

地球温暖化が確実に迫ってくる現在、環境負荷低減と効率性向上の両立を実現できるグリーンサプライチェーンマネジメント (Green Supply Chain Management) が重視されている。本稿では、グリーン・サプライチェーンの実現を目指し、今まで取り組んでいる「SCMにおけるリユース率向上のための業者間の最適取引構築に関する研究」、「サプライヤーの生産工程の効率性向上のための多期間制約問題に関する研究」、と「サプライヤーの生産コンピテンシー向上のための人材育成プログラム開発に関する研究」について紹介する。

1 SCMにおけるリユース率向上のための業者間の最適取引構築に関する研究

現在、大量生産・大量消費社会から循環型社会への転換が必要とされている。自動車製造業者を中心とした関係者に適切な役割分担を義務づけることにより、使用済自動車のリサイクル・適正処理を図るため、平成17年から自動車リサイクル法が完全施行された。しかし、制定の意図でもある、自動車製造業者等における市場原理と適切な競争原理が働く仕組みの実現には、自動車製造業者を中心とした関係者の適切な役割分担問題、解体業者、部品リユース業者及び破砕業者を中心とする物流システムの最適構成問題が課題として取り上げられている。一方、経営の視点からのリバース・ロジスティクス問題に関わる研究では、統合サプライチェーンの物流シミュレーションモデルの構築 (村山ら, 2001)、クローズド・ループ・サプライ・チェーン内におけるベンダー在庫管理 (VMI) 問題の検討 (佐藤と開沼, 2009)、リバースサプライチェーンにおける戦略問題を定式化 (Kishoreら, 2007) 等がなされている。しかしこれらの研究では、リユース業者間の取引を含む物流システムの最適構成問題に関しては触れられていない。このため、筆者らはリユース部品の利用率の向上を目指し、リユース業者間の取引を含むリバース・ロジスティクスモデルを提案し、実施可能な物流構造とその条件を検討している (頼哈斯, 孫晶, 越島, 2010)。本研究では、上記の研究成果を踏まえ、Win-Winの視点から、リユース部品業者全体の利益を最大にする物流構造の最適解空間を導くことにより、自動車業界のリバースチェーンにおける需要変動に対する最適物流構造の変更方策を考察する (Jing Sunら, 2011)。

1.1 モデルの定式化

自動車リサイクルには製品レベル、リユース部品レベル、マテリアルリサイクルレベル、サーマルリサイクルレベルの4つがある。今後の自動車リサイクル率を上げるためには部品のリユースが不可欠であることから、リユース部品業者を中心として図1に示す物流モデルを作成した。図1ではリユース部品業者A社とB社を設定しF1～F8はこのモデルで取り扱う廃車 (AD, BD, ABD) の流れる量を示している。

図1の物流構造から以下のような定式化を行った。本定式化では、目的関数はA社とB社の利益最大を設定しており、制約条件としてA社並びにB社における需給バランスとしている。

目的関数：

$$Z = E[(C_3F_3 + C_4F_4) - \{[C_{AD}(1-\eta_A)F_1 + C_{ABD}\eta_A F_1] + C_8F_8 + C_JF_2\}] \\ + E[(C_7F_7 + C_8F_8) - \{[C_{BD}(1-\eta_B)F_5 + C_{ABD}\eta_B F_5] + C_4F_4 + C_JF_6\}] \\ \rightarrow MAX$$

制約条件：

A社の需給バランス

$$\begin{cases} \varepsilon_{A1}F_1 + \varepsilon_{A2}F_8 = F_3 \\ \gamma_A\eta_A F_1 \geq F_4 \\ (1-\varepsilon_{A1})(1-\eta_A)F_1 + (1-\varepsilon_{A1})\eta_A F_1 - F_4 + (1-\varepsilon_{A2})F_8 = F_2 \end{cases}$$

B社の需給バランス

$$\begin{cases} \varepsilon_{B1}F_5 + \varepsilon_{B2}F_4 = F_7 \\ \gamma_B\eta_B F_5 \geq F_8 \\ (1-\varepsilon_{B1})(1-\eta_B)F_5 + (1-\varepsilon_{B1})\eta_B F_5 - F_8 + (1-\varepsilon_{B1})F_4 = F_6 \end{cases}$$

1.2 モデルの解析

上述した定式は線形計画問題 (LP問題と略す) であり、定量的な解法としてシンプレックス法等で数値的に解くことも可能である。しかし数値解法では物流構造問題の本質的理解の助けになるとは言い難い。よって、LP問題の解析的解法 (越島ら, 1983) を利用する。

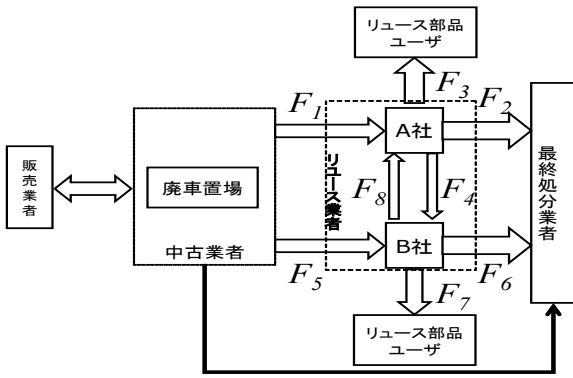


図 1.1 リユース部品業者間の物流モデル

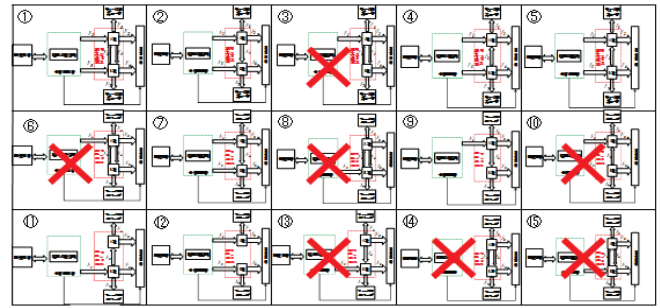


図1.2 実行可能な物流構造

本解法は、LP問題の基底解として任意の変数の組み合わせ（基底解セット）を指定し、その変数組が最適解であるための実行可能条件、最適条件並びに最適解を数式処理によって解析的に導出することを特徴としている。

本研究では、LP問題の解析的解法に従い、基底解セットにより物流構造（15通り）が得られるが、実行可能な物流構造は図2に示す8通りである。また、図3に、リユース部品業者間物流モデルの最適解空間構造を示す。図3を用いた意思決定方策例は次の通りである。

(I) 廃車が無償で入手できる場合：モデルセット⑩→①→⑨又は⑫から選ばれる。処分業者が解体品を無償で引き取る場合である。この業者間取引の無い構造は、現実のリユース部品業者が採用している構造であり、この構造を取り得るのは、行政による補助金があるためと理解できる。

(II) 廃車を有償で購入する場合：モデルセット⑤→①→②、⑤→④、⑦→②の三つの可能性がある。

以上、取り得る構造遷移に関して検討を重ね、図4に需要比率変化に対する最適構造変化を提示する。この図を利用することで、需要比率が変化した場合でも、業界全体の利益が最大となる最適構成を速やかに採ることが可能となる。

