

静 的 メ タ ル シ ー ル の 基 本 特 性
に 関 す る 研 究

1 9 9 3

松 崎 良 男

目 次

| | |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 緒論 | 1 |
| 1.1 静的メタルシールの現状およびその分類 | 1 |
| 1.2 従来の研究とその問題点 | 3 |
| 1.3 シールの基本特性の定義 | 5 |
| 1.4 シールの基本特性と表面粗さの関係 | 6 |
| 1.5 本研究の目的 | 6 |
| 1.6 本研究の概要 | 8 |
| 主な使用記号 | 11 |
| 第 2 章 実験装置および漏れ量測定方法 | 13 |
| 2.1 緒言 | 13 |
| 2.2 実験装置および実験方法 | 13 |
| 2.3 ガスクロマトグラフによる漏れ量測定方法 | 16 |
| 2.3.1 微小漏れ量に対する各種測定方法の比較 | 16 |
| 2.3.2 ガスクロマトグラフによる漏れ量の測定原理 | 18 |
| 2.4 漏れ量換算式 | 20 |
| 2.5 漏れ測定量の検定 | 22 |
| 2.6 結言 | 25 |
| 第 3 章 シールの基本特性 (1) | |
| － 金属平面同士の場合 － | 27 |
| 3.1 緒言 | 27 |
| 3.2 実験装置および実験方法 | 27 |
| 3.3 実験材料 | 28 |
| 3.4 シールの基本特性およびその考察 | 30 |
| 3.4.1 シーリング特性 | 30 |
| 3.4.2 設定接触圧力および設定押し付け力の定義 | 35 |

| | | |
|-------|--------------------------|----|
| 3.4.3 | 設定接触圧力について | 36 |
| 3.5 | 結言 | 37 |
| | | |
| 第4章 | シールの基本特性(2) | |
| | －金属ガスケットの場合－ | 39 |
| 4.1 | 緒言 | 39 |
| 4.2 | 実験装置および実験材料 | 39 |
| 4.2.1 | 実験装置 | 39 |
| 4.2.2 | 実験材料 | 39 |
| 4.3 | シールの基本特性およびその考察 | 43 |
| 4.3.1 | 金属ガスケットのシーリング特性 | 43 |
| 4.3.2 | 設定押し付け力について | 48 |
| 4.3.3 | 設定接触圧力について | 49 |
| 4.4 | 結言 | 51 |
| | | |
| 第5章 | シールの基本特性(3) | |
| | －硬いくさび形突起と軟らかい平面の組み合わせ－ | 53 |
| 5.1 | 緒言 | 53 |
| 5.2 | 実験材料および実験方法 | 53 |
| 5.3 | シールの基本特性およびその考察 | 56 |
| 5.3.1 | シーリング特性 | 56 |
| 5.3.2 | 設定押し付け力について | 62 |
| 5.3.3 | 設定接触圧力について | 65 |
| 5.4 | 結言 | 69 |
| | | |
| 第6章 | ナイフエッジシールの基本特性 | 71 |
| 6.1 | 緒言 | 71 |
| 6.2 | ナイフエッジ稜線部の幅に関するシーリング特性実験 | 71 |
| 6.2.1 | 実験材料および実験方法 | 71 |
| 6.2.2 | シールの基本特性およびその考察 | 73 |

| | | |
|---------|-----------------|----|
| 6.2.2.1 | 設定押し付け力について | 74 |
| 6.2.2.2 | 設定接触圧力について | 76 |
| 6.3 | 硬い材料のナイフエッジの場合 | 79 |
| 6.3.1 | 実験材料および実験方法 | 79 |
| 6.3.2 | シールの基本特性およびその考察 | 81 |
| 6.3.2.1 | 設定押し付け力について | 81 |
| 6.3.2.2 | 設定接触圧力について | 87 |
| 6.4 | 結言 | 87 |

第7章 接線力が作用するシールの基本特性（1）

| | | |
|---------|-------------------|-----|
| | －環状くさび形ガスケットの場合－ | 89 |
| 7.1 | 緒言 | 89 |
| 7.2 | 表面粗さと環状くさびモデルとの関係 | 89 |
| 7.3 | 実験装置および実験材料 | 90 |
| 7.3.1 | 実験装置 | 90 |
| 7.3.2 | 実験材料 | 91 |
| 7.4 | シールの基本特性およびその考察 | 92 |
| 7.4.1 | シーリング特性 | 92 |
| 7.4.2 | くさび表面の粗さ突起の影響 | 93 |
| 7.4.3 | くさびの接触幅について | 95 |
| 7.4.3.1 | 変形量の計算 | 95 |
| 7.4.3.2 | 変形量の実測 | 98 |
| 7.4.3.3 | 計算および実測結果 | 99 |
| 7.4.4 | 設定押し付け力について | 101 |
| 7.5 | 結言 | 102 |

第8章 接線力が作用するシールの基本特性（2）

| | | |
|-----|--------------------|-----|
| | －円すい内側密封面の場合－ | 103 |
| 8.1 | 緒言 | 103 |
| 8.2 | 密封面の表面粗さに及ぼす接線力の影響 | 103 |

| | | |
|---------|--------------------------|-----|
| 8.3 | 設定押し付け力の計算 | 104 |
| 8.4 | 実験材料および実験方法 | 107 |
| 8.5 | シールの基本特性およびその考察 | 109 |
| 8.5.1 | シーリング特性 | 109 |
| 8.5.2 | 設定押し付け力について | 113 |
| 8.6 | 結言 | 114 |
| | | |
| 第9章 | 静的メタルシールにおける設定押し付け力の低減因子 | 115 |
| 9.1 | 緒言 | 115 |
| 9.2 | 密封面に垂直力が作用する場合 | 116 |
| 9.2.1 | 設定接触圧力について | 116 |
| 9.2.1.1 | 接触幅の影響 | 117 |
| 9.2.1.2 | 仕上げ方法の影響 | 118 |
| 9.2.1.3 | 表面粗さの影響 | 118 |
| 9.2.1.4 | 材質の影響 | 119 |
| 9.2.2 | 設定押し付け力について | 122 |
| 9.2.2.1 | 接触幅の影響 | 122 |
| 9.2.2.2 | 仕上げ方法の影響 | 123 |
| 9.2.2.3 | 表面粗さの影響 | 123 |
| 9.2.2.4 | 材質の影響 | 124 |
| 9.3 | 密封面に垂直力と接線力が作用する場合 | 127 |
| 9.3.1 | 環状くさび形ガスケットの設定押し付け力について | 127 |
| 9.3.2 | 円すい内側密封面の設定押し付け力について | 130 |
| 9.4 | メタルシール設計の指針 | 132 |
| 9.5 | 結言 | 134 |
| 第10章 | 結論 | 136 |
| | | |
| | 参考文献 | 142 |
| | | |
| | 謝辞 | 147 |

第 1 章 緒論

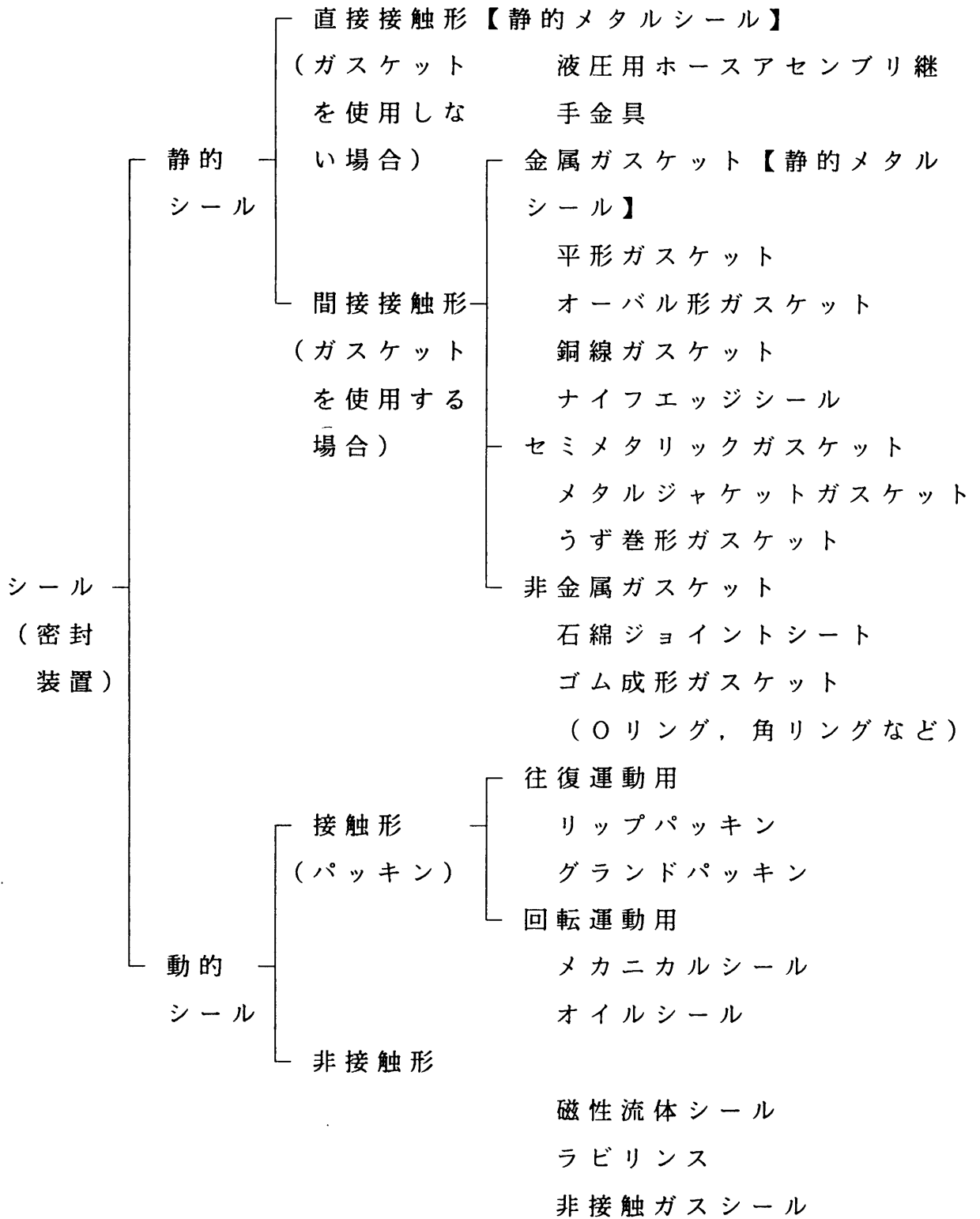
1.1 静的メタルシールの現状およびその分類

従来の静的シール（密封装置）では，密封面間に非金属ガスケット類を挿入し，そこからの漏れ量を抑制する装置が多かった。しかし，科学技術の進歩に伴い，密封性能に対する要求は厳しくなり，非金属ガスケット類の使用ができなくなり，金属面同士を直接に，または金属ガスケットを挿入して，密封を行う静的メタルシールが採用されるようになった。さらに，近年の化学反応装置，真空装置および原子力関係装置では，密封流体の化学的作用，高圧，高温，極低温，超高真空あるいは放射線場などの極限環境下で使用せねばならないことが多くなってきた。このような過酷な環境下では，従来の静的メタルシールも使用できなくなっており，さらに性能の優れた静的メタルシールを研究開発する必要に迫られている。

シールは，その使用目的，使用条件の違いによって多くのものがすでに開発され，使用されている。しかし，シールの分類には確定した分類法はなく，一例を示せば表1-1に示すようになる。大別すると，管フランジ継ぎ手など固定用の静的シールと往復または回転運動用の動的シールに分けられる。さらに，静的シールは金属面同士を直接に押し付けて漏れ止めを行う直接接触形のシールと，金属面間にガスケット類を挿入する間接触形のシールに分けることができる。ガスケットは，材料面から分類すれば，金属ガスケット，セミメタリックガスケットおよび非金属ガスケットに分けることができる。ここで，直接接触形のシールと金属ガスケットのシールは，金属密封面間におけるガスケットの有無の差異はあるが，密封部の材料はすべて金属であり，それらのシーリング機構は基本的に同じであると考えられる。本研究では，直接接触形のシールと金属ガスケットのシールを静的メタルシールと定義し，分類する。

また，静的メタルシールをシーリング機構の観点から分類すれば，(1) 接触面に垂直力だけが作用して密封を行うシールと，(2) 接触

表1-1 シールの分類



注) 本研究では,直接接触形のシール(ガスケットを使用しない場合)と金属ガスケットのシールを静的メタルシールと定義する。

面に垂直力と接線力の両者が作用して密封を行うシールの2種類に分類できる。(1)の静的メタルシールとしては、金属平形ガスケット、金属波形ガスケット、のこ歯形ガスケットなどがあり、また(2)の静的メタルシールとしては、リングジョイントガスケット、レンズ形ガスケット、加熱脱ガス処理(真空槽全体を200℃程度に加熱し、壁に吸着しているガス分子を脱離させ、その後のガス放出を減らす方法)を施す超高真空用ベークブルフランジおよび液圧用ホースアセンブリ継手金具などがある。これらの一部は、J I S⁽¹⁾、J P I⁽²⁾、J V I S⁽³⁾、A P I⁽⁴⁾、D I N⁽⁵⁾およびI S O⁽⁶⁾で標準規格化されている。

しかし、これらの静的メタルシールでは、極限環境下で要求される高い密封性能に対応できないため、さらに安全で信頼性があり、押し付け力が低い静的メタルシールの研究開発が必要となっている。たとえば、現在最も信頼性があり、多用されている真空用ナイフエッジ型メタルシールを例に取ってみれば、日本真空協会の真空装置用ベークブルフランジの形状・寸法⁽³⁾の規格解説(JVIS003-1982)の中で、シーリング機構の解明に基づいた、押し付け力が低い、密封箇所最適な形状・寸法をしたシールの開発を望むことが記述されている。さらに、実用新案を調べると、ナイフエッジの材料に関する特許はあるが、押し付け力を低くするための、ナイフエッジの(最適)形状・寸法に関する特許は現在のところ見当たらない。なお、従来の静的メタルシールに関する研究でも、シーリング機構の解明に基づき、密封箇所の最適な形状・寸法を決定した論文は見当たらない。

1.2 従来の研究とその問題点

従来までに行われた静的メタルシールに関する研究は

- (1) 接触面に垂直力だけが作用して密封を行うシールに関する研究
 - (2) 接触面に垂直力と接線力(環状密封面に対して半径方向あるいは接線方向)の両者が作用して密封を行うシールに関する研究
- に大別される。

すなわち，(1)項に関しては，金属平面同士からなるメタルシールに関してForrest⁽⁷⁾およびBuchter⁽⁸⁾らは，表面仕上げ（仕上げ方法と表面粗さ）と接触圧力の関係について研究し，表面仕上げに関係なく密封ができる初期接触圧力を求め，静的メタルシールの基礎データを提示した。超高圧装置用メタルシールに関しては，表面粗さの影響については直接言及していないが，小谷は軸方向自緊式の複合材料からなるガスケット⁽⁹⁾について，遠藤らは金属製のご歯形ガスケット⁽¹⁰⁾や平形ガスケット⁽¹¹⁾について，さらに，Tückmantelは軟質材のリング状ガスケット⁽¹²⁾について，ガスケットの形状と材質および締め付け力との関係を研究し，それぞれのメタルガスケットシールに対する設計指針を与えた。超高真空用メタルシールに関しては，Elsworthらはアルミニウム線ガスケット⁽¹³⁾について，久呉および酒井らは軟質材被覆中空Oリングガスケット⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾について，南らは平面接触型ガスケット⁽¹⁶⁾について，小原⁽¹⁷⁾らはナイフエッジ型メタルシールフランジについて，厳しい密封性能を要求される真空用メタルシールを研究し，新しい形状と材質からなるメタルシールを開発した。フランジ面の表面粗さは，できるだけ小さくする必要があり，普通は6.3S以下⁽¹⁸⁾，特別な場合で0.3S以下⁽¹⁹⁾が要求される。しかし，久呉あるいは酒井らが開発した中空Oリングガスケットの研究では，フランジが旋削仕上げの場合，滑らかな面よりもむしろ中程度の表面粗さの面の方が良い密封性能を示すことを明らかにした。しかし，これらのメタルシールに関する研究は，(1)ガスケットやフランジの材質，接触箇所の形状および締結条件などを含めた総合的な見地からの研究で，近年の極限環境下のメタルシールの研究開発のためには，(2)接触表面の接触突起の変形を考慮したシーリング機構を含めた研究を行う必要があると考える。気体のシーリング機構に関しては築添⁽²⁰⁾，風巻^{(21)~(24)}および田中⁽²⁵⁾らは，接触機構との関連において接触面からの気体の漏れについて研究し，接触表面におけるシーリング機構を明らかにした。しかし，これらの静的メタルシールの基礎研究

でも、理論と実験との検証は接触圧力が低い範囲でしかなされておらず、実際に気体の密封を行う高い接触圧力下での密封性能の検討が不足している。液体のシーリング機構に関して船橋ら⁽²⁶⁾は、接触面の表面粗さの方向性が密封性能に与える影響を研究し、漏れ方向に対し表面粗さの方向が直角な場合は、平行な場合に比べ漏れ量が少なくなることを明らかにした。

次に、(2)項に関しては、多くの研究者によって実験が古くから行われており、その成果はJIS⁽¹⁾、JPI⁽²⁾、API⁽⁴⁾およびDIN⁽⁵⁾規格となっている。これらは、接触面を傾斜させることにより接線力を発生させ、密封を促進させるメタルシールで、その傾斜角の理論的根拠は明らかにはされていないようである。最近、井上⁽²⁷⁾は大径円筒面用自緊式メタルシールに関して、花田ら⁽²⁸⁾はズレ変位を強制的に与える二重被覆中空Oリングガスケットに関して、いずれも接線力が作用するメタルシールの研究を行っている。しかし、これらはいずれも上述した(1)の総合的な見地からの研究で、(2)の接触表面の接触突起の変形を考慮したシーリング機構を明らかにしていない。接触面に垂直力の他に接線力が作用する場合、接触突起の垂直方向の変形が促進されること⁽²⁹⁾が知られている。液体のシーリング機構に関して船橋らは、表面粗さがガウス分布で近似できる接触面に対し、接線力が作用したときの垂直変位を定量的に推定する方法を導き⁽³⁰⁾、一定の垂直荷重で接触するメタルシール面に接線力が作用するときの密封性挙動を調べ⁽³¹⁾⁽³²⁾、接線力は密封性能に対し有効に働くことを明らかにした。なお、メタルシールの密封を直接には対象としていないが、船橋らは、接触表面の突起を円すい突起と考えると、硬い単一突起と軟らかい平面の接触⁽³³⁾⁽³⁴⁾、表面粗さの大きい硬い面の接触⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾の場合について、接線力が作用したときの垂直変位についての詳細な研究を行っている。

1.3 シールの基本特性の定義

静的メタルシールで最も重要なシールの特性は、漏れ量が許容値

以下になる時の，初期締め付け時の密封特性である。シールは，熱，振動あるいはクリープなどの影響を受け，シール内部の応力緩和により再び漏れ始める危険性がある。この危険性を防止し，運転時の密封性能を維持するためには，シールの締め付けは初期締め付け時の密封特性を基準として行われなければならない。このため，初期密封特性は運転時の密封性能に対する基本特性として重要となる。

本研究では，許容漏れ量を設定し，漏れ量が設定許容値以下になる時の，初期締め付けにおける密封特性をシールの基本特性と定義し，次に示す3特性をシールの基本特性とする。

- (1) シーリング特性；漏れ量が設定許容値以下になるまでの漏れ減少挙動
- (2) 設定接触圧力；漏れ量が設定許容値以下になる時の接触圧力
- (3) 設定押し付け力；漏れ量が設定許容値以下になる時の押し付け力

1.4 シールの基本特性と表面粗さの関係

金属表面には，どのような金属および加工方法であろうとも，粗さ突起が必ず存在する。金属平面同士を接触させ，そこからの流体漏れ量を許容値以下に抑制するためには，押し付け力を接触表面に作用させることにより，粗さ突起を変形させて，接触面間のすきまを小さくしなければならない。この場合，接触表面の表面粗さ（粗さ突起の大きさや方向性および粗さ突起の機械的性質）はシールの基本特性に大きく影響することとなる。このような理由から，シールの基本特性と密封面の表面粗さは密接な関係にあり，極限環境下の静的メタルシールを研究開発するためには，これら両者の関係を明らかにすることが第一に必要となると考えた。

1.5 本研究の目的

静的メタルシールの密封性能を向上するためには，シーリング機構を解明することが必要であり，従来の静的メタルシールと比べて

押し付け力がはるかに低いシールを具体的に開発する必要がある。本研究はシールの基本特性と密封面の表面粗さとの関係を明らかにすることによってシーリング機構を解明し、低い押し付け力で密封が可能な静的メタルシールの開発の一助となるような設計基礎データの確立を目的としたものである。

まず最初に、ガスクロマトグラフを用いて密封面間からの気体の微少漏れ量を定量的に測定する方法を考案し⁽³⁷⁾、接触面に垂直力だけが作用する接触状態のもとで、シーリング機構を解明する。金属平面同士⁽³⁸⁾およびメタルガスケットにおけるシール⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾のシーリング特性実験を行い、密封面の表面粗さがシールの基本特性に及ぼす影響を実験的に調べ、押し付け力が低くても密封が可能な条件を明らかにする。

次に、うねりやむしれが少なく、一定の表面粗さに旋削仕上げ加工した密封面の粗さ突起（旋削山突起）は、見かけ上滑らかな面同士の接触に比べて押し付け力を低くする密封効果があることに着目し、非常に低い押し付け力で密封を可能にする静的メタルシールの設計基礎データを求める。すなわち、硬い環状くさび形突起と軟らかい平面からなるシールのシーリング特性実験を行い、シーリング機構を実験的に解明し、環状くさび形突起（いわゆるナイフエッジ）の最適な形状・寸法⁽⁴¹⁾を求め、ガスケット材料に関係なく密封が可能で、従来のナイフエッジシールと比べて押し付け力がはるかに低いナイフエッジシール⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾の設計基礎データを求める。従来では、押し付け力が低いメタルシールとして、無酸素銅ガスケットを用いたナイフエッジ型メタルシールフランジ⁽³⁾が広く用いられている。しかし、この場合でも押し付け力は高く、密封装置が大型化するため、押し付け力をさらに下げ、密封装置の小型化が必要とされている。

さらに、接触面に垂直力と接線力が同時に作用する接触状態のもとで、シーリング機構を解明し、低い押し付け力で密封を可能にするシールを具体的に開発する設計基礎データを求める。軟らかい環状くさびと硬い球面からなるシール⁽⁴⁴⁾および軟らかい円すい内側

密封面と硬い球面からなるシール⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾のシーリング特性実験を行い、環状くさびおよび円すい内側密封面における旋削仕上げの粗さ突起に対する塑性変形量を実験と計算で比較検討し、それぞれのシールの最適形状の設計基礎データを求め、その押し付け力を算出する。

1.6 本研究の概要

第1章では、静的メタルシールの現状およびその分類、従来の研究とその問題点、シールの基本特性の定義、シールの基本特性と表面粗さの関係、本研究の目的、さらに本研究の概要について述べる。

第2章では、ガスクロマトグラフにおける定量分析機能に着目して、ガスクロマトグラフをシーリング特性の実験装置およびその漏れ測定方法に適用することの妥当性を検討した。その結果、ガスクロマトグラフの測定範囲は約 $10^{-5} \sim 5 \times 10^{-1}$ L/h (標準状態量: 0.101 MPa, 0°C) で、測定時間が短く、連続記録が可能なガス漏れ測定装置として適用できることがわかった。従来の、浮力を利用した重量計測方法を併用することにより、シーリング特性実験装置の漏れ測定範囲は約 $10^{-5} \sim 10^2$ L/h と広くなり、しかも正確さを増大した。

第3章からは、第2章で考案したシーリング特性実験装置を用い、静的メタルシールの基本特性に及ぼす表面粗さの影響について調べた。

すなわち、第3章では、金属平面同士からなるシールについて検討した。接触面間からの漏れ量を許容量以下に留めるのに必要な設定接触圧力 p_c は、材質の組み合わせ(銅とステンレス鋼、銅と合金工具鋼との組み合わせ)や表面粗さ(ただし、 $R_{max} < 50 \mu m$)に関係なく、軟らかい材質(銅)の引張強さ σ_B 以下でよい。特に、銅とステンレス鋼の密封面を両者とも旋削仕上げで同一表面粗さに組み合わせした場合には、 R_{max} が約 $10 \sim 50 \mu m$ の範囲内で、最も小さくなり $p_c \approx 0.5 \sigma_B$ となる。

第4章では、金属ガスケット(銅材の平形ガスケット、オーバル

形ガスケットおよび銅線を半ひねり成形した銅線ガスケット)のシールについて検討した。 p_c は、金属密封面の表面粗さ ($R_{max} \approx 0.3 \sim 224 \mu m$) およびガスケット断面形状 (平形, オーバル形) に関係なくそれぞれ一定値を示し、 $p_c \approx (0.8 \sim 1.3) \sigma_B$ である。銅線ガスケットおよびオーバル形ガスケットの場合、密封に必要な設定押し付け力 P_c/l (P_c/l は単位長さ当たりの設定押し付け力で、 P_c は設定押し付け荷重、 l は接触部の長さ) は、金属密封面での、ある表面粗さ範囲内で低くなる。すなわち、銅線ガスケットの場合、 P_c/l は、 R_{max} 値が大きくなると低くなり、 $R_{max} \geq 110 \mu m$ で $P_c/l \approx 350$ kN/m となる。この理由は、金属密封面の旋削山突起群が、ガスケット合わせ部の溝に食い込み、溝部の漏れ通路を閉塞する密封効果によると考える。オーバル形ガスケットの場合、 P_c/l は $R_{max} \approx 2 \sim 20 \mu m$ の範囲内で、 $P_c/l \approx 200$ kN/m と最も低くなり、 R_{max} がこれより小さくても大きくても P_c/l 値は高くなる。この理由は、金属密封面の旋削山突起群が、ガスケット表面に食い込み、ガスケット表面の放射状傷による漏れ通路を閉塞する密封効果によると考える。

第5章では、第4章で明らかとなった密封効果に着目し、旋削山突起群の単一突起に相当する、いわゆる硬い環状くさび形シールについて検討した。 P_c/l は $R_{max} \leq 14 \mu m$ でほぼ一定値を示し、くさび突起の半頂角 α が $15 \sim 60^\circ$ の P_c/l ($P_c/l \approx 35$ kN/m) は、 $\alpha = 90^\circ$ のそれ ($P_c/l \approx 170$ kN/m) と比較して、約 $1/5$ と低い値を示した。この理由は、半頂角 α 値によるシーリング機構の差異によると考える。

第6章では、第5章で述べた環状くさびの密封効果を、ナイフエッジシールについて、さらに詳細に検討した。ナイフエッジ稜線部の幅 b ($b \approx 30 \sim 500 \mu m$) を変えて、それらのシーリング機構の解明を行い、 P_c/l が低くなる最適形状のナイフエッジシールの設計基礎データと、そのシールの基本特性を調べた。ナイフエッジシールのシーリング機構は、密封面の仕上げ方法 (旋削仕上げで $R_{max} \approx 8 \mu m$ および研削仕上げで $R_{max} \approx 3 \mu m$) に関係なく、ナイフエッジ稜線部の幅 b の大きさにより、(a) 密封面の最表面層への食い込み型シール、

(b) 密封面の母材への押し込み型シール, および(c) これら両者の中間型シールの3型式に分類されることが明らかとなった。ナイフエッジの形状として P_c/l が最も低い(a)型を, その材料として硬くて耐熱性・耐食性のある材料を選定した場合の P_c/l は, $R_{max} \approx 4 \sim 40 \mu\text{m}$ の範囲内において, 密封面が銅の場合は約 $15 \sim 40 \text{kN/m}$, 炭素鋼の場合は約 $45 \sim 110 \text{kN/m}$, ステンレス鋼の場合は約 $80 \sim 190 \text{kN/m}$ であり, 従来のナイフエッジシールの P_c/l (ステンレス鋼のナイフエッジと銅のガスケットの密封装置で, 銅の密封面の R_{max} が約 $3 \mu\text{m}$, $P_c/l \approx 120 \sim 600 \text{kN/m}$) と比べて, 極めて低い値を示した。

第2章から第6章においては, 接触面に垂直力のみが作用する場合について検討したが, 第7章および第8章では, 垂直力のほかに接線力が作用する場合について検討した。

第7章では, 垂直力に加え接線力が作用する場合の, 軟らかい環状くさび形ガスケットからなるシールについて調べた。くさびの塑性変形量変化の計算と実験, およびシーリング特性実験から, 接触面に作用する接線力は, くさびの塑性変形量を大きくする効果があり, シールの密封性能に有効であることが明らかとなった。

第8章では, 第7章で得られた計算式を, 円すい内側密封面からなるシールに適用して, 旋削仕上げ面に及ぼす接線力の影響について検討した。接線力の増加(すなわち円すい内側密封面の半頂角 θ の減少)に伴って, P_c/l が減少することが明らかとなった。密封面が旋削仕上げで $R_{max} \approx 8 \mu\text{m}$ の場合, P_c/l を低くすることができる θ の推奨値は $5 \sim 35^\circ$ で, その推奨値の範囲に対応する P_c/l を算出することができた。

第9章では, 第3章から第8章まで個々の条件について検討したが, それらを総括的に考察し, メタルシールを設計する際に最も重要となる P_c/l に関して, それを低くする因子について論じた。

第10章は結論である。

主な使用記号

| | | |
|-----------------|--|--------------------|
| q_1 | ： 検出ガス量 | [mL] |
| q_2 | ： 漏れ量 | [mL/min] |
| Q_0 | ： 標準状態 (0.101MPa, 0°C) での漏れ量 | [L/h] |
| Q_c | ： 漏れ許容量 | [L/h] |
| m | ： 記録紙の質量 | [g] |
| ε_a | ： ガスクロマトグラフの減衰値 | |
| S | ： シーリング特性実験曲線の出力 | [%] |
| C_1 | ： 検出ガスの検量から定まる定数 | [g/mL] |
| C_2 | ： 記録紙の質量計測から定まる定数 | [g/mm] |
| C_3 | ： 漏れ量の換算係数 | [L/h] |
| v_1 | ： 記録紙の検量時の紙送り速度 | [mm/min] |
| v | ： 記録紙の任意の紙送り速度 | [mm/min] |
| P | ： 軸方向の押し付け荷重 | [kN] |
| P_c | ： 設定押し付け荷重 | [kN] |
| l | ： 接触部の長さ | [mm] |
| A_n | ： 実験前の接触面積 | [m ²] |
| A_c | ： 実験後の接触面積 | [m ²] |
| P/l | ： 単位長さ当たりの押し付け力 | [kN/m] |
| P_c/l | ： 単位長さ当たりの設定押し付け力 | [kN/m] |
| p_n | ： 接触圧力 (P/A_n) | [MPa] |
| p_c | ： 設定接触圧力 (P_c/A_c) | [MPa] |
| σ_B | ： 引張強さ | [MPa] |
| p_m | ： 接触部の密封最表面層のマイヤー硬さ | [MPa] |
| K_c | ： 設定接触圧力と引張強さの比 (p_c/σ_B) | |
| M_c | ： 設定接触圧力と接触部表面層のマイヤー硬さの比 (p_c/p_m) | |
| R_{max} | ： 表面粗さ | [μ m] |
| α | ： くさび稜線部の半頂角, [度] | |
| r | ： くさび稜線部の丸み半径 | [μ m] |

| | | |
|----------|---|-------------------|
| b | : ナイフエッジ稜線部の幅 | [μm] |
| p | : 接触部に作用する軸方向の単位長さ当たりの押し付け荷重 | [kN/m] |
| n | : 接触部に作用する単位長さ当たりの垂直力 | [kN/m] |
| t | : 接触部に作用する単位長さ当たりの摩擦力 | [kN/m] |
| N | : 接触部に作用する垂直力 | [kN] |
| T | : 接触部に作用する接線力 | [kN] |
| θ | : 密封面の円すい半頂角, [度] | |
| ρ | : 密封面の摩擦角, [度] | |
| μ | : 密封面の摩擦係数 | |
| p | : 圧縮応力 | [MPa] |
| s | : せん断応力 | [MPa] |
| w | : くさびの接触幅 | [μm] |
| w_0 | : $\theta = 90^\circ$, $s = 0$ のときのくさびの接触幅 | [μm] |
| w_{r0} | : $\theta \neq 90^\circ$, $s = 0$ のときのくさびの接触幅 | [μm] |
| w_r | : $\theta \neq 90^\circ$ のときのくさびの接触幅 | [μm] |
| A_0 | : $\theta = 90^\circ$, $s = 0$ のときのくさびの接触面積 | [m^2] |
| A_{r0} | : $\theta \neq 90^\circ$, $s = 0$ のときのくさびの接触面積 | [m^2] |
| A_r | : $\theta \neq 90^\circ$ のときのくさびの接触面積 | [m^2] |
| d | : 球面の直径 | [mm] |
| d_s | : 円すい内側密封面と球面の線接触部の直径 | [mm] |
| W | : 接触部の幅 | [μm] |
| H | : 接触部のくぼみ深さ | [μm] |
| H_c | : 密封に必要な接触部のくぼみ深さ | [μm] |
| f | : くさびの山のピッチ | [μm] |
| c | : 接触部の幅Wを横切るくさびの山数 | |
| L | : スパイラル状くさびの線接触部の接触長さ | [mm] |

2.1 緒言

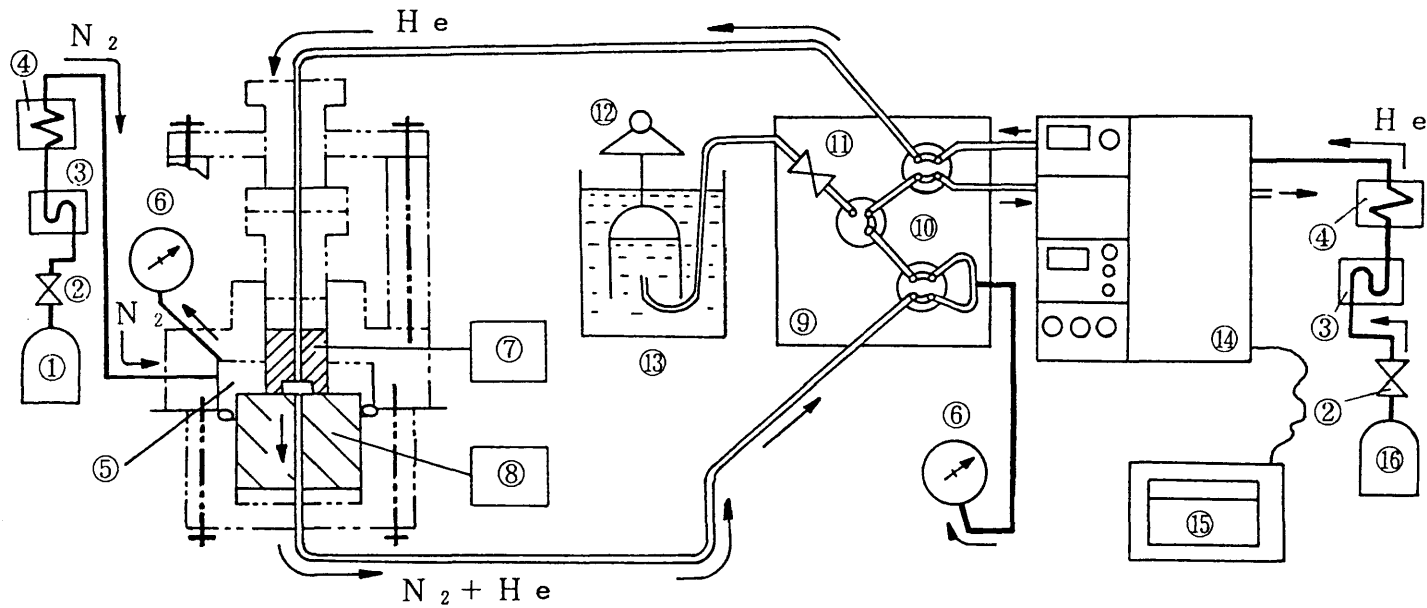
静的メタルシールの密封面間からの漏れ量を支配する主な因子の一つに、密封部の接触面積の大きさが考えられる。従来の静的メタルシールに関する基礎研究^{(20)~(24)}では、この接触面積が広いため、締め付け力の増加割合に対する漏れ量の減少割合はゆるやかで、またその漏れ量も多かった。そのため、密封部からの漏れ量を測定するには、ある一定時間の平均値を算出する方法が採用されてきた。

しかし、実際のガスケットを取り扱う静的メタルシールでは、その密封部の接触面積は、平形ガスケットのように広い場合もあるが、ナイフエッジシールのように狭い場合もある。特に後者の場合では、密封部からの漏れ量は、締め付け力をわずかに増加しても、その影響は大きく、漏れ量は締め付け力の微増によっても急減し微少となる。この場合、従来のように漏れガス量を水中に集めて測定する方法あるいは真空容器内の圧力変動量を測定する方法などでは、短時間に減少する漏れ量の変化割合と微少漏れ量を連続的かつ定量的に、また正確に測定することは困難であった。

本研究の目的は、実際のガスケットを含めた静的メタルシールの基本特性に及ぼす表面粗さの影響を解明し、低い締め付け力で密封が可能な静的メタルシールの設計基礎データの確立である。そのためには、まず、密封部からの漏れ量を連続的かつ定量的に、さらに微少漏れ量まで正確に測定できる実験装置、およびその装置による漏れ量測定方法を開発することが必要となる。そこで、以下に述べる微少漏れ量の測定装置および漏れ量測定方法を考案した。

2.2 実験装置および実験方法

実験装置・系統図、実験装置本体をそれぞれ図2-1, 図2-2に示す。窒素ポンプ①からの検出ガスは、圧力調整弁②によって所定の供給圧に調整された後、乾燥器③、さらにフィルタ④を経て実験装置本



- | | | |
|-------------------------------|----------------------|---------------------|
| ① N ₂ gas cylinder | ⑥ Pressure gage | ⑪ Needle Valve |
| ② Valve | ⑦ Upper specimen | ⑫ Balance |
| ③ First filter | ⑧ Lower specimen | ⑬ Water tank |
| ④ Second filter | ⑨ Circuit controller | ⑭ Gas chromatograph |
| ⑤ Pressure chamber | ⑩ Change-over valve | ⑮ Recorder |
| | | ⑯ He gas cylinder |

図2-1 シーリング特性実験装置・系統図

体の加圧室⑤に導かれる。上試料⑦と下試料⑧との試験面のすきまを通過した漏れ窒素ガスは、試験回路内を流れるヘリウムキャリアガスによってガスクロマトグラフ⑭に導かる。漏れ量は、レコーダ⑮に記録され、後述の2.4節で示される漏れ量換算式により算出される。加圧室⑤の加圧力は 882 kPa (ゲージ圧)、試験回路の内圧は 39 kPa (ゲージ圧) で一定である。試料の軸方向の押し付け荷重は

