

博士論文

化学工業の生産工程における弾力性に関する研究
Study of Production Process Resilience in the Chemical Industry

2017年1月

江口 元

目次

第1章 緒言	1
1.1 研究の背景	1
1.2 既往研究のレビュー	2
1.2.1 生産工程の弾力性について	2
1.2.2 生産スタッフの技能の定量的評価法	3
1.2.3 弾力性向上に有効な PSS の要素機能	4
1.3 問題設定	4
1.3.1 生産工程の弾力性管理	4
1.3.2 生産工程における弾力性の定量的評価	5
1.3.3 生産スタッフの業務における時間的余裕の創出	5
1.3.4 弾力性向上に関わる生産支援システム	6
1.3.5 本論文の構成	8
第2章 生産工程の弾力性管理の検討	13
2.1 生産工程の弾力性	14
2.2 化学工業の生産工程	15
2.3 ヒューマンファクターズにおける弾力性	15
2.3.1 生産工程において弾力性を生み出すもの	16
2.3.2 ヒューマンファクターズにおける弾力性評価のための組織的管理項目	17
2.3.3 取り組み方と注意点（ヒューマンファクターズの場合）	18
2.3.4 ヒューマンファクターズにおける弾力性についての考察	20
2.4 アーティフィシャルファクターズにおける弾力性	20
2.4.1 アーティフィシャルファクターズの生み出す弾力性	20

2.4.2	生産支援システム（PSS）における弾力性	21
2.4.3	生産支援システム（PSS）の弾力性評価のための管理項目	22
2.4.4	取り組み方と注意点（PSS の場合）	23
2.4.5	生産装置における弾力性管理	23
2.4.6	生産装置の弾力性評価のための管理項目	24
2.4.7	取り組み方と注意点（生産装置の場合）	26
2.4.8	アーティフィシャルファクターズにおける弾力性の考察	27
2.5	考察と結論	27
第 3 章	生産工程における弾力性の定量的評価	29
3.1	生産スタッフの技能・知識から生まれる弾力性	30
3.1.1	生産工程における技術と生産スタッフの技能・知識から生まれる弾力性の 関わり	30
3.1.2	生産スタッフの技能・知識から生まれる弾力性評価の例	32
3.1.3	生産スタッフの技能・知識から生まれる弾力性に関する結論	33
3.2	生産支援システム（PSS）から生まれる弾力性の定量的評価	34
3.2.1	生産スタッフから生まれる弾力性との関わり	35
3.2.2	生産支援システム（PSS）から生まれる弾力性の定量的評価の前提条件と手順	35
3.2.3	生産工程に導入した生産支援システム（PSS）における例	37
3.2.4	生産支援システム（PSS）から生まれる弾力性に関する結論	42
3.3	生産装置から生まれる弾力性	43
3.3.1	生産工程におけるリスクアセスメント	43
3.3.1.1	生産工程における作業の特定	43
3.3.1.2	単位作業に潜在する危険源の抽出	43
3.3.2	リスクアセスメントの結果を用いた弾力性評価	44
3.3.3	生産工程の総合的な弾力性	46
3.4	考察と結論	46
第 4 章	生産工程での生産スタッフの業務における時間的余裕の創出	49

4.1	業務分担最適化 (時間的余裕の創出 : 1 グループの場合)	50
4.1.1	1 グループの業務分担最適化の概要	50
4.1.2	生産スタッフの技能の定量評価	50
4.1.2.1	技能価値を維持しながら技能表出時間を最小化する方法	52
4.1.2.2	最適化計算の結果	53
4.1.3	生産スタッフの入れ替えに関する考察	54
4.1.4	1 グループにおける業務分担最適化に関する結論	54
4.2	技能価値に基づく生産工程間の人員配置最適化 (時間的余裕の創出 : 3 グループの場合)	55
4.2.1	生産工程間の人員配置最適化の概要	55
4.2.2	複数の生産工程における生産スタッフ配置の最適化	55
4.2.2.1	生産スタッフ 2 名の入れ替えにおける前提	56
4.2.2.2	入れ替えの対象者の組み合わせの決定について	56
4.2.2.3	人員配置の最適化 (第 1 段階)	57
4.2.2.4	人員配置の最適化 (第 1 段階) の手順	57
4.2.2.5	人員配置最適化 (第 1 段階) の計算結果	60
4.2.2.6	人員配置最適化 (第 2 段階 : グループごとの技能表出時間最小化) の手順と結果	60
4.2.3	生産工程間の人員配置最適化に関する結論	61
4.3	考察と結論	63
第 5 章	技能と技術および技能の定量的評価	65
5.1	技能と技術の関わり	65
5.1.1	技能と技術の相互作用	66
5.2	生産技能伝承	66
5.2.1	生産技能と生産支援システム (PSS) の関わり	67
5.2.2	生産に必要な技能の伝承と高度化	69
5.2.3	これからの技能の伝承	70
5.2.4	技能向上のための枠組み	71

5.2.4.1	企業内での生産技能伝承のための教育体制	71
5.2.5	生産技能伝承支援システムの例	72
5.2.5.1	生産技能の表現法	72
5.2.5.2	生産技能データベース	74
5.2.5.3	技能の形式化の例	76
5.2.5.4	マネジメントシステムの運用方法	78
5.2.6	考察と結論	79
5.3	生産工程における技能の定量的評価	80
5.3.1	化学プラントにおける技能の定量的評価例	80
5.3.1.1	技能価値の計算方法	81
5.3.1.2	要員の入れ替えに関する検討	85
5.4	考察と結論	86
第 6 章	弾力性向上に関わる生産支援システムの役割	89
6.1	バッチ反応機生産スケジューリングシステム	89
6.1.1	スケジューリングシステム導入の背景	89
6.1.2	問題の定式化	90
6.1.2.1	バッチ反応機における生産工程	90
6.1.2.2	変数と制約条件	91
6.1.2.3	CLP における解の探索アルゴリズム	92
6.1.2.4	目的関数	94
6.1.3	生産スケジュール作成	95
6.1.3.1	生産スケジュールを作成する際の前提	95
6.1.3.2	生産スケジュール入力データ	95
6.1.3.3	初期生産スケジュール	95
6.1.3.4	平準化生産スケジュール	96
6.1.3.5	途中変更生産スケジュール	97
6.1.3.6	考察：本システムで実現できたこと	100
6.1.3.7	今後の課題	100

6.1.4	結論	101
6.2	バッチ反応機反応温度制御システム	101
6.2.1	反応温度制御の概要	101
6.2.2	制御アルゴリズム	102
6.2.2.1	参照軌道	102
6.2.2.2	モデルからの出力を用いた操作量の算出	102
6.2.2.3	オフセットに関する考察	103
6.2.3	制御系の構成	105
6.2.4	モデルの構築	107
6.2.4.1	モデルの定式化	107
6.2.4.2	プロセスモデル	108
6.2.5	導入事例	111
6.2.5.1	対象プロセス	111
6.2.5.2	導入の目標	112
6.2.5.3	システム構成	113
6.2.6	モデル予測制御導入前と導入後の比較	114
6.2.6.1	PID 制御とモデル予測制御の比較	114
6.2.6.2	モデル予測制御導入によるメリット	115
6.2.7	結論	116
6.3	バッチプラント運転管理システム (BOMS)	118
6.3.1	BOMS の概要	118
6.3.2	導入の背景	119
6.3.3	BOMS の構成	119
6.3.4	データ処理	121
6.3.4.1	DCS 内でのデータ処理	121
6.3.4.2	バッチ収集データ	121
6.3.4.3	連続収集データ	121
6.3.4.4	DCS 以外からのデータの収集	121

6.3.4.5	データの編集と検索	122
6.3.5	BOMS 導入による省力効果	122
6.3.5.1	帳票自動作成による省力効果	122
6.3.5.2	データ検索迅速化による省力効果	123
6.3.5.3	クライアント/サーバPC 導入による省力効果	123
6.3.6	BOMS 導入後の課題	123
6.3.7	結論	125
6.4	考察と結論	125
第7章	結言	127
7.1	本研究の結論	127
7.2	残された課題	128
付録A	付録	137
A.1	ケーススタディ: 技能価値の増加による弾力性の向上	137
A.2	係数行列 BN, C^{abc}	139
A.3	定式化と最適解 (その1)	140
A.4	定式化と最適解 (その2)	144
A.5	化学工業における労働生産性評価法	146
A.5.1	はじめに	146
A.5.2	生産技能評価法	146
A.5.3	技能価値による生産人員数の補正	147
A.5.4	計算例	147
A.5.4.1	生産スタッフの技能価値が10%向上した場合	148
A.5.4.2	最も技能価値の少ない生産スタッフを減らした場合	148
A.5.5	結論	148
A.6	反応機内温度モデル、ジャケット冷却水入口温度モデルの関係式導出	150
A.7	ステップ応答テスト	152
A.8	貯槽の移液データ収集	155

A.8.1	目的	155
A.8.2	自動収集の仕組み	155
A.9	バッチデータトレース	156
A.9.1	データトレースの目的	156
A.9.2	データトレースの原理	156
A.9.3	シミュレーション	156
A.9.4	結論	158

表 目 次

1.1	発表済み論文と各章の関係	11
3.1	Degree of potential risk	45
4.1	Matrix of work hours devoted to skills B_1, B_2, B_3 [h/month]	52
4.2	Optimized work hours devoted each skill between 1 and 50	53
4.3	Optimized work hours devoted each skill between 3 and 30	53
4.4	Replacement of newcomer by deputy-supervisor of another team	54
4.5	Replacement of deputy supervisor by newcomer of another team	54
4.6	Current WHDS (B) and VOS (Q) of three groups	57
4.7	All pairs of personnel reallocation (24 pairs)	58
4.8	Optimal pairs of new comers	60
4.9	Optimal solution	62
4.10	Total WHDS and VOS for each case	63
5.1	Scale for pair wise comparison	83
5.2	Matrix for pair wise comparison (supervisor) A_1	83
5.3	Matrix for pair wise comparison(deputy supervisor) A_2	83
5.4	Matrix for pair wise comparison (newcomer) A_3	83
5.5	Eigenvalue and eigenvector of pair wise comparison matrix	84
5.6	Matrix of working hours devoted to each skill (supervisor) B_1	84
5.7	Matrix of working hours devoted to each skill (deputy supervisor) B_2	84
5.8	Matrix of working hours devoted to each skill (newcomer) B_3	84
6.1	Input data of initial plan	96

6.2	Input data of leveled plan	98
6.3	Input data of re-scheduled plan	99
A.1	Modified matrix of work hours devoted to each skill after the implementation of a function of PSS (supervisor) B'_1	138
A.2	Modified matrix of work hours devoted to each skill after the implementation of a function of PSS (deputy supervisor) B'_2	139
A.3	Matrix of normalized work hours devoted to skills (supervisor) BN_1	139
A.4	Matrix of normalized work hours devoted to skills (deputy supervisor) BN_2 . . .	139
A.5	Matrix of normalized work hours devoted to skills (newcomer) BN_3	140
A.6	Matrix of replaceable work hours by each function (supervisor) C_1^{abc}, C_1^{total}	140
A.7	Matrix of replaceable work hours by each function (deputy supervisor) C_2^{abc}, C_2^{total}	140
A.8	Matrix of replaceable work hours by each function (newcomer) C_3^{abc}, C_3^{total}	141
A.9	Input data for simulation	157
A.10	Batch mixture ratio after in/out operation	157

目 次

1.1	Resilience matrix [19] (Two arrows are added on the original figure in the reference [19] to explain the current research status)	3
1.2	Resilience Matrix for Key Concepts	4
2.1	Disruption concerned with a production process	14
2.2	Relationship between the three elements of the production process and information flow	16
2.3	Resilience matrix for the human factors	17
2.4	Information flow in the company	19
2.5	Managerial components of PSS	21
2.6	Managerial subjects and managerial objects (Units)	24
2.7	Managerial components of production units	25
3.1	Source of resilience and disruptive signals	31
3.2	Replacement of daily routine by PSS	36
3.3	Tree diagram from Factory to Work	44
3.4	Structure of strainer	45
5.1	Interactive reciprocal movement	65
5.2	Cycle of skills and technique	67
5.3	Sharing of skills with Sills DB	68
5.4	Organization of operational work	76
6.1	Packing duration [EST,DD] and margin	90
6.2	Search tree of simplified problem	93
6.3	Output data of initial plan	97

6.4	Output data of leveled plan	98
6.5	Output data of re-scheduled plan	99
6.6	Block diagram of Model Predictive Controller	103
6.7	Behavior of PV, sm and MV after step input	104
6.8	Behavior of PV, sm and MV after step input at steady state	104
6.9	Cross over range and split range [73]	105
6.10	Cascade control block diagram	106
6.11	Model 1 block diagram	109
6.12	Model 2 block diagram	110
6.13	Dynamics of the heat transfer between jacket and reactan	110
6.14	Dynamics of the heat transfer between jacket and reactan	111
6.15	Model 3 block diagram	111
6.16	Model block flow of Slave Control (Model 4)	112
6.17	Process flow [73]	113
6.18	System configuration [75]	114
6.19	Result of PID control [73]	115
6.20	Result of Model Predictive Control [73]	116
6.21	Hardware configuration [77]	120
6.22	Software configuration [77]	120
6.23	Relation between batch data and continuous data	122
A.1	Step response test (Slave control)	154
A.2	Step response test (Master control)	154
A.3	Movement of batch/lot between reactor/tank	158
A.4	Batch mixture ratio in Tank 2	158

第1章 緒言

1.1 研究の背景

製造業における生産方式は大きく2つに分けることができる [1]。ここで一方を素材生産型（化学工業の多くはこの範疇に含まれる）、他方を組み立て加工型（化学工業においても、機能性化学品と呼ばれる製品はこの型に含まれることがある）と呼ぶ。素材生産型では置に原料、副原料などを投入すると、ある時間経過すると求める製品に転化する。原料から製品への転化は一度始まると止まることなく続き、その過程を目で見ることはできない（バッチプラントの場合は決まった時間で転化は終了する）。さらに製品の生産量や品質は製造装置の仕様によってほぼ決まり、大きな変更はできないのが一般的である。したがって、製造装置を稼働させるにあたってはかなりの部分が自動化可能であり、生産工程で人の果たす役割は装置を正しく稼働させ製品の規格を守るための“監視”とそれにともなう“操作”を行なうことであり、普段は製品の生産量や品質を左右する攪乱事象の発生はそれほど多くない。一方で組み立て加工型は、生産装置を用いて“人”が積極的に介入して製品を作り上げるという生産方式であり、素材生産型に比べて生産工程における人の役割は大きい。すなわち原材料を工程に投入してから、いくつかの生産装置を経て製品が完成するまでに人の介入する程度が素材生産型に比べて大きく、しかもその過程を目で見ることができる。したがって、人の技能は製品の品質を大きく左右し高い熟練度が求められる。

素材生産型は装置産業と呼ばれ、組み立て加工型に比べると生産工程において人の果たす役割はそれほど大きくないとみられており、これまで生産支援システム（Production Support System; 以下 PSS と称す）の導入による運転・操作の自動化によって省力化の実現を目指してきた。化学プロセスは一般に外部から雑音信号（ノイズ）が加わってもプロセス自身によってフィルタリングされ、その影響が抑制されるという特徴を持つ。その反面外部からの操作の影響はゆるやかに時間をかけてあらわれる。しかし異常反応などのプロセスの暴走状態が発生すると運転の自動化のための機構からの操作では抑止できないことが多いにもかかわらず、制御技術によって安定な状態にあるプロセスを限界運転に近づけ、省資源・省エネルギー効果を得るという考えが定着した。そのため、生産工程において自動化の対象となる“監視”、“操作”以外の、例えば異常時や緊急時の的確な対応や予測、推定をともなう業務など自動化の困難な高い熟練度や判断力を求められる技能は人に委ねられるという傾向があった。

しかし、化学プロセスにおいては高温・高圧のもとで、場合によっては引火性や爆発性のある物質を用いて単位操作を行なうので、異常状態が発生するときわめて不安定になり危険な状態に陥る。機器や設備が不調や故障の場合、危険を回避するために事前に想定できる異常・故障には自動あるいは手動で対応するが、それによってすべての危険状態が回避できるわけではなく、そもそも想定がすべての場合を網羅しているわけではない。化学工業においては、省力化を追求すると自動化が極限まで進み生産コストも下がると考えがちであり、それに固執すると人の持つ技能

の空洞化に行き着くという危険性がある。平常時は人が把握しきれない高度で複雑な運転になり、自動化が収益性向上にばかり注目して進展したため異常時の対応は対象外となった。そのため異常発生時にはすべて人に投げ出されるという状態になってしまうのが問題である。さらに、自然災害などの予期できないトラブルへの対応も求められており、これまでの自動化による生産性向上を目指す取り組みの評価の視点を変える必要が出ている。

また化学工業においては長年にわたって、プラントの状況を把握するための状態データ（温度、圧力、流量、組成など）をリアルタイムで収集し、得たデータを操業に活用するためにPSSが導入され、その機能も進歩してきたが、達成目標は省資源、省エネルギー、省力化であった。しかし、経済環境が変動し、見込んだ収益が確保できない場合、PSSに対する投資が適正であったかどうかの判断ができなかった。そのため、生産工程に欠かせないものであると評価されているPSSの機能の進歩も頭打ちになってしまう恐れが出てきた。

さらに生産工程の内外で、生産活動に影響を及ぼす攪乱信号（様々な大きさのものがあ、り、予期できるもの、予期できないもの、既に発生してその影響がわかっているもの、また未発生で影響が不明のものなど多種多様である）が発生し、安全を確保し生産性を維持し向上させるためには適切に抑制することが必要である。生産工程にはもともと攪乱信号を抑制する能力が備わっており弾力性（レジリエンス）と呼ぶ。弾力性の生まれるのは生産工程を構成する3つの要素（生産スタッフ、PSS、生産装置）からであり、そのうちで、最も重要なのは生産スタッフの技能・知識水準である（第5章参照）。したがって、PSSの導入目標も明らかになる（第6章参照）。弾力性と柔軟性の違いについては、前者は外部からコントロールできることであると筆者は考えている。

筆者は長年にわたって、化学会社において生産工程の省力化を目指す業務に従事したが、その中心となったのはPSS導入であった。導入したPSSについては省力化に関する有効性はあったが、その水平展開（他の生産工程への導入）は非常に困難であった。それは省力化が生産性向上にどのようなつながるのかを明確に示すことができなかったからである。本研究ではその答えを見つけることを目指す。

1.2 既往研究のレビュー

1.2.1 生産工程の弾力性について

この節では生産工程の弾力性に関する既往研究について述べる。生産工程の弾力性を組織の観点からとらえたモデルが提案されている [19]（図 1.1 参照）。このモデルは弾力性行列と呼ばれ、 3×3 の行列で縦軸に攪乱信号の影響の大きさ、横軸に攪乱信号への組織における管理主体（応答者）を規定している。この行列の要素は攪乱信号に対して各管理主体のとるべき対応（応答；管理項目）をあらわしており、生産工程の安全性を高めるための方策である。

これまでに発表された化学工業の生産工程にかかわる弾力性を分類した研究内容は、図 1.2 のように分類することができる [2]。（図中の番号と文献の対応は次のとおりである。1 は [16], 2 は [17], 3 は [18], 4 は [19], 5 は [20], 6 は [21], 7 は [22], 8 は [23], 9 は [24], 10 は [25], 11 は [26], 12 は [27], 13 は [28] に対応している）その結果によると、社会科学的なアプローチによる Step3,4,6 に関する

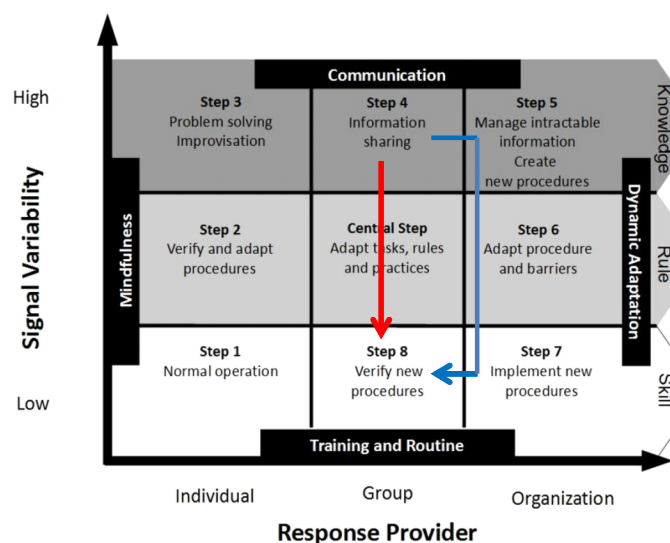


図 1.1: Resilience matrix [19] (Two arrows are added on the original figure in the reference [19] to explain the current research status)

研究があり、その他の研究は Step1,7 に関するものである。しかし、Step5,8,9 に関する研究は存在しなかった。Bracco らは次のように述べている [19]。

「グループは Step4 でとるべき方策を明確にすべきである。攪乱信号に関してグループの業務で行動が規定されているならば、関連した作業、手順、やり方などを新たな攪乱信号に適用することができ、新たな日々の作業手順を実行に移すことができる (Step8)。そのことは扱いやすい攪乱信号を人の技能に基づいて管理することにつながる」

このことは Step4、CentralStep、Step8 に関して十分な研究が行なわれれば、攪乱信号への確実な対応を行なうための対応手段（管理項目）が新たに登場する可能性があることを示している。したがって、生産工程における弾力性の研究においては、グループの果たす役割の研究が重要である。

1.2.2 生産スタッフの技能の定量的評価法

生産スタッフに関わる生産性評価にあたっては、これまで生産高/人件費という指標を用いることが多かったが、この指標では生産性向上のためには生産高を増やすことと人件費を減らすことの2つの方法がとられた。しかし生産高は企業外部の要件である需要によって決まり、企業の思惑どおりに増やすことはできない。また人件費は人員数を保ったままで減らすことは難しく、企業は人員削減に頼ることが多かった。しかし、人員削減によって工場における生産スタッフの技能低下をもたらし、逆に生産性が下がるのではないかという疑問がたねに存在した。そこで、生産スタッフの技能を定量的に評価できれば、技能向上による生産性向上も可能ではないかと考えた。その結果、人員削減によって生産性向上をはかっても、技能の低下でその効果が打ち消されることがわかった [10]。すなわち人を減らすと人件費は削減でき、残った人員でカバーするというのが従来の考え方であるが、個人の発揮できる技能の量には限界があり全体の技能量は減って

Signal Variability	Resilience concept					Resilience concept					Resilience concept					
	paper number	analysis method	analysis method	analysis method	analysis method	paper number	analysis method	analysis method	analysis method	analysis method	paper number	analysis method	analysis method	analysis method		
	Resilience concept	interview	questionnaire	case study	observation	Resilience concept	interview	questionnaire	case study	observation	Resilience concept	interview	questionnaire	case study	observation	
High	Mindfulness	6.9	●	●	●	Mindfulness					Organizational learning					Knowledge
	Awareness	7.8, 1.3	●	●	●	Awareness					Reporting culture					
	Preparedness	7.8	●	●	●	Preparedness					Learning culture					
	Response					Response					no motivation for self-reporting					
	Anticipation					Anticipation	5.6, 1.2	●		●	Flexibility					
	Monitor					Monitor					Controllability					
	Communication					Communication	10, 11, 1.3			●						
	others	1	●			others										
	Mindfulness					Mindfulness					Organizational learning	6.1	●	●	●	
	Awareness					Awareness					Reporting culture	7.8	●	●	●	
Medium	Preparedness					Preparedness					Learning culture	7	●	●		Rule
	Response	5.6, 1.2	●		●	Response					no motivation for self-reporting	1	●		●	
	Anticipation					Anticipation					Flexibility					
	Monitor					Monitor					Controllability					
	Communication					Communication										
	others					others										
	Mindfulness					Mindfulness					Organizational learning					
	Awareness					Awareness					Reporting culture					
	Preparedness					Preparedness					Learning culture					
	Response					Response					no motivation for self-reporting					
Low	Anticipation					Anticipation					Flexibility	8.9		●	●	Skill
	Monitor	5.9, 1.2, 1.3			●	Monitor					Controllability	9			●	
	Communication					Communication										
	others					others										
	Mindfulness					Mindfulness					Organizational learning					
	Awareness					Awareness					Reporting culture					
	Preparedness					Preparedness					Learning culture					
	Response					Response					no motivation for self-reporting					
	Anticipation					Anticipation					Flexibility					
	Monitor					Monitor					Controllability					
Communication					Communication											
others					others											

図 1.2: Resilience Matrix for Key Concepts

しまうので生産性向上には逆行するということを示した。

1.2.3 弾力性向上に有効な PSS の要素機能

筆者は化学工場の生産工程に導入された PSS の要素機能を多数開発したが、その中で省力効果の大きいものは生産スタッフに技能・知識水準の向上に必要な時間的余裕を与える。PSS の要素機能のうちで特に省力化効果の大きかったものは、

- バッチ反応機生産スケジューリングシステム [12]
- バッチ反応機反応温度制御システム [13]
- バッチプラント運転管理システム [14]

であり、得られた時間的な余裕を用いて生産スタッフの技能・知識水準の向上をはかることが可能である。

1.3 問題設定

1.3.1 生産工程の弾力性管理

これまでに発表された数多くの弾力性（レジリエンス）に関する研究においては、弾力性を対象となる生産工程の安全問題に関わる性質としている。すなわち、ある生産工程の内外で発生す

る生産活動を攪乱する信号を、事故・トラブル、自然災害などとし、主として安全面からとらえている。しかし本研究では事故・トラブル、災害に加えて、生産活動において必然的に生起する事象、例えば生産設備のスタートアップやシャットダウン操作、生産する製品の銘柄変更、あるいは顧客からの急な発注なども攪乱信号に含める。さらに、日常的に行なわれる生産設備の運転条件の設定変更なども生産工程に対する攪乱信号として扱う。ここでは弾力性を、生産工程の内外で発生し生産を攪乱する信号を抑制する、生産工程に備わった固有の能力であるとする。第2章において生産工程における弾力性の管理について述べる。弾力性は生産工程を構成する要素である、1) 生産スタッフ、2) PSS、3) 生産装置がそれぞれ備えているものであり、生産工程の内外で発生し、生産活動に影響を与える様々な攪乱信号を抑制する能力である。弾力性をヒューマンファクターズ [2] とアーティフィシアルファクターズ [3] に分けて、弾力性の管理主体（個人、グループ、企業）、管理対象（PSS: データ収集・警報（PSSの基本的な機能であり、PSSはすべてこれらの機能を備えていなければならない）、オペレーション機能、メモリ機能、コミュニケーション機能、生産装置: 巡回点検（事後対応）、トラブル発生（事後対応）、補修・改造（事前対応）、リスクアセスメント（事前対応））について明らかにし、管理すべき項目について述べる（PSSの3つの機能、オペレーション機能、メモリ機能、コミュニケーション機能は生産スタッフの持つ3つの技能（5.1節参照）を技術化してPSSに導入した場合の機能を指す）。

1.3.2 生産工程における弾力性の定量的評価

化学工業の生産性を左右する要素の一つは生産工程の弾力性であり、生産工程を構成する要素である、1) 生産スタッフ、2) PSS、3) 生産装置がそれぞれ備えている。弾力性は生産工程の内外で発生し、生産活動に影響を与える様々な攪乱信号を抑制する能力であるが、これまでその大きさを定量的に評価することは行なわれていない。既存の研究では弾力性を様々な視点で定性的に分析しているが、第3章で化学工場の生産工程を構成する3つの要素についてそれぞれの生み出す弾力性を定量的に評価することを試みる。生産スタッフによって生み出される弾力性は、一人ひとりが生産活動において発揮している技能（技能価値と称し、業務従事時間と技能表出時間、職位別技能重視度、技能・知識水準から求める。詳細は第5章参照）をもとに定量的に評価する。技能は一人ひとりが職位にふさわしい業務に従事しているか、およびその能力が高いかによって決まる [4]。また、PSSから生まれる弾力性はPSSが生産スタッフの業務を代替する機能を持つことから、生産スタッフの技能がPSSに技術として導入されると生産スタッフから生まれた弾力性がPSSに継承されるとして求める [5]。さらに、生産装置の弾力性は生産スタッフから生み出される弾力性（トラブルや故障の発見と適切な対応および未然防止に関する指標）およびリスクアセスメントの結果（潜在するリスクの大きさの指標）を合わせたものから求める。

1.3.3 生産スタッフの業務における時間的余裕の創出

第4章においては、生産スタッフの業務における余裕創出の手法について、あるグループにおける生産スタッフの業務分担 [6]、あるいは複数のグループ間での人員配置の最適化について述べる [7]。生産スタッフに求められる技能を最小の業務従事時間で実現できれば、生まれた余裕時間を利用した訓練・教育によって生産スタッフの技能・知識水準を高めて弾力性を向上させること

ができる。生産工程における弾力性の向上には、生産スタッフの技能・知識水準が最も大きく寄与する。したがって、生産工程の操業に必要な技能価値（5.2節参照）を最短時間で実現するための工夫が必要になる。生産工程における生産スタッフの技能価値は、業務従事時間の実測値に基づく技能表出時間（業務従事時間を3つに体系化した技能ごとに分けたものを指す）、職位別技能重視度および技能・知識水準からなり、生産スタッフ一人ひとりがその職位にふさわしい技能を発揮することによって必要な技能価値を実現するための業務従事時間を短縮できる。ここでは業務従事時間の上限値を設けており、さらにメンバー間に差が出た場合には、その余裕を他の業務や教育・訓練にあてて有効に使うことを考える。まず、ある生産工程の操業に関わる3名の生産スタッフからなるグループについて、業務分担を最適化することによって技能価値を保ちながら業務従事時間を最短化することを試みる。このとき現状の業務分担を基準として生産スタッフそれぞれの業務をその職位にふさわしいものにするによって、短い業務従事時間で必要な技能価値を実現するように業務分担を見直す。例えば、リーダーの業務のうちのオペレーション技能は新人に移しコミュニケーション技能に関わる業務を増やすことによって、業務従事時間の短縮をはかることができる。

さらに、ある生産工程の操業には複数のグループが携わっており（例えば24時間稼働するプラントでは、一般に3つ以上のグループが操業に関わっている）、グループ間で人員配置の変更が行なわれる。その際に注意すべき点は、生産スタッフ一人ひとりが自分の能力を向上させる必要があるように人員配置を行なうということである。すなわち人員配置の変更において、生産スタッフがある時点で実際に実現している技能価値を下げないようにすること、グループ全体の技能価値も下げないことなどを制約条件として全体の業務従事時間が最小になるように複数のグループ間で人員配置を変更して人員配置を最適化できる。

この章では上記の2つの場合について、生産スタッフの業務従事時間の実測値をもとにした業務従事時間（技能表出時間）の短縮について検証する。

生産工程の弾力性（生産工程の内外で発生する、生産活動に影響を与える攪乱信号を抑制する能力）の大きさは、生産スタッフの技能・知識水準に依存する。すなわち生産スタッフの攪乱信号への対応力を高めるためには教育や訓練を実施することが必要である。そのための時間的な余裕を生み出すために、生産スタッフの業務分担やグループ間の人員配置を最適化して業務従事時間を短縮することが有効である。

1.3.4 弾力性向上に関わる生産支援システム

第6章では実際に導入されて生産スタッフの省力化に有効であったPSSの要素機能について述べる [12], [13], [14]。生産工程の弾力性にはアーティフィシャルファクターズとしてPSSが大きく寄与する。PSSを構成する要素機能は生産に従事する生産スタッフの技能を形式知化し、技術化して人の業務を代替させることを目的として開発される。その結果生産スタッフの業務には時間的な余裕が生まれ、それを利用して訓練・教育を行ない技能・知識水準の向上で生産工程の弾力性も向上するという効果が期待できる。さらに、PSSは生産工程の内外で発生し生産活動に影響を与える様々な攪乱信号のうち、大きさが中程度以下で既に発生したことがあるもので生産工程への影響の大きさが分かっている場合に抑制効果があり、大きい攪乱信号や未発生 of 攪乱信号への対応には生産スタッフがあたらざるを得ないというのが現状である。したがってPSSの導入は

すべての攪乱信号の抑制に寄与するということができる。以下にこれまで実際の生産工程に導入して、生産スタッフの省力化に有効であった3つの要素機能の概要について述べる。

1. バッチ反応機生産スケジューリングシステム [12]

バッチプラントにおいては、日々変化する需要、すなわち顧客からの注文に応じてどの製品をいつどれだけ生産するかを決めるにあたって工夫を要する。それは次のようなバッチプラント特有の性質による。

- 大きさの異なる複数の反応機で生産する場合に、同じ生産量でも使用する反応機によってバッチ数が異なる。
- 同規模の連続プラントに比べると一定期間に生産する銘柄数が多い。
- 銘柄によってバッチサイクル（バッチの開始から完了までに要する時間）が異なる。
- プラントにおいて銘柄切り換えが容易に行なえるので、再スケジューリングが多い。

これらのバッチプラントに特有な条件を考慮した生産スケジューリングが必要であるが、熟練者の手作業でスケジュールを作成するのが一般的であった。そこでサイズの異なる複数のバッチ反応機からなるプラントにおいて、組合せ最適化問題を解くのに向く制約論理プログラミングを用いて、全体の総生産バッチ数が最小である月間の生産スケジュールを求めるシステムを開発した。総生産バッチ数最小とする理由は生産に関わるユーティリティコストを削減することと生産量に応じて使用する系列数（反応機台数）を極力減らすためである。このシステムでは制約条件をすべて明示しているわけではなく目的関数も簡略化しているが、実行時に与える入力データの作り方で融通性を高めるような工夫をしている。さらに実用的な時間内に最適解が求まらないことも多い。しかし生産工程で実行可能な生産スケジュールがスケジューリングに関する未熟練者でも短時間で作成できるようになった。このシステムは熟練した担当者の持つ技能とプロセスシステム工学の手法を結びつけて技術化したものであり、需要に応じるために再スケジューリングを繰り返していた生産スタッフの業務負担を軽減できた。さらに担当者以外でも販売部門からの情報をもとに生産スケジュールをトライアルアンドエラーでたてることができるようになったのがこのシステムの成果である。

2. バッチ反応機反応温度制御システム [13]

バッチ反応機においてはバッチ生産の開始から終了までのサイクルに非定常操作が多く制御対象の動特性も変化する。したがって反応機内温度の制御では安定した制御性が得られないことがある。そこで2台のバッチ反応機からなる試験設備において、反応機の2つの制御系（ジャケット冷却水入口温度制御：スレーブ・コントロール、反応機内温度制御：マスター・コントロール）にモデル予測制御を導入した。2つの制御系はカスケード接続され、その結果導入以前のPID制御系では反応中の反応機内温度の設定値からの偏差が $\pm 6^{\circ}\text{C}$ 以上あったものが、 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 程度に収まるようになり以前に比べて1/3になった。PID制御を使用していたときには、反応温度の偏差を減らすための頻繁な原料装入量の変更や反応温度の微調整のための頻繁な反応温度設定値変更操作を行っていたがすべて不要になった。またスレーブ・コントロールの操作用出力をスプリットレンジ方式に変更して、スチームおよび冷却水というユーティリティの使用量を削減した。さらにコントローラのチューニングパラメータが閉ループ応答時間一つだけになったため制御性の調整がきわめて簡単になった。既存のDCS

はそのまま残しておりモデル予測制御系に異常が発生した場合にはDCSでバックアップできる。また生産スタッフによる操作はすべてこれまでと同じ操作卓から行なうため新たな操作を覚える必要はない。このシステムは生産スタッフ設定値変更操作の回数を著しく減少させ業務負荷を軽減し、従来の操作手順を変更することなく実現できた。

3. バッチプラント運転管理システム [14]

化学プラントにおいては運転実績を把握するために24時間休まずにリアルタイムで各種センサを介してプラントの状況を示す状態量を測定している。またバッチプラントの場合、同規模の連続プラントに比べて管理すべき運転実績データの数が多いのでその処理には効率のよさが求められる。さらにデータの時間区切りが2種類あり一つはバッチ区切り（バッチの開始と終了の間でデータの平均、積算などの加工をするもの）、もう一つは定時区切り（毎日、毎時決まった時刻にデータの平均、積算などの加工をするもの）である。これらの異なる構造を持つデータがばらばらに保存されていると、ある期間の生産性を評価する場合や生産状況をトレースする場合に必要なデータの検索に手間取ることが多い。これまでバッチ区切りデータと定時区切りデータが別々の帳票で保存されていたため、トラブル解析や生産性評価のためのデータ作成ではそれらの帳票をつき合わせながら他の帳票に手書きで転記するなど大きな労力を必要としていた。また複数の帳票を統合したデータを求める際にはすべての帳票を参照しながら手計算で行ない、この作業も多大な労力を要していた。そこでバッチ区切りデータと時間区切りデータの整合性がとれるようにそれぞれインデックスをつけてデータベースに保存し、表計算ソフトウェアで容易に編集したり統合したりできる仕組みを作った。このシステムの特徴は加工周期の異なる2種類のデータについて整合性を持たせて検索編集できることや、システムがネットワーク構造になっているのですべてのデータにネットワーク上のどこからでも自由にアクセスできるということである。したがって他部門からのアクセスも可能である。このシステムは生産スタッフがデータ管理に要する業務負荷を軽減し、生産に関わる人々に有用な生産情報をリアルタイムで提供するという2つの機能を持ち、遠隔地にいる関係者がデータを共有してそれをもとに最適な生産を実現することを可能にするものである。

1.3.5 本論文の構成

第1章は緒言であり、第2章以下は次のような考察によって構成される。また各章の内容を発表した時期については、第2章から第4章は研究期間である2014年から2016年までである。また第5章は2013年以前に発表したものであるが、弾力性評価の基本となるものであり不可欠のもので加えた。さらに第6章は2006年以前の発表であるが、筆者が実際に生産工程に導入して省力化効果が得られたシステムである。生産工程の弾力性向上のためにはPSSの省力化効果によって時間的余裕を生み出し、それを用いた教育・訓練による生産スタッフの技能・知識水準の向上が不可欠なのでここに例として加えた。なお、第3章から第5章までと第6章の第2節で検討の対象とした化学プラントは、樹脂の原料の試作品を生産するもので容量が200lと100lの2台のバッチ反応機を備えている。プラントの稼働は平日の昼間のみで、生産活動に携わるのはリーダ、サブリーダ、新人の3名である。この3名の業務を筆者が観察したうえで、1か月間の主要な業務への従事時間を実測した。それをもとに筆者が技能表出時間を推定した（表4.1）。また、PSSの

機能を導入した場合の代替可能技能表出時間も筆者が推定したものである（表 A.6,A.7,A.8）。その他は筆者が想定したものである。この研究の手法を実際に生産工程に適用する場合には、生産スタッフ本人についての業務従事時間の実測値、推定値を用いる必要がある。

（１）生産工程の弾力性管理に関する考察（第２章）

本博士論文では生産工程の弾力性について研究するにあたって、生産工程の内外で発生する攪乱信号（生産活動の中で設備の起動や停止、生産銘柄の変更のように必然的に発生するものと災害や事故のように予期できないものがある）を定義し、それを抑制する弾力性の生まれるもとをヒューマンファクターズ（生産スタッフ）とアーティフィシャルファクターズ（PSS、生産装置）に分けて、それぞれに関する管理主体（個人、グループ、企業）、管理対象、管理項目を攪乱信号の大きさ（大、中、小）ごとに考察した。この章で述べる手法はヒューマンファクターズについては企業全体について適用することができる。またアーティフィシャルファクターズについては生産工程ごとに適用できる。

（２）弾力性の定量的評価に関する考察（第３章）

これまで弾力性の評価は定性的なものにとどまっていたが、生産工程を構成する３つの要素（生産スタッフ、PSS、生産装置）についてそれぞれの生み出す弾力性を定量的に評価する方法について考察した。生産スタッフから生まれる弾力性は生産スタッフが生産活動において発揮している技能、業務の職位に対するふさわしさ、技能・知識水準から求める。PSSから生まれる弾力性は生産スタッフの業務をPSSの要素機能で代替させた場合に、生産スタッフの技能・知識水準が継承されるものとして継承された技能・知識水準として求める。したがって、生産スタッフの技能をすべて技術化して代替させれば、生産スタッフの技能・知識水準がそのまますべて継承される。また生産装置から生まれる弾力性は、生産スタッフから生まれる弾力性と生産装置に関するリスクアセスメントの結果とを合わせたものから求める。すなわちリスクアセスメントの結果をもとに潜在するリスクを低減させることによって、また生産スタッフの技能・知識水準を高めることによって生産装置の弾力性は向上するという評価指標を用いる。この章の内容の生産スタッフから生まれる弾力性は生産工程において業務に従事する生産スタッフのグループ（班と呼ばれることが多い）に適用できる。複数のグループを対象にしてもよい。また、PSSから生まれる弾力性は生産工程に導入された複数の機能を持つPSSに適用できる。さらに生産装置から生まれる弾力性は生産装置ごとに適用できる。また複数の生産装置を合体したものにも適用できる。

（３）弾力性を向上させるためのグループ内での業務分担および複数のグループ間での人員配置の最適化に関する考察（第４章）

ある生産工程において、業務に携わる生産スタッフの業務従事時間を短縮できれば、そこに生まれた余裕時間を技能・知識水準向上のための教育・訓練にあてることができる。そこで、実測した業務従事時間からその生産工程で業務に必要とされる技能量を求め、それぞれの業務の分担を生産スタッフの職位に合わせて配分し直す。生産スタッフ一人ひとりが職位にふさわしい業務を担当することによって、業務に必要な技能量を減らすことなく業務従事時間の合計を短くできることが分かった。この手法は生産工程において生産活動に従事する複数の生産スタッフからなるグループ（班）に適用することができる。また同じようにして複数のグループで人員を再配置すると、それぞれの生産工程で必要な技能量を減らさずに業務従事時間を短縮できることも分かった。この手法は生産工程における複数のグループ（一般に24時間操業の生産工程では複数のグループによる交替勤務が行われている。この場合業務はほぼ同じである）に適用できる。

(4) 技能と技術および技能の定量的評価に関する考察 (第5章)

技能は人の身につけた作業能力で人に内在するものである。したがってそのまま他の人に伝えることはできず一旦形式化してから伝える。一方、技術は人の技能を形式化して明示化したものである。技能と技術は相互作用しながらそれぞれ向上し、技能は次第に技術化されていく。さらに人の技能を定量的に評価できれば、どの技能を技術化するかあるいはどうすれば生産スタッフの業務分担や人員配置が効率的なものにできるかの指針が得られる。また、人員削減は技能の低下をもたらす労働生産性を低下させることも示すことができる。そのような視点から生産スタッフの技能について定量的に評価し考察した。前半の技能と技術に関する部分は企業全体の生産部門に適用できる。また、後半の技能の定量的評価に関する部分は生産スタッフ一人ひとりに適用できる。

(5) 生産工程の弾力性向上に関わる生産支援システムの役割に関する考察 (第6章)

化学工業においては生産工程に生産性向上のためのPSSが導入されている。導入に必要な費用は1)省資源、2)省エネルギー、3)省力化によって生み出されるとされたが、前の2つは経済環境に左右されて所期の目標の達成が難しくどうしても省力化による人員削減に頼りがちであった。しかし人員削減は技能の低下につながり事故・トラブルを誘発する。したがって事故やトラブルなどの生産活動に対する攪乱信号を抑制する能力である弾力性を向上させることが必要であり、教育・訓練によって生産スタッフの技能・知識水準を高めなければならない。すなわちPSSの省力化に対する寄与を用いて業務に時間的な余裕を生み出すことが求められる。そこで、これまでに実際のプラントに導入して省力化に実績のあった3つの機能、1) バッチ反応機生産スケジューリングシステム、2) バッチ反応機反応温度制御システム、3) バッチプラント運転管理システムの省力化効果について考察した。これらのうち1)はある樹脂製品の生産工程の例であり、2)はやはり樹脂製品の原料を生産する中試験設備の例である。3)は樹脂製品の工場全体を対象としている。なお、発表済み論文と各章の関係を表1.1に示す。

表 1.1: 発表済み論文と各章の関係

公表（予定）年月日	公表内容 (全文・要約)	出版物の種類及び名称
2015 年 6 月	第 2 章第 1 節に掲載	H. Eguchi, T. Aoyama, K. Seki, D. O'Donovan, I. Koshijima; "Organizational Structure on the Resilience of Production Processes Based on Human Factors in the Chemical Industry," Journal of Engineering Science and Technology Special Issue on SOMChE 2014 & RSCE 2014 Conference, January (2015) pp.30-40
2015 年 7 月	第 2 章第 2 節に掲載	H. Eguchi, T. Aoyama, K. Seki, D. O'Donovan, I.Koshijima; "Organizational Structure on the Resilience of Production Processes Based on Artificial Factors in the Chemical Industry," Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers Vol.3, No.3, pp.141-147, (2015.7.25)
2016 年 1 月	第 3 章第 1 節に掲載	H. Eguchi, T. Aoyama, K. Seki, D. O'Donovan, I. Koshijima; "A Metric for Quantitative Estimation of Production Process Resilience based on the Skills and Knowledge of Production Plant Personnel in the Chemical Industry," Journal of Chemical Engineering of Japan Vol.49, No.1, pp.35-41, (2016)
2016 年 7 月	第 3 章第 2 節に掲載	H. Eguchi, T. Aoyama, K. Seki, I. Koshijima; "A Metric for Quantitative Estimation of Production Process Resilience generated by Production Support System in the Chemical industry," Journal of Chemical Engineering of Japan Vol.49, No.7, pp.673-679, (2016)
2016 年 12 月	第 3 章第 3 節に一部掲載	D.Nyambayar, I.Koshijima, H. Eguchi; "A Metric for Quantitative Estimation of Production Unit Based on OSHMS," Proceedings of the 29th Symposium of Malaysian Chemical Engineers (SOMChE) 2016 Miri, Sarawak, Malaysia, December
2014 年 12 月	第 4 章第 1 節に掲載	H. Eguchi, T. Aoyama, K. Seki, I. Koshijima; "Optimal Job Routine Assignment for the Improvement of Operational Resilience Based on Skills and Knowledge of Production Staff in the Chemical industry," Proceedings of SCIS & ISIS 2014 (158) (December 3-6, 2014 at Kitakyushu International Conference Center
2015 年 7 月	第 4 章第 2 節に掲載	Hajime Eguchi, Tomomi Aoyama, Kohei Seki, Ichiro Koshijima; "Optimal Personnel Reallocation Based on the Skills and Knowledge in the Chemical Industry," Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers Vol.3, No.3, pp.126-133, (2015.7.25)
2010 年 5 月	第 5 章に一部掲載	Hajime Eguchi and Donal O'Donovan; "Advancement and Transfer of Skills by Reciprocal Interaction of Human Skills and Techniques via a Production Support System in the Chemical," Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.43, No.5, pp. 435-442, 2010
2011 年 1 月	第 5 章に一部掲載	Hajime Eguchi and Donal O'Donovan; "Effect of a Change in Personnel on the Quantitative Evaluation of Human Skills in the Chemical Industry," Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.44, No.1, pp.32-36, 2011
2012 年 3 月	付録に一部掲載	Hajime Eguchi and Donal O'Donovan; "Evaluation of labor productivity using a corrected production staff number approach in the chemical industry," Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.45, No.3, pp.206-209, 2012

第2章 生産工程の弾力性管理の検討

この章では生産工程の弾力性について、どのように管理すべきかを弾力性行列の考え方をを用いて検討する。ここでは、管理主体（個人、グループ、企業）、管理対象（巡回点検、トラブル発生、装置の改造・補修、リスクアセスメント、生産支援システムの機能）、攪乱信号の大きさを分類した管理項目を明らかにしている。

2.1 生産工程の弾力性

化学工場では生産工程に対する様々な大きさの攪乱作用（攪乱信号）が発生し、生産工程はそれを抑制する働きとしての弾力性を持つ [16], [17], [18], [19]。生産工程内外で発生し操業に影響を与える攪乱信号（図 2.1 参照）は大きさによる分類が可能であり、その大きさに応じた抑制力（弾力性）を発揮するためには個人、グループ、企業を管理主体とする組織的な対応（応答）が必要である [19]。

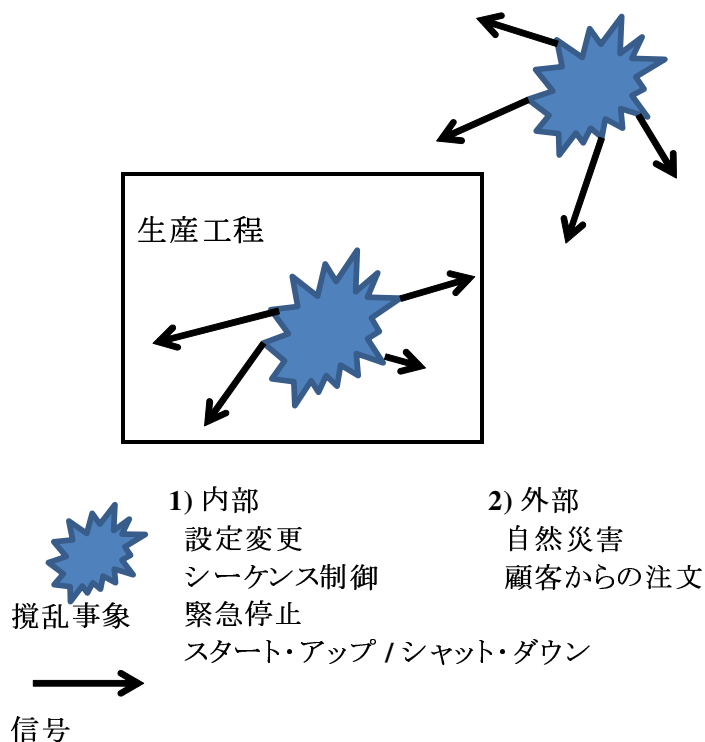


図 2.1: Disruption concerned with a production process

生産工程への攪乱信号には生産活動に対する影響の小さいものから大きいものまで様々な種類のものが存在し、しかも頻繁に発生している。しかし生産工程には攪乱信号が生産に与える影響を抑制する能力がもともと備わっているため、生産活動の管理主体である生産スタッフ、生産グループおよび企業による生産工程の管理が行き届いていれば生産活動は支障なく継続できる。ところが時として生産工程の持つ抑制能力を越えた攪乱信号が生起することがあり、その影響で生産活動が阻害され生産性が低下する。攪乱信号の種類は多く、その一つひとつを抑制するためにはつねに生産工程の弾力性の状況を把握することが必要である。

またこれまでに発表された研究においては弾力性に関する議論が定性的なものに終始しており、定量的な評価は行なわれていない。そこで本章では化学工業における生産工程の構成要素の中で、弾力性を生み出すものとなるものを明確にし、弾力性の変化を定量的にあらわす方法を示す。一方、生産工程を構成する要素として

1. 生産スタッフ（ヒューマンファクターズ）

2. 生産支援システム（Production Support System；以下 PSS と称す）、生産装置（アーティフィシャルファクターズ）

とがあり、それぞれ攪乱信号を抑制する能力（弾力性：レジリエンス）を持っている。PSS は主として小さくて発生頻度の高い攪乱信号に対応できる。また生産装置は中程度で、非定常的に発生する攪乱信号にまで対応できる。大きな攪乱信号に対応できるのは生産スタッフのみであるが、生産スタッフは大きさに関わりなく様々な攪乱信号に対応できる。また生産工程の弾力性は時間とともに変化する。生産装置の経時的な劣化による変化もあれば、生産スタッフの入れ替えによる変化もある。教育・訓練による生産スタッフの技能・知識水準の向上にともない、弾力性も向上するということを前提として、生産装置や PSS の弾力性を見極めながら低下を防ぎ向上をはかる必要がある。生産スタッフ自身も技能・知識水準の向上に努めなければならない。