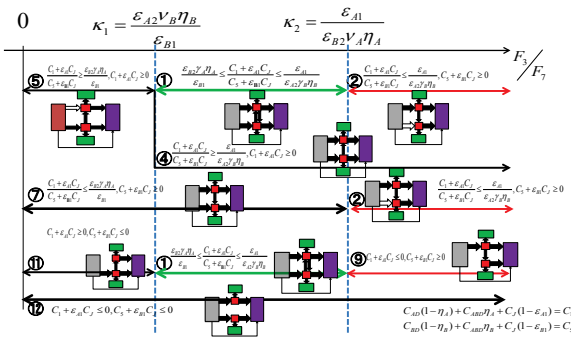


図1.3 最適解空間

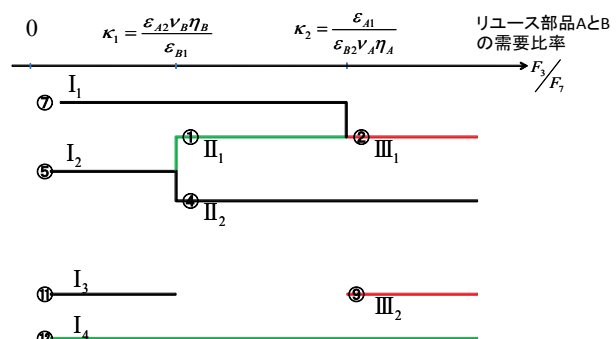


図1.4 最適構造システム

2 サプライヤーの生産工程の効率性向上のための多期間制約問題に関する研究

各期間（または（検査）工程、コンポーネントなど）において納期の制約が存在し、その状況が反復的（すなわち、サイクリック）に発生するモデルを多期間制約サイクルモデルと呼ぶ。そこで、多期間制約サイクルモデル共通に存在する問題として、評価基準（例えば、信頼度や期待リスク）の効率的な導出手順、各期間にどのように作業員や機械を配置すれば最適か（最適配置問題）が考えられる。本研究では、多期間制約サイクルモデル共通に存在する課題として、評価基準の効率的な導出手順、最適配置や最適切換問題に対する統一理論の構築及び統一的アプローチを提案し、多期間工程における加工効率の最適切換と作業員の最適配置の法則について、有益な知見を提供している(Yamamoto, Sun, Matsui, 2010)。以下は、最適切換問題の研究成果を紹介する(Sun, Yamamoto, Matsui, 2010)。

不確定下では、ある期間の成果や効率はその期間だけではなく、それ以前に発生したリスクに左右される状況は多く考えられる。通常、ある工程（期間）が納期（制約）を満足するかどうかは前工程（前の期間）の状態に依存する。

有限期間と納期制約問題に関する研究として、生産計画システムの要素およびその構築を解析したVerzij (1979)、ピリオドパッチ

コントロール (PBC) システムの原点からソリューションまでをレビューしたBenders (2002), MRP技法としての生産システムのリードタイムとロットサイズの設定に寄与したEnns (2001), 確率的なスケジューリング問題における遅れペナルティを最小化するダイナミックなプログラミングアルゴリズムを提案したWuとZhou (2008)などが挙げられる。

本研究では、このようにリスクが過去の状況に依存し、そして複数の期間にわたり反復的にリスクが発生する状況を想定し、その場合の期待リスク最小化について議論する。著者らは、この問題を、各期間において、例えば目標完了時点が存在する加工時間、すなわち制約された対象が存在し、それらが多期間にわたり反復的 (すなわち、サイクリック) に発生する問題と捉え、この種の問題を多期間制約サイクル問題と呼んでいる。

多期間制約サイクル問題は、上述した研究の他に、生産管理や品質管理における納期制約問題[7], ラインバランス問題や生産座席予約問題にも適用される。筆者らは、各工程において加工が遅れた場合にその影響が後工程に依存しない、または当該工程で人員増強等により後工程に影響させないと仮定している (本論文ではリセットモデルと呼ぶ)。しかし、各工程において加工が遅れた場合にその影響が後工程に直接影響があることも考えられる (本論文ではノンリセットモデルと呼ぶ)。

そこで、本論文では、加工が遅れた場合にその遅れを加工時間を早めることにより遅れを回復するというノンリセット多期間制約サイクルモデルを考える。そして、ある基準工程を考え、その工程の目標完了時点より、基準工程が遅れた場合に、加工時間を早める (ただし、そのために余分なコストが発生) ことにより遅れを取り戻す政策を取る場合において、期待コストが最小となる最適な基準工程について議論する。

2.1 問題と定式化

2.1.1 ノンリセット多期間制約サイクルモデル

本研究で考察するノンリセット多期間制約サイクルモデルの詳細を以下に述べる。

- (1) ある製品の生産ラインの工程数を n とする。そして、製品は工程1, 工程2, \dots , 工程 n の順で加工され、 n 工程で製品1個を加工する。これを1サイクルと呼ぶ。
- (2) $i=1,2,\dots,n$ に対して工程 i の加工時間を T_i (確率変数) とすると、 T_i ($i=1,2,\dots,n$) は互いに独立で、加工率 μ_1 の指数分布に従う。各工程はその前工程が完了するとすぐに開始される。すなわち、 $i=1,2,\dots,n$ に対して工程 i の完了時点は $\sum_{l=1}^i T_l$ で表される。
- (3) 各工程には、工程が完了すべき目標時点が存在する。 $i=1,2,\dots,n$ に対して工程 i の目標完了時点を U_i とする。そして U_n (工程 n の目標完了時点) を納期とする。ただし、 $U_n > U_{n-1} > \dots > U_1$ である。

発生するコストとして以下を考える。 $i=1,2,\dots,n$ に対して

- (4) 工程 i が目標完了時点 (U_i) 以内で実行されている場合には、単位時間当たり $C_s^{(1)}$ の費用が発生、
- (5) 工程 i が目標完了時点 (U_i) を超えて実行されている場合には、単位時間当たり $C_p^{(1)}$ の費用が発生する。
- (6) 納期 (U_n) を超えて工程 n が完了した場合、上記コストに加え納期遅れペナルティコスト C_p が発生する。逆に、
- (7) 納期 (U_n) より早く工程 n が完了した場合、上記コストに加え遊休ペナルティコスト C_s が発生する。

筆者らが考察したモデルでは、各工程はその該当時間で修正されると仮定しているが、上記モデルにおいては、前工程が遅れると後工程の開始が遅れることになる。このことが本論文で考察するモデルをノンリセットモデルと呼ぶ所以である。

次に、上記モデルにおいて、目標完了時点より工程が遅れることが考えられる。その対処方法として多くのことが考えられるが、本研究では、次の切替方策を行うことを考える。

切替方策：

ある工程 k (基準工程と呼ぶ) に注目し、その工程がその目標完了時点 (U_k) を超えて完了した場合には、工程 $k+1$ から加工率を上げる。

そして、切替後の加工率及び発生コストを以下とする。

- (8) 工程 i の加工時間 T_i ($i=1,2,\dots,n$) は互いに独立で、加工率 μ_2 の指数分布に従う。ただし $\mu_2 > \mu_1$ である。
 $i=k+1, k+2, \dots, n$ に対して
- (9) 工程 i が目標完了時点 (U_i) 以内で実行されている場合には、単位時間当たり $C_s^{(2)}$ の費用が発生、ただし $C_s^{(2)} > C_s^{(1)}$,
- (10) 工程 i が目標完了時点 (U_i) を超えて実行されている場合には、単位時間当たり $C_p^{(2)}$ の費用が発生する。ただし $C_p^{(2)} > C_p^{(1)}$ である。