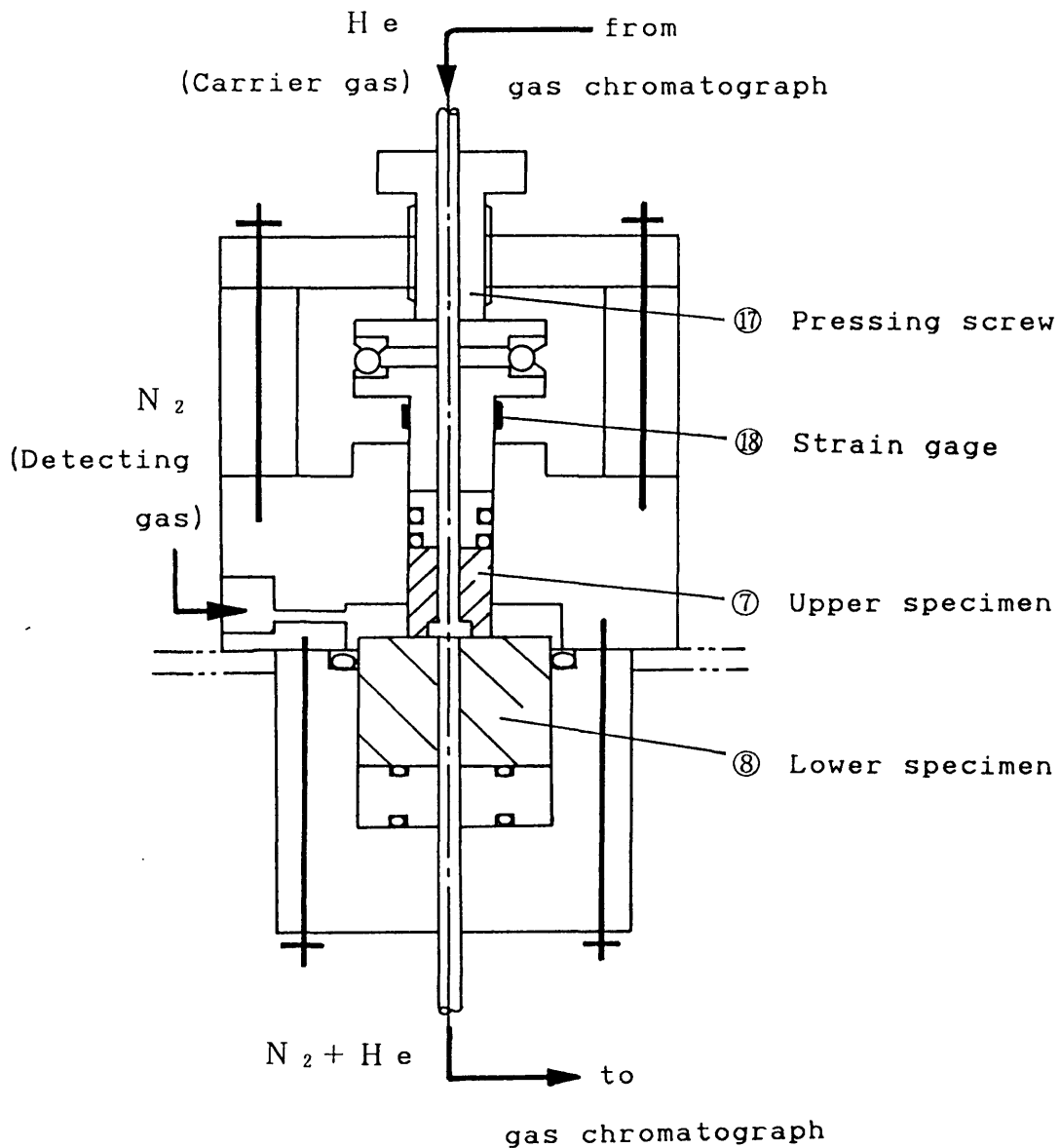


図2-2 実験装置本体

図2-2 に示す押し付けねじ⑩により加えられ，その大きさはひずみゲージ⑪で検出されペンレコーダで記録される。なお漏れ量の減少挙動に関するシーリング特性実験を始めるに当たり，いったん漏れ窒素ガスを水槽⑬に流し試験回路を窒素に置換する。次に押し付け荷重を増加させ，漏れ量がガスクロマトグラフの測定範囲内まで減少したら，回路を切り換えてシーリング特性実験を開始する。

2.3 ガスクロマトグラフによる漏れ量測定方法

2.3.1 微小漏れ量に対する各種測定方法の比較

静的メタルシールの接触面間の密封性能に関する研究において，ガス流体の微小漏れ量の測定には，従来ではメスシリンダを使用する水中置換法⁽²⁰⁾，浮力を利用する重量計測法^{(21)~(24)}，ガラス管内のせっけん膜移動量計測法⁽⁴⁷⁾および電離真空計などを用いた圧力上昇法⁽⁴⁸⁾などが採用されてきた。これらの測定方法による測定範囲を表2-1に示す。水中置換法は，密封部の固体接触面間から漏れたガスを水槽中のメスシリンダに集めて測定する方法で，測定範囲は約 $10^{-2} \sim 10^2$ L/h [標準状態 (0.101 MPa, 0°C) での漏れ量] と高く，微小漏れ量の測定には適さない。重量計測法は，漏れたガスを水槽中のガスだめ容器に集め，その重量差を水の浮力を利用して計測し，漏れ量に換算する方法である。ガラス管内のせっけん膜移動量計測法は，漏れたガスをガラス管に導きガラス管内のセッケン膜の移動量を読み取って漏れ量を知る方法である。これらの重量計測法およびせっけん膜移動量計測法は，表中の破線範囲の測定も可能であるが，測定時間が約1時間以上も必要とし，そのうえ測定値も平均値として算出される。したがって，漏れ量が短時間で変化するような測定には不向きである。圧力上昇法は検出器内圧が真空のため，装置自体からのガス放出量も考慮しなければならないなどの難点がある。ここで考案するガスクロマトグラフによる漏れ量測定方法は，圧力上昇法に比べて微小漏れ量の領域（約 10^{-5} L/h以下）を測定することが困難であるという欠点があるが，操作が簡単で測定

表2-1 微小漏れ量の測定方法と測定範囲

| Leak detection method | Pressure level | Test gas | Leakage $Q_0, L/h$ (at 0.101MPa, 0°C) | | | | |
|--|-----------------------------------|--|---------------------------------------|-----------|-----------|---|--------|
| | | | 10^{-6} | 10^{-4} | 10^{-2} | 1 | 10^2 |
| Gathering bubbles in water ⁽²⁰⁾ | Atmospheric pressure | Air | | | | | |
| The weight of a storage tank in water ^{(21)~(24)} | | | | | | | |
| The movement of a soap film in glass pipe ⁽⁴⁷⁾ | | | | | | | |
| ⁽⁴⁸⁾ Pressure rise | Vacuum | He, CO ₂ N ₂ , H ₂ O | | | | | |
| Gas chromatograph | approx. 40 kPa (gage pressure) | N ₂ | | | | | |

注) 破線の矢印範囲は, 測定に時間がかかることを示す。

時間が短く，連続自動記録が可能などの特徴をもっている。本研究の実験では，検出ガスとして窒素ガスを用いる。その採用理由は，ヘリウムキャリアガスとの熱伝導度の差が大きく，検出能力が大きくなるからである。しかし，その他のガスを用いることも可能ではある。

2.3.2 ガスクロマトグラフによる漏れ量の測定原理

本来，ガスクロマトグラフ⁽⁴⁹⁾は物質の定性・定量分析に有効な装置である。本研究では，ガスクロマトグラフ（日立製作所，163形）の定量分析の機能を利用して微小漏れ量の測定に応用した。ガスクロマトグラフを漏れ量測定へ応用するときの考え方を図2-3に示し，その測定原理を述べる。

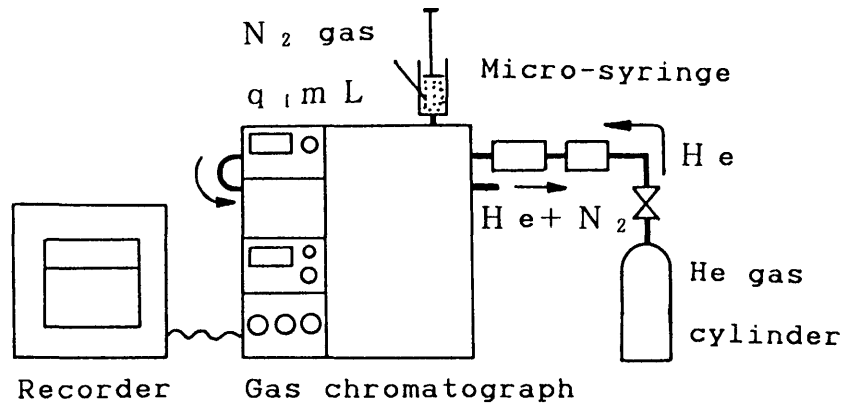
(a) マイクロシリンジに検出ガスを採り，ガスクロマトグラフの注入部に所定の検出ガス量 q_1 mLを注入する（図2-3-a）。

(b) 注入ガス量 q_1 mLに応じた出力すなわちピーク面積が，レコーダに記録される（図2-3-b）。

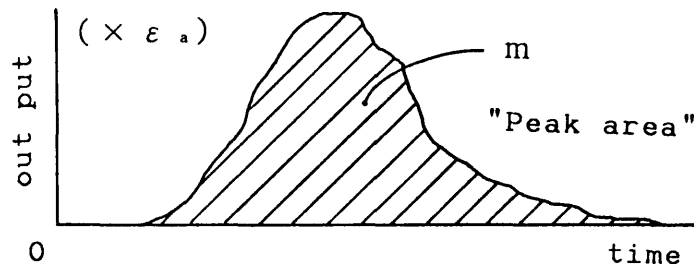
(c) この記録紙からピーク面積を切り抜き，記録紙の質量 m gを直示天秤（最小測定単位 10^{-4} g）で測定し，ガスクロマトグラフの減衰値 ϵ_a との積 W g ($= m \epsilon_a$) を求める。 W gと q_1 mLとの関係を順次求め絶対検量線図を描く（図2-3-c）。

(d) 接触面間からの漏れ量は，この絶対検量線図を用いて算出できる。いま，シーリング特性実験において，図2-3-dで示すシーリング特性実験曲線が描かれるとする。時間 t_1 から t_2 までの1分間当たりの密封部の接触面間からの漏れ量 q_2 mL/minは，記録紙の斜線部の面積を切り抜き，その質量 m' g/minの計測から W gを求め，図2-3-cの絶対検量線図に適用して算出される。

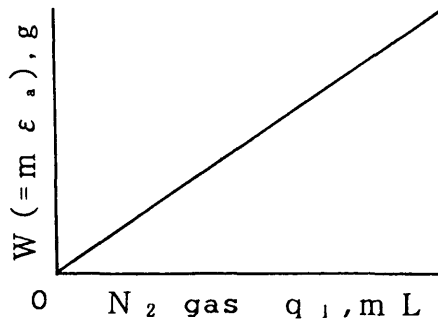
しかし，上述の q_2 mL/minの算出方法は，測定に時間がかかるため，漏れ量が短時間で変化する測定には適用できず，また測定のたびに m' g/minの計測を行っていたのでは実用的ではない。そこで本研究では，操作が簡単で測定時間が短く，連続測定が可能な方法



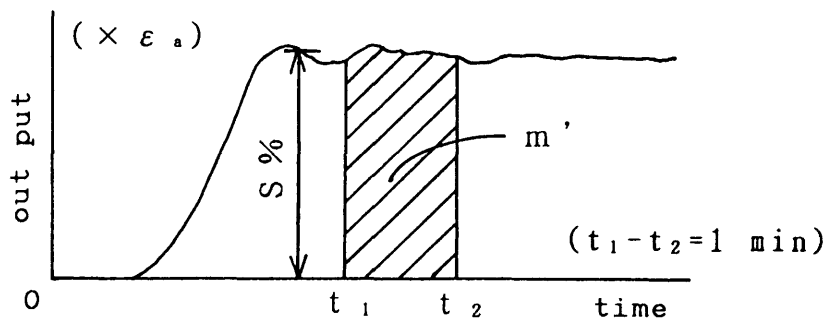
(a) 装置



(b) クロマトグラム



(c) 絶対検量線



(d) シーリング特性実験

図2-3 漏れ量測定へのガスクロマトグラムの応用

とするため、漏れ量換算式を使用する方法（シーリング特性実験曲線の出力 S % と減衰値 ε_a を漏れ量換算式に代入して漏れ量を求める方法）とした。

すなわち、絶対検量線から得られる W g と q_1 mL との関係

$$W = m \varepsilon_a = C_1 q_1 \quad [\text{g}] \quad (2.1)$$

と、記録紙の質量計測から得られる 1 分間当たりの質量 m' g/min と S % および検量時の記録紙の送り速度 v_1 mm/min との関係

$$m' = C_2 S v_1 \quad [\text{g/min}] \quad (2.2)$$

とにおいて、式(2.1)と式(2.2)を用いれば 1 分間あたりの検出ガス量 q_1 mL が求まる。ここで、この 1 分間当たりの検出ガス量 q_1 mL を 1 分間当たりの漏れガス量 q_2 mL/min とすれば、 q_2 mL/min は S % と ε_a との関係式として得られる。

$$q_2 = (C_2 / C_1) v_1 S \varepsilon_a \quad [\text{mL/min}] \quad (2.3)$$

さらに実験データを統一するため、標準状態(0.101 MPa, 0°C)を規定して、この状態における 1 時間当たりの体積流量 Q_0 L/h に換算すれば

$$Q_0 = C_3 S \varepsilon_a \quad [\text{L/h}] \quad (2.4)$$

の漏れ量換算式を得る。ここで、 C_1 [g/mL] は検出ガスの検量から定まる定数、 C_2 [g/mm] は記録紙の質量計測から定まる定数、 C_3 [L/h] は漏れ量換算係数である。本研究の微小漏れ量の測定は、この漏れ量換算式を用いて実施する。

2.4 漏れ量換算式

前節で述べた、ガスクロマトグラフによる漏れ量の測定原理の考え方に基いて、表2-2 に示した設定条件のもとで求めた絶対検量線を図2-4 に示す。検出ガスにはヘリウムキャリアガスとの熱伝導度の差が大きい窒素ガスを用いた。マイクロシリンジは 0.25, 0.50, 3.0 mL 用の 3 種類、キャリアガス流量は 30 mL/min, 記録紙の送り速度 v_1 mm/min は 40 mm/min である。図2-4より、 q_1 が $5 \times 10^{-3} \sim 2.0$ mL の検量範囲において、 q_1 mL と W g (= $m \varepsilon_a$) はほぼ直線となり

$$q_1 = m \varepsilon_a / 28.30 \quad [\text{mL}] \quad (2.5)$$

の關係を得る。この式は $v_1 = 40 \text{ mm/min}$ に対するものであり、任意の紙送り速度 $v \text{ mm/min}$ に対する關係式は

$$q_1 = 40m \varepsilon_a / (28.30 v) \quad [\text{mL}] \quad (2.6)$$

となる。また1分間当たりの記録紙の質量 $m' \text{ g/min}$ と $S\%$ および $v \text{ mm/min}$ との關係は、記録紙の質量計測により

$$m' = 1.345 \times 10^{-4} S v \quad [\text{g/min}] \quad (2.7)$$

の關係を得る。式(2.7)を用いて式(2.6)を1分間当たりの漏れガス量 $q_2 \text{ mL/min}$ を表す式に直す。さらにガスの状態方程式を用いて、1時間当たりの標準状態 (0.101 MPa , 0°C) での漏れ量 $Q_0 \text{ L/h}$ に整理すれば

$$Q_0 = 1.027 \times 10^{-5} S \varepsilon_a \quad [\text{L/h}] \quad (2.8)$$

として漏れ量換算式を得る。

表2-2 ガスクロマトグラフと設定条件

| | |
|-------------------|---|
| Gas chromatograph | Thermal conductivity detector (TCD) Carrier gas: He (99.99% pure), 30 mL/min Detecting gas: N ₂ (99.99% pure) |
| Setting condition | Temperature: Column temp; 80°C, Injection Temp; 100°C, TCD Temp; 100°C, TCD Current: 115mA, Column: Sensitivity cell; ϕ 3mm \times 2m, Activated carbon, Reference cell; ϕ 3mm \times 1m, Molecular sieve 5A |

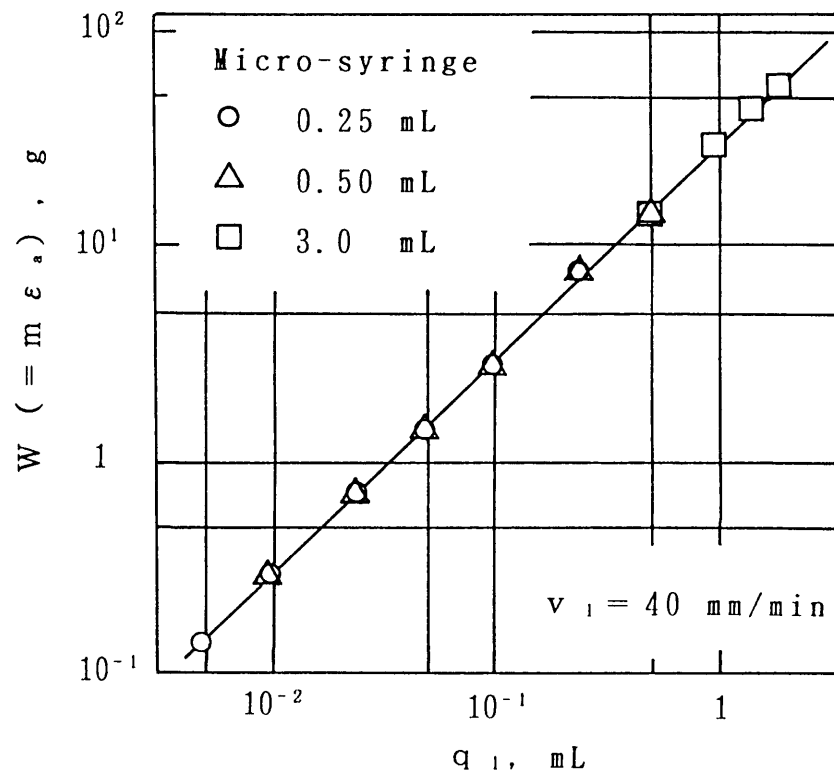


図2-4 絶対検量線

2.5 漏れ測定量の検定

漏れ測定量の検定実験に用いた試料の形状と寸法を図2-5に示す。上試料がステンレス鋼 (SUS304), 下試料が一般構造用圧延鋼 (SS41) で, それらの試験面は研磨紙による平面研磨仕上げが施され, 表面粗さは $R_{max} \approx 1 \sim 2 \mu m$ である。ガスクロマトグラフによる漏れ測定量の検定は, 浮力利用の重量計測法による漏れ測定量と比較検討することにより実施した。2.2節の図2-1に示したように, 重量計測法による漏れ量の測定を水槽⑬中で行うため, 試験回路を回路制御盤⑨の切り替え弁⑩により切り替え, 漏れ窒素ガスを水槽⑬に導く。その際, 試験回路の内圧をガスクロマトグラフによる漏れ量を測定

した場合の内圧 39 kPa (ゲージ圧) とほぼ等しくするため, 流量調整弁⑩で試験回路の内圧を微調整する。漏れ検出ガスの漏れ量の調整は, 図 2-2 に示した実験装置本体の押し付けねじ⑦で上下試料に荷重を加え, 試験面間のすきまの大きさを変化させることによって実施する。

重量計測法との比較実験の結果を図 2-6 に示す。測定量が 10^{-3} L/h 以下の範囲で, データーにバラツキが見られるが, この原因は重量計測法では微小漏れ領域における試験回路の内圧微調整が困難なた

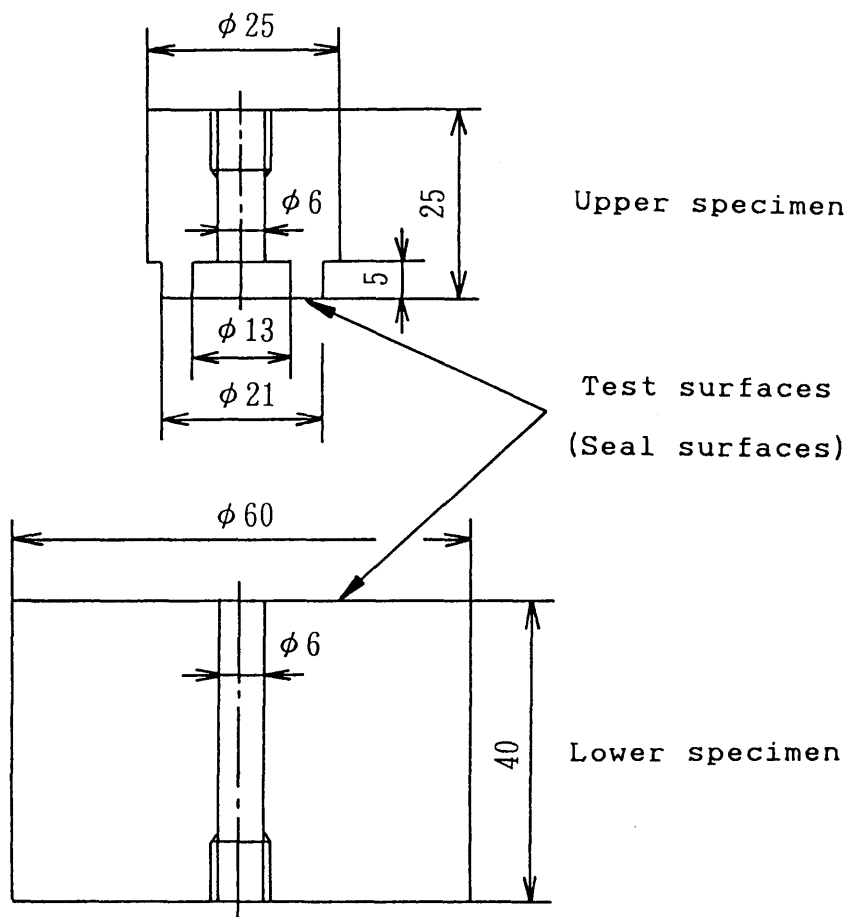
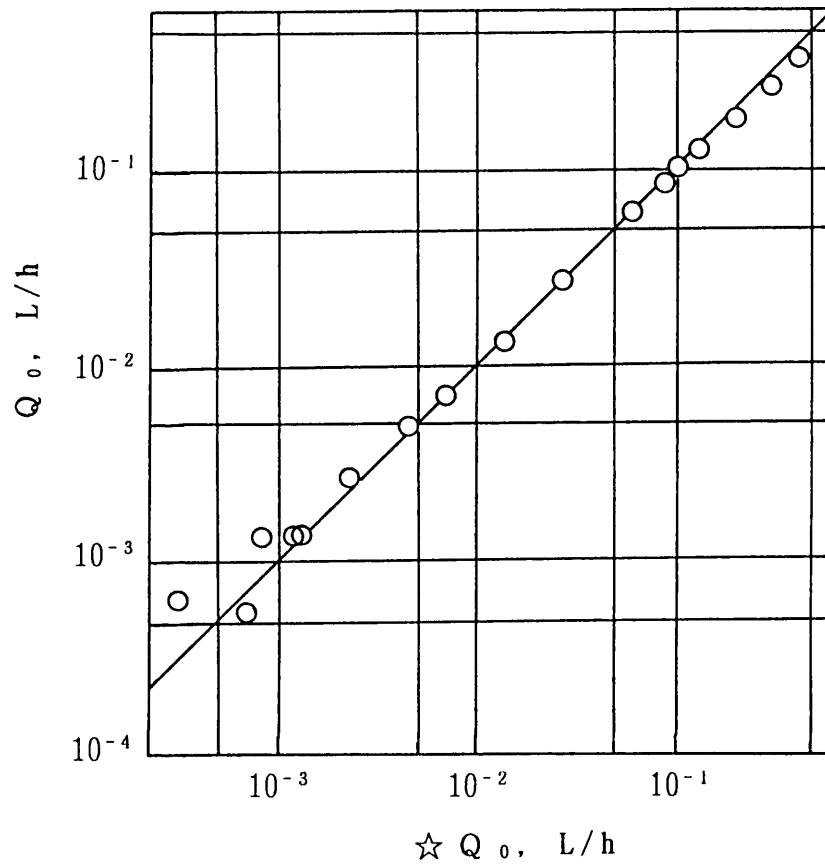


図 2-5 試料の形状と寸法



注) Q_o はガスクロマトグラフにより計測された漏れ量を,
 $\star Q_o$ は重量計測法により計測された漏れ量を示す。

図2-6 漏れ測定量の検定実験結果

めであり、この微調整をもっと精度良く行うことが可能ならば、この漏れ領域でのデータのバラツキは小さくなるを考える。また、測定量が約 5×10^{-1} L/h以上の範囲において実験値が示されていないが、この理由は、漏れ量がこれ以上多くなると、ガスクロマトグラフにおける熱伝導検出器 (TDC) の電流値が変化して小さくなり、

漏れ量の正確な測定が困難になるためである。図より、漏れ測定量が $10^{-3} \sim 5 \times 10^{-1}$ L/h の範囲では両者の誤差は 5% 以内で良く一致しており、ガスクロマトグラフを微量漏れ測定に応用できると判断される。なお、本装置の漏れ量の測定範囲は、最大値が漏れ測定量の比較検定実験から 5×10^{-1} L/h に、最小値がガスクロマトグラフの保証性能から 1×10^{-5} L/h で、測定精度はガスクロマトグラフの保証性能から $\pm 5\%$ になると考える。

なお、漏れ量がガスクロマトグラフの測定範囲を超える場合は、漏れ窒素ガスを水槽に導き、従来の重量計測方法により漏れ量を測定する。この 2 種類の漏れ測定方法を併用することにより、 $10^{-5} \sim 10^2$ L/h と広範囲の漏れ量を測定することが可能となる。

2.6 結言

静的メタルシールのシーリング機構の解明を行うため、測定時間が短く、連続測定記録が可能な実験装置を考案し、その漏れ測定量の検定を行った。結果は次の通りである。

(1) ガスクロマトグラフにおける定量分析機能を利用して、微量漏れ量を測定することを検討した。その結果、ガスクロマトグラフは、測定時間が短く、連続測定記録が可能な実験装置およびその装置による漏れ量測定方法に適用できる。

(2) 本装置の漏れ検出ガスとして、窒素ガスを用いる。その理由はヘリウムキャリアガスとの熱伝導度の差が大きく、検出能力を大きくする利点があるからであり、その他のガスを用いることも可能である。密封部からの窒素ガスの漏れ量は、連続測定記録され、ガスクロマトグラフにおける漏れ量換算式

$$Q_0 = 1.027 \times 10^{-5} S \varepsilon \quad [\text{L/h}] \quad (2.8)$$

により算出される。その測定範囲は約 $10^{-5} \sim 5 \times 10^{-1}$ L/h、測定精度は $\pm 5\%$ である。ここに、 Q_0 L/h は標準状態 (0.101 MPa, 0°C) での漏れ量、 $S\%$ および ε はガスクロマトグラフのシーリング特性実験曲線の出力および減衰値を示す。

(3) 実験装置の漏れ量測定方法として、ここで考案したガスクロマトグラフによる測定方法の他に、従来からの浮力を利用する重量計測方法（漏れ測定範囲： $10^{-3} \sim 10^2$ L/h）を併用すれば、漏れ量の測定範囲は約 $10^{-5} \sim 10^2$ L/hに広げることが可能である。

第3章 シールの基本特性(1) (38)

－金属平面同士の場合－

3.1 緒言

静的メタルシールにおける密封性能に関する研究は数多くあるが、各種ガスケットのシールにおける密封性能に関する実用的な報告^{(7)~(17)}が多く、シールの基本特性に関する基礎的な研究^{(20)~(25)}は少ない。これらの基礎研究でも、理論と実験との検証は接触圧力が低い範囲でしかなされておらず、実際に密封を行う高い接触圧力下でのシールの基本特性の検討は不十分である。

前章では、静的メタルシールの基本特性を解明するために必要な、漏れ減少挙動に関するシーリング特性を調べる実験装置と考案した漏れ量測定方法に関して記述した。

本章では、この実験装置を用い、実際に密封が成される高い接触圧力下でのシールの基本特性を調査する目的で、最初にガスケットを装着しないで金属平面同士からなる密封面を押し付け、密封面の表面粗さがシールの基本特性に及ぼす影響について実験的に検討する。

3.2 実験装置および実験方法

漏れ量の減少挙動に関するシーリング特性を求める実験は、次のように実施した。3.3項 図3-1に示す試料を前章で示した図2-2の実験装置本体にセットする。試料の軸方向の押し付け荷重は押し付けねじにより加えられ、その大きさはひずみゲージで検出されペンレコーダに記録される。上下試料の接触面間のすきまを通過した漏れ窒素ガスは、前章図2-1の試験回路内を流れるヘリウムキャリアガスによってガスクロマトグラフに導かれる。漏れ窒素ガス量 Q_0 （標準状態量：0.101MPa, 0°C）はガスクロマトグラフにより測定され、漏れ量は式(2.8)の漏れ量換算式によって算出される。

3.3 実験材料

実験に供した材料はガスケットおよびフランジに常用される銅 (C1100B) およびステンレス鋼 (SUS304) で、下試料には鏡面仕上げも施されるため合金工具鋼 (SKS3) も用いた。実験材料の機械的性質、試料の組み合わせとその表面粗さを表3-1、表3-2に、試料の形状と寸法を図3-1に示す。試料の密封面は、旋削、研磨紙による研磨、ラッピングにより仕上げた。旋削仕上げ（渦巻き状）の場合には、超硬バイト（材質：P 10，形状：5°，10°，7°，3°，60°，30°，R mm，ここで R = 1.2, 0.4 mm）を用いて、送り：0.10～0.55 mm/rev，切込み：0.06～0.13 mm，回転数：1000～160 rpm の切削条件で、表面粗さ R_{max} が約 1.5～110 μm になるように加工した。研磨仕上げの場合には、上試料の研磨傷が同一方向になるように研磨紙により仕上げた。実験は、粗い面と滑らかな平面との接触および粗い面同士の接触の組合せを選び、シールの基本特性の違いを明らかにするため、表3-2で示す三つのグループで実施した。なお、グループⅢの

表3-1 実験材料の機械的性質

| Material | | Mechanical properties | | | Heat treatments |
|----------------|--------|-----------------------|-----------------|---------------|--------------------------------------|
| | | Tensile strength | Elon- gation | Hard- ness | |
| | | σ_B | ϵ | Hv | |
| | | MPa | % | | |
| Upper specimen | C1100B | 206 | 62 | 59 | 560°C × 1hr Annealed in vacuum |
| Lower specimen | SUS304 | above 519* | above 40* | 389 | (Goods on market) |
| | SKS3 | ~ | ~ | 858 | Oil-quenched |

注) *印はJIS規格値を示す。

表3-2 試料の組み合わせとその表面粗さ(実験回数)

$R_{max}, \mu m$

| Experimental group | Experimental number | Number of specimens | Upper specimen | | Lower specimen | |
|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | | Material finished | Surface roughness | Material finished | Surface roughness |
| I | 1 | 2 | C1100B Polished | 0.5 | SUS304 Turned | 1.5 |
| | 2 | 2 | | | | 8.0 |
| | 3 | 2 | | | | 14.5 |
| | 4 | 1 | | | | 42 |
| | 5 | 1 | | | | 112 |
| II | 6 | 3 | C1100B Turned | 12.0 | SKS3 Lapped | 1.5 |
| | 7 | 2 | | | | 5.8 |
| | 8 | 2 | | | | below |
| | 9 | 1 | | | | 0.2 |
| | 10 | 2 | | | | 98 |
| III | 11 | 3 | C1100B Turned | 13.0 | SUS304 Turned | 1.5 |
| | 12 | 2 | | | | 6.0 |
| | 13 | 2 | | | | 12.0 |
| | 14 | 1 | | | | 42 |
| | 15 | 2 | | | | 112 |
| | 16 | 1 | | | | 14.5 |

N o. ⑩～⑮ の上下試料の密封面は、同一加工条件で加工したため、旋削山同士が1周で2箇所 of 交差がある接触状態にある。しかし、N o. ⑯では、上試料が右巻き、下試料が左巻きの加工面のため、旋削山同士が交差しない接触状態にある。

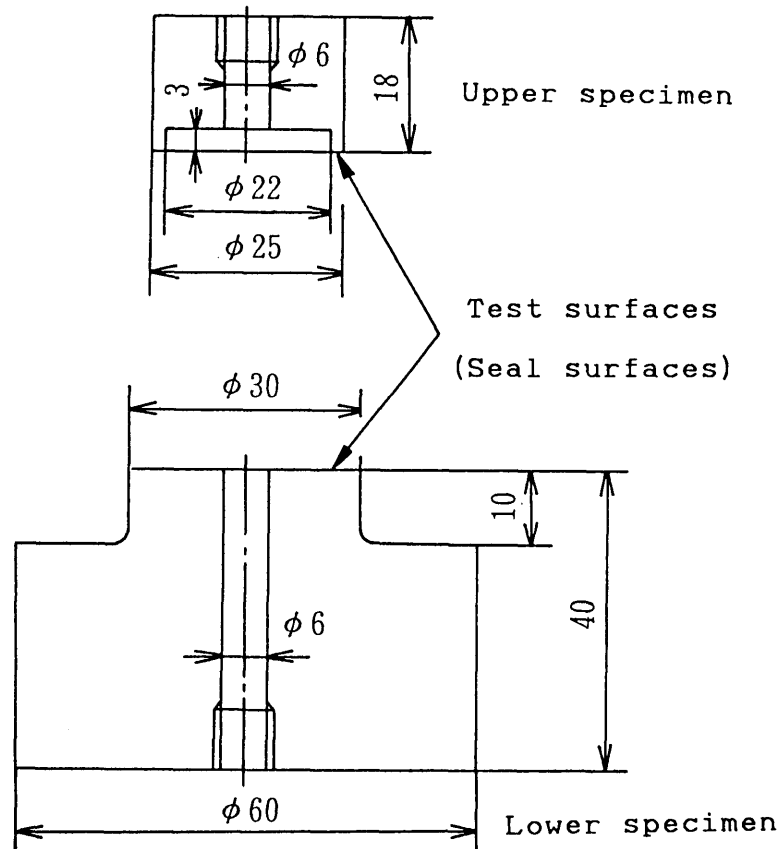
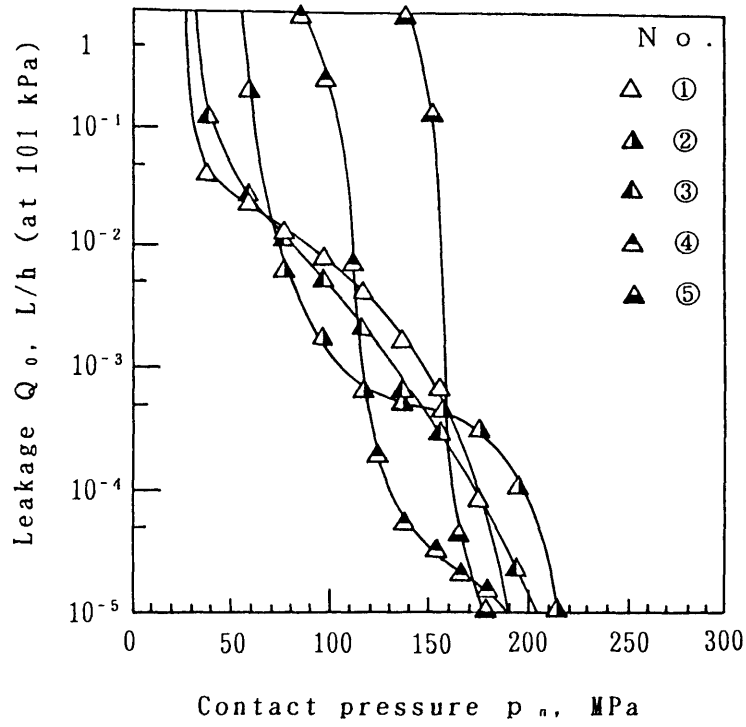


図 3-1 試料の形状と寸法

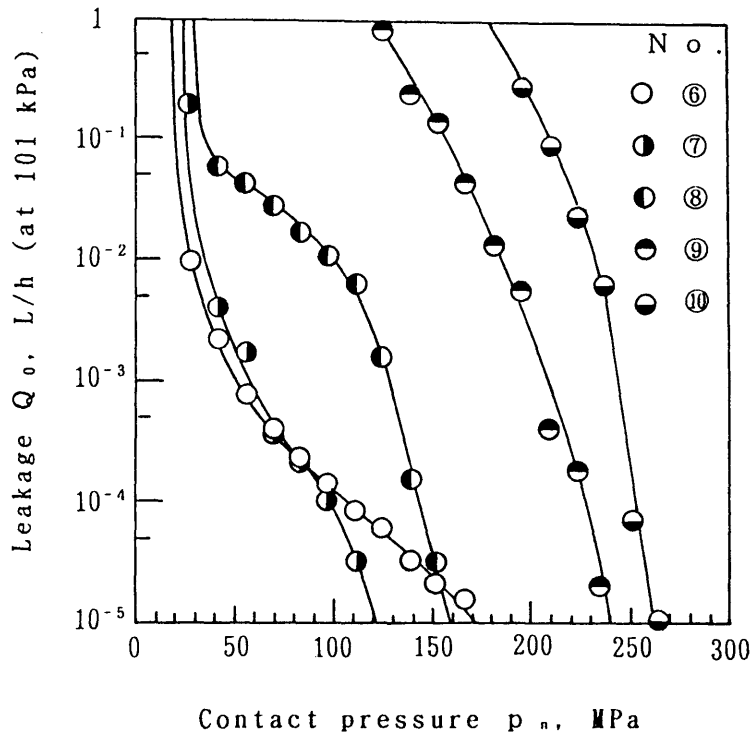
3.4 シールの基本特性およびその考察

3.4.1 シーリング特性

シーリング特性実験は、接触面間からの窒素ガスの漏れ量の減少傾向を測定して行い、シーリング特性を調べた実験結果の一例を図 3-2 に示す。図は接触圧力 p_n ($p_n = P / A_n$ で、 P は押し付け荷重、 A_n は実験前の接触面積) と漏れ量 Q_0 との関係を示す。グループ I

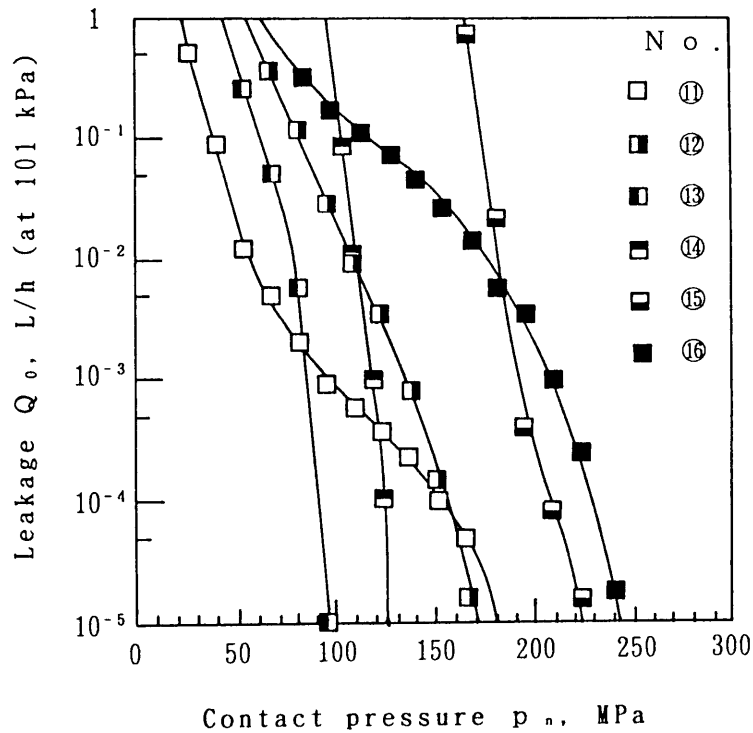


(1) Group I



(2) Group II

図3-2 シーリング特性実験結果



(3) Group III

図3-2 シーリング特性実験結果

の場合、比較的漏れ量の多い $Q_0 \approx 10^{-1}$ L/h に対する p_n は下試料の R_{max} が大きくなるほど (No. ① → ⑤) 高い値をとり、なお p_n の増加に対する漏れ量の減少割合も大きく、言いかえると、 p_n の増し締めに対して密封効果は敏感である。グループ II の場合の Q_0 は、上試料の R_{max} が大きくなるほど (No. ⑥ → ⑩) 多くなる傾向にある。グループ III の場合では、上下試料の R_{max} が中程度の No. ⑬・⑭ の漏れ量の減少割合が急激で、また Q_0 が 10^{-5} L/h 以下になる p_n も低い。

上述の Q_0 の減少傾向の差異については、走査型電子顕微鏡によって上試料面を観察した結果から、次のような考察を行った。まず、各グループとも銅材の上試料は圧着初期段階で接触面において塑性

変形し、 Q_0 が減少する。さらに p_n を増加すれば、図3-3に示すように、塑性変形が試料全体に生じて接触面近傍では太鼓形となる。このような状態では Q_0 は 10^{-5} L/h以下となっている。次に、各グループについて考察すると、グループIの場合、下試料の旋削山突起が、上試料の銅材研磨面にくい込み、接触面の銅材の横方向への移動を妨げる（図3-3でグループIの d_2 寸法が d_1 寸法よりわずかに小さいのは、このことを示す）。このため、塑性変形が上試料全体