2.2 化学工業の生産工程

製造業には素材生産型と組み立て加工型の2つのタイプがあるが、化学工業は前者の典型的なものである。ある製品を製造するための生産装置は原材料をその中に送り込むと製品に転化するという働きをし、そこでどのような反応が起きているのかを目で見ることはできない。したがって原材料から製品に至るまでの状態の変化は事前の予想どおりに進まないことも多い。そこである程度の変化の幅を許容できるように、安全のための余裕を持たせた装置設計が行なわれる。しかし現在国内で稼働している生産装置には建設から長い年月を経て老朽化の進んだものもあり、重大な事故の発生が危惧されるものもある。また生産工程においては事故の誘因になり得る様々な攪乱信号が発生する。

化学工業における生産工程は工程の内外で発生し操業を攪乱する信号（運転状態の変化、外乱、運転条件の変更のような工程に及ぼす影響の小さいものから、生産装置の緊急停止やスタートアップ、シャットダウン、自然災害のように大きなものまで様々あり、自然災害のように突発的に発生するものもある）の影響を抑制する働きを持つ（弾力性）。生産工程は操業に関わる生産スタッフ、PSS（省資源、省エネルギー、省力化を目指して生産工程に導入されたコンピュータシステムであり様々な要素機能を備えている）、生産装置などから構成され、それぞれが生産工程の弾力性を生み出す。生産工程は顧客からの製品需要に合わせて最適に操業されるが、生産性向上のためには生産工程の弾力性を高めて生産過程で生じる様々な攪乱信号の影響を抑制する必要がある。この攪乱信号に対して組織として対応するのは個人（生産スタッフ）、グループ（生産活動に携わる生産スタッフのグループ）、企業であり、それぞれが弾力性を高めるための役割を担っている（弾力性の管理主体と呼ぶ）。

2.3 ヒューマンファクターズにおける弾力性

生産工程を構成する3つの要素として生産スタッフ、PSS、生産装置がある。それぞれは弾力性を持ち、それらを合わせたものが生産工程に対する攪乱信号による影響を抑制している。その中のヒューマンファクターズ（個人、グループ、企業）における弾力性について述べる。

2.3.1 生産工程において弾力性を生み出すもの

化学工業において生産工程の弾力性は次の2つから生まれる。

1. 生産工程で操業に携わる生産スタッフの技能と知識（ヒューマンファクターズ）

生産スタッフの技能と知識は生産工程の操業に必須であり、その水準の高低は生産性を左右する [8], [9]。生産スタッフの持つ技能の大きさ（技能価値）を日々従事する業務を分析して測定した作業時間から割り出し、その中に技能・知識水準として含まれる個人の職位と職務能力に関する要素 [15] を用いて弾力性を求める。

$$V = \text{職位に基づく要素} + \text{職務に基づく要素} \quad (2.1)$$

すなわち、個人の職位（経験の多さ、労務費の高さを示す）と職務能力（個人の職務が職務にふさわしいものかどうか示し、職場における教育・訓練によって向上する）から弾力性が生まれるものとする。

2. 生産装置や PSS の機能（アーティフィシャルファクターズ）

生産装置や PSS も生産工程の弾力性に寄与している。生産装置は生産工程の内外での攪乱信号の発生に対して即座に対応できる設計（異常時の緊急停止処理であるインターロック機能など）、あるいは常用する運転条件（温度や圧力など）に対して余裕を持たせた設計がなされている。また PSS は省資源、省エネルギー、省力化による生産性向上を目指して生産工程に導入されるが、操業を攪乱する様々な信号に対して人に代わって自動的に応答することによって弾力性を生み出している。

生産工程において弾力性を生み出す3つの要素、生産スタッフ、生産装置、PSS のつながりを図 2.2 に示す。図の中の矢印は情報のながれをあらわしている。生産工程の弾力性の維持のためには、生産工程内での情報のながれと他の生産工程との情報のながれとが保たれなければならない。

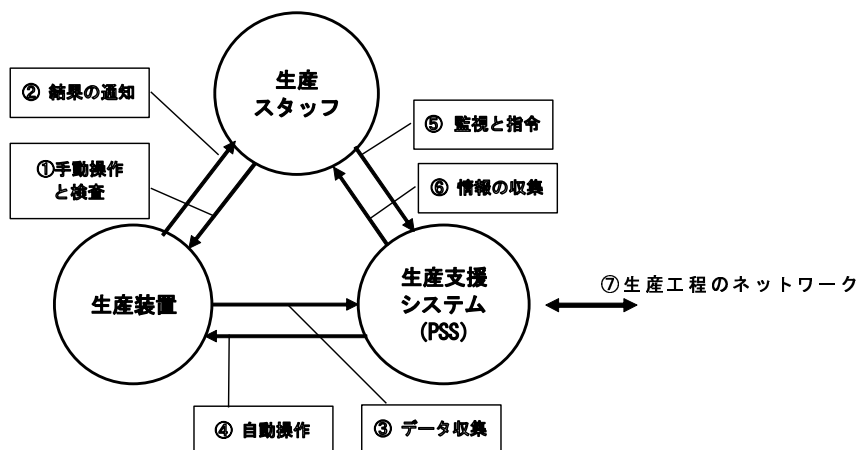


図 2.2: Relationship between the three elements of the production process and information flow

2.3.2 ヒューマンファクターズにおける弾力性評価のための組織的管理項目

生産工程の弾力性を保つための管理項目について、攪乱信号の大きさと組織の構成要素を用いて弾力性行列の形であらわすことができる（図 1.1、図 2.3 参照）。ここで、横方向は組織の構成要素で個人、グループ、企業であり、様々な大きさを持つ攪乱信号への管理対応者（管理主体）とする。縦方向は攪乱信号の影響の大きさである。この行列において成分要素（Step）として攪乱信号に対する弾力性を高めるための管理項目が規定されている。また影響の大きい攪乱信号に対しては知識で対応し、影響が中程度の攪乱信号には操作手順（あるいは規則）で、影響の小さい攪乱信号には技能で対応する。

組織の最小の構成要素である個人においては管理で着目すべき点は確実性であり、組織の最大の構成要素である企業の場合は計画的な実行である。また攪乱信号の影響が小さい場合に着目すべき点は訓練と技術開発であり、影響が大きい場合にはコミュニケーションと情報共有である。図 2.3 の中の項目に対する付番は図 2.2 の付番をあらわしている。

攪乱信号	大 中 小	業務遂行における信頼性の高さ	情報交換、情報共有および教育			知識 規則(手順) 技能	
			Step3 大きい攪乱信号の検知・予測 ⑤,⑥ 迅速な情報伝達と共有 ⑤,⑥,⑦	Step4 情報共有 ⑦ 攪乱信号への迅速かつ適切な応答 ①,②,⑤,⑥	Step5 大きい攪乱信号による被害の予防措置 安全措置の確立 自然災害の予知 計画的な教育		計画的な実施
			Step2 異常処理(緊急停止) ①,② 装置のスタートアップ/シャットダウン ⑤,⑥	Central Step 操作手順(規則)の遵守 ①,②,③,④ 教育・訓練計画の完全実施	Step6 標準的/統一的手順の確立 (定常/非定常状態) 教育・訓練体制の確立		
Step1 データ収集・監視とプロセス変動の 抑制 ③,④,⑤,⑥ 手動操作 ①,② 運転条件の変更 ⑤,⑥	Step8 技能の向上 ①,② 技能に基づく技術(形式知)の開発	Step7 PSSの要素機能による操作の 自動化促進	技能				
			訓練および技術開発				
個人			グループ			企業	

図 2.3: Resilience matrix for the human factors

以下に弾力性行列の成分要素（Step）について、その具体的な内容を述べる。

Step1: 影響の小さい攪乱信号に対して個人の対応すべき管理項目である。生産工程に対する攪乱信号が発生した時点で必要な手動操作（配管内のフィルターの交換など）の実行、生産工程の状態変化の監視、運転条件の変更（設定値変更、生産銘柄変更など）など日々決まってくる定例的な作業である。

Step2: 影響が中程度の攪乱信号に対して個人の対応すべき管理項目である。攪乱信号は生産工程の異常対応（装置の緊急停止、製品の品質異常などへの対応）、装置のスタートアップ、シャットダウン操作など非定常操作によって生まれ、その際には生産スタッフは操作手順に規定された操作を実行する。

- Step3:** 影響の大きい攪乱信号に対して個人の対応すべき管理項目である。ここでは個人は大規模な、被害の程度の大きな異常事態の検知、あるいは予知が管理項目である。そのためには災害発生メカニズムまで含む深い知識を身につけていなければならない。さらに異常事態を検知、予知したら、その情報を速やかにグループ内で共有すべく正確に伝達することも個人の役割である（図2.4参照）。
- Step4:** 影響の大きい攪乱信号に対してグループの対応すべき管理項目である。異常事態発生時にグループ内で共有した情報の全社的な共有をはかる（図2.4参照）ことや、異常事態に対する初期対応、公的防災機関への通報、関係者の安全な場所への避難誘導などがグループの役割である。この対応のためにはグループメンバーは事前に必要な知識を身につけておかなければならず、適切な教育・訓練が必要である。
- Step5:** 影響の大きい攪乱信号に対して企業の対応すべき管理項目である。企業には生産工程における大規模災害（火災、爆発など）の発生の未然防止対策の策定や、社外の専門家の指導を受けた自然災害（台風、地震、津波など）発生時の対応などの事前検討、準備などが必要である。また攪乱信号に直接向き合う個人やグループに対する教育・訓練の場を提供するのも企業の役割である。
- Step6:** 影響が中程度の攪乱信号に対して企業の対応すべき管理項目である。企業には生産工程における操作手順の標準化・統一化をはかり定着させること、また定常、非定常操作における技能向上のための教育・訓練体系を確立し実行することが求められる。特に非定常操作は発生頻度が小さいので、適切な操作手順を確立することとそれに沿って訓練を重ねることによってのみ誤った対応を防止することができる。
- Step7:** 影響の小さい攪乱信号に対して企業の対応すべき管理項目である。企業の果たすべき役割は装置の運転を自動化して生産工程の省資源、省エネルギー、省力化をはかりながら生産性の向上を実現することでありその成果を他の工程に展開することである。したがって必要な設備投資を行なうことは企業の役割である [29]。
- Step8:** 影響の小さい攪乱信号に対してグループの対応すべき管理項目である。生産性向上のためにPSSを導入するにあたって生産スタッフの技能を技術化（形式知化）することや、技能を向上させ定着させるための職場における生産スタッフの活動・教育・訓練もグループの果たすべき役割である。
- Step9:** （図1.1におけるCentralStepに対応する）影響が中程度の攪乱信号に対してグループの対応すべき管理項目である。影響が中程度の攪乱信号には生産工程の異常対応のような非定常操作が求められるので、グループの果たすべき役割は正確な操作手順の確立と手順の順守のための教育・訓練の実施である。

2.3.3 取り組み方と注意点（ヒューマンファクターズの場合）

図2.3には弾力性の管理項目として、弾力性を高めるための取り組みが組織の構成要素を個人、グループ、企業の3つに区分して攪乱信号の大きさに応じて規定されている。具体的な取り組み方と注意点は以下のとおりである。

1. 個人（生産スタッフ）

- 日々の業務においてつねに生産工程の状態を監視し、その間に得た情報は速やかにグループで共有すること。特に異常の兆候を見つけたときの対応は、個人での判断に頼らずグループ内での総合的な判断に委ねること（図 2.4 参照）。
- 技能を高め作業に熟練するように、また異常を検知・予知し、適切に対処するための知識を身につけるように努めること。
- 企業が個人の技能・知識水準を評価する際の評価項目と評価基準は明確にされなければならない。また評価結果は評価対象者（個人）にとって納得性のあるものとし、個人の業績に反映されなければならない。

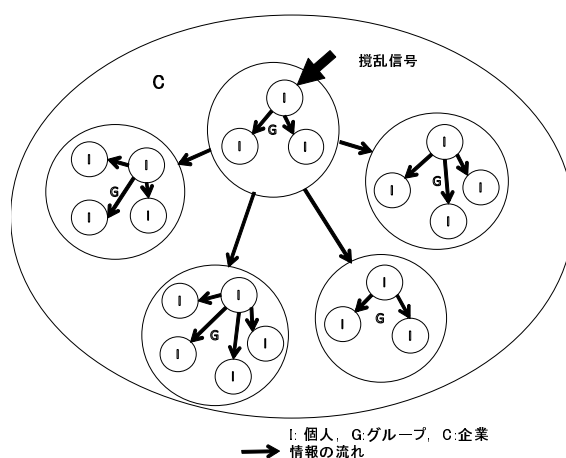


図 2.4: Information flow in the company

2. グループ

- 個人が検知・予知して共有した異常状態に関する情報に基づいて、生産工程への攪乱信号に適切に対応すること。得た情報は速やかに他のグループに伝え共有をはかること（図 2.4 参照）。
- 異常対応や非定常操作について、正しい操作手順をグループ内の教育・訓練で生産スタッフに徹底させること。教育・訓練には計画的にグループの全員をみれなく参加させ、その達成度に応じて職務能力として個人の業績評価に反映させること。
- 生産工程における操作の自動化によって生産スタッフの業務にゆとりを生み出すために生産スタッフの技能を技術化（形式知化）して PSS の要素機能に組み込む [29]。生産スタッフは得られたゆとりを弾力性向上のために技能の向上や新しい技能の修得にあてること。

3. 企業

- 大規模な災害に備えて予防・防護措置を講じること。またその発生時に被害を最小限にとどめるための方策を策定すること。特に外部の専門家に委託して指導を受けることも、客観的な見方を知るといふ点で有効である。

- 生産スタッフによる誤操作を防ぐために操作手順の標準化・統一化をはかること。またこれは生産スタッフの多能工化に向けて、業務負荷の軽減につながり生産性向上に有効である。
- 生産工程の操作自動化による生産性向上のために技能の技術化（形式知化）を促進する。その際には投資効果の高い技術を PSS の要素機能に組み込むこと [29]。
- 大小様々な生産工程への攪乱信号に対する個人、グループの対応については、つねに正確に把握したうえで適切な応答、不適切な応答にかかわらずつねに分析して評価したうえで全社的に公開することが必要である。

生産装置は導入後に時間が経過するにつれて弾力性を生み出す能力が低下する。特に近年建設から長い年月が経過した国内の生産拠点をマザープラントとして残しながら海外に生産をシフトさせる企業が増えているが、国内での生産は生産スタッフの技能低下や装置の老朽化など安全面で危険な状態に陥っている場合がある。したがって老朽化による弾力性の低下の評価については、生産装置に関わるリスクアセスメントの結果を用いて行なうことができる（3.3節参照）。

2.3.4 ヒューマンファクターズにおける弾力性についての考察

化学工業においては生産工程への攪乱信号が常に存在し、生産性向上のためにはその影響の抑制が必要である。その抑制能力を弾力性という。生産工程の持つ弾力性を高めるために組織としての管理主体（個人、グループ、企業）が対応すべき管理項目を個人、グループ、企業に分けて示した。また生産工程の弾力性には個人（生産スタッフ）の技能・知識から生まれるものと PSS や生産装置から生まれるものがあるが、生産スタッフの技能や知識の水準は訓練や教育によって向上する。つねに高い水準を保ち続けるためには企業の計画的かつ継続的な取り組みが欠かせない。

2.4 アーティフィシャルファクターズにおける弾力性

この節では生産工程を構成する3つの要素のうちの PSS、生産装置の生み出す弾力性について述べる。

2.4.1 アーティフィシャルファクターズの生み出す弾力性

生産工程を構成する要素のうちの PSS や生産装置はそれ自体に様々な大きさの攪乱信号を抑制する弾力性を持っている。PSS には生産スタッフの技能を形式知化した技術が要素機能として組み込まれており、経時的な生産工程や生産装置の変化とともに PSS によって生みだされる弾力性も変化する。また生産装置に関しては、設置時点において想定される攪乱信号に対する弾力性を持った設計がなされるが、時間の経過にともなう素材の劣化や、想定外の種類や大きさの攪乱信号の発生が原因となって所期の弾力性が発揮できないことがある。これらのアーティフィシャルファクターズにおいては管理主体が管理すべき管理項目を定めて弾力性を評価することが必要で

あり、その結果に応じて対策を講じる。以下に、弾力性行列を用いて PSS および生産装置の弾力性を評価するための管理項目を示す（縦方向に攪乱信号の影響の大きさ、横方向に管理対象をとる）（図??、図??参照）。また攪乱信号にはすでに発生したことがあって生産工程に対する影響の程度が分かっているものと、まだ発生しておらず生産工程に対する影響の程度が分からないものとがある。

2.4.2 生産支援システム（PSS）における弾力性

PSS の持つ様々な大きさの攪乱信号を抑制する弾力性を評価するための管理項目を弾力性行列であらわす（図??参照）。弾力性行列の縦方向に攪乱信号の影響の大きさをとり、横方向に管理対象として 1) システムの基本となるデータ収集、アラーム機能、2) オペレーション機能（生産スタッフが手や足を使う技能に基づく要素機能）、3) メモリ機能（生産スタッフが記憶力を使う技能に基づく要素機能）、4) コミュニケーション機能（生産スタッフが口や耳を使って相互間の意思疎通をはかる技能に基づく要素機能）をとる。2) から 4) までの機能は生産スタッフの技能の 3 つの体系に合わせて PSS の要素機能を分類したものである。上記の項目は 2) から 4) に向かって、技能としての水準が高くなる。ここで影響の大きい攪乱信号とはこれまで発生したことがなく、対応するための規則（操作手順）も技能も存在しない攪乱信号、影響が中程度の攪乱信号とは非定常的に発生し、技能や操作手順が存在する攪乱信号（例えば装置のスタートアップ、シャットダウン操作など）、影響の小さい攪乱信号とは定常的に発生し、対応するための技能や操作手順が存在する攪乱信号（例えば運転条件の変更（設定値変更、生産銘柄変更など））である。

攪乱信号	大	Step3 なし	Step4 なし	Step5 なし	Step6 なし	知識
	中	Step2 個別操作に対する警報機能の有効性 (緊急停止、スタート・アップ/シャット・ダウン操作など)	Step11 非定常操作実施中のバックアップ機能 (スタート・アップ/シャット・ダウン操作)	Step12 PSSによる自動操作の履歴保存および自動操作履歴の確認のためのツール	Step7 操作手順に関するコミュニケーション機能 (情報共有)	高度な機能の開発
	小	Step1 機能の信頼性 (データ収集と警報)	Step10 要素機能の導入効果 トラブル発生時のバックアップ機能	Step9 操作履歴の保存および操作履歴の確認のためのツール	Step8 運転操作の実行に関するコミュニケーション機能 (情報共有)	技能
		自動操作の領域の拡大				
		データ収集、警報機能	オペレーション機能	メモリ機能	コミュニケーション機能	

図 2.5: Managerial components of PSS

2.4.3 生産支援システム（PSS）の弾力性評価のための管理項目

Step1: データ収集・アラーム機能から生まれる、影響の小さい攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。プロセスデータの上下限值チェックや変化速度チェックによって機器の操作や設定値変更による状態変化が正常であるかそれとも異常であるかを知るための機能で、プラントの状態の変動を監視することができる。もしアラームが頻発すれば限界値の設定が不適切であるか、あるいは異常状態の前兆のこともある。この場合の管理項目はこの機能の有無および信頼性である。

Step2: データ収集・アラーム機能から生まれる、影響が中程度の攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。緊急停止時、スタートアップ、シャットダウンなどの際に収集したデータを用いたアラーム機能が用いられる。この場合の管理項目は有効なアラーム機能が備えられているかどうかである。

Step3: データ収集・アラーム機能から生まれる、影響の大きい攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。データ収集とアラーム機能そのものは影響の大きい攪乱信号を抑制する弾力性を生み出すことはないので管理項目はない。

Step4: オペレーション機能から生まれる、大きい攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。PSSのオペレーション機能は省資源、省エネルギー、省力化による効果を目指して導入されるので、発生した影響の大きい攪乱信号を抑制する弾力性を生み出すことはない。したがって管理項目はない。

Step5: メモリ機能から生まれる、影響の大きい攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。メモリ機能も省資源、省エネルギー、省力化による効果を目指して導入されるので、影響の大きい攪乱信号を抑制する弾力性を生み出すことはない。したがって管理項目はない。

Step6: コミュニケーション機能から生まれる、影響の大きい攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。コミュニケーション機能も省資源、省エネルギー、省力化による効果を目指して導入されるので、影響の大きい攪乱信号を抑制する弾力性を生み出すことはない。したがって管理項目はない。

Step7: コミュニケーション機能から生まれる、影響が中程度の攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。影響が中程度の攪乱信号に対しては、ヒューマンファクターズに関わる弾力性の組織共通の管理項目は操作手順の確立である（図2.3）。したがって操作手順に関わるコミュニケーション機能（情報をグループ内で共有する機能）が管理項目である。

Step8: コミュニケーション機能から生まれる、影響が小さい攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。影響が小さい攪乱信号に対しては、ヒューマンファクターズに関わる弾力性の組織共通の管理項目は運転操作の確実な実行である（図2.3）。したがって運転操作の実行に関わるコミュニケーション機能（情報をグループ内で共有する機能）が管理項目である。

Step9: メモリ機能から生まれる、影響の小さい攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。影響の小さい攪乱信号にはPSSからの操作で対応する。またPSSからの操作の結果として攪乱信号が生まれることもある。影響の小さい攪乱信号の発生状況とその適切な抑制が判断できる履歴の保存と確認のためのツールが管理項目である。

Step10: オペレーション機能から生まれる、影響の小さい攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。この機能はPSSに省資源、省エネルギー、省力化の効果を狙って導入されるので、導入効果およびその機能に異常が発生した時のバックアップ機構の有無が管理項目である。

Step11: オペレーション機能から生まれる、影響が中程度の攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。PSSによって自動化された非定常操作における操作中の異常発生時のバックアップ機構が管理項目である。

Step12: メモリ機能から生まれる、影響が中程度の攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。PSSによって自動化された操作に関する履歴データおよびその内容の確認のためのツールが管理項目である。

2.4.4 取り組み方と注意点（PSSの場合）

生産工程に導入されるPSSは生産スタッフの技能に基づいて、主としてオペレーション機能とメモリ機能を中心に開発されている。したがってここではPSS全体についての取り組みと注意点について述べる。PSSの要素機能は生産スタッフの技能をもとにコンピュータによって代替させるための技術として組み込まれるが、その際に最も投資効果の大きい技術を選ぶ[30]。また生産工程への大きな攪乱信号（これまで発生したことがなく、対応するための技能も操作手順も存在しない攪乱信号）に対してPSSで代替することは困難である。したがってPSSによって生産工程の弾力性を生み出すことができる攪乱信号は、影響の小さいものと中程度のものに限られる。しかしPSSの活用で生産スタッフの攪乱信号に対応するための負担を軽減できれば、そこで生産スタッフの業務の中で生まれた時間的な余裕を技能・知識水準の向上にあてることができ、影響の大きい攪乱信号に対する弾力性を高めることも可能になる。

2.4.5 生産装置における弾力性管理

生産装置に対する攪乱信号を抑制する弾力性評価の管理項目を弾力性行列であらわす。縦方向には攪乱信号の影響の大きさをとり、横方向には管理対象として1) 巡回点検結果（攪乱信号未発生）、2) トラブル発生（攪乱信号発生）、3) 装置改造・補修（攪乱信号発生）、4) リスクアセスメント（攪乱信号未発生）をとる。管理主体は個人、グループ、企業である（図1.1参照）。

1. 巡回点検結果（攪乱信号未発生）：生産工程では毎日巡回点検が行なわれ人の五感を用いて異常状態を検出する。巡回点検で様々な故障の前兆が見つかることがある。また、打音や超音波による診断で隠れた異常を検出することもある。さらに、生産工程の外で発生する影響の大きい攪乱信号に対する弾力性を低下させる要因の発見も目指す。
2. トラブル発生（攪乱信号発生）：生産工程における装置のトラブルの発生は弾力性の低下を示しており早急な是正措置が必要である。その履歴（ヒヤリ・ハットも含む）から類似の事象の再発リスクの潜在を発見することがある（トラブル発生時にはリスクアセスメントが必要である）。

3. 装置改造・補修（攪乱信号発生）：製品の生産量や仕様の変更に合わせて生産装置を改造することがあり、また定期的にあるいは必要に応じて装置の補修が行なわれる。その結果装置の弾力性が変化する（この場合にもリスクアセスメントを行なう）。
4. リスクアセスメント結果（攪乱信号未発生）：生産工程において生産装置に潜在するリスクの大きさを見積もり、許容できるか否かを決定するリスクアセスメントの結果を弾力性評価に用いる。

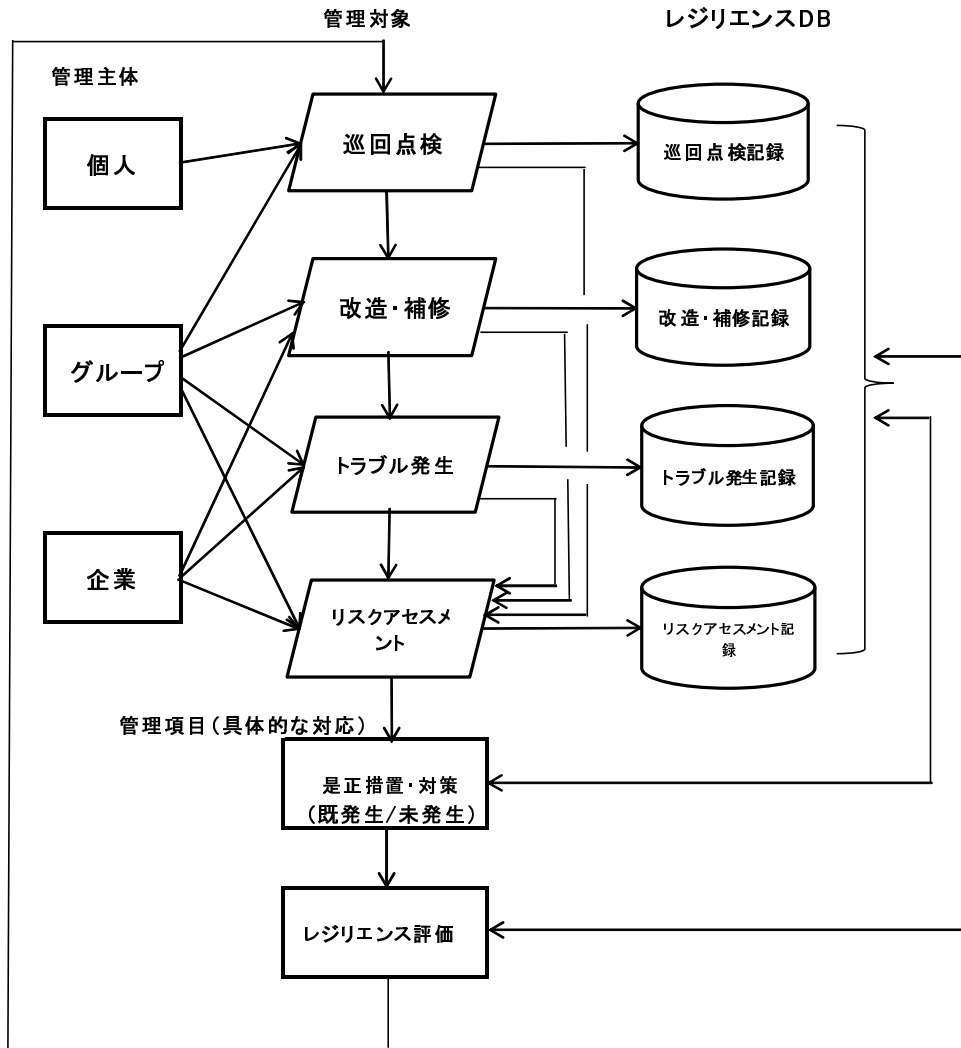


図 2.6: Managerial subjects and managerial objects (Units)

2.4.6 生産装置の弾力性評価のための管理項目

各管理対象には攪乱信号の影響の大きさに応じた管理項目があり、その一つひとつを **Step** と称する。

撓乱信号	大 中 小	災害や事故に関する学習				知識	
		Step3 巡回点検の履歴 (亀裂,傾き,陥没・沈下 および対応措置)	Step4 トラブルの発生状況 発生原因の解析結果および 再発防止のための措置 (火災,爆発)	Step5 装置の改造・補修の履歴 装置の強度や耐久性の 検査結果および経過の 観察結果	Step6 リスクアセスメントの結果に 基づくリスク低減措置 (壊滅的な被害を受ける場合)		高度なリスク低減措置の実施
		Step2 巡回点検の履歴 および診断結果 (打音,超音波などによる 診断結果の解析)	Step11 トラブルの発生状況 発生原因の解析結果および 再発防止のための措置	Step12 装置の改造・補修の履歴 および経過の監察結果	Step7 リスクアセスメントの結果に 基づくリスク低減措置 (火災,爆発)		
Step1 巡回点検の履歴 (腐食,漏洩,異音など)	Step10 ヒヤリ・ハットの発生状況 発生原因の解析結果および 再発防止のための措置	Step9 装置の改造・補修の履歴 および経過の監察結果	Step8 リスクアセスメントの結果に 基づくリスク低減措置 (人身事故)				
		履歴データの継続的な確認					
		巡回点検	トラブル発生	装置の改造・補修	リスクアセスメント	技能 規則(手順)	

図 2.7: Managerial components of production units

Step1: 巡回点検で見つかる、影響の小さい撓乱信号に対する弾力性の管理項目である。生産スタッフは目視で腐食や漏洩を見つけたり、異音によって機器の破損を発見したりすることがある。これらの異常を発見すると直ちに程度に応じた補修が行なわれる。ここでは巡回点検の記録が管理項目である。

Step2: 巡回点検で見つかる、影響が中程度の撓乱信号に対する弾力性の管理項目である。目視や異音による異常検知が困難な場合には装置の材質の変化（劣化）に対する打音による検知が行なわれる。また超音波による診断も行なわれる（素材の減肉化や破断などの診断）。この場合も巡回点検の記録と診断結果が管理項目である。

Step3: 巡回点検で見つかる、影響の大きい撓乱信号に対する弾力性の管理項目である。装置や機器における亀裂の発生、傾き、沈下などの発見がこの項目にあてはまる。亀裂発生個所からの危険物や有害物の漏洩や自然災害時の装置の倒壊につながるこれらの異常は即時の対応を要する。この場合は巡回点検の記録と診断結果が管理項目である。

Step4: 影響の大きい撓乱信号を発生させたプラント内部のトラブルに対する弾力性の管理項目である。亀裂、傾き、沈下に加えて、危険物の漏洩、火災、爆発、重大な人身事故の発生などがある。これらのトラブルについては徹底した原因究明と再発防止策の確立が必要である。したがって弾力性を評価するための管理項目は、トラブルの発生状況、原因究明とその解析結果および再発防止策の策定である。

Step5: 影響の大きい撓乱信号の発生後の装置改造・補修で生まれる弾力性の管理項目である。生産装置の用途変更に関わる改造で、強度や耐久性が規格を下回ると異常事態における被害の拡大につながる。ここでは改造・補修の記録と要求される強度や耐久性の確認、その後の経過の観察結果が管理項目である。

Step6: リスクアセスメントの結果見つかる、影響の大きい撓乱信号に対する弾力性の管理項目である。リスクアセスメントで生産装置に潜在するハザードを特定し、想定される被害が大きい

い場合（壊滅的な被害を受ける場合）である。この場合の管理項目はリスクアセスメントの結果に対するリスク低減措置である。

Step7: リスクアセスメントの結果見つかる、影響が中程度の攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。リスクアセスメントのハザードとして火災・爆発の発生が特定された場合であり、この場合の管理項目もリスクアセスメントの結果に対するリスク低減措置である。

Step8: リスクアセスメントの結果見つかる、影響の小さい攪乱信号に対する弾力性の管理項目である。リスクアセスメントのハザードとして人身事故が特定された場合であり、管理項目はリスクアセスメントの結果に対するリスク低減措置である。

Step9: 影響の小さい攪乱信号の発生後の生産装置の改造・補修で生まれる弾力性の管理項目である。巡回点検やリスクアセスメントの結果によって補修を行なった場合などである。この場合の管理項目は、改造・補修の記録である。

Step10: 影響の小さい攪乱信号を発生させたプラント内部のトラブルに対する弾力性の管理項目である。生産現場においてヒヤリ・ハットのような、トラブル・事故ではないがその一步手前の状況が頻発する場合であり、この場合の管理項目はヒヤリ・ハットの発生状況と原因究明の結果と再発防止策の策定である。

Step11: 影響が中程度の攪乱信号を発生させたプラント内部のトラブルに対する弾力性の管理項目である。同一のトラブルが繰り返し発生する場合、さらに大きなトラブルにつながりかねないので原因究明と再発防止策を徹底させる。ここでは、トラブルの発生状況とトラブルの原因究明の結果と再発防止策の策定とが管理項目である。

Step12: 影響が中程度の攪乱信号の発生後の生産装置の改造・補修で生まれる弾力性の管理項目である。ある生産装置で同一箇所の補修を繰り返すと、それが引き金となってさらに大きなトラブルが引き起こされる危険性がある。したがって設備の更新や生産装置全体の点検・補修が必要になる場合もあり、この場合の管理項目は改造・補修の記録とその後の経過の観察結果である。

2.4.7 取り組み方と注意点（生産装置の場合）

生産装置について管理対象ごとに取り組み方と注意点を述べる。

1. 巡回点検

- 巡回点検は設備ごとに必要な点検項目を明らかにして毎回確実に実行すること。
- 生産スタッフは点検において、五感を活かして小さな異常も見逃さないこと。
- 異常を発見した場合には直ちに所属するグループ内でその状況を周知徹底し、内容に応じてリーダーの判断に基づいて情報を企業内で共有すること。また、場合によっては装置メーカーや公共機関に通報する。

2. 生産工程内でのトラブル発生

- トラブル発生時には徹底的に原因を究明したうえで再発防止策を策定し、その結果を企業内で共有すること。
- トラブルを同じ個所で繰り返す場合には被害が大きくなることもある。したがって応急的な処置にとどまらず、根本的な対策を講じること。
- ヒヤリ・ハットのようなトラブル・事故に至らない事象についても、他の生産工程の事例を参考に原因を究明すること。

3. 生産装置の改造・補修

- 改造・補修についてはその詳細な履歴を保存し、つねに参照できるようにすること。
- 生産装置は改造後に当初の目的どおりに使用されているかどうかを定期的に確かめること。
- 補修を繰り返している個所があれば、生産装置の更新を検討すること。

4. リスクアセスメント

- 定期的に生産工程に関するリスクアセスメントを行なうこと。評価が前回と異なる個所には特に注意する。
- リスクアセスメントの結果リスク低減措置が必要と判定されたリスクについては計画的に措置を講じること。
- リスクアセスメントの結果は対象となる生産工程に限らず、他の生産工程でも情報を共有し参照できるようにすること。

2.4.8 アーティフィシャルファクターズにおける弾力性の考察

この節ではアーティフィシャルファクターズについて、攪乱信号の影響の大きさと管理対象を対応させた弾力性行列を用いて PSS および生産装置の弾力性を評価するための管理項目について考察した。ここでは管理主体と攪乱信号の大きさとを関連づけして管理項目を決めることができず、攪乱信号の大きさと管理対象とを関連づけて管理項目を決めた。管理主体は管理対象の上位にあり管理項目を実施しその結果に応じた対応措置をとる責任を負う。その際に管理項目や対応措置の有効性は、生産スタッフの技能・知識水準によって決まる。

2.5 考察と結論

この章では生産工程から生まれる弾力性について、管理主体（個人、グループ、企業）あるいは管理対象がどのように対応すべきかという観点から管理項目を検討した。まず、生産工程の構成要素をヒューマンファクターズ（生産スタッフ）とアーティフィシャルファクターズ（生産支援システム（PSS）、生産装置）に分け、前者については既存の研究で提案された弾力性行列（管理主体と攪乱信号の大きさとに対応させて行列の形で管理項目を示している）による弾力性評価の手

法を用いて管理項目を示した。また後者についてはPSSと生産装置に分けたが、これらについては管理主体が直接管理項目に結びつかないので、それぞれ管理対象と攪乱信号の大きさを対応させて管理項目を示した。管理対象とは管理区分のことで、PSSの管理対象は生産スタッフの技能に関わるものである。それはPSSは生産スタッフの技能を代替する機能を持つからである。また生産装置では生産スタッフの業務に関連づけられている。アーティフィシアルファクターズにおいては、管理主体は管理対象の上位にあって監視・監督の役割を果たす。ここであげた2つの要素によって生み出される弾力性にすべて関わり大きな影響を与えるのは生産スタッフである。生産スタッフの知識が増え、技能が向上すれば生産工程の弾力性が強化されることが示された。特に管理主体のうちのグループと弾力性との関わりについては、既存の研究においてもほとんど手が付けられておらず、本研究において明らかにすることができた。

第3章 生産工程における弾力性の定量的評価

既存の研究では弾力性を定性的に評価することにとどまっていたが、ここでは化学工業の生産工程について定量的に評価することを試みている。生産工程は1) 生産スタッフ、2) 生産支援システム、3) 生産装置で構成されるが、生み出される弾力性をそれぞれ個別に評価することができる。評価に際して最も重要なのは生産スタッフが生産工程で発揮している技能であり、業務従事時間の実測値から技能表出時間（技能を1) オペレーション技能、2) メモリ技能、3) コミュニケーション技能の3つに分類して業務従事時間を割り振ったもの）を割り出し、それをもとに技能価値として求めたものを弾力性の評価に用いる。

3.1 生産スタッフの技能・知識から生まれる弾力性

化学工業は長い歴史を持つ産業の一つであり、生産工程も改良を繰り返して洗練されたものになっている。さらにわが国の技術は高い国際競争力を持ち海外でのプラント建設も増加の一途をたどっているが、国内のプラントは建設から長い年月が経過し老朽化の進んでいるものが多く、事故の発生が危惧されるものもある。すなわち事故やトラブルの誘因になり得る生産工程に対する様々な攪乱作用（以下攪乱信号と称す）の影響を抑制する力の弱いプラントも多いものと思われる。生産工程に対する生産工程内外からの攪乱信号を抑制する能力を弾力性と呼ぶ。また弾力性に関連する様々な概念が提案されている [16-28]。化学工業において生産工程を構成する要素は、生産スタッフ（生産工程の操業に直接関わる運転員）、PSS（生産支援システム：Production Support System、生産工程の操業を支援するためのコンピュータシステム）、生産装置であるが、それぞれが生産工程の弾力性を生み出している。生産スタッフはリアルタイムで収集した操業データをもとに生産工程の状態を監視しつつ自動化された装置の動きを見て、それを補う操作を行なう。平常時の生産スタッフの役割は生産工程の状態の監視と自動化されていない操作を行なうことでありそれほど高い技能を必要とはしないと考えられてきたが、平常時には安定している化学プロセスも自然災害や異常反応などの発生で急激な状態変化が起きると自動操作では対応できず、生産スタッフの判断と操作が必要になることがある。このように生産性を大きく左右する生産工程内外の環境変化の影響は生産スタッフの技能や知識によって緩和される。すなわち生産スタッフの技能の高さと知識の豊富さは、生産工程の環境変化（攪乱信号が生起する）を抑制する力（弾力性）の大きさとなってあらわれる。

3.1.1 生産工程における技術と生産スタッフの技能・知識から生まれる弾力性の関わり

生産工程の収益性は企業の競争力を左右する。そのためにはPSSを活用することのほかに、生産スタッフが高い技能と幅広い知識を身につけて外的要因の変化からのマイナス面の影響を緩和する必要がある。例えば顧客の要求仕様をみたせなかった場合にも、できるだけ損失を小さくすることや規格外の製品を活用することなどは生産スタッフの技能と知識に委ねられる。またトラブルを未然に防止することやトラブル発生時の影響範囲を狭めることなどによって生産コストを削減することができる。これらについても生産スタッフの技能や知識で対応する。

しかしある時点で技能と知識の向上が止まると製造設備の経年変化や外的要因の変化への対応力の低下が考えられるので、新たな技術を導入しながら技能や知識を向上させるという継続的な取り組みを欠かさないことが、生産工程の持つ弾力性を維持し高めるためには必要である [9]。また技能から生まれる弾力性は影響の小さい攪乱信号に対応し、知識から生まれる弾力性は影響の大きい攪乱信号に対応する。さらにルール（操作手順書などを指す）などの技術から生まれる弾力性は影響が中程度の攪乱信号に対応する [19]（図 3.1 参照）。

弾力性を定量的に評価する前に、それを生み出すもとなるものを特定する必要がある。ここでは弾力性は生産に従事する生産スタッフの技能・知識（熟練度）から生まれるものとする。熟練度は技能の高さと知識の豊富さを合わせた生産スタッフの持つ能力を指す。生産スタッフの持つ技能を定量的に評価するための技能価値という指標を次のように定義する。そこではある業務に従事する時間を技能表出時間と呼び、技能を3つに体系化している（オペレーション技能、メ

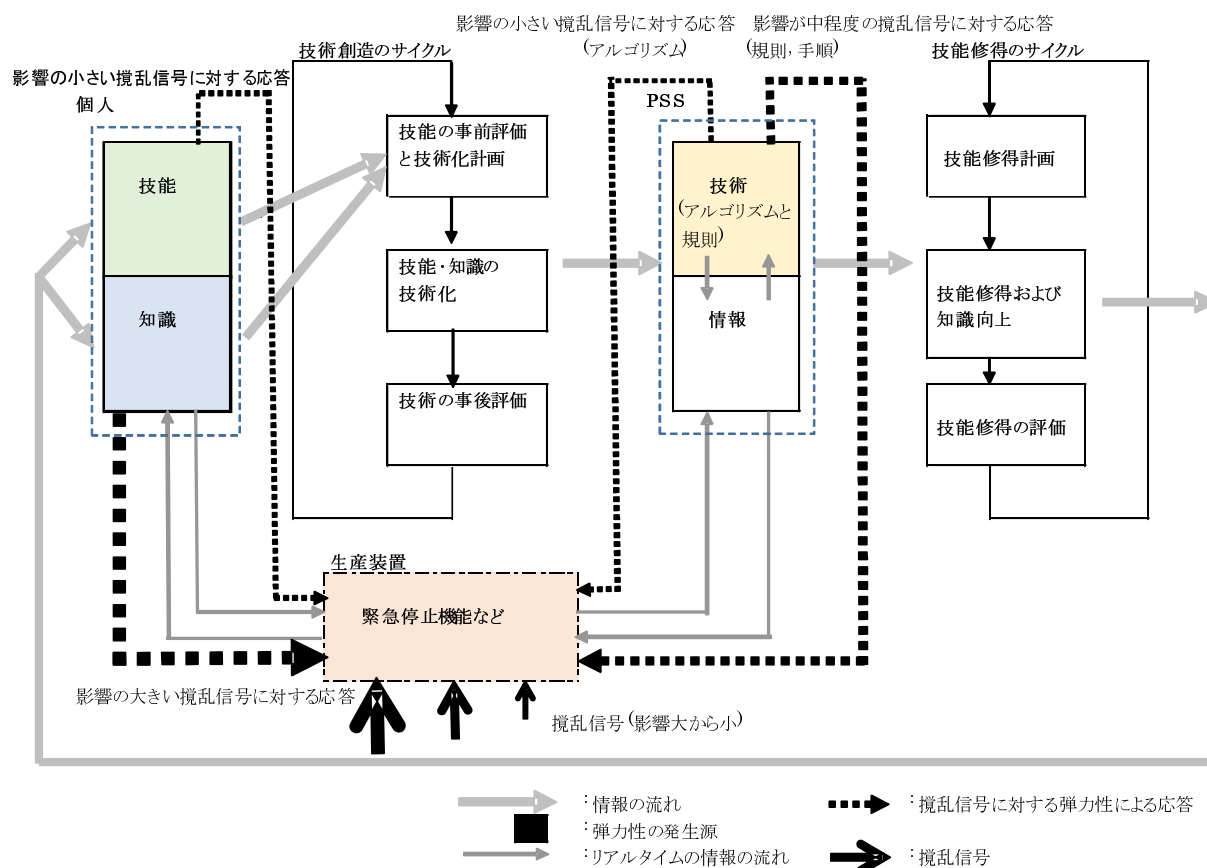


図 3.1: Source of resilience and disruptive signals

モリ技能、コミュニケーション技能)。業務において技能表出時間を実測して（3つの区分ごとの値は生産スタッフの自己申告による）技能価値 Q を求める。

$$\text{重み付き技能表出時間 } Tk = \text{技能表出時間 } B \times \text{職位別技能重視度 } W1 \quad (3.1)$$

$$\text{技能価値 } Q = \text{重み付き技能表出時間 } Tk \times \text{技能・知識水準 } V \quad (3.2)$$

ここで、

$$\text{技能・知識水準 } V = \text{職位} + \text{職務能力} \quad (3.3)$$

技能・知識水準は生産スタッフにおける職位の要素と職務能力（知識などの潜在能力も含む）の要素の和であらわす（式 (3.3) については 5.3.1.2 節の説明参照のこと）。上の 3つの式を用いて弾力性を求めるにあたってはある数名の生産スタッフからなるグループを対象とし、生産スタッフの人数の多さ、業務従事時間の長さ、業務内容によらないという前提を設けた。それらの前提をもとに、生産スタッフの持つ潜在的な能力が弾力性を生み出すものとして技能・知識水準を用いて弾力性を評価する。すなわちグループ全体の技能価値の和をグループ全体の重み付き技能表出

時間の和で割って求めた、グループの生産スタッフ全体の技能・知識水準の加重平均（平均技能・知識水準）をその生産工程の弾力性とする（もし複数のグループが業務に従事していれば、それらの平均値を用いる）。

3.1.2 生産スタッフの技能・知識から生まれる弾力性評価の例

ここで生産工程における定量的な技能評価の手法（技能価値評価法）[9]を利用して弾力性の指標を評価する方法の例を示す（技能価値の計算方法については、5.3.1.1節参照のこと）。

評価の対象となる生産工程は汎用樹脂の試作設備である（バッチプラント）。このプラントでは3名の生産スタッフ（リーダー、サブリーダー、新人）が業務に従事しており昼間のみの稼働で1ヶ月間に23日、1日平均8時間稼働する。生産スタッフの業務従事時間には休憩時間や、移動時間などの技能を発揮していない時間は含まれていない。このプラントにおける生産スタッフの技能価値を次のように求める。

業務における技能を3つに体系化し（オペレーション技能、メモリ技能、コミュニケーション技能）、生産スタッフそれぞれの職位に対する技能のふさわしさを職位別技能重視度として重み係数 $W1_k$ とする。次にそれぞれの業務に含まれる3つの技能の時間 B_k （実測値に基づく技能表出時間）に重視度としての重み係数 $W1_k$ を掛け、業務における生産スタッフそれぞれの重み付き技能表出時間 Tk を求める。（ $W1_k$ 、 B_k については5.3.1.1節参照）

$$\begin{aligned} T1 &= B_1 \cdot W1_1 \\ &= (22.96, 10.58, 3.852, 13.08, 4.912, 42.61, 27.56)^T \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} T2 &= B_2 \cdot W1_2 \\ &= (16.11, 33.26, 33.26, 8.263, 4.549, 33.26, 22.73)^T \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} T3 &= B_3 \cdot W1_3 \\ &= (5, 30, 20, 0, 5, 60, 20)^T \end{aligned} \quad (3.6)$$

このチーム全体の重み付き技能表出時間 T_{total} は次のようにあらわせる。

$$\begin{aligned} T_{total} &= T1 + T2 + T3 \\ &= (44.07, 73.84, 57.11, 21.34, 14.46, 135.87, 70.29)^T \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$(3.8)$$

チーム全体の重み付き技能表出時間の大きさ TV は次のとおりである。ここで、 TV の次元は‘時間’である。

$$\begin{aligned}
 TV &= \sum_{i=1}^7 T_{totali} \\
 &= 416.98
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

$T1, T2, T3$ を合成した行列に生産スタッフの職位と職務に応じた個別の技能と知識の水準をあらわすベクトル V を掛けて、グループ全体の技能価値を求める [15]。ここで、 $V = (1.2, 1.0, 0.8)^T$ とする (V については 5.3.1.2 節の説明を参照のこと)。

$$\begin{aligned}
 Q &= (T1, T2, T3) \cdot V \\
 &= (47.66, 69.95, 53.88, 23.95, 14.44, 132.39, 71.81)^T
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

グループ全体の技能価値の大きさ QV は次のとおりである。ここで、 QV の次元は'時間'である。

$$\begin{aligned}
 QV &= \sum_{i=1}^7 Q_i \\
 &= 414.08
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

生産工程の弾力性を評価するにあたって考慮すべき点がある。複数の生産工程についてそれぞれの持つ弾力性を求めて比較したい場合には、生産工程ごとに作業に従事する人数が異なるが人数が多いほど弾力性が高いとは限らないので、生産スタッフ一人あたりの平均値を弾力性とする。生産スタッフは日々の業務に従事し技能表出時間で示される技能を発揮している。このときベクトル Q の成分を合計したもの（グループ全体の技能価値 QV ）を重み付き技能表出時間 TV で割った値はグループ全体の技能・知識水準の加重平均である。この値を人数とは無関係にその生産工程の生産スタッフによって生み出される弾力性 R_{PPP} とする。 R のとる値の範囲については 5.3.1.2 節の説明を参照のこと。

$$\begin{aligned}
 R_{PPP} &= QV/TV \\
 &= 0.993
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

3.1.3 生産スタッフの技能・知識から生まれる弾力性に関する結論

素材生産型のプラントは装置の設計仕様によって生産できる製品の種類や生産能力が決まるが、企業は外的環境が変化してもその装置を使い続けなければならない。したがって高い生産性を保ちながら内的、外的要因からのマイナス面の影響を抑える、すなわち生産工程に対する攪乱信号を抑制するためには生産工程の弾力性を高める必要がある。しかしこれまで弾力性を定量的に評

価するための指標は存在しなかった。生産工程には弾力性が生まれるものとなるものとして生産スタッフ、PSS、生産装置があるが、ここでは生産スタッフによって生み出される弾力性を定量的に評価するのに用いる指標を定義し、実際の化学プラントの例によってその有効性を示した。ここで求めた指標は引き続き検討するPSSから生まれる弾力性および生産装置から生まれる弾力性の定量的評価にも用いられる。

3.2 生産支援システム（PSS）から生まれる弾力性の定量的評価

化学工業においては、生産される製品について1)生産スタッフ、2)PSS、3)生産装置からなる生産工程があり、複数の生産工程を組み合わせると一つの工場が形成されている。生産活動が続ける間に安定した操業に影響を与える様々な攪乱信号（運転条件の変更、事故・トラブル、自然災害の発生など、生産工程の受ける影響が小さいものから大きいものまで多種多様である）が生産工程の内外で発生し、生産工程はその影響を抑制する能力として弾力性を持っている。攪乱信号を抑制する能力の低下は生産性の低下を招くので弾力性の維持と向上のためには弾力性を定量的に評価する必要があるが、定量的な評価が難しい理由として次の点があげられる。

- 弾力性が生産工程のどこから生まれるのかははっきりしない。
- 評価の際に用いる尺度が明確でない。
- 弾力性によって抑制すべき対象（攪乱信号）が明らかでない。

そこで次のような前提をおいて、生産工程に導入されたPSSによって生み出される生産工程の弾力性を定量的に評価する。ここでPSSとは、生産工程に省資源、省エネルギー、省力化を主たる目的として導入されたコンピュータシステムを指し、生産スタッフが生産工程で使う技能を形式知化したものを要素機能として備えている。

- 生産工程において弾力性を生み出すものとなるものは、生産スタッフ、PSS、生産装置である。
- 評価尺度は生産スタッフが日々の業務に用いる技能を定量的に評価するために提案した「技能価値」[9], [15], [30]に含まれる技能・知識水準とする。それは、PSSは生産スタッフの業務を代替する働きを持つので、生産スタッフの技能・知識水準がどの程度代替されているかによってPSSから生まれる弾力性を評価できるからである。
- 弾力性によって抑制すべき攪乱信号には、生産工程が正常に稼働している場合の運転条件の変更（装置の制御における設定値の変更操作、生産量変更操作など）、装置のスタートアップ、シャットダウン操作、生産銘柄の切り替え操作から事故・トラブル、自然災害まで含まれる。すなわち生産スタッフによる何らかの介入が求められる事象である。さらに生産工程に与える影響の大きさもそれぞれ異なる。