ただし、上述したように、基準工程 k が目標完了時点 (U_k) を超えない場合には加工時間の加工率は μ_1 のままであり、コストも仮定(4), (5)に従う。

2.1.2 最適切替問題

上述のモデルにおいて、基準工程 k によって1サイクル当たりの期待コストが異なることになる。それで、1サイクル当たりの期待コストを最小となる基準工程 k はどれかという問題が存在する。すなわち、

$C(k; T_1, T_2, \dots, T_n)$: 基準工程 k が与えられた時の1サイクルの発生コスト (確率変数) とすると、

$$E[C(k^*; T_1, T_2, \dots, T_n)] = \min_k (E[C(k; T_1, T_2, \dots, T_n)])$$

を満足する k^* を求める問題となる。

本研究ではこの問題をノンリセット多期間制約サイクルモデルに対する最適切替問題と呼ぶことにする。

2.2 期待コスト算出

本章では、基準工程 k が与えられた時の1サイクル当たりの期待コストを求める。そのために、以下の記号を定義する。

記号定義：

$i=1, 2, \dots, n$ に対して、

S_i : 工程 i の加工時間のうち、ペナルティコスト ($C_p^{(j)}$ ($j=1, 2$)) が発生する加工時間 (確率変数)

$C(i)$: 工程 i で発生するコスト (確率変数) とする。

この時、1サイクル当たりの期待コスト $E[C(k; T_1, T_2, \dots, T_n)]$ は、

$$E[C(k; T_1, T_2, \dots, T_n)] = \sum_{i=1}^n E[C(i)] + C_p P_r \left\{ \sum_{i=1}^n T_i > nT \right\} + C_s P_r \left\{ \sum_{i=1}^n T_i \leq nT \right\} \quad (1)$$

で与えられる。

まず初めに(1)式の第1項 $\sum_{i=1}^n E[C(i)]$ を求める。いま、仮定より、 $i=1, 2, \dots, k$ に対して、

$$C(i) = C_p^{(1)} \cdot S_i + C_s^{(1)} \cdot (T_i - S_i) = (C_p^{(1)} - C_s^{(1)}) \cdot S_i + C_s^{(1)} \cdot T_i.$$

また、 $i=k+1, k+2, \dots, n$ に対して、

$$C(i) = \begin{cases} (C_p^{(1)} - C_s^{(1)}) \cdot S_i + C_s^{(1)} \cdot T_i & \sum_{i=1}^k T_i \leq kT \text{ の時 (切替なし)} \\ (C_p^{(2)} - C_s^{(2)}) \cdot S_i + C_s^{(2)} \cdot T_i & \sum_{i=1}^k T_i > kT \text{ の時 (切替あり)} \end{cases}$$

となる。

さらに、 $i=1, 2, \dots, k$ に対して、

$$E[C(i)] = E[(C_p^{(1)} - C_s^{(1)}) \cdot S_i + C_s^{(1)} \cdot T_i] = (C_p^{(1)} - C_s^{(1)}) E[S_i] + C_s^{(1)} E[T_i] = (C_p^{(1)} - C_s^{(1)}) E[S_i] + \frac{C_s^{(1)}}{\mu_1} \quad (2)$$

となる。

また、 $i=k+1, k+2, \dots, n$ に対して、

$$E[C(i)] = (C_p^{(1)} - C_s^{(1)}) E[S_i | \sum_{i=1}^k T_i \leq U_k] \cdot \Pr\{\sum_{i=1}^k T_i \leq U_k\} + (C_p^{(2)} - C_s^{(2)}) E[S_i | \sum_{i=1}^k T_i > U_k] \cdot \Pr\{\sum_{i=1}^k T_i > U_k\} + \frac{C_s^{(1)}}{\mu_1} \cdot \Pr\{\sum_{i=1}^k T_i \leq U_k\} + \frac{C_s^{(2)}}{\mu_2} \cdot \Pr\{\sum_{i=1}^k T_i > U_k\} \quad (3)$$

となる。

ここで、 $i=k+1, k+2, \dots, n$ に対して、

$$E[T_i | \sum_{i=1}^k T_i \leq U_k] = \frac{1}{\mu_1}, \quad E[T_i | \sum_{i=1}^k T_i > U_k] = \frac{1}{\mu_2}$$

である。さらに、 T_i ($i=1, 2, \dots, k$) は互いに独立で、加工率 μ_1 の指数分布に従うことより、

$$\Pr\{\sum_{i=1}^k T_i > U_k\} = \sum_{l=0}^{k-1} \frac{(\mu_1 U_k)^l}{l!} e^{-\mu_1 U_k}$$

$$\Pr\{\sum_{i=1}^k T_i \leq U_k\} = 1 - \Pr\{\sum_{i=1}^k T_i > U_k\} = 1 - \sum_{l=0}^{k-1} \frac{(\mu_1 U_k)^l}{l!} e^{-\mu_1 U_k} = \sum_{l=k}^{\infty} \frac{(\mu_1 U_k)^l}{l!} e^{-\mu_1 U_k}$$

であることから、総期待コスト $\sum_{i=1}^n E[C(i)]$ を求めるためには、 $i=1, 2, \dots, k$ に対して(2)式における $E[S_i]$

また、 $i = k+1, k+2, \dots, n$ に対して(3)式における $E[S_i | \sum_{i=1}^k T_i \leq U_k]$ と $E[S_i | \sum_{i=1}^k T_i > U_k]$ を求めればよいが、それらは次の補助定理で与えられる。

補助定理1

$i = 1, 2, \dots, k$ に対して、

$$E[S_i] = \frac{1}{\mu_1} \sum_{l=0}^{i-1} \frac{(\mu_1 U_i)^l}{l!} e^{-\mu_1 U_i}$$

である。

証明) 略。

補助定理2

$i = k+1, k+2, \dots, n$ に対して、

$$E[S_i | \sum_{i=1}^k T_i \leq U_k] = \frac{1}{\mu_1} \frac{\left(\sum_{l=k}^{i-1} \sum_{l_1=k}^l \frac{(\mu_1 U_k)^{l_1}}{l_1!} \frac{(\mu_1 (U_i - U_k))^{l-l_1}}{(l-l_1)!} \right) e^{-\mu_1 U_i}}{\sum_{l=k}^{\infty} \frac{(\mu_1 U_k)^l}{l!} e^{-\mu_1 U_k}}$$

である。

証明) 略。

補助定理3

$i = k+1, k+2, \dots, n$ に対して、

$$E[S_i | \sum_{i=1}^k T_i > U_k] = \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{1}{\sum_{l=0}^{k-1} \frac{(\mu_1 U_k)^l}{l!} e^{-\mu_1 U_k}} \left(\sum_{l=k}^{i-1} \int_{U_k}^{U_i} \frac{(\mu_1 x)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\mu_1 x} \cdot \frac{\{\mu_2 (U_i - x)\}^{l-k}}{(l-k)!} e^{-\mu_2 (U_i - x)} \cdot \mu_1 \cdot dx + \sum_{l=0}^{k-1} \frac{(\mu_1 U_i)^l}{l!} e^{-\mu_1 U_i} \right)$$