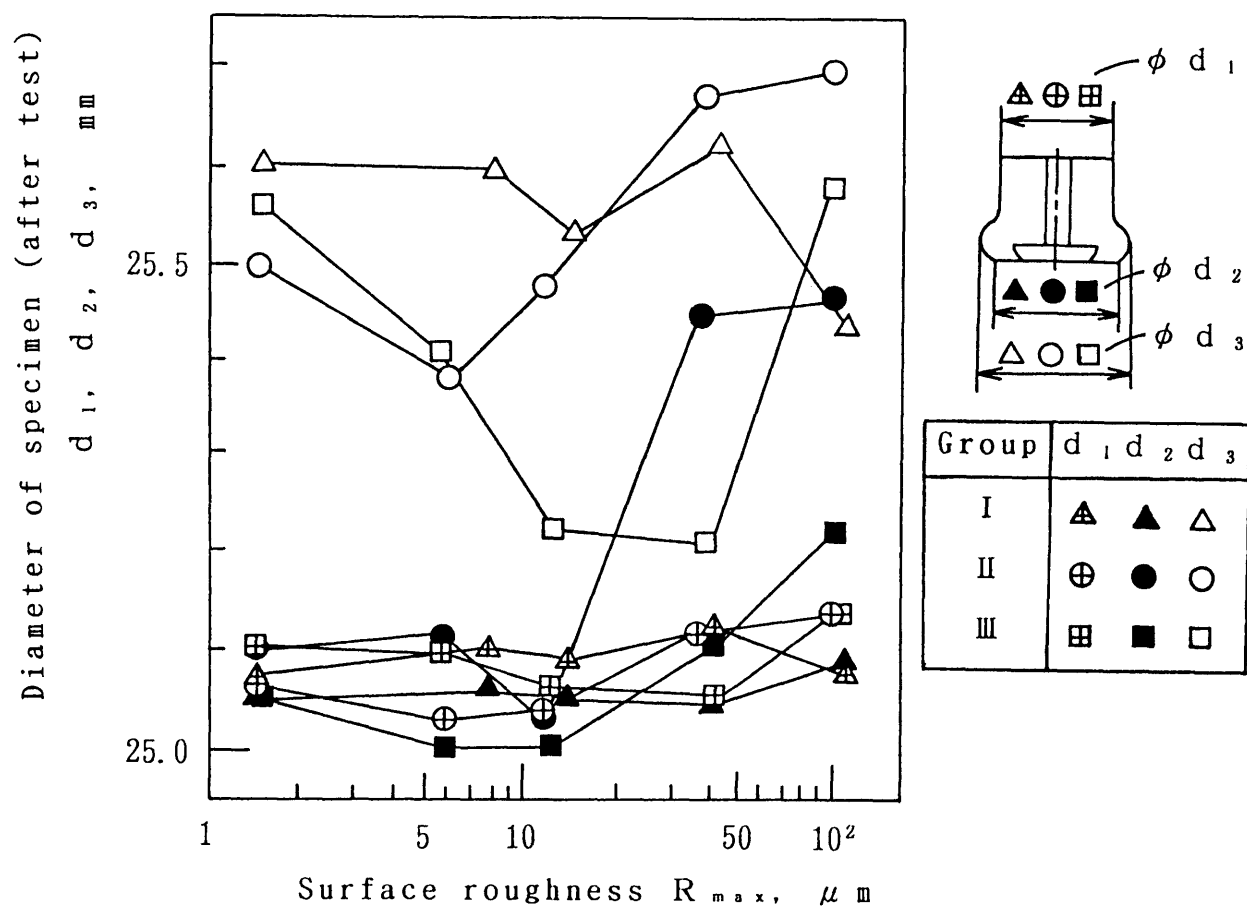
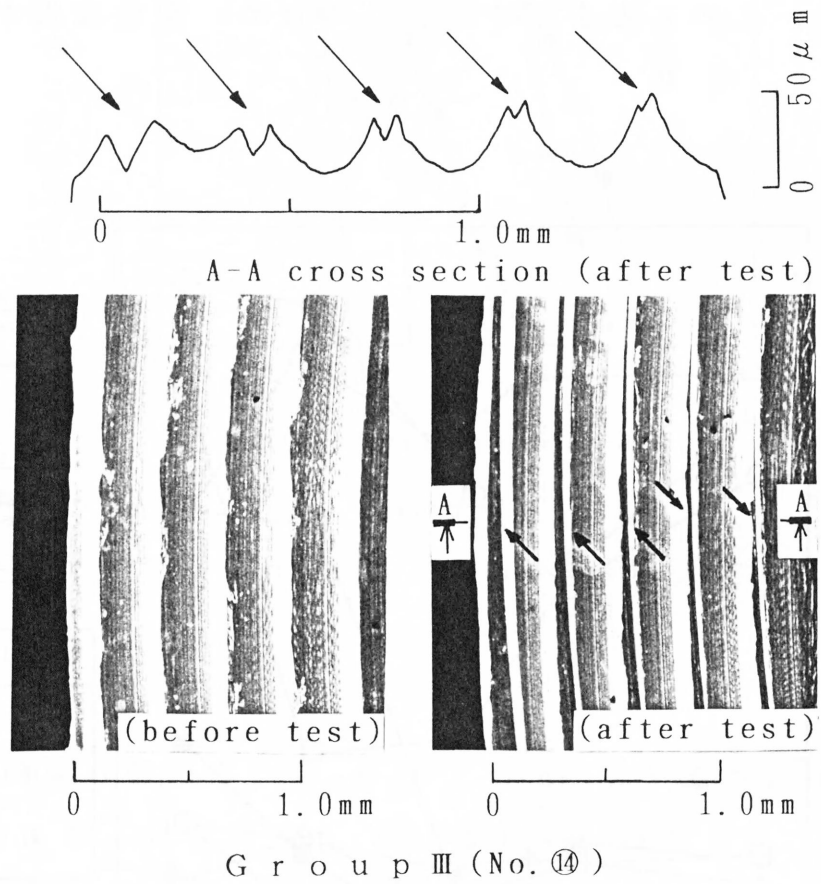


図3-3 実験後の上試料の外径寸法



注) ↘印はステンレス材の旋削山突起によるくぼみを示す。

図3-4 上試料の接触面状態 (実験前後)

に生ずると、塑性変形量が接触面外周部で多くなり、旋削溝に沿った漏れ通路は接触面外周部で閉塞される。この閉塞は R_{max} 値に関係なく、同程度の p_n になると生じるため、 p_n の増加に対する漏れ量の減少割合は、 R_{max} の増加に伴って、大きくなると考える。グループⅡの場合では、上試料の銅材旋削山突起は下試料のラップ鏡面に押しつぶされると同時にわずかに横すべりをする（図3-3でグループⅡの d_2 寸法が d_1 寸法より大きいのは、この横すべりを示す）。このため塑性変形が試料全体に生じてても、銅材接触面が横すべりをするため、漏れ通路が接触面外周部で徐々に閉塞される。その結果、 Q_0 は上試料の R_{max} が大きくなるほど多くなる傾向になると考える。グループⅢの場合には、 R_{max} が中程度のNo.⑬・⑭で、低い p_n で漏れ量が急減する理由を次のように考える。すなわち、No.⑪～⑮の上下試料は旋削山同士が1周で2箇所の変差がある接触状態にあるため、図3-4に示すように、ステンレス材の旋削山突起が、銅材の旋削山および谷部に食い込み、漏れ通路を閉塞する。この際、密封面におけるうねりやむしれなどが小さく、また同程度の表面粗さであるとき、この旋削山同士の閉塞による密封効果が顕著になる。No.⑬・⑭の場合には、この条件を満足する密封面状態に加工することが容易であるためと考える。さらに、No.⑬と旋削山同士が交差しない接触状態のNo.⑯とを比較すれば、両組の R_{max} は約 $12\mu m$ と等しいが、No.⑬の Q_0 はNo.⑯に比べて格段と少なくなっており、この密封効果の影響を確認できる。

3.4.2 設定接触圧力および設定押し付け力の定義

ここでは、許容漏れ量を設定し、接触面間からの漏れ量を設定許容値以下に留めるのに必要な接触圧力を設定接触圧力 $p_c (= P_c / A_c)$ と、また単位長さ当たりの押し付け力を設定押し付け力 P_c / l と定義する。ただし l は接触面の接触部の長さを示す。後者の P_c / l は第4章以降で検討される。 P_c は設定許容漏れ量に対する押し付け荷重、 A_c は実験後の接触面の接触面積を示す。ここに、設定許容漏れ

量 Q_c を $Q_c \leq 10^{-5}$ L/h (0.101 MPa, 0°C の標準状態量) とした。この数値は, (1) ガスクロマトグラフの測定下限値, (2) 実効排気速度 200 L/s の高真空排気装置をもつ真空系では, Q_c の分圧を約 10^{-6} Pa に保持できる状態である。さらに本実験の Q_c は, 供給圧 = 882 kPa, 出口圧 = 39 kPa (ともにゲージ圧) における値で, 粘性流の仮定で大気圧から真空への漏れ量に換算すれば, 約 1/100 に減少し, より低い分圧値を示すことが予想される。

3.4.3 設定接触圧力について

図3-2の実験結果から求まる設定接触圧力 p_c (図3-2で, $Q_0 \leq 10^{-5}$ L/h に対する p_n 値) に対して R_{max} との関係を図3-5に示す。

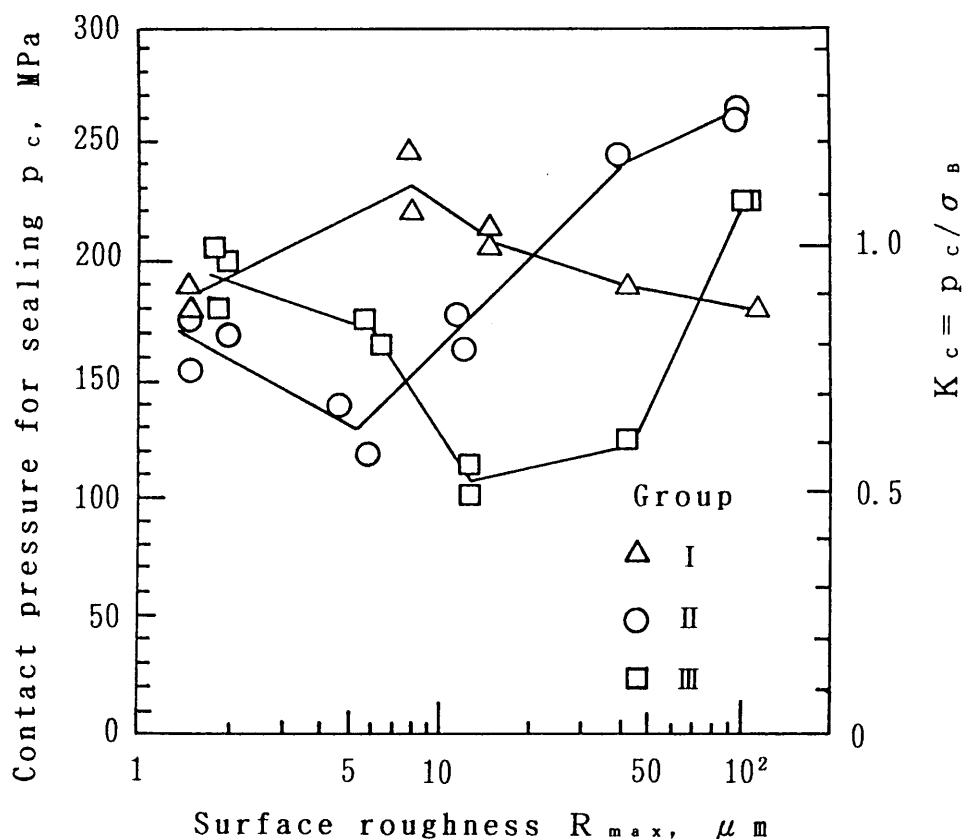


図3-5 p_c と R_{max} および K_c と R_{max} の関係

なお図中には、無次元数 $K_c = p_c / \sigma_B$ を縦軸に記載してある。ここで σ_B は銅材の引張強さである。従来、メタルシールの設定接触圧力をどの程度にすれば、密封が可能になるかということが問題となっており、メタルシールを設計する際にその値が必要となる。図3-5によれば、 p_c は軟質材料の引張強さ ($\sigma_B = 206 \text{MPa}$, 表3-1参照) の近傍値となっているので、実用的な観点から考えて、その設定接触圧力の目安として、 p_c を σ_B で整理する。図から、グループ I の p_c は、 $R_{max} \approx 8 \mu\text{m}$ の近傍ではやや高いが、 R_{max} に関係なく全体として $p_c \approx 200 \text{MPa}$ でほぼ一定値を示す。グループ II の p_c は $R_{max} \approx 6 \mu\text{m}$ の近傍でわずかに低くなるが、全体として R_{max} の増加につれて p_c も高くなる傾向になる。グループ III は、ある範囲の R_{max} (実験では約 $10 \sim 50 \mu\text{m}$) で p_c は最も低くなっており、それより R_{max} が小さくなくても大きくなっても p_c は高くなる傾向にある。このことは前節で述べた旋削山同士の交差による密封効果の影響が現れていると考える。

また図から、上下試料の R_{max} が約 $1.5 \sim 110 \mu\text{m}$ の範囲では、 K_c は $0.5 \sim 1.3$ の値を示す。密封面の表面粗さに関しては、従来から金属ガスケット装着時では密封箇所表面粗さをできるだけ小さくする必要がありといわれ、普通は 6.3S 以下⁽¹⁸⁾、特別な場合で 0.3S 以下⁽¹⁹⁾ が要求されるという報告もある。ここで実際に採用するときの密封面の粗さ範囲としては、本実験のような $50 \mu\text{m}$ 以上の表面粗さは考えられない。このことを考慮すれば R_{max} に関係なく普通の金属ガスケット面は $K_c \leq 1$ に納まっている。

3.5 結言

静的メタルシールの基本特性を調査する目的で、ガスケットを装着しないで金属平面同士を圧着する基礎実験を行い、金属平面同士からなるシールの密封面の表面粗さが設定接触圧力に及ぼす影響について検討した。得られた結果は次の通りである。

(1) 接触面からの漏れを許容量以下に留めるのに必要な設定接触

圧力 p_c は、材質の組み合わせ（銅とステンレス鋼、銅と合金工具鋼との組み合わせ）や表面粗さ（ただし、 $R_{max} < 50 \mu m$ ）に関係なく、軟らかい材質（銅）の引張強さ σ_B 以下である。すなわち、 $K_c = p_c / \sigma_B$ と定義して、設定接触圧力を無次元表示すれば、 $R_{max} < 50 \mu m$ の範囲で $K_c \leq 1$ となる。

(2) 銅を研磨紙による研磨仕上げ、相手材のステンレス鋼を旋削仕上げした場合（通常の金属平形ガスケット装着状態に相当）には、ステンレス鋼の表面粗さ（ $R_{max} \approx 2 \sim 110 \mu m$ ）に関係なく、 $K_c \approx 1$ と大略一定値を示す。

(3) 銅とステンレス鋼の密封面をともに旋削仕上げで同一表面粗さの組み合わせ（ $R_{max} \approx 2 \sim 110 \mu m$ ）の場合には、 R_{max} が約 $10 \sim 50 \mu m$ の範囲内で $K_c \approx 0.5$ と最小となる。この理由は、旋削山同士の交差による密封効果が顕著になるためと考える。

- 金属ガスケットの場合 -

4.1 緒言

前章では、静的メタルシールの基礎実験として、ガスケットを装着しないで金属平面同士からなる密封面を圧着する場合の漏れ減少挙動に関するシーリング特性実験を行い、密封面の表面粗さがシールの基本特性に及ぼす影響に関して実験的に調べた。

本章では、静的メタルシールとして、実際に多用される金属ガスケットの密封性能について、ガスケットの形状、密封面の加工方法および表面粗さを変化させ、それぞれに対するシーリング特性を調べ、設定接触圧力と密封面の表面粗さとの関係について検討する。さらに、実用上での設定押し付け力についても検討を加える。

4.2 実験装置および実験材料

4.2.1 実験装置

前章では金属平面同士からなるシールのシーリング特性を調べる実験を実施した。本章では、金属平面間に金属ガスケットを挿入して(図4-2参照)、金属ガスケットシールに対するシーリング特性実験を実施する。実験装置、実験装置本体、窒素ガス流れに対する装置上の注意、漏れ窒素ガスの計測要領および漏れ窒素ガス量の算出要領などは第3章と同様である。

4.2.2 実験材料

実験材料の機械的性質、実験材料の諸元、試料の組み合わせとその表面粗さを表4-1～表4-3に、銅線ガスケットの成形方法および試料の形状と寸法を図4-1および図4-2にそれぞれ示す。平形ガスケット、リングジョイントガスケット(形状はオーバル形で以下オーバル形ガスケットという)は旋削加工後、研磨砥粒を含浸させたナイロン不織布で研磨したもので、 $R_{max} < 1.5 \mu m$ である。銅線ガスケッ

トは線径 1 mm, 純度 99.90% 以上の極軟質材で, その特徴は密封箇所
の寸法に合わせて容易に自作できる簡便性に着目したもので, 線
材を適当な長さに切断して成形する一種の O リング (ただし耳が付
く) である。その成形方法は, 図 4-1 に示すように, 線材を適当な
長さに切断して, $\phi 20$ の丸棒に巻き付けて合わせ部を手で半ひねり
し, 厚さが線径と同程度になるようにプレスジグを使って初期成形
を行う。平形ガスケット, オーバル形ガスケット, 銅線ガスケット
のガスケット内径は 20 mm である。上下試料はラッピングおよび渦巻
き状の旋削仕上げで, 旋削の加工条件は前章と同じである。

表 4-1 実験材料の機械的性質

| Material | | Mechanical properties | | | Heat treatments |
|----------|--------|-----------------------|-----------------|---------------|--------------------------------------|
| | | Tensile strength | Elon- gation | Hard- ness | |
| | | σ_B | ϵ | Hv | |
| | | MPa | % | | |
| Gasket | C1220P | 248 | 36 | 63 | 560°C x 1hr Annealed in vacuum |
| | C1220W | 246 | 38 | 80 | |
| Specimen | SUS304 | above 519* | above 40* | 389 | (Goods on market) |
| | SKS3 | ~ | ~ | 858 | Oil- quenched |

注) *印は JIS 規格値を示す。

表4-2 実験材料の諸元

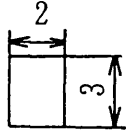
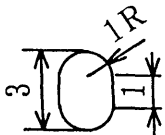

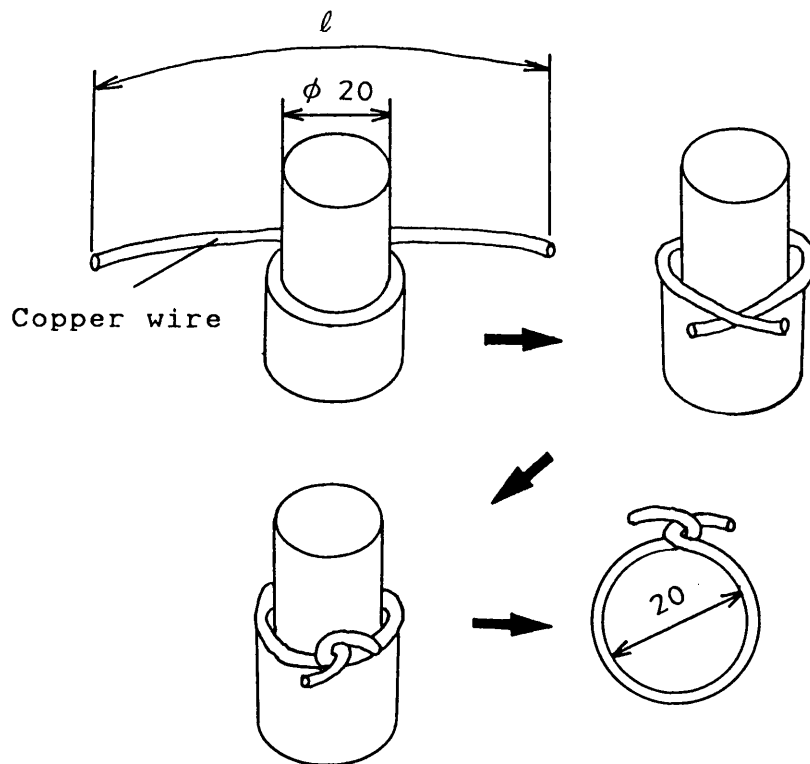
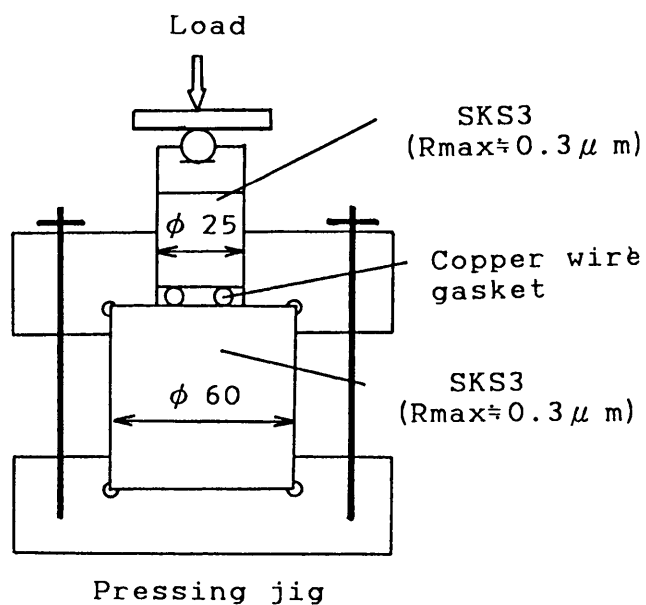
| Item | Gasket | | | Specimen |
|---------------------|---|---|---|--------------|
| Mateiral | C1220P | | C1220W | SUS304, SKS3 |
| Form | Flat | Oval | Copper wire | Plane |
| Shape and Dimension |  |  |  | |

表4-3 試料の組み合わせとその表面粗さ(実験回数)

| Level | Surface roughness: $R_{max}, \mu m$ | | Number of experiments | | |
|-------|-------------------------------------|----------------|-----------------------|------|-------------|
| | Upper specimen | Lower specimen | Flat | Oval | Copper wire |
| 0.3 | below 0.3 (Lapped) | | 2 | 3 | 1 |
| 2 | 2.2 | 1.9 | 1 | 2 | 0 |
| 4 | 3.8 | 4.1 | 1 | 2 | 0 |
| 6 | 6.0 | 6.8 | 1 | 3 | 2 |
| 10 | 12.7 | 14.3 | 2 | 2 | 1 |
| 20 | 21.2 | 22.5 | 1 | 1 | 1 |
| 40 | 43.3 | 43.7 | 1 | 1 | 0 |
| 80 | 76.7 | 75.7 | 1 | 2 | 1 |
| 110 | 103 | 112 | 2 | 1 | 1 |
| 170 | 159 | 176 | 2 | 0 | 1 |
| 220 | 224 | 208 | 2 | 0 | 1 |



| | |
|----------------------------------|---------|
| Load | 1.96 kN |
| Pressing time | 2~3 min |
| Thickness of the twisted portion | 1.14 mm |



注) 銅線ガスケットの成形方法：銅線をφ20の丸棒（ジグ）に巻き付けて合わせ部を手で半ひねりし，厚さが線径と同程度になるようにプレスする。

図4-1 銅線ガスケットの成形方法

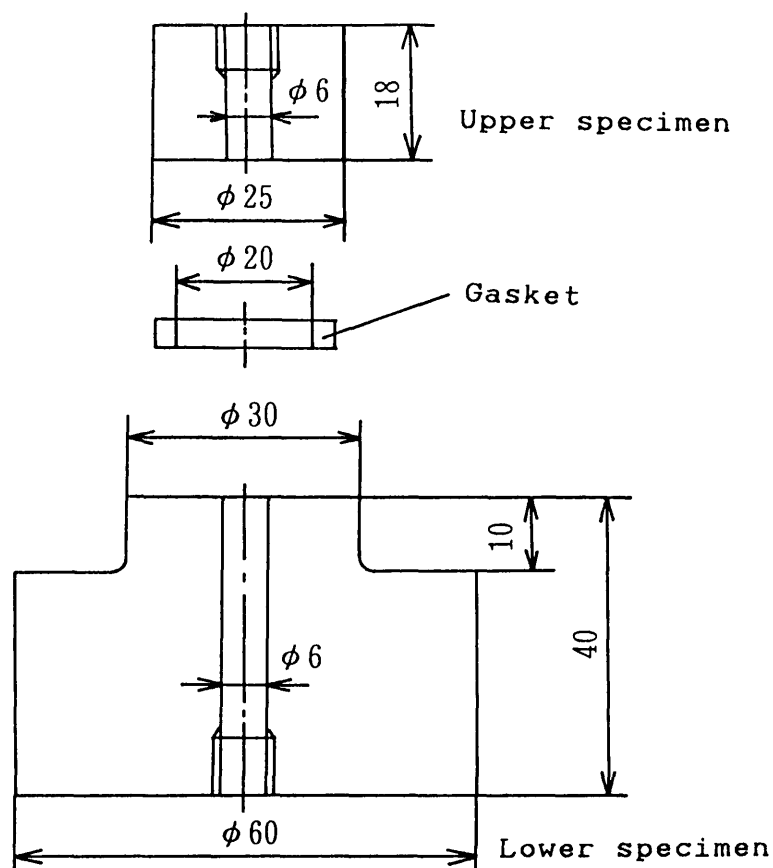


図4-2 試料の形状と寸法

4.3 シールの基本特性およびその考察

4.3.1 金属ガスケットのシーリング特性

図4-3は、漏れ量の減少挙動に関するシーリング特性を調べた実験結果の一例である。図は押し付け力 P/l (P は押し付け荷重、 l はガスケット接触部の周長で平形とオーバル形ガスケットでは69mm、銅線ガスケットでは80 mm) と漏れ量 Q_0 (0.101MPa, 0°Cの標準状態量) の関係である。上下試料の粗さが同じである組み合わせに対するシーリング特性実験を数回行った場合は、ほぼ同一のシーリング特性を示した。図より、比較的漏れ量の多い $Q_0 \approx 10^{-1}$ L/h に対す

る P/ℓ 値および P/ℓ の増加に対する漏れ減少割合について次のことがわかる。

(a) 平形ガスケットの場合：（図4-3(a)） $Q_0 \approx 10^{-1}$ L/hにおいて比べると， R_{max} が大きくなるほど P/ℓ が高い値をとり，また Q_0 の減少割合も R_{max} が大きいほど大きくなる傾向にある。このことは前章の基礎実験グループ I（銅材を研磨紙による研磨仕上げ，相手面を旋削仕上げの組み合わせ）の Q_0 の減少傾向と類似している。

(b) オーバル形ガスケットの場合：（図4-3(b)）一定押し付け力（ P/ℓ ）のもとで， Q_0 は $R_{max} \approx 0.3 \mu\text{m}$ よりも $R_{max} \approx 2 \sim 20 \mu\text{m}$ のほうがわずかに少なく（ただし $R_{max} \approx 20 \mu\text{m}$ の場合， Q_0 は約 10^{-4} L/h以下の微小漏れ量で $R_{max} \approx 0.3 \mu\text{m}$ よりも少ない）， $R_{max} > 20 \mu\text{m}$ では R_{max} が大きくなるほど多くなる傾向にある。

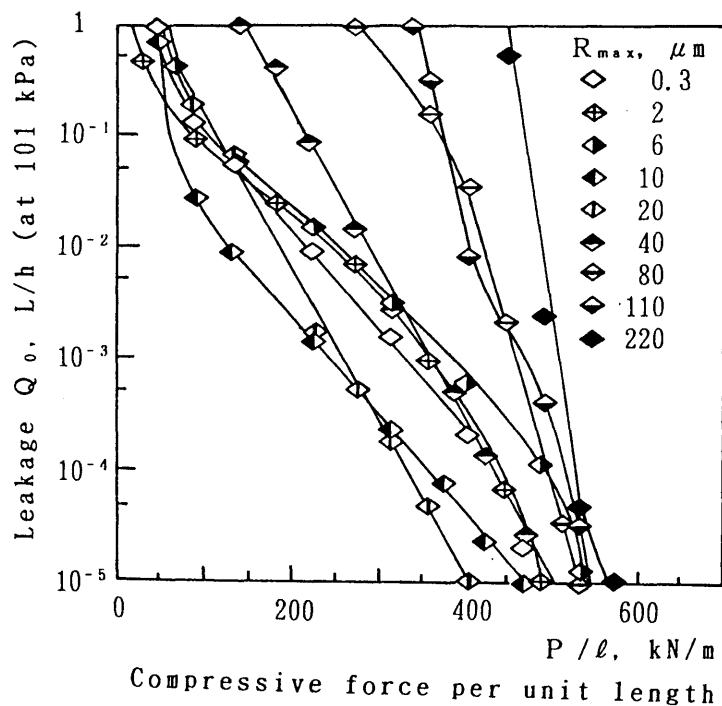
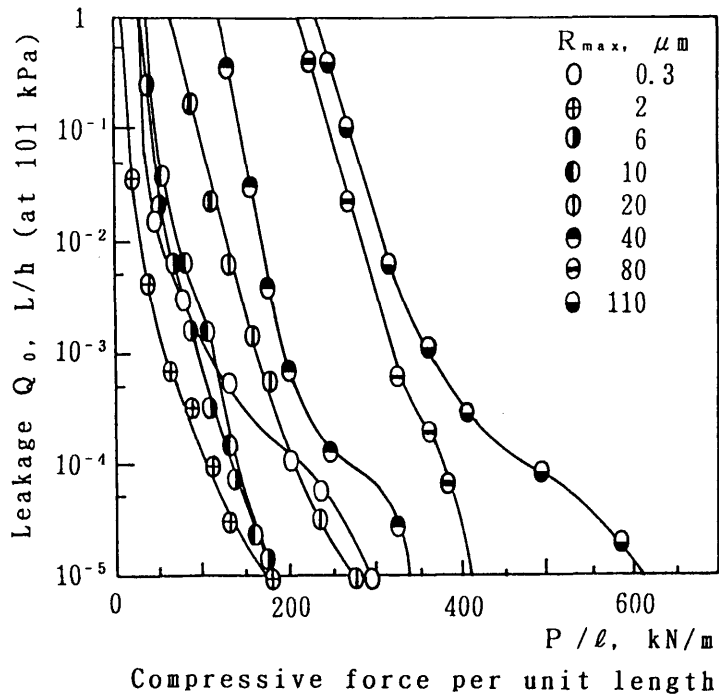
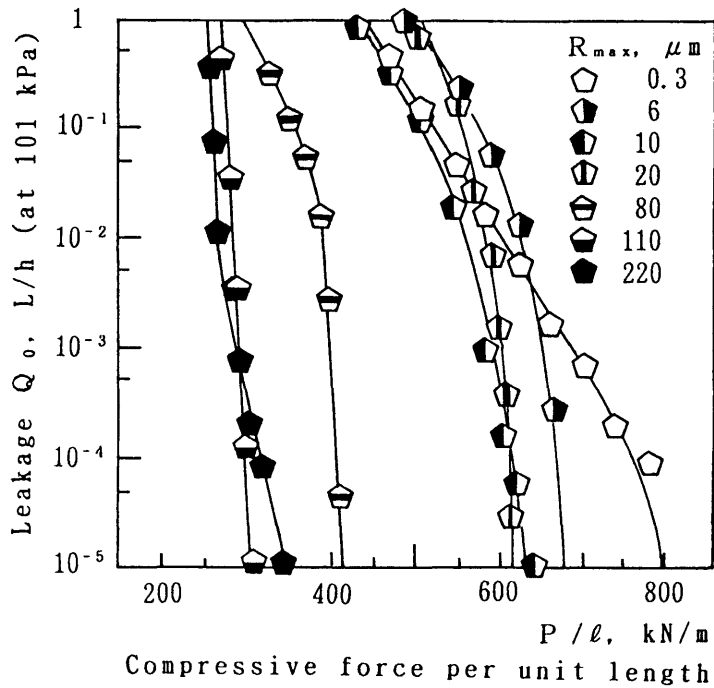


図4-3 シーリング特性実験結果



(b) オーバル形ガスケット



(c) 銅線ガスケット

図4-3 シーリング特性実験結果

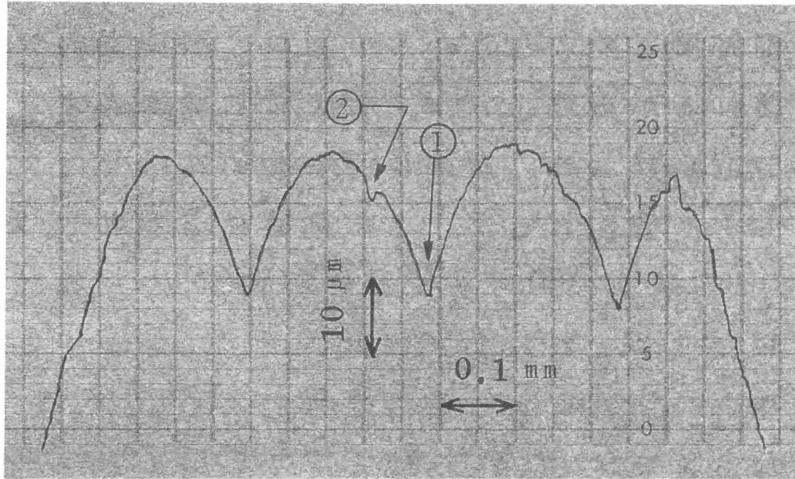
(c) 銅線ガスケットの場合： (図4-3(c)) 上述の二例とは逆に， $Q_0 \approx 10^{-1}$ L/hにおいて比べると， R_{max} が大きくなると P/l が低い値をとり， P/l の増加に対する Q_0 の減少割合は R_{max} が大きいほど大きくなる傾向にある。

実験後におけるオーバル形ガスケットおよび銅線ガスケット合わせ部の接触面を図4-4に示す。試料の旋削山突起がガスケットにくい込み，漏れ通路となるオーバル形ガスケット表面における放射状傷および銅線ガスケット合わせ部の溝が閉塞されている箇所が見受けられる。

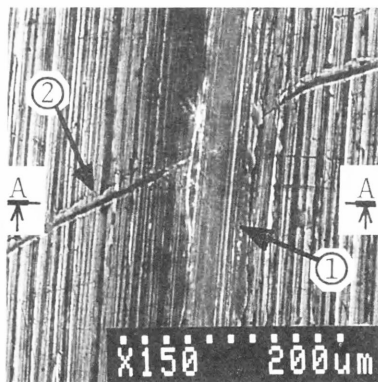
走査型電子顕微鏡 (SEM) によるガスケット接触面の観察結果より，上述した(a)~(c)における Q_0 の減少傾向に関する差異については次のように考える。

(a) の場合には，シーリング機構は前章の基礎実験グループ I の結果とほぼ同じである。すなわち，押し付け初期段階で，試料の旋削山突起がガスケットにくい込み，接触面におけるガスケット材の半径方向への移動を妨げる。さらに P/l を増加すれば，ガスケットは全体的に塑性変形して太鼓形となり，ガスケット表面上の傷（深さ $1.5 \sim 5 \mu\text{m}$ ）および試料の旋削谷部とガスケットとのすきまの漏れ通路はガスケット内外周部で閉塞される。その結果， R_{max} が大きくなるほど Q_0 の減少割合も大きくなると考える。

(b) の場合には， Q_0 が $R_{max} \approx 2 \sim 20 \mu\text{m}$ で少なくなっている理由を次のように考える。まず $R_{max} \leq 20 \mu\text{m}$ では，ガスケット表面上の傷が問題となる。すなわちガスケット表面上には同心円状の仕上研磨傷（深さ約 $1.5 \mu\text{m}$ ）と取扱い時につく放射状の傷（深さ約 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ ）がある。ラップ鏡面との押し付けでは，ガスケット接触面が平らに塑性変形されてもこれらの傷は残り，傷による漏れ通路は閉塞されにくい。しかし，旋削面との押し付けでは，図4-4(a)に示したように，試料の旋削山突起がガスケットにくい込み，放射状傷による漏れ通路を閉塞し Q_0 を抑制する。このため $R_{max} \approx 2 \sim 20 \mu\text{m}$ の Q_0 は $R_{max} \approx 0.3 \mu\text{m}$ よりも少なくなる。一方 $R_{max} > 20 \mu\text{m}$ では，ガスケットと試料

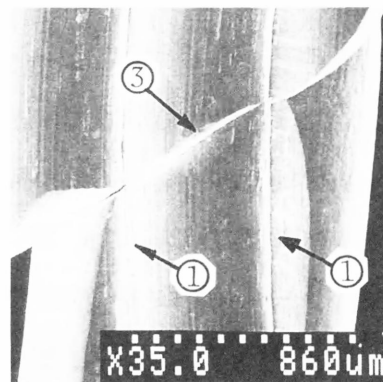


A-A cross section



$R_{max} \approx 20 \mu m$

(a) オーバル形ガス
ケット



$R_{max} \approx 110 \mu m$

(b) 銅線ガスケット
(合わせ部)

注) ①は試料の旋削山突起によるくぼみ, ②はガスケット表面の放射状傷, ③は半ひねり成形による合わせ部の溝を示す。

図4-4 ガスケット接触面の試料の旋削山突起による密封効果

の旋削谷部のすきまからの漏れが支配的となる。ガスケットは P/ℓ の増加に伴って塑性変形し旋削谷部を埋める、すなわち、ガスケットのなじみ性によって漏れ通路が閉塞される。この閉塞に必要な P/ℓ は、 R_{max} の増加につれて高くなるため、 Q_0 も多くなると考える。

(c) の場合には、接触面間からの漏れには、銅線ガスケット線部と試料の旋削谷部とのすきまからの漏れと銅線ガスケット合わせ部の溝からの漏れとがある。 P/ℓ を加えると線部のすきまが早く閉塞され溝部の閉塞が遅れる。溝部は図4-4(b)に示したように試料の旋削山群によって閉塞されるが、この閉塞に必要な P/ℓ は、試料の R_{max} が溝部（実験前の溝寸法は深さが約 $10\mu\text{m}$ 、幅が約 $200\mu\text{m}$ ）の深さ寸法と同程度かそれ以上では低いが、 R_{max} が小さくなれば高くなる。この溝部の閉塞による密封効果のため、 Q_0 は R_{max} が大きいほど少なくなると考える。

4.3.2 設定押し付け力について

ここでは、設定押し付け力 P_c/ℓ （第3章3.4.2項で定義）と密封面の表面粗さ R_{max} の関係について検討する。

図4-3の実験結果から求まる P_c/ℓ ($Q_0 \leq 10^{-5} \text{L/h}$ に対する P/ℓ 値) に対して R_{max} との関係を図4-5に示す。平形ガスケットの P_c/ℓ は、 $R_{max} \geq 80\mu\text{m}$ では R_{max} の増加につれてやや高くなる傾向にあるが、全体として R_{max} に関係なく $P_c/\ell \approx 530 \text{ kN/m}$ でほぼ一定値を示す。オーバル形ガスケットの場合、 $R_{max} \approx 2 \sim 20\mu\text{m}$ で $P_c/\ell \approx 210 \text{ kN/m}$ と最も低くなっており、それより R_{max} が小さくなくても大きくなっても P_c/ℓ は高くなる傾向にある。このことは、前節で述べたガスケット表面の傷による密封効果とガスケットのなじみ性の影響が表われている。ちなみに、中空リングガスケットの研究⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾でも同様な結果が報告されている。銅線ガスケットの P_c/ℓ は、 R_{max} が大きくなると低くなり、 $R_{max} \geq 110\mu\text{m}$ で $P_c/\ell \approx 360 \text{ kN/m}$ とほぼ一定値を示し、前項で述べた合わせ部の溝の密封効果の影響が現れていると考える。

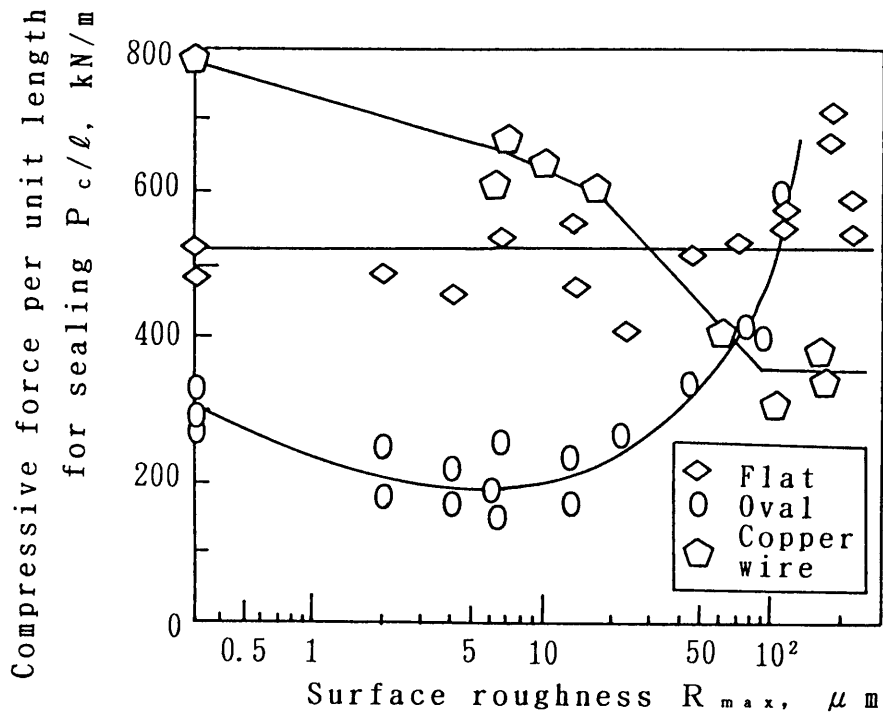


図 4-5 P_c/l と R_{max} の関係

4.3.3 設定接触圧力について

ここでは、設定接触圧力 p_c (第3章3.4.2項で定義) と密封面の表面粗さ R_{max} の関係について検討する。

p_c と R_{max} の関係を図4-6 に示す。なお図中には無次元数 $K_c = p_c / \sigma_B$ を縦軸に記載してある。ここで、 σ_B はガスケット材の引張強さである。平形、オーバル形ガスケットの p_c は、 R_{max} に関係なく、それぞれ約250, 300 MPaでほぼ一定値を示す。一方銅線ガスケットの p_c は $R_{max} \approx 0.3 \sim 20 \mu m$ よりも $R_{max} \geq 110 \mu m$ で低く、それぞれほぼ一定値を示す。これは前節で述べた合わせ部の、溝の密封効果のためと考えるが、半ひねり成形された合わせ部は線部よりも硬