これらの前提に基づいて、PSSによって生み出される弾力性を定量的に評価する。

3.2.1 生産スタッフから生まれる弾力性との関わり

生産工程において生み出される弾力性のうち生産スタッフによるものは、業務に用いる技能の評価尺度である技能価値に含まれる技能・知識水準を用いて評価する。

手順は次のとおりである。まず式 (3.2) によって技能価値を求め、その中に含まれる技能・知識水準を生産スタッフ全員の重み付き技能表出時間を用いて加重平均し、平均的な技能・知識水準をその生産工程の弾力性としている (3.1 節参照)。この方法によって生産活動に従事する生産スタッフの数にかかわらずに弾力性を求めることができ、生産工程間の弾力性の比較ができる。生産スタッフによって生み出される弾力性 R_{PPP} を生産スタッフの技能・知識水準の重み付き技能表出時間を用いた加重平均として次の式であらわす。

$$R_{PPP} = \frac{\Sigma(\text{重み付き技能表出時間 } Tk \times \text{技能・知識水準 } V)}{\Sigma(\text{重み付き技能表出時間 } Tk)} \quad (3.13)$$

PSS は生産工程において生産スタッフの業務における技能を代替する機能を持つ。生産スタッフの業務をどの程度代替できるかによって PSS の要素機能の導入の可否を判断することができる [30]。すなわち生産スタッフの業務従事時間のうち、どれだけ代替できるかを PSS の要素機能の導入の前に想定する。式 (3.2) であらわすとおり、生産スタッフによって生み出される弾力性には、技能・知識水準を用いている。一方生産工程に PSS を導入してその機能によって生産スタッフの業務を代替させると、重み付き技能表出時間の一部を PSS が分担することになる。そこで PSS から生み出される弾力性を、重み付き技能表出時間の代替部分の割合を用いて、PSS によって代替される技能・知識水準として算出する。

3.2.2 生産支援システム（PSS）から生まれる弾力性の定量的評価の前提条件と手順

前提条件は次のとおりである。

1. 代替後も生産スタッフと PSS を合わせた技能価値は変わらない ($Q_{\text{After}} = Q_{\text{Before}}$)。
2. 生産スタッフの技能・知識水準は PSS による代替後も変わらないが、重み付き技能表出時間が減少するので技能価値は減る ($Q_{\text{After}}^{\text{PPP}} < Q_{\text{Before}}^{\text{PPP}}$)。

以上の考え方にに基づき、PSS によって生み出される弾力性の評価を次の手順で行なう。

1. PSS 導入前の業務における重み付き技能表出時間 Tk を生産スタッフごとに求める。
2. PSS の要素機能の導入によって代替可能な業務従事時間 C^{abc} を生産スタッフごとに求める。
3. 生産スタッフの技能を技術化して PSS に導入すると技能すなわち技能・知識水準がそのまま継承されるものとするので、「重み付き技能表出時間と技能・知識水準の比」と「代替可能重み付き技能表出時間と代替可能技能・知識水準の比」は等しい。したがって PSS による技能の代替前後で技能・知識水準と重み付き技能表出時間との間に次の関係が成り立つものとする。

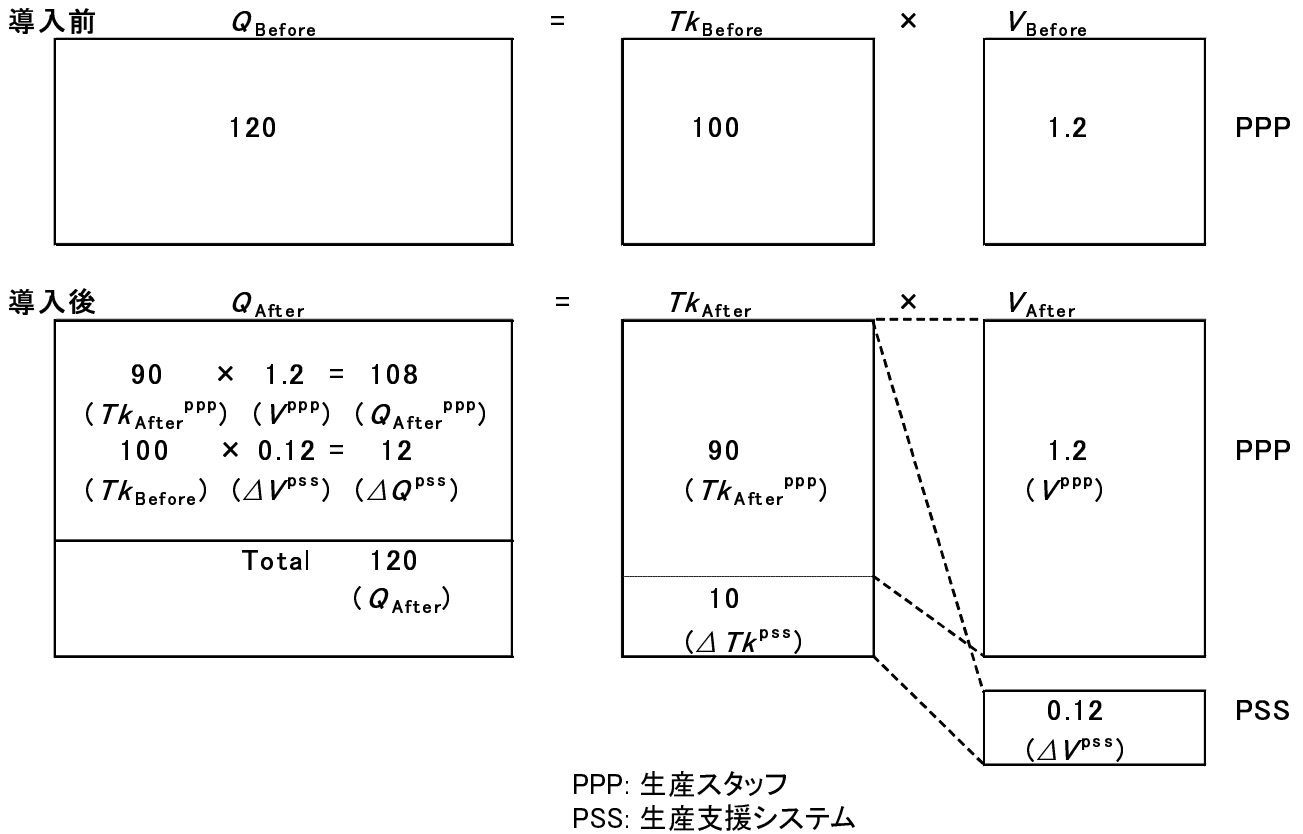


図 3.2: Replacement of daily routine by PSS

$$\begin{aligned}
 & \text{技能・知識水準 } V^* : \quad (\text{代替可能技能・知識水準 } \Delta V) \\
 & = \text{重み付き技能表出時間 } Tk^* : \quad (\text{代替可能重み付き技能表出時間 } \Delta Tk^*) \quad (3.14)
 \end{aligned}$$

上の式で*の付いた項は既知であり、式(3.14)の関係によって生産スタッフごとに ΔV を求めることができる。式(3.14)は次のようにあらわせる (ΔTk^* は付録 A.2 で示す式を用いて求める想定値である)。

$$\Delta V = V^* \cdot \frac{\Delta Tk^*}{Tk^*} \quad (3.15)$$

1. 式(3.15)によって生産スタッフごとに求めた代替可能技能・知識水準 ΔV を、代替可能重み付き技能表出時間 ΔTk^* を用いて加重平均して PSS から生まれる弾力性 R_{PSS} とする。ここで代替可能重み付き技能表出時間 ΔTk^* は生産スタッフごとに異なるので、生産工程全体の弾力性として加重平均をとる。
2. ここで得られた PSS によって生み出される弾力性は評価対象とした PSS の要素機能がある限りは変わらず、新たな要素機能の導入で生産スタッフの業務を代替するたびに追加分の弾力性を求め、それまでの弾力性に加算して更新する。

3.2.3 生産工程に導入した生産支援システム（PSS）における例

検討対象は汎用樹脂の試作設備（バッチ反応機）であり、3名の生産スタッフ（リーダー、サブリーダー、新人）が生産活動に従事している。この生産工程は1か月に23日間、1日あたり8時間稼働している。ここに導入されているPSSによって生み出される弾力性を次のように求める。

1. 生産スタッフそれぞれの職位に対する3つの技能のふさわしさ（職位別技能重視度） $W1_k$ ($k = 1, 2, 3$) を求める（5.3.1.1節参照）。
2. 次に生産スタッフの業務に含まれる3つの技能に関わる時間（技能表出時間 B_k および正規化した技能表出時間 BN_k ）とPSSの要素機能によって代替可能な生産スタッフの業務従事時間 C_k^{abc} とを用いて、代替可能技能表出時間 ΔT_k を求める（ B_k については表5.6、表5.7、表5.8参照、 BN_k 、 C_k^{abc} については付録A.2参照）。

重み付き技能表出時間 T_k を次のように求める（ $k = 1$: リーダ、 2 : サブリーダー、 3 : 新人）。

$$\begin{aligned} T1 &= B_1 \cdot W1_1 \\ &= (22.96, 10.575, 3.852, 13.076, 4.9115, 42.61, 27.563)^T \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} T2 &= B_2 \cdot W1_2 \\ &= (16.108, 33.26, 33.26, 8.2628, 4.549, 33.26, 27.73)^T \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} T3 &= B_3 \cdot W1_3 \\ &= (5, 30, 20, 0, 5, 60, 20)^T \end{aligned} \quad (3.18)$$

生産スタッフそれぞれの重み付き技能表出時間 T_k の大きさは次のように求められる。

$$\begin{aligned} T1D &= \sum_{i=1}^7 T1_i \\ &= 125.5475 \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} T2D &= \sum_{i=1}^7 T2_i \\ &= 156.4298 \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} T3D &= \sum_{i=1}^7 T3_i \\ &= 140 \end{aligned} \quad (3.21)$$

重み付き代替可能技能表出時間 ΔT_k は次のように求められる。

$$\begin{aligned}\Delta T1 &= C_1^{abc} \cdot (BN_1 \cdot W1_1) \\ &= (5.740, 7.8463, 10.5172)^T\end{aligned}\quad (3.22)$$

$$\begin{aligned}\Delta T2 &= C_2^{abc} \cdot (BN_2 \cdot W1_2) \\ &= (5.740, 7.8463, 10.5172)^T\end{aligned}\quad (3.23)$$

$$\begin{aligned}\Delta T3 &= C_3^{abc} \cdot (BN_3 \cdot W1_3) \\ &= (1, 3, 0)^T\end{aligned}\quad (3.24)$$

生産スタッフそれぞれの重み付き代替可能技能表出時間 ΔT_k の大きさは次のようにあらわせる。

$$\begin{aligned}\Delta T1D &= \sum_{i=1}^3 \Delta T1_i \\ &= 24.1035\end{aligned}\quad (3.25)$$

$$\begin{aligned}\Delta T2D &= \sum_{i=1}^3 \Delta T2_i \\ &= 20.2647\end{aligned}\quad (3.26)$$

$$\begin{aligned}\Delta T3D &= \sum_{i=1}^3 \Delta T3_i \\ &= 4.0\end{aligned}\quad (3.27)$$

このときの生産スタッフの技能・知識水準 V は次のように定める (V のとる値については5.3.1.2節参照のこと)。

$$\begin{aligned}V &= (v_1, v_2, v_3)^T \\ &= (1.2, 1.0, 0.8)^T\end{aligned}\quad (3.28)$$

PSS による代替可能技能・知識水準は次のように求められる。

$$\begin{aligned}\Delta v_1 &= \left(\frac{\Delta T1D}{T1D} \right) \cdot v_1 \\ &= 0.23038\end{aligned}\tag{3.29}$$

$$\begin{aligned}\Delta v_2 &= \left(\frac{\Delta T2D}{T2D} \right) \cdot v_2 \\ &= 0.12954\end{aligned}\tag{3.30}$$

$$\begin{aligned}\Delta v_3 &= \left(\frac{\Delta T3D}{T3D} \right) \cdot v_3 \\ &= 0.02286\end{aligned}\tag{3.31}$$

$$\begin{aligned}\Delta V &= (\Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3)^T \\ &= (0.23038, 0.12954, 0.02286)^T\end{aligned}\tag{3.32}$$

生産スタッフによって生み出される弾力性は、生産スタッフそれぞれの技能・知識水準を重み付き技能表出時間の大きさを用いて加重平均したものである。

そこで PSS によって生み出される弾力性も、同様に PSS によって代替可能な技能・知識水準を代替可能技能表出時間の大きさを用いて加重平均して求める。PSS によって生み出される弾力性を R_{PSS} とすると、次の式で求めることができる。

$$\begin{aligned}R_{PSS} &= \frac{\Delta V1 \cdot \Delta T1D + \Delta V2 \cdot \Delta T2D + \Delta V3 \cdot \Delta T3D}{\Delta T1D + \Delta T2D + \Delta T3D} \\ &= 0.17097\end{aligned}\tag{3.33}$$

ここで PSS の要素機能導入前後で技能価値の大きさが変わらないことを示す。PSS の要素機能によって代替可能な生産スタッフの業務従事時間の合計は $diagC_k^{total}$ で示すことができる (表 A.6、表 A.7、表 A.8 参照)。代替可能な技能表出時間 ($B'_k; k = 1, 2, 3$) は次のようにあらわせる。

$$B'_1 = \text{diag}C_1^{\text{total}} \cdot BN_1 = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 8.82 & 1.18 & 0 \\ 0.83 & 1.17 & 0 \\ 4 & 5.33 & 0.67 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

$$B'_2 = \text{diag}C_2^{\text{total}} \cdot BN_2 = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 11.25 & 3.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0.75 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

$$B'_3 = \text{diag}C_3^{\text{total}} \cdot BN_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 \\ 0.83 & 1.17 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.83 & 0.67 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0.25 \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

また、PSSで代替した後の技能表出時間 ($B''_k; k=1,2,3$) は次のようにあらわせる。

$$B_1'' = B_1 - B_1' = \begin{pmatrix} 30 & 0 & 0 \\ 8.82 & 1.18 & 0 \\ 0.83 & 1.17 & 0 \\ 4 & 5.33 & 0.67 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.37)$$

$$B_2'' = B_2 - B_2' = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 11.25 & 3.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0.75 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

$$B_3'' = B_3 - B_3' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 \\ 0.83 & 1.17 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.83 & 0.67 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0.25 \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

PSS による代替の前の技能価値 ($Q'_k : k = 1, 2, 3$) と PSS による代替後の技能価値 ($Q''_k : k = 1, 2, 3$) はそれぞれ次のように求めることができる。

$$\begin{aligned} Q'_1 &= v_1 \cdot B'_1 \cdot B1_1 \\ &= (6.89, 7.46, 0.77, 10.46, 1.18, 0, 0)^T \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} Q'_2 &= v_2 \cdot B'_2 \cdot B1_2 \\ &= (4.03, 12.45, 0, 2.48, 0.45, 0.83, 0)^T \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} Q'_3 &= v_3 \cdot B'_3 \cdot B1_3 \\ &= (0.8, 0.8, 0, 0, 0, 0.8, 0.8)^T \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} Q''_1 &= v_1 \cdot B''_1 \cdot B1_1 \\ &= (20.66, 5.23, 3.85, 5.23, 4.72, 51.13, 33.07)^T \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned} Q''_2 &= v_2 \cdot B''_2 \cdot B1_2 \\ &= (12.08, 20.79, 33.26, 5.78, 4.09, 32.43, 22.74)^T \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$\begin{aligned} Q''_3 &= v_3 \cdot B''_3 \cdot B1_3 \\ &= (3.2, 23.2, 16, 0, 4, 47.2, 15.2)^T \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} Q' &= \sum_{i=1}^7 Q'_{1i} + \sum_{i=1}^7 Q'_{2i} + \sum_{i=1}^7 Q'_{3i} \\ &= 363.85 \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} Q'' &= \sum_{i=1}^7 Q''_{1i} + \sum_{i=1}^7 Q''_{2i} + \sum_{i=1}^7 Q''_{3i} \\ &= 50.23 \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$Q' + Q'' = 414.18 \quad (3.48)$$

上の結果より、式 (3.46) の値と式 (3.47) の値とを加えたもの (式 (3.48)) と式 (3.11) の値の等しいことがわかる。

3.2.4 生産支援システム (PSS) から生まれる弾力性に関する結論

生産工程に PSS を導入することによって、省資源、省エネルギー、省力化が可能になる。その際に PSS の要素機能は生産スタッフの技能をもとに開発することが多く、PSS は生産スタッフの業務における技能を代替している。生産工程において生産スタッフが業務において用いる技能を「技能価値」という尺度を用いて評価し、それをもとに生産スタッフから生まれる弾力性を定量的に評価したが (3.1 節)、PSS は生産スタッフの技能を代替する機能を持つという前提に立って、PSS から生まれる弾力性も定量的に評価した。

ここで示した方法によると、PSS によって生産スタッフの業務における技能を代替し続けることによって PSS の生み出す弾力性は向上し続ける。一方で生産スタッフの生み出す弾力性を向上させるには教育・訓練によって技能・知識水準を高めること、あるいはよりいっそう重視度の高い技能に関わることが必要である。したがって PSS の要素機能によって生産スタッフの技能を代

替させて生産スタッフの業務の中に時間的な余裕を作り、それを利用した教育・訓練の機会を継続的に与えれば生産工程全体の弾力性向上が可能である。

3.3 生産装置から生まれる弾力性

生産工程は1) 生産スタッフ、2) PSS、3) 生産装置からなるが、それぞれ生産活動に関わる攪乱信号を抑制する能力である弾力性を持つ。この節では、3) の生産装置について弾力性を定量的に評価する方法について述べる。第2章で述べたように生産装置についての弾力性の管理対象としてはリスクアセスメントがある。特に作業のリスクアセスメントはすべての生産装置に関わっており、その結果を用いて生産装置から生まれる弾力性を定量的に評価する方法を提案する。

3.3.1 生産工程におけるリスクアセスメント

工場においては事故・災害の撲滅のために労働安全衛生マネジメントシステム（OSHMS）を導入することがある [31], [32]。OSHMS の中心をなすものはリスクアセスメントとその結果に基づくリスク低減措置の実施である。またリスクアセスメントの対象は、生産スタッフの作業、間接業務、化学物質などであるが、ここでは生産装置に関わるものとして、生産スタッフの作業に関するリスクアセスメントの結果を用いる。

3.3.1.1 生産工程における作業の特定

作業のリスクアセスメントに先立って、生産工程内での作業が抜け落ちることを防ぐために工場を起点として個々の作業までをツリーダイアグラムを用いて展開する。

3.3.1.2 単位作業に潜在する危険源の抽出

具体的な例として、次のような配管内のストレナーの交換作業を取り上げる [11]。

単位動作 1： バイパス側の液抜きバルブを閉める。

事故・災害： 開いていると、バルブ操作（危険源）で滞留液がとび出し被液（事故・災害）する。

単位動作 2： バイパス側のストレナーの出口、入口のバルブを順に開き、バイパス側にも流体を通す。

事故・災害： なし

単位動作 3： 交換する側の流路の入口、出口側の順にバルブを閉め、ストレナーへの送液を止める。

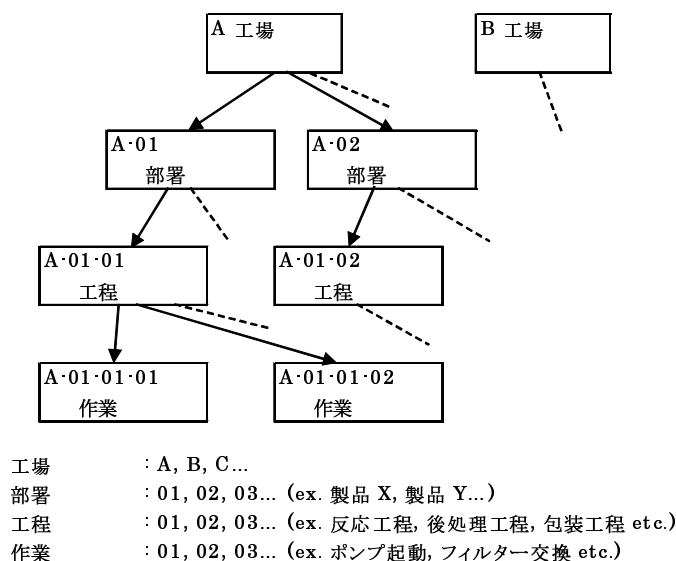


図 3.3: Tree diagram from Factory to Work

事故・災害： 出口側から閉めるとストレナーに圧力が残り、残液抜き操作（危険源）で残液がとび出し被液（事故・災害）する。

単位動作 4： 交換する側のストレナーの液抜きバルブを少しずつゆっくりと開け、ストレナーの残圧を下げながら残液を抜く。その際残液をこぼさないように大きめのバケツで受ける。

事故・災害： バケツが小さいと液抜き（危険源）中に液がこぼれ、被液（事故・災害）する。

単位動作 5： 残液が完全に抜けたらストレナー部のフランジを取りはずし、ストレナーを取り出して交換する。

事故・災害： フランジの取りはずしでレンチのサイズが合っていないとボルトをゆるめる操作（危険源）の際にレンチが空回りして転倒（事故・災害）する。

単位動作 6： フランジを再び取り付ける。

事故・災害： フランジの取り付けでレンチのサイズが合っていないとボルトを締める操作（危険源）の際に、レンチが空回りして転倒（事故・災害）する。

単位動作 7： ストレナー交換側の液抜きバルブを閉める。

事故・災害： なし

3.3.2 リスクアセスメントの結果を用いた弾力性評価

リスクアセスメントは生産工程内のすべての作業に対して行なわれ、作業の頻度、発生した場合に予想される被害の大きさをを用いてリスクを評価する。この結果を用いた弾力性評価では頻度が高いほど弾力性が小さく、被害が大きいのほど弾力性が小さい。ここで潜在するリスクの程度をあらわす行列を作る。この行列の成分の逆数を弾力性指標 IR と名付ける。

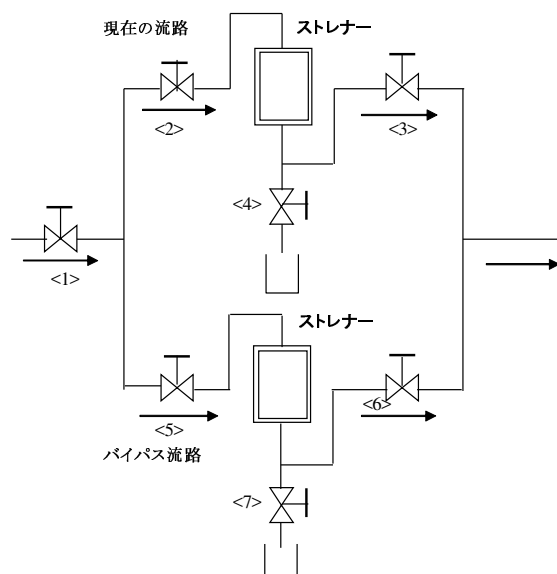


図 3.4: Structure of strainer

表 3.1: Degree of potential risk

頻度 ↑	大	5	10	15	20	25	
	4	4	8	12	16	20	
	3	3	6	9	12	15	
	2	2	4	6	8	10	
	小	1	1	2	3	4	5
		1	2	3	4	5	
		小	→ 被害の大きさ				大

なお頻度と被害の大きさの尺度は企業で規則を定めるものとする。また表において潜在するリスクの最小値は1で、最大値は25である。したがって弾力性指標 IR は0.04から1までの値をとる。また生産工程の作業の数は数百から数千に及ぶ場合があるが、弾力性指標 IR としては最小のもので生産工程を代表させる。生産工程から生まれる弾力性は生産スタッフから生まれる弾力性と弾力性指標 IR を組み合わせて（ここに示す例では掛け合わせている）次のようにあらわす。

$$R_{PU} = R_{PPP} \times \text{IR の最小値} \tag{3.49}$$

もし潜在リスクの程度が許容できないものならばリスク低減措置が実施される。したがって生産工程における潜在リスクの程度はだんだんと小さくなり、生産装置の弾力性指標 IR は次第に大きくなる。リスクアセスメントにおける評価結果には生産スタッフの技能・知識水準が影響を与える。したがって R_{PU} は R_{PPP} よりも大きくなることはないとして、 R_{PU} と R_{PPP} とを掛け合わせたものをを用いている。既に3.1節で求めた生産スタッフから生まれる弾力性が0.993の場合に、

もし IR が $1/16$ ならば R_{PU} は次のとおりである。

$$R_{PU} = 0.993 \times 1/16 = 0.062 \quad (3.50)$$

3.3.3 生産工程の総合的な弾力性

この章では、生産工程を構成する3つの要素である1)生産スタッフ、2)PSS、3)生産装置について、それぞれが生み出す弾力性を定量的に求めた。これらのうちで最も重要な弾力性は生産スタッフの技能・知識水準から生まれる弾力性である。この弾力性の大きさは他のものに対して影響を与えるので向上させるように努力する必要がある。

また PSS から生まれる弾力性はその機能に変化がなければ変わらず、生産スタッフの技能を技術化して要素機能を増やすたびに向上する。したがってつねに技能の技術化を試みて、その結果生まれる生産スタッフの余裕時間を利用して技能・知識水準の向上をはかることが必要である。さらに生産装置の弾力性に関しては、生産工程における作業のリスクアセスメントの結果によって決まるので、潜在するリスクの程度が許容できないほど大きい場合にリスク低減措置を講じることによって弾力性が向上する。

以上より、生産工程の総合的な弾力性を高く保つためには、以下のような方策が有効である。

- 生産スタッフに対する定期的なしかも継続的な教育・訓練を行ない評価する。
- 生産スタッフはその職位にふさわしい業務に従事することによって生産に関わるグループ全体の業務従事時間を短縮する。
- 生産スタッフに業務上の余裕時間を生み出すためにその技能をできるかぎり技術化して、PSS に導入する。
- 生産スタッフの技能を技術化し PSS に導入して肩代わりさせることで、生産スタッフが技能を向上させたり新たな技能を身につけたりする時間を生み出す。
- リスクアセスメントの結果に応じて必要なリスク低減措置を速やかに実施する。

3.4 考察と結論

この章では生産工程から生まれる弾力性について1)生産スタッフ、2)PSS、3)生産装置のそれぞれから生まれるものを定量的に評価する方法を提案した。1)については、日々の業務において実測した業務従事時間を用いて生産スタッフの技能・知識水準から求め、2)については、生産スタッフの技能に基づいて開発した PSS の要素機能によって生産スタッフの生み出す弾力性が受け継がれるものとして求め、3)については、生産スタッフから生み出される弾力性と生産スタッフの作業に関するリスクアセスメントの結果から求めた。いずれの場合においても、生産工程におけるヒューマンファクターズである生産スタッフの技能・知識水準が生産工程の弾力性の大きさ

の決め手になっている。そのためには教育・訓練が必須であるが企業によってその内容は異なる。その内容を決めるためにはまず全業務の分析が必要であり、ここでの提案では技能・知識水準は個人の評価と結びつくので教育・訓練についての平等性、公平性が保たれていなければならない。したがって企業の責任はきわめて大きい。安全な生産活動を推進するための方策の一つとしてリスクアセスメントが注目を集めているが、それに加えて弾力性向上のための教育・訓練体系の充実も必要である。また教育・訓練の実施には企画、立案、実行のための指導的な立場のリーダーが不可欠である。企業は長期的な視野に立って計画的に取り組まなければならない。

第4章 生産工程での生産スタッフの業務における 時間的余裕の創出

弾力性の向上のためには生産スタッフの技能・知識水準を高めることが最も有効である。そこで教育・訓練が必要であり結果を正しく評価することが企業の役割である。そのためにはまず生産スタッフの業務に余裕時間を生み出すことが必要である。生産活動に携わるグループに属する生産スタッフにはそれぞれ職位があり、職位にふさわしい業務を行なうことによって業務ごとに要求される技能価値を短い時間で実現できる。この章では一つのグループ内で業務分担を見直すことと複数のグループ間で人員配置を変えることによってグループ全体の業務時間が短縮できること、すなわち時間的な余裕が生まれることを示す。

4.1 業務分担最適化(時間的余裕の創出：1グループの場合)

この節ではある生産工程における生産活動に携わるグループにおける生産スタッフの業務分担を最適化する方法を検討する。ある時点での技能価値を維持しながら業務従事時間を最小化するように業務分担を決める。

4.1.1 1グループの業務分担最適化の概要

代表的な装置産業である化学工業において生産工程は生産を支える重要な要素である。またそこでの生産性は生産に携わる生産スタッフの知識や技能の水準に左右される [33], [34], [10]。これまで生産工程における生産スタッフの知識や技能を定量的に評価することは難しいと考えられてきたが、技能を3つに区分したうえでそれぞれの業務において業務従事時間を実測し、各技能への時間の割り振りを自己申告によって行なって技能表出時間を求める。技能表出時間をもとに技能の大きさ(以下、技能価値と呼ぶ)を求めることができる [9], [15]。この方法を用いて化学プラントの生産工程における生産活動に関わる技能価値を求めることができるが、生産スタッフの知識や技能の水準には一人ひとり違いがあるのでどの業務を誰が受け持つかによって業務従事時間の合計(技能表出時間の合計)にも違いが出る。そこである生産工程で必要とする技能価値を全体として最小の業務従事時間で実現することができれば、生産スタッフは生まれた余裕時間を新たな技能の修得や既に身につけた技能の水準向上にあてることができ生産性向上も見込める。さらに生産スタッフの知識を向上させることもできる。また安全性を強化するという目的で生産工程の弾力性を向上させるための管理項目を規定する弾力性行列が提案されており [19] (図 1.1 参照)、ここでは攪乱信号への対応には生産スタッフのグループの役割が重要であるとされている。この節では化学工業における生産工程について、技能・知識に基づいて生産スタッフがその職位にふさわしい技能を発揮することを目指すためのグループ内での業務分担の最適化を検討する。ある時点における1グループ内での技能価値を保ちながら業務従事時間を最小化するように業務分担を変更すれば余裕時間が生み出せ、それを用いて生産スタッフの訓練・教育による技能・知識水準の向上がはかれる。それは弾力性向上に対する生産スタッフの貢献度を高めるという結果につながる。

4.1.2 生産スタッフの技能の定量評価

生産スタッフの技能を次のように3つに体系化する。

1. オペレーション技能；生産スタッフが手や足を使う技能
2. メモリ技能；生産スタッフが記憶力を使う技能
3. コミュニケーション技能；生産スタッフが口や耳を使って相互間の意思疎通をはかる技能

技能の定量的評価は次の手順で行なう。まず生産スタッフの業務従事時間を実測し、3つの技能にどれだけ時間を費やしているかを求める(技能表出時間)。さらに各技能が生産スタッフそれぞれ

れの職位にふさわしいものであるかどうか(職位別技能重視度)によって技能表出時間に重み付けする。それに加えて生産スタッフそれぞれの持つ技能・知識水準によって再度重み付けして技能価値とする(具体的な計算方法は5.1節参照)。技能・知識水準の職位に基づく要素は個人の経験や能力によって決まる労務費につながる固定的な指標であり、職務に基づく要素は現在の職務が職位に応じて求められる技能・知識水準にふさわしいものかどうかをあらわしている[15]。

したがって生産スタッフにおける技能価値は次のようにあらわすことができる。

$$\begin{aligned} \text{技能価値}(Q) &= \text{技能表出時間}(B) \times \text{職位別技能重視度}(W) \\ &\quad \times \text{技能・知識水準}(V) \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\text{技能・知識水準}(V) = \text{職位に基づく要素} + \text{職務に基づく要素} \quad (4.2)$$

ここで技能の評価の対象となる生産工程では3名の生産スタッフが生産に携わっている(リーダー、サブリーダー、新人)。このプラントは昼間のみ稼働し、1か月の稼働日数は23日、1日の平均稼働時間は8時間である。

評価の対象になる業務は次の7種類である。

- A) プラントの稼働状況の監視と自動制御における設定値変更
- B) 運転管理レポートへのデータ入力
- C) 運転管理レポートの編集
- D) 生産計画の作成
- E) プロセス異常・設備故障の原因究明
- F) 設備の点検、プラント稼働の準備作業
- G) グループ内の作業打ち合わせ

3名のスタッフそれぞれの1ヶ月間の業務を分析し、その中に含まれる3種類の技能に関わる時間を調べた結果を表4.1に示す。

ここでは、業務に従事する時間の合計はリーダーが158時間/月、サブリーダーが175時間/月、新人が140時間/月である。したがってグループ全体の合計は473時間/月である。また3名の生産スタッフの技能価値の合計 QV (単位は"hour")は次のとおりである(QV の求め方は5.3節参照のこと)。

$$QV = 414.08 \quad (4.3)$$

表 4.1: Matrix of work hours devoted to skills B_1, B_2, B_3 [h/month]

業務従事時間(実測値)と技能表出時間									
技能	リーダー			サブリーダー			新人		
	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
A)	40	0	0	20	0	0	5	0	0
B)	15	2	0	30	10	0	20	10	0
C)	5	1	0	30	10	0	15	5	0
D)	6	8	1	8	2	0	0	0	0
E)	0	0	0	0	5	0	5	0	0
F)	40	20	0	30	10	0	50	10	0
G)	0	10	10	0	10	10	0	15	5
合計	158			175			140		
総合計	473								

4.1.2.1 技能価値を維持しながら技能表出時間を最小化する方法

この生産工程において式(4.3)の技能価値を維持しながら、3名の生産スタッフの技能表出時間の合計が最小になるような7つの業務の分担を考える。

ここで3名の生産スタッフの技能表出時間をあらわす行列を $B^{(i)}$; ($i = 1$, リーダ; $i = 2$, サブリーダー; $i = 3$, 新人)、生産スタッフごとの職位別技能重視度から求めた重みベクトルを $W1^{(i)}$; ($i = 1, 2, 3$)、また生産スタッフの技能・知識水準をあらわすベクトルを V とする。さらに合計が最小である技能表出時間をあらわす行列を $X^{(i)}$; ($i = 1, 2, 3$) とする。

ここで実測値に基づく技能価値を Q 、最適値を Q' とする。

$$Q = (B^{(1)} \cdot W1^{(1)} \quad B^{(2)} \cdot W1^{(2)} \quad B^{(3)} \cdot W1^{(3)}) \cdot V \quad (4.4)$$

$$Q' = (X^{(1)} \cdot W1^{(1)} \quad X^{(2)} \cdot W1^{(2)} \quad X^{(3)} \cdot W1^{(3)}) \cdot V \quad (4.5)$$

これらの関係を用いて解を求める(詳細は付録A.3参照のこと)。

制約条件と目的関数は次のとおりである。

制約条件

1. 7つの個別業務のそれぞれにおいて技能価値が減らないこと (Q' の成分がそれぞれ Q の成分より小さくないこと)。
2. 3名の生産スタッフについてそれぞれの技能表出時間の合計が増えないこと。
3. 求める技能表出時間は正の整数(1~50)とする。また実測値が0の場合は、最適値を求める場合にも0とする。したがってある生産スタッフについて、ある業務で新たに技能を増やすことはない。

目的関数

生産スタッフ3名分の技能表出時間の合計とし、その値が最小になる生産スタッフごとの業務別、技能別の技能表出時間を解とする。

4.1.2.2 最適化計算の結果

制約条件をみだし目的関数値を最小化する生産スタッフ 3 名の業務分担を求めた。最適化以前の業務分担は表 4.1 に示す。

1. 各生産スタッフの一つの業務の技能ごとの従事時間の範囲を 1 時間から 50 時間の間とした場合

業務に従事する時間 (技能表出時間) がリーダー 112 時間、サブリーダー 17 時間、新人 85 時間となり合計 367 時間となった (最適化前は 473 時間)。すなわち技能価値を減らさずに業務に従事する時間を 3 名について、それぞれ、46、5、55 時間、合計で 106 時間減らすことができた (表 4.2)。なお技能価値は最適化前には、408.18 (hour) で、最適化後に 410.52 (hour) である。

表 4.2: Optimized work hours devoted each skill between 1 and 50

Case1 技能表出時間									
技能	リーダー			サブリーダー			新人		
	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
A)	1	0	0	36	0	0	23	0	0
B)	1	49	0	1	10	0	1	1	0
C)	2	42	0	1	1	0	1	1	0
業務 D)	1	1	10	1	1	0	0	0	0
E)	0	0	0	0	5	0	5	0	0
F)	1	1	0	50	31	0	50	1	0
G)	0	2	1	0	32	1	0	1	1
合計	112			170			85		
総合計	367								

2. 各生産スタッフの一つの業務の技能ごとの従事時間の範囲を 3 時間から 30 時間の間とした場合

1. の例では生産スタッフごとの業務従事時間の減少にばらつきがあったので業務従事時間の技能ごとの制約を 3 時間から 30 時間の間にすると、合計が 403 時間となり (最適化前は 473 時間)、3 名についてそれぞれ 35、5、3 時間、合計で 70 時間減らすことができた (表 4.3 参照)。最適化前と比べると 15% 減少している。この場合技能価値は最適化前には、408.18 (hour) で最適化後は 410.15 (hour) である。

表 4.3: Optimized work hours devoted each skill between 3 and 30

Case2 技能表出時間									
技能	リーダー			サブリーダー			新人		
	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
A)	3	0	0	30	0	0	27	0	0
B)	3	30	0	3	28	0	3	3	0
C)	5	30	0	3	9	0	3	3	0
業務 D)	4	3	6	3	3	0	0	0	0
E)	0	0	0	0	5	0	5	0	0
F)	3	3	0	30	25	0	30	30	0
G)	0	30	3	0	28	3	0	3	3
合計	123			170			110		
総合計	403								

4.1.3 生産スタッフの入れ替えに関する考察

生産工程ではしばしば生産スタッフの入れ替えが行なわれる。最適化を検討した2)の場合の制約条件を用いて生産スタッフの入れ替えがどのような結果をもたらすかについて調べる。

1. 新人を他のグループのサブリーダーで入れ替えた場合

計算結果2)の制約条件を用いると技能・知識水準が上がった分だけ業務に従事する時間の合計が403時間から398時間に5時間減少している(表4.4参照)。技能価値の合計は409.86(hour)である。

表 4.4: Replacement of newcomer by deputy-supervisor of another team

技能表出時間: 新人の他のチームのサブリーダーによる置き換え									
技能	リーダー			サブリーダー			サブリーダー		
	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
A)	3	0	0	29	0	0	28	0	0
B)	4	30	0	3	3	0	3	27	0
C)	3	30	0	3	3	0	3	10	0
業務 D)	4	3	6	3	3	0	0	0	0
E)	0	0	0	0	5	0	5	0	0
F)	3	5	0	30	19	0	30	30	0
G)	0	30	3	0	27	3	0	4	3
合計	124			131			143		
総合計	398								

2. サブリーダーを他のグループの新人で入れ替えた場合

同じく計算結果2)の制約条件を用いると技能・知識水準が下がった分だけ業務従事時間の合計が403時間から413時間に10時間増加している(表4.5参照)。技能価値の合計は409.66(hour)である。

表 4.5: Replacement of deputy supervisor by newcomer of another team

技能表出時間: サブリーダーの他のチームの新人による置き換え									
技能	リーダー			新人			新人		
	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
A)	3	0	0	28	0	0	29	0	0
B)	4	30	0	3	30	0	3	4	0
C)	4	30	0	3	5	0	9	3	0
業務 D)	4	3	6	3	3	0	0	0	0
E)	0	0	0	0	5	0	5	0	0
F)	3	4	0	30	28	0	30	30	0
G)	0	30	3	0	29	3	0	3	3
合計	124			170			119		
総合計	413								

4.1.4 1グループにおける業務分担最適化に関する結論

現時点における日々の業務について、現在の担当者が業務にふさわしいかどうかの定量的評価は行なわれていない。しかし各業務においてどのような技能が使われているかを実測すれば現在

4.2. 技能価値に基づく生産工程間の人員配置最適化（時間的余裕の創出：3グループの場合） 55

の担当者がその業務にふさわしいかどうか判断できる。そこで現在の業務の担当を見直して最もふさわしい担当者に担当させることによって、業務全体の従事時間がどの程度減少するかについて検討した。その結果グループ全体の技能価値（生産スタッフが業務において発揮する技能の大きさ）を減少させることなく業務に従事する時間を15%以上減らせることがわかった。したがって業務分担の変更によって生まれた余裕時間を用いて工場の生産性向上が可能になる。生産スタッフは得られた余裕を技能向上や新たな技能の修得にあてれば生産工程の弾力性の向上が見込める。

4.2 技能価値に基づく生産工程間の人員配置最適化（時間的余裕の創出：3グループの場合）

この節ではいくつかの生産工程で業務に従事する複数のグループの人員配置を変更する場合に、業務価値を減らすことなく全体の業務従事時間を最小化する方法を検討する。

4.2.1 生産工程間の人員配置最適化の概要

化学工場においては生産工程（化学プラント）ごとに複数の生産スタッフからなるグループによって生産活動が行なわれている。その際に生産スタッフ一人ひとりの技能・知識水準が異なるので、その生産工程において必要とされる技能・知識にふさわしい配置になっているかどうかの判断が難しい。また生産スタッフの技能・知識に応じた生産工程への配置の最適化は既に試みられているが [33], [34]、生産スタッフのスキルレベルで評価しているため個々の生産工程の持つ特性を反映しにくい。一方で化学プラントにおいて生産スタッフが業務に従事する時間を測定し（業務従事時間）、その結果を3つに体系化した技能に振り分けて（技能表出時間と呼ぶ。以下略称として WHDS（Work Hours Devoted to Skills の略）を用いることがある）生産工程の稼働に必要な技能の大きさ（技能価値）を定量的に求めることが可能である [9]。この技能価値を生産工程の特性をあらわす指標として用いることができる。さらに各グループにおいては複数のスタッフがそれぞれ複数の業務に携わっているが、技能価値を減らすことなく業務従事時間を最小化する業務配分を求めることができる（4.1節参照）。そこで、技能価値を増やしながらか業務従事時間を減らすように生産スタッフを再配置すれば、生まれた時間的余裕を用いて生産のための技能・知識水準を向上させ生産工程の弾力性を高めることが可能になる。

ここで検討の対象とする生産工程はすでに技能の定量的評価を行なっているが、この生産工程で定量的に求めた技能価値に基づいて、複数の生産工程で業務に携わる複数のグループにおいて生産スタッフを再配置して全体の技能価値を増やしながらか業務従事時間を減らせることを例で示す。

4.2.2 複数の生産工程における生産スタッフ配置の最適化

複数の生産工程からなる化学工場において各生産工程の生産活動に携わるグループ内で、あるいはグループ間で、生産性向上のために生産スタッフの入れ替えを行なうことがある。それを想

定して各生産スタッフの業務従事時間（技能表出時間）とそのとき実現している技能価値に基づく最適な人員配置の決定について検討する。

4.2.2.1 生産スタッフ2名の入れ替えにおける前提

生産スタッフの入れ替えにあたっての前提として入れ替えの対象となる生産スタッフを P1、P2 とすると、生産スタッフ P1（P2）が現在の業務で実現している技能価値は別の生産スタッフ P2（P1）に替っても減らないようにする。

生産スタッフ P1（P2）がそれまで自分が実現していた技能価値よりも高い技能価値を新たな業務で求められる場合には技能表出時間が増えてもよい。

入れ替わる生産スタッフ P1 の現在の技能価値を Q_1 、P2 の現在の技能価値を Q_2 とする。このとき、 $Q_1 > Q_2$ ならば、P1 は入れ替え後の保証水準として Q_2 だけ技能価値を発揮すれば当面の役割を果たすことになるが、自身の持つこれまでの技能価値が $(Q_1 - Q_2)$ だけ低下する。したがって P1 は新たな業務において技能価値を Q_1 だけ発揮して従来よりも高めるように努める必要がある（この業務において技能表出時間が増える可能性があるが、それは認める）。すなわち保証水準を Q_1 まで高める。また P2 は現在の業務における技能価値 Q_2 を保証水準として、新たな業務において前任者の実現していた技能価値 Q_1 まで向上させるように努めることが求められる。すなわち保証水準を P1 は Q_1 、P2 は Q_2 まで高めることができれば、P1、P2 がいずれも新たな保証水準の技能価値を実現した状態となり新たな均衡状態に達している。この判断基準を用いて技能価値を向上させることを目指す。すなわち P1、P2 ともに新たな業務についての新たな技能価値（技能価値向上の見込み値）の実現が、P1、P2 にとっての努力目標となる。 $Q_1 < Q_2$ の場合も同様である。

4.2.2.2 入れ替えの対象者の組み合わせの決定について

生産スタッフの入れ替えにおいて P1、P2 の2名の組み合わせを作る方法として次の2つがある。

1. 入れ替えの対象となる P1、P2 を事前に決める。
2名ずつの組み合わせの決め方に選択の余地はない。
2. 対象者を複数選び、入れ替えによる技能価値向上の見込み値が全体として最大となる2名ずつの組み合わせを求める。
対象者が n 名ならばそのうちの2名ずつについて前節で述べた技能価値向上の見込み値を求め、その値の n 名分の和が最大になる組み合わせを求める。2名ずつの組み合わせとして可能なものは $n!$ とおりあり、その中から解を求める。もし複数の解が得られたら業務従事時間（技能表出時間）の合計が最小である解を生産スタッフ入れ替えの第1段階における解とする。

4.2. 技能価値に基づく生産工程間の人員配置最適化（時間的余裕の創出：3グループの場合） 57

4.2.2.3 人員配置の最適化（第1段階）

すでに提案したある生産工程における生産スタッフのグループ内での最適業務分担を求める例（4.1節）におけるグループに、さらに2つのグループを加えた合計3つのグループを対象として検討する。

表 4.6 において、IDno. 101, 102, 103, 104 の4名の生産スタッフが入れ替えの対象者である。

表 4.6: Current WHDS (B) and VOS (Q) of three groups

人員配置変更前				オペレーション	メモリー	コミュニケーション	WHDS合計	技能価値
G.no.	ID no.	i	v	b^i_1	b^i_2	b^i_3	b^i_{total}	Q^i
1	1	1	1.2	91	41	26	158	166,34
	11	2	1.0	118	47	10	175	151,43
	101	3	0.8	95	40	5	140	112,00
	b^i_{total} $k; (k=1,2,3)$			304	128	41		
	b^i_{total} $total, Q^i_{total}$						473	429,77
2	2	1	1.2	98	45	30	173	184,39
	12	2	1.0	115	50	10	175	151,74
	102	3	0.8	100	50	15	165	132,00
	103	4	0.8	90	50	5	145	116,00
	b^i_{total} $k; (k=1,2,3)$			403	195	60		
b^i_{total} $total, Q^i_{total}$						658	584,13	
3	3	1	1.2	100	50	25	175	181,02
	13	2	1.0	110	45	25	180	163,62
	104	3	0.8	80	60	10	150	120,00
	b^i_{total} $k; (k=1,2,3)$			290	155	60		
b^i_{total} $total, Q^i_{total}$						505	464,64	
WHDS合計, 技能価値合計							1636	1478,54

■ 入れ替え対象者

4.2.2.4 人員配置の最適化（第1段階）の手順

表 4.6 の網かけ部分が入れ替えの対象者である。いずれも新人レベルの生産スタッフで、どのグループへの配置も可能である。入れ替えの対象となる2名ずつの組み合わせは次のように求める。

1. 入れ替えの結果対象者4名の技能価値向上の見込み値の合計が最大になるような2名ずつの組み合わせを求める（表 4.7 参照）。
2. 生産スタッフ P1 と P2 の入れ替えにあたって技能別に技能表出時間を求める手順は次のとおりである。

生産スタッフの技能価値は次の式であらわすことができる。

表 4.7: All pairs of personnel reallocation (24 pairs)

入れ替え後の組み合わせ				Q_{101new}	Q_{102new}	Q_{103new}	Q_{104new}	Q_{total}	
	101	102	103	104	112	132	116	120	480
	101	102	104	103	112	132	120	120	484
	101	103	102	104	112	132	132	120	496
	101	103	104	102	112	132	120	132	496
	101	104	102	103	112	132	132	120	496
	101	104	103	102	112	132	116	132	492
Case2	102	101	103	104	132	132	116	120	500
	102	101	104	103	132	132	120	120	504
	102	103	101	104	132	132	116	120	500
Case3	102	103	104	101	132	132	120	120	504
	102	104	101	103	132	132	116	120	500
	102	104	103	101	132	132	116	120	500
	103	101	102	104	116	132	132	120	500
	103	101	104	102	116	132	120	132	500
	103	102	101	104	116	132	116	120	484
	103	102	104	101	116	132	120	120	488
	103	104	101	102	116	132	116	132	496
	103	104	102	101	116	132	132	120	500
Case4	104	101	102	103	120	132	132	120	504
	104	101	103	102	120	132	116	132	500
	104	102	101	103	120	132	116	120	488
	104	102	103	102	120	132	116	132	500
	104	103	101	102	120	132	116	132	500
Case1	104	103	102	101	120	132	132	120	504

$$\text{技能価値 } Q = \text{技能表出時間 } b \times \text{職位別技能重視度 } w1 \times \text{技能} \cdot \text{知識水準 } v \quad (4.6)$$

入れ替え前の P1 の業務における技能価値を Q_{1old} 、P2 の業務における技能価値を Q_{2old} 、入れ替え後の P2 の技能価値を Q_{1new} (P2 は入れ替え前の P1 の業務を行なっている)、P1 の技能価値を Q_{2new} (P1 は入れ替え前の P2 の業務を行なっている) とする。ここで、 b_{ij} ; ($i = 1$: 入れ替え前の P1 の業務, $i = 2$: 入れ替え前の P2 の業務), $j = 1, 2, 3$: 技能区分)、 $w1_j$; ($j = 1, 2, 3$: 技能区分)、 v_i ; ($i = 1$: P1, $i = 2$: P2) である。

$Q_{1old} \geq Q_{2old}$ ならば $Q_{1new} = Q_{1old}$ 、 $Q_{2new} = Q_{1old}$ になるように b_{ijnew} を決める。

$$\begin{aligned} Q_{1new} &= (b_{11} \cdot w_{11} + b_{12} \cdot w_{12} + b_{13} \cdot w_{13}) \cdot v_1 \\ &= \left(\frac{v_1}{v_2} \cdot b_{11} \cdot w_{11} + \frac{v_1}{v_2} \cdot b_{12} \cdot w_{12} + \frac{v_1}{v_2} \cdot b_{13} \cdot w_{13} \right) \cdot v_2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$b_{11new} = \frac{v_1}{v_2} \cdot b_{11} \quad (4.8)$$

$$b_{12new} = \frac{v_1}{v_2} \cdot b_{12} \quad (4.9)$$

$$b_{13new} = \frac{v_1}{v_2} \cdot b_{13} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} Q_{2new} &= (b_{21} \cdot w_{11} + b_{22} \cdot w_{12} + b_{23} \cdot w_{13}) \cdot v_2 \cdot \frac{Q_{1old}}{Q_{2old}} \\ &= \left(\frac{v_2}{v_1} \cdot b_{21} \cdot w_{11} + \frac{v_2}{v_1} \cdot b_{22} \cdot w_{12} + \frac{v_2}{v_1} \cdot b_{23} \cdot w_{13} \right) \cdot \frac{Q_{1old}}{Q_{2old}} \cdot v_1 \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$b_{21new} = \frac{v_1}{v_2} \cdot b_{21} \cdot \frac{Q_{1old}}{Q_{2old}} \quad (4.12)$$

$$b_{22new} = \frac{v_1}{v_2} \cdot b_{22} \cdot \frac{Q_{1old}}{Q_{2old}} \quad (4.13)$$

$$b_{23new} = \frac{v_1}{v_2} \cdot b_{23} \cdot \frac{Q_{1old}}{Q_{2old}} \quad (4.14)$$