である。

証明) 略。

以上の補助定理より(1)式の第1項 $\sum_{i=1}^n E[C(i)]$ は以下のように表される。

定理1

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n E[C(i)] \\ &= \frac{k}{\mu_1} C_s^{(1)} + \frac{(n-k)}{\mu_1} \cdot C_s^{(1)} \cdot \left(1 - \sum_{l=0}^{k-1} \frac{(\mu_1 U_k)^l}{l!} e^{-\mu_1 U_k} \right) \\ &+ \frac{(n-k)}{\mu_2} \cdot C_s^{(2)} \cdot \sum_{l=0}^{k-1} \frac{(\mu_1 U_k)^l}{l!} e^{-\mu_1 U_k} + \frac{(C_p^{(1)} - C_s^{(1)})}{\mu_1} \\ &\left(\sum_{i=1}^k \sum_{l=0}^{i-1} \frac{(\mu_1 U_i)^l}{l!} e^{-\mu_1 U_i} + \sum_{i=k+1}^n e^{-\mu_1 U_i} \sum_{l=k}^{i-1} \sum_{l_1=k}^l \frac{(\mu_1 U_k)^{l_1}}{l_1!} \frac{(\mu_1 (U_i - U_k))^{l-l_1}}{(l-l_1)!} \right) + \frac{(C_p^{(2)} - C_s^{(2)})}{\mu_2} \\ &\left(\sum_{i=k+1}^n \sum_{l=k}^{i-1} \int_{U_k}^{U_i} \frac{(\mu_1 x)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\mu_1 x} \cdot \frac{\{\mu_2 (U_i - x)\}^{l-k}}{(l-k)!} e^{-\mu_2 (U_i - x)} \cdot \mu_1 dx + \sum_{i=k+1}^n \sum_{l=0}^{k-1} \frac{(\mu_1 U_i)^l}{l!} e^{-\mu_1 U_i} \right) \end{aligned}$$

定理2

1)

$$\begin{aligned}
 & P_r \left\{ \sum_{l=1}^n T_l > U_n \right\} \\
 &= e^{-\mu_1 U_n} \sum_{l_1=k}^{n-1} \sum_{l_2=0}^{n-l_1-1} \frac{(\mu_1 U_k)^{l_1} (\mu_1 (U_n - U_k))^{l_2}}{l_1! l_2!} \\
 &+ \frac{\mu_1^k e^{-\mu_2 U_n}}{(k-1)!} \sum_{l=0}^{n-k-1} \int_{U_k}^{U_n} \frac{(x_k)^{k-1} (\mu_2 (U_n - x_k))^l}{l!} e^{-(\mu_1 - \mu_2)x_k} dx_k \\
 &+ \sum_{l=0}^{k-1} \frac{(\mu_1 U_n)^l}{l!} e^{-\mu_1 U_n}
 \end{aligned}$$

2)

$$\begin{aligned}
 & P_r \left\{ \sum_{l=1}^n T_l \leq U_n \right\} \\
 &= e^{-\mu_1 U_n} \sum_{l_1=k}^{\infty} \sum_{l_2=\max(n-l_1, 0)}^{\infty} (\mu_1)^{l_1+l_2} \frac{U_k^{l_1} (U_n - U_k)^{l_2}}{l_1! l_2!} \\
 &+ \frac{\mu_1^k e^{-\mu_2 U_n}}{(k-1)!} \sum_{l=n-k}^{\infty} \int_{U_k}^{U_n} \frac{(x_k)^{k-1} (\mu_2 (U_n - x_k))^l}{l!} e^{-(\mu_1 - \mu_2)x_k} dx_k
 \end{aligned}$$

2.3 最適基準工程の考察

本章では、基準工程 k を与え1サイクル当たりの期待コストを3章で得られた式により求め、そして期待コストを最小にする最適な基準工程 (k^*) を算出、各パラメータと最適基準工程の関係について考察を行った。ただし、本章では目標完了時点を $i=1, 2, \dots, n$ に対して、 $U_i = iT$ とした。ここで、 T は各工程の目標完了時点の間隔時間である。なお、計算はMaple11を用いて行い、計算精度は小数点以下7桁を指定し、数値積分はNAGルーチンを使用した。また、使用した計算機のSpecはIntel (R) Core (TM) 2 Duo CPU 1.9 GHz, 2.00 GB RAMである。 $n=10$ の場合に最適な基準工程 (k^*) を求めるためには、基準工程 (k) を0から10まで動かしてそれぞれの k の時の期待コストを求める必要があるがその合計計算時間は532.6秒であった。

2.3.1 通常時の加工率 (μ_1) の変化に対する最適基準工程 (k^*)

本節では通常時の加工率 (μ_1) と最適基準工程 (k^*) の関係について考察する。通常時の加工率 (μ_1) を変化させた時の実験結果を表2.1に示す。 μ_1 以外の各パラメータは次のように設定した。 $C_s^{(1)} = 1, C_p^{(1)} = 2, C_s^{(2)} = 3, C_p^{(2)} = 6, \mu_2 = 0.6, T = 5, n = 10, C_s = 20, C_p = 200$ 。

表2.1 通常時の加工率 (μ_1) の変化に対する総期待コストと最適切換工程 ($C_s = 20, C_p = 200$)

基準工程 (k)	通常時の加工率 (μ_1)				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1	205.732	133.340	74.614	54.799	45.920
2	204.118	128.443	71.638	51.398	42.767
3	223.568	126.771	69.310	49.338	41.399
4	252.501	127.851	67.674	48.127	40.804
5	283.311	131.702	66.692	47.428	40.545
6	311.389	138.180	66.354	47.044	40.433
7	334.845	146.821	66.663	46.865	40.387
8	353.647	156.830	67.601	46.821	40.371
9	368.644	167.009	69.064	46.870	40.367
10	380.541	174.092	70.356	46.942	40.368

背景を黒にした箇所が最小の期待コストを表す。表1より $\mu_1 = 0.1$ のときに $k^* = 2$, $\mu_1 = 0.2$ のときに $k^* = 3$, $\mu_1 = 0.3$ のときに $k^* = 6$, $\mu_1 = 0.4$ のときに $k^* = 8$, $\mu_1 = 0.5$ のときに $k^* = 9$ であることがわかる。すなわち、通常時の加工率 (μ_1) が高くなる (緊急時の加工率 (μ_2) に近づく) に連れて k^* は最終工程 (n) に近づく結果となった。この結果は、通常時の加工率が低いときは早い段階で

切換えることで加工コストは高くなるが、納期に間に合う可能性が高くなり、通常時の加工率が高いときはその逆が成立するためと考えられる。

2.3.2 緊急時の加工率 (μ_2) の変化に対する最適基準工程 (k^*)