いので、合わせ部による深さ約 $60\mu\text{m}$ 以下のくぼみが $R_{\text{max}} < 80\mu\text{m}$ のステンレス密封面の接触部に生じた。この変形は密封面の再利用性という観点から避けるべきであり、銅線ガスケットの有効な p_c は $R_{\text{max}} \geq 110\mu\text{m}$ で約 350MPa を示すと考える。

したがって、本実験の粗さ範囲内の有効な K_c 値は、前述の理由から、約 $0.8 \sim 1.5$ を示すと考える。なお平形ガスケットの K_c は基礎実験値と同じく $K_c = 1$ である。ここで特殊な半ひねり成形の銅線ガスケットの値を除けば、一体形のガスケットでは R_{max} およびガスケット断面形状に関係なくほぼ $K_c \leq 1.3$ となっている。

なお、図4-6の平形ガスケットの p_c 値はオーバル形ガスケットよ

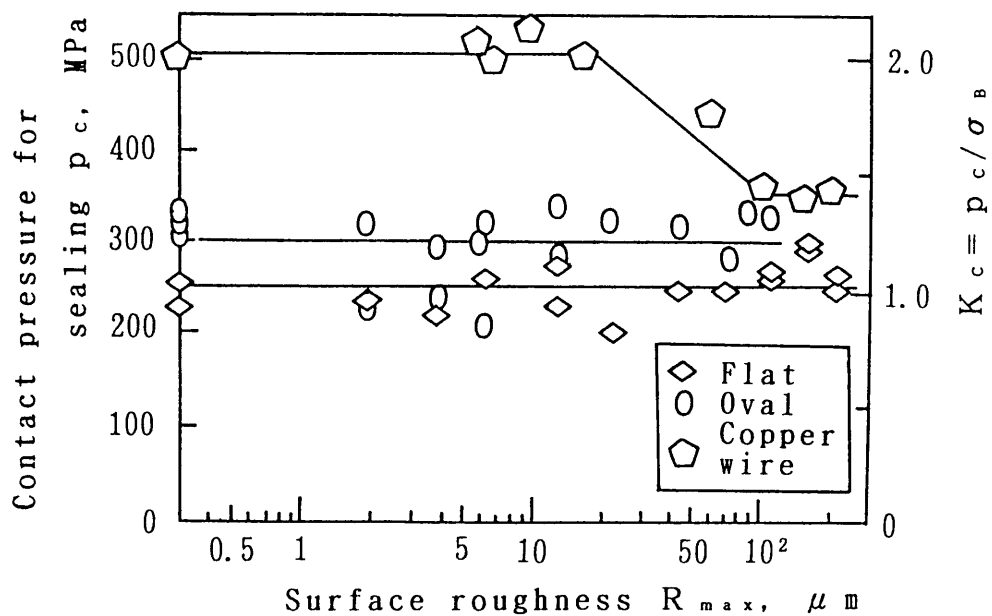


図4-6 p_c と R_{max} および K_c と R_{max} の関係

り低く、図4-5の P_c/l 値の大小関係と逆になっている。この理由として、SEM観察より密封面の接触部における接触面積の差が考えられる。実験後の平形ガスケットは見かけ上の接触面の中央部で試料の旋削谷部と接触していない箇所が見受けられるが、オーバル形ガスケットは見かけ上の接触面全域でほぼ接触状態にある。ところが p_c は P_c を実際に接触していない面積も含めた見かけ上の接触面積 A_c で割った値であるから、平形ガスケットの p_c はオーバル形ガスケットより低くなると考える。

4.4 結言

金属ガスケットからなるシールの基本特性を得ることを目的として、ステンレス鋼あるいは合金工具鋼で作製した金属平面間に銅の金属ガスケットを挿入した場合の、シーリング特性を調べる実験を行い、金属平面の表面粗さが設定接触圧力および設定押し付け力に及ぼす影響について検討した。得られた結果は次の通りである。

(1) 一体形ガスケットの設定接触圧力は、金属平面の表面粗さ ($R_{max} \approx 0.3 \sim 224 \mu m$) およびガスケット断面形状 (平形, オーバル形) に関係なくそれぞれ一定値を示し、 $K_c \leq 1.3$ である。

(2) 平形ガスケットの場合、表面粗さ ($R_{max} \approx 0.3 \sim 224 \mu m$) に関係なく $K_c \approx 1$ と大略一定値を示す。

(3) 銅線を半ひねり成形したガスケットの場合、 K_c は R_{max} が大きくなると低くなり、有効な K_c は $R_{max} \geq 110 \mu m$ で $K_c \approx 1.5$ となる。この理由は、合わせ部の溝に対する密封効果のためと考える。すなわち、金属密封面の旋削山突起群が、ガスケット合わせ部の溝部に食い込み、溝部の漏れ通路を閉塞するためである。

(4) オーバル形ガスケットの場合、設定押し付け力 P_c/l は、 $R_{max} \approx 2 \sim 20 \mu m$ で最小値が得られ、その値は $P_c/l \approx 210 kN/m$ である。この理由は、金属密封面の旋削山突起群が、ガスケット表面に食い込み、ガスケット表面に存在する放射状傷による漏れ通路を閉塞し、また、ガスケットが塑性変形することにより、金属密封面の旋削谷

部の漏れ通路が埋まるためである。

第5章 シールの基本特性(3) (41)

— 硬いくさび形突起と軟らかい平面の組み合わせ —

5.1 緒言

静的メタルシールの基本特性について、第3章では密封面が金属平面同士からなる場合の、密封面の表面粗さがシールの基本特性に及ぼす影響を、第4章では密封面が金属ガスケットからなる場合の、密封面の表面粗さがシールの基本特性に及ぼす影響を実験的に調べた。その結果、ほぼ同一表面粗さに旋削仕上げした密封面の組み合わせでは、硬い旋削山からなる表面粗さ突起が密封には効果的であることが、明らかになった。

本章では、硬い旋削山突起群の単一突起に相当する、いわゆる硬い環状くさび形シールについて、そのくさびの半頂角、密封平面の表面粗さおよび加工方法を変化させて、漏れ減少挙動に関するシーリング特性実験を行い、密封面の表面粗さがシールの基本特性に及ぼす影響について、さらに詳細に実験的に検討する。

5.2 実験材料および実験方法

実験装置、実験装置本体、窒素ガス流れに対する装置上の注意、漏れ窒素ガスの計測要領および漏れ窒素ガス量の算出要領などは第3章、第4章と同様である。

実験材料の機械的性質、上試料の密封面の表面粗さの一例および試料の形状と寸法を表5-1、表5-2、図5-1にそれぞれ示す。実験は、くさび形突起のシールの基本特性を明らかにするため、表5-2で示す組み合わせで実施した。下試料のくさび形突起は旋削加工後、半頂角 α が $15\sim 60^\circ$ の場合には環状くさび形突起の周方向に研磨紙仕上げを施し、また、 α が 90° の場合には突起先端部を平らにするため、平面ラッピング仕上げを施した。突起先端部の表面粗さは、スキッドなしの状態の触針式表面粗さ測定機で計測した。 α が $15\sim 60^\circ$ の

表 5-1 実験材料の機械的性質

| Material | | Mechanical properties | | | Heat treatment |
|----------------|--------|-----------------------|-----------------|---------------|--------------------------------------|
| | | Tensile strength | Elon- gation | Hard- ness | |
| | | σ_B | ϵ | Hv | |
| | | MPa | % | | |
| Upper specimen | C1100B | 212 | 64 | 59 | 560°C x 1hr Annealed in vacuum |
| Lower specimen | S55C | above 392* | above 15* | 267 | (Goods on market) |

注) *印はJIS規格値を示す。

表 5-2 上試料の密封面の表面粗さ

| Material finished | Surface roughness : $R_{max}, \mu m$ | | | | | |
|----------------------|--------------------------------------|---------------------------|------|------|------|------|
| | Level | Apex semiangle : α | | | | |
| | | 15° | 30° | 45° | 60° | 90° |
| Turned | 2 | 2.5 | 2.7 | 2.8 | 2.6 | 2.6 |
| | 8 | 6.2 | 8.2 | 8.2 | 8.5 | 6.9 |
| | 14 | 14.2 | 13.4 | 13.7 | 13.6 | 12.1 |
| | 40 | 38 | 38 | 40 | 38 | 41 |
| | 80 | 75 | 74 | 76 | 80 | 86 |
| Ground | 6 | 6.6 | 8.5 | 7.7 | 4.7 | 4.8 |

突起先端部(突起稜線から約 $100\ \mu\text{m}$)の半径方向の表面粗さ R_{max} および α が 90° の突起端面の接線方向の R_{max} はそれぞれ約 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下と約 $0.3\ \mu\text{m}$ である。

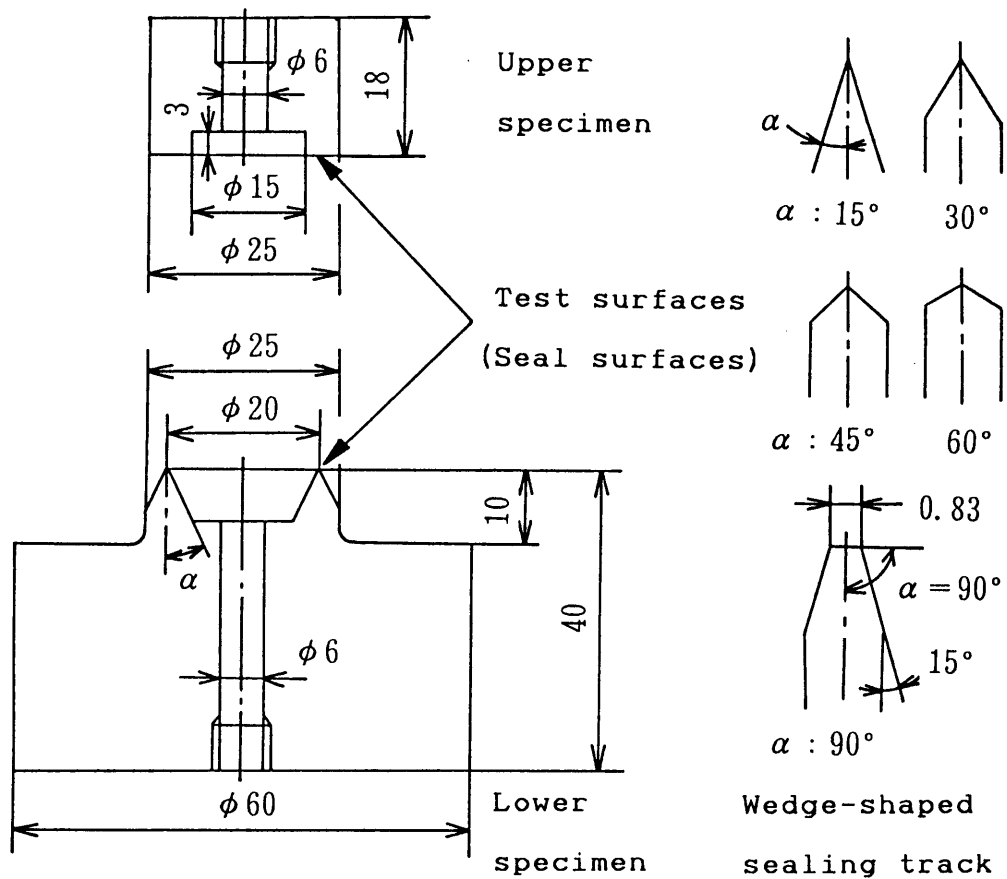
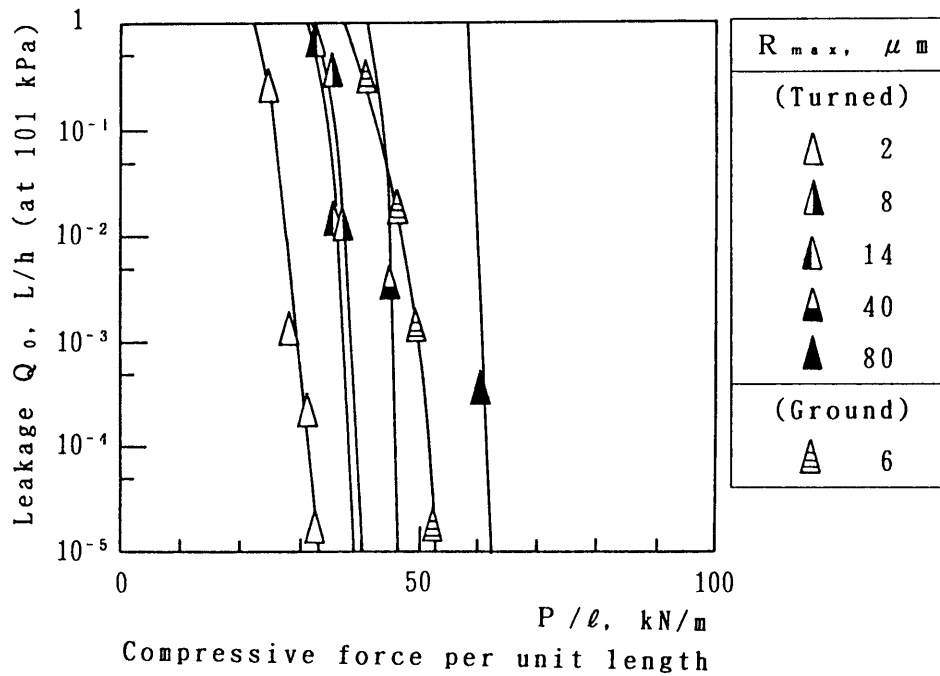


図5-1 試料の形状と寸法

5.3 シールの基本特性および考察

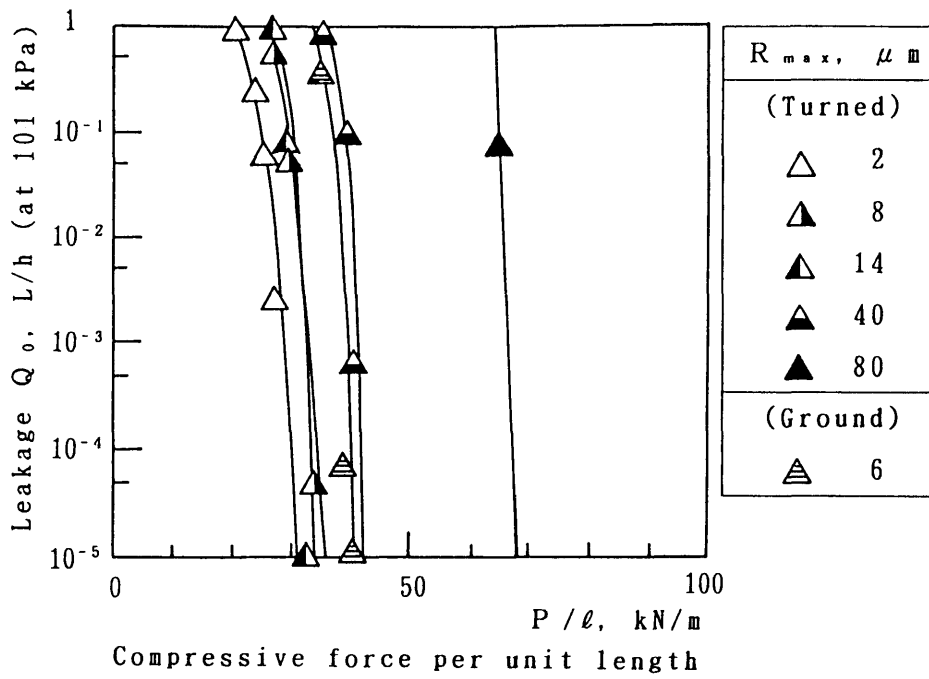
5.3.1 シーリング特性

シーリング特性を調べた実験結果の一例を図5-2に示す。図は押し付け力 P/ℓ (P は押し付け荷重, ℓ はくさび形突起稜線の全周の長さ) と漏れ量 Q_0 (0.101MPa, 0°Cの標準状態量) の関係を示す。 $\alpha = 15 \sim 60^\circ$ のくさび形突起のシーリング特性は, 密封面の表面粗さ範囲が同じならば, α にほとんど関係なくほぼ同程度の漏れ量 Q_0 を示し, それらの Q_0 は $\alpha = 90^\circ$ (平面) の Q_0 と比べて1/2~1/3と非常に少なかった。図より, 漏れ量が比較的に多い $Q_0 = 10^{-1}$ L/hに対する P/ℓ 値および P/ℓ の増加に対する漏れ量 Q_0 の減少割合については次のことが分かる。

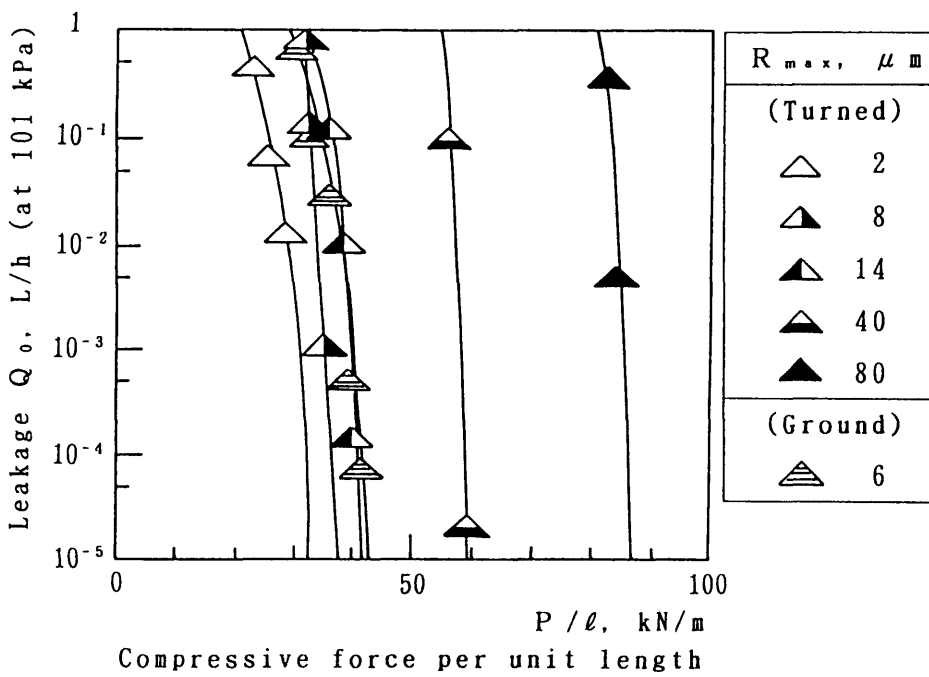


(a) 突起がくさび形 ($\alpha = 15^\circ$)

図5-2 シーリング特性実験結果



(b) 突起がくさび形 ($\alpha = 30^\circ$)



(c) 突起がくさび形 ($\alpha = 45^\circ$)

図5-2 シーリング特性実験結果

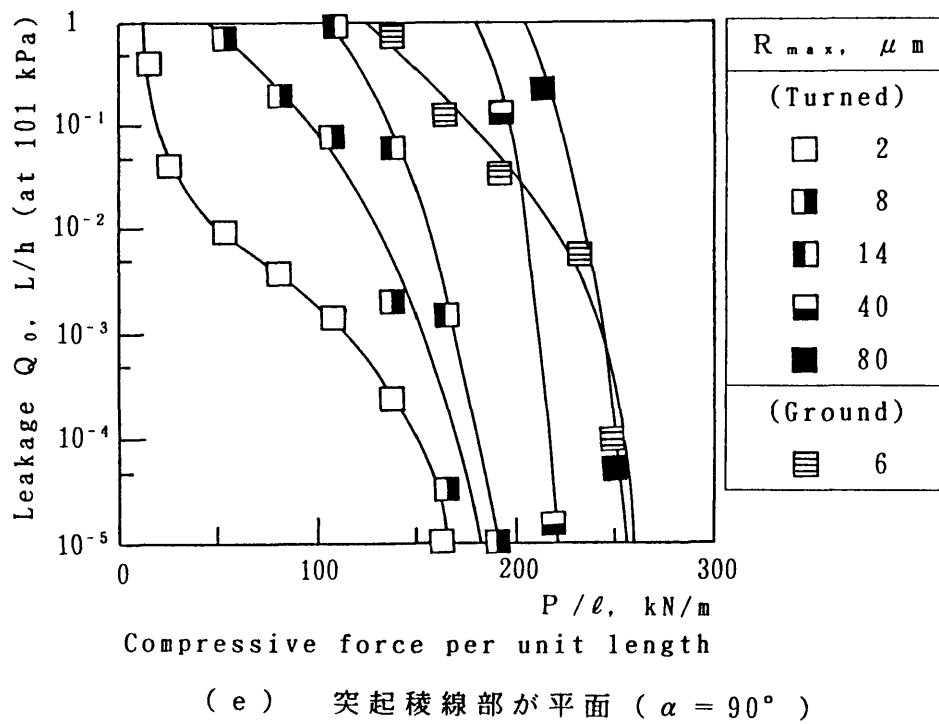
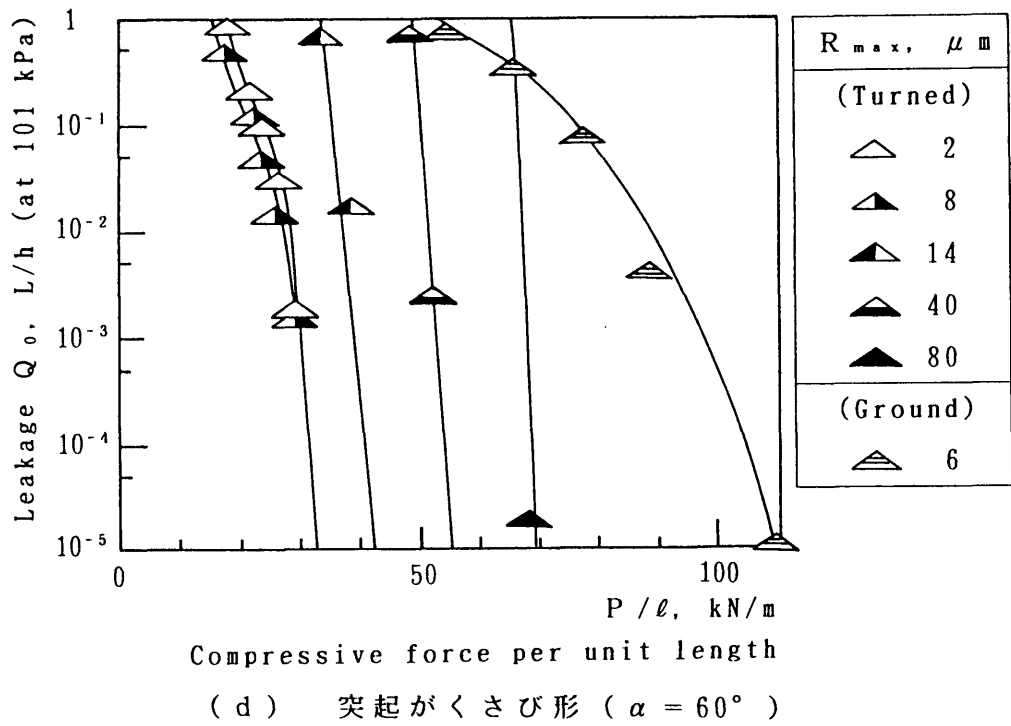


図5-2 シーリング特性実験結果

(a)~(d) 突起がくさび形 ($\alpha = 15 \sim 60^\circ$) の場合 : 図5-2(b)の $\alpha = 30^\circ$ の場合, $Q_0 = 10^{-1}$ L/hにおいて比べると, 密封面の表面粗さ R_{max} が約 $2 \sim 14 \mu\text{m}$ では, P/l はほとんど差はなく約 $25 \sim 30$ kN/m と低く, $R_{max} > 14 \mu\text{m}$ では R_{max} が大きくなるほど P/l は高い値をとる。 P/l の増加による Q_0 の減少割合は R_{max} に関係なく非常に大きい ($P/l \approx 10$ kN/m の増加に対して $Q_0 \approx 1 \rightarrow 10^{-5}$ L/h の減少)。密封面が研削仕上げ ($R_{max} \approx 6 \mu\text{m}$) の P/l は同程度の R_{max} の旋削仕上げ ($R_{max} \approx 8 \mu\text{m}$) に比べて約 10 kN/m とわずかに高い。なお $\alpha = 15^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の場合にも, $\alpha = 30^\circ$ とほぼ同一のシーリング傾向を示したが, $\alpha = 60^\circ$ で密封面が研削仕上げの P/l は $Q_0 = 10^{-1}$ および 10^{-5} L/h でそれぞれ約 50 および 110 kN/m と高く, また P/l の増加による Q_0 の減少割合もゆるやかであった。

(e) 突起稜線が平面 ($\alpha = 90^\circ$) の場合 : $Q_0 = 10^{-1}$ L/h における P/l は R_{max} が大きくなると高い値をとり, また漏れ減少割合も大きくなる傾向にある。密封面が研削仕上げの Q_0 は, 同程度の R_{max} の旋削仕上げと比べて大きい。

実験後の上試料の密封面を図5-3に示す。図5-3(a)では鋭角のくさび形突起先端部の密封面の旋削谷部への食い込みによる漏れ通路の閉塞が, 図5-3(b)では鈍角のくさび形突起先端部の研削面への食い込みによる漏れ通路の閉塞が, 見受けられる。図5-3(c)では突起端面の密封面への押し込みと突起端面の周辺部での旋削山突起群の押しつぶしによる漏れ通路の閉塞がうかがえる。Bowden-Tabor が指摘した⁽⁵²⁾と同様に, 素材が非常に大きく塑性変形しても, くぼみの中央部では表面の粗さが残っている。

走査型電子顕微鏡 (SEM) および表面粗さ計による上試料密封面の観察結果から, 前項で述べた(a)~(d)・(e)のシーリング特性の差異について次のように考える。

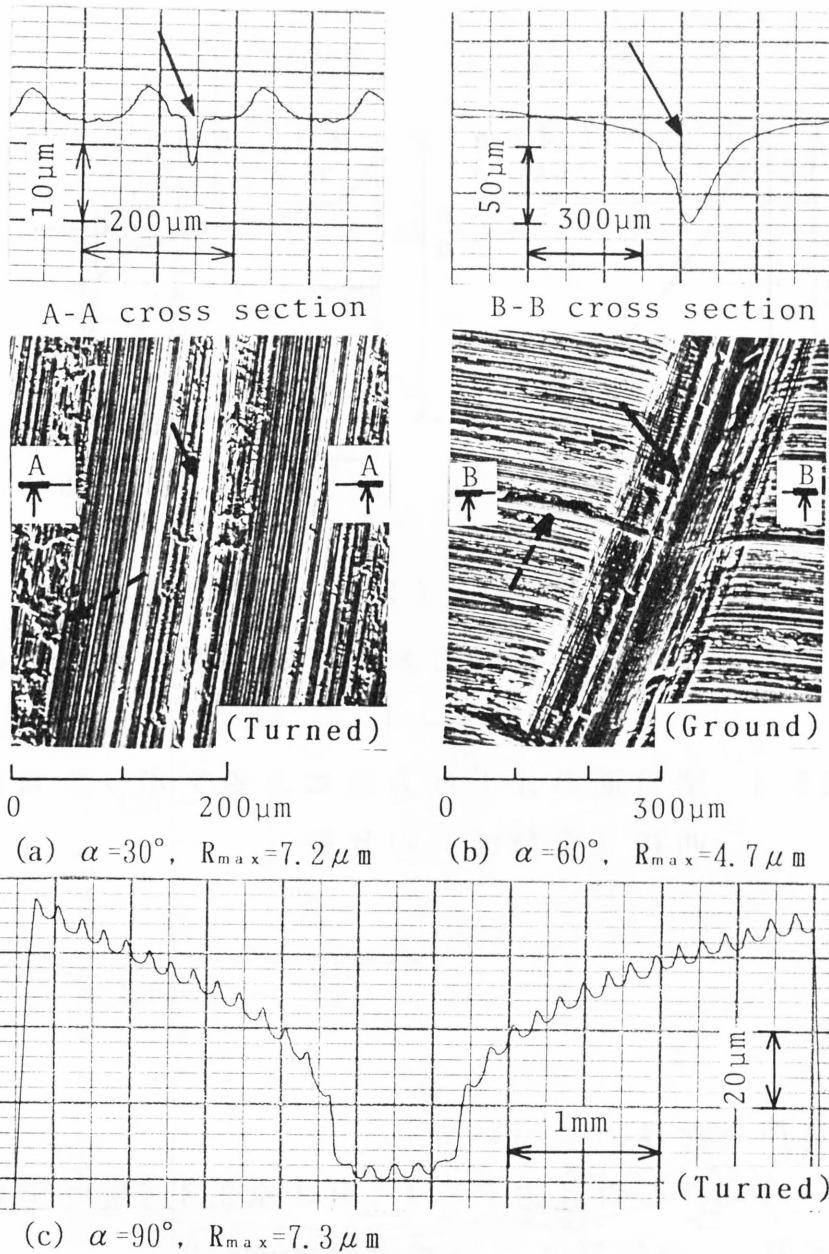
(a)~(d)の密封面が旋削仕上げの場合, 押し付け初期段階において, くさび形突起は旋削山突起群にわずかに食い込み, Q_0 は 10^{-1} L/h となる。さらに P/l を増加すれば, くさび形突起は小さな P/l の増

加で容易に旋削山突起群に食い込み，ついには旋削谷部に食い込む [図5-3(a)参照]。その結果 Q_0 は急減し 10^{-5} L/h以下となる。密封面の R_{max} が大きくなれば，くさび形突起の食い込み量も大きくなるので， P/l は R_{max} の増加に伴って高くなる。しかし， $R_{max} = 2 \sim 14 \mu m$ の範囲における Q_0 に大差がない理由は，密封面のむしろ [図5-3(a)の \searrow 印参照] やうねりおよびくさび形突起稜線部の加工精度のためと考える。

密封面が研削仕上げの場合，図5-4に示すアボット負荷曲線（基準長さの区間で断面曲線に平行なあるレベルの直線で切断したとき，断面曲線が切り取る線分の長さの総和と基準長さとの比を相対負荷長さ t_p という。この t_p 値を各レベルごとに求め，結んで描いた曲線をいわゆるアボット負荷曲線という）の比較でわかるように，研削面にはごくわずかであるが深い傷が存在する。この深い研削傷による漏れ通路を閉塞するために，同程度の R_{max} の旋削仕上げに比べて高い P/l が必要となる。 $\alpha = 60^\circ$ の場合では，このくさび突起の半頂角 ($\alpha = 60^\circ$) は他のくさび突起 ($\alpha = 15 \sim 45^\circ$) に比べて大きいので，深い研削傷 [図5-3(b)参照] はさらに閉塞されにくくなる。このために， P/l はさらに高くなり，漏れ減少割合もゆるやかになるものと考えられる。

(e) の密封面が旋削仕上げの場合，接触部における密封表面の加工硬化層（後述の図5-9参照）のため， P/l を増加しても，旋削山突起群はさほど押しつぶされず， $\alpha = 90^\circ$ の平らな突起稜線部と旋削仕上げ面との接触面下の母材に，塑性変形が生じる。そのため突起端面は密封面を押し込み， Q_0 は 10^{-1} L/hとなる。さらに P/l を増加すれば，塑性変形が試料全体に生じ（実験後の上試料外径寸法は実験前より約 $150 \mu m$ 大きくなっていて），旋削山突起群の押しつぶし量が突起端面の周辺部において多くなり，漏れ通路が急に閉塞され， Q_0 は 10^{-5} L/h以下となる。その結果， R_{max} が大きくなるほど Q_0 の減少割合も大きくなると考える。

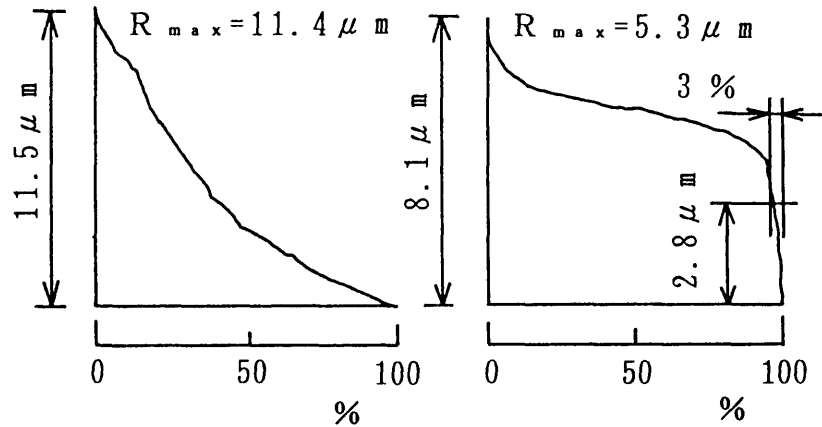
密封面が研削仕上げの場合には，上述の(a)～(d)と同じ理由から，



注) 図中の \searrow 印はくさび形突起の食い込みによるくぼみを, (a) 図の \searrow 印はむしろを, (b) 図の \searrow 印は深い研削傷を示す。

図5-3 上試料の密封面上 (実験後) とリング状くさび形突起 (下試料) による密封効果

Q_0 は旋削仕上げの Q_0 より多くなると考える。



(1) 旋削仕上げ面 (2) 研削仕上げ面

注) 計測方向は，旋削山および研削傷に直角である。

図5-4 密封面の仕上げ方法によるアボット負荷曲線（実験前）の比較

5.3.2 設定押し付け力について

ここでは，設定押し付け力 P_c/l （第3章3.4.2項で定義）と密封面の表面粗さ R_{max} の関係について検討する。

図5-2の実験結果から求まる P_c/l に対して R_{max} の関係を図5-5に示す。各 α に対する P_c/l は， $R_{max} \leq 14 \mu m$ でほぼ一定値を示し， $R_{max} > 14 \mu m$ で R_{max} が大きくなると P_c/l は高くなる傾向にある。 $\alpha = 15 \sim 60^\circ$ の P_c/l は， $\alpha = 90^\circ$ （平面）のそれに比べて約1/5と小さい。これは前項で述べたシーリング特性の差異によるものであるが， $\alpha = 15 \sim 60^\circ$ のくさび形突起の密封面への食い込みによる密封効果の影響が現れている。

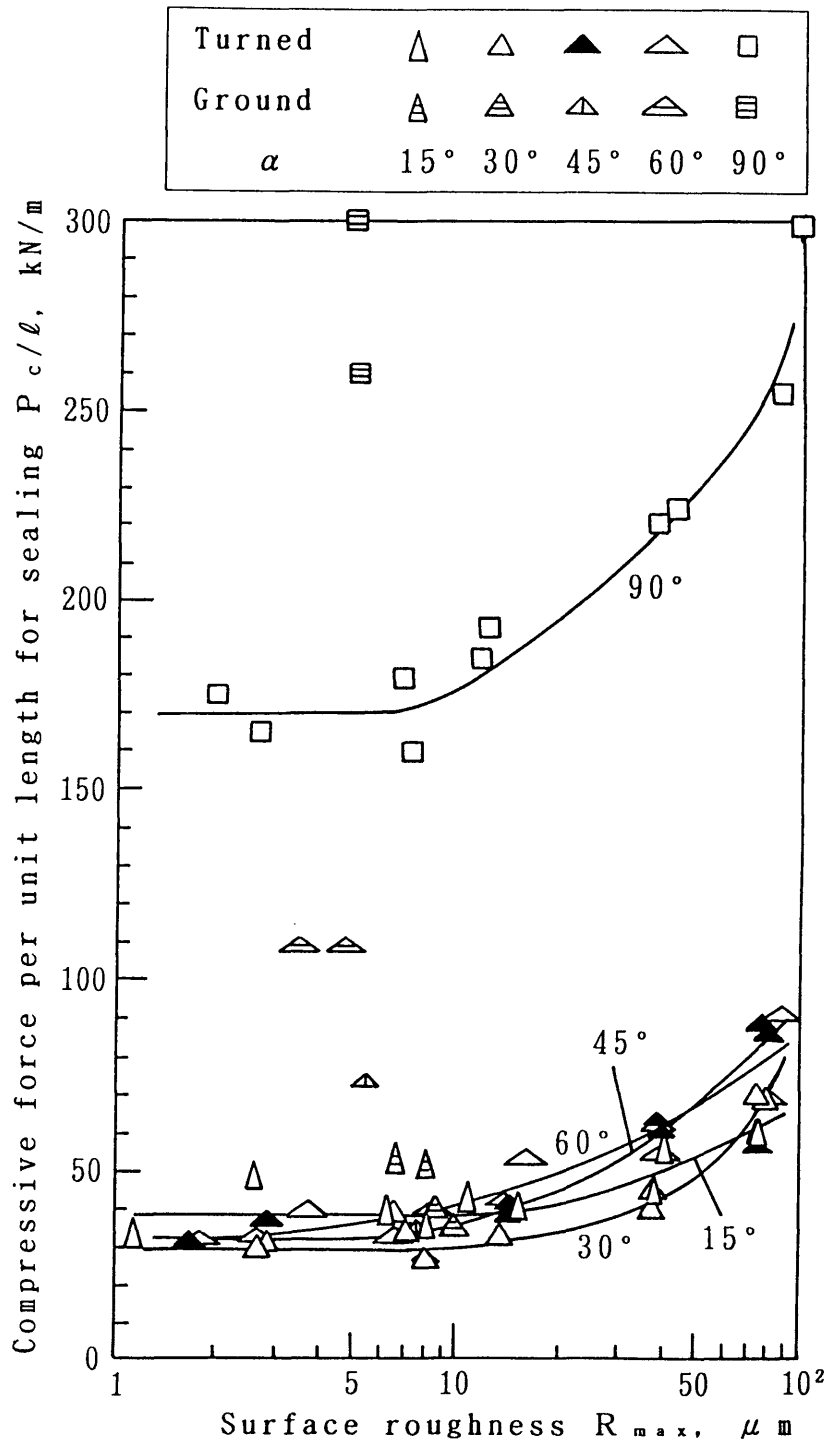
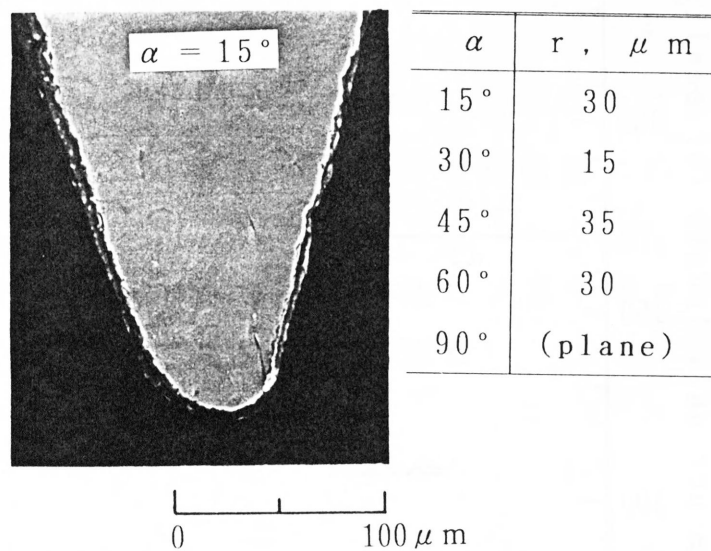


図5-5 P_c/l と R_{max} の関係



注) r は突起先端の丸み半径を示す。

図5-6 くさび形突起先端部の断面形状

また、 $\alpha = 15 \sim 60^\circ$ では、 α による顕著な差異は見受けられないが、全体的には $\alpha = 30^\circ$ の P_c/l が低い。この理由を次のように考える。くさび形突起先端部は旋削加工後研磨紙仕上げされたため、図 5-6 で示すように、丸くなっている。突起先端部は α に関係なく同程度の丸み半径 r になるように加工されたが、 $\alpha = 30^\circ$ の r が最も小さく仕上がった。一方、くさび形突起の密封面への食い込み接触幅は、実験後の密封面を SEM 観察すると、 $R_{max} \leq 14 \mu m$ で約 $30 \mu m$ 、また、 $R_{max} > 14 \mu m$ では R_{max} の増加に伴って次第に増え $R_{max} \approx 90 \mu m$ で約 $90 \mu m$ であった。これらのことは、実際にはシーリングは丸みを持つくさび形突起の先端部ではほぼ行われたことを示す。したがって、本実験の $\alpha = 15 \sim 60^\circ$ のシーリングは α よりも r の影響を受けていると思われる。