$Q_{1old} < Q_{2old}$ ならば $Q_{1new} = Q_{2old}$, $Q_{2new} = Q_{2old}$ になるように b_{ijnew} を決める。

$$\begin{aligned} Q_{1new} &= (b_{11} \cdot w_{11} + b_{12} \cdot w_{12} + b_{13} \cdot w_{13}) \cdot v_1 \cdot \frac{Q_{2old}}{Q_{1old}} \\ &= \left(\frac{v_1}{v_2} \cdot b_{11} \cdot w_{11} + \frac{v_1}{v_2} \cdot b_{12} \cdot w_{12} + \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{Q_{2old}}{Q_{1old}} \cdot b_{13} \cdot w_{13} \right) \cdot v_2 \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$b_{11new} = \frac{v_1}{v_2} \cdot b_{11} \cdot \frac{Q_{2old}}{Q_{1old}} \quad (4.16)$$

$$b_{12new} = \frac{v_1}{v_2} \cdot b_{12} \cdot \frac{Q_{2old}}{Q_{1old}} \quad (4.17)$$

$$b_{13new} = \frac{v_1}{v_2} \cdot b_{13} \cdot \frac{Q_{2old}}{Q_{1old}} \quad (4.18)$$

$$Q_{2new} = (b_{21} \cdot w_{11} + b_{22} \cdot w_{12} + b_{23} \cdot w_{13}) \cdot v_2 \quad (4.19)$$

$$= \left(\frac{v_2}{v_1} \cdot b_{21} \cdot w_{11} + \frac{v_2}{v_1} \cdot b_{22} \cdot w_{12} + \frac{v_2}{v_1} \cdot b_{23} \cdot w_{13} \right) \cdot v_1 \quad (4.20)$$

$$b_{21new} = \frac{v_2}{v_1} \cdot b_{21} \quad (4.21)$$

$$b_{22new} = \frac{v_2}{v_1} \cdot b_{22} \quad (4.22)$$

$$b_{23new} = \frac{v_2}{v_1} \cdot b_{23} \quad (4.23)$$

したがって、入れ替え後の技能表出時間の見込み値は、上で求めた $b_{11new} \sim b_{23new}$ である。

4.2.2.5 人員配置最適化（第1段階）の計算結果

入れ替えの対象者として4名選び（表4.6におけるIDno.101,102,103,104）、4名をどのように組み合わせるかによって4名分の技能価値の合計は変化する。現状維持も含めて入れ替えの組み合わせは全部で24とおりあるので、それらについて技能価値の合計を比較すると4とおりの組み合わせで最大になる（表4.7参照；この表の1番上の組み合わせは、現状のままの場合である）。この4つの組み合わせの中から実際の組み合わせを選ぶ。ただし技能表出時間は正の整数値としているので、計算結果として得られた B_1, B_2, B_3 は小数点以下を切り捨てている。24とおりの中から表4.7の4つの組み合わせ（Case1, Case2, Case3, Case4）を選ぶ。このとき、入れ替えの対象となる4名分の技能価値は480から504に増えている。

表 4.8: Optimal pairs of new comers

計算結果

Case	G. no.	ID no.	b_{1old}	b_{2old}	b_{3old}	b_{total}	Q_{old}
		P1 P2					
	1	101 101	95	40	5	140	112
	2	102 102	100	50	15	165	132
		103 103	90	50	5	145	116
	3	104 104	80	60	10	150	120
	Total					600	480
			b_{1new}	b_{2new}	b_{3new}		Q_{new}
1	1	101 104	102	43	5	150	120
	2	102 103	100	50	15	165	132
		103 102	102	57	6	165	132
	3	104 101	80	60	10	150	120
	Total					630	504
2	1	101 102	112	47	6	165	132
	2	102 101	100	50	15	165	132
		103 104	93	52	5	150	120
	3	104 103	80	60	10	150	120
	Total					630	504
3	1	101 102	112	47	6	165	132
	2	102 103	100	50	15	165	132
		103 104	93	52	5	150	120
	3	104 101	80	60	10	150	120
	Total					630	504
4	1	101 104	102	43	5	150	120
	2	102 101	100	50	15	165	132
		103 102	102	57	6	165	132
	3	104 103	80	60	10	150	120
	Total					630	504

4.2.2.6 人員配置最適化（第2段階：グループごとの技能表出時間最小化）の手順と結果

第1段階で示したように3つのグループ全体でみた人員配置の最適化によって技能価値向上が見込めるが、さらに4.1節で示すようにグループごとに業務分担を調整して技能表出時間を最小化

4.2. 技能価値に基づく生産工程間の人員配置最適化（時間的余裕の創出：3グループの場合） 61

することができる。ただし 4.1 節においては 7 つの個別業務を想定しているが、この節では一つにまとめている。

生産スタッフの技能表出時間をあらわす行列を $B^{(i)}$; ($i = 1, 2, 3, 4$)、生産スタッフごとの職位別技能重視度から求めた重みベクトルを $W1^{(i)}$; ($i = 1, 2, 3, 4$)、また、生産スタッフの技能・知識水準をあらわすベクトルを V とする。また、合計が最小である技能表出時間をあらわす行列を $Y^{(i)}$; ($i = 1, 2, 3, 4$) とする。さらに技能価値をあらわす行列を実測値に基づくものを Q 、最適値に対するものを Q' とする。

Q 、 Q' は次のようにあらわせる。

$$Q = (B^{(1)} \cdot W1^{(1)} B^{(2)} \cdot W1^{(2)} B^{(3)} \cdot W1^{(3)} B^{(4)} \cdot W1^{(4)}) \cdot V \quad (4.24)$$

$$Q' = (Y^{(1)} \cdot W1^{(1)} Y^{(2)} \cdot W1^{(2)} Y^{(3)} \cdot W1^{(3)} Y^{(4)} \cdot W1^{(4)}) \cdot V \quad (4.25)$$

これらの関係を用いて解を求める（詳細は付録 A.4 参照のこと）。

制約条件は次のとおりである。

1. グループにおける生産スタッフの技能価値の合計が減らないこと。
2. 生産スタッフごとの技能表出時間の合計が上限値を上回らないこと。
3. グループにおける 3 つの技能それぞれの技能表出時間の合計が上限値を上回らないこと。
4. 入れ替え対象である生産スタッフの技能表出時間は表 4.7 の入れ替え後の見込み値を上回らないこと。
5. 個々の技能表出時間は正の整数である。また入れ替え後の見込み値の最大値と最小値の範囲に含まれていること。

目的関数は各グループ内生産スタッフ全員の技能表出時間の合計とし、その値が最小になる生産スタッフごとの技能区別の技能表出時間を解とする。表 4.7 で示す Case1 から Case4 までについてのグループごとの技能表出時間の見込み値は表 4.8 のとおりである。この値を入力データとして、上の 1. から 5. までの制約条件をみたま最適解を求める。得られた最適解を表 4.9 に示す。

4 つの場合について得られた解を表 4.10 に示す。表 4.9 の結果をまとめたものが表 4.10 である。Case2 と Case3 が技能表出時間最小で、技能価値の総量が最大である。

4.2.3 生産工程間の人員配置最適化に関する結論

化学プラントにおいて生産工程で生産活動に携わるグループに属する生産スタッフは生産性を高めるためにその技能の向上に努めている。また職場における教育や訓練の他に、多くの生産工程での業務の経験は技能向上に有効である。したがって様々な職場（生産工程）間で生産スタッ

表 4.9: Optimal solution

Case 1														
G. no.	ID no.	i	v	オペレーション			メモリー		コミュニケーション		WHDS合計		技能価値	最適値
				b^i_1	b^i_2	b^i_3	b^i_{total}	Q^i	y^i_1	y^i_2	y^i_3	y^i_{total}	Q^i	
1	1	1	1.2	91	41	26	158	166,34	90	36	32	158	172,53	
	11	2	1.0	118	47	10	175	151,43	118	52	5	175	149,16	
	104	3	0.8	102	43	5	150	120,00	102	43	5	150	120,00	
	$b(y)_{ktotal}; (k=1,2,3)$				311	131	41			310	131	42		
$b(y)_{total} Q_{total}(Q^i)$							483	437,77				483	441,69	
2	2	1	1.2	98	45	30	173	184,39	80	50	43	173	205,55	
	12	2	1.0	115	50	10	175	151,74	115	54	6	175	149,93	
	103	3	0.8	100	50	15	165	132,00	100	50	6	156	124,80	
	102	4	0.8	102	57	6	165	132,00	102	48	6	156	124,80	
$b(y)_{ktotal}; (k=1,2,3)$				415	202	61			397	202	61			
$b(y)_{total} Q_{total}(Q^i)$							678	600,13				660	605,08	
3	3	1	1.2	100	50	25	175	181,02	90	45	40	175	200,16	
	13	2	1.0	110	45	25	180	163,62	110	60	10	180	156,82	
	101	3	0.8	80	60	10	150	120,00	80	50	10	140	112,00	
	$b(y)_{ktotal}; (k=1,2,3)$				290	155	60			280	155	60		
$b(y)_{total} Q_{total}(Q^i)$							505	464,64				495	468,98	
WHDS合計, 技能価値合計							1666	1502,54				1638	1515,75	

Case 2														
G. no.	ID no.	i	v	オペレーション			メモリー		コミュニケーション		WHDS合計		技能価値	最適値
				b^i_1	b^i_2	b^i_3	b^i_{total}	Q^i	y^i_1	y^i_2	y^i_3	y^i_{total}	Q^i	
1	1	1	1.2	91	41	26	158	166,34	86	40	32	158	174,49	
	11	2	1.0	118	47	10	175	151,43	118	51	6	175	149,62	
	102	3	0.8	112	47	6	165	132,00	112	44	6	162	129,60	
	$b(y)_{ktotal}; (k=1,2,3)$				321	135	42				135	44		
$b(y)_{total} Q_{total}(Q^i)$							498	449,77	316			495	453,71	
2	2	1	1.2	98	45	30	173	184,39	76	52	45	173	209,41	
	12	2	1.0	115	50	10	175	151,74	115	55	5	175	149,48	
	101	3	0.8	100	50	15	165	132,00	100	38	5	143	114,40	
	104	4	0.8	93	52	5	150	120,00	93	52	5	150	120,00	
$b(y)_{ktotal}; (k=1,2,3)$				406	197	60			384	197	60			
$b(y)_{total} Q_{total}(Q^i)$							663	588,13				641	593,29	
3	3	1	1.2	100	50	25	175	181,02	90	45	40	175	200,16	
	13	2	1.0	110	45	25	180	0,00	110	60	10	180	156,82	
	103	3	0.8	80	60	10	150	120,00	80	50	10	140	112,00	
	$b(y)_{ktotal}; (k=1,2,3)$				290	155	60			280	155	60		
$b(y)_{total} Q_{total}(Q^i)$							505	464,64				495	468,98	
WHDS合計, 技能価値合計							1666	1502,54				1631	1515,98	

Case 3														
G. no.	ID no.	i	v	オペレーション			メモリー		コミュニケーション		WHDS合計		技能価値	最適値
				b^i_1	b^i_2	b^i_3	b^i_{total}	Q^i	y^i_1	y^i_2	y^i_3	y^i_{total}	Q^i	
1	1	1	1.2	91	41	26	158	166,34	86	40	32	158	174,49	
	11	2	1.0	118	47	10	175	151,43	118	51	6	175	149,62	
	102	3	0.8	112	47	6	165	132,00	112	44	6	162	129,60	
	$b(y)_{ktotal}; (k=1,2,3)$				321	135	42			316	135	44		
$b(y)_{total} Q_{total}(Q^i)$							498	449,77				495	453,71	
2	2	1	1.2	98	45	30	173	184,39	76	52	45	173	209,41	
	12	2	1.0	115	50	10	175	151,74	115	55	5	175	149,48	
	103	3	0.8	100	50	15	165	132,00	100	38	5	155	124,00	
	104	4	0.8	93	52	5	150	120,00	93	52	5	137	109,60	
$b(y)_{ktotal}; (k=1,2,3)$				406	197	60			384	197	60			
$b(y)_{total} Q_{total}(Q^i)$							663	588,13				641	593,29	
3	3	1	1.2	100	50	25	175	181,02	90	45	40	175	200,16	
	13	2	1.0	110	45	25	180	163,62	110	60	10	180	156,82	
	101	3	0.8	80	60	10	150	120,00	80	50	10	140	112,00	
	$b(y)_{ktotal}; (k=1,2,3)$				290	155	60			280	155	60		
$b(y)_{total} Q_{total}(Q^i)$							505	464,64				495	468,98	
WHDS合計, 技能価値合計							1666	1502,54				1631	1515,98	

Case 4														
G. no.	ID no.	i	v	オペレーション			メモリー		コミュニケーション		WHDS合計		技能価値	最適値
				b^i_1	b^i_2	b^i_3	b^i_{total}	Q^i	y^i_1	y^i_2	y^i_3	y^i_{total}	Q^i	
1	1	1	1.2	91	41	26	158	166,34	90	36	32	158	172,53	
	11	2	1.0	118	47	10	175	151,43	118	52	5	175	149,16	
	104	3	0.8	102	43	5	150	120,00	102	43	5	150	120,00	
	$b(y)_{ktotal}; (k=1,2,3)$				311	131	41			310	131	42		
$b(y)_{total} Q_{total}(Q^i)$							483	437,77				483	441,69	
2	2	1	1.2	98	45	30	173	184,39	80	50	43	173	205,55	
	12	2	1.0	115	50	10	175	151,74	115	54	6	175	149,93	
	101	3	0.8	100	50	15	165	132,00	100	50	6	156	124,80	
	102	4	0.8	102	57	6	165	132,00	102	48	6	156	124,80	
$b(y)_{ktotal}; (k=1,2,3)$				415	202	61			397	202	61			
$b(y)_{total} Q_{total}(Q^i)$							678	600,13				660	605,08	
3	3	1	1.2	100	50	25	175	181,02	90	45	40	175	200,16	
	13	2	1.0	110	45	25	180	163,62	110	60	10	180	156,82	
	103	3	0.8	80	60	10	150	120,00	80	50	10	140	112,00	
	$b(y)_{ktotal}; (k=1,2,3)$				290	155	60			280	155	60		
$b(y)_{total} Q_{total}(Q^i)$							505	464,64				495	468,98	
WHDS合計, 技能価値合計							1666	1502,54				1638	1515,75	

入れ替え対象者

技能表出時間 WHDS 見込み値(最大): $b^i_{k\max}$

技能表出時間 WHDS 見込み値(最小): $b^i_{k\min}$

表 4.10: Total WHDS and VOS for each case

Case	$b_{case\ total}$	$Q_{casetotal}$
	1636	1478,54
1	1638	1515,75
2	1631	1515,98
3	1631	1515,98
4	1638	1515,75

フを移動させることが行なわれている。しかしどのように生産工程や対象者を選ぶかについてはあまり根拠が明確ではない。その理由として、向上させるべき技能とは何か、そしてその技能をどう評価するかが明らかでないためである。しかし生産工程における技能の定量評価は可能であることが示され（第5章参照）、その方法を用いて生産工程における生産スタッフの業務分担を変更して、技能価値を減らすことなく業務に従事する時間を減らせることを示した（4.1節参照）。

この節では技能評価の対象を複数の生産工程に広げ、生産スタッフのグループ内外での入れ替えにおいて技能価値を減らさずに業務に従事する時間を減らせることを示した。削減できた時間を生産スタッフの技能・知識水準の向上にあてることによって、生産工程の弾力性（生産を阻害する事象の発生を抑制する能力）を高めることができる。

4.3 考察と結論

この章では生産スタッフの業務従事時間を減らす方法について述べた。ある時点で業務に必要な技能量（技能価値）を減らさずに従事する時間を減らすことが可能である。生産スタッフ一人ひとりが仕事の効率を高めるように心がければ、すなわち自分の職位にふさわしい業務に従事すれば業務従事時間の短縮は可能である。この章の前半で示したように、グループ内での業務分担を見直して生産スタッフ一人ひとりが職位にふさわしい業務に従事すれば全体の技能価値を減らすことなく業務従事時間を減らすことができる。生まれた余裕時間はより高度な仕事や教育・訓練にあてることで活用できる。また後半で示したように複数のグループ間で人員配置を変えることによって業務従事時間を減らすことができる。グループ間の移動によって新たな業務につくことになるが、当事者にとっては業務スパンの拡大や新たな知識の獲得につながる機会となる。したがって弾力性向上にはきわめて有効な手段である。

第5章 技能と技術および技能の定量的評価

生産工程における技能と技術はしばしば混同して用いられる。この章では、技能は生産スタッフに内在するものであり技術は技能を形式化して明示的に表現したものであるということを明らかにしている。さらに実測可能な生産スタッフの業務従事時間から技能量（技能価値）を定量的に評価する方法を示す。ここで求める技能価値は生産工程における弾力性の評価に用いるものである。

5.1 技能と技術の関わり

化学工場では生産に必要な生産スタッフの持つ生産技能と PSS の要素機能である生産技術とが相互作用しながら生産活動を支えている（図 5.1 参照）。

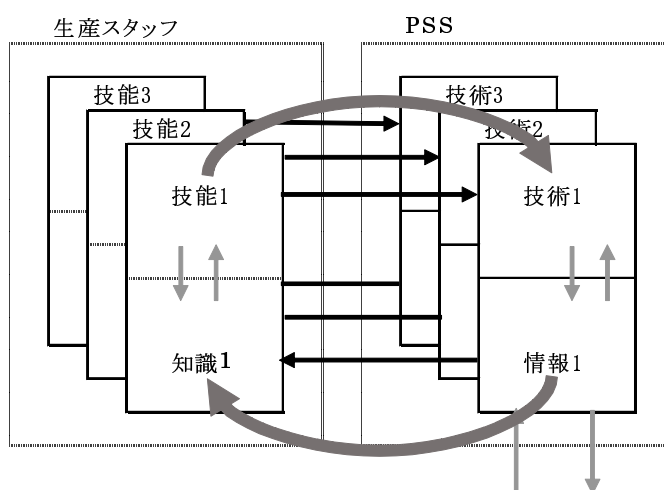


図 5.1: Interactive reciprocal movement

ここで技能と技術を次のように定義する。生産工程における技能とは生産に携わる人々が身につけている作業能力で [37]、それを構成するのは知識 [38] であり暗黙的なものである。人の持つ知識はそのまま他の人に伝えることはできず [39]、一旦知識を形式化して技術や情報に変換する。人はそれらに加えて時々刻々増えていく外部からの情報を取り込みながら知識化する。人の内奥に存在するそれらの知識の集合体が技能である。

一方、技術とは人の持つ技能を形式化・記号化して明示化したものとそれらに関連した情報の

集合体をさす。したがって技術は人の外にあり [39]、貯えるための場が必要である。それは設備や装置そのものあるいは PSS である。技能には技術化の容易なものから難しいものまで様々あるが、次のように3つに体系化できる。

1. 人が手・足を使うオペレーション技能
2. 人が記憶力を使うメモリ技能
3. 人が口・耳を使うコミュニケーション技能

これらの技能において1.、2.、3.の順に技術化は難しくなるが、技術化によって生産スタッフの業務負荷を軽減したり時間的余裕を作り出したりして既存技能の熟練度を高め、技能を技術化したものとおして新たなさらに高い技能を身につけることができる。生産スタッフの技能・知識水準を向上させることで、生産工程の持つ弾力性（生産工程に対する内外からの攪乱信号を抑制する能力）を高めることができる（第2章参照）。

5.1.1 技能と技術の相互作用

技能は人が他人と共有できない内奥にあり [38] 知識と一体化している。技能を身につけるためには当事者が努力して知識を増やすしかない。すなわち知識は外部から情報を取り入れることによって増え、そのことをとおして技能は向上する。また人の持つ技能を技術化すると新たな技能が必要になり、人はその技術を介して新しい技能を身につける。また技能と技術はそれらが相互作用する場において相互補完的循環運動 [38] を繰り返しながら（図5.1参照）高度化していく。しかし技術の技能化への動きと技能の技術化への動きはどちらも自然発生的なものではなく、外部からの働きかけによる推進力を必要とする（図5.2参照）。

技術を介して技能を向上させるためには、すなわち図5.1に示す相互補完的循環運動のサイクルをまわすためには、計画的な技能修得プログラムや個人の能力に合わせた技能修得スケジュールが必要であり事後の修得度評価も不可欠である。また技能を技術化するためには、すなわち図5.2に示す技能の技術化のサイクルをまわすためには、定期的に業務を見直し、事前評価で技術化によって大きな生産性向上が見込める技能から順次技術化していくという組織的な取り組みを繰り返す必要がある。この取り組みにおいて技能の高度化と技術の高度化は技能化のサイクルと技術化のサイクルという周期的なPDCAサイクルの実行によって実現でき、その推進力となるのは組織としての生産工程の運営方針に基づく計画の遂行である。またPSSは技能そのものを自然言語で明示的に記述して蓄えるデータベース（技能データベース）を持つが（図5.3参照）、その中のある一つの技能に類似したものが複数の生産工程に存在する場合がある。このような類似技能をすべての生産工程で標準化・共通化して共有できれば技能の質的向上にもつながる。

5.2 生産技能伝承

生産工程において生産スタッフに内在する技能は生産活動の円滑な遂行に不可欠なものであるが、現状では人から人へと直接伝えるものであるため、熟練者の減少や伝承に必要な時間の不足

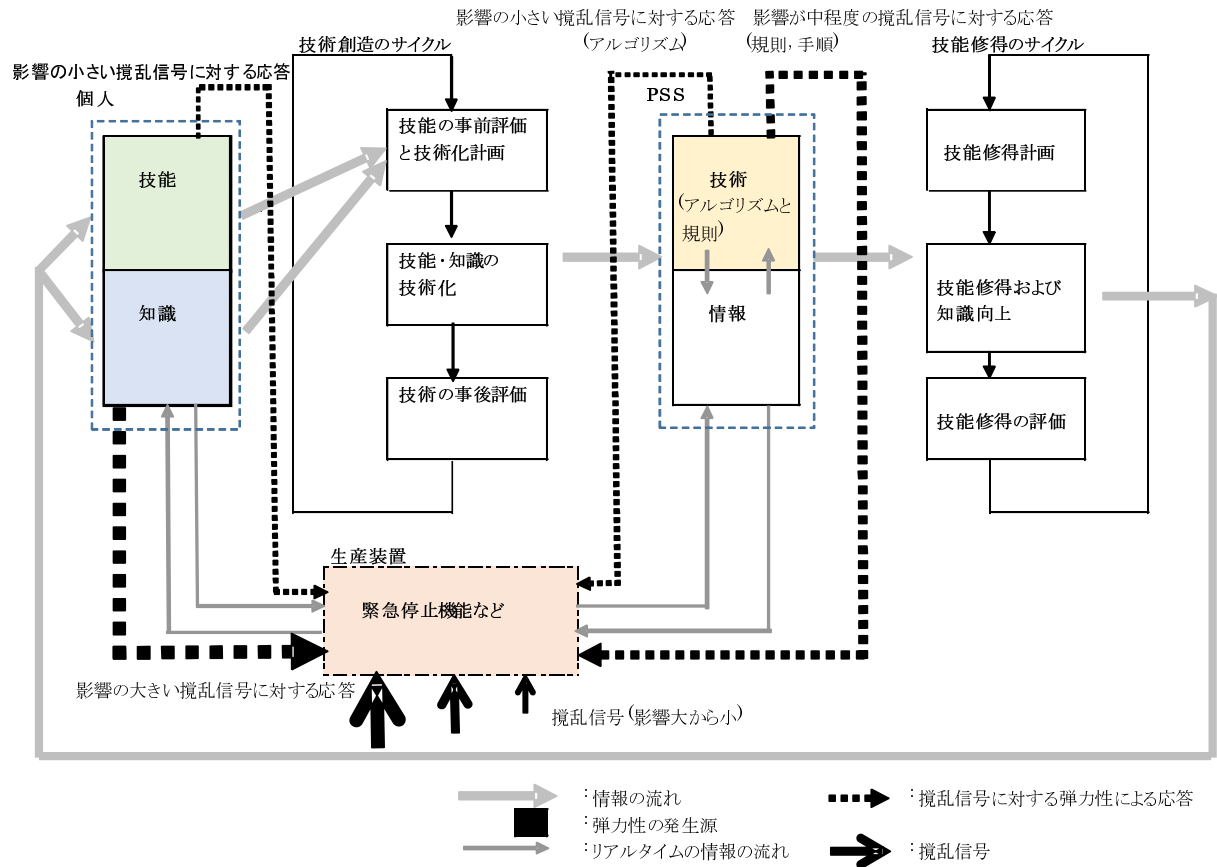


図 5.2: Cycle of skills and technique

などの問題により、次第に技能そのものの低下が懸念されるようになってきた。そのような状況を改善する仕組みが必要である。

5.2.1 生産技能と生産支援システム (PSS) の関わり

化学工業においては生産技能と PSS とが密接なつながりを持ち、しかもそれらは相互作用している。すなわち技能→技術→次の技能→次の技術というサイクルがまわり続けている。また次のような考え方もある。これまでの製造業では工程から人の技能に依存した熟練作業を極力排除して標準化された容易な作業へと転換をはかってきた。しかし生産を支える技術が進歩すれば製造に関する技能の向上も求められ、技能が向上すれば技術の進歩を促す。すなわち技術と技能は不離の関係にあり、人を製造現場から排除することによって技能が空洞化すれば生産技術の空洞化も避け難い [37]。さらに次のような考え方もある。技能をその操作能力の側面のみを日常性の文脈の中から切り出し機械の中に押し込めてしまうならば、その時点で孤立したものとなり、いやがては陳腐化することになる [38]。このように生産技能と PSS は車の両輪のようなものであり、片方欠けたり同じ速さで同じ方向にまわらなかつたりすると決してまっすぐ前には進めない。すなわち技能は技術化して伝承できるものであり、そのためには PSS の機能が必要になる。

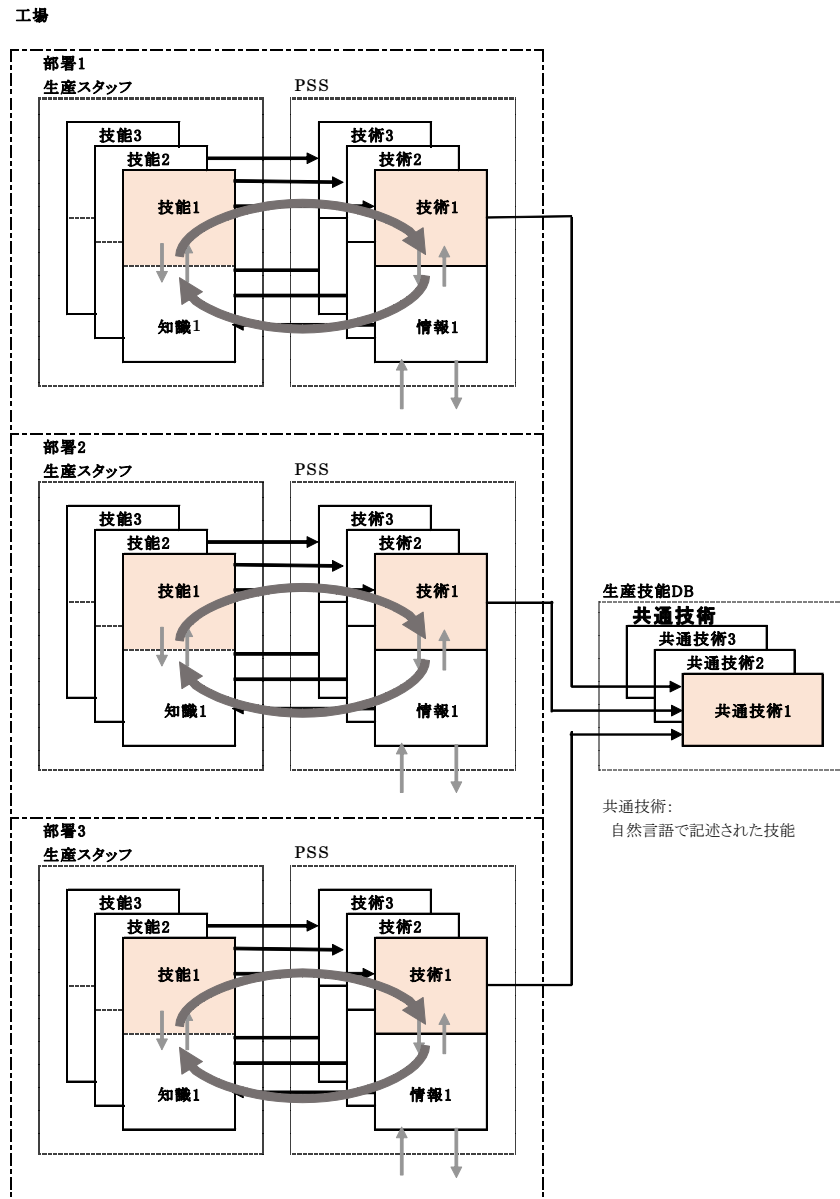


図 5.3: Sharing of skills with Sills DB

化学工業において生産に必要な情報の収集と処理は当初計装システムで行なわれた。人は計器の指示値を目視しながら運転実績の記録をとり、必要に応じて機器を手動で操作していた。しかしプラントの規模が大きくなるにつれ管理すべき情報の量および操作の頻度が増え、求められる運転精度も次第に高くなり運転に多くの人手を必要とするようになった。このような問題点を解決するために様々な技術が開発され、その中の一つがプロセスコンピュータの導入である。生産工程に導入されるコンピュータ（プロセスコンピュータあるいはマイクロコンピュータを内蔵したDCS、PLCなど）は、まずフィールドのセンサ（温度、流量、圧力など）を介してプラントの状況を示すデータをオンラインリアルタイムで24時間休むことなく収集する。そのデータはメモリあるいはディスクに保存され自由に参照できる。さらに集めたデータを生産スタッフのための

ガイダンスや様々なレポート類に編集し、それらは安定した運転のためや工場の管理・運営のために用いる。しかしデータの加工・編集には手仕事では時間がかかり、プラント特有のノウハウも必要でそのままでは活用の範囲も限られている。そこでできるだけ手仕事をなくしてデータを広く活用するための工夫がなされてきた。またコンピュータは、データの監視だけではなく制御にも用いられてそこでも手仕事をなくすことを目指した。しかしどんなに技術が進歩しても必ず生産スタッフの技能の役割は残り、技術が高度化すればそれに応じて新たに管理の対象が変化してより高度な技能が必要になる [39]。

すなわちコンピュータ導入の前後において生産スタッフの果たすべき役割は変わり、新たに身に付けるべき技能もできてくる。それに伴ってシステム化の対象も生まれる。このように生産スタッフとコンピュータは絶えず相互作用し、相互補完し合いながらそれぞれの能力を高めてきた。ここでは PSS のはたす機能を大まかに 1) 人の業務を代替する機能、2) 生産技能の伝承を支援する機能、3) 業務範囲拡大に必要な情報を提供する機能の 3 つに分類して生産現場の熟練技能と PSS との関わりを次のようにあらわす。

- A) 生産スタッフの生産技能のうち低レベルのもの（熟練を要しないもの）をコンピュータの機能で置き換える。この場合 PSS の機能は 1) である。
- B) 生産スタッフは自分の技能を絶えずレベルアップする。この技能はまだコンピュータの機能で置き換えられていない。
- C) 人から人への技能の伝承が必要であるが円滑には進まない。
- D) PSS を用いた生産技能伝承の支援が必要である。この場合に PSS がはたすべき機能は 1) および 2) である。
- E) 人の技能の更なるレベルアップおよび業務範囲の拡大を行なう。この場合の PSS の機能は 1)、2) および 3) である。

A) から E) までの一連の流れは生産スタッフの技能と PSS とはつねに相互作用しながらそれぞれレベルアップしていくことを示している。E) までくると A) に戻り順次繰り返される。

5.2.2 生産に必要な技能の伝承と高度化

熟練技能の伝承方策には次の 2 つがあるといわれる。それは人から人への伝承、人から機械への伝承（機械化）の 2 つである。そこでは企業においてどちらの方策をとるかはその企業ごとに違うとしている [40]。しかしすでに述べたように、生産スタッフの技能と PSS は相互作用を続けることによってその能力を向上させる。したがって生産技能はコンピュータの機能を用いて受け継がれるものと、人から人へと伝承されるものとが渾然一体となっている。これらがうまく機能して工場の高い生産技術・生産技能は維持されてさらにレベルアップする。日本の化学工業を支えたものの一つは生産に従事する人々の技能レベルの高さであった。しかし今日では若年層の製造業離れが進み、生産スタッフの高齢化と引退で高い技能が保てなくなっている。そのような現状を変えるためには生産技能伝承を推進する仕組みが必要である。これまでは効率性追求で

生産技能から離れつつあった生産技術を創造性重視の生産技術へと方向転換させて生産技能の方に引き寄せることも方策の一つである。

生産技能の伝承がうまくいかないとどのようなことが起きるかについて次のように5つに分類できる [41]。

- 製品への直接的な影響
- 現場の技能が低下
- 将来の技術革新への対応が困難
- 海外生産への影響
- 日本の文化や日本人の価値観への影響

さらにこれ以外にもいくつかの問題点がある。

- 異常時、緊急時の迅速な対応が不十分である。
- 予測や推定などの高い判断力を要する技能が空洞化する。

日本の化学産業を支えてきた生産技能は一度伝承が途切れるともはや取り戻すことは不可能である。したがって化学工業にとって生産技能伝承の方策を確立することが重要である。

5.2.3 これからの技能の伝承

製造現場では、生産技能伝承についてこれまで小集団の中で経験豊かなベテランがうまく取り仕切ってきた。プラントの運転に関するあらゆる暗黙的な知識はベテランの頭の中で整理されているが、その知識を言葉によって形式化して文字で表現した操作手順書やマニュアルあるいは技能データベースのみに頼って自力で学ぼうとしても、ベテランの持つすべての暗黙的な知識を受け継ぐことは不可能である。これまでベテランが長年かけて身につけたものを後に続く人たちに時間をかけて少しずつ教えるというのが一般的であったが、そのようなやり方で技能を伝承するには技能の内容が高度化しており PSS に頼らざるを得ない。したがって長い時間をかけて貯えた現場の生産技能を伝承するためにはコンピュータ、データベース、ネットワークを活用して人の頭の中にある暗黙的な知識を形式化したうえで、技能を暗黙的な知識として伝承するための方策が必要である。次にその例をあげる。

- ベテランの持つ生産技能に関する豊かな暗黙的な知識を形式化してデータベース化する（人からコンピュータを介して人への伝承） [42]。
- 人の持つノウハウを、高度制御や最適化の技術などのプロセスシステム工学に基づく技術によって代替させてシステム化する（人からコンピュータへの伝承） [43], [44]。

生産工程における小集団の活動を利用して生産技能伝承を促進する（人から人への伝承；技能データベースを利用するが、受け手が技能としての暗黙的な知識を正しく身につけたことの判定が不可欠である）。

5.2.4 技能向上のための枠組み

製造現場において技能を伝承したり新しい技能を覚えたりするためには日常的な活動が欠かせない。いずれの場合でも単に個人が技能を身につけるための学習行為を実践するだけでは不十分であり、学ぶための舞台と道具立てや正しく修得したことを確認するための手段、および誤りをたやすための規準などが必要である。

日本人にとって社会的単位は個人ではなく、つねに（ほとんど毎日）顔を合わせ仕事や生活をともにする人々からなる小集団である [46]。小集団の理想的なサイズは5ないし7人である [46] が、化学工場の製造現場における生産スタッフの小集団としての「班あるいはチーム」は数名で構成され、リーダーとその他のメンバーの間には技術力の面での暗黙の序列がある。メンバーはつねにリーダーの指揮のもとに一体となって日々の業務を遂行している。小集団は日本の伝統的な社会基盤をなし、そのメンバーの秩序のある行動を支えてきたといわれており、生産工程においても小集団の果たす役割は大きく、これまで日本の製造業における生産技能の向上と伝承に多大な貢献をしてきた。PSS から最も距離の近いのが生産スタッフであり、PSS をとおして技能の高度化と伝承を活性化する（図 5.2 参照）。小集団という舞台における生産スタッフの活動は企業組織における制度上活性化が奨励されており（ヒヤリ・ハット発掘や改善提案制度など）、その活動の道具立てとして PSS に組み入れることによって PSS の要素機能を用いて技能を正しく修得したことを確認して誤りをたやすことができる。このように工場における既存の組織や制度を極力活かしながら PSS と融合させるとさらに技術と技能を伸ばす効果を生む。

5.2.4.1 企業内での生産技能伝承のための教育体制

生産技能の伝承や PSS のレベルアップのためには、企業内における技能やシステムを繰り返し継続的に見直す組織上の制度が不可欠である。業務の中で教育・訓練を行なうことに加えて技能の到達水準に応じた教育プログラムに沿って実施される定期的な教育・訓練も必要である。

その際に注意すべき点を列挙すると次のとおりである。

- 教育・訓練の対象者の業務は自分の所属する小集団の中でのものが大部分である。したがって技能も小集団の中で伝承されて全小集団をとおした同一技能の標準化はきわめて難しい。そこで技能データベース（5.2.5.2 節および図 5.3 参照）に格納された作業単位の動作解析に基づいて教育・訓練を行なう。当初は部署ごとに作業動作を規定するが、部署を横断した「横割り技能」（図 5.4 参照）として標準化が進むので次第に全社の技能が標準的なものへと収束していく。
- 生産技能の標準を規定する技能データベースはつねに改訂されるので（標準化のためにあるいは発見された誤りを訂正するために）、その中の作業動作を用いたも継続的に繰り返し行

なう必要がある。そのためにも小集団ごとの教育訓練の目標設定、実施状況、到達水準などを明らかにする組織上の制度が教育・訓練には不可欠である。例えば年間計画、期間計画、月間計画などで進捗を把握する必要がある。

- 技能の伝承は、受け手に暗黙的な知識として定着してはじめて完了する。ある小集団にない技能を身につけようとする小集団間の人の交流が必要である。技能の標準化を進めながら人の交流も行なうことによって技能の伝承や向上も促進される。

生産技能と PSS は相互作用しており、そのことは人の生産技能伝承を加速する。生産技能伝承を業務から切り離して行なうのではなく PSS を最大限に活用する組織上の制度を確立することが最も確実なやり方である。

5.2.5 生産技能伝承支援システムの例

生産技能伝承支援システムの例について以下に述べる [8], [9]。

5.2.5.1 生産技能の表現法

装置産業における製造現場の熟練技能はいくつかに分類すると考えやすい [39], [40]。ここで生産スタッフの生産技能を 1) オペレーション技能、2) メモリ技能、3) コミュニケーション技能の 3 つに分類する [40]。いずれも製造現場の生産スタッフの技能として欠かせないもので、日々の業務にはこれらが含まれている。

1. 生産スタッフが手・足を使うこと（オペレーション技能）
生産スタッフが設備やコンピュータを操作すること、運転の状況を記録にとること、生産に必要なものを運ぶことあるいは使用した設備を洗浄すること、設備の巡回点検などがこの技能である。
2. 生産スタッフが記憶力を使うこと（メモリ技能）
プラントの運転実績データは帳票の形で保存されているが、膨大な過去のデータを有効に活用しようとする、必要なデータを検索して抽出したり加工したり簡略化したり残すべきデータを選択したりする技術が必要になり、現状では担当者の個人的な技量に依存する部分が多い。
3. 生産スタッフが口・耳を使うこと（コミュニケーション技能）
生産に関わる人々のコミュニケーションは円滑な生産に不可欠である。現在はフェイス・ツー・フェイスのコミュニケーション（ミーティング、報告会など）が主流であるが、工場内外におけるコミュニケーション・ネットワークの広がりによって、コミュニケーションの手段が充実してきておりその新しい技術を有効に活用すれば迅速かつ正確なコミュニケーションを助ける。

このように分類された技能をさらに細かく作業動作単位で詳細に記述すれば、伝承すべき技能がどのようなもので具体的に伝えるべきことは何なのかが明確になる。このように分類された技能を伝えるための方法論として4段階の知識変換プロセス [41] の考えを応用する。

熟練技能を持つ生産スタッフの技能（暗黙知）を伝承するプロセスは次のように表現することができる。

- 第1段階としてまず技能を暗黙知のまま取り出すことが必要である。この段階では技能はまだ熟練技能者の中にあるが、ここでは熟練技能者本人が次のステップの準備段階として自分の技能を頭の中で整理する。この段階で重要なのは、実際にどのような技能があり、どう行なわれているかは正確には技能者自身にしかわからないということである。このとき技能を系統化することが不可欠で、それによって技能を網羅することや重複の排除が可能になる。具体的な系統化の例は5.2.5.2節に技能を形式化する際の組織を基本とした縦割り技能として述べる。
- 第2段階として熟練技能者自身が自分の持つ技能（暗黙知）を言語による表現（形式知）に置き換える。この段階でどうしても元の意味が崩れてしまいがちであり、言語（文字）による表現には細心の注意を払うことが必要である。特に表現のばらつきをなくするためのガイドラインをシステム化のための指針として生産スタッフに明示する。例えば市販の表計算ソフトウェアのシートにおいてフォーマットを規定し、そこに生産スタッフ自身が文字で記入するという方法がある。この段階は、極力生産スタッフ自身の手で行なうべきである。それは当事者のみが持つ、細かい注意点などをもらさないようにするためである。
- 第3段階として、形式化したものをより抽象度の高い一般化された情報技術で扱える形に変換する。言語を用いて形式知として技能者（生産スタッフ）の頭の中から取り出した技能は、表計算ソフトウェアを介してデータベースの中に格納される。この手順はコンピュータのソフトウェアによって自動的に行なわれる。その結果生産スタッフの熟練技能は系統化された形でデータベースに格納され、検索や追加・修正を自由に行なうための基盤として蓄積される。この情報（形式知）には誰でもコンピュータをとおして自由にアクセスできる。この段階で組織に基づく縦割り技能として系統化して整理した生産技能は、インデックスをつけてデータベースに格納されているので、横割り技能として組織をこえて標準化、共有化ができる。
- 第4段階としてこの情報を暗黙知として個人の中に取り込む。この過程はスケジュールされた訓練あるいは教育をとおして行なわれる。これらの4つの段階を経て製造現場の技能は暗黙知として人から人へと伝承されていく。この4つの段階がつねにまわり続けることによって今ある技能が一方的に伝承されるだけでなく、新しく身につけた技能やこれまで以上に高度化された技能が伝承の対象として貯えられる。したがってこの仕組みは工場全体の生産性向上にもつながる。またこのシステムを定着させ発展させるためには、組織としてこの仕組みをまわし続けるための制度を確立することが必要である。

5.2.5.2 生産技能データベース

生産現場において伝承すべき技能を当事者以外が具体的な中身を明らかにすることはまず不可能である。運転に関わる技能はきわめて属人性が高いうえにその数と量が膨大で、しかも暗黙的な知識として生産スタッフが身につけている技能を形式化するのは本人以外には難しいからである。したがって対象となる技能を絞ったうえで生産スタッフ自身の手で形式化していく。3つに分類した生産現場における技能のうちオペレーション技能は数が多いが他のものに比べると形式化しやすい。これまでも工場では作業ごとの標準操作手順書（SOP：Standard Operational Procedure）やプロセスフロー図（PFD：Process Flow Diagram）を用いて作業手順の標準化を目指してきた [42]。これらは教育や技能の伝承に有効であったが、作業そのものの数がきわめて多いことや文字で記述するという表現上の制約から、どうしても抜けや誤りをなくすることができず肝心のときに役に立たないこともあった（プラント改造時の訂正の不備により、事故発生時の原因究明に使えないなど）。この現状を踏まえてより使いやすく、よりわかりやすく、より発展性のある生産技能伝承方式を考えることにする。そこでは暗黙的な知識として生産スタッフが持つ生産技能をまず形式化することが必要であり、その技能を伝承するためには技能を受け継ぐ側はその形式知を自分の中に取り込んで暗黙的な知識として確実に身につける必要がある。したがってそこで用いられる形式化された技能について以下のような前提条件をおく。

- 1) 扱いやすい形で表現されていること。誰にでもわかりやすい表現が用いられていること。
- 2) 技能の所在が明らかで、いつでもどこからでもすぐに参照できること。
- 3) 技能の内容の追加や修正が容易にできること。
- 4) 技能の内容が継続的に改善されながら維持される制度的枠組み（運用方法）ができていること。
- 5) 現場ごとの技能を縦割り技能とすると、その技能を水平展開するために同種の技能を横割り技能として、組織をこえて各現場で標準化し共有化する機能を持つこと。
- 6) 対象とする技能の範囲をオペレーション技能に限定すること。

これらの前提条件をみたすマネジメントシステムを作る。しかしこれらの要件を備えたシステムを一から作るには膨大な時間と労力を要するので、作業量をあまり大きくせずにマネジメントシステムを完成させるために、既存のマネジメントシステムの仕組みを有効に使う。その一例を次にあげる。

製造工場では労働安全衛生マネジメントシステム（OSHMS）[43], [44]の導入が増えている。このシステムは工場の中における無事故無災害を目指すためのもので、その中核をなすのはリスクアセスメントである。それは工場の中に潜在する危険源を抽出して定量的に評価することによって、リスク低減措置を講じるというものである。ここでいうリスクとは事故災害の誘因となるもので、想定される危険な事象の発生の可能性と危害の大きさを組合せたものである。危険な事象が発生する可能性の評価には、作業頻度やすでにとられている防護措置の程度を用いることができる。また危害の大きさの評価には想定される事故・災害の大きさを用いることができる（休業、不休業など）。リスクは生産スタッフの作業動作によって事故や災害となって顕在化する。リスク

アセスメントの具体的な方法は様々あるが、生産スタッフの作業の一つひとつまでもれなく網羅する必要がある。OSHMS が導入で特定された生産スタッフの作業に新しいものが追加されたり特定されなかった作業において災害が発生したりすると、その時点でリスクアセスメントすることが OSHMS には規定されているので次第に作業の網羅性は高くなる。OSHMS では作業内の動作レベルまでの詳細な分析は要求していないが、生産技能の伝承のためには動作レベルまでの解析が必要である。ここでは装置産業における工場を想定して現場での生産技能のうちのオペレーション技能の一つひとつの作業動作レベルまで詳細に解析し、潜在するリスクも含めて形式化するための手順を述べる。

1) 業務の系統化（縦割り技能と横割り技能）

ここで対象とするオペレーション技能について作業解析する前に、生産スタッフの業務活動を分類し、一つひとつの作業動作まで分解する。業務活動の分類にあたっては、組織の分類から始めてオペレーション技能に関わるすべての作業まで網羅できるように、工場全体を起点として日々行なわれている作業までをツリー状に系統化（工場、部署、工程、作業）して展開する。工場に OSHMS の導入が済んでいればリスクアセスメントを行なうためにこの系統化と作業の特定はできている。ここで展開された技能（作業）を縦割り技能と呼ぶ。ここで特定された技能（作業）は一つの作業単位ごとにそこで行なわれる動作を分析し、単一動作ごとに潜在するリスクを明らかにする。

2) 作業系統のインデックス化の例

いくつかの工場から個々の作業を検索するにあたってデータベースにアクセスするためのインデックスを用いる。系統化して技能（作業）まで階層化して展開される工場、部署、工程、作業と作業種別についてユニークな識別番号をつけ、それをインデックスとして用いて検索する。次に例を挙げる。

工場： A、B、C

部署： 01、02、03

工程： 01、02、03

作業： 001、002、003

種別： 01、02、03（例：01 ストレナー交換作業、02 ポンプの起動/停止）

これらをハイフン（-）で結びつけたものをインデックスとしてデータベースにアクセスする。

例えば A 工場における「ストレナー交換作業」をすべて抽出する場合は、インデックスを「A-**-**-***-01」として検索する（*はワイルドカードを示す）。図 5.4 に系統化の例をあげる。

3) 作業の標準化と共有化

図 5.4 で A-01-01-001 作業と A-01-01-002 作業が同一である場合、それぞれの内容を比較してより効率がよく、かつ安全への配慮が十分になされているものに統一する。また B 工場で新たに B-01-02-001 作業が追加されたとき、A 工場の A-01-01-001 作業と同一である場合はそれをそのまま共有化できる。

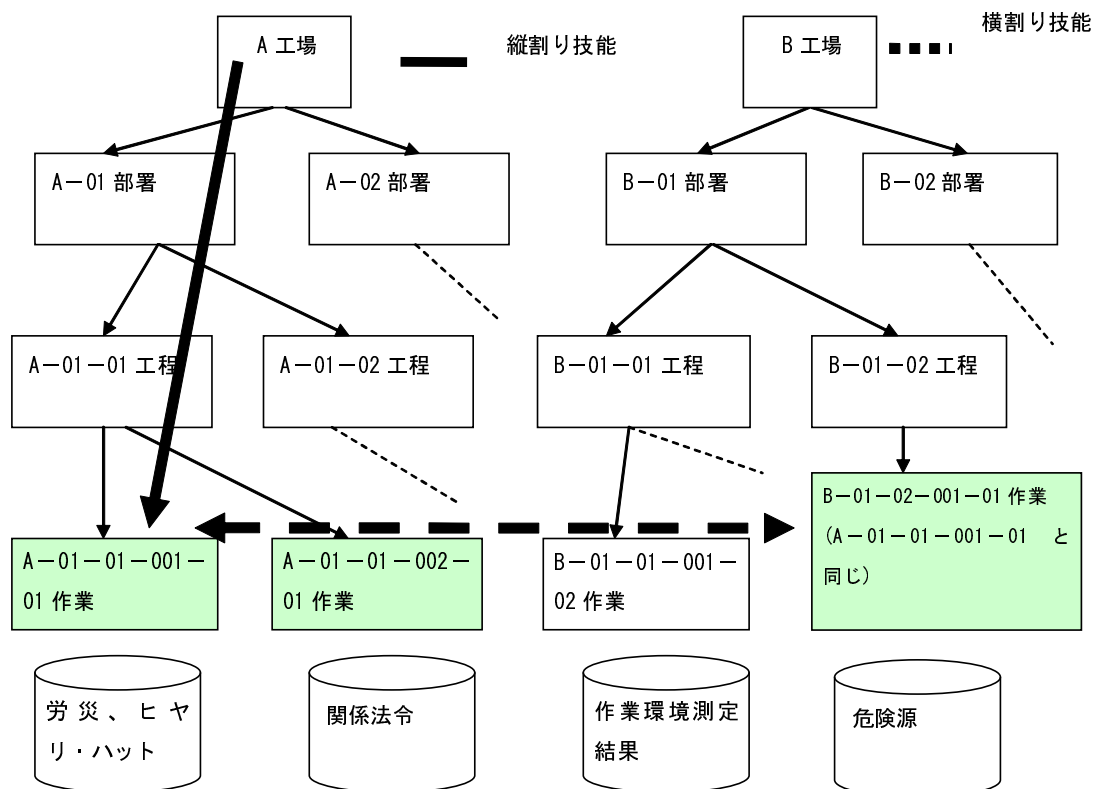


図 5.4: Organization of operational work

4) トラブル発生時の対応

図 5.4 の A-01-01-01 作業でトラブル、事故が発生した場合にはその作業の動作を見直して必要に応じて訂正を施す。その際に重点を置くのは作業動作が欠落していなかったか、とリスクが見落とされていなかったかということである。その際同一作業である A-01-01-02 作業および B-01-02-01 作業についても見直す。他部署の場合は見直しの結果を知らせて注意を喚起する。

5) 様々なデータベースとの連携

各作業の個々の動作において、他システムで貯えた各種データを参照する。図 5.4 で示すような、労働安全衛生関連のデータは生産技能とも密接な関わりを持つが縦割りの作業解析の中では見落としやすい。これらを組織横断的な情報として活用できるデータ構造にする。