本節では緊急時の加工率 (μ_2) と最適基準工程 (k^*) の関係について考察する。緊急時の加工率 (μ_2) を変化させた時の実験結果を表2.2に示す。 μ_1 と μ_2 以外の各パラメータは表2.1と同じ値に設定し、 $\mu_1 = 0.2$ とした。また、 C_p 以外のパラメータは表2.2と同じ値とし $C_p = 110$ とした場合の実験結果を表2.3に示す。

表2.2 緊急時の加工率 (μ_2) の変化に対する総期待コストと最適切換工程 ($C_s = 20, C_p = 200$)

基準工程 (k)	緊急時の加工率 (μ_2)				
	0.3	0.4	0.5	0.8	1.0
1	177.874	152.347	140.433	124.839	119.807
2	177.871	149.745	136.224	119.513	114.375
3	177.411	149.305	135.010	117.574	112.446
4	177.128	150.694	136.348	118.379	113.183
5	177.049	153.608	140.056	122.197	116.960
6	177.071	157.676	145.815	129.204	124.160
7	177.035	162.443	153.097	139.160	134.739
8	176.748	167.373	161.163	151.320	148.036
9	175.998	171.824	169.022	164.327	162.647
10	174.092	174.092	174.092	174.092	174.092

表2.3 緊急時の加工率 (μ_2) の変化に対する総期待コストと最適切換工程 ($C_s = 20, C_p = 110$)

基準工程 (k)	緊急時の加工率 (μ_2)				
	0.3	0.4	0.5	0.8	1.0
1	150.256	129.210	118.281	103.020	98.012
2	150.635	128.445	116.805	101.122	96.105
3	149.247	127.781	116.182	100.778	95.979
4	147.433	127.706	116.624	101.766	97.204
5	145.469	128.235	118.147	104.241	99.957
6	143.404	129.242	120.631	108.293	104.423
7	141.198	130.523	123.819	113.800	110.569
8	138.771	131.816	127.350	120.389	118.070
9	136.066	132.847	130.770	127.415	126.244
10	132.879	132.879	132.879	132.879	132.879

表2.3では、 $\mu_2 = 0.3$ のときに $k^* = 10$ (切換なし)、 $\mu_2 = 0.4$ のときに $k^* = 4$ 、 $\mu_2 = 0.5, 0.8, 1.0$ のときに $k^* = 3$ となった。この理由として、 $\mu_2 = 0.3$ のときは切換えても加工率に大きな違いがないため、納期に間に合う確率が大きく変わることがなく、かつ、加工コストが高くなることから切換なし ($k^* = 10$) で作業することでコストが最小になったと考えられる。 $\mu_2 = 0.4, 0.5, \dots, 1.0$ のときは、切換えることで加工コストは高くなるが納期に間に合う確率が高くなることから早い段階で切換を行うことで全体のコストを減らすことができるためと考えられる。表3と比較した場合には、表2.2の場合の納期遅れコストが大きいために納期遅れを発生させないように表2.2では早めに切換えた方が良いことがわかる。しかし、その切り替え時期も緊急時の加工率が大きくなるにつれて一定となっている。これは、緊急時の加工率が大きくなると遊休の際に発生するコストの方が納期遅れで発生するコストに比べ大きくなり、遊休発生を抑制した方が全体としてコストが安くなるためと考えられる。

2.4 まとめ

本研究では、加工が遅れた場合にその遅れを加工時間を早めることにより遅れを回復するというノンリセット多期間制約サイクルモデルについて考察した。そして、ある基準工程を考え、その工程の目標完了時点より、基準工程が遅れた場合に加工時間を早めることにより遅れを取り戻すという切り替え方策を考え、

1) 加工時間が指数分布を仮定した場合の1サイクル当たりの期待コストの式を導出し、そして

2) 数値実験により、コストを最小にする最適な基準工程を求め、

- ・通常時の加工率(μ_1)及び緊急時の加工率(μ_2)と最適基準工程(k^*)の関係、また
- ・納期遅れコスト(C_p)及び遊休コスト(C_s)と最適基準工程(k^*)の関係

を主に調査した。特に2)については、それらの関係を定量的に評価できたと考える。

今後の課題として、加工時間が指数分布以外の1サイクル当たりの期待コスト式の導出および、コストと最適基準工程の関係調査、さらに他の切替方策の下でのノンリセット多期間制約サイクルモデルの考察が挙げられる。

3 サプライヤーの生産コンピテンシー向上ための人材育成プログラム開発に関する研究

グローバル生産における情報可視化とスピード経営の実現に対して、激しい市場変動への迅速な対応を可能とする柔軟性・拡張性・豊富なモジュールを持つERP(Enterprise Resource Planning)システムの導入が、企業の業務効率向上にはますます重要になっている。しかしながら、ERP導入により、業績アップと顧客満足度向上を達成した数多くのケースがある一方、失敗したケースも少なくない。失敗する理由は様々だが、経営戦略上の武器としてERPシステムを導入したが生産現場で上手く使いこなせていないことが原因の1つとして挙げられる。一方、近年、経営工学分野における大学教育においても、実務管理に直結した実践的な複数業務の連携に関する知識と技術の習得が要求されている。しかしながら、学部教育では、個別の専門知識と技術の習得は可能であるものの、個別に学習した技術を連携して体験する場の用意が不十分である。このため、即戦力が求められる時代にあつて、実践的な経営管理教育プログラムの開発が益々重要になっている。

孫ら(2010)では、より実践的なERP教材とカリキュラムを開発するため、定期的な研究会(「事業創造戦略プロフェッショナル研究部会(TF21)」)での情報交換、および2007年度からの授業試行の結果に基づいて、ERP実践型人材のコンピテンシディクショナリを提案し、ERP実践コンピテンシー策定のための教育システムを開発した。具体的には、まず、ERP実践型人材のコンピテンシー構築を提案し、さらに需給マネジメント、製番管理、MRP、在庫管理、マスタデータ管理およびスケジューリング技法などの実践的な生産管理の知識を身につけるための教材構成の仕組みを開発した。そこで、実企業で実際に活用されている生産管理に特化したERPシステムを用いて実際に仮想企業の業務を行なうことで、実践的な生産管理の知識を身につける事を目的とした授業試行をし、さらに、課題とアンケートおよび専門家レビューによる評価を行い、提案した教材デザインの有効性を確認した。

3.1 業務改革プロジェクトのためのERP教育プログラムの開発

3.1.1 ERP導入による業務改革のプロジェクトマネジメント

標準プロジェクトモデルに基づくP2Mフレームワークとして、プログラムは、スキーム、システム、サービスの3S (Scheme, System, Service) から構成される。図1に示すように、ERP導入による業務改革プロジェクトにおいては、プロジェクトの計画や人材育成を含むスキーム型プロジェクト、業務プロセスやIT支援などの仕組みを作り上げるシステム型プロジェクト、仕組みの運用により戦略の実現を行うサービス型プロジェクトから構成されている。本研究のERP教育プログラムの開発は図1のP2Mフレームワークでのスキーム型プロジェクトに相当する。