5.3.3 設定接触圧力について

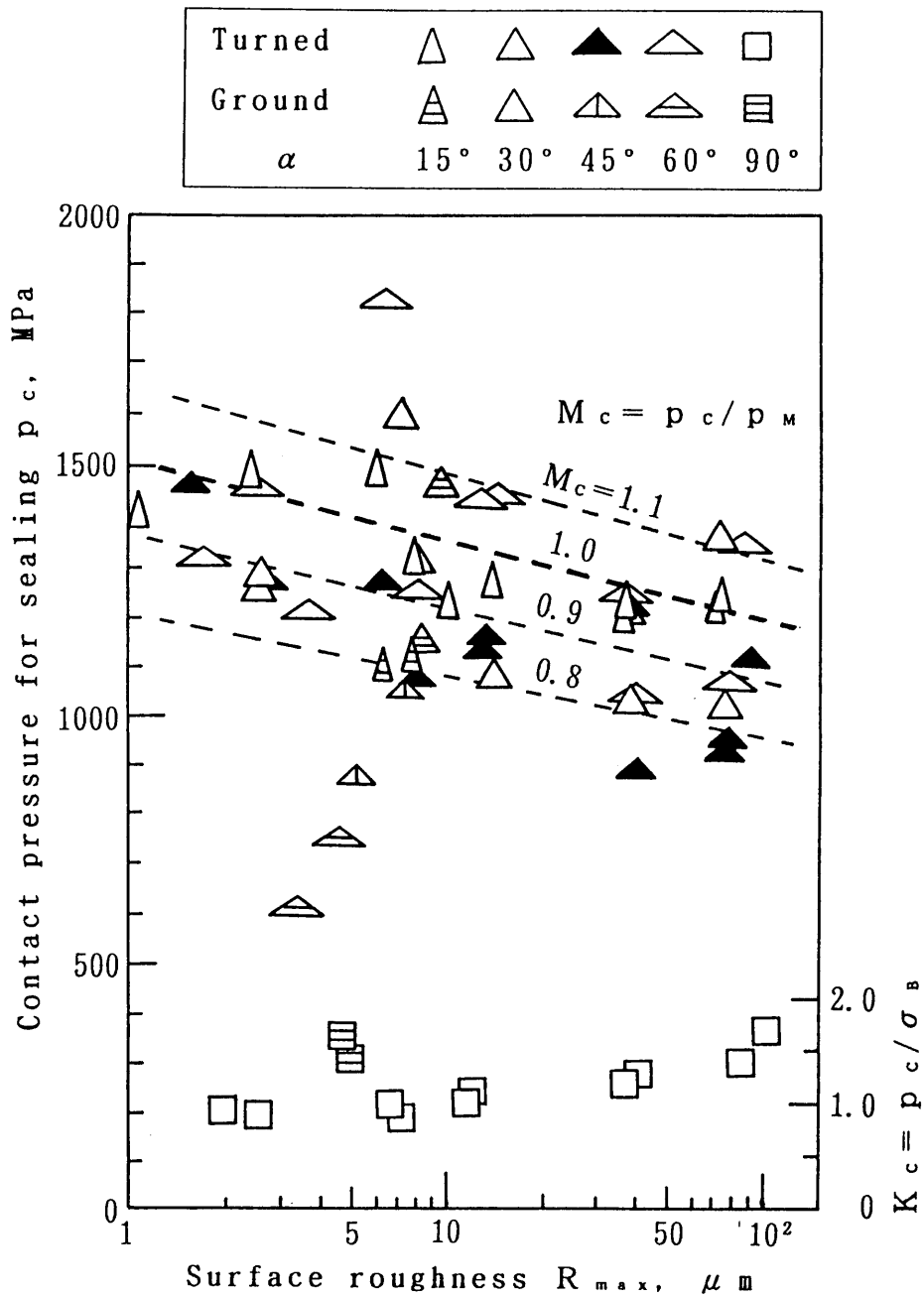
ここでは、設定接触圧力 $p_c = P_c/A_c$ (第3章3.4.2項で定義) と密封面の表面粗さ R_{max} の関係について検討する。ここで、 A_c は実験後の接触面積 ($\alpha = 15 \sim 60^\circ$ の場合は真実接触面積、 $\alpha = 90^\circ$ (平面) の場合は見かけの接触面積で、それぞれ食い込み接触幅あるいは押し込み接触幅の10箇所の平均値にくさび形突起稜線の全周の長さをかけて算出) である。

p_c と R_{max} の関係を図 5-7 に示す。図には無次元数 $M_c = p_c/p_m$ (一点破線) と $K_c = p_c/\sigma_B$ が併記してある。 p_m は接触部の密封最表面層のマイヤー硬さ、 σ_B は銅素材の引張強さである。

図によれば、 $\alpha = 15 \sim 60^\circ$ の p_c 値は $\alpha = 90^\circ$ (平面) の p_c 値に比べて高い。この理由を次のように考える。ここで、上試料の斜め切断面のミクロ組織、上試料における密封表面層の硬さ分布 p_m をそれぞれ図 5-8 と図 5-9 に示す。銅材の上試料は、真空焼鈍処理後、旋削および研削仕上げされたため、密封表面に加工変質層が生じ、そのミクロ組織は表面層では腐食されやすいため黒く見え、内部に行くにつれて逆に腐食されにくいため、焼鈍時の粗大結晶がそのま

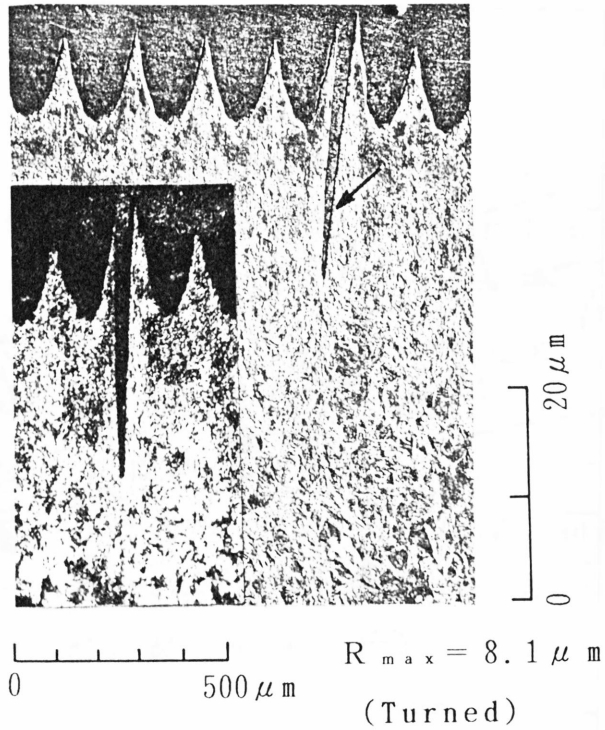
ま見える（図 5-8参照；図のミクロ組織は，最後の精密化学研摩後，蒸留水100～200ml，塩酸20～50ml，塩化第2鉄5～10gf からなる腐食液に約30秒間漬けて得た）。硬さ分布から見ると，その硬さは最表面から内部にいくにつれて減少の傾向を呈し， $R_{max} = 8.1 \mu m$ の場合，最高硬さは最表面層で $p_m \approx 1350$ (MPa)（図5-9参照），素地の硬さは $p_m \approx 620$ (MPa)（表5-1参照）である。ところで $\alpha = 15 \sim 60^\circ$ のシーリングは，前項で述べたように，くさび形突起の先端部の密封表面層への食い込みによって行われるため，密封表面層の p_m 値の影響を受ける。また， $\alpha = 90^\circ$ （平面）のシーリングは，5.3.2項の(b)で述べたように，突起端面の周辺部での密封面の旋削山群の押しつぶしと銅材素地の塑性変形により行われるため，銅材素地の σ_b 値の影響を受ける。したがって， $\alpha = 15 \sim 60^\circ$ の p_c は，図5-7に示すように，最表面層の p_m 値近傍の値を示し， $\alpha = 90^\circ$ （平面）の $p_c \approx \sigma_b$ より高い値を示すと考える。なお， $\alpha = 60^\circ$ で $R_{max} \approx 4 \mu m$ （研削仕上げ）の p_c が低い値を示す。これは，くさび形突起の頂点角が大きくなれば，密封面のごくわずかな深い研削傷が閉塞されにくくなり，くさび形突起の密封面への食い込み量が大きくなる（図5-3参照）。その結果，密封最表面層より軟らかい内部の硬さの影響を受けるためと考える。

また図5-7より，本実験の粗さ範囲内では， $\alpha = 15 \sim 60^\circ$ の M_c は， $\alpha = 60^\circ$ で $R_{max} \approx 4 \mu m$ （研削仕上げ）の場合を除けば，約0.8～1.1，また $\alpha = 90^\circ$ （平面）の K_c は約0.9～1.5である。



注) $M_c = p_c / p_m$ の p_m は密封最表面層の値を示す。

図5-7 p_c と R_{max} の関係



注1) 図中の小さい写真は、同一箇所従来の顕微鏡写真を示し、SEMによる写真との比較のために示す。

注2) \searrow 印は $\alpha = 15^\circ$ のくさび形突起の食い込みによるくぼみを示す。

図5-8 SEMによる上試料(銅)の斜め切断面

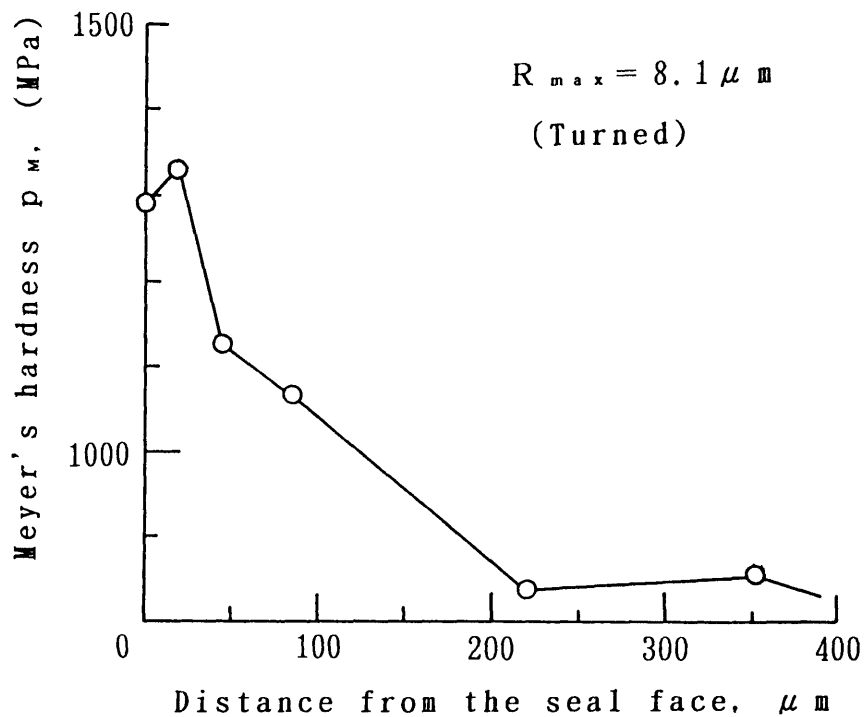


図5-9 上試料（銅）の密封表面層の硬さ分布

5.4 結言

硬いくさび形突起と軟らかい平面との静的メタルシールの基本特性を，くさび形突起の半頂角，銅材密封面の表面粗さおよび加工方法を変えて実験的に調べた。得られた結果は次の通りである。

(1) 設定接触圧力 p_c は，くさび形突起の半頂角 α が $15 \sim 60^\circ$ の範囲では，密封面の表面粗さ ($R_{max} \approx 1 \sim 100 \mu m$) に関係なく，銅材密封最表面層におけるマイヤー硬さの約 $0.8 \sim 1.1$ 倍に相当する。

(2) $\alpha = 90^\circ$ (平面) の p_c は，密封面の表面粗さ ($R_{max} \approx 1 \sim 100 \mu m$) および加工方法 (旋削と研削仕上げ) に関係なく，銅材素地の

引張強さの約0.9~1.5倍に相当する。

(3) 設定押し付け力 P_c/l は, $R_{max} \leq 14 \mu m$ でほぼ一定値を示し, $R_{max} > 14 \mu m$ で R_{max} が大きくなれば高くなる。研削仕上げ面に対する P_c/l は旋削仕上げ面に対する値より高い値を示す。また, $\alpha = 15 \sim 60^\circ$ の P_c/l は, α にあまり関係なく同程度の値を示し, $\alpha = 90^\circ$ (平面) の P_c/l の約1/5と低い値を示す。

6.1 緒言

前章では、環状くさびからなるシール、いわゆるナイフエッジシールの基本特性を調べた。その結果、鋭い稜線部からなる環状くさび形シールの設定押付け力は、面の突き合わせに比べて、低くなることが明らかになった。しかし、漏れの原因となるナイフエッジ稜線部のうねりや傷が生成されないように、鋭い稜線部を超精密加工することはきわめて困難であるから、鋭い稜線部からなるナイフエッジのシールは実用的ではない。さらに、従来のナイフエッジシールの研究⁽¹⁷⁾⁽⁵²⁾では、ナイフエッジ部の材料として加工困難なステンレス鋼を使用しているため、ナイフエッジ稜線部の幅あるいは稜線部の半径を、精密に、一定の微小寸法に加工することができない。その結果として、高い設定押付け力が必要となり、その上、相手シール材としては銅やアルミニウムなど、塑性変形が容易な軟質材料に限定されるという問題を有している。

そこで本章では、まず、ナイフエッジ稜線部の幅を変えて、ナイフエッジシールのシーリング機構の解明を行い、設定押付け力が低くなる最適ナイフエッジ形状を求める。次に、ナイフエッジの材料として硬くて耐熱性のある材料を選定し、相手シール材には、銅、炭素鋼およびステンレス鋼を選び、これらの材料との組み合わせに対するシールの基本特性に及ぼす表面粗さの影響を調べる。

6.2 ナイフエッジ稜線部の幅に関するシーリング特性実験

6.2.1 実験材料および実験方法

実験装置、実験装置本体、窒素ガス流れに対する装置上の注意、漏れ窒素ガスの計測要領および漏れ窒素ガス量の算出要領などは第3章～第5章と同様である。

試料の形状と寸法、実験材料の機械的性質および上試料の密封面の表面粗さの一例を図6-1、表6-1、表6-2に示す。下試料のナイフ

エッジ部の断面形状は，半頂角 α は 30° で，稜線部の半径 r が約 $15\ \mu\text{m}$ のものと稜線部の幅 b が約 $30, 50, 100, 500\ \mu\text{m}$ のものとの5種類で，稜線部の平面にラッピング仕上げを施した。ナイフエッジ稜線部の表面粗さは，スキッドなしの状態です触針式表面粗さ測定機で計測した。 r が約 $15\ \mu\text{m}$ の環状稜線部（稜線部頂点から約 $100\ \mu\text{m}$ ）の半径方向の表面粗さ R_{max} および稜線部の平面における接線方向の R_{max} はそれぞれ約 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下と約 $0.3\ \mu\text{m}$ である。実験は，ナイフエッジ稜線部の幅とシーリング機構の関係を明らかにするため，ナイフエッジ材として炭素鋼を，密封面材として銅を用いて，表6-2で示す組み合わせで実施した。

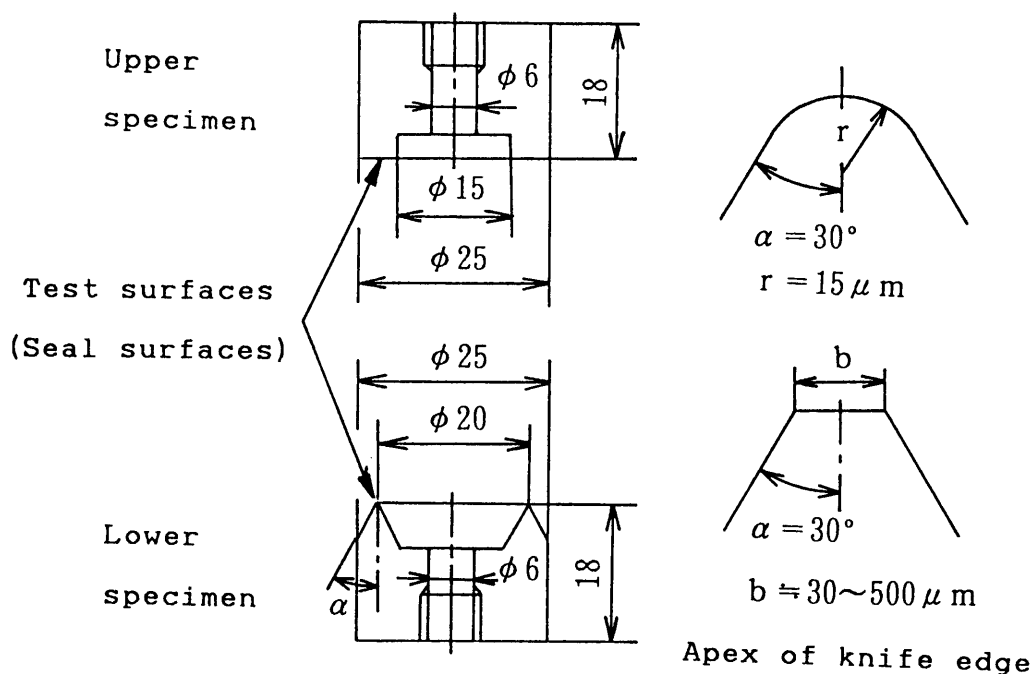


図6-1 試料の形状と寸法

表6-1 実験材料の機械的性質

| Material | | Technical properties | | | Heat treatments |
|----------------|--------|----------------------|-----------------|---------------|--------------------------------------|
| | | Tensile strength | Elon- gation | Hard- ness | |
| | | σ_B | ϵ | Hv | |
| | | MPa | % | | |
| Upper specimen | C1100B | 212 | 64 | 59 | 560°C × 1hr Annealed in vacuum |
| Lower specimen | S55C | above 392※ | above 15※ | 267 | (Goods on market) |

注) ※印はJIS規格値を示す。

表6-2 上試料の密封面の表面粗さ

| Material finished | Surface roughness : $R_{max}, \mu m$ | | | | | |
|-------------------|--------------------------------------|--|-----|-----|-----|------|
| | Level | Width of flat area on apex of knife edge : $b, \mu m$ | | | | |
| | | r=15※ | 30 | 50 | 100 | 500 |
| Turned | 8 | 7.1 | 7.8 | 7.1 | 7.7 | 11.2 |
| Ground | 3 | 2.3 | 2.5 | 3.6 | 2.7 | 3.5 |

注) r=15※は、稜線部が約15 μm の丸いナイフエッジを示す。

6.2.2 シールの基本特性およびその考察

ここでは、設定押し付け力 P_c / ℓ (第3章3.4.2項で定義) と密封面の表面粗さ R_{max} との関係、および設定接触圧力 $p_c = P_c / A_c$ (第3章 3.4.2項で定義) と R_{max} の関係について検討する。ここで、 P_c は漏れ許容量 $Q_c = 10^{-5} \text{ L/h}$ のときの押し付け荷重、 ℓ はナイフ

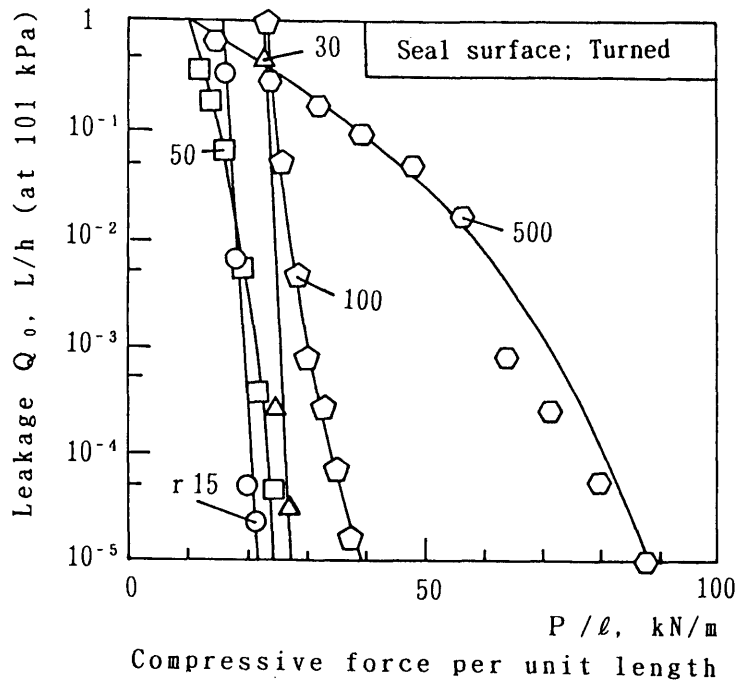
エッジ稜線部の全周の長さ， A_c は実験後の接触面積である。なお，実験後の上試料の接触面は， $r \approx 15 \mu\text{m}$ と $b \approx 30, 50 \mu\text{m}$ では，ナイフエッジ稜線部の粗さの転写状態， $b \approx 100, 500 \mu\text{m}$ では，密封面の旋削仕上げ粗さが一部に残っている状態にある（後述の図6-5参照）。したがって，実験後の接触面積 A_c は， $r \approx 15 \mu\text{m}$ と $b \approx 30, 50 \mu\text{m}$ の場合は真実接触面積を， $b \approx 100, 500 \mu\text{m}$ の場合は見かけの接触面積を示すものとする。ここでの接触面積の算出は，それぞれの接触幅の10箇所の平均値にナイフエッジ稜線部の全周の長さを掛けて行う。

6.2.2.1 設定押し付け力について

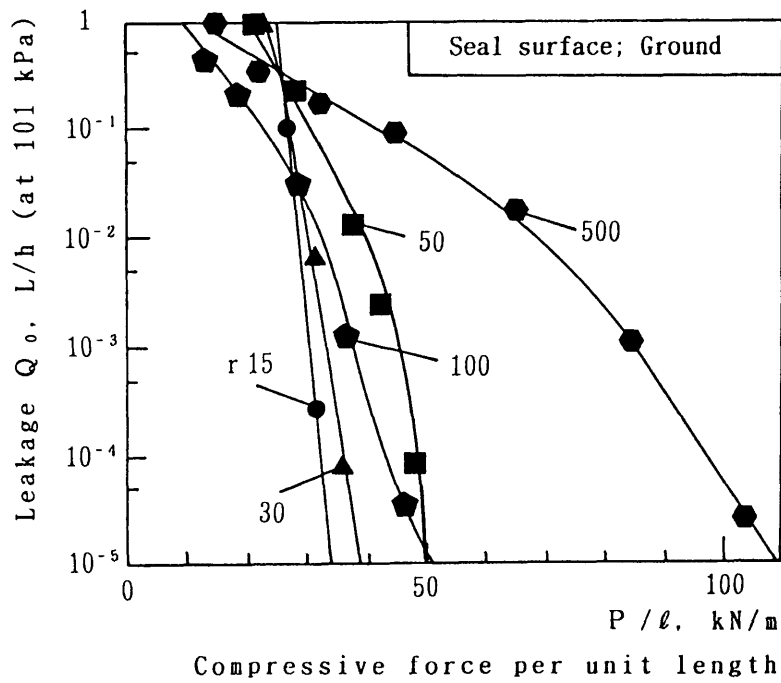
シーリング特性を調べた実験結果の一例を図6-2に示す。図は押し付け力 P/l と漏れ量 Q_0 の関係を示す。密封面が研削仕上げの場合，単位長さあたりの押し付け力 P/l の増加による Q_0 の減少傾向は，旋削仕上げの場合とほぼ同様である。図6-2から求まる設定押し付け力 P_c/l に対してナイフエッジ稜線部の幅 b との関係を図6-3に示す。なお，図6-3中には前章で得られた実験値も示す。これらの実験値は本章と同じ実験条件で得られた値であり，そのナイフエッジ形状は $\alpha = 15^\circ$ ， $b \approx 830 \mu\text{m}$ である。前章の実験結果によれば， $\alpha = 15 \sim 60^\circ$ の範囲において， α の差によるシーリング特性の差異はほとんど見られない。

図6-3より，密封面が旋削仕上げの場合， $b \approx 30, 50 \mu\text{m}$ の P_c/l は約30 kN/mと低く，稜線部が丸いナイフエッジ（ $r \approx 15 \mu\text{m}$ ）の $P_c/l \approx 25 \text{ kN/m}$ とほぼ同じく低い値を示す。 b が増加すると P_c/l は高くなり，その P_c/l は $b \approx 100 \mu\text{m}$ で約40 kN/m， $b \approx 500 \mu\text{m}$ では約100 kN/mと急激に高くなる。この b の増加に伴う P_c/l の増加傾向の理由は，次項の6.2.2.2で詳しく述べるが，ナイフエッジシールのシーリング機構の違いによるものであると考える。

密封面が研削仕上げの場合， b の増加による P_c/l の増加傾向は，旋削仕上げの場合とほぼ同様であり，それらの P_c/l は旋削仕上げ



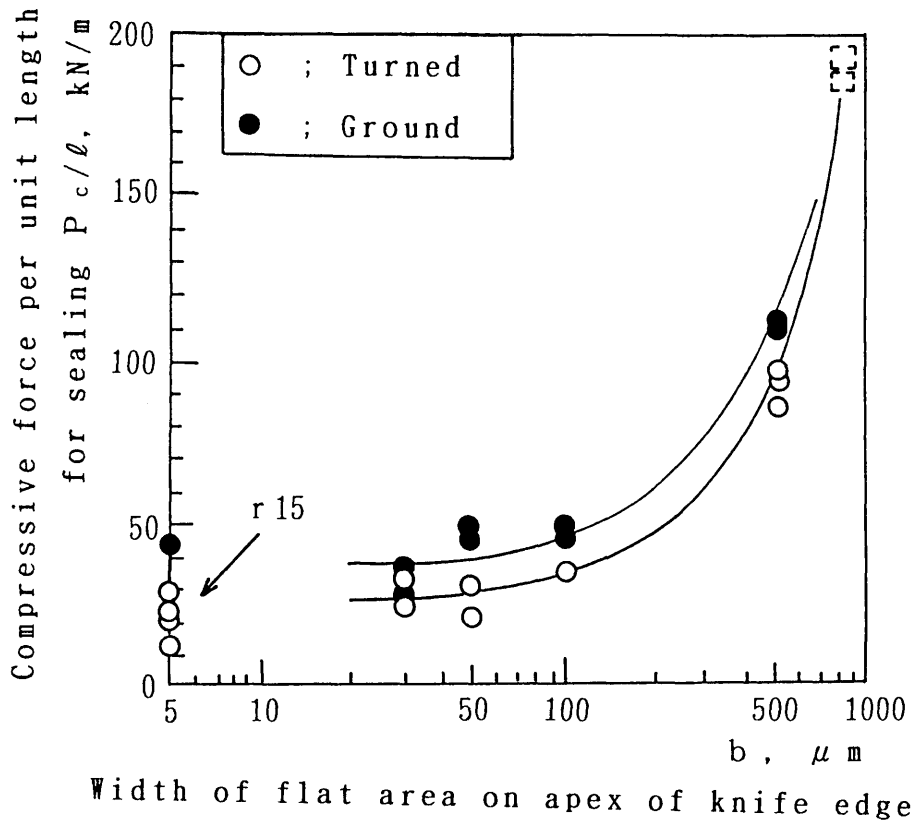
(a)



(b)

注) 図中の数字は, ナイフエッジ稜線部の頂点半径 r μ m, 稜線部幅 b μ mを示す。

図6-2 シーリング特性実験結果



注) 図中の [] 印は, 前章で得た実験値を示す。

図6-3 P_c/l と b の関係

の P_c/l に比べてわずかに高い。これは, 前章で述べたように, 研削仕上げ面のごくわずかな量の深いむしろ傷は閉塞されにくいことを示している。

6.2.2.2 設定接触圧力について

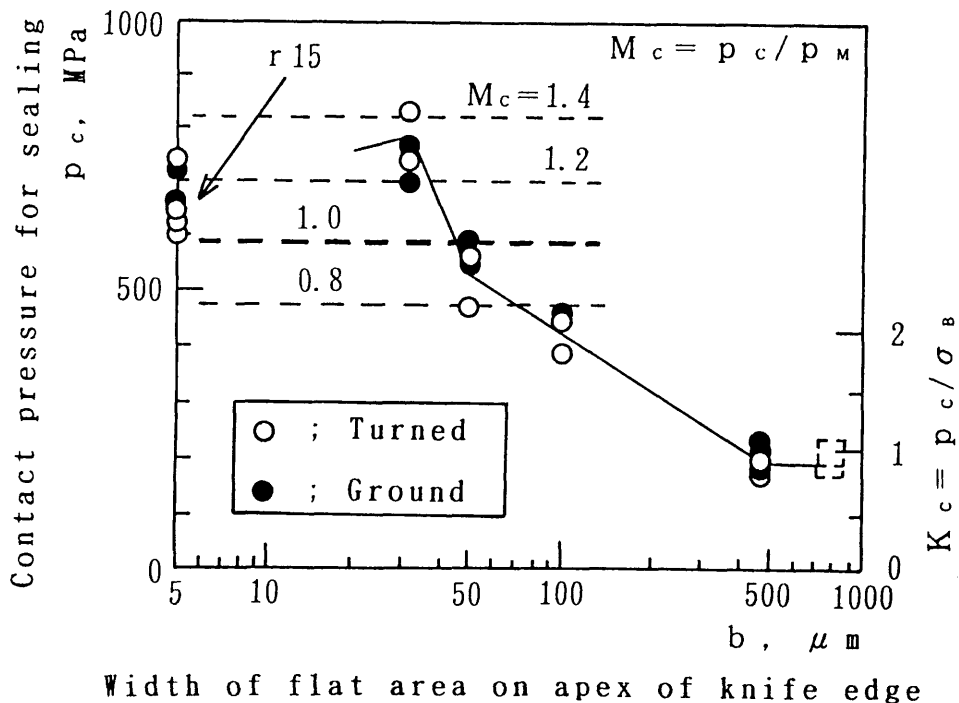
設定接触圧力 p_c とナイフエッジ稜線部の幅 b との関係を図6-4に示す。図には無次元数 $M_c = p_c/p_m$ の破線と $K_c = p_c/\sigma_B$ を記載してある。 p_m は接触部の密封最表面層のマイヤー硬さ, σ_B は銅素材の引張強さである。

図6-4より, 密封面の仕上げ方法 (旋削と研削) による p_c の差異はあまり見受けられない。 p_c 値は, $b \leq 50 \mu\text{m}$ で $p_c \approx p_m$ (586MPa), $b \approx 100 \mu\text{m}$ では約440 MPaとわずかに低くなり, $b \approx 500 \mu\text{m}$ で $p_c \approx$

σ_B (212MPa) になる。

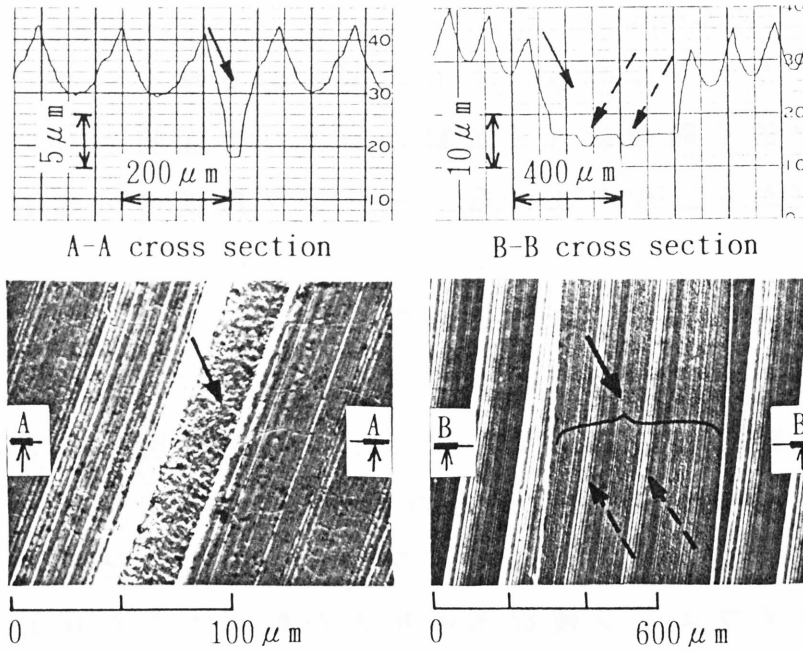
ナイフエッジシールの p_c と b の関係およびシーリング機構について、走査型電子顕微鏡 (SEM) および表面粗さ計による密封表面の観察結果から、次のようなシーリング機構の分類および考察を行った。

(a) 密封最表面層への食い込み型シール； $b \leq 50 \mu\text{m}$ と稜線部の幅が狭い場合、炭素鋼のナイフエッジが銅の密封面に押し付けられると、狭い稜線部からなるナイフエッジは密封面の最表面層に食い込み、その狭い稜線部と密封面との密着により、密封が行われる (図6-5(a) の $b \approx 30 \mu\text{m}$ の場合、ナイフエッジの食い込みによる溝の底の表面は、ナイフエッジ稜線部の粗さが転写された状態にあり、この箇所でも密封が行われたことを示す)。この場合、 p_c は p_m (586



注) $M_c = p_c / p_m$ の p_m 半径を密封最表面層の値を示す。
 [] 印は、前章で得た実験値を示す。

図6-4 p_c と b の関係



(a) $b \approx 30 \mu\text{m}$, $R_{\text{max}} = 7.8 \mu\text{m}$ (b) $b \approx 500 \mu\text{m}$, $R_{\text{max}} = 10.6 \mu\text{m}$

注) 図中の \searrow 印はナイフエッジの食い込みおよび押し込みによる溝を, \swarrow 印は溝の底に残っている旋削仕上げの粗さを示す。

図6-5 ナイフエッジの密封面への (a) 食い込み状態, (b) 押し込み状態 (実験後の銅密封面) (SEM像)

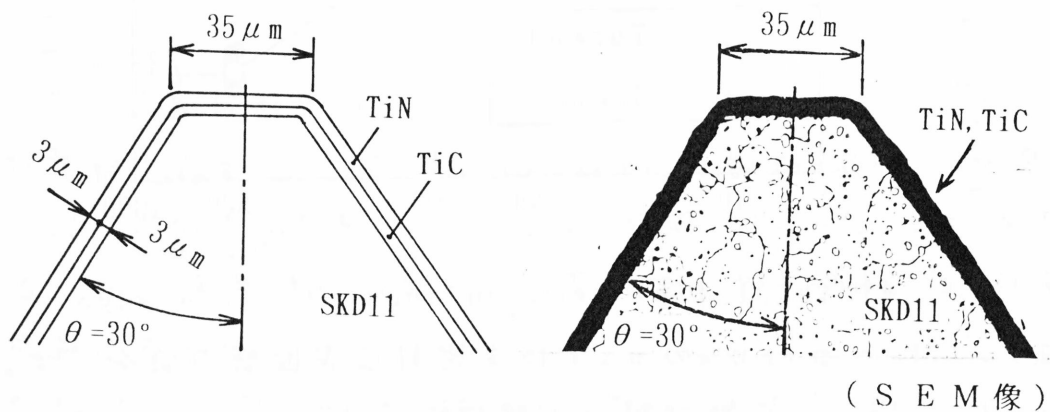


図6-6 ナイフエッジ稜線部の断面形状

MPa) の約0.8~1.4倍と高くなるが, 接触部の接触面積 A_c が狭い。その結果として, P_c/l は低くなる。

(b) 密封面の母材への押し込み型シール; $b \geq 500 \mu\text{m}$ と稜線部の幅が広い場合, ナイフエッジが密封面に押し付けられると, 広い稜線部からなるナイフエッジは密封面に広く押し込まれ, 密封面の銅素材が大きく塑性変形し, ナイフエッジ稜線部の平面における周辺部と密封面の密着により密封が行われる (図6-5(b)の $b = 500 \mu\text{m}$ の場合, 押し込みによる溝の底の中央部では, まだ密封面の旋削仕上げの粗さが残っている)。この場合, p_c は σ_b (212 MPa) の約0.9~1.1倍と(a)の場合に比べて低くなるが, A_c が広い。その結果として, P_c/l は高くなる。

(c) 中間型シール; $50 < b < 500 \mu\text{m}$ の場合, そのシーリング機構は上で述べた2通りの場合の中間的な型であると考える。

以上の実験結果より, 設定押付け力が低くなる最適なナイフエッジの形状と寸法として, ナイフエッジの半頂角は 30° , 稜線部平面はラップ仕上げ, 稜線部の幅は約 $50 \mu\text{m}$ 以下とするのが良い。

6.3 硬い材料のナイフエッジの場合

前節では, ナイフエッジシールのシーリング機構の解明を行った結果, 設定押付け力を低くすることができる最適なナイフエッジの形状と寸法を得ることができた。本節では, そのナイフエッジの材料として硬くて耐熱性のある材料を選定し, 銅, 炭素鋼およびステンレス鋼に対するシーリング特性について調べる。

6.3.1 実験材料および実験方法

実験装置および実験要領は前章迄と同様である。ナイフエッジ稜線部の断面形状, 実験材料の機械的性質および上試料における密封面の表面粗さの一例を図6-6, 表6-3, 表6-4に示す。ナイフエッジの形状は前節で得られた密封最表面層への食い込み型シールのもの

で、半頂角 α が 30° , 稜線部平面がラップ仕上げ ($R_{max} = 1.5 \mu m$) で、稜線部の幅 b が約 $35 \mu m$ である。また、その材料は合金工具鋼 (SKD11) で、表面に CVD 法により TiC と TiN の硬質被膜層を形成し (TiC ; 四塩化チタンガス $TiCl_4$, 水素ガス H_2 およびメタンガス CH_4 を真空炉内で、 $1030^\circ C$ で 30 分間加熱反応させて TiC を形成する、TiN ; 四塩化チタンガス $TiCl_4$, 水素ガス H_2 および窒素ガス N_2 を真空炉内で、

表 6-3 実験材料の機械的性質

| Material | | Mechanical properties | | | Heat treatments |
|----------------|---------|-----------------------|-----------------|---------------|---|
| | | Tensile strength | Elon- gation | Hard- ness | |
| | | σ_B | ϵ | Hv | |
| | | MPa | % | | |
| Upper specimen | S55C | 598 | 28 | 183 | $790^\circ C \times 1hr$ Annealed in vacuum |
| | C1100B | 212 | 64 | 59 | $560^\circ C \times 1hr$ Annealed in vacuum |
| | SUS304 | 753 | 46 | 291 | (Goods on market) |
| | ‡SUS304 | above 519* | above 40* | 216 | $1050^\circ C \times 0.5hr$ Solution heat treatment |
| Lower specimen | SKD11 | ~ | ~ | 774 | (TiC, TiN coated) |

注) *印は JIS 規格値を示す。また、‡SUS304 は溶体化処理を施された SUS304 を示す。

990℃, 50分間加熱反応させてTiNを形成する), 焼入れ焼戻しにより内部をも硬くしたものである。実験は, この稜線部の幅が狭くて硬いナイフエッジの, 銅, 炭素鋼およびステンレス鋼に対するシーリング特性を明らかにするため, 表6-4で示す組み合わせで実施した。

表6-4 上試料の密封面の表面粗さ

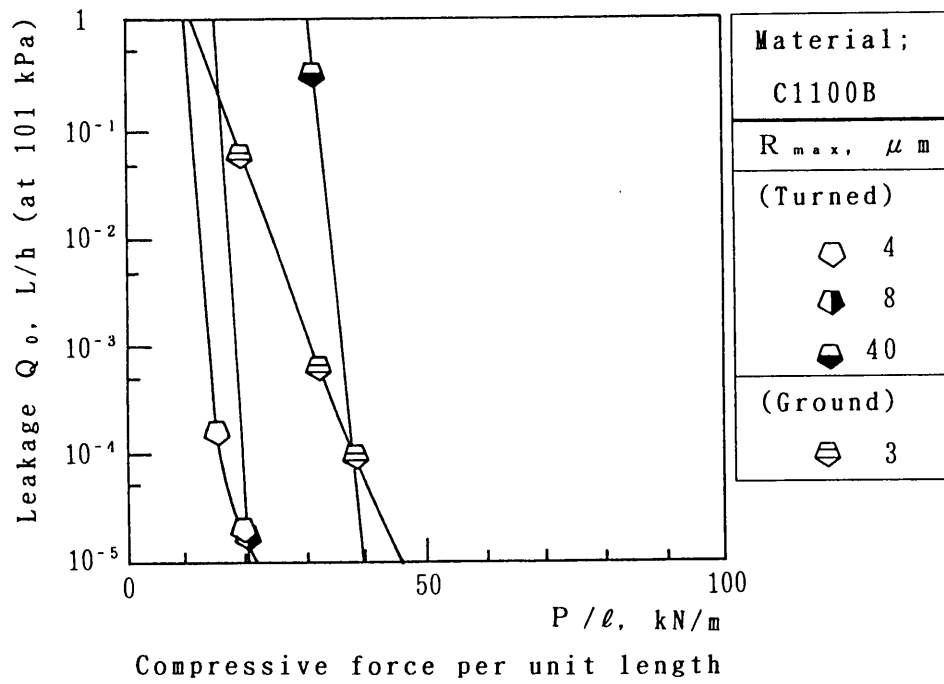
| Material finished | Surface roughness : $R_{max}, \mu m$ | | | | |
|-------------------|--------------------------------------|----------------|--------|--------|---------|
| | Level | Upper specimen | | | |
| | | S55C | C1100B | SUS304 | ‡SUS304 |
| Turned | 4 | 5.3 | 2.8 | 2.0 | 3.2 |
| | 8 | 8.3 | 8.0 | 9.0 | 9.2 |
| | 40 | 42 | 43 | 44 | 46 |
| Ground | 3 | 3.5 | 4.2 | 3.2 | 2.9 |