5.2.5.3 技能の形式化の例

技能の形式化の例として生産スタッフが行なう 2 つの作業「ストレナーの交換作業」、「ポンプの起動・停止作業」をとりあげる。化学工業においては流体中の異物を除去するために配管の途中にストレナー（網状のフィルター）を設置している。ある一定時間使用すると網の目が詰まり、流体の流れが悪くなるので交換する必要がある（交換時期はストレナー前後の差圧の上昇で判断

する)。例1にストレナー交換作業の操作手順に潜在するリスクを加えたものと操作手順のみのものを示す。後者は不完全な作業解析の例である。また例2に示すポンプの起動・停止は、現場で頻繁に行なわれる基本的な作業である。これらの作業は単位動作まですべて生産スタッフが身につけるべき技能である。

例1：ストレナーの交換作業

例1-1：潜在するリスクについて加えた作業動作解析

- 1) バイパス側のストレナーの入口、出口のバルブを開きバイパス側にも流体を通す。このときバイパス側のドレン抜きバルブが閉まっていることを確認する（開いているとドレンが噴出し、熱傷・薬傷のおそれがある）。
- 2) 交換するストレナー側の入口、出口側のバルブを閉めてストレナーへの送液を止める。
- 3) 交換するストレナー側のドレン抜きバルブをゆっくりと開けて残圧を下げて残液を抜く。その際残液がこぼれないように大きめのバケツで受ける。（残液をこぼすと被液のおそれがある）
- 4) 残液が完全に抜けたらストレナーのフランジをはずしてストレナーを取り出して交換する（締結ボルトを緩める際にレンチの空振りと打撲のおそれがある）。
- 5) 取り外したフランジを再び取り付けて固定する（締結ボルトを締める際にレンチの空振りと打撲のおそれがある）。

例1-2：操作手順のみの作業動作解析

- 1) バイパス側のストレナーの入口、出口のバルブを開きバイパス側にも流体を通す。
- 2) 交換するストレナー側の入口、出口側のバルブを閉めてストレナーへの送液を止める。
- 3) ストレナーのフランジをはずしてストレナーを取り出して交換する。
- 4) 取り外したフランジを再び取り付けて固定する。
（この操作では残圧、残液の確認がまったく行なわれておらず操作者が被液する危険がきわめて大きい。またバイパス側のドレン抜きバルブから液が噴出するおそれがある。さらにボルト締結時のレンチの空振りによるリスクが抜けている。）

例2：ポンプの起動・停止作業

例2-1：ポンプ起動操作

- 1) ポンプ設置場所に行く。
- 2) ポンプ付属バルブの全閉を確認する。
- 3) 送り元に液があることを確認する。
- 4) 送り先が受け入れ可能かどうか確認する。
- 5) 扱う流体が凝固点の高い物質の場合、配管、機器、計装の保温状態を確認する。
- 6) ポンプ入側バルブを開ける。
- 7) ポンプのエア抜きを行なう（残液の飛散による被液のおそれがある）。

- 8) エアー抜き完了後ポンプ出側バルブを開ける。
- 9) ポンプを起動する。
- 10) ポンプの負荷電流、ポンプの吐出圧力、ポンプの送液量が正常であることを確認する。
- 11) ポンプの振動を目視でチェックする。
- 12) ポンプに異常がなければ付属バルブに操作禁止札を掛ける。
- 13) 再度液の送り元、送り先の保液状態を確認する。
- 14) ポンプまわり、配管、送り元、送り先での液の漏れがないかチェックする。

例 2-2：ポンプ停止操作

- 1) ポンプ設置場所に行く。
- 2) ポンプ出側バルブを全閉にする。
- 3) ポンプを停止する。
- 4) ポンプ入側バルブを全閉にする。
- 5) 循環バルブがあれば全閉にする。
- 6) 必要があればポンプの液抜きを行なう（作業中の被液のおそれがある）。
- 7) 液抜き、養生後ポンプの元電源を切る。
- 8) ポンプ付属バルブに操作禁止札を掛ける。
- 9) ポンプにポンプ停止の表示を行なう。

化学工業における生産技能には操作手順のほかに、そこから抽出された操作に潜在するリスクに関する対応も含まれる。そのためここで提案した作業動作解析に潜在するリスクについても情報を付加すればより精度が高まる。また一つの作業の解析は30ステップ程度以下にとどめることによって第三者にとって理解しやすいものになり、さらに横割り技能として類似作業が集めやすくなる。作業解析の中にはプラント特有の情報が含まれているが、それらは操作手順からは切り離して扱う（例えば取り扱う流体、各種上下限值など）。これらの情報にインデックスを付けてデータベースに格納し、自由に検索参照、修正・追加ができるシステムとする。

5.2.5.4 マネジメントシステムの運用方法

5.2.5.2 節で示した形式化された生産技能に関する前提条件のうち1)、2)、3)の3つは実現できることがわかったので、4)と5)についての取り組み方について述べる。4)については、OSHMSではシステムを確立したあとパフォーマンスを継続的に改善していくように規定しているので、その仕組みをマネジメントシステムとして確立した組織には、計画的な目標設定と達成状況の把握、および目標達成のための具体的な活動規定が設けられている。これらは定期的な内部監査や経営層による見直しによって、一層確実に実行できる。工場の組織においては製造現場ごとに年間計画を作成するので、その中に生産技能伝承についても定量的に目標を定め、OSHMSとは別の制度として、しかし並行して形式化された技能の見直しも行なうことにすれば、生産技能伝承の仕組みを継続的に改善し維持することができる。また5)で示した縦割り技能については、形式化された生産技能が系統化されてデータベースに格納されているのでそのまま検索、参照が可能であ

るが、このデータベース内の情報を横割り技能として組織をこえて検索することもできる。例えばいくつかの現場で同じ作業を行なっているときそれらをすべて横一列にして比較すること、すなわち共有化することができる。もし同じ作業を職場によって違った手順で行なっているとすれば、それらのどれを標準とするかあるいはどれが不適切なのかなどを考えることによって、技能の統一化（共通化）およびレベルアップ、さらにリスクアセスメントにフィードバックすることによってその精度の向上をはかることができる。なお、化学工業の生産工程においては6)に述べたオペレーション技能以外の生産技能（メモリ技能とコミュニケーション技能）を形式知化することはまだ試みられていないようである。

5.2.6 考察と結論

ここで提案した生産技能の形式化には自然言語を用いたが、人が読んで理解するのは容易でもその意味するところが正しく伝わっているか、あるいは明らかな論理的な誤りを含んでいないかなどの検証が難しい。もし自然言語の代わりに形式言語を用いて生産技能を記述することができればより一層論理的な表現が可能になり、生産技能の統一化や多言語化への取り組みも容易になる。形式言語をどのように用いて生産技能を表現するかの試みが今後の課題である。これまで日本の製造業は世界でも有数の競争力を保ってきたがその優位性にもかげりが見え始めた。その中で日本に強い製造業を復活させるためにはかつてそれを支えた高い熟練技能をさらに高度化させる必要があるといわれている [45]。生産技能の伝承は喫緊の課題であるが、ここでは化学工業において対象となる技能を現場における操作に限定しデータベース化して参照する仕組みおよびそれを改善し維持するための制度上の枠組みを提案した。このシステムが実現したあとさらにこのシステムの機能を拡張するためには、生産スタッフの技能として分類した3つのうちの残り2つ、メモリ技能とコミュニケーション技能を伝承する仕組みを作る必要がある。生産技能は人から人へと伝えられて受け継がれていくものであり、つねに伝え手と受け手が存在しなければならない。しかも技能はひとりでの伝わっていくものではなく、伝え手と受け手のそれぞれが明確な意思を持って相手に働きかけることが必要である。ここで提案した生産技能伝承支援システムはその間に立って媒介者としての役割を担うことができるものである。

5.3 生産工程における技能の定量的評価

化学工場において生産工程の安定した稼働に必要な生産スタッフの技能を定量的に評価することができれば、最適な業務分担や人員配置についての指針が得られる。しかしこれまで生産技能を定量的に評価することは難しいと考えられてきた。生産工程には様々な業務があり生産スタッフがそれぞれの業務に携わる時間が測定できる。技能の定量的評価に関わる要因として次のものをあげることができる。

- 業務を構成する技能を修得の難易度をもとに体系化する。
- 体系化した技能が生産スタッフの職位に対するふさわしきの指標を設ける。
- 生産スタッフの職位や技能・知識水準を評価に加える。

これらの項目に留意して、生産工程において生産スタッフが発揮する技能を定量的に評価する(以下、定量的に評価した技能の大きさを技能価値と呼ぶ)。技能を定量的に評価した結果は様々な目的で利用することができる(付録 A.5 参照)。

5.3.1 化学プラントにおける技能の定量的評価例

生産スタッフの持つ技能価値の大きさを定量的に評価するにあたって個人別の技能価値を次のように定義する。

$$\text{重み付き技能表出時間 } Tk = \text{職位別技能重視度 } W1 \cdot \text{技能表出時間 } B \quad (5.1)$$

$$\text{技能価値 } Q = \text{重み付き技能表出時間 } Tk \cdot \text{技能} \cdot \text{知識水準 } V \quad (5.2)$$

$$\text{技能} \cdot \text{知識水準 } V = \text{職位} + \text{職務能力} \quad (5.3)$$

技能表出時間 B は次のように求める。3つに体系化した技能 1) 人が手・足を使うオペレーション技能、2) 人が記憶力を使うメモリ技能、3) 人が口・耳を使うコミュニケーション技能のそれぞれが各生産スタッフの業務にどれだけ含まれているかを測定する。その際に業務ごとの従事時間を実測し、そこに含まれる各技能の割合は各生産スタッフの自己申告によって決まる。

次に職位別技能重視度 $W1$ は、生産スタッフの職位に対して3つの技能が職位にふさわしいものかどうかをあらわす指標である。例えば高い職位の生産スタッフにとってコミュニケーション技能は職位にふさわしいが、オペレーション技能は職位にふさわしくないというような評価をするためのものである。すなわち職位の異なる2名の生産スタッフがそれぞれオペレーション技能に2時間ずつ費やしたときに、技能価値は異なるということを意味している。

重み付き技能表出時間 Tk は業務従事時間の実測値をもとに求めた技能表出時間に、生産スタッフごとにその職位に対するふさわしきで重み付けしたものである。

さらに技能・知識水準 V は生産スタッフにおける職位の要素と職務能力（知識などの潜在能力も含む）の要素の和である。すなわち生産スタッフ個人の熟練度の高さをあらわすもので一人ひとり異なる。職位の要素は職位で決まり、職務能力の要素は個人の技能・知識水準向上のための教育・訓練の履歴や能力評価の結果を反映させた指標である。これらの3つの要素を掛け合わせて技能価値 Q を求める。

以上に示した方法を用いて生産スタッフそれぞれについての技能価値を求めることができる。生産工程全体の技能価値は個人の技能価値の全員分の和をとったものである。

ある化学プラントにおいて、HA法（Hierarchical Analytic Method）を用いて技能価値を定量的に評価した例について述べる [41], [42]。このプラントには3名の生産スタッフ（リーダー（supervisor）、サブリーダー（deputy supervisor）、新人（newcomer））がおり、それぞれの1か月の業務を分析してその中に含まれる3つの技能について携わる時間を調べた（表 5.6, 表 5.7, 表 5.8 参照）。このプラントは昼間のみ稼働し1か月の稼働日数は23日、1日あたりの平均稼働時間は8時間である。

5.3.1.1 技能価値の計算方法

生産工程における技能価値は次の3段階の計算によって求める。

1. 生産スタッフごとの3つの技能の重要性の違い（職位別技能重視度）をあらわすための一対比較行列の要素を定義する（表 5.1 参照）。次に生産スタッフごとに一対比較行列 A_k を定める。ここで一対比較行列 A_k は、リーダーの場合コミュニケーション技能がオペレーション技能より重要で、メモリ技能よりもやや重要であることを示し（表 5.2 参照）、サブリーダーの場合コミュニケーション技能とメモリ技能はそれぞれオペレーション技能よりやや重要であることを示している（表 5.3 参照）。新人の場合どの技能も重要性は等しいので、一対比較行列 A_k は単位行列である（表 5.4 参照）。これらの一対比較行列 A_k について固有値、固有ベクトルを計算する。行列 A_k の最大固有値 λ_{max} に関する整合度 CI は $CI = (\lambda_{max} - 3) / (3 - 1)$ に等しく、この値がすべて 0.1 より小さいので一対比較行列 A_k には整合性がある [36]。最大固有値 λ_{max} に対する固有ベクトルを各成分の積を用いて正規化すると重みベクトル W_{1k} が得られる（表 5.5 参照）。
2. 生産スタッフの日常の業務に含まれる各技能について時間であらわしたものを行列 B_k （表 5.6, 表 5.7, 表 5.8 参照）（技能表出時間）とする。生産スタッフの業務を分析することによって行列 B_k の成分が決まる。このプラントにおける業務は7つに分類されている。ここで評価の対象となっているのは次の業務である。
 - A) プラントの稼働状況の監視と制御における設定値変更
 - B) 運転管理レポートへのデータ入力
 - C) 運転管理レポートの編集
 - D) 生産計画の作成
 - E) プロセス異常・設備故障の原因究明
 - F) 設備の点検、プラント稼働の準備作業

G) グループ内（リーダー、サブリーダー、新人）の作業打ち合わせ

3. 行列 B_k に重みベクトル $W1_k$ を掛けた結果をベクトル Tk とする。ベクトル Tk は各生産スタッフの業務に含まれる技能を時間であらわしたもの（技能表出時間）を生産スタッフごとの3つの技能の重要性の違い（職位別技能重視度）で重み付けしている（重み付き技能表出時間）。

$$\begin{aligned} T1 &= B_1 \cdot W1_1 \\ &= (22.96, 10.58, 3.852, 13.08, 4.912, 42.61, 27.56)^T \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} T2 &= B_2 \cdot W1_2 \\ &= (16.11, 33.26, 33.26, 8.263, 4.549, 33.26, 22.73)^T \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} T3 &= B_3 \cdot W1_3 \\ &= (5, 30, 20, 0, 5, 60, 20)^T \end{aligned} \quad (5.6)$$

このチーム全体の重み付き技能表出時間は次のようにあわせる。

$$\begin{aligned} T_{total} &= T1 + T2 + T3 \\ &= (44.07, 73.84, 57.11, 21.34, 14.46, 135.87, 70.29)^T \end{aligned} \quad (5.7)$$

チーム全体の重み付き技能表出時間の大きさ TV は次のとおりである。ここで、 TV の次元は”時間”である。

$$\begin{aligned} TV &= \sum_{i=1}^7 T_{totali} \\ &= 416.98 \end{aligned} \quad (5.8)$$

T_1, T_2, T_3 を合成した行列に、生産スタッフの職位と職務に応じた個別の技能・知識水準をあらわすベクトル V を掛けて、チーム全体の技能価値を求める。

ここで、 $V = (1.2, 1.0, 0.8)^T$ とする。

$$\begin{aligned} Q &= (T1 \ T2 \ T3) \cdot V \\ &= (47.66, 69.95, 53.88, 23.95, 14.44, 132.39, 71.81)^T \end{aligned} \quad (5.9)$$

チーム全体の技能価値の大きさ QV は次のとおりである。ここで、 QV の次元は”時間”である。

$$QV = \sum_{i=1}^7 Q_i = 414.08 \quad (5.10)$$

表 5.1: Scale for pair wise comparison

i と j の比較	\rightarrow	a_{ij}
i は j と同じくらい重要である。	\rightarrow	1
i は j より少しだけ重要である。	\rightarrow	2
i は j よりかなり重要である。	\rightarrow	3
i は j より非常に重要である。	\rightarrow	4
i は j よりきわめて重要である。	\rightarrow	5

表 5.2: Matrix for pair wise comparison (supervisor) A_1

a_{ij}	1) オペレーション 技能	2) メモリ技能	3) コミュニケーショ ン技能
1) オペレーション 技能	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$
2) メモリ技能	2	1	$\frac{1}{2}$
3) コミュニケーショ ン技能	3	2	1

表 5.3: Matrix for pair wise comparison(deputy supervisor) A_2

a_{ij}	1) オペレーション 技能	2) メモリ技能	3) コミュニケーショ ン技能
1) オペレーション 技能	1	1	$\frac{1}{2}$
2) メモリ技能	1	1	1
3) コミュニケーショ ン技能	2	1	1

表 5.4: Matrix for pair wise comparison (newcomer) A_3

a_{ij}	1) オペレーション 技能	2) メモリ技能	3) コミュニケーショ ン技能
1) オペレーション 技能	1	1	1
2) メモリ技能	1	1	1
3) コミュニケーショ ン技能	1	1	1

表 5.5: Eigenvalue and eigenvector of pair wise comparison matrix

	Supervisor	Deputy supervisor	Newcomer
Eigen vector	0.2724 0.4662 0.8417	0.44080 0.4979 0.74865	0.57735 0.57735 0.57735
Maximum eigen value λ_{\max}	3.0621	3.0057	3.0
Consistency CI	0.03105	0.00285	0.0
Weight vector $W1$	0.5740 0.9823 1.7785	0.8054 0.9098 1.3633	1.0 1.0 1.0

表 5.6: Matrix of working hours devoted to each skill (supervisor) B_1

		[h/month]		
		Skill j		
Work i		1)	2)	3)
		A)	40	0
B)	15	2	0	
C)	5	1	0	
D)	6	8	1	
E)	0	5	0	
F)	40	20	0	
G)	0	10	10	

表 5.7: Matrix of working hours devoted to each skill (deputy supervisor) B_2

		[h/month]		
		Skill j		
Work i		1)	2)	3)
		A)	20	0
B)	30	10	0	
C)	30	10	0	
D)	8	2	0	
E)	0	5	0	
F)	30	10	0	
G)	0	10	10	

表 5.8: Matrix of working hours devoted to each skill (newcomer) B_3

		[h/month]		
		Skill j		
Work i		1)	2)	3)
		A)	5	0
B)	20	10	0	
C)	15	5	0	
D)	0	0	0	
E)	5	0	0	
F)	50	10	0	
G)	0	15	5	

5.3.1.2 要員の入れ替えに関する検討

ある化学工場の生産工程において生産に携わるスタッフの業務内容を分析してそれをもとに技能価値を定量的に評価できることを示したが、チームを組んでいる生産スタッフを他のプラントからの要員で入れ替えるとそのプラントの技能価値はどのような影響を受けるかを調べる [15]。

1. サブリーダーの新人による入れ替え

3名の生産スタッフのうち、サブリーダーを新人で入れ替えた場合について検討する。ここで新たに配属された新人は業務引き継ぎ期間を経てサブリーダーの受け持っていた業務をそのまま受け継ぐことができているものとする。この場合は $T2$ の計算において $W1_2$ を $W1_3$ で置き換えればよい。 $T1$ は式 (5.4)、 $T3$ は式 (5.6) を用いて求める。

$$\begin{aligned} T2 &= B_2 \cdot W1_3 \\ &= (20, 40, 40, 10, 5, 40, 20)^T \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} Q &= (T1 \ T2 \ T3) \cdot V \\ &= (54.04, 71.30, 63.23, 30.31, 13.53, 109.74, 67.26)^T \end{aligned} \quad (5.12)$$

ここで $V = (1.2, 0.8, 0.8)^T$ である。したがって技能価値の合計は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} QV1 &= \sum_{i=1}^7 Q_i \\ &= 409.41 \end{aligned} \quad (5.13)$$

2. 新人のサブリーダーによる入れ替え

3名の生産スタッフのうち、新人をサブリーダーで入れ替えた場合について検討する。ここでも前の例と同じく業務引き継ぎは完了しているものとする。この場合は $T3$ の計算において $W1_3$ を $W2$ で置き換えればよい。 $T1$ は式 (5.4)、 $T2$ は式 (5.5) を用いて求める。

$$\begin{aligned} T3 &= B_3 \cdot W1_2 \\ &= (4.027, 25.21, 16.63, 0, 4.027, 49.37, 20.46)^T \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} Q &= (T1 \ T2 \ T3) \cdot V \\ &= (47.69, 71.17, 54.51, 23.96, 14.47, 133.76, 76.26)^T \end{aligned} \quad (5.15)$$

ここで $V = (1.2, 1.0, 1.0)^T$ である。

$$\begin{aligned} QV2 &= \sum_{i=1}^7 Q_i \\ &= 421.82 \end{aligned} \quad (5.16)$$

3. 2とおりの入れ替えの結果

生産スタッフの入れ替えを行なう前の技能価値は $QV = 414.08$ であったが、サブリーダを新人で入れ替えると $QV1 = 409.41$ に、新人をサブリーダで入れ替えると $QV2 = 421.82$ になった。すなわち $QV2 > QV > QV1$ という結果が得られた。このことからわかるようにサブリーダを新人で入れ替えると技能価値は入れ替え前に比べて減少している。しかし配属された新人は本来求められるよりも要求技能の高い職務に従事しているので自身の技能の向上によってさらに効率のよい生産活動が望める。

また新人をサブリーダで入れ替えると技能価値は入れ替え前に比べて増加している。しかしサブリーダは本来求められるよりも要求技能の低い職務に従事しているので職位にふさわしい生産活動とはいい難い。そこで技能価値の計算で現実の生産体制を反映させるために生産スタッフの技能・知識水準をあらわすベクトル V の調整を行なう。計算例ではベクトル V の成分をリーダは 1.2、サブリーダは 1.0、新人は 0.8 としているが、ここでは次のように定義している。

$$V_i = \text{職位に基づく要素} + \text{職務能力に基づく要素} \quad (5.17)$$

職位に基づく要素は個人の経験や能力によって決まり労務費につながる固定的な指標である。ここでリーダは 1.0、サブリーダは 0.8、新人は 0.6 とする。

職務に基づく要素は現在の職務が職位に応じて求められる技能・知識水準にふさわしいものかどうかをあらわす指標である。職務が職位にふさわしいものである場合は 0.2、職務において職位に対する要求水準をこえた高い技能を発揮している場合は 0.4、職務において職位から見て低い技能に甘んじている場合は 0 とする。したがって、 V_i の最大値は 1.4、最小値は 0.6 である。

ベクトル V の成分を 2 つの要素の加算によってあらわすことで、技能価値の評価に個々の生産スタッフの技能・知識水準をより正確に反映させることができる。特に職務能力に基づく要素は定期的な見直し評価が必要である。

5.4 考察と結論

この章では技能と技術の関わりおよび技能の定量的評価について述べた。生産活動には技能と技術は不可欠であるが、一般的にその意味が正しく理解されているとはいいい難い。ここでは技能は人に内在するもので、技術は人の技能を形式化して明示したものと定義した。技能を伝承するにあたっては人の技能を形式化したものを介して行なうことが必要である。そのために生産技能データベースを構築し、その中に技能を格納し参照するシステムを提案した。その際には円滑な運用をはかるためのマネジメントシステムが不可欠である。技能と技術は相互補完的に作用し合いそれぞれレベルアップしていくが、技能を技術化することで生産支援システムの要素機能として生産スタッフの業務を代替させることができる。また技能は生産活動に不可欠のものであっても直接その量を測定することができない。業務従事時間は実測できるがそれは技能をあらわすものではない。そこで生産スタッフの職位や職務能力を業務従事時間と組合わせて技能量（技能価値）を定義した。これを用いてあるグループにおける技能価値を評価した。さらに、チームの構成

メンバーを入れ替えるとチームの技能価値がどう影響を受けるかについて検討した [35], [9], [15]。高い技能を要求される職務に要求技能の低い生産スタッフをつけると技能価値は減少するかのように見えるが、自分に与えられた要求水準をこえる技能を要する職務を遂行していることから実際には技能価値は決して減っていない。また生産スタッフを自分の持つ技能・知識水準よりも要求技能の低い職務につけると技能価値は増加するかのように見えるが、自分に求められるよりも低い技能に甘んじているとすれば技能価値は実際上増えているとは言えない。ここで示した方法を用いてプラントにおける技能価値がどのように変化しているかをみれば、チームを構成するメンバーが入れ替わっても適切に職務を遂行しているかどうかを確かめることができ、また一人ひとりの技能が向上しているかどうかもわかる。この方法を用いた技能の定量的評価によってグループ内での業務分担や複数のグループ間での人員配置の最適化などが可能になる（第4章）。

第6章 弾力性向上に関わる生産支援システムの役割

生産工程の弾力性には生産支援システム（Production Support System、以下 PSS と称す）の寄与が大きい。PSS を構成する要素機能は生産スタッフの技能をシステムで代替させることを目的として開発される。その結果生産スタッフの業務には時間的な余裕が生まれ、それを利用して訓練・教育を行ない、技能・知識水準の向上で生産工程の弾力性も強化されるという効果が期待できる。この章では実際の生産工程に導入して生産スタッフの省力化に効果のあった3つの要素機能について述べる。

6.1 バッチ反応機生産スケジューリングシステム

バッチプラントは化学工業においてよく見られる生産方式である。少量多品種の生産に向いているが、複数の系列がある場合や生産能力が異なる場合などには最適な生産計画（コスト最小、ロス最小、機会損失最小など）の策定がきわめて難しい。このような問題を制約条件と目的関数を用いて定式化し、制約論理プログラミングを用いて解を求めた。

6.1.1 スケジューリングシステム導入の背景

バッチプラントにおいては生産効率は生産スケジュールのよしあしに大きく依存するといわれているが、難しい問題も多くシステム化は遅れている [53]。プラントの生産スケジュール作成問題は、スケジューリング問題としてこれまでも数多くの取り組みがなされてきたが [54], [55], [56], [57], [58], [59]、特にバッチプラントの場合は生産が間歇的なので、この問題を組合せ問題に置き換えることができる。組合せ最適化に対してもこれまでにさまざまな解法が提案されてきたが [60]、大規模な問題では可能な組合せの数が爆発的に増加して実用的な時間（5分以内）の範囲では解けないことも多い。このような問題を解くには制約論理プログラミング（Constraint Logic Programming ; CLP） [61], [62] が有効であるといわれている [63]。CLP は変数の探索空間を縮小するために分枝限定法 [64] や制約伝播 [61], [62] の技術を用いている。しかし CLP では実行可能解は短い時間で求まるが、最適解に達するまでに時間がかかる場合もあるといわれている [60] のでその性質を活かした使い方が求められる。特に大規模なプラントの生産スケジュールの場合には、解を求める際に運転管理上の特性に合わせてさまざまな工夫をすることが多い。実際にプラントの運転に用いる大規模な生産スケジュールを求めるにあたっては求解の迅速さと結果の簡明さは必須であり、その点を重視する解法を用いることが多い。これまでに提案された2つの手

法 [42], [43] について、前者では解を求める過程で制約をあらかじめ設けた優先度に従って緩和して実行可能解を求めやすくしているが解の妥当性の判定に不確かさの生じるおそれがあり、後者ではロットの割り付けのルール（解の探索ルール）をシミュレーション結果によって変えていることや、制約条件が多いときに最終的に得られた解がそれらをみたしていることを判定する必要があるなど、実プラントに適用するには複雑すぎるアルゴリズムが難点である。本節で提案する方法は解を求める過程において制約条件を固定して、得られた結果が妥当なものであることを判定しやすくしていること、そして適切な目的関数を明確に定義し複数のスケジュールを比較する際に優劣がつけやすくしていることに特徴がある。本節では6台のバッチ反応機からなるプラントを対象とする、CLPを用いた生産スケジューリングの事例について、問題の定式化、生産スケジュールの作成手順、得られた結果、さらに今後の課題について述べる。

6.1.2 問題の定式化

CLPを用いて解を求めるためには問題を制約条件と目的関数について定式化する必要がある、まず検討対象の生産工程を定義する。さらに変数、制約条件、目的関数を定義する。

6.1.2.1 バッチ反応機における生産工程

対象となるプラントは大きさの異なる6台のバッチ反応機からなり、生産スケジューリングで必要とする生産工程は次のとおりである（各工程のつながりは図6.1参照）。

1. 仕込み・反応（原料の装入および反応開始から完了までの工程）
2. 荷造り（反応機に荷造り機を装着し、種々の缶に詰める工程）
3. 洗浄（水または薬液による反応機内部の洗浄工程）

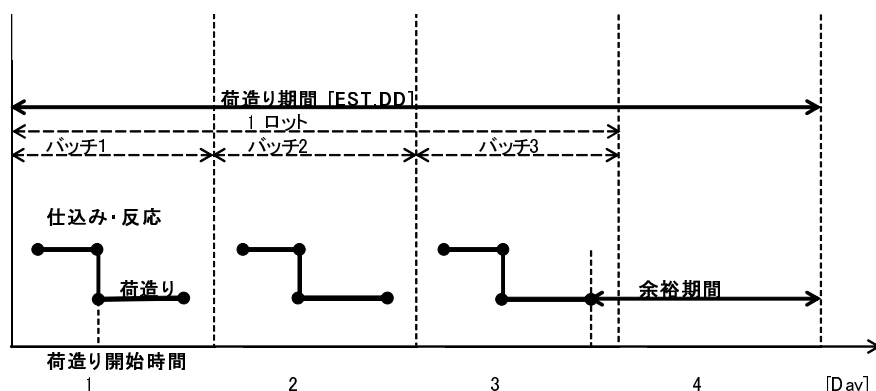


図 6.1: Packing duration [EST,DD] and margin

6.1.2.2 変数と制約条件

生産スケジュールの入力を構成する基本単位をロットと呼ぶ（図 6.1 参照）。1 ロットは何バッチかに分けて同じ反応機で連続して生産する。ロットは次のような共通の属性を持つ。

1. ロットの通し番号 (Lot ID no.)
2. 銘柄名 (Grade)
3. ロットの生産量 (Quantity ; ton)
4. 荷造り期間 [EST,DD]; (Earliest Start Time, Due Date ; hour)
5. バッチサイクル (Cycle; hour) 標準値は 24、48、72 時間である。
6. 生産可能な反応機 (Reactor ; reactor no.) (1 桁の数字 1 から 6 までが反応機の番号を示す)

初期生産スケジュールではバッチサイクルの標準値を用いて、ロットの銘柄の生産が可能なすべての反応機を解の探索の対象とする。また生産可能な反応機を限定することもできる。

解くべき問題は変数と制約条件であらわされる。変数とは解の探索にあたってロットを反応機にどう割り付けるかを定める際に変化させて試行するロットの属性を指し、ここでは 1. ロットの通し番号 (Lot ID no.) と 6. 生産可能な反応機である。

この問題の制約条件は次のとおりである。なお以下で述べる固定データはあらかじめ設定されており、一つの解を求めるにあたって不変である。

洗浄制約 製品銘柄は洗浄の有無を明らかにするためにグループ化されている。異なるグループに属する銘柄を続けて同じ反応機で生産する場合、前の銘柄の荷造りが終わった後で反応機の洗浄を行なう。その際洗浄時間が 1 バッチに必要な時間に加えられる。図 6.1 に示すロットの例では、3 番目のバッチの直後に挿入される。洗浄時間は固定データとして与えられている。

荷造り開始時刻制約 荷造りは毎日決まった時刻に開始される（図 6.1）。

工程順序制約 あるバッチにおいて仕込み・反応、荷造り、洗浄の各工程はこの順序で並び、しかも隙間なしにつながっている。洗浄工程は洗浄が必要な場合にのみ、先行バッチの荷造り工程のすぐ後に行なわれる。

荷造り停止日制約 設備の保守のために、反応機ごとに荷造り停止日を指定することができる。この日には荷造りは行なわず、またこの日がロットの途中に割り込むことはない。この期日は反応機ごとに入力データで指定する。

代替反応機指定制約 製品の銘柄ごとに生産可能な反応機を指定する。入力データで自由に変更可能である。

荷造り期間 [EST,DD 制約] 各ロットには入力データとして荷造り期間 [EST,DD] を与える。ロットは [EST,DD] の間に前詰めで割り付ける（このような割り付け方を前倒しと呼ぶ）。

バッチサイクル制約 前後するバッチの荷造り開始時刻の間隔を指す。一つのロットが複数のバッチからなる場合、この間隔はロット内で一定である。例えば図6.1ではバッチサイクルは24時間で3バッチを3日間で生産しているが、48時間に変更すると3バッチの生産に6日間必要である。

仕込み・反応時間制約 銘柄ごとに仕込み反応時間が決まっており、固定データとして与えられている。

荷造り必要時間制約 銘柄ごとに1バッチに必要な荷造り時間は決まっており、固定データとして与えられている。

6.1.2.3 CLPにおける解の探索アルゴリズム

解を探索する過程は図6.2の探索木で表現することができる（ここでは探索木は3ロットの生産を3台の反応機に割り付けることを想定している）。あらかじめ決めた規則にしたがって、ロットを一つ選ぶたびにノード（節点）が生成される。各ノードでは、生産可能な反応機の中から割り付ける反応機を一つ選択する。この反応機はエッジ（辺）であらわされ、その先にまたノードが生成される。このように階層の数が増えて生産すべきすべてのロットを反応機に割り付けることができたとき、それは実行可能解である。図6.2の例では3ロット目までの選択をあらわし、1番目に選ばれたロットは2台の反応機で生産が可能で、2番目に選ばれたロットは3台の反応機で生産が可能である。また3番目に選ばれたロットは2台の反応機で生産が可能である。

あるロットの荷造り期間 [EST,DD] とそのロットの反応機への割り付けの例を図6.1に示す（この図は実際の生産スケジュールの出力フォーマットにおけるバッチの表現と同じガントチャートで示した。実際の生産スケジュールは図6.3参照）。この例では荷造り期間 [EST,DD] は [1,4] である。このロットは選ばれた反応機において3バッチで生産可能であるとし、期間 [1,4] のすべてに割り付け可能ならば、前倒しで期間 [1,3] に割り付けられる。そのとき荷造り期間 [EST,DD] の残り（荷造り余裕期間）は3バッチ目の荷造り終了から4日目の終わりまでである。ここで示した荷造り期間 [EST,DD] と荷造り余裕期間は、全生産ロットから1ロットずつ選ぶ際の判断基準として用いる。

このシステムにおいて解の探索手順は次のとおりである。

1. ロットの選択と反応機の指定

スケジュール対象期間における生産ロットの属性は、生産すべき全ロットについて入力データとして与えられる（表6.1に1か月分の生産ロットの例を示す）。生産すべき全ロットから一つずつロットを選ぶ規則は次のとおりである。

a) ロットの属性である荷造り期間 [EST,DD] のもっとも短いものを選ぶ。

a-1) 同じ荷造り期間 [EST,DD] のロットが複数ある場合

図6.1に示すように、ロットを最小のバッチ数で割り付けた場合に残る荷造り期間 [EST,DD] のもっとも短いものを選ぶ（すなわち荷造り期間 [EST,DD] の残り、図6.1における荷造り余裕期間の短いもの）。

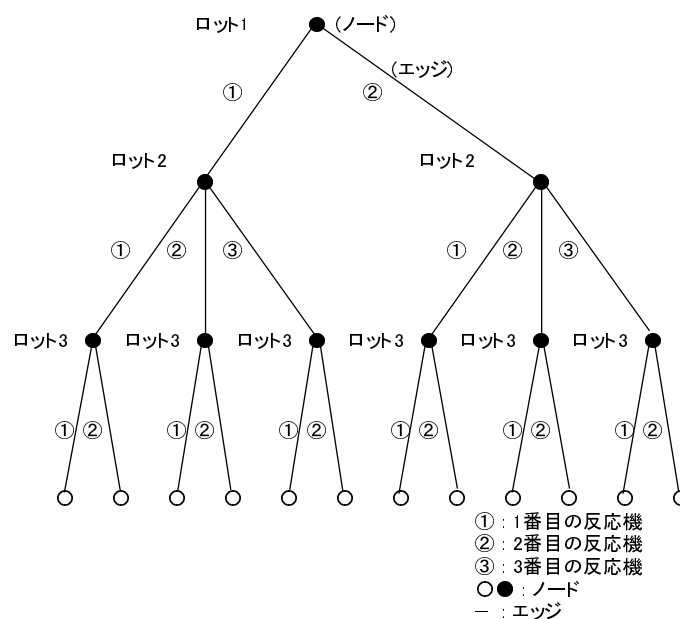


図 6.2: Search tree of simplified problem

a-2) 荷造り期間の残りが同じであるロットが複数ある場合

Lot ID no. が小さいものを選ぶ。

b) ロットを選んだら、そのロットを生産可能な反応機のうちで生産バッチ数がもっとも少なくなる反応機を選ぶ。生産バッチ数はロットの生産量を反応機の容量で割って求めるが半端分は1バッチとみなす。

b-1) 最小バッチ数の反応機が複数ある場合

容量がもっとも大きい反応機を選ぶ。

b-2) 容量がもっとも大きい反応機が複数ある場合

反応機番号が小さいものを選ぶ。

初期解（最初に見つかった実行可能解）を早く見つけるために、a) で荷造り期間 [EST,DD] に関する制約の厳しいロットから順に選択し、さらに b) で生産可能な反応機のうちバッチ数の少なくすむ反応機、すなわち容量の大きい反応機から順に選択する。

2. 解の探索

選ばれたロットは選ばれた生産可能な反応機に、そのロットに与えられた荷造り期間 [EST,DD] をみたとすように、その期間の前に詰めて（前倒しで）割り付ける。他のロットがすでに割り付けられている場合に、そこに重ねることや入力データで指定された荷造り停止日に割り付けることはできない。制約条件をみたとすことができず選んだ反応機にロットを割り付けることができなければ、ブランチ（探索木で次のエッジに移ること）して次の生産可能な反応機（必要なバッチ数がもっとも少ないもの）について試行する。そのノードに割り付けることのできる反応機がなければ、バックトラック（一つ前のノードに戻る）が起きる。そのときには一つ前のロットの反応機への割り付けは取り消され、改めて割り付ける反応機を選びなおす。そのノードですでに選んだ反応機は除いて、残りの生産可能な反応機からバッチ

数がもっとも少なくなる反応機を選ぶ。この操作を暫定解（実行可能解）が見つかるまで繰り返す。もし最後まで暫定解が見つからなければ、解なしとして終了する。

3. 終了

解の探索を続け、可能なすべての探索（図 6.2 の探索木において右下の最終エッジまで）が終了したら、その時点における暫定解を最終解とする。またあらかじめ設定した計算打ち切り時間（5分）に達したら強制的に探索を打ち切り、その時点で暫定解があればそれを最終解として計算を終了する。もし暫定解が見つかっていなければ解なしとして終了する。

4. 例外処理

反応機 DC5 で仕込み・反応を行ない、その終了後に反応機 DC6 に移液し静置して荷造りするという特殊銘柄がある（特殊銘柄の割り付けについては図 6.3 参照）。この銘柄はロット選択の際にその他の銘柄に優先させて、入力データとして与えられた荷造り期間 [EST,DD] の範囲で、反応機 DC5、DC6 に Lot ID no. 順に前倒しで割り付ける（特殊銘柄はつねに 1 ロットを 1 バッチで生産し、サイクルタイムの制約は適用されない）。さらに反応機 DC5 においては、特殊銘柄の間の空き時間にその他の一般銘柄を割り込ませて生産することができる。ただし生産量を増やすため、特殊銘柄と一般銘柄（特殊銘柄でない銘柄）の間では一般銘柄のサイクルタイムの制約を無視している。

6.1.2.4 目的関数

数多くの実行可能解の中から最適解を見つけるために、そして解の探索のための計算量を減らすために目的関数を用いる。この問題における目的関数はスケジュール対象期間内の総生産バッチ数とし、これがスケジュールのよしあしを評価する基準になる。ここで目的関数を総生産バッチ数としたのはプロセスのユーティリティコストを削減するためと生産量に応じた系列数（反応機台数）の削減を可能にするためである。目的関数に他の項目（洗浄回数、作りすぎの量など）を加えると次のような問題が起きるのでここでは総生産バッチ数のみにした。

- 各反応機について生産期間内でロットの順番を入れ替えたスケジュールを比較して評価する必要があり計算量が増大する。
- 目的関数の評価項目の和をとってそのまま評価すると、次元の異なる量を比較するという不都合が生じるので無次元化が必要である。

すべての生産ロットを反応機に割り付け終わって得られた実行可能解を暫定解と呼ぶ。暫定解が一つ求まった後もさらによい解（目的関数値の小さい解）を求めて探索を続ける。もし目的関数値の小さい解が求まったら暫定解を更新するが、目的関数値が同一の解が見つかっても暫定解は更新しない。解の探索は可能なロットの組合せの試行が終わるまで続ける。解を求める過程においてロットが生産可能な反応機にうまく割り付けられたときには、そのロットのバッチ数を目的関数値に加算する。このとき目的関数値が暫定解の値よりも小さくなければ、そのロットの割り付けは取り消して目的関数値を元に戻して次の選択可能な反応機への割り付けを試行するかあるいはバックトラックする（枝刈り）。

6.1.3 生産スケジュール作成

生産スケジュールには、初期生産スケジュール、平準化生産スケジュール、途中変更生産スケジュールの3種類があり、対象期間のはじめに入力データをそのまま用いてスケジューリングするもの、必要に応じて対象期間全体あるいは特定の反応機に分散させてスケジューリングするものである。

6.1.3.1 生産スケジュールを作成する際の前提

生産スケジュールの入力データ（生産ロットに関する情報）は前月末に上位システムから与えられるが、その時点では生産期日についてはまだ確定していない。その時点で確定している入力データと制約条件、目的関数を用いて解を求めると、それは実用的なものとはいえない（図6.3に例を示す）。そのために入力データを修正することによって平準化生産スケジュールを作成する。その目的は飛び込み生産が必要な際にスケジュール変更なしに対応できる余裕を持たせるため、また設備の均等な使用のために生産の偏り（時期あるいは使用する反応機）をなくすことである（図6.4に例を示す）。

またスケジュールを期間の途中でたてなおす際には（途中変更生産スケジュールと呼ぶ）、生産期日や生産する装置が大きく変わることのない、製造側の負担を重くしないスケジューリング（包材の手配が済んでいたり、荷造り要員の配置が決まっていたりするとその変更に関与する）が必要である（図6.5に例を示す）。

平準化生産スケジュールをたてる際にはロットごとのバッチサイクルを標準より長くしてロットの生産時間を長くとる。その結果バッチ間に空き時間ができるので、そこに飛び込み生産を割り込ませる。途中変更生産スケジュールの場合には、追加ロット以外はロットごとに生産可能な反応機を限定することや荷造り期間を狭めることによって生産ロットの位置（生産期日）を固定するのが効果的である。

6.1.3.2 生産スケジュール入力データ

上位のシステムからその月に生産する銘柄とその数量を得て生産ロットを設定する。ここで用いた例は1か月分で46ロットからなる。表6.1に初期生産スケジュールで用いる1か月分の生産ロットの例を示す。また反応機1（DC1）は9日を荷造り停止日としている。表6.2は平準化生産スケジュールの入力データ（表6.1と同一のロットは除く）、表6.3は途中変更生産スケジュールの入力データ（18日以降の生産ロットのみを示す）である。

6.1.3.3 初期生産スケジュール

入力データがすべて準備できたら初期生産スケジュールを作成する（入力データは表6.1参照のこと。Lot ID no. の部分は上旬に生産するロットである）。結果は図6.3のようにガントチャート

形式で出力される。生産スケジュールは横軸に日付をとり、縦に6台の反応機を並べたものである。特殊銘柄を除いて反応機ごとに1日1バッチの生産で、前後バッチの生産銘柄の関係から洗浄が必要な場合は先行銘柄の荷造り工程のすぐ後に洗浄工程が挿入されている。銘柄名はアルファベット2文字であらわし、その上の欄の番号はLot ID no. である。さらにこの生産スケジュールにおいてA5、A6、A7の3つの銘柄は特殊銘柄で、反応機DC5、DC6を用いて生産される。特殊銘柄はDC5で反応させたあとDC6に移液して静置後荷造りする。ここで求めた解は与えられた入力データによる必要な制約条件をすべてみたす合計バッチ数72のものである。

表 6.1: Input data of initial plan

Lot ID no	銘柄	数量	EST	DD	サイクル	反応機
			[t]	[date]	[date]	[hr]
1	E5	3	1	31	24	46
2	E4	10	1	31	24	123456
3	E3	7	1	31	24	123456
4	E2	1	1	31	24	123456
5	E1	7	1	10	24	123456
6	E0	1.8	1	31	24	123456
7	D9	2.4	1	31	24	123456
8	D8	20	1	31	24	3
9	D7	10	1	10	24	3
10	D6	4.5	1	31	24	24
11	D5	4.5	1	31	24	35
12	D4	8	1	10	24	35
13	D3	5	1	10	48	123456
14	D2	4	1	31	24	123456
15	D1	10	1	10	24	24
16	D0	4	1	31	24	1
17	C9	10	1	31	24	123456
18	C8	10	1	31	24	24
19	C7	20	1	31	24	123456
20	C6	10	1	10	24	123456
21	C5	10	1	31	24	24
22	C4	10	1	10	24	24
23	C3	10	1	31	24	24
24	C2	6	1	31	24	123456
25	C1	6	1	31	24	123456
26	C0	4	1	31	24	3
27	B9	0.1	1	31	24	3
28	B8	16	1	31	24	3
29	B7	8	1	10	24	3
30	B6	2.3	1	10	24	123456
31	B5	8.4	1	10	24	123456
32	B4	6	1	31	24	35
33	B3	5	1	31	24	123456
34	B2	10	1	31	24	35
35	B1	10	1	10	24	35
36	B0	10	1	31	24	35
37	A9	1.4	1	31	24	123456
38	A8	3.1	1	31	24	35
39	* A7	3.4	1	31	72	5
40	* A6	3.2	1	31	72	5
41	* A5	3.2	1	31	72	5
42	A4	10	1	31	24	1
43	A3	10	1	31	24	1
44	A2	5	1	10	24	1
45	A1	5	1	31	24	35
46	A0	5	1	10	24	35

* 特殊銘柄

6.1.3.4 平準化生産スケジュール

初期生産スケジュールでは生産が時期的に（前倒し）あるいは特定の反応機（容量の大きい反応機）に偏っている。実際に使用するスケジュールは飛び込み生産や予定変更に対して、スケジュールを変えずに応じることのできる余裕を持った平準化されたものが望ましい。そのために入力データを修正して（表 6.2 参照）、図 6.4 で示すような解を求めなおした。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2				
LOT ID no.	44	42	42	43	43	16	20	20																													
DC1 (5 t) 銘柄	A2	A4	A4	A3	A3	D0	C6	C6		D3																											
装入 反応	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋		⌋																											
荷造り	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋		⌋																											
洗浄																																					
LOT ID no.	15	15	22	22	18	18	21	21	23	23	10																										
DC2 (5 t) 銘柄	D1	D1	C4	C4	C8	C8	C5	C5	C3	C3	D6																										
装入 反応	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋																										
荷造り	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋																										
洗浄																																					
LOT ID no.	9	9	29	29	8	8	8	8	28	28	28	26	27	4	36	36	34	34	2	2	17	17	33	25	6	7	11	32	45	24							
DC3 (6 t) 銘柄	D7	D7	B7	B7	D8	D8	D8	D8	B8	B8	B8	C0	B9	E2	B0	B0	B2	B2	E4	E4	C9	C9	B3	C1	E0	D9	D5	B4	A1	C2							
装入 反応	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋		
荷造り	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	
洗浄																																					
LOT ID no.	31	31	30																																		
DC4 (4.5 t) 銘柄	B5	B5	B6																																		
装入 反応	⌋	⌋	⌋																																		
荷造り	⌋	⌋	⌋																																		
洗浄																																					
LOT ID no.	39	35	35	40	12	46	41	5	19	19	19	3	38	37	14																						
DC5 (8 t) 銘柄	*	A7	B1	B1	A6	D4	A0	A5	E1	C7	C7	C7	E3	A8	A9	D2																					
装入 反応	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋																				
荷造り	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋	⌋																				
洗浄																																					
LOT ID no.			39			40			41	1																											
DC6 (3.5 t) 銘柄			*			*			*																												
装入 反応			⌋			⌋			⌋																												
荷造り			⌋			⌋			⌋																												
洗浄																																					
バッチ数	72	*	* 特殊銘柄																																		
洗浄回数	15																																				

図 6.3: Output data of initial plan

このスケジュールの入力データの変更点は次のとおりである。(変更後の入力データを表 6.2 に示す。変更部分を網かけで示す)

1. 荷造り期間の変更：ロット 42、43 について当月上旬の出荷の可能性はなくなったことを想定して、[1,31] から [11,31] に変更。
2. バッチサイクルの変更：ロット 2, 8,14,17,18,19,21,23,24,25,28,33,34,35,36,42,43 で 24 時間から 48 時間に変更。これらのロットにおいては、過去の実績から飛び込み生産の可能性があると想定する。

初期生産スケジュールでは容量の大きい反応機で生産していたロットが、平準化生産スケジュールでは容量の小さい反応機へ移ったためバッチ数は 72 から 81 に増えたが、生産時期と使用する反応機の偏りは少なくなっている（平準化生産スケジュールを図 6.4 に示す。変更部分を網かけで示す）。この平準化によって初期生産スケジュールに比べて合計 36 バッチ分（バッチサイクルが 24 時間の銘柄について）の余裕ができた。できた余裕は色の薄い網かけで示す。ただし洗浄操作が必要な銘柄を飛び込み生産する場合などにはここで作った余裕では足りないこともある。そのときにはスケジュールをたてなおす。

6.1.3.5 途中変更生産スケジュール

図 6.4 に示す平準化生産スケジュールで生産を開始すると、月の途中で生産スケジュールを修正したり見直したりする必要が生じる。必要に応じて入力データの生産ロットの荷造り期間を固定

表 6.2: Input data of leveled plan

Lot ID no	銘柄	数量	EST	DD	サイクル	反応機
			[t]	[date]		
2	E4	10	1	31	48	123456
8	D8	20	1	31	48	3
14	D2	4	1	31	48	123456
17	C9	10	1	31	48	123456
18	C8	10	1	31	48	24
19	C7	20	1	31	48	123456
21	C5	10	1	31	48	24
23	C3	10	1	31	48	24
24	C2	6	1	31	48	123456
25	C1	6	1	31	48	123456
28	B8	16	1	31	48	3
33	B3	5	1	31	48	123456
34	B2	10	1	31	48	35
35	B1	10	1	10	48	35
36	B0	10	1	31	48	35
42	A4	10	11	31	48	1
43	A3	10	11	31	48	1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2			
LOT ID no	44	16	20	20	30							42	42	43	43																					
銘柄	A2	D0	C6	C6	B6		D3				A4	A4	A3	A3																						
装入 反応	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞		⌞				⌞	⌞	⌞	⌞																						
荷造り	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞		⌞				⌞	⌞	⌞	⌞																						
洗浄	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞		⌞				⌞	⌞	⌞	⌞																						
LOT ID no.	15	15	22	22		21		21	5	5																										
銘柄	D1	D1	C4	C4		C5		C5	E1	E1																										
装入 反応	⌞	⌞	⌞	⌞		⌞		⌞	⌞	⌞																										
荷造り	⌞	⌞	⌞	⌞		⌞		⌞	⌞	⌞																										
洗浄	⌞	⌞	⌞	⌞		⌞		⌞	⌞	⌞																										
LOT ID no.	9	9	29	29		8		8		8		8		28	28	28	26	27		19	19	19	19	3	3											
銘柄	D7	D7	B7	B7		D8		D8		D8		D8		B8	B8	B8	C0	B9		C7	C7	C7	C7	E3	E3											
装入 反応	⌞	⌞	⌞	⌞		⌞		⌞		⌞		⌞		⌞	⌞	⌞	⌞	⌞		⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	
荷造り	⌞	⌞	⌞	⌞		⌞		⌞		⌞		⌞		⌞	⌞	⌞	⌞	⌞		⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	
洗浄	⌞	⌞	⌞	⌞		⌞		⌞		⌞		⌞		⌞	⌞	⌞	⌞	⌞		⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	
LOT ID no.	18		18		18		23		23		23	10																								
銘柄	C8		C8		C8		C3		C3		C3	D6																								
装入 反応	⌞		⌞		⌞		⌞		⌞		⌞	⌞																								
荷造り	⌞		⌞		⌞		⌞		⌞		⌞	⌞																								
洗浄	⌞		⌞		⌞		⌞		⌞		⌞	⌞																								
LOT ID no.	39	12	46	40	31	31	41	35		35		36		36		34	34		2	2	17		17	11	32	45	38									
銘柄	A7		D4	A0		A6	*	B5	B5		A5	*	B1	B1	B0	B0	B2	B2	E4	E4	C9	C9	D5	B4	A1	A8										
装入 反応	⌞		⌞	⌞		⌞	⌞	⌞	⌞		⌞	⌞		⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	
荷造り	⌞		⌞	⌞		⌞	⌞	⌞	⌞		⌞	⌞		⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	
洗浄	⌞		⌞	⌞		⌞	⌞	⌞	⌞		⌞	⌞		⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	
LOT ID no.			39				40			41	33		33		25	25		24	24		14		14	1	4	6	7	37								
銘柄			*A7				*A6			*A5	B3		B3		C1	C1		C2	C2		D2		D2	E5	E2	E0	D9	A9								
装入 反応			⌞				⌞			⌞	⌞		⌞		⌞	⌞		⌞	⌞		⌞		⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	
荷造り			⌞				⌞			⌞	⌞		⌞		⌞	⌞		⌞	⌞		⌞		⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞
洗浄			⌞				⌞			⌞	⌞		⌞		⌞	⌞		⌞	⌞		⌞		⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞	⌞
バッチ数	81																																			
洗浄回数	16																																			