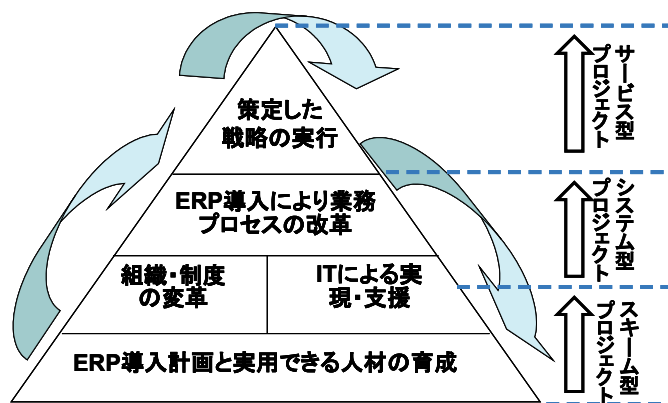


図3.1 ERP導入による業務改革プロジェクトにおける3Sモデル

ERPシステムは、企業の基幹業務を構成する各部門業務(例えば、販売管理、財務管理、人事管理、生産管理など)に対応した、サブモジュールの情報システムとしてパッケージ化されている。そこで、ERPシステムは、個々の部門業務プロセスの処理に対応した、情報システムを構築・運営管理するため、それぞれのプロジェクトをマネジメントする役割を果たしている。一方、市場のグローバル化、需要の多様化、及び市場変化の高速化への対応として、全社最適の観点からのビジネスプロセス(業務)改革が当然のこととして要求されている。

表 3.1 ERP 実践型人材のコンピテンシディクショナリ

プロセス分類	コンピテンシ分類	コンピテンシ内容	認知レベル
ビジネスプロセス	会社のビジネスシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 会社組織および企業間取引の概要を説明できる 業務フローおよびハイブリッド生産方式の業務プロセスの概要を説明できる 	知識 知識
需要&販売管理プロセス	販売管理	<ul style="list-style-type: none"> 購買処理, 受注オーダーや出荷指示書作成, 出荷確認, 伝票照合などの業務の概要を説明できる 	応用
	需要予測	<ul style="list-style-type: none"> 需給マネジメントの体系および需給データの収集方法の概要を説明できる 需要予測法の分類および指数平滑法の概要を説明できる 指数平滑法を用いて需要予測を行うことができる 	知識 知識 応用
生産管理プロセス	生産総合計画	<ul style="list-style-type: none"> 生産計画の基本的な立案方法を説明できる 見込み生産方式, 受注生産方式, ハイブリッド生産方式の概要を説明できる 	知識 知識
	工程能力管理	<ul style="list-style-type: none"> 仕事量(負荷工数), 作業生産能力, 機械生産能力を算出できる 負荷工数と生産能力との調整と対策を提案できる 	知識 応用
	生産スケジューリング	<ul style="list-style-type: none"> スケジューリングの概要, 目的, 基本構造を説明できる 山積みスケジューリングを作成できる 	知識 知識
	製番管理	<ul style="list-style-type: none"> 製番管理の特徴および仕組みの概要を説明できる 	知識
	MRP(資材所要量計画)&在庫管理	<ul style="list-style-type: none"> MRPシステムの概要およびBOM展開を説明できる MPS(基準生産計画)の計算手順, 資材所要量計算の手順およびロットサイジングルールを説明できる 定量発注方式, 定期発注方式, ABC管理および経済発注量について説明できる 	知識 応用 知識
情報プロセス	マスタ管理	<ul style="list-style-type: none"> マスタ分類および機能の概要を説明できる 	知識
	データフロー管理	<ul style="list-style-type: none"> 見込み生産方式, 受注生産方式およびハイブリッド生産方式のデータフローを説明できる 情報プロセスとマスタデータの関係および対応を説明できる 	知識 知識
物流プロセス	SCM	<ul style="list-style-type: none"> サプライチェーンマネジメントの概要および体系の概要を説明できる 	知識
環境プロセス	環境経営マネジメント	<ul style="list-style-type: none"> 生産・物流・販売などの業務プロセスに対応させて環境経営マネジメントの概要を説明できる 	知識

この背景の中、ここ10年程、全社効率化のための業務改革BPR(Business Process Re-engineering)の実現を目的としてERPの導入を積極的に行う企業が少なくない。しかしながら、導入したERPシステムを業務改革に結び付けられないケースがよく見られる。そこで、ERP実践型人材育成が挙げられたことは、1つの原因として挙げられる。業務改革の当初の期待効果を達成するためには、ERP導入に合わせ、図1に示すように、策定した戦略の実行/業務プロセス/組織・制度/ITを整合させることが重要である。さらに、これまでの仕事のやり方を180度変えても成果をあげるとの企業全体の覚悟と、そのためのERP実践型人材育成や現場モチベーションをアップさせる推進体制も重要といえる。

一方、近年では、BSC(Balanced Score Card)で代表されるように、企業全体の業績評価として、財務の視点、顧客の視点、財務目標の達成や顧客満足度の向上のための社内ビジネスプロセス視点の他、従業員能力向上のための学習と成長視点が重視されている。すなわち、ERP導入による業務改革を成功に導くには、現場従業員のERPトレーニングプログラムが、キーポイントの一つといえる。

本教育プログラムでは、より実践的なERP教材とカリキュラムを開発するため、パートナー企業への訪問調査、定期的な研究会での情報交換、および2007年度からの授業試行の結果に基づいて、表3.1に示すERP実践型人材のコンピテンシディクショナリを提案し、ERP実践コンピテンシ策定のための教育システムを開発した。

提案した教育システムを検証するため、青山学院大学大学院社会情報学部研究科ヒューマンイノベーションコースの正規授業(1回180分、全8回)に適用し、試行を行った。この授業では、実企業で実際に活用されている生産管理に特化したERPシステムを用いて実際に仮想企業の業務を行なうことで、実践的な生産管理の知識を身につける事を目的とした授業を実施した。授業の前半(1-4回目)では、仮想企業「eLPCO自動車会社」の会社概要や製番管理、MRP(資材所要量計画)や在庫管理などの生産管理の基礎知識やERPシステムの歴史、概要、機能など

について学ぶ。後半(5-8回目)では、eLPCO自動車会社の年間車種別生産計画に基づいたデータフローおよび生産計画と在庫管理の仕組みについて学ぶ。最後にNTTデータシステムズの生産管理に特化したERPシステムである「SCAW生産管理システム」で実際にeLPCO自動車会社の生産管理を行い、仮想企業の業務フローとSCAW生産管理システムの操作フローを対応づけることで、実践的な生産管理の知識を身につける。詳細な授業内容を下記に説明する。

3.1.2 仮想企業におけるハイブリッド生産方式

ERPシステムは、膨大な量の情報を一元的に管理、活用できることに特徴があり、たとえば、数百、数千点にも及ぶ部品情報をERPシステムで一元的に管理し、在庫、調達、会計など企業組織を横断した業務に活用できる。しかしながら、授業ERPを取り上げる際には、その膨大な情報量と業務を横断する複雑な機能構成が、学習者の混乱を招く原因となることも考えられる。

したがって、ERPシステムを導入するにあたり、複雑なビジネスの様子をわかりやすく抽出した仮想ビジネスモデルが必要となる。本研究では、学習者に現実の企業における業務プロセスの理解を助けるため、部品点数の比較的小さい玩具の自動車(チョコQ)を製造、販売する簡略化したeLPCO自動車会社の仮想ビジネスモデルを策定した。