6.3.2 シールの基本特性およびその考察

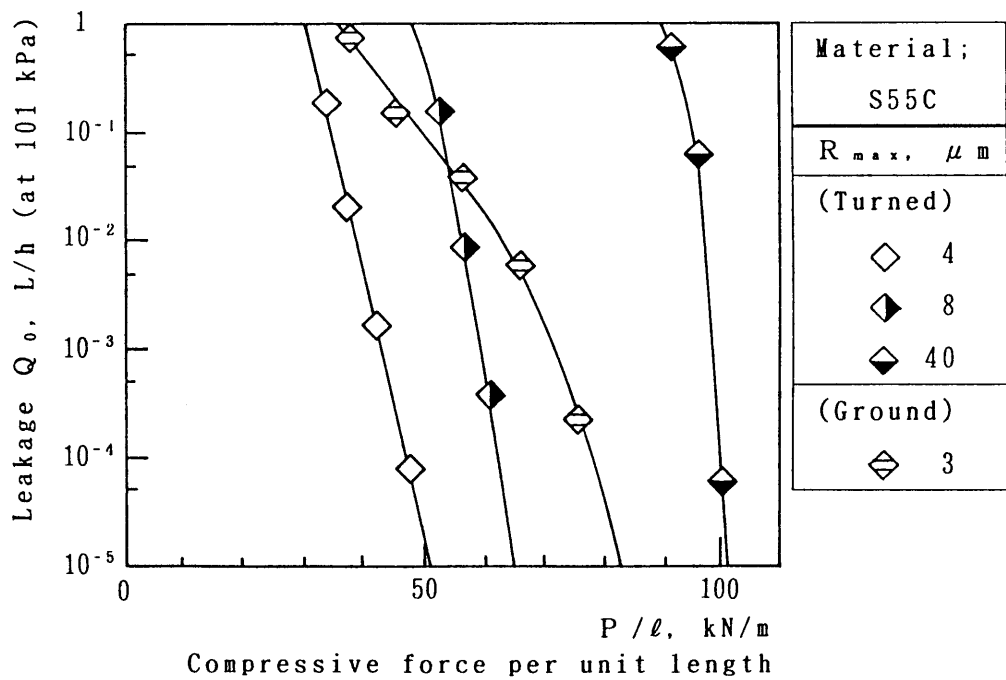
6.3.2.1 設定押し付け力について

シーリング特性を調べた実験結果の一例を図6-7に示す。密封面が銅, 炭素鋼, ステンレス鋼と異なっても, P/l の増加による Q_c の減少傾向はほぼ同様である。すなわち, 密封面が旋削仕上げの場合, P/l 値は密封面の R_{max} 値の増加に伴って高くなる傾向にある。密封面が研削仕上げの場合, P/l は旋削仕上げ面の P/l に比べて高い。これは, 前章で述べたように, 研削仕上げ面のごくわずかな量の深いむしろ傷は閉塞されにくいことを示している。図6-7から求まる P_c/l に対して R_{max} との関係を図6-8に示す。

図6-8から, 密封面が旋削仕上げの場合, P_c/l は R_{max} の増加に伴って増加の傾向にある。しかし, 溶体化処理されたステンレス鋼(図中の材料記号は‡SUS304)の P_c/l は $R_{max} \approx 2 \sim 8 \mu m$ の範囲で

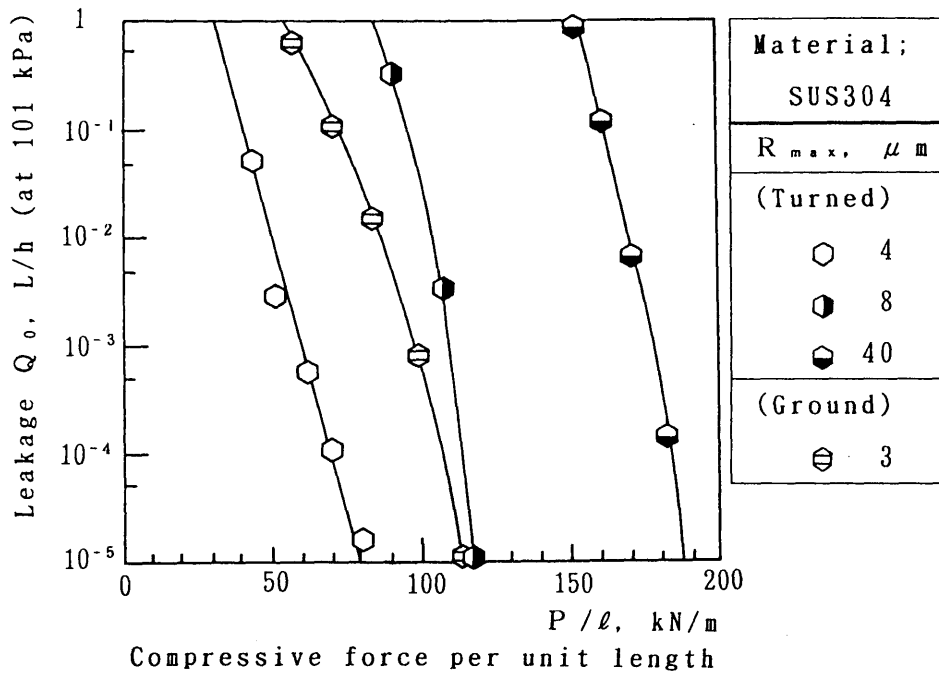


(a) 密封面が銅の場合

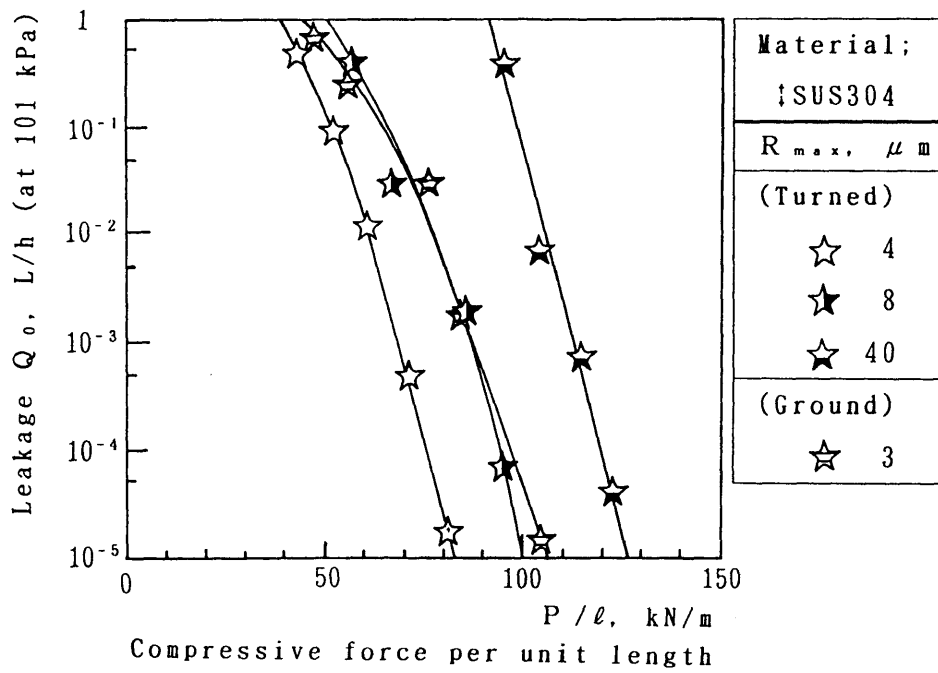


(b) 密封面が炭素鋼の場合

図6-7 シーリング特性実験結果



(c) 密封面がステンレス鋼の場合



(d) 密封面が溶体化処理されたステンレス鋼の場合

図6-7 シーリング特性実験結果

ほぼ同じ値を示している。これは、図6-9に示すように、ステンレス鋼が中性塩浴で溶体化処理された際に、密封面は中性塩によって腐食された、無数の微細な凹凸が観察され、この微細な凹凸による溝の漏れ通路を閉塞するため、 $R_{max} \approx 3 \mu\text{m}$ の P_c/l は高くなり、 $R_{max} \approx 8 \mu\text{m}$ の P_c/l とほぼ同じ値を示したものと考える。密封面が研削仕上げの場合、 P_c/l は密封面の材料にかかわらず、旋削仕上げの P_c/l に比べて高い。これは、研削仕上げ面のむしれ傷による漏れ通路は閉塞されにくいことを示している。

| | | | | |
|----------|-------------------------------|---|---|---|
| Material | C1100B, S55C, SUS304, †SUS304 | | | |
| Turned | ◇ | ◇ | ○ | ☆ |
| Ground | ◐ | ◑ | ◒ | ☆ |

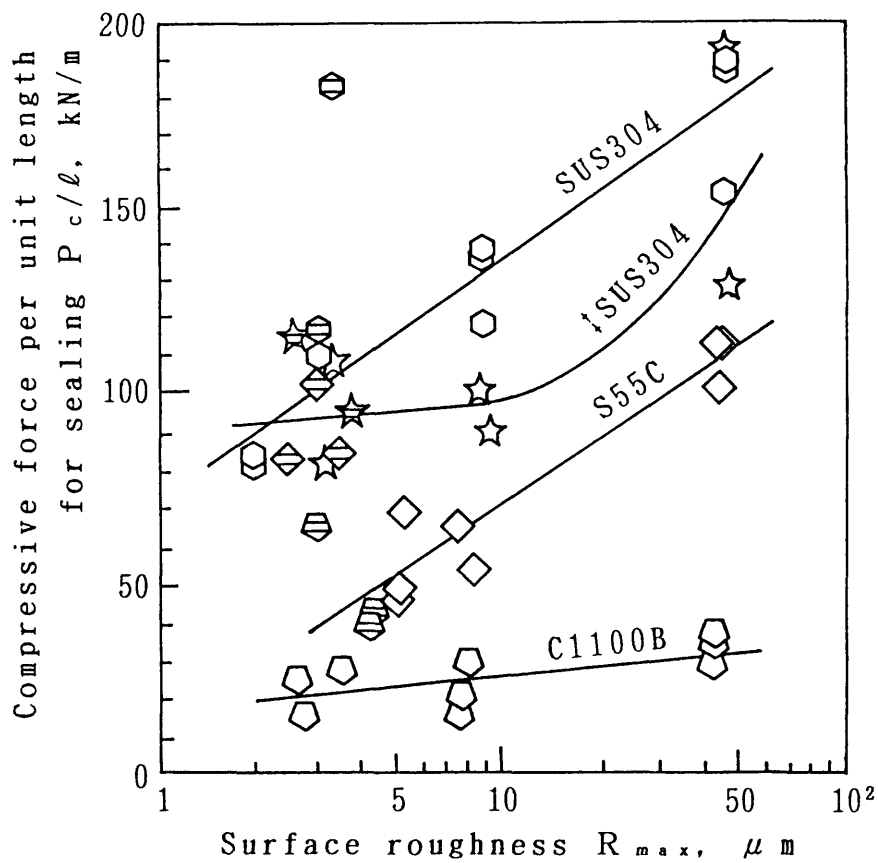
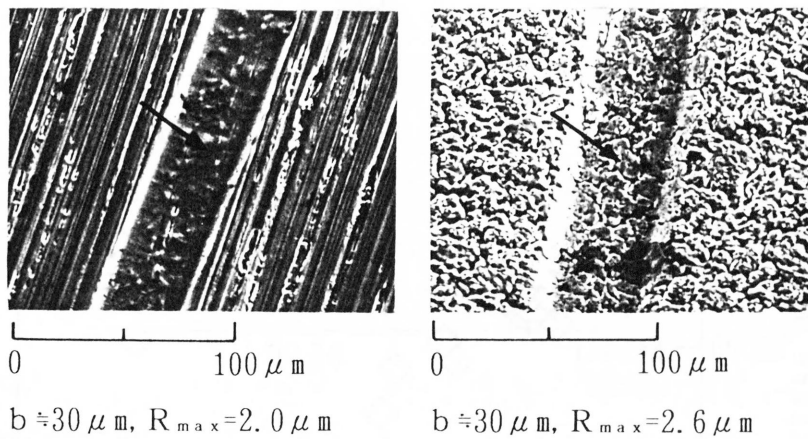


図6-8 P_c/l と R_{max} の関係

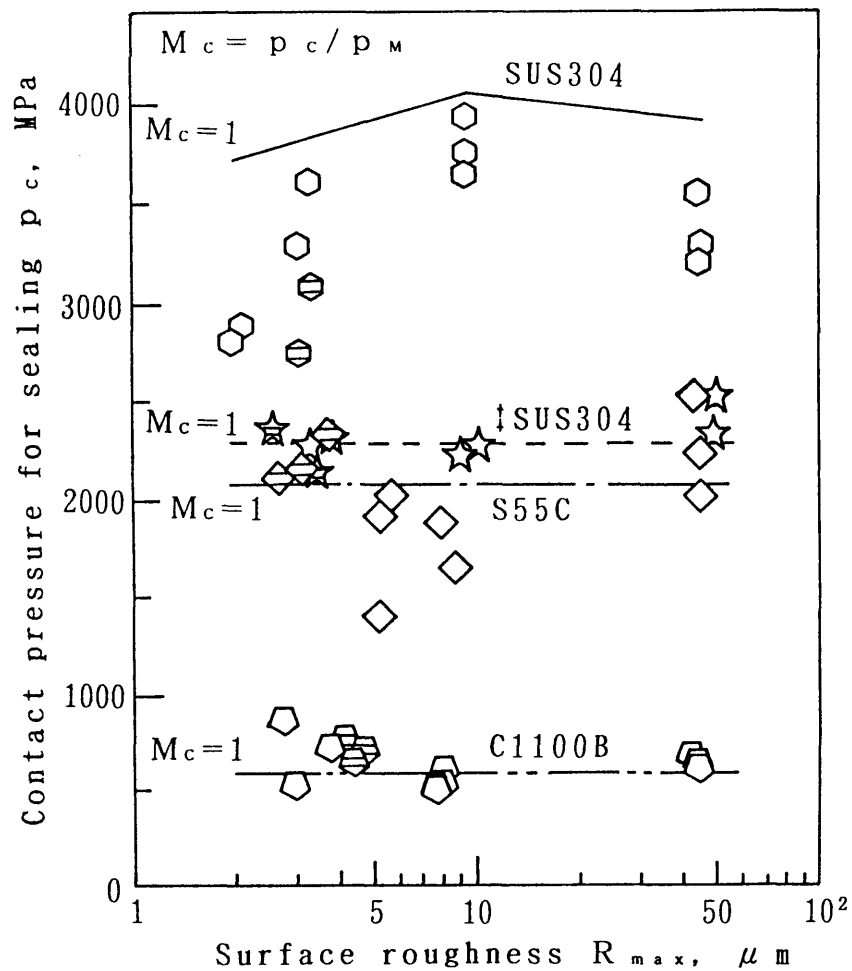


(a) 溶体化処理前 (b) 溶体化処理後

注) 図中の \searrow はナイフエッジの食い込みによる溝を示す。

図6-9 (a)溶体化処理前, (b)溶体化処理後のステンレス鋼密封面へのナイフエッジの食い込み状態の比較 (SEM像)

また図6-8 から，本章のナイフエッジは， $R_{max} \approx 3 \sim 40 \mu m$ の範囲において，密封面の材質が銅の場合はもちろんのこと，炭素鋼，ステンレス鋼の場合でも密封が可能であることを示している。それぞれの P_c/ℓ は，銅では約 $15 \sim 40 \text{ kN/m}$ ，炭素鋼では約 $45 \sim 110 \text{ kN/m}$ ，ステンレス鋼では約 $80 \sim 190 \text{ kN/m}$ と，従来のナイフエッジシールの



注) 図中の記号は，図6-8と同じである。また， $M_c = p_c/p_m$ は，それぞれの密封面材料の密封最表面層の値を示す。

図6-10 p_c と R_{max} の関係

P_c/l (ステンレス鋼のナイフエッジ部と銅のガスケットの密封装置で、銅の密封面の R_{max} が約 $3\mu m$, $P_c/l \approx 120 \sim 600 \text{ kN/m}$)⁽³⁾⁽¹⁷⁾⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾ と比べても低く、シールとして大きな効果が得られる。これは、従来のナイフエッジ部の材料として、加工困難なステンレス鋼を使用しているため、加工精度の信頼性が悪く、また加工時の寸法精度管理が行われなかったため、安全性を考慮して必要以上の高い押し付け力を負荷していると考えられる。

6.3.2.2 設定接触圧力について

p_c と R_{max} の関係を図 6-10 に示す。図より、密封面の仕上げ方法（旋削仕上げと研削仕上げ）による p_c の差異は見受けられない。銅、炭素鋼、ステンレス鋼および溶体化処理を施されたステンレス鋼に対する p_c は、 R_{max} に関係なくほぼ一定値を示し、それぞれの密封面材の p_m の約 $0.9 \sim 1.3$, $0.8 \sim 1.2$, $0.8 \sim 1.0$, $0.9 \sim 1.1$ 倍に相当する。このことは、本章のナイフエッジシールは、 P_c/l 値が低くなる食い込み型シールであることを示す。

6.4 結言

密封面の仕上げ方法およびナイフエッジ稜線部の幅を変えてシーリング機構を実験的に調べ、最適なナイフエッジの形状と寸法を求めた。その最適な形状と寸法に対し、さらに材料を硬質とした場合の特性を密封面の粗さに着目して検討した。得られた結果は次の通りである。

(1) 銅材密封面に対する、炭素鋼製ナイフエッジ（ナイフエッジの半頂角が 30° ）のシーリング機構は、密封面の仕上げ方法（旋削仕上げで表面粗さが $R_{max} \approx 8\mu m$ および研削仕上げで $R_{max} \approx 3\mu m$ ）に関係なく、ナイフエッジ稜線部の幅 b ($b \approx 30 \sim 500\mu m$) の大きさにより、3 型式に分類される。

(a) 密封最表面層への食い込み型シール；

b が狭い ($b \leq 50\mu m$) 場合のシーリング機構で、設定接触圧力

p_c は接触部における密封最表面層のマイヤー硬さ $p_m = 586 \text{ MPa}$ の約 $0.8 \sim 1.4$ 倍と高くなるが、接触面積 A_c が狭いため、設定押付け力 P_c/l は低くなる。

(b) 密封面の母材への押し込み型シール；

b が広い ($b \geq 500 \mu\text{m}$) 場合のシーリング機構で、 p_c は密封面の母材の引張強さ $\sigma_B = 212 \text{ MPa}$ の約 $0.9 \sim 1.1$ 倍と低くなるが、 A_c が広いため、 P_c/l は高くなる。

(c) 中間型シール；

(a) と (b) の中間のシーリング機構で、 P_c は P_m より低く σ_B より高い値となる。

上記 (1) の分類により、設定押し付け力が低くなる最適なナイフエッジの形状と寸法として、ナイフエッジの半頂角は 30° 、稜線部平面はラップ仕上げ、稜線部の幅は約 $50 \mu\text{m}$ 以下とするのが良い。

(2) ナイフエッジの半頂角は 30° 、稜線部の平面はラップ仕上げ、稜線部の幅が $b \approx 35 \mu\text{m}$ と狭く、硬い合金工具鋼の表面に TiC 、 TiN の硬質被膜層が形成されたナイフエッジの場合、 $R_{max} \approx 4 \sim 40 \mu\text{m}$ (旋削仕上げ) および $R_{max} \approx 3 \mu\text{m}$ (研削仕上げ) において、つぎの結果が得られた。

(a) 密封面の材質が銅、炭素鋼、ステンレス鋼に対する p_c は R_{max} に関係なくほぼ一定値を示し、それぞれ、密封面材質に対する p_m の約 $0.9 \sim 1.3$ 、 $0.8 \sim 1.2$ 、 $0.8 \sim 1.1$ 倍に相当する。

(b) 密封面の材質が銅、炭素鋼、ステンレス鋼に対する P_c/l は、 R_{max} の増加 ($R_{max} \approx 4 \sim 40 \mu\text{m}$) に伴い高くなる傾向にある。しかし、それらの P_c/l は、銅では約 $15 \sim 40 \text{ kN/m}$ 、炭素鋼では $45 \sim 110 \text{ kN/m}$ 、ステンレス鋼では $80 \sim 190 \text{ kN/m}$ と、従来のナイフエッジシールの P_c/l と比べて、低い値を示す。

第 7 章 接線力が作用するシールの基本特性 (1) ⁽⁴⁴⁾

－環状くさび形ガスケットの場合－

7.1 緒言

第 3 章～第 6 章において、密封面に垂直力のみが作用する静的メタルシールに関する実験を行い、シールの基本特性と密封面の表面粗さとの関係について調べた。

本章では、密封面に垂直力のほかに接線力が作用する場合の、シールの基本特性と表面粗さとの関係を解明する研究の一環として、密封面に垂直に押し付け力が作用し、同時に環状密封面に対して半径方向にもその分力が及ぶ接触状態のもとで、接触表面の塑性変形がシールの基本特性に与える影響について検討する。具体的には、軟らかい材料で作った環状くさび形ガスケットと硬い材料の球面とでシールを構成し、密封面の円すい半頂角を変化させ、漏れ量を許容量以下に留めるために必要なくさびの接触幅と押し付け力との関係を先ず実験的に求める。さらに、この実験で求めるくさびの接触幅と計算で求めるくさびの接触幅とを比較検討する。

7.2 表面粗さと環状くさびモデルとの関係

金属同士の接触で密封性能を確保する場合、接触面の表面性状が大きな影響を与える。つまり、方向性のある表面粗さをもつ接触面では、漏れ流体の方向と表面粗さ突起の方向との相対的關係が密封性能に影響する。船橋ら⁽²⁶⁾は、研削加工で仕上げられた接触面を用い、表面粗さ突起の方向性が密封性能に与える影響を調べた。その結果、流体漏れ方向に対し表面粗さ突起の方向が直角な場合は、平行な場合に比べ漏れ量が少なくなり、また押し付け面圧の増加に伴う漏れ量の減少は、表面粗さ突起の方向が直角の場合の方が、減少の割合が大きいことを明らかにしている。

そこで、本章で取り扱う密封面の表面性状としては、流体漏れ方向（見かけ）に対し、表面粗さ突起方向がほぼ直角となる、渦巻き

状旋削仕上げ面上の旋削山突起群の一つを選び，これを軟らかい材料から成る環状くさびモデルのガスケットとし，相手密封面を硬い材料からなる滑らかな球面とする。

7.3 実験装置および実験材料

7.3.1 実験装置

実験は，図7-1に示す実験装置本体内に図7-2に示す試料をセットして実施した。窒素ガス流れに対する装置上の注意，漏れ窒素ガス

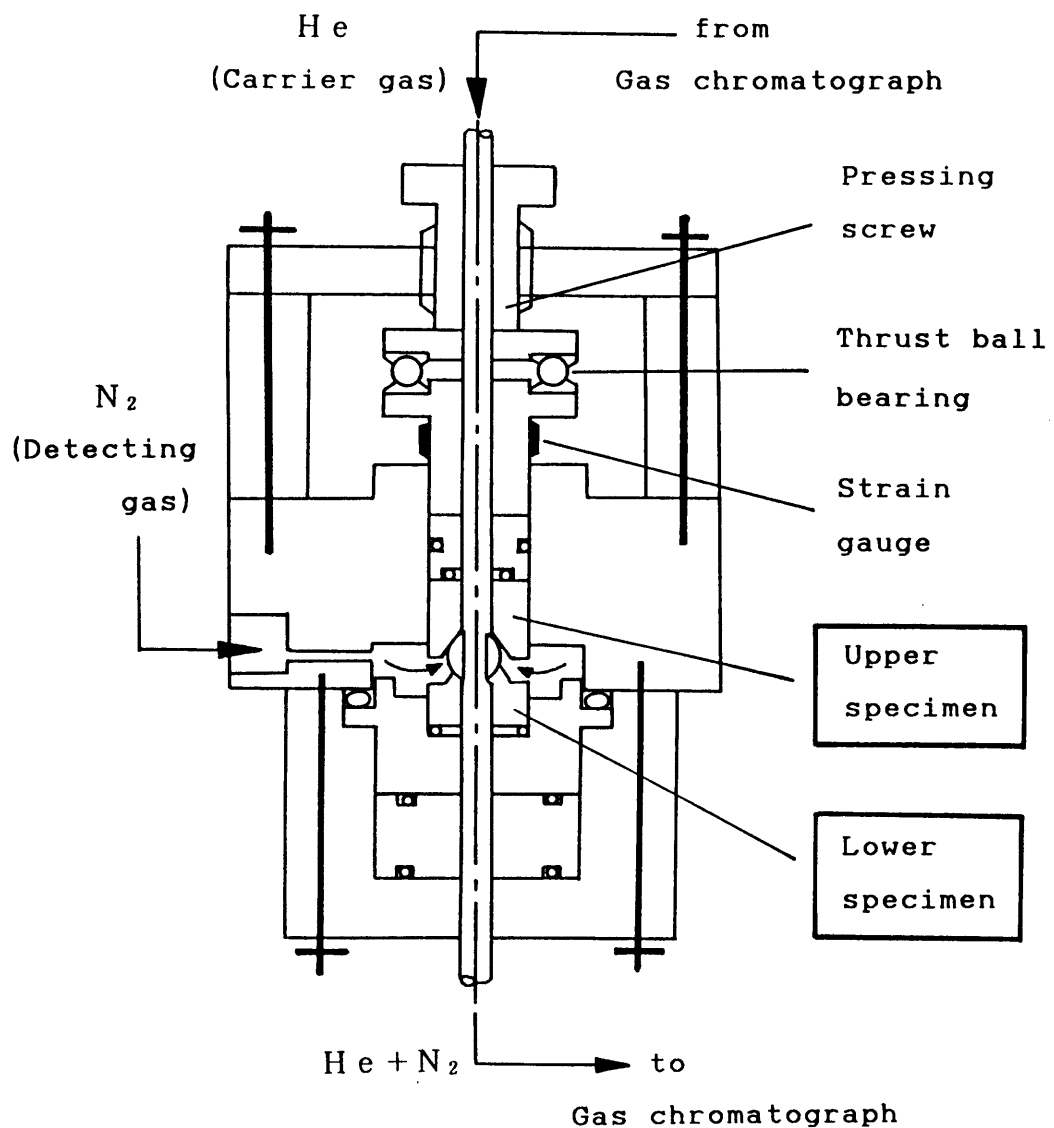


図7-1 実験装置本体

の計測要領および漏れ窒素ガスの算出要領などは第3章～第6章と同様である。

7.3.2 実験材料

試料の形状と寸法，試料の機械的性質を図7-2，表7-1に示す。上試料の環状くさびは銅材（C1100B）で，所定のくさび形状（くさびの頂角 2α は 160° ）に旋削仕上げ後，真空焼きなましを施した。下試料の密封面の円すい半頂角 $\theta \neq 90^\circ$ に対する球面は市販の玉軸受

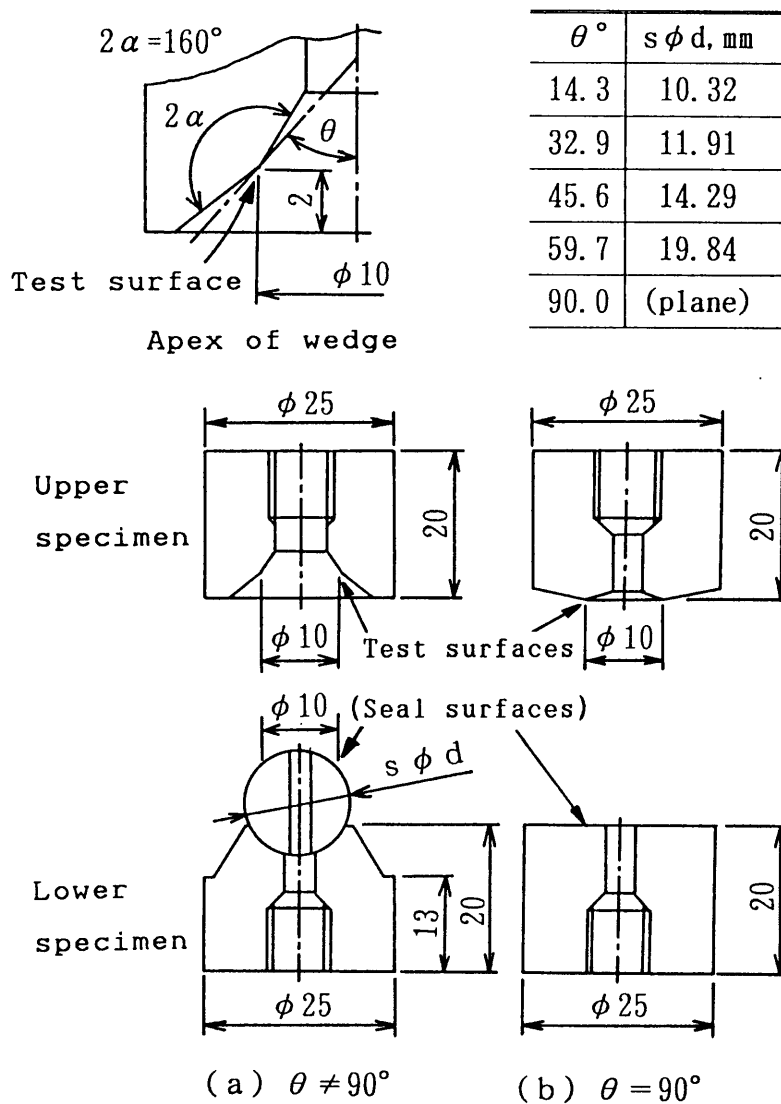


図7-2 試料の形状と寸法

表 7-1 実験材料の機械的性質

| Material | | Mechanical properties | | | Heat treatments |
|----------------|--------|-----------------------|-----------------|---------------|--------------------------------------|
| | | Tensile strength | Elon- gation | Hard- ness | |
| | | σ_B | ϵ | Hv | |
| | | MPa | % | | |
| Upper specimen | C1100B | 212 | 64 | 59 | 560°C × 1hr Annealed in vacuum |
| Lower specimen | SUJ2 | ~ | ~ | ~900* 772 | (Steel balls for ball bearing) |
| | SKS3 | ~ | ~ | 858 | Oil-quenched |

注) *印は JIS規格値を示す。

け用鋼球 (JIS B1501) である (図 7-2(a))。 $\theta = 90^\circ$ の場合 (単一くさびからなる, のこ歯形ガスケットに相当), 下試料は, 油焼き入れた合金工具鋼鋼材 (SKS3) で, ラッピング仕上げを施した平面である (図 7-2(b))。くさびの断面形状および試料の表面粗さは, スキッドなしの状態 で触針式表面粗さ測定機で計測した。くさびの稜線部付近の表面粗さ R_{max} は約 $1.0 \mu m$, 鋼の球面および平面の R_{max} は約 $0.1 \mu m$ 以下である。実験は, 図 7-2 において, $\theta = 14.3 \sim 90.0^\circ$ の 5 種類について実施した。

7.4 シールの基本特性およびその考察

7.4.1 シーリング特性

シーリング特性の実験結果を図 7-3 に示す。図は, 押し付け力 P/l (P は押し付け荷重, l はくさび稜線部の全周の長さ) と窒素ガス漏れ量 Q 。(0.101MPa, 0°C の標準状態量) の関係である。図より, 各 θ に対する P/l は θ の減少に伴って低くなる傾向を示し, 約 14~23

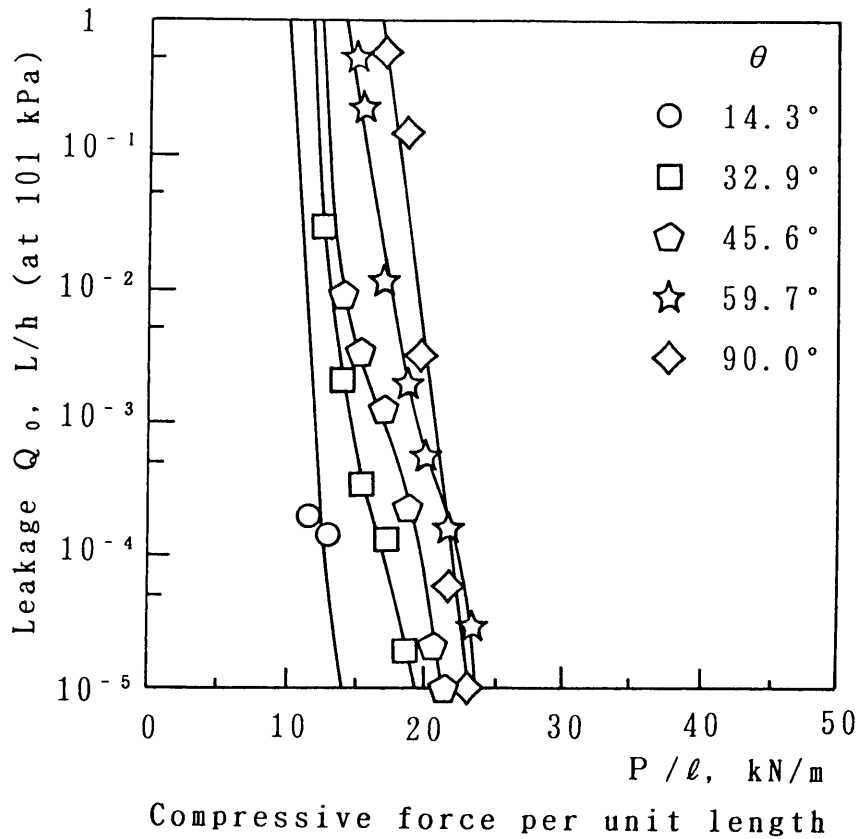
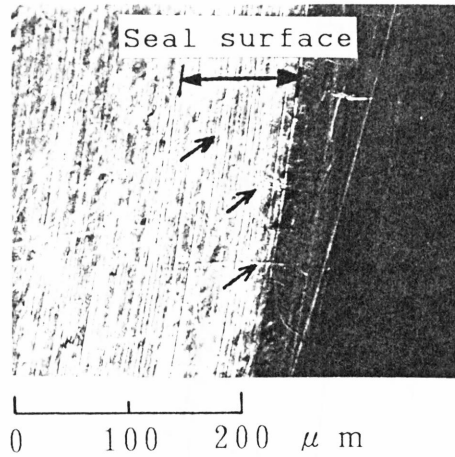


図7-3 シーリング特性実験結果

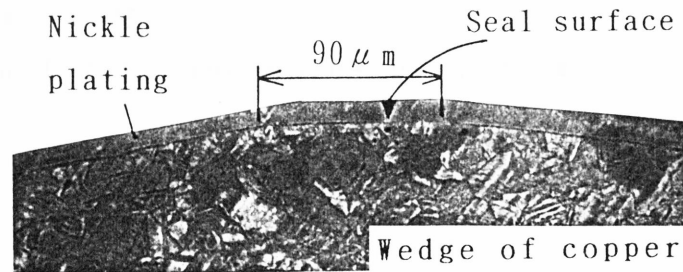
kN/mの押し付け力で Q_0 は 10^{-5} L/h以下となる。ここで、 $\theta = 14.3^\circ$ での P/ℓ は $\theta = 90^\circ$ に比べ約0.6倍と低くなっていることが分かる。

7.4.2 くさび表面の粗さ突起の影響

実験後のくさび稜線部の接触面について、一例を図7-4に示す。図は $\theta = 59.7^\circ$ の場合で、くさび稜線部は約 $90 \mu\text{m}$ と平らに大きく塑性変形しているが、接触表面には約 $0.4 \mu\text{m}$ （実験前は約 $1 \mu\text{m}$ ）の粗さ突起が依然として残っている。また、接触部の表面層について硬さ測定したところ、測定荷重の200, 100, 50, 25 gに対するマイクロビッカース硬さHv値は76, 84, 93, 101を示し、母材そのものよりも硬さが増大していた。これらのことから、環状くさび形ガスケットのシーリング特性については、くさび稜線部の粗さ突起の存在と



(a) 接触面 (SEM像)



(b) 断面形状 (SEM像)

注) (a) の ↗ 印はくさび接触面の溝や放射状の傷を示す。(b) のニッケルメッキは断面形状を鮮明に撮影するためのものである。

図7-4 くさび稜線部の接触面 (実験後 ; $\theta = 59.7^\circ$, $P/\ell = 24.5 \text{ kN/m}$)

押し付けによるその突起の変形から考察する。

すなわち、くさび稜線部の半径方向および周方向には、旋削仕上げによるうねりや微小突起の凹凸 ($R_{max} \approx 1 \mu m$) およびガスケット取り扱い時につく傷からなる粗さ突起が存在する。環状くさびを球面で押し付けると、まずくさび稜線部の周方向の高い突起群が押しつぶされ加工硬化する。この突起群が硬化するため、くさびが粗さ突起の高さ (約 $1 \mu m$) 以上に押しつぶされても、接触部全域の粗さ突起は完全には押しつぶされず、漏れの原因となる漏れ通路としてすきまが生じる。くさびがさらに押しつぶされたとき、新たに押しつぶされるくさび表面の粗さ突起も塑性変形し、加工硬化するため、漏れ通路としてすきまは残ることになる。しかし、くさびの接触幅が広がると、接触面間からの漏れ量は減少傾向を示し、この接触幅がある程度の大きさ (本実験ではその平均値が約 $95 \mu m$) になると、漏れ量は一定値 ($10^{-5} L/h$) 以下になる。

ここで、接触面間からの漏れ量を許容量以下に留めるために必要なくさびの接触幅を w_c と定義し、実験後のくさびの接触幅を計測したときの w_c 値を後述の第 7.4.3 項で図 7-7 に黒印で示す。なお、漏れ量の許容量 Q_c は、第 3 章～第 6 章と同じく、 $Q_c = 10^{-5} L/h$ とした。

7.4.3 くさびの接触幅について

前項で述べた、密封に必要なくさびの接触幅について、くさびの接触幅の変形量と押し付け力の関係を計算と実験で求める。

7.4.3.1 変形量の計算

まず密封面間の球面から環状くさび形ガスケットへの力の伝達を考える。球面を環状くさびに押し付けると図 7-5 のように単位長さ当たりの接触部に垂直力 n が発生し、その力が摩擦力 t を作り、これらの軸方向成分が単位長さ当たりの押し付け荷重 p とつりあう。接触部の全周 ℓ においては、垂直力が $N = n \ell$ 、接線力が $T = t \ell$ となり、これらの軸方向成分が押し付け荷重 $P = p \ell$ とつりあう。

その結果，(a) $\theta < 90^\circ - \rho$ の場合は， N および T は，くさび効果により，次式となる。

$$N = \frac{P}{\sin \theta + \mu \cos \theta}$$
$$T = \mu N \quad (7.1)$$

ここで， θ は密封面の仮想接触円すい半頂角， ρ は摩擦角， μ はその摩擦係数である。また(b) $\theta \geq 90^\circ - \rho$ の場合には，接触面の傾きは摩擦角 ρ よりも小さいため

$$N = P \sin \theta$$
$$T = P \cos \theta \quad (7.2)$$

となる。

次に環状くさび形ガスケットのくさびの接触幅の変形量を計算するに際し，くさびに関する次のような仮定を用い，そのモデルを図7-6に示す。

- (1) くさび表面は凹凸がなく滑らかである。
- (2) くさびの接触幅は環状くさび稜線部の直径および球面の直径に比べて小さいことから，くさびの接触幅の計算は，くさびと平面の二次元接触問題に置換する。
- (3) くさび表面の粗さ突起群の加工硬化は，くさび母材の変形には影響を与えない程度であると考え，くさび母材の塑性変形が加工硬化に及ぼす影響は微少なものとする。

図7-6で示したくさびモデルは次のように変形すると考える。軟らかいくさびを硬い理想平面に押し付ければ，くさびは垂直力 N によって押しつぶされ（図7-6(1)），さらに接線力 T の作用によって接触幅が増加する（図7-6(2)）。くさびは塑性変形し，わずかに押しつぶされ，静止状態となる。押し付け荷重をさらに増加すれば，図7-6の(1)→(2)の変形が繰り返され，接触幅は増加する。本実験では，静止状態になった後のくさびの接触幅を対象として取り扱った。

ここで，くさびの接触幅 w の塑性変形量変化について計算する。

(a) $\theta < 90^\circ - \rho$ の場合, 図7-6 (2) で示す接触部にはMisesの降伏条件式⁽⁵⁰⁾

$$p^2 + 3s^2 = K^2 \quad (7.3)$$

を適用する。ここで p は圧縮応力, s はせん断応力, K は定数, 図7-6で示す A_r (w_r) は $\theta \neq 90^\circ$ のときのくさびの接触面積 (接触幅), A_{r0} (w_{r0}) は $\theta \neq 90^\circ$, $s = 0$ のときのくさびの接触面積 (接触幅), A_0 (w_0) は $\theta = 90^\circ$, $s = 0$ のときのくさびの接触面積 (接触幅), ℓ は接触部の全周である。式 (7.3) に式 (7.1) を代入すれば接触面積 A_r と A_{r0} の関係が, またくさびの塑性流動応力が一定である条件 (仮定3) から, A_{r0} と A_0 の関係も求まる。 A_r と A_0 との関係式に整理すれば

$$\frac{A_r}{A_0} = \frac{1}{\sin \theta + \mu \cos \theta} \sqrt{1 + 3\mu^2} \quad (7.4)$$