図 6.4: Output data of leveled plan

し、また新しいロットを追加して図 6.5 に示すようなスケジュールを求めなおす（途中変更生産スケジュールの入力データを表 6.3 に示す。入力の変更部分は網かけで示す）。

このスケジュールのたてなおしは 18 日に行なっており、対象となっているのは 19 日以降のスケジュールである。このスケジュールの入力データの変更点は次のとおりである。

1. 19 日以降の生産予定ロットについて生産する反応機はすべて固定し、荷造り期間 [EST,DD] も一部固定している (ロット 19)。
2. 追加生産分として、ロット 1 の生産量を 3t 増やしている。

すなわち途中修正生産スケジュールではスケジュール全体が大きく変わらないように配慮している（途中修正生産スケジュールを図 6.5 に示す。生産の終了している部分は網かけで示す）。またこのスケジュールで荷造り日と反応機を入力データで固定したロットは反応機に優先的に割り付けられるので全体として探索領域も縮小され、解が得られるまでの時間は短縮される。さらにこの生産スケジュールでは生産量は 3t 増やしたにもかかわらず、図 6.4 の平準化生産スケジュールに比べて総生産バッチ数が 81 から 80 へと 1 バッチだけ少なくなっている。

表 6.3: Input data of re-scheduled plan

Lot ID no	銘柄	数量	EST	DD	サイクル 反応機	
			[t]	[date]	[date]	[hr]
1	E5	6	19	31	24	6
2	E4	10	19	31	48	5
3	E3	7	19	31	24	5
4	E2	1	19	31	24	6
6	E0	1.8	19	31	24	6
7	D9	2.4	19	31	24	6
11	D5	4.5	19	31	24	5
14	D2	4	19	31	48	1
17	C9	10	19	31	48	5
19	C7	20	21	28	48	3
24	C2	6	18	20	48	6
26	C0	4	19	31	24	3
27	B9	0.1	19	31	24	3
32	B4	6	19	31	24	5
37	A9	1.4	19	31	24	6
38	A8	3.1	19	31	24	5
45	A1	5	19	31	24	5

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2			
LOT ID no.	44	16	20	20	30		13					42	42	43	43				14																	
銘柄	A2	D0	C6	C6	B6		D3				A4	A4	A3	A3	D2																					
装入 反応	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊		⌊				⌊	⌊	⌊	⌊	⌊				⌊																	
荷造り	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊		⌊				⌊	⌊	⌊	⌊	⌊				⌊																	
洗浄	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊		⌊				⌊	⌊	⌊	⌊	⌊				⌊																	
LOT ID no.	15	15	22	22		21		21	5	5																										
銘柄	D1	D1	C4	C4		C5		C5	E1	E1																										
装入 反応	⌊	⌊	⌊	⌊		⌊		⌊	⌊	⌊																										
荷造り	⌊	⌊	⌊	⌊		⌊		⌊	⌊	⌊																										
洗浄	⌊	⌊	⌊	⌊		⌊		⌊	⌊	⌊																										
LOT ID no.	9	9	29	29		8		8		8				28	28				28	26	27			19	19		19	19								
銘柄	D7	D7	B7	B7		D8		D8		D8				B8	B8				B8	C0	B9			C7	C7		C7	C7								
装入 反応	⌊	⌊	⌊	⌊		⌊		⌊		⌊				⌊	⌊				⌊	⌊	⌊			⌊	⌊		⌊	⌊								
荷造り	⌊	⌊	⌊	⌊		⌊		⌊		⌊				⌊	⌊				⌊	⌊	⌊			⌊	⌊		⌊	⌊								
洗浄	⌊	⌊	⌊	⌊		⌊		⌊		⌊				⌊	⌊				⌊	⌊	⌊			⌊	⌊		⌊	⌊								
LOT ID no.	18		18		18		23		23		23	10																								
銘柄	C8		C8		C8		C3		C3		C3	D6																								
装入 反応	⌊		⌊		⌊		⌊		⌊		⌊	⌊																								
荷造り	⌊		⌊		⌊		⌊		⌊		⌊	⌊																								
洗浄	⌊		⌊		⌊		⌊		⌊		⌊	⌊																								
LOT ID no.	39	12	46	40	31	31	41	35		35		36		36		34	34			2	2		17		17	17	3	11	32	45	38					
銘柄	* A7	D4	A0	A6	B5	B5	A5	B1		B1		B0		B0		B2	B2			E4	E4		C9		C9	E3	D5	B4	A1	A8						
装入 反応	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊		⌊		⌊		⌊		⌊	⌊			⌊	⌊		⌊		⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊		
荷造り	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊		⌊		⌊		⌊		⌊	⌊			⌊	⌊		⌊		⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊		
洗浄	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊		⌊		⌊		⌊		⌊	⌊			⌊	⌊		⌊		⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊		
LOT ID no.			39			40		41	33		33		25	25		24			24	1	1		4	6	7	37										
銘柄			* A7			* A6		* A5	B3		B3		C1	C1		C2			C2	E5	E5		E2	E0	D9	A9										
装入 反応			⌊			⌊		⌊	⌊		⌊		⌊	⌊		⌊			⌊	⌊	⌊		⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊		
荷造り			⌊			⌊		⌊	⌊		⌊		⌊	⌊		⌊			⌊	⌊	⌊		⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊		
洗浄			⌊			⌊		⌊	⌊		⌊		⌊	⌊		⌊			⌊	⌊	⌊		⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊	⌊		
バッチ数	80																																			
洗浄回数	16																																			

図 6.5: Output data of re-scheduled plan

6.1.3.6 考察：本システムで実現できたこと

この生産スケジューリングシステムにおいて実現できたことは次のとおりである。

- 実行可能解をすばやく見つけ、それを逐次改良するという方針に沿って、計算負荷を軽くするために目的関数を総生産バッチ数のみにした。46ロットからなる実際の1か月分の生産スケジュールが実用的な時間（5分以内）の範囲で得られた。
- 生産能力に比べて生産量が少ない場合には初期生産スケジュールでは容量の大きい反応機を優先的に使い、生産期間の前のほうで生産が終わってしまうという偏ったスケジュールができる。その場合サイクルタイムの延長、生産可能な反応機の限定など制約条件を調整すれば生産を平準化でき、飛び込み生産にも再スケジューリングせずに対応できる。
- 再スケジューリングに際して生産予定（生産期日および反応機）を変えたくない生産ロットは生産予定に関する入力データを用いて固定することができる。
- 生産スケジュール作成担当者でなくても生産スケジューリングができる。さらに入力データが同じであれば同じスケジュールが得られるので、得られたスケジュールに個人差はない。入力データを変更するにあたっての判断に個人差があればスケジュールは変わってしまうが、スケジュール途中での変更・追加は最終結果の見通しをつけて行なうので個人差は出にくい。

6.1.3.7 今後の課題

ここでは実行可能解を改良するという方針をたてて具体的なスケジュールを得ることを最優先させて上に述べたような成果が得られたが、まだ今後の課題がいくつか残されているので以下に述べる。

- バッチプラントでは生産必要量よりも実際の生産量が多いが、今回開発したシステムでは作りすぎはその量にかかわらず許容している。余分な在庫を持たないためには作りすぎが極力少なくなるようなスケジュールをたてる必要がある。例えば1ロット20tを生産するのに、1バッチの生産能力が6tの反応機または4tの反応機を使った場合、前者で4バッチ生産すると4t作りすぎになり、後者で5バッチ生産すると作りすぎなしという2つの解があるが、現在の生産スケジュールでは前者を選ぶ。
- 平準化生産スケジュールでは一般に総生産バッチ数は増える。すなわち平準化とバッチ数最小とはトレードオフの関係にある。したがって平準化してバッチ数が増えた場合に、飛び込み生産のための余裕のメリットと増えたバッチのコストとどちらが大きいかを判定するための評価基準が必要である。
- システムの精度を高めるためには、解の探索の網羅性を上げることや目的関数内の項目を増やすことが必要であるが、計算負荷が増えるのでさらに効率的な探索アルゴリズムや、計算負荷を極力増やさずに効果的な項目を目的関数に追加する方法を見出す必要がある。

6.1.4 結論

このシステムでは1か月分の生産スケジュールという比較的大規模な問題について、実用的な時間内に実行可能解を見つけて改良しながら最終解を得る（5分以内）という目標を達成した。また当月の生産必要量と生産期限を与えれば、これまでスケジュール作成に携わってきた担当者以外でも生産スケジューリングが可能である。したがって生産スケジューリングに必要な時間を短縮できるだけでなく、業務そのものを変える可能性も生まれてくる。生産スタッフはこのシステムの導入によって業務に生まれた余裕を活かして、生産工程の弾力性向上に必要な技能・知識を身につけることができるであろう。

6.2 バッチ反応機反応温度制御システム

バッチ反応機は連続反応機に比べて反応スタートから反応終了までのサイクルが短く、過渡状態から定常状態への移行が頻繁である。そのため制御を自動化しても人の介入回数が多く、その削減が求められることが多い。すなわち外乱の多い制御対象に対応できる制御体系を確立することが必要であり、ここでは従来用いられていたPID制御からモデル予測制御に置き換えて成果を得た例を示す。

6.2.1 反応温度制御の概要

バッチ反応機はバッチプロセスの代表的なもので、多くの化学工場で用いられている生産設備である [65], [66], [67]。バッチ反応機の運転には、バッチの開始から終了までのサイクルにおいて昇温操作や原料装入量の段階的な変更などの非定常操作が多い。またバッチ操作ではバッチの進行にともなって反応原料の量も変化し、発熱量の変化、除熱と加熱のための伝熱面積や触媒の活性が変化することなどとともに、制御対象の動特性も変化するという難しさがある。したがって製品の品質に影響を及ぼす反応機内温度の制御は安定した制御性が得られないことも多い。これまでも昇温時に設定値を階段状に変化させたり、積分要素をバッチの途中から生かしたり、学習制御を適用 [68] したり、様々な制御性の改善が試みられている。バッチ反応機は様々な反応に用いられているが、昨今の商品の短命化により次々と開発される新製品の製造にも迅速に対応する必要がある。

バッチ反応機では外部からジャケットに冷却水を供給することによって（以下この冷却水を追加水と呼ぶ）反応液を冷却するとき、反応熱が小さければジャケット内温度と反応機内温度にはあまり差がなく、ジャケット内温度と追加水温度には大きな差があるが、逆に反応熱が大きければジャケット内温度を低くして冷却することになりジャケット内温度と冷却水温度との差は小さくなる。このとき追加水量を増やしてもジャケット内温度への感度は小さく、ジャケット内温度が追加水温度と等しければ感度はゼロで、どれだけ追加水量を増やしてもそれ以上温度は下がらない。したがってこの感度はジャケット内温度と追加水温度に応じて補正する必要がある。運転条件により感度に変化するという非線形性は反応の種類によらず伝熱系の特性として存在する。こ

のジャケット内温度に関する非線形特性を考慮したうえで、制御精度の高い制御系を実現する必要がある。

近年産業界において導入が進み、成果のあがっている制御技術の一つがモデル予測制御である [69], [70]。これまでバッチ反応機にモデル予測制御を適用した例 [71], [72], [77] の報告がいくつかあるが、ここでは試験設備のバッチ反応機（実プラントの10分の1程度の大きさ）の温度制御にモデル予測制御を導入し、発熱量に対して十分な冷却能力があるという条件のもとでは、反応を無視した制御系でも反応中に良好な制御性能を示すことについて述べる。このバッチ反応機の制御系設計方法によって、反応の多様性に対してもロバストで、モデルの変更が不要な実用性の高い制御が期待できる [73], [74], [75]。

6.2.2 制御アルゴリズム

ここで使用するコントローラでは利用する内部モデルが異なる場合でも同じアルゴリズムを用いる。またここで用いるモデル予測制御ではモデルによる制御量の将来の予測値が、将来の目標値とある1点（一致点）で一致するように現在の操作を決める。またこのコントローラはオフセットフリーである。

6.2.2.1 参照軌道

今回導入したモデル予測制御では設定値と測定値に偏差が存在するとき、その偏差をどのような速度で減衰させるかを調整するパラメータを用いる。また現在からの偏差の減衰をあらわすのに参照軌道（Reference Trajectory）を用い、その始点はむだ時間がない場合は現時刻の測定値である。参照軌道は1次遅れで、95%減衰するまでの時間をパラメータとして設定する。このパラメータを閉ループ応答時間（TRBF）と呼び、制御偏差が生じたときに制御量をオーバーシュートなしに設定値の95%に整定させるのに希望する時間をあらわす。1制御周期 T_s での偏差の減衰率を α とすると、 α は次式であらわせる。

$$\alpha^{\text{TRBF}/T_s} = 0.05 \quad (6.1)$$

現在の時刻を0とすると、参照軌道上の h 制御周期後の値 $RV(h)$ はその時刻での設定値 $SP(h)$ と現在の設定値 $SP(0)$ 、および現在の測定値 $PV(0)$ を用いて次のようにあらわせる。

$$RV(h) = SP(h) - \alpha^h \{ (SP(0) - PV(0)) \} \quad (6.2)$$

6.2.2.2 モデルからの出力を用いた操作量の算出

モデル予測制御系の制御対象、コントローラおよびモデルの関係をあらわすブロック線図は図6.6のようにあらわすことができる。

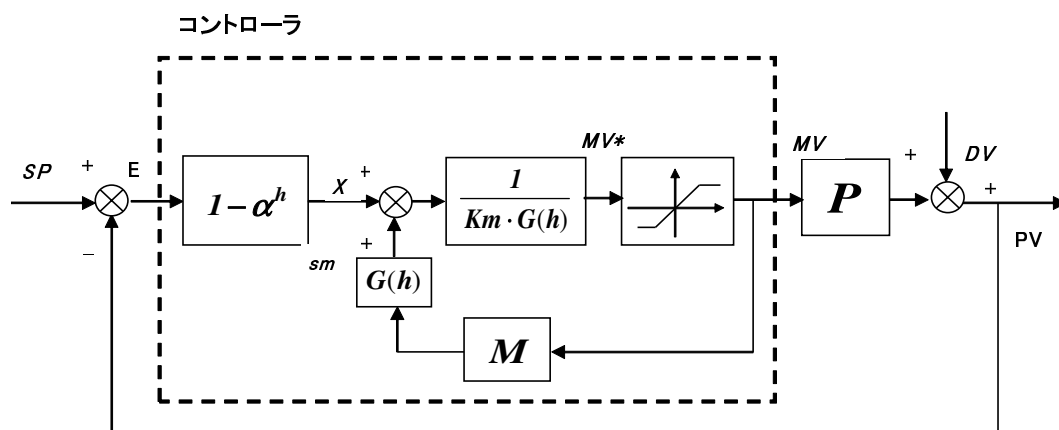


図 6.6: Block diagram of Model Predictive Controller

ここで $G(h)$ はモデルの単位ステップ応答の時刻 h における正規化されたゲイン、 sm はモデルからの出力（強制出力と自由出力の和）、 Km はモデルの定常ゲイン、 P は制御対象、 M は制御対象のモデル（内部モデル）、 PV は制御量、 SP は設定値、 E は制御偏差、 X はフィルタリングされた制御偏差、 MV^* はリミッタを通す前の操作量、 MV はリミッタを通した後の操作量とする。上のブロック線図において、フィルター要素である $1 - \alpha^h$ は参照軌道の設定値へのアプローチをあらわし、 $Km \cdot G(h)$ はモデルからの出力の定常値へのアプローチをあらわす。時刻 0 における操作量は次のようにあらわすことができる。

$$\begin{aligned} MV^*(0) &= \frac{(1 - \alpha^h)}{Km \cdot G(h)} \cdot E(0) + \frac{1}{Km} \cdot sm(0) \\ &= \frac{1}{Km \cdot G(h)} \{ (1 - \alpha^h) \cdot E(0) + G(h) \cdot sm(0) \} \end{aligned} \quad (6.3)$$

現時刻を 0 としたときの、モデルのステップ応答の入力と出力の関係および制御量の挙動を図 6.7 に示す（図中の $sm1$ は強制出力をあらわし、 $sm2$ は自由出力をあらわす）。

6.2.2.3 オフセットに関する考察

次に図 6.7 の制御系はプラントが一定の状態に落ち着いているときは、オフセットフリー（設定値 SP と制御量 PV が一致していること）であることを示す。定常状態におけるステップ応答を図 6.8 に示す（図中の $sm1$ は強制出力をあらわし、 $sm2$ は自由出力をあらわす）。

図 6.8 に示すように定常状態においてはモデルからの出力（自由出力と強制出力の和）が一定になる。したがって次の関係が成り立つ。

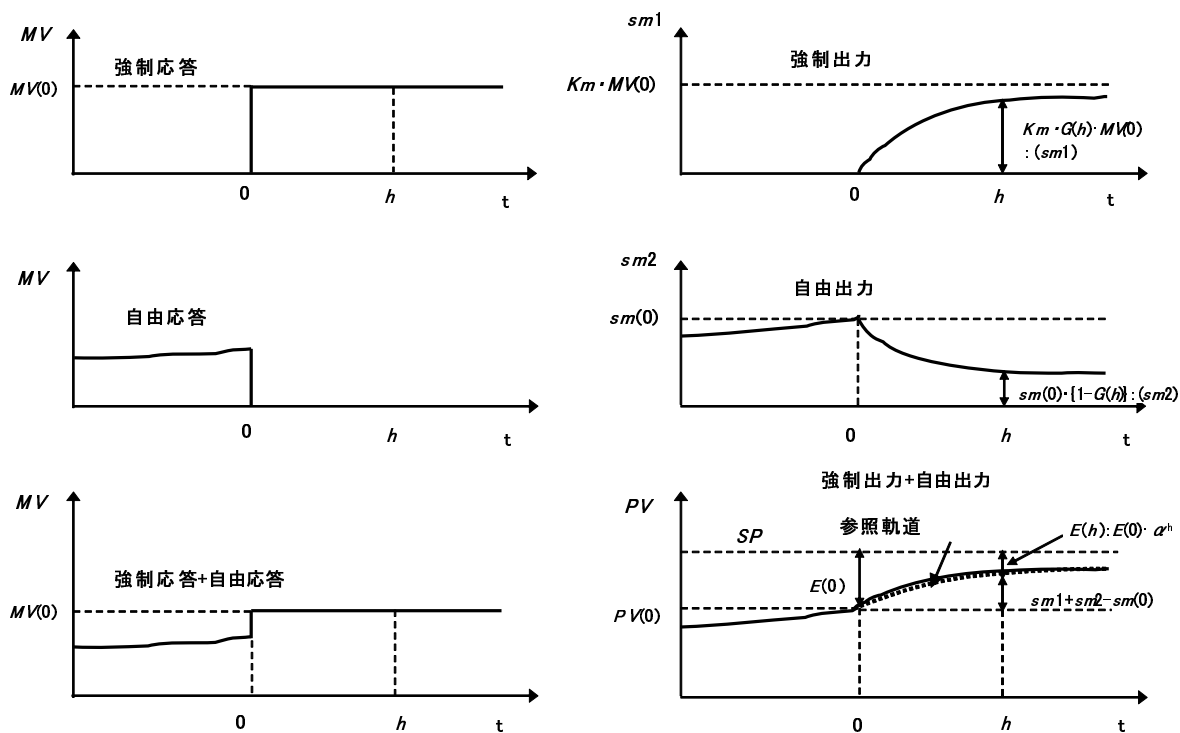


図 6.7: Behavior of PV, sm and MV after step input

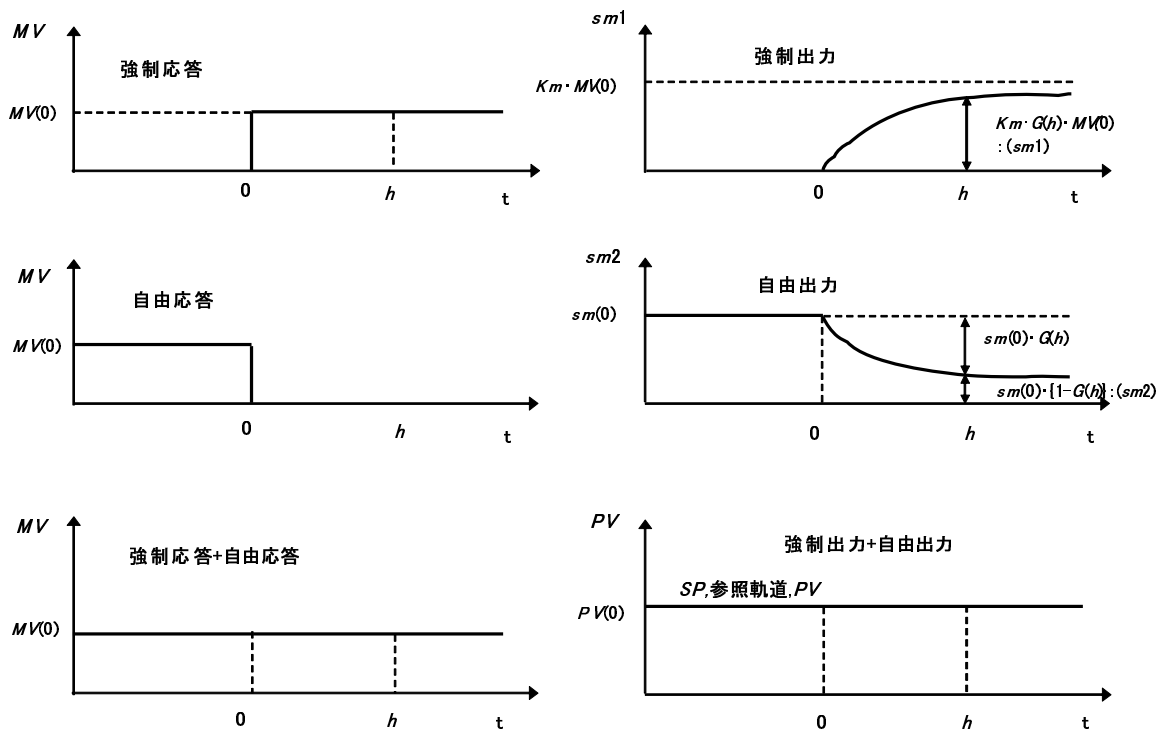


図 6.8: Behavior of PV, sm and MV after step input at steady state

$$sm(0) = sm1 + sm2 \quad (6.4)$$

$$= Km \cdot G(h) \cdot MV(0) + sm(0) \cdot \{1 - G(h)\} \quad (6.5)$$

$$= Km \cdot G(h) \cdot MV(0) + sm(0) - sm(0) \cdot G(0) \quad (6.6)$$

$$sm(0) = Km \cdot MV(0) \quad (6.7)$$

また定常状態においても式 (6.3) が成り立つので、

$$MV(0) = \frac{1}{Km \cdot G(h)} \left\{ (1 - \alpha^h) \cdot E^*(0) + Km \cdot G(h) \cdot MV(0) \right\} \quad (6.8)$$

$$Km \cdot G(h) \cdot MV(0) = (1 - \alpha^h) \cdot E^*(0) + Km \cdot G(h) \cdot MV(0) \quad (6.9)$$

$$E^*(0) \cdot (1 - \alpha^h) = 0 \quad (6.10)$$

したがって式 (6.10) より $E^*(0) = 0$ である。すなわち定常偏差はゼロ、オフセットフリーである。

6.2.3 制御系の構成

PID 制御においては加熱側と冷却側の操作出力は図 6.9a) に示すクロスオーバーレンジ方式（操作出力 0% で追加水調節弁全開、スチーム調節弁全閉、操作出力 50% で追加水調節弁およびスチーム調節弁 50% 開、操作出力 100% で追加水調節弁全閉、スチーム調節弁全開）を用いていた。この方式では追加水とスチームが両方同時にジャケットに送られることによるむだが避けられない。そこで図 6.9b) に示すスプリットレンジ方式（操作出力 0% で追加水調節弁全開、操作出力 50% 以上で追加水調節弁全閉、操作出力 100% でスチーム調節弁全開、操作出力 50% 以下でスチーム調節弁全閉）に変更した。

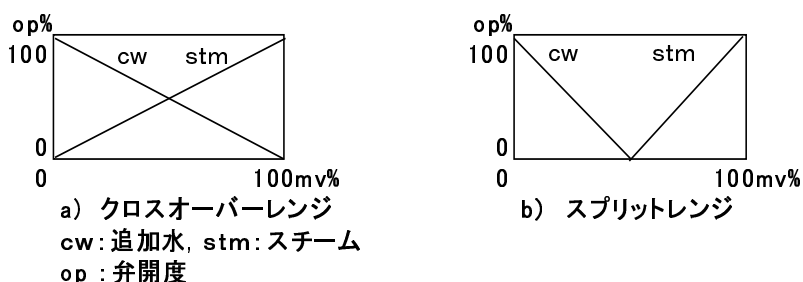


図 6.9: Cross over range and split range [73]

加熱・冷却をスプリットレンジ方式で行なう際には操作量から制御量（ジャケット冷却水入口温度）への動特性が異なるので、まずこの切替えの影響を抑制するための制御系（スレーブ・コントロール）を設け、その制御系の設定値を操作量として反応機内温度の制御性を向上させる制御系（マスター・コントロール）を設けるというカスケード制御の構成を用いる。マスター・コントロールとスレーブ・コントロールの関係を図 6.10 に示す。

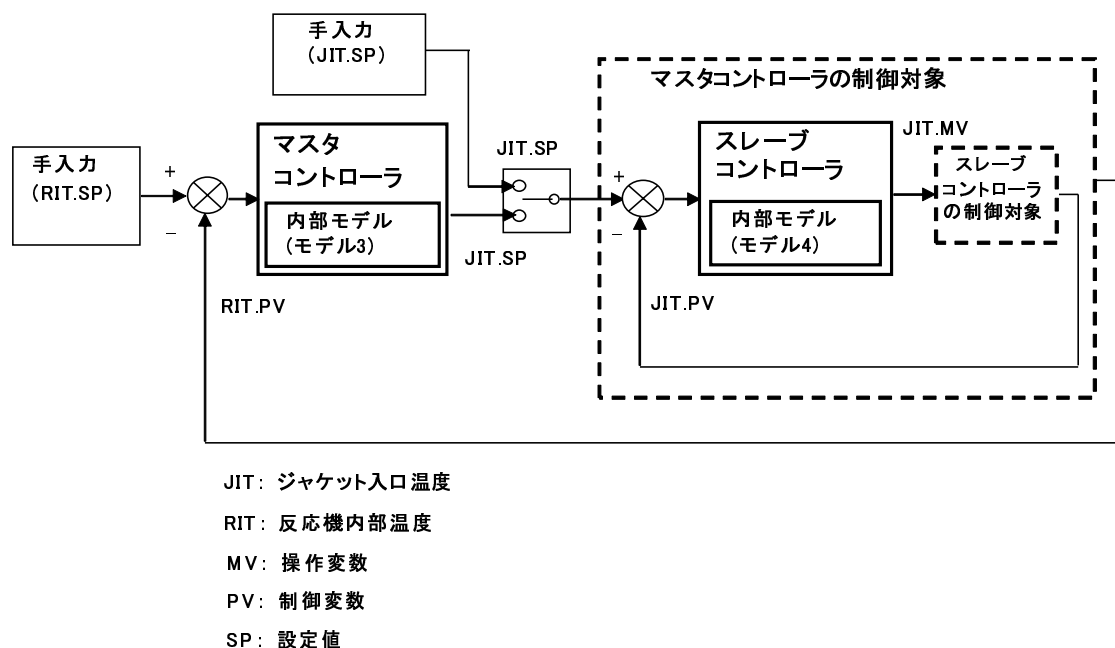


図 6.10: Cascade control block diagram

ここで用いたモデル予測制御では一致点として1点を定めて1周期先としている。むだ時間がある場合はそれを補償したうえで1周期先とする。一致点を1周期先にしてるのはアルゴリズムが簡単で計算負荷が軽減できるからである。

1. ジャケット入口冷却水入口温度制御 (スレーブ・コントロール)

このループの制御周期は5秒である。この周期はPLCの演算能力から割り出した最も短いものである。制御量はジャケット冷却水入口温度で、操作量は追加水とスチームの調節弁の開度である。またコントローラからの操作出力はスプリットレンジ方式である。このコントローラは制御量を予測するために、1次遅れ+むだ時間あるいはそれに非線形要素を加えたものを組合せたモデルを持つ。コントローラを持つパラメータは閉ループ応答時間 (TRBF) のみである。このコントローラは冷却用と加熱用それぞれの閉ループ応答時間 (TRBF) を持ち、その標準値は冷却側モデルと加熱側モデルそれぞれの持つ時定数の3倍であるが、実運転テストを行なってから制御系の安定性が保たれる範囲で応答性をよくするために1.5倍としている。

2. 反応機内温度制御 (マスター・コントロール)

このループの制御周期は50秒である。このループの時定数はスレーブ・コントロールの冷却側と加熱側の平均より約10倍長いので制御周期も10倍長くとした。制御量は反応機内温度で、操作量はジャケット冷却水入口温度制御 (スレーブ・コントロール) の設定値である。スレーブ・コントロールの制御モードがカスケードならば、このループの操作出力がスレーブ・コントロールの設定値に設定される。またこのコントローラは制御量を予測するための1次遅れ+むだ時間のモデルを持っている。コントローラのパラメータはスレーブ・コントロールと同じく閉ループ応答時間 (TRBF) のみである。ここでもスレーブ・コントロールの

場合と同じ理由でモデルの時定数の1.5倍としている。このループの操作出力は上下限值および変化速度の上限を持ち、その制約をみたすように値が設定される。

6.2.4 モデルの構築

ここで用いたモデル予測制御では反応がない場合に理想的に制御できる制御系を目指す。反応による発熱をモデルに加えると、反応条件が異なる銘柄を生産するたびにモデルを入れ替えることや制御系のパラメータの調整を行なうのは非常に煩雑である。そこで反応のない状態での温度制御性能を可能な限り高めることにより、反応による発熱という変動要因を制御系全体の制御精度の高さで吸収してその影響を抑制するという方法をとった。すなわちスレーブ・コントロール側のモデルの精度を上げることによって制御系の応答性を高め、マスター・コントロール側も含めたロバスト性を高めることを目指した。この場合反応による発熱を直接測定することは不可能であるが、反応機の除熱能力が足りていれば制御は可能であるとしている。

6.2.4.1 モデルの定式化

この制御系の構築に用いたモデル予測制御の標準モデルは、1次遅れ+むだ時間の伝達関数であらわされる。このモデルは物理モデルを表現する最も簡単なものであるが、プラントが高次系の場合あるいは1次遅れ+むだ時間で表現できない場合にもこのモデルを複数組合せることにより表現できる。ジャケットでの加熱と冷却にはスチームと追加水を切替えて用いるが、それぞれジャケットの温度への影響が異なるので別々のモデルを用いる。さらにジャケットを循環する流れの温度変化とジャケットと反応機内の熱交換による温度変化とを別々の伝熱モデルで表現し、それらを組合せて操作量と制御量との間の応答を表現する。個々のモデルは反応機内に反応しない液が一定量入っている状態を想定している。モデルのパラメータは、反応機に水を一定量装入した状態でステップ応答テストを行なって求める（付録A.7参照）。

バッチ反応機の熱収支より次の関係が得られる。

$$\rho_m C_P^m V_m \frac{dT_m}{dt} = UA(T_o - T_m) + \Delta H^x + \rho_R C_P^R R(T_R - T_m) \quad (6.11)$$

$$\rho_o C_P^o V_o \frac{dT_o}{dt} = \rho_o C_P^o F_i(T_i - T_o) + UA(T_m - T_o) \quad (6.12)$$

$$F_i T_i = F_c T_c + (F_i - F_c) T_o \quad (6.13)$$

反応や原料の影響は制御系のロバスト性で抑制することにして、モデルは反応機の内容物が反応しないことと液の量は一定であることを前提として求めるので、モデルでは反応の項および原料の項を無視したうえで、式(6.11)、式(6.12)および式(6.13)を基準点(*)まわりで線形化すると以下のようにあらわすことができる。

$$\rho_m C_P^m V_m \{sT_m(s) - T_m(0)\} = UA \{T_o(s) - T_m(s)\} \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} \rho_o C_P^o V_o \{sT_o(s) - T_o(0)\} &= \rho_o C_P^o F_i^* \{T_i(s) - T_o(s)\} \\ &+ \rho_o C_P^o (T_i^* - T_o^*) F_i(s) + UA(T_m(s) - T_o(s)) \end{aligned} \quad (6.15)$$

$$F_i^* T_i(s) + T_i^* F_i(s) = F_c^* T_c(s) + T_c^* F_c(s) + (F_i^* - F_c^*) T_o(s) + T_o^* \{F_i(s) - F_c(s)\} \quad (6.16)$$

式(6.14)、式(6.15)および式(6.16)を用いて、反応機内温度モデルとジャケット冷却水入口温度モデルを導く関係式を求める(付録A.6参照)。

反応機内温度モデルをあらわす関係式は次のとおりである。

$$T_m(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_m \cdot C_P^m \cdot V_m}{UA}\right) s} T_i(s) \quad (6.17)$$

またジャケット冷却水入口温度モデルをあらわす関係式(ただし追加水側のみ)は次のとおりである。

$$T_i(s) = T_o(s) + \frac{T_c^* - T_o^*}{F_i^*} F_c(s) \quad (6.18)$$

式(6.17)、式(6.18)の関係からプロセスのモデルを求める。

ここでジャケット冷却水出口温度 T_o は操業中に大きく変化するので、基準点ではなくその時刻での追加水温度との差 $T_c - T_o$ を用いてモデルを更新する。さらに調節弁を操作してから流量が変化するまでの動特性を $F_c(s) = \tilde{K}_{co} e^{-D_{co} \cdot s} / (1 + \tau_{co} \cdot s) \cdot V_e(s)$ とあらわし、 $K_{co} = \tilde{K}_{co} / F_i^*$ とすると図6.11のようにモデル表現できる。

6.2.4.2 プロセスモデル

この制御システムで用いるモデルは次の4つである。

モデル1 ジャケット冷却水入口温度

モデル2 ジャケット冷却水出口温度

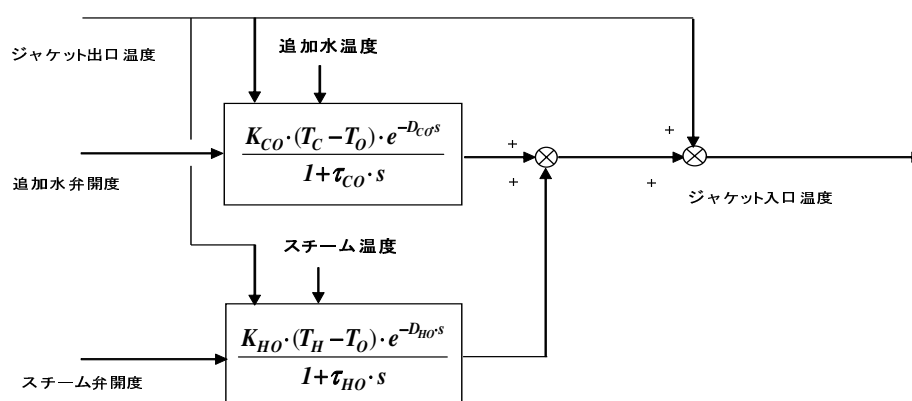
モデル3 反応機内温度

モデル4 スレーブ・コントロールに対する組合せモデル

スレーブ・コントロールにおいて制御量（ジャケット冷却水入口温度）の予測値を求めるのにモデル4を用い、マスター・コントロールにおいて制御量（反応機内温度）の予測値を求めるのにモデル3を用いる。モデル3はモデル4の中でも用いられている。

モデル1（ジャケット冷却水入口温度）

ジャケット冷却水入口温度のモデルは、同出口温度を基準にして追加水を増やせば下がり、スチームを増やせば上がるという関係から図6.11のようにあらわすことができる。このモデルでは非線形のゲイン補正項として $T_C - T_0$ 、 $T_H - T_0$ が用いられているが、これらは追加水温度 T_C あるいはスチーム温度 T_H とジャケット冷却水出口温度 T_0 との差であり、追加水温度あるいはスチーム温度の変動による感度の違いを補正して制御性能に影響が出ないようにしている。ただしここでは非線形項を線形化して状態に応じて変化する係数として扱い、図6.11のブロック線図に加えた。

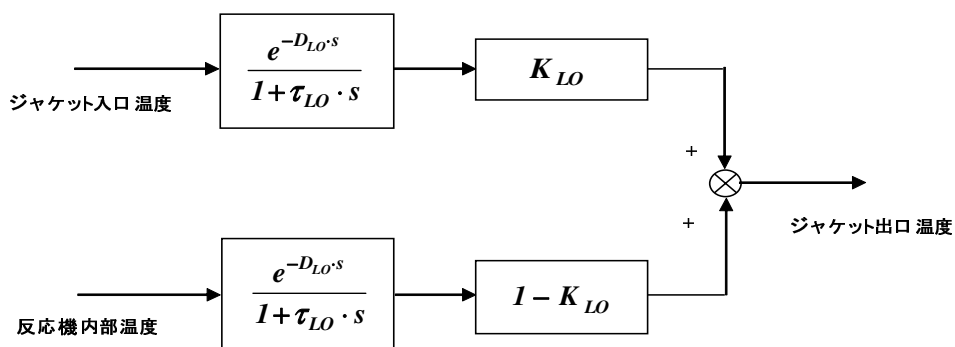


入力：ジャケット冷却水出口温度、スチーム弁開度、追加水弁開度、
追加水温度（非線形項の入力）、スチーム温度（非線形項の入力）
出力：ジャケット冷却水入口温度

図 6.11: Model 1 block diagram

モデル2（ジャケット冷却水出口温度）

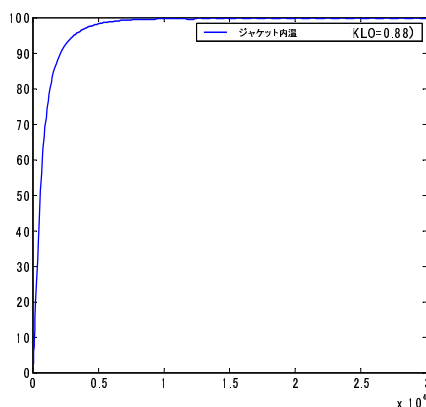
ジャケット内の冷却水（あるいは加熱水）と反応機内の滞留物との間の伝熱は内壁を介して行なわれるため1次遅れ+むだ時間のみでは表現できない。そこでジャケット冷却水出口温度は同入口温度と反応機内温度の中間の値をとるという関係からモデルを図6.12のようにあらわす。このモデルを用いてシミュレーションを行なった結果を図6.13、図6.14に示す。この図ではジャケット入口温度の設定を 0°C から 100°C に変化させたときに測定値が時間とともにどう変化するかを示すものである（横軸：時間(秒)、縦軸： $^{\circ}\text{C}$ ）。ジャケット側ゲイン K_{LO} の値が0.88の場合と、0.2の場合である。 K_{LO} を大きくすればステップ状の設定値変更に対するジャケット冷却水入口温度の立ち上がりが速くかつ大きくなり（すなわち伝熱の効率が悪い場合をあらわす）、小さくすれば立ち上がりが遅くかつ小さくなる（伝熱の効率がよい場合をあらわす）。また K_{LO} を求めなおすには反応機内温度制御が安定する反応の後半におけるある一時点での、反応機内温度とジャケット冷却水入口温度と同出口温度の実測値を参考にする。



入力：ジャケット冷却水入口温度、反応機内温度
出力：ジャケット冷却水出口温度

図 6.12: Model 2 block diagram

ここで用いるむだ時間と時定数はジャケット循環水のジャケットの入口から出口までのものであり、ジャケット内の循環水量（一定）とジャケット容積から計算できる。



GAIN=0.88

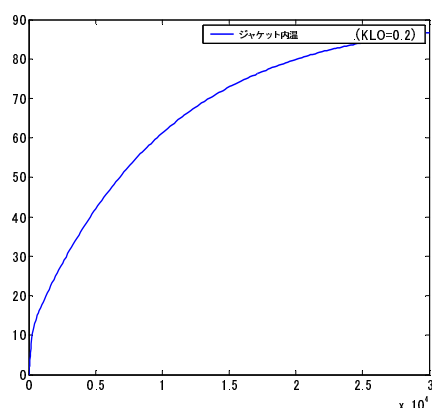
図 6.13: Dynamics of the heat transfer between jacket and reactan

モデル 3（反応機内温度）

このモデルはジャケット冷却水入口温度から反応機内温度を求めるのに用いる。反応機内温度制御（マスター・コントロール）の出力は、ジャケット冷却水入口温度制御（スレーブ・コントロール）の設定値にカスケード接続されている。このコントローラでは図 6.15 であらわされるモデルが用いられる。

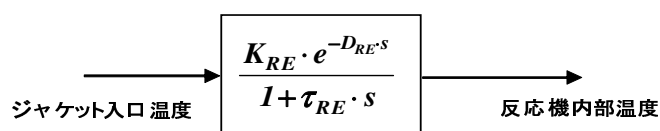
モデル 4（スレーブ・コントロールに対する組合せモデル）

組合せモデルを図 6.16 に示す。このモデルは追加水あるいはスチームの調節弁の開度からジャケット冷却水入口温度を求めるのに用いる。ジャケット内の循環水は一定流速で循環



GAIN=0.2

図 6.14: Dynamics of the heat transfer between jacket and reactan



入力：ジャケット冷却水入口温度
 (マスター・コントロールのモデルとして用いる場合は設定値を入力)
 出力：反応機内温度

図 6.15: Model 3 block diagram

しており、その循環水による熱伝達とジャケットと反応機内の熱伝達により、3つのモデル間にループができています。このモデルを用いて1制御周期後のモデルからの出力を推定することができます。

6.2.5 導入事例

ここまで制御系の特徴や全体の構成について述べたが、次に実際の化学プロセスに適用した事例について述べる。

6.2.5.1 対象プロセス

対象とするバッチ反応機のプロセスフローを図6.17に示す。このバッチ反応機の容量は200ℓであり、製品の製造処方を検討するための試験設備である。反応機内の滞留物の加熱、冷却はスチームあるいは追加水をジャケットに送ることによって行なう。冷却水（あるいは加熱水）はジャケッ

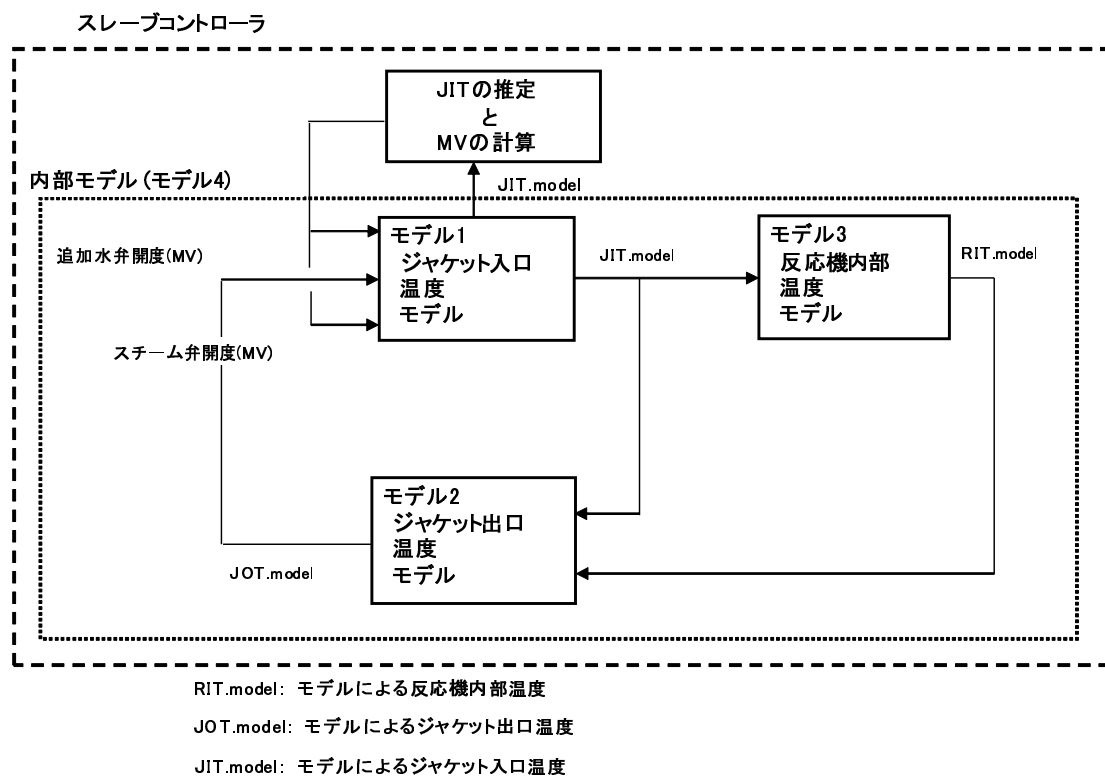


図 6.16: Model block flow of Slave Control (Model 4)

ト内を一定量が一定速度（100ℓ/min）で循環する。なおこのプラントには同じ型式で、同じ製品を製造するための大きさが1/2のバッチ反応機がもう1台設置されている。

6.2.5.2 導入の目標

モデル予測制御の導入に際して設定した目標は次のとおりである。

1. 反応機内温度制御の精度を上げるための原料モノマー装入力変更操作をなくすこと。

これまでPID制御では反応機内温度制御の精度がよくないため、反応機内温度（制御量）を設定値に合わせようと原料モノマー装入力量の微調整を短い周期で繰り返していた。しかし原料モノマー装入力量を変動させると反応機内温度制御の不安定さを促進するため、原料モノマー装入力量に加えて反応機内温度の設定も頻繁に加減していた（図6.19参照）。このプロセスに対してモデル予測制御を導入し、反応機内温度のオーバーシュートやアンダーシュートの減少とモノマー装入力量変更操作は圧力制御のためだけに行なうことを目指す。

2. 原料モノマー装入力量の変動や追加水温度の季節変動の影響を抑制すること。

原料モノマー装入力量は反応機内温度と反応機の気相圧力とに影響を与える。また追加水温度は季節によって15℃以上の差があり、冷却能力にも大きな変動がある。このような外乱の影響を極力抑制したうえで制御性を向上させることのできる制御系を構築する。

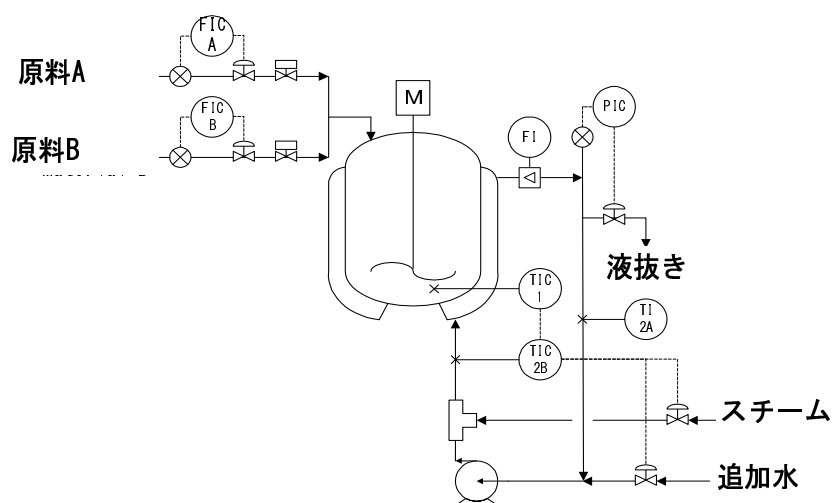


図 6.17: Process flow [73]

3. 追加水、スチームの使用量を削減すること。

操作出力の型式をクロスオーバー方式からスプリットレンジ方式に変更してユーティリティ（スチームおよび冷却水）使用量削減が可能なことを検証する。それによって PID 制御使用時には不可能な大小 2 台の反応機の同時運転を可能にする。

6.2.5.3 システム構成

この試験設備にはすでに DCS (Distributed Control System) が導入されており、生産スタッフは DCS の操作卓を介してプラントを監視し制御操作を行なっている。ここでの制御の対象であるバッチ反応機についても DCS で PID 制御が可能である。この DCS に加えてモデル予測制御の実行環境として PLC (Programmable Logic Controller) を新たに導入した。PLC は制御に必要なプロセスデータ等を 5 秒周期で収集し、それを用いてモデル予測制御の制御演算を行なう。結果は DCS に送られて DCS から操作端に設定する。DCS と PLC 間のインターフェイスにはそれぞれのアナログ出力およびデジタル入出力を用いている。システム構成を図 6.18 に示す。図中の MV、PV、SP はそれぞれ操作量、制御量、設定値をあらわす。

このシステム構成を選択した理由は次のとおりである [75]。

1. 生産スタッフはすべての操作を DCS の操作卓から行なうことができるので新しいマンマシンインターフェイスの操作を覚える必要はない。
 - (a) DCS と PLC の間のインターフェイスに特別な通信プロトコルは不要である。
 - (b) 既存の DCS 単独では導入不可能なモデル予測制御が導入できる。

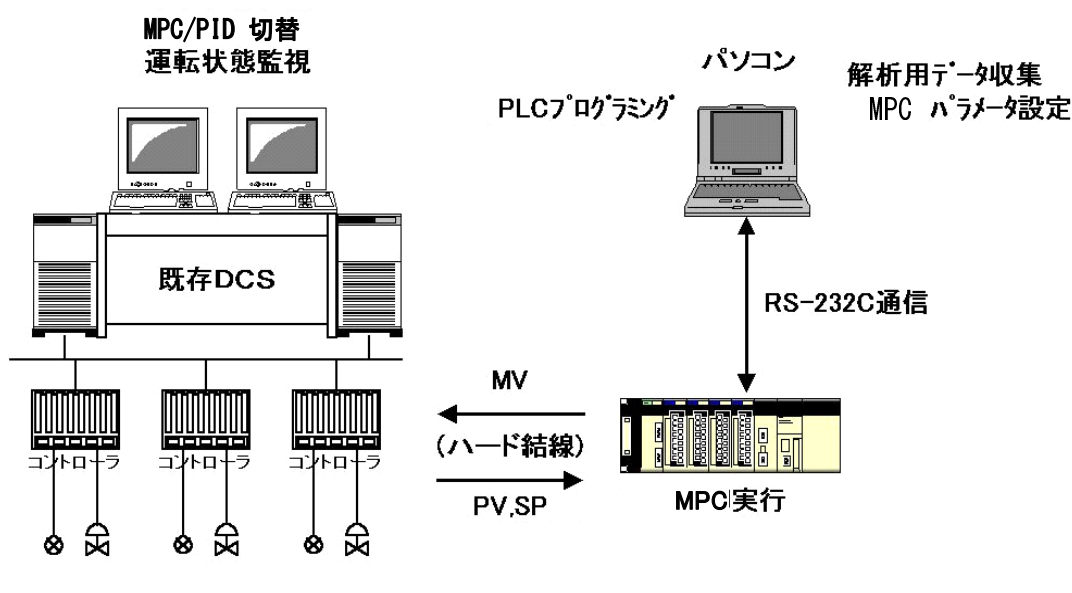


図 6.18: System configuration [75]