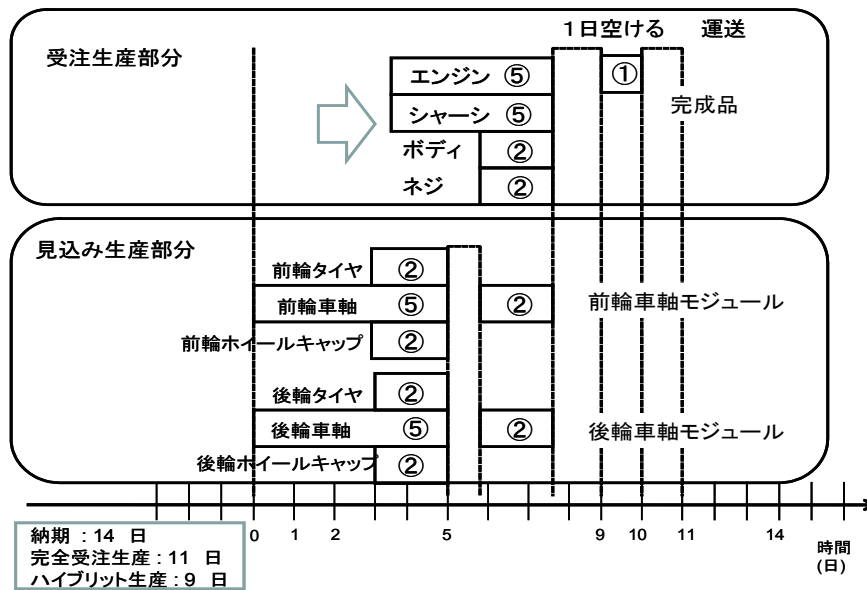


図 3.2 ハイブリッド生産システム (eLPCO自動車会社) の調達スケジュール

eLPCO自動車会社ではハイブリッド生産方式を用いて6車種(モデルはGZL(001, 002), CSW(001, 002), EMU, PEC)に絞った自動車の生産・販売を行うこととした。これにより、的確な納期管理が行えるだけでなく、必要最小限の在庫で生産を行うことが可能になる。すなわち、自動車を構成する部品のうち、他の部品と比べ車軸モジュールの部品調達リードタイムが長いので、車軸モジュールを見込生産で行い、それ以外の部品に関しては受注生産で行う。

図3.2は6車種の中の1つであるGZL001の品目構成を表している。このようにeLPCO自動車会社で販売する製品は、シャーシ、エンジン、前輪モジュール(前輪車軸、前輪タイヤ、前輪ホイールキャップ)、後輪モジュール(後車軸、後輪タイヤ、後輪ホイールキャップ)、ボディ、ねじなどの部品から構成される。そのうち、前後輪車軸、ねじについては6車種共通の部品とし、他の部品は6車種で個別の部品とする。

ハイブリッド生産方式とは、製品の組立てに主要なユニット部品をあらかじめ見込みで生産および在庫しておき、製品の注文(Order)を受けてからその他の部品を調達し、最終製品を組み立てる生産方式であり、顧客の多様なニーズに適合した多品種少量生産方式の一形態である。多くの製造業企業がハイブリッド生産に挑戦しており、消費者の多様なニーズに柔軟に対応して売上げを伸ばすために適合した生産方式として、注目されている。

eLPCO自動車会社では、車種ごとにそれぞれの車軸モジュール(前輪および後輪)を需要予測に基づいて見込み生産により在庫をしておく。そして、車種ごとの注文を受けてから、車軸モジュールを在庫から引き当て、それぞれのユニット部品を調達して各車種に対応した全ユニット部品を組み立て、完成車を生産する。

3.1.3 マスタデータと情報プロセス

マスタデータとは企業のあらゆる取引活動の基本的なデータ群のことであり、企業が重大な経営判断や継続的な運営を行う際の基盤となるマスタデータを最新の状態で正確に維持・管理することが必要となる。

本研究では、eLPCO自動車会社のSCAW操作の一連の流れ、ビジネスシナリオ、マスタデータの3つの因果関係を学習者に理解させるため、第7, 8回目の授業において表 1のような教材カリキュラムを提案した。

本節では、ERPシステムのオペレーションを学習するために開発した教材について説明する。開発した教材は、以下のように構成となっている。

(1) 教材1: eLPCO自動車会社のDFD(Data Flow Diagram)

ビジネスシナリオの業務プロセスとSCAW操作の全体像について解説する教材であり、以下のような特徴をもつ。

- 他の教材を学習するときにも全体像が把握できるよう1枚に図示した。
- 画面ごとに番号を割り振り、どの教材の何ページと対応しているかを明記した。

(2) 教材2: ビジネスシナリオとSCAW操作の関係

eLPCO自動車会社のビジネスシナリオの業務プロセスにSCAW操作画面を対応させ、SCAW画面の操作の流れを解説した。

(3) 教材3: SCAW画面の操作とマスターデータの関係(図3.3参照)

- SCAW操作画面のフローチャートを作成し、そのチャート図に対してマスターデータの解説を加えた。
- MRP展開や製番登録などの重要な操作については実際のSCAW画面を掲示しながら解説した。

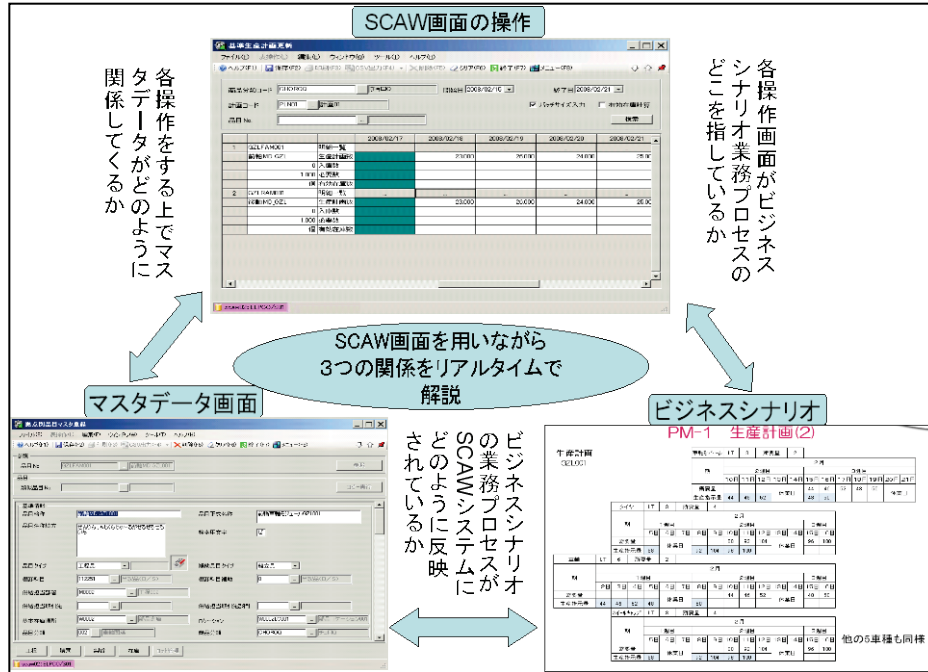


図3.3 3つのSCAWの導入プロジェクトマネジメントの関係

3.1.4 スケジューラの活用

現在の多品種少量生産に対して、基準生産計画(MPS)に納期やコストの制約を課した場合には、スケジューラを併用することでより高精度な生産計画が立案可能となる。本研究では、企業における生産管理で実績のあるスケジューラASPROVA (<http://www.asprova.jp/>)を使用した。すなわち、スケジューラを併用して、生産ロットサイズ、品目数と品目別生産比率、段取り替え時間を含めた工程条件などを考慮した詳細な生産条件の下で、MPS出力した総合計画の実行可能性を検証する。さらに、演習では生産の効率化を考慮して、スケジューラを用いて総合計画の修正を行う。たとえば、残業時間の短縮、生産ロットサイズの変更による生産の効率化をスケジューラにより検討する。スケジューラを活用することで、納期に遅延が生じた場合にロットサイズなどのパラメータを変更することによって、6車種全てに納期の遅延が波及しないスケジュールの作成を検討する。