となる。 A_0 , A_r に対する接触幅の w_0 , w_r の塑性変形量変化 w_0/w_r は

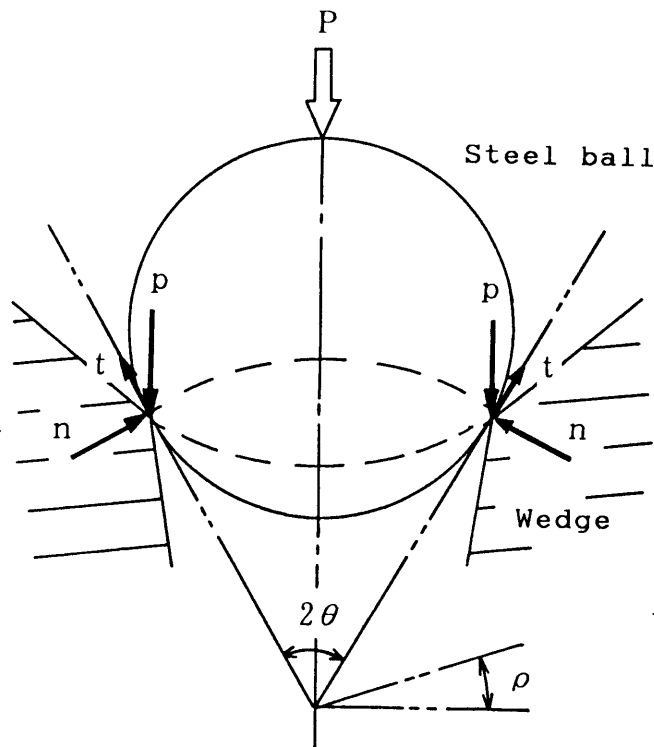


図7-5 接触部における力のつりあい

$$A_0 = w_0 \ell, \quad A_r = w_r \ell \quad (7.5)$$

の関係から

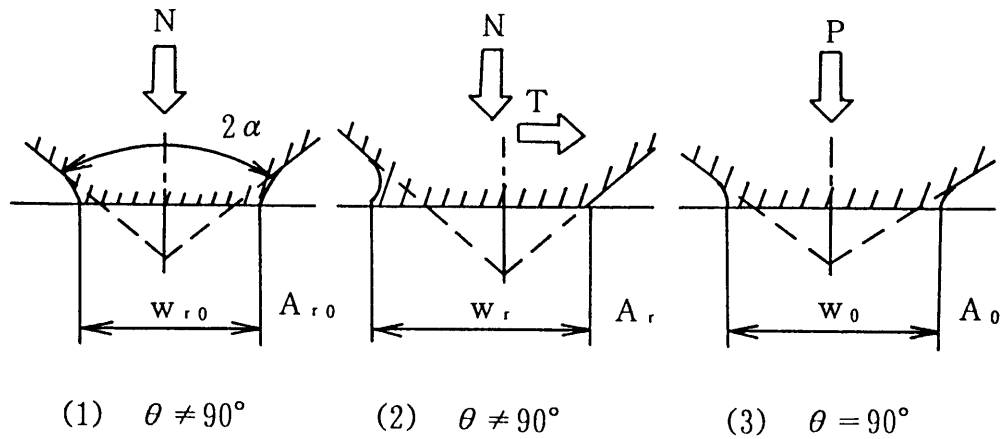
$$\frac{w_r}{w_0} = \frac{1}{\sin \theta + \mu \cos \theta} \sqrt{1 + 3 \mu^2} \quad (7.6)$$

となる。

(b) $\theta \geq 90^\circ - \rho$ の場合, (a) の場合と同様に考えて, 接触幅の塑性変形量変化 w_r/w_0 の関係を求めることができる。すなわち

$$\frac{w_r}{w_0} = \sin \theta \sqrt{1 + \frac{3}{\tan^2 \theta}} \quad (7.7)$$

となる。



注) θ は密封面の円すい半頂角 (図7-5 参照) を示す。

図7-6 くさびの接触状態

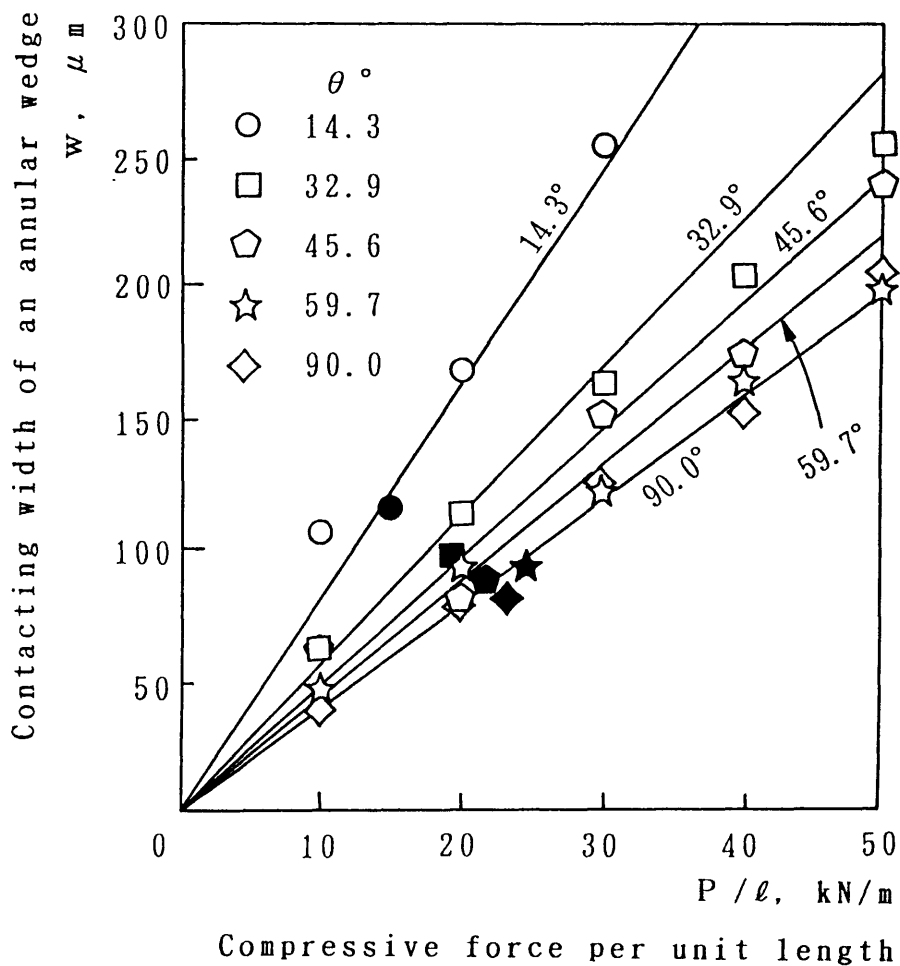
7.4.3.2 変形量の実測

試料の形状と寸法, 試料の材料, くさびの仕上げ方法は第7.3.2項と同じ条件とした。くさびは旋削仕上げし, その表面粗さ (R_{max}) は約 $1.0 \mu m$ であるが, 粗さ突起の山と山との間隔は半径方向で約 $100 \mu m$, また周方向ではそれ以上と大きく, くさびの接触幅の変形量を求める場合, くさび表面は滑らかであると考え。実験は, 試料を図7-1に示す実験装置本体にセットした後, 所定の軸方向の押し付け力 ($P/\ell = 10 \sim 50 \text{ kN/m}$ の範囲において5段階) を押し付

けねじにより加え，くさびの弾性変形の影響を無視できるまでの時間（約6分間）保持した。実験後のくさびの接触幅 w としては，くさびの断面形状を縦横同倍率（500倍）に拡大記録し，環状接触面の6箇所を測定し，その平均値を取った。

7.4.3.3 計算および実測結果

塑性変形による環状くさびの接触幅 w と押し付け力 P/ℓ を求めた計算および実測の結果を図7-7に示す。ただし，図中の黒印は密封に



注) 図中の黒印は第7.4.2項で述べた密封に必要なくさびの接触幅 w_c で，シーリング特性実験から得る。

図7-7 くさびの接触幅の変形量

必要なくさびの接触幅 w_c で、第 7.4.1 項のシーリング特性実験から得た値である。図中に実線で示した計算値は次の手順で求めた。 w の実測値は P/l に対してほぼ比例関係にあるから、まず、くさびの接触幅の塑性変形量変化の比較基準となる $\theta = 90^\circ$ の w_0 値を最小二乗法を使って直線近似すると、

$$w_0 = 4.1 (P/l) \quad (7.8)$$

となる。次に、式 (7.6)、(7.7) および (7.8) から各 θ に対する w_r 値を算出した。なお、式 (7.6) 中の上下試料面間の摩擦係数 μ は 0.32 ($\rho = 17.7^\circ$) であった。この μ 値は、 $\theta = 90^\circ$ の上試料が下試料平面上を滑り始める傾き角 (摩擦角 ρ) を測定した値の平均値から求めた。図 7-7 中の実測および計算の結果から、 P/l に対する

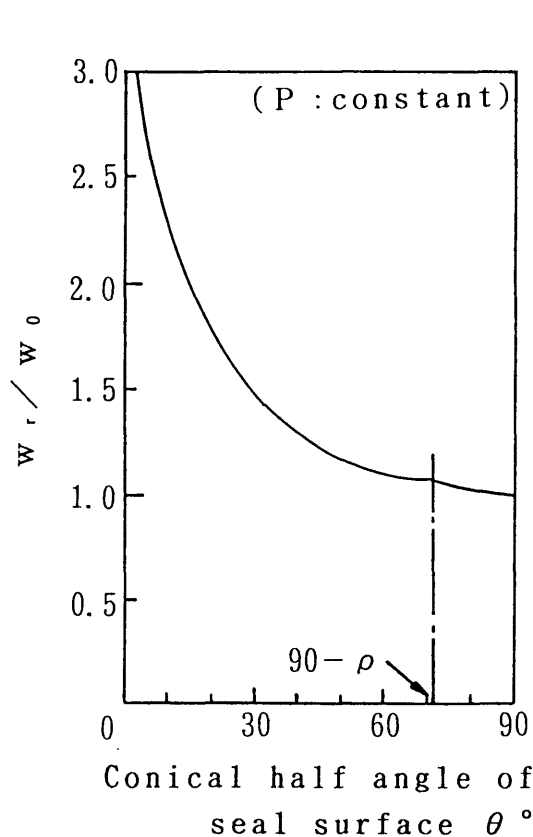


図 7-8 w_r/w_0 と θ の関係

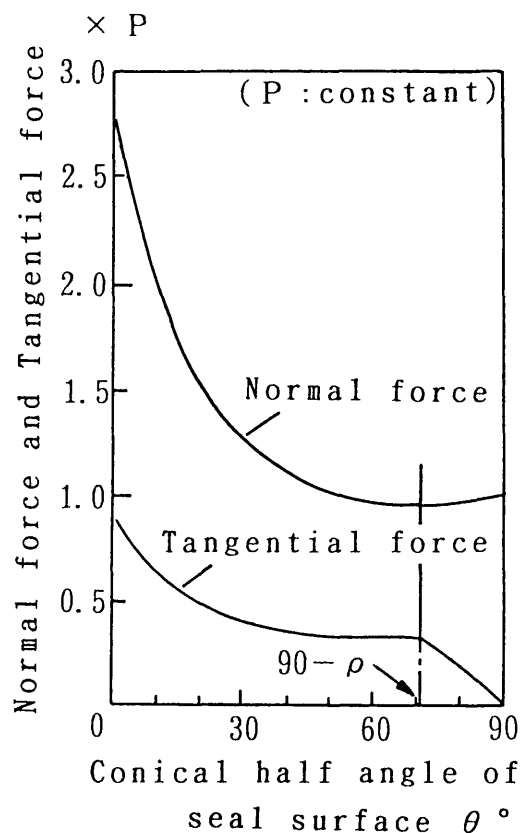


図 7-9 垂直力、接線力
と θ の関係

w の増加傾向の計算値と実測値が約10%の誤差範囲内でほぼ一致する。

次に、計算による θ に対する w_r の変形量を検討するため、式 (7.6)、(7.7) を図7-8に、式 (7.1)、(7.2) の N 、 T と θ の関係を図7-9に示す。図7-8より、 θ の減少に伴って w_r/w_0 は増加し、 $\theta = 45^\circ$ では1.2倍、 $\theta = 15^\circ$ では2.0倍となっている。これは、図7-9に示すように、 θ の減少に伴う垂直力および接線力の増加に起因するものと考えられる。

7.4.4 設定押し付け力について

ここでは、設定押し付け力 P_c/l (第3章3.4.2項で定義) と密封面の円すい半頂角 θ との関係について検討する。図7-3 から求めた P_c/l に対して θ との関係を図7-10に示す。図中の実線は密封に必要なくさびの接触幅 w_c の平均値 ($w_c = 80 \sim 120 \mu\text{m}$ で、平均値は約 $95 \mu\text{m}$) に対する P_c/l の計算値である。実験と計算の結果はほぼ一致している。 P_c/l は θ の減少に伴って減少し、 $\theta = 15^\circ$ の P_c/l は θ

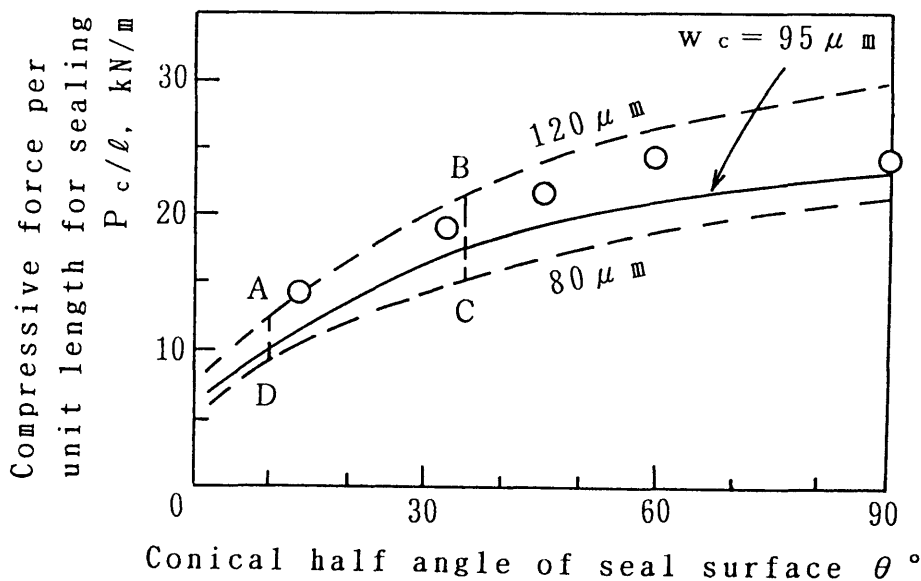


図7-10 P_c/l と θ の関係

= 90°の値と比べて約50%となっている。これは、 θ が小さくなれば、低い押し付け力で密封ができるという密封効果を示す。

最後に、 θ の推奨範囲について考察する。 θ の下限値は、球面がどんなに強く押し込まれても、球面が環状くさびを突き抜けないための安全性を考慮すれば、 θ の下限値は10°が適当と考える。 θ の上限値は、絶対的制限はないが、その目安として90°の P_c/l 値の約70%とすれば、 $\theta = 35^\circ$ が適当である。なお、図中の破線は本実験条件における P_c/l が取り得る上限と下限の推定値を示す。これらの値は、本実験の w_c を参考として、 w_c の上限値を120 μm 、下限値を80 μm とした場合の P_c/l 値である。以上の考察より、本実験条件における、 θ の推奨値は10~35°であり、図中のA B C D内は θ の推奨値と P_c/l の推定値を示す。

7.5 結言

軟らかい材料で作られた環状くさび形ガスケットと硬い材料の球面間のシーリング特性を、密封面の円すい半頂角 θ を変えて実験的に調べ、密封に必要なくさびの接触幅と設定押し付け力 P_c/l との関係を検討した。得られた結果は次の通りである。

(1) くさび表面上の粗さ突起が加工硬化するため、漏れ量を許容量以下に留めるためには、くさびの塑性変形による、所定の接触幅（本実験ではその平均値が約95 μm ）が必要となる。

(2) くさびの接触幅の変形量に関する計算と実験結果から、くさびの接触幅は θ の減少に伴い増加する。この結果、 P_c/l は θ の減少に伴って低下する。たとえば、 $\theta = 15^\circ$ の P_c/l は $\theta = 90^\circ$ の値と比べて約50%となり、密封効果の向上が認められる。

(3) θ の推奨値は10~35°で、その推奨値の範囲に対応する P_c/l を計算することができる。

8.1 緒言

前章では、垂直力と接線力が作用する場合の、シールの基本特性に及ぼす表面粗さの影響を解明する前段階として、環状くさび形ガスケットと硬い滑らかな球面からなるシールの基本特性を調べた。そして、密封に必要なくさび稜線部の接触幅について検討した結果、くさび稜線部の接触幅の塑性変形量と押し付け力との関係を求める計算式を提案した。

本章では、表面粗さの基因である旋削によるスパイラル状の旋削山（円すい内側密封面上の旋削山突起）を、一個のスパイラル状のくさびと見なし、前章の計算式を適用して、垂直力と接線力の両者が作用する場合の、密封面の表面粗さがシールの基本特性に及ぼす影響を調べ、設定押し付け力の定量的計算を行う。

8.2 密封面の表面粗さに及ぼす接線力の影響

表面粗さをもつ金属接触面に垂直力のほかに接線力が作用するとき、巨視的なすべりを生じる前に微視的すべり状態が存在し、そのときは接線方向だけでなく垂直方向にも接触面が変位することが知られている⁽⁵⁰⁾。接触面の垂直変位は、静的メタルシールの密封性能に直接的な影響を与える。

松橋らは、表面粗さがガウス分布で近似できる接触面に対し、接線力が作用したときの垂直方向変位（接近量）を、単一突起の実験結果から定量的に推定する方法を導いている⁽³⁰⁾。さらに、その方法を発展させて、実際の研削加工密封面に接線力が作用したときの垂直変位を推定して、液体漏れ量の変化を計算と実験で比較検討し、それぞれの値が良く一致することを示した⁽³¹⁾。

本章では、旋削加工密封面に垂直力のほかに接線力が作用するとき、密封に必要な押し付け力を、旋削山突起の変形量の計算と実験

結果から、定量的に推定する方法を示す。

8.3 設定押し付け力の計算

軟らかい円すい内側密封面と硬い球面との押し付けによる密封問題を扱う場合に、その押し付け力を計算する際、密封面の接触部に関する、次のような仮定を用いる。

- (1) 密封面のスパイラル状の旋削山は、一個のスパイラル状のくさびから成る。
- (2) くさびの接触幅が球面の直径と比べて小さいことから、くさびの変形量の計算は、第7章と同様に、くさびと平面の二次元接触問題に置換できる。
- (3) 接触状態のくさびは、くさびの全接触長さにおいては、変形量は均一である。

図8-1は、密封面でのスパイラル状旋削山突起のモデル（断面図）を示す。旋削仕上げ面の表面粗さは、通常では、後述の図8-7のように示される。しかし、ここでは、旋削仕上げ面突起は図8-1のような波形状の断面を形成していることにするが、実線と破線で囲まれる断面積1と2の和が断面積3に等しい、三角形の直線でできている、と近似する。図8-2は、円すい内側密封面と球面が押し付けられてシーリングを行う状態を示し、密封面の接触部には垂直力

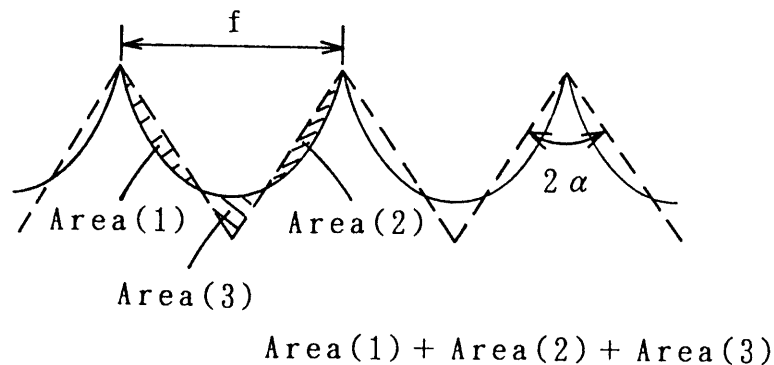


図8-1 突起モデル

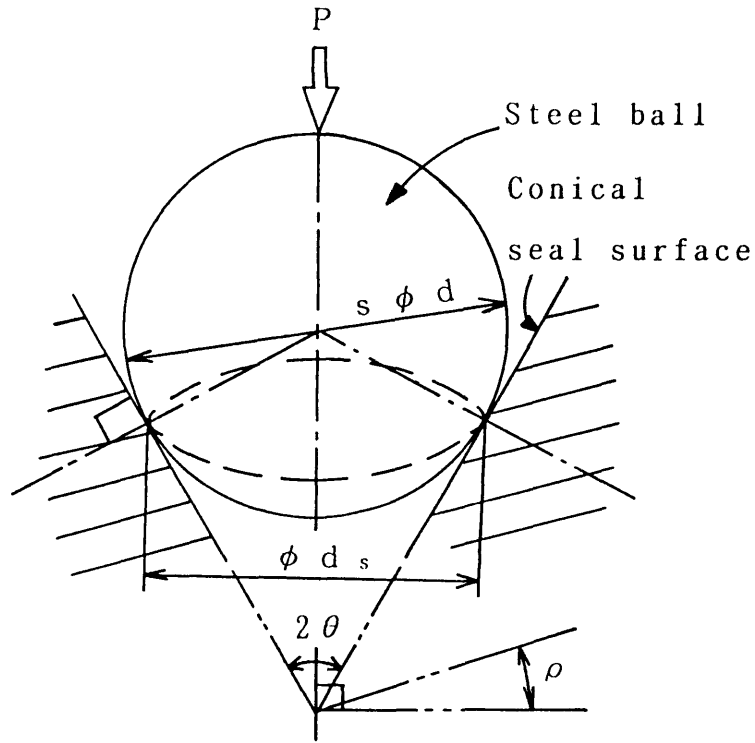


図8-2 円すい内側密封面と球面の接触部に
負荷される押し付け荷重

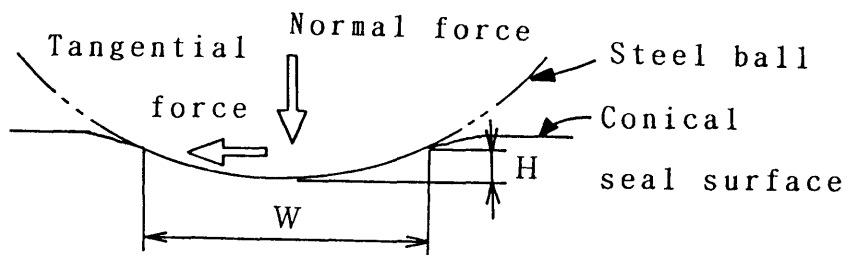


図8-3 密封面の接触状態

のほかに接線力が作用し，図8-3のように，くぼみ深さがH，接触部の幅がWのくぼみ寸法で，硬い球面が軟らかい円すい内側密封面に食い込む。図8-2および8-3より，球面の直径dおよびWは

$$d = \frac{d_s}{\cos \theta}$$

$$W = 2 \sqrt{d H - H^2} \quad (8.1)$$

と示される。ここで、 d_s は密封面のリング状接触部の直径、 θ は密封面の円すい半頂角である。密封面の接触部幅 W を横切るくさびの山数 c は、くさびの山のピッチを f とすれば、

$$c = \frac{W}{f} \quad (8.2)$$

となる。 f と d_s の関係は $f \ll d_s$ であるから、スパイラル状のくさびの接触長さ L は

$$L \approx \pi d_s c \quad (8.3)$$

となる。一方、くさびの接触幅 w_r が $f/2$ になると、密封面の接触面間の隙間はなくなり、漏れ量が許容値以下になると仮定すれば、その w_r は

$$w_r = \frac{f}{2} \quad (8.4)$$

になると考えられる。第7章の単一リング状くさびの実験では、くさびの接触幅 w_0 と押し付け力 P/ℓ の関係として、

$$w_0 = k \frac{P}{\ell} \quad (8.5)$$

の式が提案されており、本章の条件では

$$k = 4.1$$

となる。また第7章では、 w_r と w_0 の関係式として、

(1) $\theta \geq 90^\circ - \rho$ の場合

$$\frac{w_r}{w_0} = \sin \theta \sqrt{1 + \frac{3}{\tan^2 \theta}}$$

(2) $\theta < 90^\circ - \rho$ の場合

$$\frac{w_r}{w_0} = \frac{\sqrt{1 + 3\mu^2}}{\sin \theta + \mu \cos \theta} \quad (8.6)$$

が、単一リング状くさびの変形量計算式から提案されている。したがって、 $w_r = f/2$ に相当する押し付け力 P/ℓ は、式(8.5)、(8.6)より算出される。ここで、 w_0 はくさびの接触部に垂直力が働くときのくさびの接触幅、 w_r はくさびの接触部に垂直力と接線力が働くときのくさびの接触幅、 ρ は接触面の摩擦角、 μ はその摩擦係数

である。したがって、円すい内側密封面に対する設定押し付け力 P_c/ℓ (P_c は漏れ量が許容漏れ量になるときの押し付け荷重, ℓ は円すい内側密封面と球面との接触長さで $\ell = \pi d$) は, 式(8.1)~(8.6)より

(1) $\theta \geq 90^\circ$ - ρ の場合

$$\frac{P_c}{\ell} = \frac{\sqrt{\frac{d_s}{\cos \theta} H - H^2}}{4.1 \sin \theta \sqrt{1 + \frac{3}{\tan^2 \theta}}} \quad (8.7)$$

(2) $\theta < 90^\circ$ - ρ の場合

$$\frac{P_c}{\ell} = \frac{\sqrt{\frac{d_s}{\cos \theta} H - H^2} (\sin \theta + \mu \cos \theta)}{4.08 \sqrt{1 + 3\mu^2}} \quad (8.8)$$

となる。

8.4 実験材料および実験方法

実験装置, 実験装置本体, 窒素ガス流れに対する装置上の注意, 漏れ窒素ガスの計測要領および漏れ窒素ガス量の算出要領などは第3章~第7章と同様である。

試料の形状と寸法, 実験材料の機械的性質, 密封面の表面粗さと旋削山の突起モデル寸法を図8-4, 表8-1, 表8-2に示す。上試料は銅材で, 所定の円すい内側密封面は旋削仕上げされた後, 真空焼鈍処理が施される。くさびの頂角 2α は, スキッドなしの状態の触針式表面粗さ測定機により測定され, 縦横同倍率(500倍)に拡大された断面曲線の記録紙から読取られた。その平均値は $2\alpha = 165^\circ$ で, 第7章で述べた単一リング状くさびの頂角 $2\alpha = 160^\circ$ とほぼ等しい。下試料の球面は市販の鋼球で, 硬さは $H_v = 772 \sim 900$ (J I S規格値), 表面粗さは $R_{max} < 0.1 \mu m$ と, 上試料に比べて, 十分に硬く滑らかな面である。

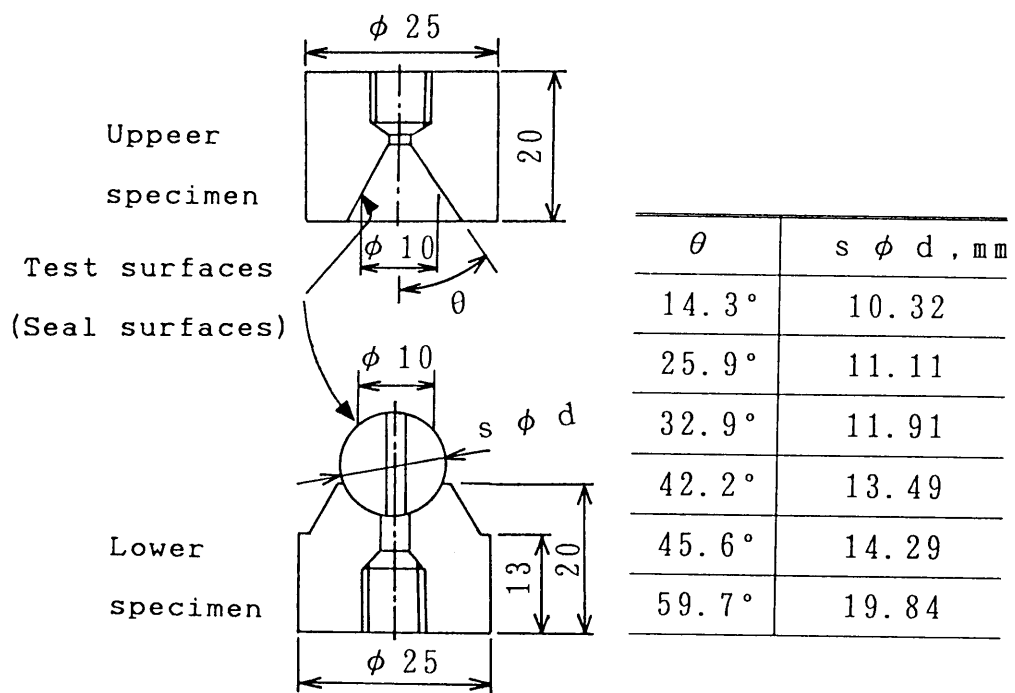


図 8-4 試料の形状と寸法

表 8-1 実験材料の機械的性質

| Material | | Mechanical properties | | | Heat treatments |
|----------------|--------|-----------------------|-----------------|---------------|--------------------------------------|
| | | Tensile strength | Elon- gation | Hard- ness | |
| | | σ_B | ϵ | Hv | |
| | | MPa | % | | |
| Upper specimen | C1100B | 212 | 64 | 59 | 560°C × 1hr Annealed in vacuum |
| Lower specimen | SUJ2 | ~ | ~ | 772 ~900* | Steel balls for ball bearing |

注) *印は JIS規格値を示す。

表 8-2 密封面の表面粗さと旋削山の突起モデル寸法

| Conical half-angle of seal surface θ° | Surface roughness $R_{max}, \mu m$ | Size of wedge | |
|--|---------------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| | | Pitch $f, \mu m$ | Apex angle $2\alpha^\circ$ |
| | 8.0 | 123 | 163 |
| 14.5 | 8.5 | 123 | 162 |
| | 8.0 | 128 | 164 |
| 25.9 | 6.0 | 128 | 168 |
| | 8.2 | 129 | 163 |
| 32.9 | 8.7 | 129 | 166 |
| | 7.8 | 140 | 165 |
| 42.2 | 7.7 | 140 | 164 |
| | 7.3 | 154 | 168 |
| 45.6 | 7.4 | 154 | 167 |
| | 5.7 | 126 | 168 |
| 59.7 | 7.0 | 126 | 167 |

8.5 シールの基本特性およびその考察

8.5.1 シーリング特性

図 8-5 は、接線力が作用する円すい内側密封面と球面間のシーリング特性を求める実験結果を示し、押し付け力 P/l と漏れ量 Q_0 (0.101 MPa, 0°C の標準状態量) の関係を示す。その結果は次のようである。 P/l の増加に対する漏れ減少割合は、 Q_0 が約 10^{-2} L/h までの範囲では急激であるが、 Q_0 がそれ以下の範囲では緩慢になる。また、各 θ に対する P/l は、 $\theta = 14.3^\circ$ の値は $\theta = 25.9^\circ$ の値

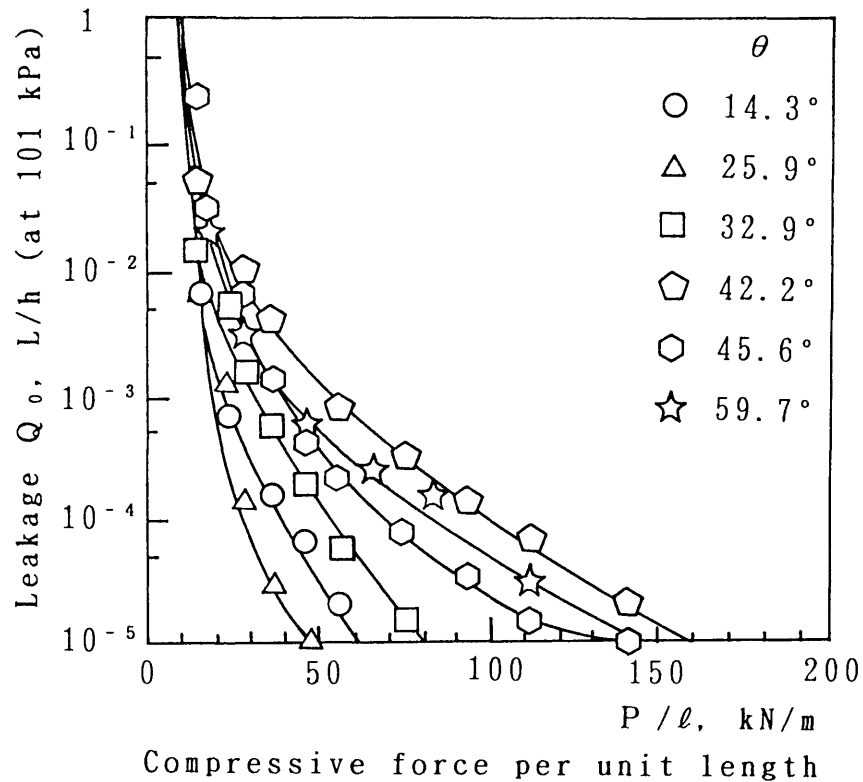


図8-5 シーリング特性実験結果

より、 $\theta = 42.2^\circ$ の値は $\theta = 45.6^\circ$, 59.7° の値よりわずかに高くなっているが、全体としては、 θ の値の減少に伴って低くなる傾向にある。

この漏れ減少傾向については、表面粗さ計による密封面観察から、次のように考える。図8-6は、漏れ減少傾向を観察するために行ったシーリング特性実験結果の一例である。図8-7は、図8-5, 図8-6の Q_0 値に対する、種々の接触状態による密封面の表面粗さ変化を示す。押し付け初期段階においては、密封面上の旋削山突起の頂点部が押しつぶされ（図8-7(a)）、旋削溝に沿って漏れる Q_0 は約 $10^{-2} L/h$ まで急減する。密封面がさらに押し付けられると、旋削山突起はあまり押しつぶされず、密封母材表面層が塑性変形し、密封面の接触下部はくぼみ、接触近傍はわずかに盛り上がる（図8-7(b)）。その結果、

漏れ減少割合は緩慢となる。その後の押し付けで、密封母材がくぼむと同時に旋削山突起は押しつぶされ（図8-7(c)）、 Q_0 は徐々に 10^{-5} L/h 以下になる。

なお、 θ の減少に伴って P/ℓ 値が低くなる理由は、次の8.5.2節で述べる。

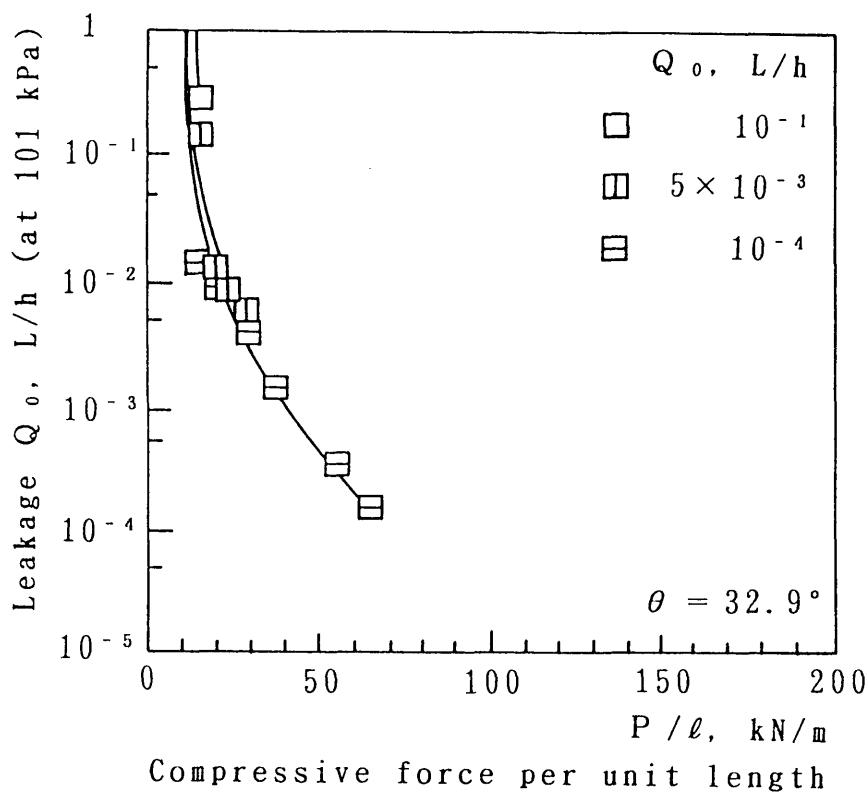
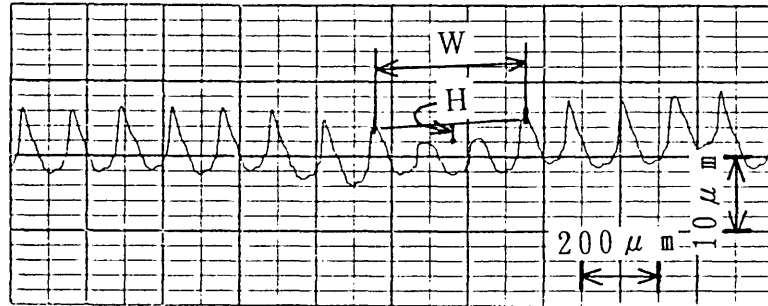
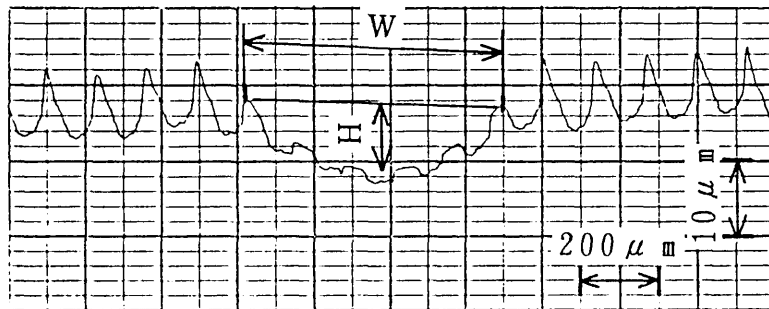


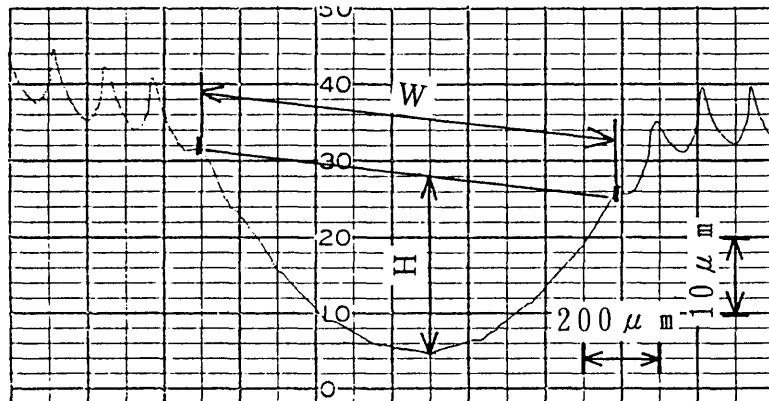
図8-6 $Q_0 = 10^{-1}, 5 \times 10^{-3}, 10^{-4}$ L/h に対するシーリング特性実験結果



(a) $Q_0 = 5.1 \times 10^{-3} \text{ L/h}$, $P/\ell = 28.3 \text{ kN/m}$



(b) $Q_0 = 2.0 \times 10^{-4} \text{ L/h}$, $P/\ell = 66.0 \text{ kN/m}$



(c) $Q_0 = 10^{-5} \text{ L/h}$, $P/\ell = 80.0 \text{ kN/m}$

図8-7 種々の接触状態による密封面の表面粗さの変化 ($\theta = 32.9^\circ$ の場合の断面曲線)