2. PLCに異常が起きモデル予測制御の実行継続が不可能になってもDCSでバックアップ可能である。

6.2.6 モデル予測制御導入前と導入後の比較

これまでこのバッチ反応機の温度制御はPID制御で行なわれてきたが、モノマーの装入操作や追加水温度の変化のような外乱の影響を受けて反応機内温度の制御精度がよくなかった。また製品の品質は反応中の反応機の気相圧力によって決まるため、反応中は気相圧力のある上限値以下に抑える必要がある。ここで生産する製品においては反応機の気相圧力は反応機内の液相のモノマー濃度によって決まるといわれており [76]、原料モノマーの装入量を増やすと気相圧力は上昇する。しかし反応時間を短縮するにはできるだけ装入量を増やす必要があるため、気相圧力の変化をみながらその上限値を下回るように、そして反応機内温度も目標値を保つように装入量を頻繁に増減していた。同時に反応機内温度の変動も抑えようとしてその設定値も頻繁に変更していた (図 6.19 参照)。この作業は高い熟練度を必要とし担当者以外には難しいものであった。

6.2.6.1 PID制御とモデル予測制御の比較

モデル予測制御導入前のPID制御を行っていたときの結果を図 6.19 に示す。反応開始後反応機の気相圧力を上限値以下に保つために原料モノマー装入量を操作しているが、その変動が反応機内温度制御の外乱となり反応機内温度制御の設定変更で対応しようとして細かい反応機内温度の設定変更操作を繰り返している。その間生産スタッフは操作卓につきっきりになっていた。

反応機内部温度 (PID制御の場合)

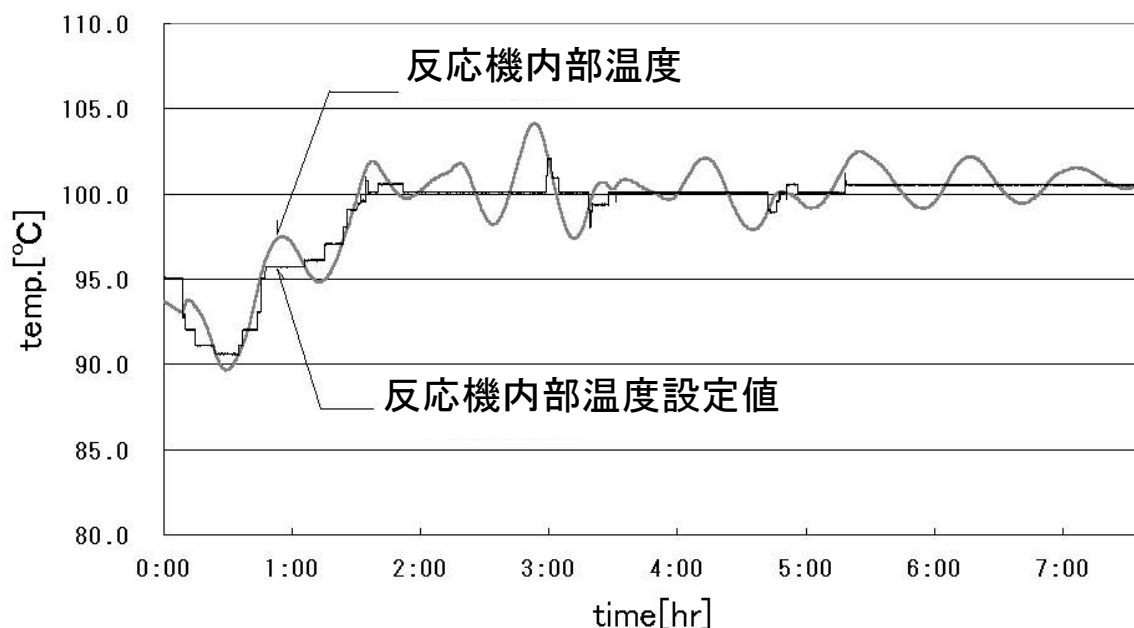


図 6.19: Result of PID control [73]

モデル予測制御導入後の結果を図 6.20 に示す。テスト運転のあと 1 バッチ分としてあらかじめ規定されたモノマー装入量をみだし、かつ反応機内温度の設定値からのずれが $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内であるような矩形の装入パターンを割り出し、原料モノマー装入はそれにしたがって手動で流量の設定を変更しながら行なっている。反応機内温度の設定値からのずれは $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内に収まっており、外乱の影響は十分に抑制されている。このとき反応機内温度の設定変更も行なっておらず、モデル予測制御による反応機内温度制御は PID 制御に比べて精度があがっている。ここで用いたモデル予測制御ではモデルの中に反応に関わる部分を含んでいないがよい制御性を示している。銘柄や反応条件が変わるたびにモデルを変えたりパラメータを調整したりする必要はなくきわめて使いやすい制御系である。

6.2.6.2 モデル予測制御導入によるメリット

モデル予測制御の導入にあたって達成すべき目標を設定したが導入後に得られたメリットは次のとおりである。

1. 反応中の反応機内温度の設定値をはさんだ変動幅 (PID 制御の場合 : 6.5°C 、モデル予測制御の場合 : 2°C) が小さくなったため、反応機内温度制御のための原料モノマー装入量の微調整あるいは反応機内温度設定変更が不要になり、運転中の DCS からの設定値変更のための操作回数が著しく減少した。

反応機内部温度（モデル予測制御の場合）

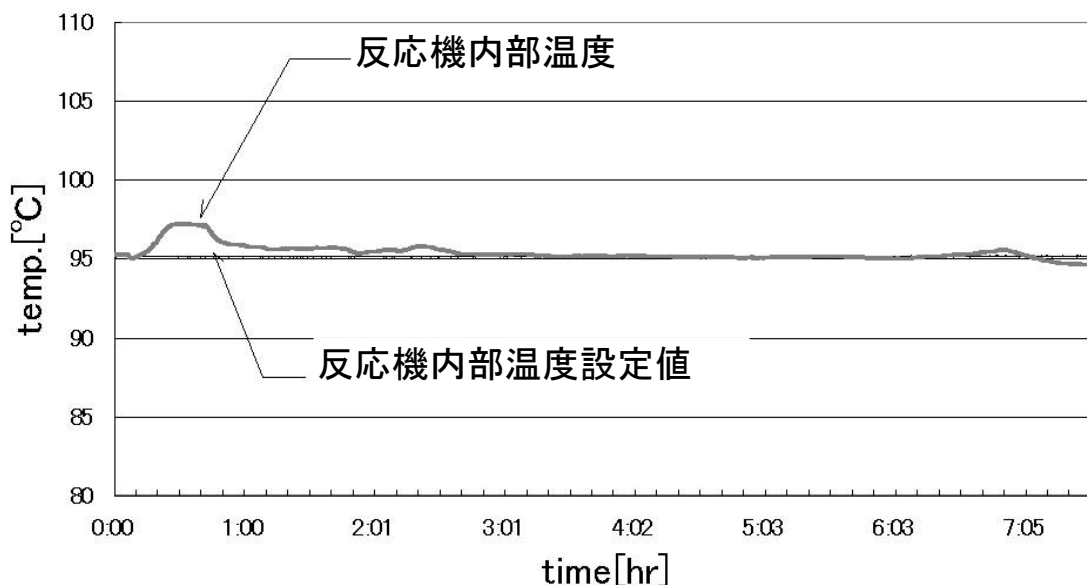


図 6.20: Result of Model Predictive Control [73]

2. スレーブ・コントロールの操作出力をクロスオーバーレンジ方式からスプリットレンジ方式に変更することができ、その結果ユーティリティの使用量が減って2台の反応機の同時運転が可能になった。
3. モデル予測制御のコントローラのチューニングパラメータは閉ループ応答時間 (TRBF) 一つだけであり、PID 制御の3つ（比例帯、積分時間、微分時間）に比べて簡単である。

6.2.7 結論

PID 制御を用いる場合バッチ反応の開始から終了までの進行状況を生産スタッフがDCSの操作卓の前で常時監視し、反応機内温度や反応機の気相圧力の動きに合わせて反応機内温度や原料モノマー装入量の設定を変更しなければならない。しかしこの操作は頻度も高く、かつ細心の注意を必要とする。しかし温度制御に新たにモデル予測制御を導入することによって反応中の設定値変更操作は著しく減少し生産スタッフの負荷も非常に軽減された。またスチームの使用量を削減することができたので、このプラントの2台のバッチ反応機を同時に運転することも可能になった。この制御システムの導入によって生まれた業務における余裕を活かせば、生産スタッフは生産工程の弾力性向上に必要な新たな技能・知識を身につけることができる。

< Nomenclature >

ρ_m : 反応液密度 [kg/m³]

ρ_o : 循環水密度 [kg/m³]

ρ_R : 原料モノマー密度 [kg/m³]

C_P^m : 反応液比熱 [kg/m³]

C_P^o : 循環水比熱 [kg/m³]

C_P^R : 原料モノマー比熱 [kg/m³]

V_m : 反応液滞留量 [kg]

V_o : ジャケット容量 [kg]

T_m : 反応機内温度 [°C]

T_o : ジャケット冷却水出口温度 [°C]

T_C : 追加水温度 [°C]

T_H : スチーム温度 [°C]

T_i : ジャケット冷却水入口温度 [°C]

T_R : 原料モノマー温度 [°C]

U : ジャケット総括伝熱係数 [J/(m² hr°C)]

A : ジャケット伝熱面積 [m²]

F_C : 追加水量 [kg/hr]

R : 原料モノマー装入量 [kg/hr]

F_i : 循環水流量 [kg/hr]

ΔH^x : 反応熱 [J/mol]

K_{CO} : 冷却側ゲイン [-] (追加水弁開度とジャケット冷却水入口温度との間の動特性より求める)

K_{HO} : 加熱側ゲイン [-] (スチーム弁開度とジャケット冷却水入口温度との間の動特性より求める)

D_{CO} : 冷却側むだ時間 [sec] (追加水弁開度とジャケット冷却水入口温度との間の動特性より求める)

D_{HO} : 加熱側むだ時間 [sec] (スチーム弁開度とジャケット冷却水入口温度との間の動特性より求める)

τ_{CO} : 冷却側時定数 [sec] (追加水弁開度とジャケット冷却水入口温度との間の動特性より求める)

τ_{HO} : 加熱側時定数 [sec] (スチーム弁開度とジャケット冷却水入口温度との間の動特性より求める)

K_{LO} : ジャケット冷却水入口温度側ゲイン [-]、 $0 \leq K_{LO} \leq 1$ の値をとる。

D_{LO} : ジャケット循環水むだ時間 [sec]

τ_{LO} : ジャケット循環水時定数 [sec]

K_{RE} : 反応機内温度ゲイン [-] (ジャケット冷却水入口温度と反応機内温度の間の動特性より求める)

D_{RE} : 反応機内温度むだ時間 [sec] (ジャケット冷却水入口温度と反応機内温度の間の動特性より求める)

τ_{RE} : 反応機内温度時定数 [sec] (ジャケット冷却水入口温度と反応機内温度の間の動特性より求める)

V_e : 追加水弁開度 [%]

6.3 バッチプラント運転管理システム (BOMS)

バッチプラントは構造が簡単であり、大きさの異なるものを複数建設して生産量や製品の銘柄に応じて自在に使い分けることが可能であるが、そのために管理すべきデータが同じ規模の連続プラントに比べて多い。またプラントの状態を示すデータが不等間隔で発生することもあり、データ管理や、解析を人手に頼ることが多い。同じような単純作業に時間を取られることも多くシステム化による省力化が求められてきた。

6.3.1 BOMS の概要

バッチプラントは一般に同じ規模 (生産量が同じということ) の連続プラントに比べると設備数が多く管理すべき運転実績データの数も多いため、データの収集とその編集 (データ保存のための帳票類の作成) に必要とする労力も大きい。このようなデータをいかに効率よく管理し最大限に活用するかは生産性に大きな影響を与える。

分散型計装制御システム DCS (Distributed Control System) の導入されたバッチプラントにおいては運転操作を大幅に自動化し省力化を進めることができたが、運転の記録として残すデータは人手に頼って収集している。そこで省力化によって人数の減った生産スタッフの業務負担を軽減するために、単純なデータの転記が多い帳票作成作業を自動化することを目的とするバッチプラント運転管理システム (以下 Batch Plant Operation Management System、略して BOMS と記す) を導入した。これまでの手書き帳票では帳票にデータを記入する時間をとられること、単純な繰り返し作業はミスを誘発しやすく大きなトラブルにつながるおそれがあること、必要なデータを後から見つけ出すのに手間取ること、状況を解析するためのデータを準備するのに時間がかかること、そして複数の利用者がデータを共有するのが難しいことなどの問題があったが BOMS の導入によって解決できた。実績データは DCS によってセンサを介して状態変数としてオンラインリアルタイムで収集されている。それらをもとに BOMS で収集するデータには、バッチ収集データと連続収集データの 2 種類があり、前者はバッチ開始と終了との間に収集するデータで、後者は定時 (時間あるいは日の区切り) に定周期で収集するデータである。これまでバッチプラント

の運転実績データの管理についてはいくつかの提案がなされているが [75], [76]、ここで述べるシステムでは、データの発生周期の異なる 2 種類の情報を効率よく収集して整合性を持たせることができる。人と機械 (コンピュータ) とが共存する環境で、BOMS の導入によって業務におけるシステム側の守備範囲が広がると人の側には余裕が生まれそれを活かしてより高い技能を身につけることが可能になる。しかし人と機械の接点にあるヒューマンマシンインターフェイスには解決すべき新たな課題も生まれる。生産スタッフとは生産工程で直接生産に携わる人々であり、プラント管理者には生産スタッフの業務効率を高めプラント全体の生産性を向上させるという役目があり、BOMS の導入運用をとおして業務の未来像を示し徹底させることが必要である。生産スタッフにはプラントの生産性向上のためにプラント管理者の示した業務の未来像に向けて BOMS を活用しながら自身の技能を高めていくことが求められる。

6.3.2 導入の背景

このプラントは 20 台のバッチ反応機、多数の貯槽 (原料、中間製品、最終製品用) から構成され、運転管理のために DCS が導入されている。DCS の導入によるプラントの省力化によって生産に従事する生産スタッフの数が減ったことや、その後生産能力が増えたことにより一人ひとりの作業量も増加してきたので一層の省力化対策が必要になった。運転に関わる業務のうち帳票の作成は単純かつ単調な繰り返し作業で、しかも毎日長時間かけており大きな省力効果が見込めるのでまずこの作業を自動化することにした。データの収集は DCS 画面上の数値の帳票への転記が主であるが、データ数がきわめて多いため人手に頼ると記入ミスや欠測などが発生するおそれもあった。さらにそれらのミスが他のトラブルを誘発することも考えられ、安定な操業を確保するためにも自動化が強く望まれていた。しかしミスをなくしてトラブル原因を除去しても、どの程度のメリットがあるかを直接定量的に評価することができないため省力化の効果 (時間) のみを評価の対象とした。実際にデータの記入ミスや欠測がどの程度の頻度で発生しているのか、また具体的にどのようなようなトラブルを誘発したのか、あるいは誘発しうるのかについて調査することはあまりなかった。したがってその発生時にこうむる経済的な損失を事前に評価して対策を講じることもできなかった。しかしシステムの導入によってトラブル発生リスクを低減できることへの期待も大きい。

6.3.3 BOMS の構成

このプラントにはすでに DCS が導入されており、DCS に備え付けられたゲートウェイをとおしてサーバ PC (Personal Computer) と LAN 回線を介して接続されている。さらにこのサーバ PC は工場内の構内基幹 LAN 回線を介して複数のクライアント PC (プライマリーとセカンダリーの 2 種類があり、プライマリーはサーバ PC のデータベースへのアクセスの機能を持つ) と接続されている。ハードウェアの構成を図 6.21 に、ソフトウェアの構成を図 6.22 に示す。DCS から送られるデータを処理するプログラムやそれらを格納するデータベース (Relational Database ; RDB) および帳票作成用表計算ソフトウェアはサーバ PC にあり、データベースへのアクセス (データの手入力やデータトレース ; 付録 A.9 参照) はサーバ PC に隣接するプライマリークライアント PC から行なう。

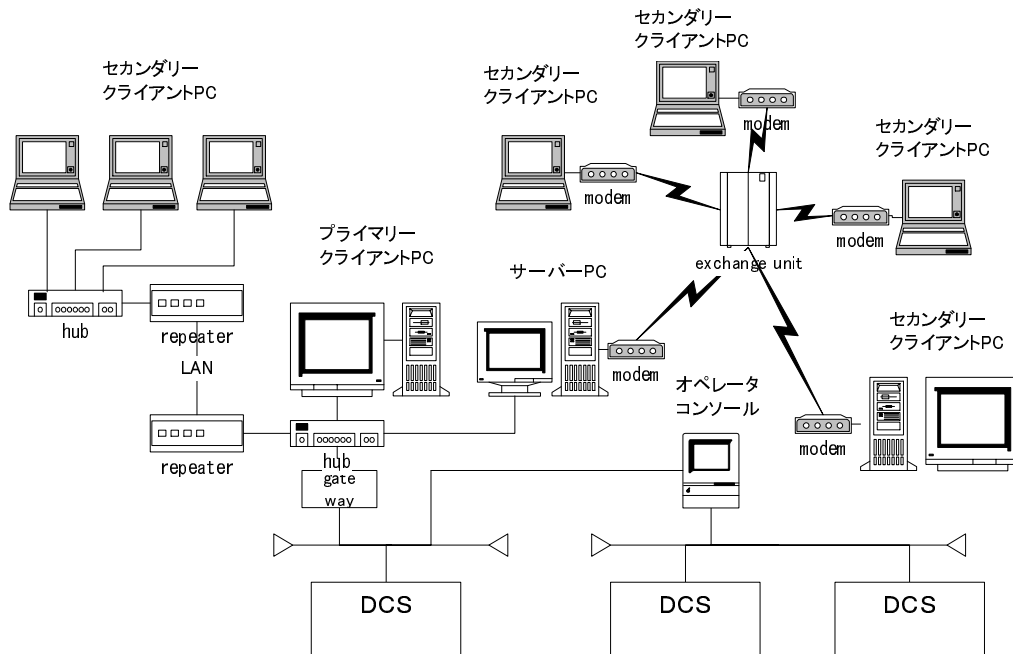


図 6.21: Hardware configuration [77]

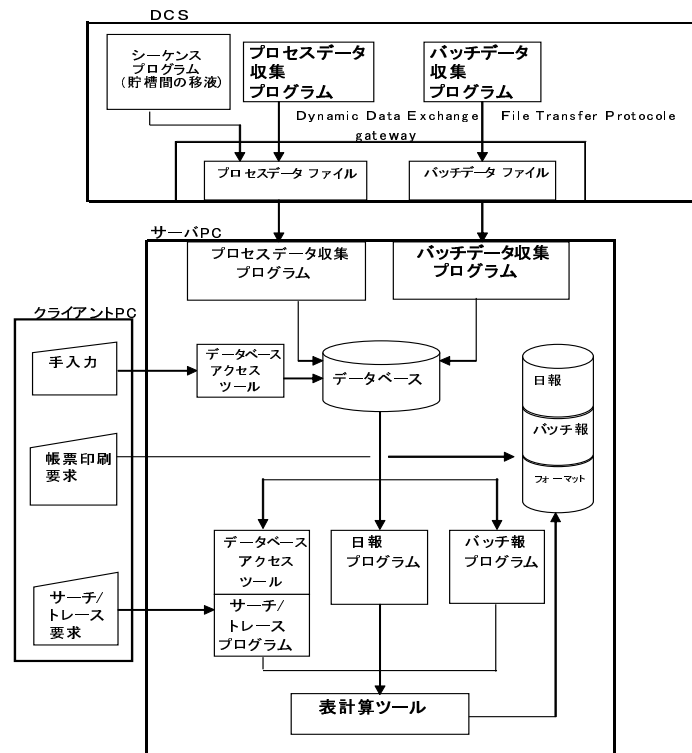


図 6.22: Software configuration [77]

6.3.4 データ処理

ここで取り扱うデータには、バッチ周期ごとのもの、連続して発生するもの、外部から数値を入力するものなどさまざまな種類があり、それぞれに応じた処理が行なわれる。

6.3.4.1 DCS 内でのデータ処理

DCS 内のプロセスデータにはバッチシーケンスの進行に合わせて発生するバッチ収集データと用役などに関する連続収集データとがある。日報の中にこれらのデータを共存させるためには整合性がとれるように個別のデータを識別するためのキーを定義する必要がある。

6.3.4.2 バッチ収集データ

複数の反応機で生産されるバッチを一つずつ識別するキーとして、データ名 + 日付 + バッチ番号 + 反応機番号 + 銘柄という属性を用いてデータを RDB (Relational Data Base) に格納する。データはバッチ生産量、触媒使用量、原料使用量などがある。このデータは表計算ソフトウェアで自動的に帳票の形に編集される。この帳票はサーバ PC 内で作成されるがクライアント PC から自由参照できる。

6.3.4.3 連続収集データ

これらのデータも識別するキーとして、データ名 + 日付 + 時刻という属性を用いて RDB に格納する。データは貯槽のレベル、温度、用役使用量などがある。このデータも表計算ソフトウェアで自動的に帳票の形に編集される。この帳票はサーバ PC 内で作成されるがクライアント PC から自由参照できる。

6.3.4.4 DCS 以外からのデータの収集

フィールドのセンサからのデータは DCS に取り込まれているが、帳票にのせる必要のある管理データのうち DCS で収集していないものは PC の画面より手で入力する。手入力はその処理の機能を持つプライマリークライアント PC から行ない、対象となるデータは現場計器の指示値、分析値などである。RDB 用のキーはそのデータをバッチと連続のどちらとして扱うかに合わせて設定する。

現実のプラントではこの種のデータがきわめて多く運転管理システムへの入力作業に多くの労力を費やしている。この場合においても入力ミス、入力忘れなどのヒューマンエラーの発生が避けられず、それらをどう防ぎかつ人の負荷を増やさずに済ませることができるかはプラント管理者にとってきわめて重要な今後の課題である。

6.3.4.5 データの編集と検索

DCS から送られるデータはバッチ収集データも連続収集データも一旦 RDB に格納される。バッチ収集データと連続収集データの関係は次の図に示すとおりである (図 6.23 参照)。図の中でバッチ収集データと連続収集データのデータ構成における網かけ部分はデータベースアクセス時のキーである。

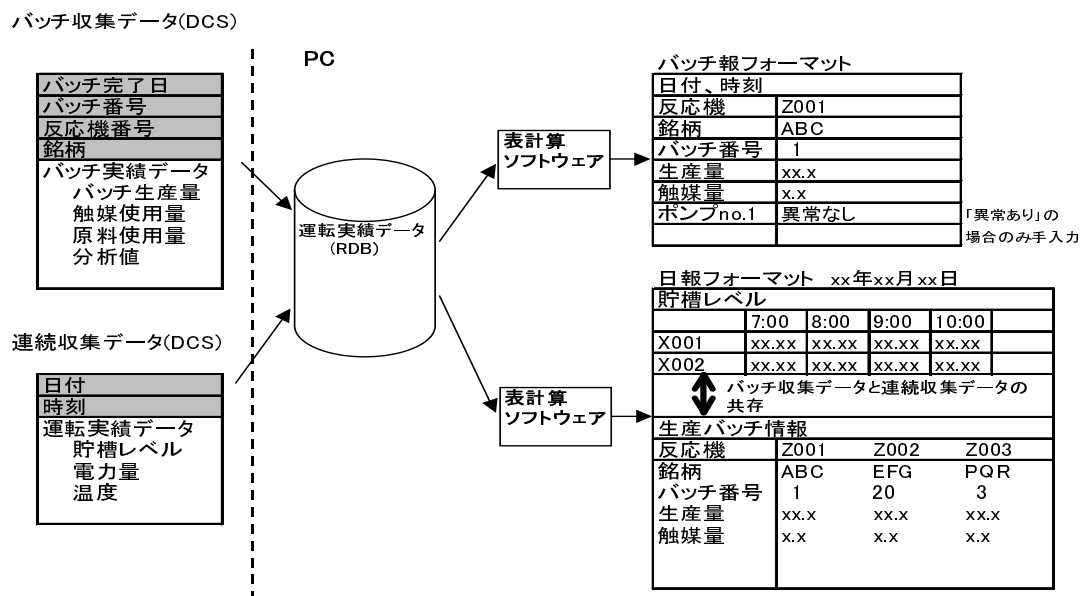


図 6.23: Relation between batch data and continuous data

6.3.5 BOMS 導入による省力効果

BOMS の導入によって得られた省力効果を、実プラントにおいて調べた結果に基づいて以下に示す [77]。

6.3.5.1 帳票自動作成による省力効果

ここで自動化の対象にした帳票はバッチ報と日報である。このうちバッチ実績データをバッチ単位で記載したバッチ報は、これまで生産スタッフが定時あるいはバッチのシーケンス処理の区切りに決まった書式に手書きで記入していたが、何バッチかの完了が重なったときなど負荷が集中する傾向があった。プラント全体の年間の総生産バッチ数から割り出した1日あたりの生産バッチ数は、平均すると16バッチであり1バッチについて1枚のバッチ報が対応している。バッチ報のフォーマットは反応機によって異なりデータ数も違うが、1枚あたりの平均データ件数は130件で、16枚の合計は2080件である(バッチ報のデータ数は反応機、銘柄によって様々なので平均値を用いている)。また日報は11種類あり、それらのデータ件数は40から400件で、平均すると220件であり合計すると2420件である。したがってここで自動作成した帳票のデータ合計4500件

を生産スタッフが手で帳票に記入していたことになる。実際に生産スタッフがデータ1件をDCSの画面から帳票に転記するのに要する時間を測定したところ、1件あたり平均5秒かかっていたので(あるバッチ報について、バッチ終了時にデータ記入の件数と所要時間を実測して求めた)その値を用いると帳票上のデータのうちDCSから転記するものの割合を70%(ここではDCSで収集していないデータ、例えば点検時などに目視によって収集するデータや分析値などが30%ほどある。ただしこの数字は帳票によってかなり差があり、全データ件数に対するきわめておおまかな推定である)とすると262分かかることになり、1日あたり4時間22分の省力化が実現できる。

6.3.5.2 データ検索迅速化による省力効果

プロセスデータの検索を必要とするのはバッチ実績データのトレースやバッチ実績の銘柄別、反応機別の仕分けを行なう場合である。バッチ実績データのトレースはトラブルの原因究明のために行なう。これまでスタッフが帳票のデータをもとにプラント内でのバッチ/ロットの流れを手書きでガントチャート形式に書きなおしていたがその負担を軽減するための機能を追加した(貯槽の移液データ収集:付録A.8、バッチデータトレース:付録A.9)。さらに月末に行なうバッチ実績の集計において、それまでは手書きの帳票のデータを表計算ソフトウェアのシートに転記して計算していたが、本システムではすでに実績データが仕分けされた形で表計算ソフトウェアのシート上にあるので、そのまま表計算ソフトウェアの機能を用いて編集し1ヶ月分を自動的に集計することができる。

6.3.5.3 クライアント/サーバPC導入による省力効果

これまでプロセスデータを参照するためには、次の2つの方法があった。

1. 操作室のDCSの画面上に表示する(直近の50時間分)。
2. 手書きの帳票で調べる(事務所に保管)。

いずれの場合もデータのある場所まで出向く必要があったが、システム導入後は工場内のクライアントPCをとおしてすべての帳票の参照(全クライアントPCから)や過去のデータの検索(プライマリークライアントPCから)が瞬時にできるようになった。

6.3.6 BOMS導入後の課題

BOMSの導入後、所期の目標であった省力化は達成できたがなお次のような課題が残されている。これまで人の行なってきた作業を機械(コンピュータ)に置き換えると人の果たすべき役割は変わる[79]といわれているが、そのことを十分に認識していないために起きる問題もある。特に人間機械系の接点であるヒューマンマシンインターフェイスに関して様々な課題が残されており、それらの課題をどう解決するかについての指針を述べる。

1. 手入力データが残っている。

6.3.5.1 節で示したように帳票のデータのうち DCS で収集していないものが 1000 件以上ある。これらの大半は異常あり/なしに関するもので異常時に限って入力する（帳票のフォーマットで、「異常なし」をデフォルトとして前もってセルに格納しておく。もし異常があれば手入力で「異常あり」（状況...）と上書きする）。それらを除くと手入力には、現場計器の指示値、分析値（バッチ終了後に分析結果を手入力する場合）、特記事項などがある。手入力はその作業の単純さ、単調さの点で手書き帳票となんら変わらず、しかも繰り返し発生するので極力なくすべきであるが、どうしても自動収集できないデータについてはデータの発生源で入力できるようにする。例えば現場計器の指示値の入力が必要な場合には、定期的に行なっている巡回点検時にタブレット型コンピュータを携帯し、現場で文字入力しサーバ PC に転送するやり方がある。ただし持ち込む機器は防爆対応仕様であることが必要である。手入力を減らしたり、収集するデータの範囲を広げてシステムの機能を高めたりするためには次のような方法がある。

a) センサの数を増やすことや他のシステムとのネットワークを強化しデータを共有することによってデータの自動収集を進める。

b) 移液データ収集（付録 A.8）、バッチデータトレース（付録 A.9）に加えて、センサで直接収集することのできないデータを計算によって求める（ソフトセンサの利用）。

例）熱収支式、物質収支式を用いて測定値の誤差を推定する方法であるデータリコンシレーションによって未測定値を推定する [80]。

2. 帳票のデータが多すぎる。

すべての運転実績データを収集することは必要であるが、それらをすべて帳票に載せたあとで帳票内のデータの重複をなくすことや不要な帳票の廃止、統合化などを行なわずにいると次第に帳票がそのデータの数とともに増加し利用効率が低下してくる。そのような状態では自分の欲しいデータがどこにあるのかわからなかったり、重要なデータを見落としたりするおそれがある。一度 BOMS が完成すると運用体制に移行するが計装、コンピュータシステム関連の人員が入れ替わったりすると、その影響で保守作業が遅れがちになり BOMS を使用する側の非効率あるいは不具合の放置が続くことになる。このような状態を改善するためには、プラントにおける組織内の制度として定期的に（1年に1、2回）帳票の項目を見直す仕組みが不可欠である。また汎用的な表計算ソフトウェアをヒューマンマシンインターフェイスとして導入することによって、生産スタッフが自分で保守できるオープンなシステムにすることも有効である。しかし汎用的なソフトウェアを使う限り、利用者の要求に応じて関連するデータのみ限定して表示することや、不要なデータは表示しないことによって重要なデータを強調するという方法を取り入れるというような柔軟性には欠ける。

3. データの入力ミスは完全には防げない。

入力ミスは手入力でデータを転記する際に発生する。防ぐ方法としては、入力データの上下限值チェックや変化量チェックなどがあり、操作者に警告を発することができるがそれらをくぐり抜けることも多い。一度受け付けられたデータについては誤りがあってもなかなか発見できない。このような誤りを見つけるには同一データの経時変化をチェックするのが唯一の方法である。さらに入力の手間を省くためにデフォルト値を持たせると、入力を忘れたり誤ったりしても、システムの機能では完全には発見も防止もできない。

4. 運用開始後の定着化に時間がかかる。

運用開始後に次のような問題の発生することがある。

a) システムの運用開始後も以前の手書きがやめられない。

b) 導入を推進したプラント管理者が替わるとうやむやになりもとの手書きに戻ってしまう。

システムの運用への移行を円滑にするためには、品質の向上（規格からのばらつきを減らすこと）、原単位向上、ロスの削減（作りすぎ、在庫切れの防止）に関する製造上の管理目標を明確にすることである。それによって生産スタッフはBOMSが必要不可欠であることを認識する。

6.3.7 結論

バッチプラントに運転管理システムを導入することで手書きの帳票をなくしてデータ管理にもなう業務負荷を軽減し、さらにトラブル発生時の原因究明を迅速化するための仕組みを確立することができたが、このシステムは生産支援システム（PSS）要素機能の一つである。このシステムの導入によって生産スタッフの業務にゆとりができるので、それを生産工程の弾力性向上のための技能・知識の修得や業務範囲の拡大あるいは生産技能伝承にあてる。

6.4 考察と結論

この章では実際に導入して省力化に有効であった生産支援システムの要素機能について述べた。いずれのシステムも導入前に省資源、省エネルギー、省力化の観点から導入効果を見積もったが、省力化の効果を確認することができた。これらのシステムは生産スタッフの技能を代替できているが、省資源、省エネルギーについてはどの程度目標を達成できたか確かめることができなかった。そのような状況において省力化効果を強調すると人員削減につながりかねず、また生まれた時間的な余裕の有効活用方法もはっきりしなければシステムの導入によって技能の低下を招き、生産性の低下を引き起こすのではないかという疑問を持ったことが本研究のそもそもの発端である。本研究において明らかになったことは、生産支援システム（PSS）の導入において目指すのはまず省力化効果であり、それによって生産スタッフに生まれた余裕時間で生産工程の弾力性向上をはかることができるということである。

第7章 結言

7.1 本研究の結論

本研究においては、

1. 生産工程の弾力性管理
2. 生産工程における弾力性の定量的評価
3. 生産スタッフの業務における時間的余裕の創出
4. 弾力性向上に関わる生産支援システム（PSS）

について検討したが、それぞれの結論を以下に述べる。

1. 生産工程における弾力性は、生産スタッフ、PSS、生産装置から生まれることとそれぞれについて攪乱信号の大きさに対応する管理項目を明らかにした（図 2.3, 図 2.5, 図 2.7 参照）。また管理項目は生産スタッフの技能に関わるもので、生産工程の弾力性は生産スタッフの技能・知識水準を用いて求められることが明らかになった。
2. 生産工程において生産スタッフ、PSS、生産装置のそれぞれから生まれる弾力性を定量的に求める方法を提案した。生産スタッフはその数が多いからといって弾力性が高まるわけではなく、その技能・知識によって弾力性が決まるという考え方をとっている。すなわち生産スタッフの技能・知識水準を高めれば弾力性が向上するというを示した。そのためには適切な教育・訓練の体系が必要でその結果の正しい評価も必要である。また生産支援システムは、生産スタッフの技能を技術化してその業務を代替するものである。そのため生産スタッフの技能が代替された分だけ継承されるものとして弾力性を評価することができる。生産スタッフの業務をすべて代替すれば、生産スタッフにより生み出される弾力性はすべて生産支援システムに継承される。さらに生産装置から生まれる弾力性は、その管理対象（巡回点検、トラブル発生、装置の改造・補修、リスクアセスメント）については生産スタッフの技能・知識水準によって確実に管理できるかどうかが決まるので、生産装置に内在するリスクと合わせたものを定量的評価の指標とした。これらの3つの弾力性を合わせて生産工程から生まれる弾力性を総合的に評価できる。
3. 生産スタッフの実測可能な業務従事時間を用いて業務に必要な技能量（技能価値）を求めることができるが、職位にふさわしい業務に従事すれば時間の短縮が可能であることを示した。同じように、複数のグループ間で人員配置を変更することによっても時間短縮が可能で

あることがわかった。これまで業務分担や人員配置は安定した操業を保つためとして固定されがちであったが、担当業務を変えることによって慣れからくる不注意や手抜きを防止でき新しい業務に積極的に関わることは技能・知識の向上につながる。

4. 弾力性向上のためには、生産スタッフの業務において時間的な余裕を創出することが必要であるが、その方法の一つとして生産支援システムの機能によって生産スタッフの業務を代替させることがある。ここではかつて実際に化学工場の生産工程に導入した3つのシステムについて述べた。いずれも、省資源、省エネルギー、省力化によって設備投資を回収することを目指したが、実際に最も顕著であったのは省力化効果である。しかし当時は得られた生産スタッフの時間的な余裕をどう活用するかを明確にできなかったため、新たな技術として他の生産工程に水平展開することができなかった。しかし本研究において、生産工程の弾力性向上のためには教育・訓練のための時間的な余裕の必要性が明らかになり、上記の3つのシステムの有用性も明らかにすることができた。

7.2 残された課題

今日、日本の化学工業は様々な問題点を抱えているが、工場における生産活動に限っても以下のようなものがある。

- 国内の向上を海外に移転させる企業が多く国内の工場の老朽化が進んでいる。そのため生産装置の補修・改造が繰り返されて建設時には備わっていた弾力性が失われている可能性が高い。
- 生産活動に従事する生産スタッフの技能向上が難しくなっている。その理由として新しい技術の導入によって（特にIT関連技術）これまでの熟練技能が役に立たなくなること、工場の統合・閉鎖などで蓄積された技能が失われること、化学工業の将来性に疑問を感じて工場に若い人材が入ってこなくなることなどがあげられる。また新たな技能を修得するための教育・訓練体系もまだ十分とは言えない。
- 予知の困難な自然災害で生産活動が阻害されることが多い。企業も被害を減らすように努めているが決め手となる対策はまだ見出されていない。また大災害が襲った時に被害を免れる方法があるかどうかは未知の領域である。
- 生産工程における弾力性の重要性は次第に認識されてきているが、企業としての具体的な取り組みはまだ明確になってはいない。

このような問題点がある中で、本研究に残された課題は次のとおりである。

- 老朽化した工場の弾力性をいかに取り戻すか。生産スタッフの技能・知識のみでは不可能であるが設備投資してもそれに見合う利益は得られるであろうか。生産支援システムによる生産スタッフの業務の代替がどこまで可能か。

- 現在熟練度の高い（経験豊富な）生産スタッフは急速に減少している。生産技能伝承をいかに加速するか、また技能の受け継ぎ手である若い人材をいかに確保するか。教育・訓練についても体系化したものを作れるか。指導者をどのように育成していくか。
- 生産工程における弾力性の重要性を生産活動に従事するすべての人たち（企業経営者も含む）にいかに認識させるか。また弾力性向上のための投資はどのように回収できるか。

これらの残された課題の解決はいずれも難しく個人の研究のみでは不可能である。企業や業界も含めて化学工業の将来像を描いていくことが必要であろう。

参考文献

- [1] 藤本隆宏・桑嶋健一編：日本型プロセス産業（ものづくり経営学による競争力分析）有斐閣（2009）
- [2] H. Eguchi, T. Aoyama, K. Seki, D. O'Donovan and I. Koshijima, Organizational Structure on the Resilience of Production Processes Based on Human Factors in the Chemical Industry, *Journal of Engineering Science and Technology Special Issue on SOMCHE 2014 & RSCE 2014 Conference*, January (2015) pp.30 -40
- [3] H. Eguchi, T. Aoyama, K. Seki, D. O'Donovan and I.Koshijima, Organizational Structure on the Resilience of Production Processes Based on Artificial Factors in the Chemical Industry, *Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers* Vol.3, No.3, pp.141-147, (2015.7.25)
- [4] H. Eguchi, T. Aoyama, K. Seki, D. O'Donovan and I. Koshijima, A Metric for Quantitative Estimation of Production Process Resilience Based on the Skills and Knowledge of Production Plant Personnel in the Chemical Industry, *J. Chem. Eng. Japan*, vol.49, pp.35–41 (2016)
- [5] H. Eguchi, T. Aoyama, K. Seki and I. Koshijima, A Metric for Quantitative Estimation of Production Process Resilience Based on the Production Support System in the Chemical industry, *J. Chem. Eng. Japan*, vol.49, pp.673–679 (2016)
- [6] H. Eguchi, T. Aoyama, K. Seki and I. Koshijima, Optimal Job Routine Assignment for the Improvement of Operational Resilience based on Skills and Knowledge of Production Staff in the Chemical Industry, *Proceedings of SCIS&ISIS 2014 (158)* (December 3-6, 2014 at Kitakyushu International Conference Center, Japan)
- [7] Hajime Eguchi, Tomomi Aoyama, Kohei Seki and Ichiro Koshijima, Optimal Personnel Reallocation Based on the Skills and Knowledge in the Chemical Industry, *Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers* Vol.3, No.3, pp.126-133 (2015.7.25)
- [8] 江口元, 装置産業における運転技能伝承支援システムの研究, ヒューマンファクターズ, vol.10, no.1, pp.15–21 (2005)
- [9] H. Eguchi and D. O'Donovan, Advancement and Transfer of skills by Reciprocal Interaction of Human Skills and Technique via a Production Support System in the Chemical Industry, *J. Chem. Eng. Japan*, vol.43, pp.435–442 (2010)

- [10] H. Eguchi and D. O'Donovan, Evaluation of labor productivity using a corrected production staff number approach in the Chemical Industry, *J. Chem. Eng. Japan*, vol.45, pp.206–209 (2012)
- [11] 江口元, 工場作業における3段階の危険源抽出法, 化学工学論文集, vol.37, no.6, pp.532–538 (2011)
- [12] 江口元, 組合せ最適化によるバッチ反応機の生産スケジューリング, 化学工学論文集, vol.32, no.6, pp.500–506 (2006)
- [13] 江口元 他, PLCを用いたバッチ反応機のモデル予測制御, 計装, 2002年5月号, pp.21-25, 工業技術社 (2002)
- [14] 江口元, バッチプラント運転管理システムにおける省力効果の考察, ヒューマンファクターズ, vol.11, no.1, pp.22–30 (2006)
- [15] H. Eguchi and D. O'Donovan, Effect of a Change in Personnel on the Quantitative Evaluation of Human skills in the Chemical Industry, *J. Chem. Eng. Japan*, vol.44, no.1, pp.32–36 (2011)
- [16] G.H.A. Shirali, M. Motamedozade, I. Mohammadfam, V. Ebrahimipour and A. Moghimbeigi, Challenges in building resilience engineering (RE) and adaptive capacity: A field study in a chemical plant, *Process Safety and Environmental Protection*, vol.99, pp.83–90 (2012)
- [17] D. Furniss, J. Back, A. Blandford, M. Hilderbrandt and H. Broberg, A resilience markers framework for small teams, *Reliability Engineering and System Safety*, vol.96, pp.2–10 (2011)
- [18] J. Back, D. Furniss, M. Hilderbrandt and A. Blandford, Resilience marker for safer systems and organizations, *Proceedings of Computer Safety, Reliability, and Security*, pp. 99–112 (2008)
- [19] F. Bracco, T. Piccinno and G. Dorigatti, Turning Variability into Emergent Safety: the Resilience Matrix for Providing Strong Responses to Weak Signals, *Proceedings of 5TH Symposium on Resilience Engineering Managing Trade-Off*, pp.23–28 (2013)
- [20] G.O. Ose, L.S. Ramstad and T.J. Steiro, Analysis of Resilience in Offshore Logistics and Emergency Response Using a Technology Based Tool, *Proceedings of 5th Symposium on REA* (2013)
- [21] G.O. Ose and T.J. Steiro, Introducing IO in a Drilling Company: Towards a Resilience Organization and Informed Decision-Making?, *Integrated Operations in the Oil and Gas Industry: Sustainability and Capability Development*, vol.22, pp.370–388 (2012)
- [22] A. Azadeh, V. Salehi, M. Ardan and M. Dolatkhah, Assessment of resilience engineering factors in high-risk environments by fuzzy cognitive maps: A petrochemical plant, *Safety Science*, 68, pp. 99–107 (2014)

- [23] A. Azadeh, V. Salehi, B. Ashjari and M. Saberi, Performance evaluation of integrated resilience engineering factors by data envelopment analysis: The case of a petrochemical plant, *Process Safety and Environment Protection*, vol.92, pp.231–241 (2014)
- [24] L.T.T. Dinh, H. Pasman, X. Gao and M.S. Mannan, Resilience engineering of industrial process: Principles and contributing factors, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol.25, pp.233–241 (2012)
- [25] M.C.R. Vidal, P.V.R. Carvalho, M.S. Santos and I.J.L. Santos, Collective work and resilience of complex systems, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol.22, pp.516–527 (2009)
- [26] I. Gene Rochlin, Safe operation as a social construct, *Ergonomics*, vol.42, pp.1549–1560 (1999)
- [27] L.K. Comfort, Y. Sungu, D. Johnson and M. Dunn, Complex Systems in Crisis: Anticipation and Resilience in Dynamic Environment. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, vol.9, pp.144–158 (2001)
- [28] P.V.R. de Carvalho, I.J.L. Santos, J.O. Gomes, M.R. da Silva Borges and G.J. Huber, The Role of Nuclear Power Plant Operator's Communications in Providing Resilience and Stability in System Operation, Proceedings of the 2nd Symposium on Resilience Engineering, pp.80–91 (2006)
- [29] 江口元, 化学工場の生産支援システムにおける導入効果評価法, 化学工学論文集, vol.34, no.1, pp.168–174 (2008)
- [30] 江口元, 化学工場の生産支援システムにおける導入効果評価法, 化学工学会論文集, vol.34, no.1, pp.168–174 (2008)
- [31] リスクマネジメント規格活用検討会, ISO31000: 2009 リスクマネジメント–解説と適用ガイド, 日本規格協会 (2010)
- [32] リスク学入門 5 科学技術から見たリスク, 岩波書店 (2007)
- [33] 野田 賢, 倉恒匡輔, 西谷紘一, スキルレベル評価に基づくプラント運転シフトの編成最適化, ヒューマンファクターズ, vol.12, no.2, pp.102–109 (2008)
- [34] 野田 賢, 倉恒匡輔, 西谷紘一, プラント運転シフトの異常/緊急対応能力の定量的評価法, ヒューマンファクターズ, vol.14, no.2, pp.72–78 (2010)
- [35] 江口元, 橋本芳宏, 伊藤利昭, HA 法を用いた化学プラントにおけるシステム化対象項目評価法, 計測自動制御学会産業論文集, vol.4, no.9, pp.56–64 (2005)
- [36] T. Saaty, Decision Making for Leaders, The Analytic Hierarchy Process Series vol.2, p80, RWS Publications (2001)
- [37] 中村肇, 製造現場における熟練技能の現状, 計測と制御, vol.37, no.7, pp.490–494 (1998)

- [38] 中村肇, 製造業における技能伝承に関する研究, 三菱総合研究所報, vol.25, pp.44–85 (1994)
- [39] 榎木哲夫, 人間－機械－環境系からみる熟練技能, 計測と制御, vol.37, no.7, pp.471–476 (1998)
- [40] 江口元, 橋本芳宏, 伊藤利昭, 階層分析法を用いた化学プラントにおけるシステム化対象項目決定法, 計測自動制御学会産業論文集, vol.4, no.9, pp.56–64 (2005)
- [41] 國領二郎, 野中郁次郎, 片岡雅憲, ネットワーク社会の知識経営, 第1章, NTT出版 (2003)
- [42] 橋本伊織編, 次世代化学プラントの設計・運転・保全のための知的支援システムの開発, 日本学術振興会, 未来開拓学術研究推進事業, 研究成果報告書, 第5章 (2001)
- [43] 吉澤正監修, OHSAS18001・18002 労働安全衛生マネジメントシステム, 日本規格協会 (2000)
- [44] 平林良人, 労働安全衛生 (OHSAS) 入門, やさしいシリーズ 8, 日本規格協会 (2004)
- [45] 中川威雄, デジタルマイスタープロジェクトによる日本製造業の活性化, システム/制御/情報, vol.46, no.8, pp.459–463 (2004)
- [46] 中根千枝, タテ社会の力学, 第1部, 2小集団所属, 講談社現代新書 (1978)
- [47] 山本孝, 熟練技能の伝承システムの研究, 白桃書房 (2004)
- [48] 国領二郎, 野中郁次郎, 片岡雅憲, ネットワーク社会の知識経営, NTT出版 (2003)
- [49] 森和夫, 技術・技能伝承ハンドブック, JIPM ソリューション (2005)
- [50] 藤本隆宏, 生産システムマネジメント入門 I, p.118, 日本経済新聞出版社 (2001)
- [51] 長尾高明, 産業システム経済学, p.69, 東京大学出版会 (1993)
- [52] 武谷三男編: 安全性の考え方, p.208 岩波新書 B118, 岩波書店 (1967)
- [53] 北島禎二, バッチスケジューリングシステム構築に対する諸問題, 化学工学の進歩 38, バッチプロセス工学, 第5章, 化学工学会編, pp.59–83, 槇書店 (2004)
- [54] 河野浩司, バッチプロセスにおけるスケジューリング制御, 化学産業における制御, 第5章, 伊藤編著, pp.110–143, コロナ社 (2002)
- [55] 長谷部伸治, バッチプロセスの最適設計と操作, 化学工学, vol.61, pp.645–48 (1997)
- [56] 茨木俊秀, 組合せ最適化とスケジューリング問題: 新解法とその動向, 計測と制御, vol. 34, pp.340–346 (1995)
- [57] 茨木俊秀, スケジューリングの理論, システム/制御/情報, vol.41, pp.100–115 (1997)
- [58] 富田重幸, 山場久昭, 大島榮次, ツリー型工程をもつ多目的バッチプラントの知的運転支援システム－多品種同時生産での適応スケジューリングにおける経験則の活用－, 化学工学論文集, vol.17, pp.740–749 (1991)

- [59] 高田真好, 寺野隆雄, 2段階 CLP 緩和法によるリソース平準化スケジューリングシステム, 電子通信情報学会, J84-D-I, pp.896–905 (2001)
- [60] I. Harjunoski, V. Jain and I. E. Grossmann, Hybrid Mixed Integer/Constraint Logic Programming Strategies for Solving Scheduling and Combinatorial Optimization Problem, Computer and Chemical Engineering, vol.24, pp.337–343 (2000)
- [61] 相場亮, 制約論理プログラミングシステム, コンピュータソフトウェア, vol.9, pp.461–472 (1992)
- [62] 淵一博, 溝口文雄, 古川康一, J-L. Lassez 編, 制約論理プログラミング, 第1章, pp.1–12, 共立出版 (1989)
- [63] 木瀬洋, 生産スケジュールの現状と動向, システム/制御/情報, vol.41, pp.92–99 (1997)
- [64] 福島雅夫, 数理計画入門, pp.145–151, 朝倉書店 (1996)
- [65] 日本学術振興会 PSE143 委員会 WS17 報告書, バッチプロセスの設計・運転・管理のシステムの的アプローチ (1997)
- [66] 日本学術振興会 PSE143 委員会 WS22 報告書, 離散事象システムとしてのバッチ制御システムの設計 (2002)
- [67] 化学工学会編, バッチプロセス工学, 化学工学の進歩 38, 槇書店 (2004)
- [68] 花熊克友他, バッチ重合反応器に対する繰り返し学習制御系の設計と応用, 化学工学論文集, vol.16, no.1, pp.51–55 (1990)
- [69] 大嶋正裕, 小河守正, モデル予測制御Ⅱ—基礎編: 発展の歴史と現状, システム/制御/情報, vol.46, no.5, pp. 286–293 (2002)
- [70] ジャックリシャレ, 江口元, モデル予測制御, 日本工業出版 (2007)
- [71] マチエヨフスキー (足立他訳), モデル予測制御制約のもとでの最適制御, 東京電機大学出版局 (2004)
- [72] K.Preuss et al., Thermal Control of Chemical Batch Reactors with Predictive Functional Control, Benelux Quarterly Journal on Automatic Control, vol.39, no.4, pp.13–20 (1998)
- [73] 江口元他, PLC を用いたバッチ反応機のモデル予測制御, 計装, 2002年5月号, pp.21–25, 工業技術社 (2002)
- [74] 江口元他, PLC を用いたバッチ反応機のモデル予測制御<モデル同定・パラメータチューニングと制御性向上のためのシミュレーション>, 計装, 2003年2月号, pp.88–92, 工業技術社 (2003)
- [75] 江口元他, PLC を用いたバッチ反応機のモデル予測制御<ステップ応答テスト, DCS/PLC 共存環境>, 計装, 2003年7月号, pp.24–28, 工業技術社