3.2 開発した教材の評価

本研究では、授業における学習目標を、ERPシステム導入の中核であるビジネスシナリオ、ハイブリッド生産方式、マスターデータと情報プロセスの関係、SCAWのオペレーションを理解することとした。この学習目標の達成度評価は、各授業の最後に実施したアンケートと専門家レビューにより行った。

3.2.1 アンケート及び課題結果による評価

青山学院大学授業のアンケート結果は以下になる。

(1) ビジネスモデルとハイブリッド生産方式について

- 教材内容の理解度に関しては、満点4.00に対して、ビジネスシナリオ教材の理解度平均は3.57、ハイブリッド生産方式教材理解度の平均は3.14であり、どちらも理解度は高かった。一方、ハイブリッド生産業務プロセスの教材の理解度平均は2.00で、多くの学生が難しいと感じてお

り、講義資料の改善が求められた。

- ・課題の難易度に関しては、満点4.00に対して、難易度平均は2.57で、学生による評価がバラついた。

(2) マスタデータと情報プロセスの関係&SCAWオペレーションについて

- ・教材内容の理解度に関しては、SCAWの流れとビジネスフローの関係の教材理解度平均が3.25、SCAW操作とマスタデータの関係の教材理解度の平均が3.5であり、この結果から、本単元への理解度が高いことがわかった。
- ・課題の難易度に関しては、満点4.00に対して、難易度平均は3.25だが、学生から授業で考察する時間が少なく、理解不足という意見が挙げられた。

ここで、自由記述の中代表的な意見として、実際に動いているシステムを見たい、操作したいということが挙げられた。これにより、受講者がSCAWの操作に関心を持ってくれたことと、SCAWシステムを受講者に実際に操作させる環境を整える事ができれば、授業の理解度はより増す可能性があると考えられる。

また、本授業においては、課題結果による評価も行った。今回、授業に参加した大学院生の課題問題の正解率は平均94点だった。この結果から、理解度について高い学習効果を確認できたと考える。

3.2.2 専門家(NTTDSとオラクル)による評価

NTTDSとオラクルの専門家の方に実際に作成した教材のレビューを依頼し、次のコメントを頂いた。

- ・大学の中だけでなく企業の中においてもERPシステムの導入プロジェクトマネジメントおよびオペレーションに関する教育には大きなニーズがあり、今後もこの研究をプロジェクトで進めていってほしい。
- ・ERPの操作画面をビジネスシナリオと対応させながら解説するスタイルは非常にわかりやすく評価できる。
- ・次のステップとして、ビジネスソリューションを学べる授業の設計、開発を目指していただきたい。

上記のサーバーやデータベース性能などの原因で、受講者が操作できる環境を整えることが出来ず、受講者からは実際のERPシステムを体験したいとの希望が多く出されていた。そのため、2010年から、名古屋工業大学は、ERPとCRMの機能を総合的に含み、ビジネス情報の流れが理解しやすく、またオープンソースで日本語のマニュアルがあるため操作方法も交えて教えやすいCompiereを採用し、今までの研究成果を踏まえ、ERP実践力育成のための演習を開発している(Jing Sunら, 2011)。

参考文献

- Verzija, J. J.: *Production Planning and Information Systems*, Macmillan, London, 1976.
- 越島一郎, 西尾雅年, 城子克夫, 梅田富雄, プロセスシステムの最適設計余裕に関する基本的考察, 化学工学論文集, 1983, Vol9, No.2, pp.192-20.
- 村山長, 畠中伸也, 金子正明, 鳴龍則彦, 大場史憲, リバース・ロジスティクスを含むサプライチェーンのシミュレーションによる評価, 機械工学会 第11回設計工学・システム部門講演会講演論文, 2001, 259-262.
- Enns, S. T.: MRP Performance Effects Due to Lot Size and Planned Lead Time Settings, *Int. J. Prod. Res.*, 2001, 39, 461-480.
- Benders, J.: "The Origin of Period Batch Control (PBC)", *Int. J. Prod. Res.*, 2002, 40, 1-6.
- Kishore K. Pochampally, Surendra M. Gupta, Approaches for strategic planning of a reverse supply chain, オフィス・オートメーション, 日本情報経営学会, 2007, 27 (4), 75-82.
- Wu, X. and Zhou X.: Stochastic Scheduling to Minimize the Expected Maximum Lateness, *Eur. J. Oper. Res.*, 2008, 190, 103-115.
- 佐藤淳嵩, 開沼泰隆, クローズド・ループ・サプライ・チェーンにおけるVMIの有効性の検討, 日本情報経営学会誌, 2009, 29 (4), 84-92.
- Yamamoto, H., Sun, J., Matsui, M.: "A Study on Limited-Cycle Scheduling Problem with Multiple Periods", *Computers & Industrial Engineering*, 2010, 59 (4), 675-681.
- Sun, J., Yamamoto, H., Matsui, M.: "A Study of Optimal Switching Problem in Limited-Cycle with Multiple Periods", *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 2010, 11 (12), 933-937.
- 山本 久志, 孫 晶, 松井 正之: "ノンリセット多期間制約サイクルモデルにおける最適切替問題に関する研究~基準工程により加工率を切替える場合~", 日本経営工学会論文誌, 2010, 61 (4), 234-243.
- 頼哈斯, 孫晶, 越島一郎, 「リバース・ロジスティクスにおける業者間物流構築の基礎研究」, 平成22年度日本経営工学会秋季研究大会予稿集, 2010, 40-41.
- 孫晶, 玉木欽也, 笥宗徳, 渡辺一衛, 石井信明, 松井正之, 越島一郎 "業務改革プロジェクトのためのERP教育プログラムの開発", 国際プロジェクト・プログラムマネジメント学会誌, 2011, 6 (1), 63-74.
- Jing Sun, Ichiro Koshijima, Yoshihiro Hashimoto, Hasu Lai: "Trade Construction Problem in Supply Chain of Auto-Industry for Reuse Rate Improvement", *Proceeding of 21st International Conference on Production Research*, 2011.
- Jing Sun, XiaoDong Liang, Ichiro Koshijima, Yoshihiro Hashimoto, Kinnya Tamaki: "A Design of Practicing Education System with ERP", *Proceeding of The Twelfth Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference*, 2011.