- [76] 五島芳和, 暴走プロポキシレーションのシミュレーション, 油化学, vol.41, no.6, pp.489–494 (1992)
- [77] H.Bouhenchir, M.Cabassad, M.V.Le Lann, Predictive functional control for the temperature control of a chemical batch reactor, Computer and Chemical Engineering, vol.30, pp.1141–1154 (2006)
- [78] 化学工学協会編, バッチプロセス工学, 最近の化学工学 36, 化学工学協会, 第6章, バッチプロセスにおける情報管理 (大島榮次) (1984)
- [79] 化学工学会編, バッチプロセス工学, 化学工学の進歩 38, 槇書店, 第6章, バッチプロセスの運転管理システム (河野浩司) (2004)
- [80] 江口元, 野口明彦, バッチプラントにおける既存 DCS の機能高度化事例, 計装制御技術会議予稿, 日本能率協会 (1998)
- [81] 江口元, 化学産業における知識創造型生産支援システムの研究, ヒューマンファクターズ, vol.10, no.2, pp.94–102 (2006)
- [82] 岡田有策, ヒューマンファクターズ概論, 慶応義塾大学出版会, 第5章, インターフェイスデザインアセスメント (2005)
- [83] 中矢一豊他, データリコンシリエーションの実装置への適用, 化学工学論文集, vol.21, no.1, pp.83–?88 (1995)
- [84] 辻洋巳, 江口元, 特開平 10-314574, 製造プロセス品質管理法

付録 A 付録

ここで本論文の付録として、各章において計算例あるいは適用事例として説明を補足する内容を一括してとりあげる。

A.1 ケーススタディ：技能価値の増加による弾力性の向上

生産工程において技能価値が増加すると生産スタッフによって生み出される弾力性も向上する。生産支援システム（PSS）の要素機能によって生産スタッフの業務（業務の内容については、4.1.2節参照）を代替させると、生産スタッフは生まれた余裕時間をより高度な技能の修得にあてることができるので生産スタッフの技能はさらに向上するに違いない。日々の業務の一つ、例えば‘データ収集および監視業務：業務 B)’の一部を PSS の要素機能で代替させればそのことによって生まれた時間的な余裕を他の業務、例えば‘トラブルや異常の発生原因の究明：業務 E)’にあてることができる（表 A1、表 A2 参照）。表 A1、表 A2 は、PSS に新たな要素機能を導入した後の技能表出時間である。 B'_1 はリーダーのもの、 B'_2 はサブリーダーのものである。その際に業務 B) における技能表出時間は PSS の要素機能で代替されているので、すべてゼロである。したがって要素機能の導入前の業務 B) における技能表出時間は余裕時間となり、業務 E) にあてることにして業務 E) の技能表出時間に加える。このとき以前の業務 B) のオペレーション技能の時間は業務 E) のメモリ技能に加算し、メモリ技能の時間はコミュニケーション技能に加算する。

$$\begin{aligned} T1' &= B'_1 \cdot W1_1 \\ &= (22.96, 0, 3.852, 13.08, 23.19, 42.61, 27.56)^T \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

$$\begin{aligned} T2' &= B'_2 \cdot W_2 \\ &= (16.11, 0, 33.26, 8.263, 45.48, 33.26, 22.73)^T \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

$$\begin{aligned} T3 &= B_3 \cdot W_3 \\ &= (5, 30, 20, 0, 5, 60, 20)^T \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

グループの重み付き技能表出時間の合計 T'_{total} は次のようにあらわせる。

$$\begin{aligned} T'_{total} &= T1' + T2' + T3 \\ &= (44.07, 30, 57.11, 21.34, 73.67, 135.87, 70.29)^T \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

グループ全体の重み付き技能表出時間 T'_{total} の成分の合計値 TV' は次のようにあらわせる。

$$\begin{aligned} TV' &= \sum_{i=1}^7 T'_{totali} \\ &= 432.34 \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

次に、 $T1', T2', T3$ を合成した行列にベクトル V を掛けて求めた行列は、このグループ全体の技能価値をあらわす。ここで、ベクトル V は業務における生産スタッフの技能・知識水準をあらわす指標である [15]。

$V = (1.2, 1.0, 0.8)^T$ とすると、 Q' は次のようにあらわせる。

$$\begin{aligned} Q' &= (T1' \ T2' \ T3) \cdot V \\ &= (47.66, 24.0, 53.88, 23.95, 77.31, 132.39, 71.80)^T \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

ベクトル Q' の成分の和はグループ全体の技能価値の合計であり、次のとおりである。

$$\begin{aligned} QV' &= \sum_{i=1}^7 Q'_i \\ &= 430.99 \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

$$\begin{aligned} R'_{PPP} &= QV'/TV' \\ &= 0.997 \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

式 (3.12) と式 (A.8) を比較すると、生産スタッフの技能価値が高まれば生産スタッフによって生み出される弾力性も向上することがわかる。

表 A.1: Modified matrix of work hours devoted to each skill after the implementation of a function of PSS (supervisor) B'_1

		[h/month]		
		Skill j		
Work i		1)	2)	3)
A)		40	0	0
B)		0(15)	0(2)	0
C)		5	1	0
D)		6	8	1
E)		0	20(5)	2(0)
F)		40	20	0
G)		0	10	10

() : former value

表 A.2: Modified matrix of work hours devoted to each skill after the implementation of a function of PSS (deputy supervisor) B'_2

		Skill j		
		1)	2)	3)
Work i	A)	20	0	0
	B)	0(30)	0(10)	0
	C)	30	10	0
	D)	8	2	0
	E)	0	35(5)	10(0)
	F)	30	10	0
	G)	0	10	10

[h/month]

(): former value

A.2 係数行列 BN, C^{abc}

技能表出時間 B_k (表 5.6、表 5.7、表 5.8 参照) の成分を正規化した技能表出時間を BN_k とすると行列 BN_k は表 A.3、表 A.4、表 A.5 のようにあらわすことができる。

表 A.3: Matrix of normalized work hours devoted to skills (supervisor) BN_1

		Skill j		
		1)	2)	3)
Work i	A)	40/40	0	0
	B)	15/17	2/17	0
	C)	5/6	1/6	0
	D)	6/15	8/15	1/15
	E)	0	5/5	0
	F)	40/60	20/60	0
	G)	0	10/20	10/20

[h/h]

表 A.4: Matrix of normalized work hours devoted to skills (deputy supervisor) BN_2

		Skill j		
		1)	2)	3)
Work i	A)	20/20	0	0
	B)	30/40	10/40	0
	C)	30/40	10/40	0
	D)	8/10	2/10	0
	E)	0	5/5	0
	F)	30/40	10/40	0
	G)	0	10/20	10/20

[h/h]

ここで導入する PSS の要素機能は次の 3 つである。

1. 高度制御システム
2. データ収集・監視システム
3. 生産スケジューリングシステム

表 A.5: Matrix of normalized work hours devoted to skills (newcomer) BN_3

		Skill j		
		1)	2)	3)
Work i	A)	5/5	0	0
	B)	20/30	10/30	0
	C)	15/20	5/20	0
	D)	0	0	0
	E)	5/5	0	0
	F)	50/60	10/60	0
	G)	0	15/20	5/20

PSSによって生産スタッフの業務を代替可能な時間 C_k^{abc} を実測値あるいは想定値として求める (表 A.6、表 A.7、表 A.8 参照)。

表 A.6: Matrix of replaceable work hours by each function (supervisor) C_1^{abc}, C_1^{total}

		Work i						
		A)	B)	C)	D)	E)	F)	G)
Alternative j	a)	10	0	0	0	0	0	0
	b)	0	10	1	0	1	0	0
	c)	0	0	0	10	0	0	0
	total	10	10	1	10	1	0	0

表 A.7: Matrix of replaceable work hours by each function (deputy supervisor) C_2^{abc}, C_2^{total}

		Work i						
		A)	B)	C)	D)	E)	F)	G)
Alternative j	a)	5	0	0	0	0	0	0
	b)	0	15	0	0	0.5	1	0
	c)	0	0	0	3	0	0	0
	total	5	15	0	3	0.5	1	0

PSSによる代替可能な重み付き技能表出時間 ΔTk は次のようにあらわせる。

$$\Delta Tk = C_k^{abc} \cdot (BN_k \cdot W1_k) \quad (k = 1, 2, 3) \quad (\text{A.9})$$

A.3 定式化と最適解 (その1)

3名の生産スタッフの技能表出時間をあらわす行列を $B^{(i)}$ ($i=1$, リーダ; $=2$, サブリーダ; $=3$, 新人)、生産スタッフごとの職位別技能重視度から求めた重みベクトルを $W1^{(i)}$ ($i=1,2,3$)、生産スタッフの技能・知識水準をあらわすベクトルを V とする。また、合計が最小である技能表出時間をあらわす行列を $X^{(i)}$ ($i=1,2,3$) とする。

さらに、技能価値をあらわす行列を実測値に基づくものを Q 、最適値に対するものを Q' とする。

ここで、

表 A.8: Matrix of replaceable work hours by each function (newcomer) C_3^{abc}, C_3^{total}

		lh/monthl						
		Work i						
Alternative j		A)	B)	C)	D)	E)	F)	G)
	a)		1	0	0	0	0	0
b)		0	1	0	0	0	1	1
c)		0	0	0	0	0	0	0
total		1	1	0	0	0	1	1

$$B^{(1)} = \begin{pmatrix} 40 & 0 & 0 \\ 15 & 2 & 0 \\ 5 & 1 & 0 \\ 6 & 8 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 40 & 20 & 0 \\ 0 & 10 & 10 \end{pmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$B^{(2)} = \begin{pmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 30 & 10 & 0 \\ 30 & 10 & 0 \\ 8 & 2 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 30 & 10 & 0 \\ 0 & 10 & 10 \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

$$B^{(3)} = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 20 & 10 & 0 \\ 15 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 \\ 50 & 10 & 0 \\ 0 & 15 & 5 \end{pmatrix} \quad (\text{A.12})$$

$$W1^{(1)} = (0.5740, 0.9823, 1.7735)^T \quad (\text{A.13})$$

$$W1^{(2)} = (0.8054, 0.9098, 1.3633)^T \quad (\text{A.14})$$

$$W1^{(3)} = (1.0, 1.0, 1.0)^T \quad (\text{A.15})$$

$$V = (1.2, 1.0, 0.8)^T \quad (\text{A.16})$$

$$\begin{aligned}
Q &= \left(B^{(1)} \cdot W1^{(1)} \quad B^{(2)} \cdot W1^{(2)} \quad B^{(3)} \cdot W1^{(3)} \right) \cdot V \\
&= \left(47.66, \quad 69.94, \quad 53.88, \quad 23.96, \quad 8.55, \quad 132.39, \quad 71.80 \right)^T \quad (\text{A.17})
\end{aligned}$$

$$X^{(1)} = \begin{pmatrix} x_{11}^1 & \cdots & x_{13}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{71}^1 & \cdots & x_{73}^1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.18})$$

$$X^{(2)} = \begin{pmatrix} x_{11}^2 & \cdots & x_{13}^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{71}^2 & \cdots & x_{73}^2 \end{pmatrix} \quad (\text{A.19})$$

$$X^{(3)} = \begin{pmatrix} x_{11}^3 & \cdots & x_{13}^3 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{71}^3 & \cdots & x_{73}^3 \end{pmatrix} \quad (\text{A.20})$$

$$\begin{aligned}
Q' &= \left(X^{(1)} \cdot W1^{(1)} \quad X^{(2)} \cdot W1^{(2)} \quad X^{(3)} \cdot W1^{(3)} \right) \cdot V \\
&= \begin{pmatrix} 0.6888x_{11}^1 + 1.1788x_{12}^1 + 2.1282x_{13}^1 + 0.8054x_{21}^2 + 0.9098x_{22}^2 + 1.3633x_{23}^2 + 0.8x_{31}^3 + 0.8x_{32}^3 + 0.8x_{33}^3 \\ 0.6888x_{21}^1 + 1.1788x_{22}^1 + 2.1282x_{23}^1 + 0.8054x_{21}^2 + 0.9098x_{22}^2 + 1.3633x_{23}^2 + 0.8x_{31}^3 + 0.8x_{32}^3 + 0.8x_{33}^3 \\ 0.6888x_{31}^1 + 1.1788x_{32}^1 + 2.1282x_{33}^1 + 0.8054x_{31}^2 + 0.9098x_{32}^2 + 1.3633x_{33}^2 + 0.8x_{41}^3 + 0.8x_{42}^3 + 0.8x_{43}^3 \\ 0.6888x_{41}^1 + 1.1788x_{42}^1 + 2.1282x_{43}^1 + 0.8054x_{41}^2 + 0.9098x_{42}^2 + 1.3633x_{43}^2 + 0.8x_{51}^3 + 0.8x_{52}^3 + 0.8x_{53}^3 \\ 0.6888x_{51}^1 + 1.1788x_{52}^1 + 2.1282x_{53}^1 + 0.8054x_{51}^2 + 0.9098x_{52}^2 + 1.3633x_{53}^2 + 0.8x_{61}^3 + 0.8x_{62}^3 + 0.8x_{63}^3 \\ 0.6888x_{61}^1 + 1.1788x_{62}^1 + 2.1282x_{63}^1 + 0.8054x_{61}^2 + 0.9098x_{62}^2 + 1.3633x_{63}^2 + 0.8x_{71}^3 + 0.8x_{72}^3 + 0.8x_{73}^3 \\ 0.6888x_{71}^1 + 1.1788x_{72}^1 + 2.1282x_{73}^1 + 0.8054x_{71}^2 + 0.9098x_{72}^2 + 1.3633x_{73}^2 + 0.8x_{71}^3 + 0.8x_{72}^3 + 0.8x_{73}^3 \end{pmatrix} \quad (\text{A.21})
\end{aligned}$$

制約条件

1. 7件の個別業務の技能価値がすべて減らないこと。

A) の業務に関する制約

$$0.6888x_{11}^1 + 1.1788x_{12}^1 + 2.1282x_{13}^1 + 0.8054x_{21}^2 + 0.9098x_{22}^2 + 1.3633x_{23}^2 + 0.8x_{31}^3 + 0.8x_{32}^3 + 0.8x_{33}^3 \geq 47.66$$

B) の業務に関する制約

$$0.6888x_{21}^1 + 1.1788x_{22}^1 + 2.1282x_{23}^1 + 0.8054x_{21}^2 + 0.9098x_{22}^2 + 1.3633x_{23}^2 + 0.8x_{31}^3 + 0.8x_{32}^3 + 0.8x_{33}^3 \geq 69.94$$

C) の業務に関する制約

$$0.6888x_{31}^1 + 1.1788x_{32}^1 + 2.1282x_{33}^1 + 0.8054x_{31}^2 + 0.9098x_{32}^2 + 1.3633x_{33}^2 + 0.8x_{41}^3 + 0.8x_{42}^3 + 0.8x_{43}^3 \geq 53.88$$

D) の業務に関する制約

$$0.6888x_{41}^1 + 1.1788x_{42}^1 + 2.1282x_{43}^1 + 0.8054x_{41}^2 + 0.9098x_{42}^2 + 1.3633x_{43}^2 + 0.8x_{51}^3 + 0.8x_{52}^3 + 0.8x_{53}^3 \geq 23.96$$

E) の業務に関する制約

$$0.6888x_{51}^1 + 1.1788x_{52}^1 + 2.1282x_{53}^1 + 0.8054x_{51}^2 + 0.9098x_{52}^2 + 1.3633x_{53}^2 + 0.8x_{51}^3 + 0.8x_{52}^3 + 0.8x_{53}^3 \geq 8.55$$

F) の業務に関する制約

$$0.6888x_{61}^1 + 1.1788x_{62}^1 + 2.1282x_{63}^1 + 0.8054x_{61}^2 + 0.9098x_{62}^2 + 1.3633x_{63}^2 + 0.8x_{61}^3 + 0.8x_{62}^3 + 0.8x_{63}^3 \geq 132.39$$

G) の業務に関する制約

$$0.6888x_{71}^1 + 1.1788x_{72}^1 + 2.1282x_{73}^1 + 0.8054x_{71}^2 + 0.9098x_{72}^2 + 1.3633x_{73}^2 + 0.8x_{71}^3 + 0.8x_{72}^3 + 0.8x_{73}^3 \geq 71.80$$

2. 生産スタッフそれぞれの業務従事時間（技能表出時間）が増えないこと。

$$\sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^3 x_{j,k}^1 \leq h_1 = 158$$

$$\sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^3 x_{j,k}^2 \leq h_2 = 175$$

$$\sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^3 x_{j,k}^3 \leq h_3 = 140$$

3. 技能表出時間 $x_{j,k}^i$ は正の整数とする。また $b_{j,k}^i = 0$ に対応する $x_{j,k}^i$ の値は0とする。

目的関数

目的関数は生産スタッフ3名の技能表出時間の合計 J とする。すなわち、

$$J = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^3 x_{j,k}^i \quad (\text{A.22})$$

の値が最小になるときの $X^{(i)}$ ($i=1,2,3$) が求める解である。

A.4 定式化と最適解（その2）

各グループに属する生産スタッフの技能表出時間をあらわす行列を $B^{(i)}$ ($i = 1$, リーダ; $i = 2$, サブリーダー; $i = 3$, 新人; $i = 4$, 新人)、生産スタッフごとの職位別技能重視度から求めた重みベクトルを $W1^{(i)}$; ($i = 1, 2, 3$)、生産スタッフの技能・知識水準をあらわすベクトルを V とする。また、合計が最小である技能表出時間をあらわす行列を $Y^{(i)}$; ($i = 1, 2, 3, 4$) とする。

さらに、実測値に基づく技能価値を Q 、技能価値の最適値を Q' とする。ここで、

$$B^{(i)} = (b_1^i \quad b_2^i \quad b_3^i) \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (\text{A.23})$$

$$W1^{(1)} = (0.5740, 0.9823, 1.7735)^T \quad (\text{A.24})$$

$$W1^{(2)} = (0.8054, 0.9098, 1.3633)^T \quad (\text{A.25})$$

$$W1^{(3)} = (1.0, 1.0, 1.0)^T \quad (\text{A.26})$$

$$V = (1.2, 1.0, 0.8)^T \quad (\text{A.27})$$

$$\begin{aligned} Q &= \left(B^{(1)} \cdot W1^{(1)} \quad B^{(2)} \cdot W1^{(2)} \quad B^{(3)} \cdot W1^{(3)} \quad B^{(4)} \cdot W1^{(3)} \right) \cdot V \\ &= Q_{total} \end{aligned} \quad (\text{A.28})$$

$$Y^{(i)} = (y_1^i \quad y_2^i \quad y_3^i) \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (\text{A.29})$$

$$\begin{aligned} Q' &= (Y^{(1)} \cdot W1^{(1)} \quad Y^{(2)} \cdot W1^{(2)} \quad Y^{(3)} \cdot W1^{(3)} \quad Y^{(4)} \cdot W1^{(3)}) \cdot V \\ &= 0.6888y_1^1 + 1.0828y_2^1 + 2.1282y_3^1 \\ &\quad + 0.8054y_1^2 + 0.9098y_2^2 + 1.3633y_3^2 \\ &\quad + 0.8y_1^3 + 0.8y_2^3 + 0.8y_3^3 \\ &\quad + 0.8y_1^4 + 0.8y_2^4 + 0.8y_3^4 \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

制約条件

1. グループにおける生産スタッフの技能価値の合計が減らないこと。

$$Q' \geq Q_{total} \quad (\text{A.31})$$

2. 生産スタッフごとの技能表出時間が上限値を上回らないこと。

$$\sum_{k=1}^3 y_k^1 \leq b_{total}^1 \quad (\text{A.32})$$

$$\sum_{k=1}^3 y_k^2 \leq b_{total}^2 \quad (\text{A.33})$$

$$\sum_{k=1}^3 y_k^3 \leq b_{total}^3 \quad (\text{A.34})$$

$$\sum_{k=1}^3 y_k^4 \leq b_{total}^4 \quad (\text{A.35})$$

3. グループにおける3つの技能それぞれの技能表出時間の合計が上限値を上回らないこと。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 y_1^i &\leq b_{1\ total} \\ \sum_{i=1}^3 y_2^i &\leq b_{2\ total} \\ \sum_{i=1}^3 y_3^i &\leq b_{3\ total} \end{aligned}$$

4. 入れ替え対象である生産スタッフの技能表出時間は表4.7の入れ替え後の見込み値を上回らないこと。次の式で*i*は入れ替えの対象になっている生産スタッフをあらわす。グループ1と3では*i*=3、グループ2では*i*=3,4である。

$$\begin{aligned} y_1^i &\leq b_1^i \\ y_2^i &\leq b_2^i \\ y_3^i &\leq b_3^i \end{aligned}$$

5. 技能表出時間 y_k^i ($i=1,2,3,4; k=1,2,3$) は正の整数である。また、入れ替え後の見込み値の最大値 b_{min}^i 、最小値 b_{max}^i の範囲に含まれていること。

$$b_{min}^i \leq y_k^i \leq b_{max}^i \quad (i=1,2,3,4; k=1,2,3)$$

目的関数

目的関数は生産スタッフの技能表出時間の合計 J とする。すなわち、

$$J = \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^3 y_k^i$$

の値が最小になるときの $Y^{(i)}$ ($i=1,2,3,4$) が求める解である。

A.5 化学工業における労働生産性評価法

ここでは生産技能を定量的に求めた、実測値に基づく“技能価値”を用いた、労働生産性の現実に即した評価法について述べる [10]。

A.5.1 はじめに

製造業における生産方式は大きく2つに分けることができるが、それは素材生産型と組み立て加工型である。化学工業の多くは前者に含まれるがその生産効率を評価するための労働生産性評価指数は次のように定義される [50], [51]。一般に生産性とは投入量1単位あたりの産出量と定義するが労働生産性の場合には投入量を生産人員数、産出量を売上高とすることができる。

$$\text{労働生産性} = \frac{\text{売上高}}{\text{生産人員数}} \quad (\text{A.36})$$

上式はその値が大きいほど労働生産性は高く、生産設備を自動化して分母の生産人員数を減らせば高い労働生産性が実現できることを示している。さらに売上高を増やして高い労働生産性を目指すこともできるが、売上高は仕様における製品の需要によって決まるものであり、生産者の意図どおりに動かすことはできない。そこで上式を労働生産性評価指標として用いる場合には、最も確実な方策として生産人員数の削減に頼ることが多かった。しかし生産人員数を減らすとプラントにおける生産技能が全体として低下してそれが引き金となって事故や災害が発生し、そのために売上高の減少をきたし労働生産性も低下するという悪循環に陥る。そこで生産人員数をそのプラントにおける技能価値で補正して、高い技能は高い労働生産性につながるという新たな評価指標を提案する [9], [10], [15]。

A.5.2 生産技能評価法

ここで生産に関わる人員の持つ技能量（技能価値）を労働生産性評価に導入するために、化学プラントにおける生産技能の評価法について述べる。生産技能の大きさは人によって異なるがそれぞれ自分の技能を向上させようと日々努力している。またチームを構成する人員数が同じでも構成員の顔ぶれが異なれば技能の総量（技能価値）も異なる。本評価法では同じプラントでも技能価値が低いと、高い場合よりも事故や災害の発生、製品品質の異常や低下の可能性があるということを前提としている。その前提に基づいて労働生産性の評価に生産技能を反映させれば、生産人員数あるいはその労務費の合計のみを用いた評価よりも現実に即したものになる。

すでに述べた化学プラントにおける生産技能の定量的評価法を用いて、業務分析をもとに実測したプラントの技能価値で生産人員数を補正する。

ある化学プラントにおいて生産に関わる人員の持つ生産技能の大きさを定量的に測定した技能価値を Q とすると、 Q を次の式であらわすことができる。

$$Q = A \cdot B \cdot V \quad (\text{A.37})$$

ここで、

A: 3つに体系化した技能の生産スタッフごとの重み（それぞれの職位における技能ごとの重要度の違い（重視度）をあらわす）行列。3つの技能とは、オペレーション技能、メモリ技能、コミュニケーション技能である。

B: 生産スタッフの業務の中に、それぞれ3つの業務がどれだけ含まれているかを示す行列。

V: 生産スタッフの技能・知識水準（職位、職務能力）という技倆をあらわすベクトル。

A.5.3 技能価値による生産人員数の補正

まず労働生産性の評価における基準時点（評価開始点）を決める。基準時点における実生産人員数を n_0 とし、技能価値を Q_0 とする。その1年後の実生産人員数を n_1 、技能価値を Q_1 として技能価値で実生産人員数を補正すると、補正後の生産人員数は $n'_1 = n_1 \cdot (Q_0/Q_1)$ となる。ここで、 Q_1/n_1 は基準時点から1年後の生産人員1人あたりの技能価値（平均値）である。技能価値の初期値 Q_0 を Q_1/n_1 で割ると、基準時点の実生産人員数 n_0 に対して1年後に実質的に何人の生産人員でプラントを操業しているかを示す n'_1 が得られる。

もし $n_1 = n_0$ で Q_1 が Q_0 よりも大きいならば、同じ人員数で1年の間に技能価値は増加しており基準時点よりも少ない人員数で操業しているとみなす。したがってここで導入する補正済み生産人員 n'_1 は、整数であらわされる実生産人員数 n_1 とは異なり、基準時点における技能価値 Q_0 のその後の増減を反映させて求めた補正值である。同様に基準時点からN年後の補正済み生産人員数は、 $n'_N = n_N \cdot (Q_0/Q_N)$ とあらわすことができる。実生産人員数が変わっても補正済み生産人員数を求める式はそのまま使うことができる。

以上に述べた補正済み生産人員数を用いて、基準時点からN年後の労働生産性は次のようにならわすことができる。

$$\text{労働生産性} = \frac{\text{売上高}}{(n_N \cdot (Q_0/Q_N))} \quad (\text{A.38})$$

A.5.4 計算例

ここで労働生産性を2つの例を用いて評価する。これらの例で用いるデータは第5章の技能価値の計算例で用いたものと同じである。

A.5.4.1 生産スタッフの技能価値が10%向上した場合

この章において評価の対象としたプラントにおける技能価値の初期値を Q_0 とする。その3年後に技能価値が合計で10%向上すると、 $Q_3 = Q_0 \cdot 1.1$ である。したがって、生産人員数の補正値は $n'_3 = n_0 \cdot (Q_0/Q_3) = 2.73$ (人) となる。すなわち売上高が0.912倍に減っても労働生産性は変わらないことになる。

A.5.4.2 最も技能価値の少ない生産スタッフを減らした場合

この章で評価の対象としたプラントで新人1名を減らして残りの2名の人員で操業すると、もし売上高が変わらなければ一般的な労働生産性の定義式によると労働生産性は1.5倍になる。しかし補正した労働生産性を用いると新人を除いた2人で操業することから技能価値 Q は次のようにあらわせる。

$$\begin{aligned} Q &= (T1 \ T2) \cdot V_0 \\ &= (43.66, 45.96, 37.88, 23.96, 10.44, 84.39, 55.80)^T \end{aligned} \quad (\text{A.39})$$

ここで $V_0 = (1.2 \ 1.0)^T$ は重みベクトルである。

以上より、

$$QV = \sum_{i=1}^7 Q_i = 302.09 \quad (\text{A.40})$$

技能価値で補正された生産人員数は次のようになる。

$$n' = 2 \cdot (414.08/302.09) = 2.74 \text{ (人)} \quad (\text{A.41})$$

新人1名を減らしてもその技能価値を考慮すると0.26人しか減らないことになり、労働生産性の向上は1.09倍にとどまる。さらに新人が担当していた業務を完全に他の2人が引き継ぐまでは事故・災害の発生の危険性は以前よりも高いものと考えられる。

A.5.5 結論

上で示したように技能価値を導入すると労働生産性の評価がより現実的なものになることがわかる。ここでは売上高が減っても労働生産性の低下しないことを示した。一般に売上高は生産者の意に反する動きをすることがあり、一般的な労働生産性の定義式をそのまま用いると、生産者は生産人員の削減によって労働生産性の低下を防ごうとする。しかし技能価値で補正する

と生産人員を1人削減しても0.26人の削減にしかならず、労働生産性はあまり向上しない。すなわち予想よりも人員削減効果が小さいことがある。生産スタッフは労働生産性の向上を目指すだけでなく安全操業も実現しなければならないので、生産人員を削減すると安全性に悪影響を及ぼしかねない [52]。生産現場においては安全性の向上は労働生産性の向上にもつながるとして改善項目の対象として取り上げられることが多い。したがって労働生産性の正確な把握のためには、生産スタッフの技能価値の継続的な評価が今後の課題である。

A.6 反応機内温度モデル、ジャケット冷却水入口温度モデルの関係式導出

反応機内温度モデルの導出

式(6.14)より

$$T_o(s) = \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_m \cdot C_P^m \cdot V_m}{UA} \right) s \right\} T_m(s) \quad (\text{A.42})$$

式(6.15)より

$$\begin{aligned} & \rho_o C_P^o V_o s T_o(s) + \rho_o C_P^o F_i^* T_o(s) + U A T_o(s) \\ &= \rho_o C_P^o F_i^* T_i(s) + \rho_o C_P^o (T_i^* - T_o^*) F_i(s) + U A T_m(s) \end{aligned} \quad (\text{A.43})$$

$$\begin{aligned} & \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_o C_P^o V_o}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A} \right) s \right\} T_o(s) \\ &= \left(\frac{\rho_o C_P^o F_i^*}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A} \right) T_i(s) + \left\{ \frac{\rho_o C_P^o (T_i^* - T_o^*)}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A} \right\} F_i(s) + \left(\frac{U A}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A} \right) T_m(s) \end{aligned} \quad (\text{A.44})$$

式(A.42)の T_o を式(A.44)の T_o に代入すると、

$$\begin{aligned} & \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_o C_P^o V_o}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A} \right) s \right\} \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_m C_P^m V_m}{U A} \right) s \right\} T_m(s) \\ &= \left(\frac{\rho_o C_P^o F_i^*}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A} \right) T_i(s) + \left\{ \frac{\rho_o C_P^o (T_i^* - T_o^*)}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A} \right\} F_i(s) + \left(\frac{U A}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A} \right) T_m(s) \end{aligned} \quad (\text{A.45})$$

式(A.45)を整理すると

$$\begin{aligned} & \left[\left\{ 1 + \left(\frac{\rho_o C_P^o V_o}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A} \right) s \right\} \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_m C_P^m V_m}{U A} \right) s \right\} - \left(\frac{U A}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A} \right) \right] T_m(s) \\ &= \left(\frac{\rho_o C_P^o F_i^*}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A} \right) T_i(s) + \left\{ \frac{\rho_o C_P^o (T_i^* - T_o^*)}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A} \right\} F_i(s) \end{aligned} \quad (\text{A.46})$$

ここで F_i は一定なので T_i のみに着目すると、次のようにあらわせる。

$$T_m(s) = \frac{\frac{\rho_o C_P^o F_i^*}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A}}{\left\{ 1 + \left(\frac{\rho_m C_P^m V_m}{U A} \right) s \right\} \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_o C_P^o V_o}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A} \right) s \right\} - \frac{U A}{\rho_o C_P^o F_i^* + U A}} T_i(s) \quad (\text{A.47})$$

ここでジャケットでの滞留時間 V_o/F_i は短く、 $UA \ll \rho_o C_p^o F_i^*$ と伝熱律速であるとするとき式 (A.47) は次のように近似できる。

$$T_m(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_m C_p^m V_m}{UA}\right) s} T_i(s) \quad (\text{A.48})$$

ジャケット冷却水入口温度モデルの導出

式 (6.16) より

$$T_i(s) = \frac{F_i^* - F_c^*}{F_i^*} T_o(s) + \frac{F_c^*}{F_i^*} T_c(s) + \frac{T_o^* - T_i^*}{F_i^*} F_i(s) + \frac{T_c^* - T_o^*}{F_i^*} F_c(s) \quad (\text{A.49})$$

ここでジャケット循環水量 F_i と追加水温度 T_c は一定であるとし、さらに $F_i^* \gg F_c^*$ とすると式 (A.49) は次のようにならわせる。

$$T_i(s) = T_o(s) + \frac{T_c^* - T_o^*}{F_i^*} F_c(s) \quad (\text{A.50})$$

A.7 ステップ応答テスト

ステップ応答テストはスレーブ・コントロールループ（ジャケット冷却水入口温度）、マスター・コントロールループ（反応温度）およびジャケット冷却水出口温度それぞれの持つ1次遅れ+むだ時間モデルのパラメータを求めるために行なう [75]。

モデルのパラメータは次の3つである。

1. ゲイン
2. 時定数
3. むだ時間

ステップ応答テストは、まずスレーブ・コントロールについて行ない、そこで求めたモデルパラメータを用いてスレーブ・コントロールをチューニングした後、マスター・コントロールのテストを行なう。

テストの前に反応機には水または反応完了品（製品）を入れておく。水よりも反応完了品のほうが反応液に近くパラメータの精度が高いように思われるが、水のほうが取扱いも簡単であり多くの場合は水で十分である。さらに、実際の反応中は初期滞留物に対して原料を追加装入しながら反応させるので滞留量が増加する。したがってテスト開始前にあらかじめ装入しておく液の量は、その量によって伝熱面積や除熱能力に違いがあるため一つの値で代表させるのが難しい。反応液の滞留量に応じてモデルのパラメータを変えることもできるが、反応中に滞留量の測定が必要で、制御ブロックに処理ルーチンを追加する必要もあり構造が複雑になる。さらに滞留量別にステップ応答テストを行なう必要もある。また冷却水温度は季節によって大きく変動し、最大で15度以上の差がある。したがってステップ応答テストによって同定したモデルのパラメータには、実プロセスとのミスマッチがつねに存在し、しかもその大きさが変動すると考えて、ステップ応答の手順はあまり複雑なものにしないほうがよい。以上よりステップ応答テストを行なう際の注意点は次のとおりである。

1. 反応機内に装入する液としては、水あるいは反応完了品（製品）を用いることができるが多くの場合水で十分よい結果が得られる。
2. 冷却水温度の季節変動が非常に大きいので、モデルミスマッチを平準化させるという意味でステップ応答テストは中間期に行なうとよい。なお冷却水温度がリアルタイムで収集されている場合は、その信号を制御に利用できる。
3. ステップ応答テストで求めたモデルにミスマッチは避けられずまたその絶対的な大きさも測定できないので、テストを何回か繰り返したうえで最終的にパラメータを決めるのがよい。

ステップ応答テストはまずスレーブ・コントロールに対して行ない、次にマスター・コントロールについて行なう。

1. あらかじめ決めた量の水を反応機に装入する。
2. 装入した水の温度およびジャケット入口冷却水温度をステップ応答テスト開始温度に整定させる。初めてのテストの場合はマニュアル (Manual) モードで、すでにモデルやコントローラにパラメータが設定されている場合はオート (Auto) モードで整定させる。この温度は外気温と反応温度の中間（外気温よりやや高め）にとり、中立点 (Neutral point) と呼ぶ。一般に中立点では外気へのヒートロスがあるためスチーム弁が少し開いた状態になる。ただし、スチーム弁と追加水の弁のいずれかに漏れがあると中立点は必ずしもこのようにはならない。モデル同定の観点からは2つの弁がどちらもほぼ全閉に近いことが望ましい。
3. スチームおよび追加水の調節弁の開閉によるステップ応答テストを開始する。まずスチームの制御ループのモードをマニュアル (Manual) にして、調節弁を全開 (100%開) にする。その状態を一定時間保った後（整定するまで）調節弁の開度を中立点に戻し、また一定時間待つ。この操作を調節弁の 100%から中立点の開度まで3ないし4分割した開度について繰り返す。ここで、調節弁の操作後一定に保つ時間は事前にシミュレータを用いて開度毎に推定する。その際、スチームの調節弁の各開度でジャケット入口温度がその制約の範囲内（例えば沸騰が起こらない範囲）でなるべく大きくなるように一定に保つ時間を決める。続いて制御ループのモードをマニュアル (Manual) のままにして、追加水の調節弁を全開 (100%開) にする。その状態を一定時間保った後（整定するまで）開度を中立点の開度に戻し、また一定時間待つ。この操作を追加水の調節弁の開度 100%開から中立点の開度まで3ないし4分割した開度について繰り返す。中立点ではジャケット入口温度を一定に保つために、スチーム弁がわずかに開いた状態であるが冷却側のテストではスチーム弁は全閉にする（スプリットレンジ方式と同条件でテストする）。またこのテストではスチーム弁の開度を中立点のものに戻してもスチームの量が少ないため、ジャケット冷却水入口温度は加熱側のテストに比べると低い温度で落ち着く。
4. 上のテストの結果をもとに、スレーブ・コントロールのモデルパラメータを求め、設定する（モデルは加熱側と冷却側の2つがあり、それぞれゲイン、時定数、むだ時間を設定する）。そしてスレーブ・コントロールをオート (Auto) にして設定値を操作することにより、コントローラの動作を確認する。必要に応じて冷却側、加熱側のそれぞれについてコントローラのチューニングパラメータ（閉ループ応答時間；TRBF）を調整して望ましい制御性能が得られるようにする。
5. 次に、マスター・コントロールのモデル同定を行なうために、ジャケット冷却水入口温度を変化させたステップ応答テストを行なう。まずスレーブ・コントロールのモードをオート (Auto) にする。テストの開始温度を決め、ジャケット冷却水入口温度と反応機内温度が一致するまで待つ（この温度は外気温と反応温度の中間で外気温よりやや高めにとる）。反応機内温度が開始点に一致したら、ジャケット冷却水入口温度の設定値を3ないし4段階に分けて上限値まで上げていく。設定値を変更したら、ジャケット冷却水入口温度と反応機内温度が設定値に一致するまで（整定するまで）待つ。

温度を上げる方向のテストが終わったら、続いて下げる方向のテストを行なう。設定値は上限値から開始点まで上げる方向のときと同じ値を用い、3ないし4段階にわたる。

上下両方向のステップ応答テストが終了したら、その間に収集したデータを用いてツールによってマスター・コントロールのモデル同定を行ない、求めたコントローラのパラメータを設定する。その後マスター・コントロールのモードをオート (Auto) にしてスレーブ・コントロールと同様にコントローラの制御性能を確認し、パラメータ (TRBF) をチューニングする。

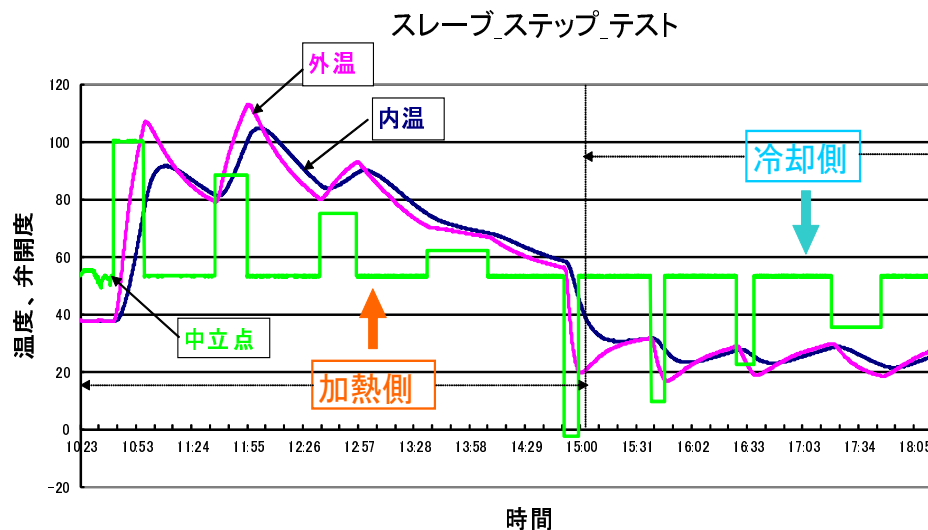


図 A.1: Step response test (Slave control)

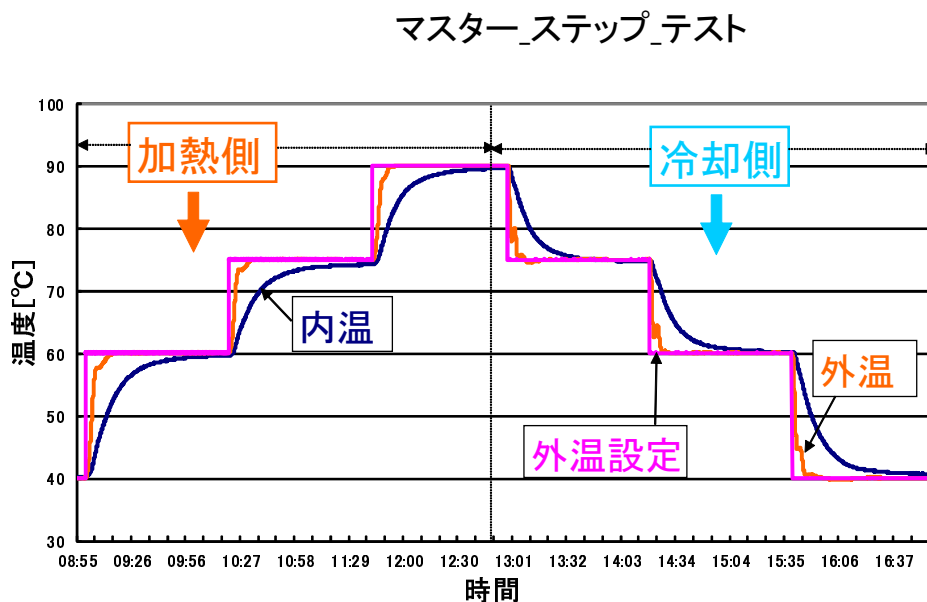


図 A.2: Step response test (Master control)

A.8 貯槽の移液データ収集

A.8.1 目的

バッチプラントにおいて貯槽からの払出し/受入れに関する実績データが自動収集されることは少なく、コンピュータに手で入力することが多い。このようなやり方では欠測や入力の間違いの発生が避けられない。そこで受入れ/払出しの操作を行なうと同時にデータも自動的に収集してそれを他のプロセスデータと整合性をとって保存する仕組みを作れば、欠測や入力の間違いの防止につながりデータ収集に関する省力化にもつながる。また受入れ/払出し操作がないにもかかわらずレベルの下降があったり、受入れ/払出しとレベル変化に不突き合いがあったりすると貯槽からの漏れのおそれがある。

A.8.2 自動収集の仕組み

バッチプラントにはDCSが導入されているので、その中で収集している貯槽の在庫レベルの値を用いて、レベルが上昇したら受入れ、下降したら払出しとして移液量を求めることができる。この移液量に識別のための受入れ/払出し操作時刻、払出し貯槽、受入れ貯槽、移液量、銘柄などの属性を付加してバッチ実績データとして保存する。データ収集はDCSのシーケンスプログラムで行なう。移液開始、終了のタイミングで貯槽のレベル変化を測定し、移液量を割り出す。移液の実績は1日分まとめて連続収集データとしてサーバPCに送る。

A.9 バッチデータトレース

A.9.1 データトレースの目的

バッチ反応機では1バッチの製品を生産するたびにバッチ番号を付けて、そのバッチの製品を識別している。しかし液体製品の場合には貯槽に受入れると異なるバッチの製品と混じり合う。同じ銘柄で、同じ製品規格ならば貯槽内で混じり合っても物性や品質が変化することはないが、万一品質に異常のある製品が混入すると他のバッチの製品に悪影響を与える。その影響を最小限に食い止め、また原因追及を迅速に行なうためには、各バッチの動きをトレースする仕組みが必要である [81]。

A.9.2 データトレースの原理

液体製品は一度混じり合うと元に戻すことはできないが、槽内のバッチ混合比で各バッチの影響の度合いを表現する。そのために反応機あるいは貯槽の受入れ/払出しに着目し、それぞれを時系列的なトランザクションとし、その情報を上流から下流へ継承する。この情報を保存し、下流から上流へとさかのぼれば、異常時の原因究明に有効である。

ここで次の2つの仮定をおく。

1. 容器内の液体は完全混合である。
2. 容器への受入れ/払出しの同時操作は行なわない。

A.9.3 シミュレーション

バッチデータトレースの有効性をシミュレーションで検討する。

例1) ある貯槽における受入れ/払出し後のバッチ混合比の変化

ある貯槽において受入れと払出しを繰り返したときに、バッチ混合比がどのように変化するかを知るためのシミュレーションを行なう。操作は表 A.9 に示すように行なうが、貯槽は最初空の状態である。ここで受入れはバッチ単位で昇順に付けたバッチ番号で識別し、払出しはロット単位で昇順に付けたロット番号で識別する。

表 A.9 のデータをもとに、貯槽内の滞留物とそれぞれのロットに含まれるバッチ混合比を求めると、表 A.10 のようになる。

表 A.10 はバッチ受入れ後の滞留物あるいは払出しロットにおいて、各バッチの製品がどれだけ含まれているかを示すものである（数値欄の () 内の数字はバッチ混合比%）。例えば L1 で品質異常が発生した場合、B1 あるいは B2 に原因のあるおそれがあり L2 以下のロットにも影響の及ぶおそれがある。また L5 で異常が発生した場合には、他の払出しロットで異常が起きていないならば

表 A.9: Input data for simulation

操作番号	種別	番号	数量[トン]
1	受入れ	B1	10
2	受入れ	B2	9
3	払出し	L1	5
4	受入れ	B3	10
5	払出し	L2	5
6	払出し	L3	6
7	払出し	L4	7
8	受入れ	B4	9
9	払出し	L5	7
10	受入れ	B5	11

網かけ部分■ は払出し操作

表 A.10: Batch mixture ratio after in/out operation

番号	受入れ/払出し[トン]	B1[トン](%)	B2[トン](%)	B3[トン](%)	B4[トン](%)	B5[トン](%)	滞留量[トン]
B1	10	10.0(100)					10.0
B2	9	10.0(52.6)	9.0(47.4)				19.0
L1	5	2.63(52.6)	2.37(47.4)				14.0
B3	10	7.37(30.7)	6.63(27.6)	10.0(41.7)			24.0
L2	5	1.53(30.7)	1.38(27.6)	2.09(41.7)			19.0
L3	6	1.84(30.7)	1.66(27.6)	2.50(41.7)			13.0
L4	7	2.15(30.7)	1.93(27.6)	2.92(41.7)			6.0
B4	9	1.85(12.3)	1.66(11.1)	2.49(16.6)	9.0(60.0)		15.0
L5	7	0.86(12.3)	0.78(11.1)	1.16(16.6)	4.20(60.0)		8.0
B5	11	0.99(5.2)	0.88(4.6)	1.33(7.0)	4.80(25.3)	11.0(57.9)	19.0

網かけ部分■ は払出し操作

B4に原因のあることがわかる。またバッチの受入れがあると貯槽内のバッチ混合比が変化することもわかる。

例2) 反応機と貯槽を2台ずつ交互に直列に結合した場合の受入れ/払出し

ここでは反応機と貯槽が複数組み合わせられた設備において、バッチ混合比がどのように変化するかを図で示す。バッチ/ロットの動きを次の図のようにあらわすことができる(図A.3参照)。

反応機1で生産された同一銘柄のバッチは順に貯槽に送られる。貯槽1にA1からA4までのバッチが混在するときに払出すと、それらのバッチの混合物が反応機2に送られる。そのとき貯槽1におけるバッチ混合比は既知なので、その属性を反応機2の情報として継承する。さらに反応機2で生産されたバッチは貯槽2に送られるが、その時点で反応機1に関するバッチ情報も継承しているのでそのトレースが可能である。すなわち貯槽2から払出す場合、そのロットには反応機1のバッチであるA系統と反応機2のバッチであるB系統それぞれのバッチ混合比を属性として付加することができる。貯槽2における反応機1のバッチと反応機2のバッチとの、混合比に関するデータのつながりを図A.4に示す。

図A.4に示すように、2つの仮定(槽内での完全混合と受入れ/払出しの同時操作禁止)をおくことによって、反応機1と反応機2のバッチ情報のトレースが可能である。このことは、反応機

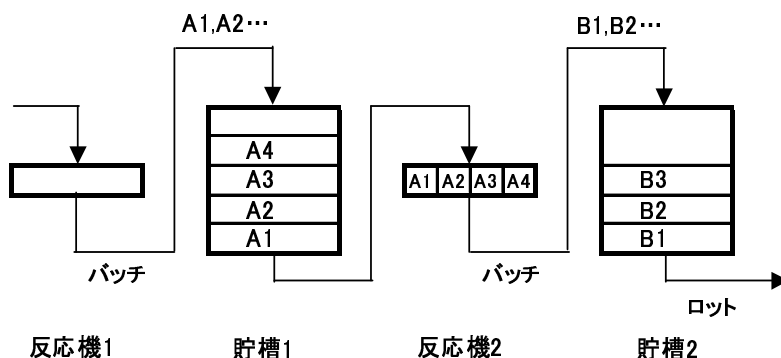


図 A.3: Movement of batch/lot between reactor/tank

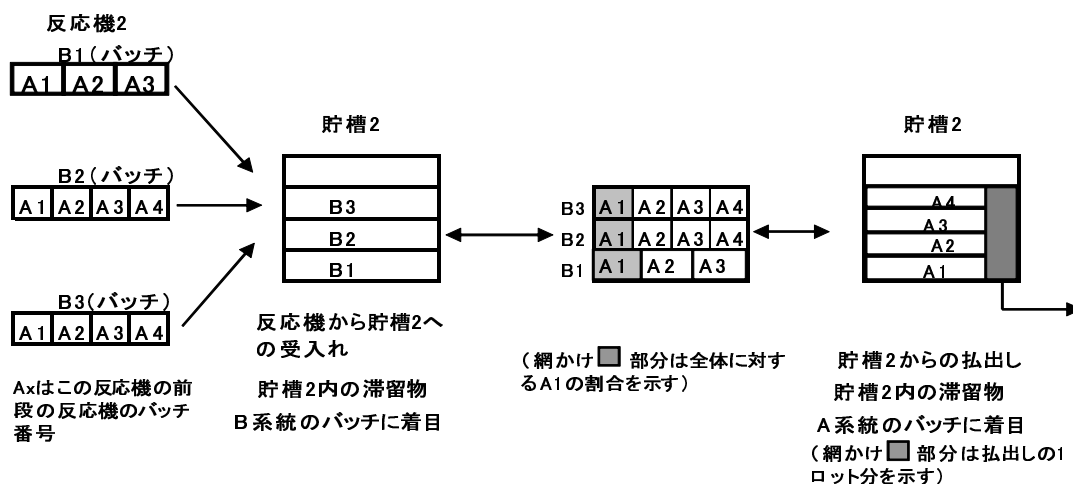


図 A.4: Batch mixture ratio in Tank 2

と貯槽がリサイクルなしにつながっていればなりたつ。

A.9.4 結論

このようにバッチ/ロットの受入れ/払出しに関する情報を収集して保存すれば、あるバッチあるいはロットに着目して工程の下流から上流へとトレースできる。すなわちあるロットで品質異常が発生したときに、バッチ混合比を用いて、その原因になりうるバッチを絞り込むことやその影響が及ぶ可能性のあるロットを示すことができる。さらに受入れ/払出しに関するデータの自動収集ができれば、より迅速なバッチデータのトレースが可能になる。

謝辞

本研究をすすめるにあたり、多くのご指導、ご鞭撻をいただき、発表論文の完成にお力添えをくださいました名古屋工業大学大学院社会工学専攻 越島一郎教授に心からお礼申し上げます。

また本論文の審査にあたり、副査の労をおとりくださいました名古屋工業大学大学院社会工学専攻 橋本芳宏教授、名古屋工業大学大学院社会工学専攻 荒川雅裕教授に深くお礼申し上げます。

本研究のテーマは筆者が勤務した三井化学株式会社（旧三井東圧株式会社）在職中にその発端があります。当時お世話になりました多くの皆様にもこの場を借りましてお礼申し上げます。

末筆ながら、本研究の完成に多大なご協力をいただきました名古屋工業大学越島研究室の皆様にもお礼申し上げます。どうもありがとうございました。