8.5.2 設定押し付け力について

ここでは、設定押し付け力 P_c/l （第3章3.4.2項で定義）と密封面の円すい半頂角 θ の関係について検討する。図8-5から求まる P_c/l に対して θ との関係を図8-8に示す。図中の実験は、漏れ量を許容量以下に留めるために必要な密封面のくぼみ深さ H_c の平均値（ $H_c = 13 \sim 47 \mu\text{m}$ で、平均値は $27 \mu\text{m}$ ）に対する P_c/l の計算値であり、第7章で求めた上下試料面間の $\mu = 0.32$ （ $\rho = 17.8^\circ$ ）の値を用いて、式(8.7)、(8.8)により算出される。図より、 P_c/l は θ の減少に伴って減少することがわかる。この減少傾向の理由は、第7章で述べた理由（密封面に作用する垂直力および接線力の増加による、くさびの変形量の増加）のほかに、 θ の減少に伴って球面の直径 d （図8-2参照）が小さくなり、密封面の接触幅 W （図8-3参照）が狭くなる結果、 P_c/l が減少するためと考える。実験値と計算値を比較すれば、その減少割合はほぼ一致している。その減少割合は、例えば、 $\theta = 15^\circ$ の P_c/l は $\theta = 60^\circ$ の値と比べて約40%で、 θ を小さくすることによって、小さな押し付け力で密封が行えるという、いわゆる密封効果が得られる。

最後に、 θ の推奨範囲について考察する。図中の計算曲線によれば、 θ が小さい程 P_c/l は低くなるが、実際のシールでは $\theta = 0^\circ$ の密封は実行不可能である。 θ の下限値は、モールステーパの約 1.5° 、傾斜角度誤差の約 1° および密封面の加工精度などを考慮すると、 $\theta = 5^\circ$ が適当と考える。 θ の上限値は、その目安として、 θ の下限値の2倍の P_c/l を示す θ 値とすれば、 $\theta = 35^\circ$ が適当と考える。なお、図中には本実験条件における P_c/l が取り得る上限と下限の推定値を破線で示す。これらの値は、本実験の H_c 値（ $13 \sim 47 \mu\text{m}$ ）を参考として、 H_c の上限値を $50 \mu\text{m}$ 、下限値を $10 \mu\text{m}$ とし、それぞれの値に対する P_c/l を上限と下限の値としたものである。以上の考察より、本実験条件における θ の推奨値は $5 \sim 35^\circ$ で、図中の A B C D 内は、この θ の推奨値と P_c/l の推定値の関係を示す。

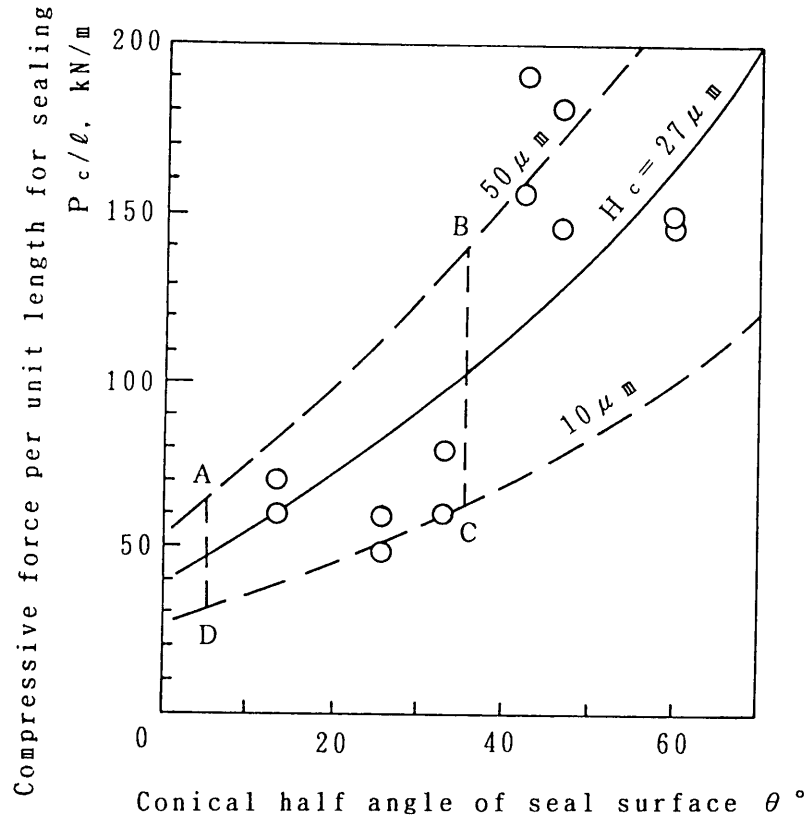


図8-8 P_c/l と θ の関係

8.6 結言

銅のような軟らかい材料の旋削仕上げ面と硬い鋼球面間の静的密封面に、垂直力と接線力の両者が作用する場合の、密封面の表面粗さがシールの基本特性に及ぼす影響を調べた。密封面の旋削山をくさび突起にモデル化して、密封に必要な設定押し付け力 P_c/l を計算し、シーリング特性実験から求まる値と比較した。得られた結果は次の通りである。

(1) P_c/l は、円すい内側密封面の半頂角 θ の減少に伴って減少する。密封面の表面粗さが $R_{\max} = 8 \mu\text{m}$ の場合、 P_c/l は、 $\theta = 60^\circ$ では 160 kN/m 、 $\theta = 15^\circ$ では 65 kN/m となり、約40%に減少する。

(2) P_c/l を低くすることができる θ の推奨値は $5 \sim 35^\circ$ で、その推奨値の範囲に対応する P_c/l を計算することができる。

9.1 緒言

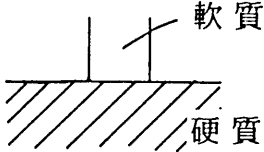
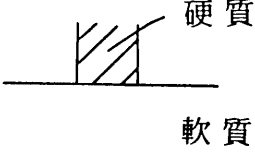
第3章から第8章にわたって、静的メタルシールの基本特性に関し、個々の条件について検討した。本章ではそれらを総合的に考察し、メタルシールを設計する際に最も重要となる設定押し付け力(接触面間からの漏れ量が設定された許容値以下になる時の押し付け力)に関し、それを低くする因子について論ずる。

各章で使用した試料の材質および作用力の接触条件を総括すると表9-1のようにまとめられる。第3章から第6章までは、密封面に垂直力だけが作用する場合の接触状態で、第3章と第4章では、ガスケットとフランジのメタルシールを想定し、軟質材料の環状突起と硬質材料の密封面の組み合わせについて、また第5章と第6章では、ナイフエッジ型メタルシールを想定し、硬質材料の環状突起と軟質材料の密封面の組み合わせについて実験したものである。さらに第7章と第8章では、接触面の塑性変形を促進する意図から垂直力の他に接線力も作用する場合の接触状態で、密封面を押し付け荷重方向に対し傾斜させることにより接線力を発生させたものである。この条件のもとに軟質環状くさびと硬質球面および軟質円すい内側密封面と硬質球面の組み合わせについての実験である。

本研究では、軟質材料側に一貫して銅を選定し、相手密封面は旋削仕上げ面である。銅は相手密封面になじみやすく、また耐食性にも優れているため、従来から化学反応装置、真空装置および原子力関係装置などの密封材料として広く使用され、その使用頻度は高い。このガスケットの使用範囲の広さと使用頻度の高さおよび入手の容易さと価格面を考慮して、銅を密封材料に選定した。密封面は、表面粗さや粗さ突起の方向性が密封性に大きな影響を与え、圧力流れでは粗さの方向が流れと直角の場合、漏れ流量が少なくなる⁽²⁶⁾ことが知られており、実際のフランジ面も圧力流れに対して直角(見かけ上)となる同心円状の仕上げ面の場合が多い。この圧力流れと

粗さ突起の方向性の関係を考慮して，ほぼ同心円となる渦巻き状の旋削仕上げ面を密封面に選定し，その表面粗さを $R_{max} = 2 \sim 224 \mu m$ と広い範囲で変化させ，その作用を実験的に調査した。

表 9-1 密封面の接触条件との対比

| 作用力 | 密封面の接触条件 | |
|-----------------|---|---|
| |  |  |
| 垂直力 | 金属平面同士 (第 3 章) 金属ガスケット (第 4 章) | 硬いくさびと軟らかい 平面 (第 5 章) ナイフエッジシール (第 6 章) |
| 垂直力 と 接線力 | 環状くさび形ガスケット (第 7 章) 円すい内側密封面 (第 8 章) | |

9.2 密封面に垂直力が作用する場合

9.2.1 設定接触圧力について

漏れ量が設定された許容値以下になる時の押し付け力，すなわち設定押し付け力 P_c / ℓ (第 3 章 3.4.2 項で定義) は

$$P_c / \ell = p_c w_c \quad (9.1)$$

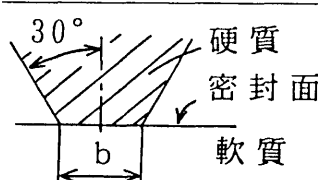
により算出される。ここで， P_c ， p_c および w_c は，それぞれ漏れ量が設定許容値以下になる時の押し付け荷重，設定接触圧力 (第 3 章 3.4.2 項で定義) および接触幅， ℓ は接触長さである。メタルガスケットの場合，密封面間の接触圧力がガスケット材料の引張強さまで高められると密封が行われると言われているが，密封面間の接触条件

(接触幅, 表面粗さ, 仕上げ方法および材質) をどのように変えると密封効果が高められるかといった詳細な研究報告は見当たらない。そこで本節ではまず, 設定接触圧力と接触条件の関係について論ずる。

9.2.1.1 接触幅の影響

硬質環状突起と軟質密封面の組み合わせに対する設定接触圧力と接触幅(稜線部の幅)の関係を総合して表9-2に示す。ここで, 密封面は旋削仕上げ($R_{max} \approx 8 \mu m$)および研削仕上げ($R_{max} \approx 3 \mu m$)である。なお, 接触幅 w_c は稜線部の幅 b にほぼ等しいため($b \approx 30 \mu m$ あるいは $490 \mu m$ に対し, それぞれ $w_c \approx 35 \mu m$ あるいは $500 \mu m$), w_c を b と見なして整理した。表9-2より, 設定接触圧力 p_c は b の大きさにより異なり, 次のようになる。(1) b が小さい($b \leq 50 \mu m$)場合, シーリング機構は密封最表面層への食い込み型を示し, p_c は

表9-2 設定接触圧力と接触幅(稜線部の幅)の関係(図6-4より)

| 密封面の 接触条件 | シーリング機構 | 稜線部の幅 $b, \mu m$ | 設定接触圧力 p_c, MPa |
|--|-------------------|---------------------|---|
|  硬質 密封面 軟質 旋削, $R_{max} \approx 8 \mu m$ 研削, $R_{max} \approx 3 \mu m$ | 密封最表面層への 食い込み型 | $b \leq 50$ | 約 p_m ($0.8 \sim 1.4$) p_m |
| | 中間型 | $50 < b < 500$ | $\sigma_B < p_c < p_m$ |
| | 密封面母材への 押し込み型 | $b \geq 500$ | 約 σ_B ($0.9 \sim 1.1$) σ_B |

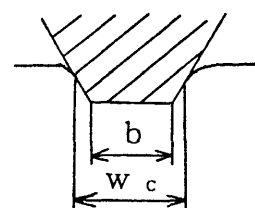
b ; ナイフエッジ稜線部の幅 [μm]

w_c ; ナイフエッジと密封面の接触幅 [μm]

p_c ; 設定接触圧力 [MPa]

p_m ; 接触部の密封最表面層のマイヤー硬さ [MPa]

σ_B ; 密封面母材の引っ張り強さ [MPa]



$$b \approx w_c$$

密封表面層のマイヤー硬さ p_m にほぼ等しく、高い値を示す。(2) b が大きい ($b \geq 500 \mu m$) 場合、シーリング機構は密封母材への押し込み型を示し、 p_c は密封面母材の引張強さ σ_B にほぼ等しく、低い値を示す。(3) b が(1)と(2)の間である ($50 \mu m < b < 500 \mu m$) 場合、シーリング機構は(1)と(2)の間型を示し、 p_c も p_m と σ_B の中間の値を示す。

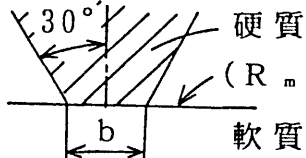
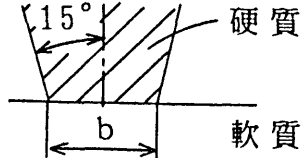
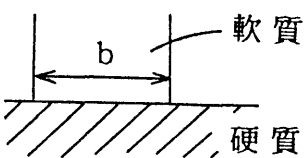
9.2.1.2 仕上げ方法の影響

密封面の仕上げ方法が異なっても設定接触圧力は、表9-2 に示したように、密封面の仕上げ方法 (旋削 $R_{max} \approx 8 \mu m$ または研削 $R_{max} \approx 3 \mu m$) の影響を受けず、ほぼ同じ値である。

9.2.1.3 表面粗さの影響

設定接触圧力と表面粗さの関係を表9-3 に示す。ここで、密封面は旋削仕上げである。設定接触圧力 p_c は密封面の表面粗さ R_{max} に関係なくほぼ一定値を示し、稜線部の幅 b の大きさによって決まる。

表9-3 設定接触圧力と表面粗さの関係 (図6-10, 図5-7, 図4-6より)

| 密封面の 接触状態 | 稜線部の幅 $b, \mu m$ | 表面粗さ $R_{max}, \mu m$ | 設定接触圧力 p_c, MPa |
|---|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
|  硬質 (R_{max}) 軟質 | 35 ($b \leq 50$) | 4~40 | 約 p_m (0.9~1.3) p_m |
|  硬質 軟質 | 830 ($b \geq 500$) | 2~80 | 約 σ_B (0.8~1.2) σ_B |
|  軟質 硬質 | 2000 ($b \geq 500$) | 0.3 (ラップ 仕上げ) 2~224 | 約 σ_B (0.9~1.5) σ_B |

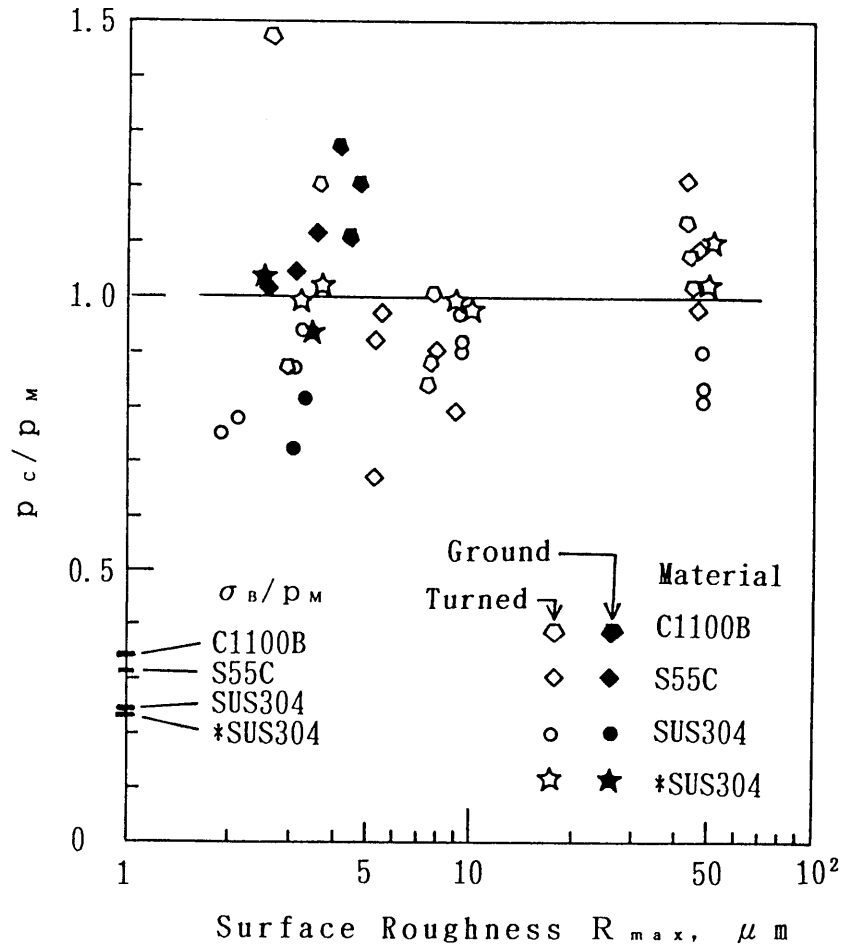
すなわち，硬質環状突起で $b \approx 35 \mu\text{m}$ ($b \leq 50 \mu\text{m}$) の場合， p_c は $R_{\text{max}} \approx 4 \sim 40 \mu\text{m}$ の範囲内で $p_c \approx p_m$ ，また $b \approx 830 \mu\text{m}$ ($b \geq 500 \mu\text{m}$) の場合， p_c は $R_{\text{max}} \approx 2 \sim 80 \mu\text{m}$ の範囲内で $p_c \approx \sigma_B$ とほぼ一定値を示す。さらに軟質環状突起で $b \approx 2000 \mu\text{m}$ ($b \geq 500 \mu\text{m}$) の場合も， p_c は $R_{\text{max}} \approx 0.3 \mu\text{m}$ (ラップ仕上げ) および $2 \sim 224 \mu\text{m}$ の範囲内で， $p_c \approx p_m$ とほぼ一定値を示す。

9.2.1.4 材質の影響

b が小さい ($b \leq 50 \mu\text{m}$) 場合の p_c/p_m と R_{max} の関係を図9-1に示す。ここで， p_c は設定接触圧力， p_m は密封最表面層のマイヤー硬さである。なお図中には各材質の p_m と σ_B (引張強さ) を比較するため， σ_B/p_m を参考として示す。硬質環状突起は稜線部の幅が $35 \mu\text{m}$ で表面に硬質のTiN, TiCを被覆したナイフエッジ，密封面の材料は炭素鋼，ステンレス鋼および溶体化処理を施したステンレス鋼である。図9-1より，密封面の材質の種類，表面粗さおよび仕上げ方法 (旋削または研削) による p_c/p_m の差異は見受けられない。すなわち，それぞれの p_c は σ_B よりも p_m の近傍にあり，その p_c は $(0.8 \sim 1.2) p_m$ の範囲内の値であり，密封面の材質の影響は見られない。

以上より設定接触圧力と接触条件の関係をまとめると次のようになる。

軟質密封面材料が銅の場合，設定接触圧力，接触幅 (稜線部の幅) および表面粗さの関係は図9-2にまとめられる。設定接触圧力 p_c は，密封面の表面粗さ ($R_{\text{max}} \approx 1 \sim 100 \mu\text{m}$) および仕上げ方法 (旋削または研削) に関係なくほぼ一定値を示し，稜線部の幅 b の大きさのみに影響される。すなわち，(1) b が小さい ($b \leq 50 \mu\text{m}$) 場合， p_c は密封表面層のマイヤー硬さ p_m にほぼ等しく，高い値を示す。(2) b が大きい ($b \geq 500 \mu\text{m}$) 場合， p_c は密封面母材の引張強さ σ_B にほぼ等しく，低い値を示す。(3) b が(1)と(2)の間である ($50 \mu\text{m} < b < 500 \mu\text{m}$) 場合， p_c は p_m と σ_B の中間の値を示す。



注) 硬質環状突起は稜線部の幅が $35 \mu m$ で表面に硬質の TiN, TiC を被覆したナイフエッジ, 密封面の材質は銅 (C1100B), 炭素鋼 (C1100B), ステンレス鋼 (SUS304), および溶体化処理を施したステンレス鋼 (*SUS304) である。

図9-1 設定接触圧力と材質の関係(図6-10 より)

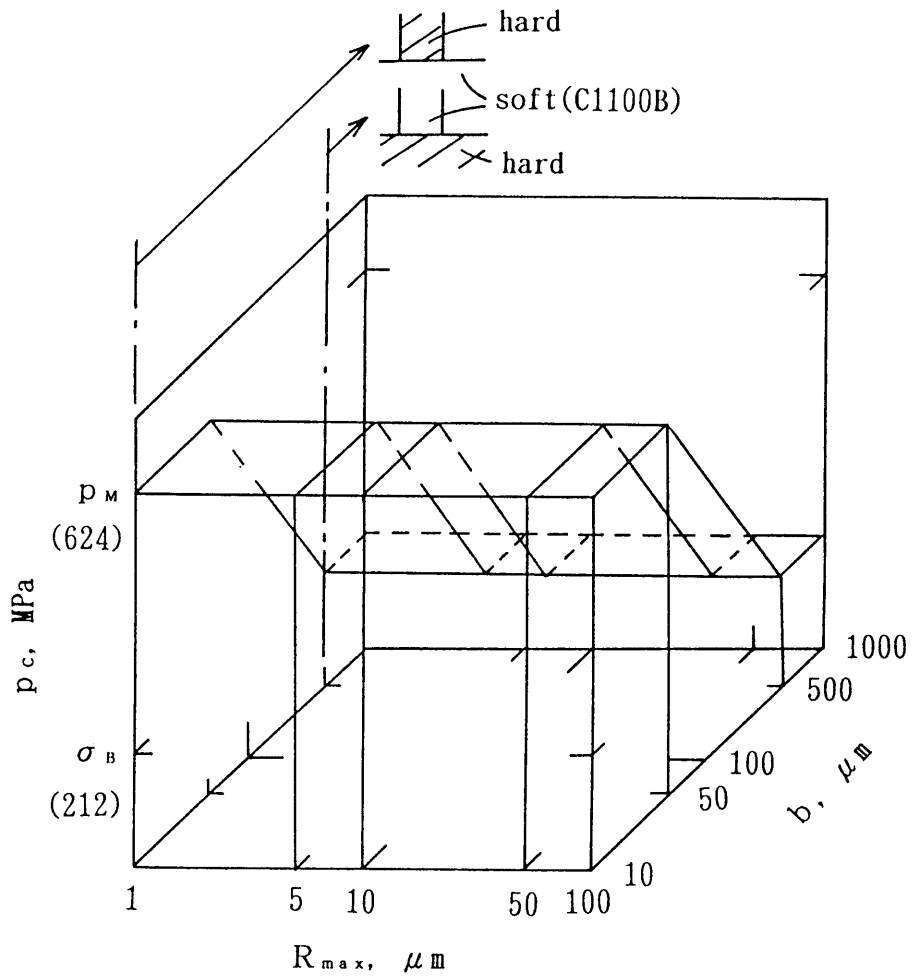


図9-2 設定接触圧力 (p_c)，接触幅（稜線部の幅 (b)）
および表面粗さ (R_{max}) の関係

9.2.2 設定押し付け力について

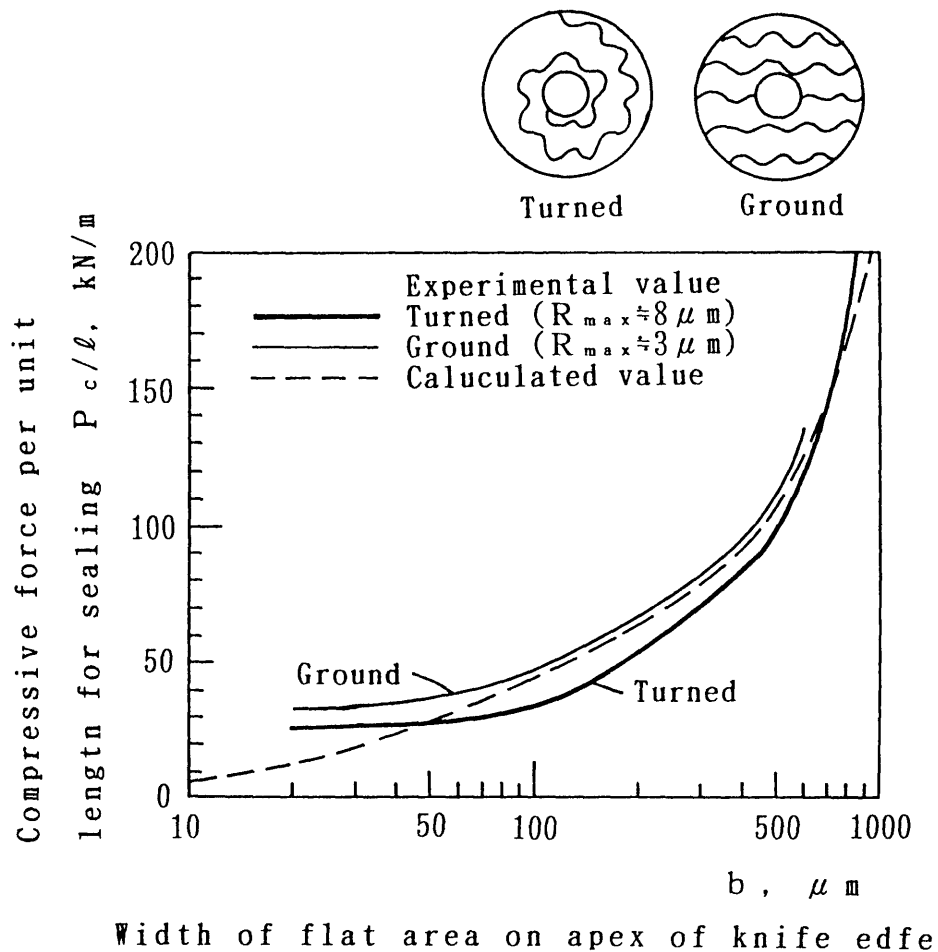
設定押し付け力 P_c/ℓ (第3章3.4.2項で定義) は式(9.1)により算出される。しかし, 9.2.1項で述べたように接触幅 w_c と稜線部の幅 b の差は小さいため, 本項では $w_c \approx b$ とし, 式(9.1)は

$$P_c/\ell \approx p_c b \quad (9.2)$$

となる。

9.2.2.1 接触幅の影響

硬質環状突起と軟質密封面の組み合わせに対する設定接触圧力と稜線部の幅の関係を図9-3に示す。図中の破線は式(9.2)で求めた計



注) 図中の破線は密封面の切削方向を示す。

図9-3 設定押し付け力と稜線部の幅の関係 (図6-3 より)

算値で，実線は実験値である。

図9-3より，設定押し付け力 P_c/l は稜線部の幅 b の減少に伴い低くなる。実験値 P_c/l は計算値とよく一致しているが， $b < 30 \mu\text{m}$ の範囲において， P_c/l はほぼ一定値（ 30kN/m ）を示す。この理由は， $b < 30 \mu\text{m}$ では， b が小さいため，環状突起および密封面の幾何学的形状誤差，接触面間の摩擦係数および弾性係数などの因子による影響割合が大きくなるためと考える。

9.2.2.2 仕上げ方法の影響

図9-3より，研削仕上げ面（ $R_{\text{max}} \approx 3 \mu\text{m}$ ）の P_c/l は旋削仕上げ面（ $R_{\text{max}} \approx 8 \mu\text{m}$ ）の P_c/l に比べてわずかに高い。これは，研削仕上げ面上に存在するごくわずかな量の深いむしろ傷が閉塞されにくいことを示している。

9.2.2.3 表面粗さの影響

設定押し付け力と表面粗さの関係を図9-4に示す。縦軸の押し付け力は $(P_c/l) / (p_c b)$ の無次元量である。ここで図中①～③の p_c の値は，図9-2で示した実験結果から，①の場合（ $b \approx 35 \mu\text{m}$ ）は p_m ，②および③の場合（ $b \approx 830$ および $2000 \mu\text{m}$ ）は σ_B である。硬質環状突起と軟質密封面の組み合わせ（①・②）に対する P_c/l は， $R_{\text{max}} < 10 \mu\text{m}$ ではほぼ一定値を示すが， $R_{\text{max}} \geq 10 \mu\text{m}$ では R_{max} の増加に伴って高くなる傾向を示す。この理由は，密封を行う際，硬質環状突起（ナイフエッジ形状）の相手密封面への食い込み量と接触幅 w_c （密封面上の突起に対する稜線部から谷部までの食い込み量と接触幅で， w_c は表9-2の下図参照）は R_{max} の増加に伴って増加するためと考える。この場合， P_c/l は $P_c/l = p_c w_c$ （式(9.1)）の関係にある。軟質環状突起と硬質密封面の組み合わせ（③の場合で金属ガスケットのメタルシールに相当）の場合，実験値の P_c/l は R_{max} に関係なくほぼ一定値を示し，理論値よりわずかに高い。この理由は，密封を行う際，軟質側の母材も含めたバルクの塑性変

形に起因する塑性変形が生じ，接触幅が増加するためと考える。この接触幅の増加量は R_{max} に関係なくほぼ一定である。

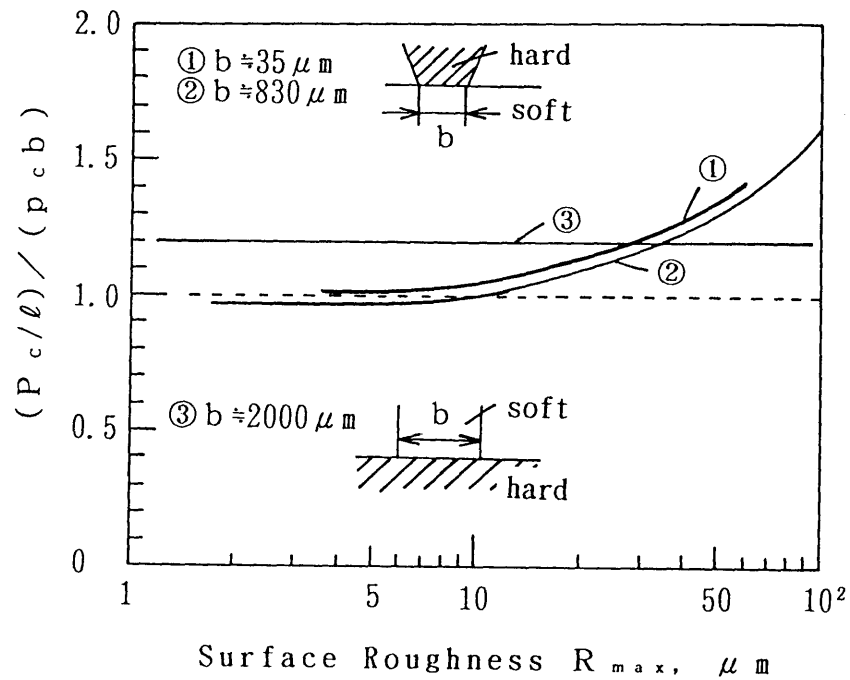
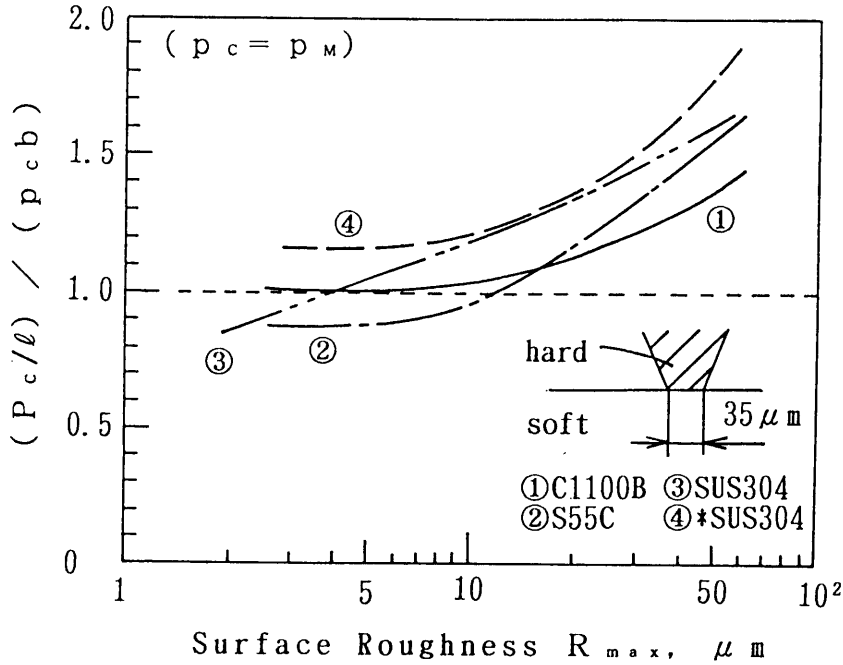


図9-4 設定押し付け力と表面粗さの関係
(図6-8, 図5-5, 図4-5より)

9.2.2.4 材質の影響

設定押し付け力と密封面の材質の関係を図9-5に示す。縦軸の押し付け力は $(P_c/l) / (pcb)$ の無次元量である。硬質環状突起は，形状として半頂角が 30° ，稜線部の幅が $35\mu\text{m}$ で，熱処理を施して硬くした合金工具鋼の表面に，さらに硬質のTiN, TiCを被覆したナイフエッジである。 $b \approx 35\mu\text{m}$ に対する p_c は，図9-2より， $p_c = p_m$ である。図9-5より，各密封面材料に対する P_c/l は R_{max} の増加に伴って高くなる傾向にあり，①銅，②炭素鋼，③ステンレス鋼および④溶体化処理されたステンレス鋼の密封材料に対する顕著な差異は見られない。



注) 図中の*SUS304反応溶体化処理を施されたSUS304を示す。

図9-5 設定押し付け力と材質の関係 (図6-8 より)

以上, 設定押し付け力と接触条件について個別に検討を行ったが, これらをまとめると, 次のような関係が成立する。

密封面の軟質材料が銅に対する設定押し付け力, 接触幅 (稜線部の幅) および表面粗さの関係を図9-6 に示す。図から, 設定押し付け力 P_c/l を最も低くする影響因子は稜線部の幅 b で, P_c/l は b の減少に伴い低くなっており, その密封効果が顕著である。密封面の表面粗さの影響は, 図中の① (硬質環状突起と軟質密封面の組み合わせでナイフエッジ型メタルシールに相当) の場合, $R_{max} \geq 10 \mu\text{m}$ の範囲で P_c/l は R_{max} の増加に伴って高くなるが, $R_{max} < 10 \mu\text{m}$ の範囲では P_c/l は一定値に収束する。また, 図中の② (軟質環状突起と硬質密封面の組み合わせで金属ガスケットのメタルシールに相当) の場合, 実験値の P_c/l は理論値よりわずかに高いが, R_{max} に関係なく一定値を示す。なお, $b = 35 \mu\text{m}$, $R_{max} = 4 \sim 40 \mu\text{m}$ に対す

る P_c/l の実験値は、約 $15 \sim 40 \text{ kN/m}$ であり、従来のナイフエッジシールの P_c/l (ステンレス鋼のナイフエッジと銅のガスケットの密封装置で、銅の密封面が約 $3 \mu\text{m}$ 、 $P_c/l \approx 120 \sim 600 \text{ kN/m}$) と比べて、約 $1/3$ 以下と低い値を示す。これは、従来のナイフエッジ部の材料として加工困難なステンレス鋼を使用しているため、稜線部を精密に、一定の微小寸法に加工されていないため、安全性を考慮して必要以上に高い押し付け力を負荷していると考えられる。

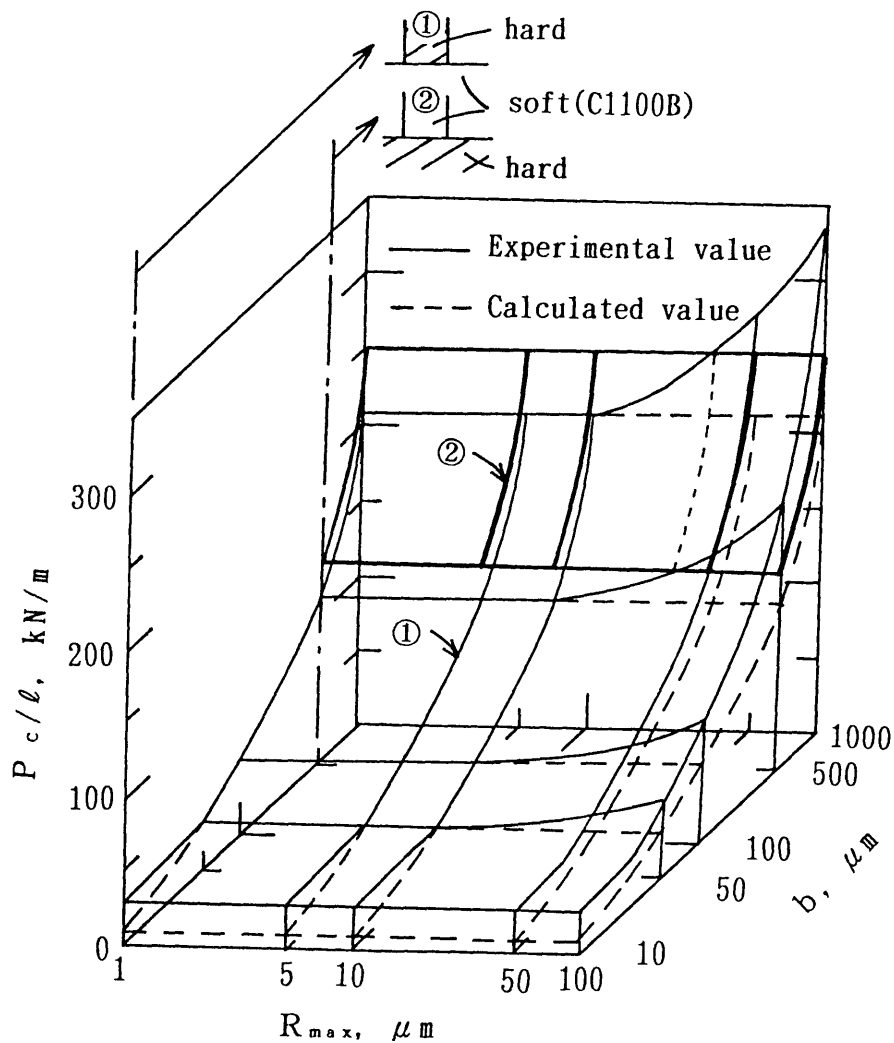


図9-6 設定押し付け力 (P_c/l)、接触幅 (稜線部の幅 (b)) および表面粗さ (R_{max}) の関係

9.3 密封面に垂直力と接線力が作用する場合

9.3.1 環状くさび形ガスケットの設定押し付け力について

球面を環状くさび（あるいは円すい内側密封面）に押し付け荷重 P で押し付けると，図9-7のように単位長さ当たりの接触部に垂直力 n が発生し，その力が摩擦力 t を作り，これらの軸方向成分が単位長さ当たりの押し付け力 p とつりあう。その結果，接触面全体に作用する垂直力および接線力は，第7章で示したように，(1) $\theta < 90^\circ - \rho$ の場合は式(7.1)で，また(2) $\theta \geq 90^\circ - \rho$ の場合は式(7.2)で表される。式(7.1)，(7.2)から求まる垂直力および接線力を図9-8に示す。ここで， θ は密封面の仮想接触円すい半頂角， ρ は摩擦角であり，本実験では $\rho = 17.7^\circ$ である。図より，垂直力および接線力は θ の減少に伴い高くなり， $\theta = 10^\circ$ では約 $2P$ の垂直力と $0.6P$ の接線力が接触部に作用し，環状くさび（あるいは円すい内側密封面の粗さ突起）を押しつぶす。

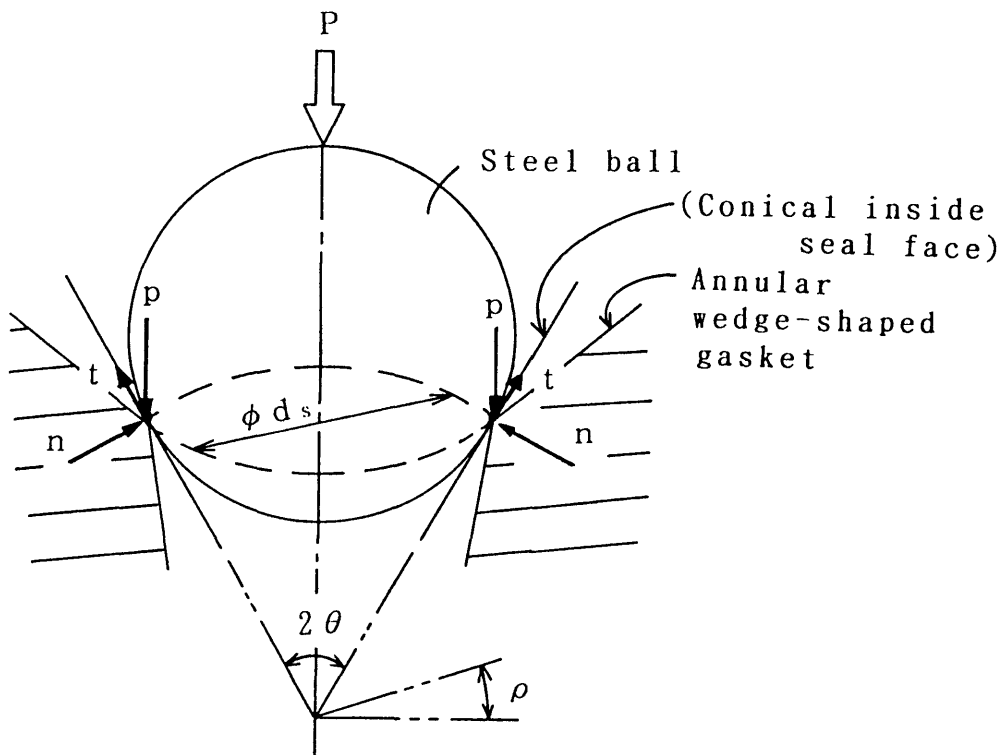


図9-7 接触部における力のつりあい（図7-5の再録）

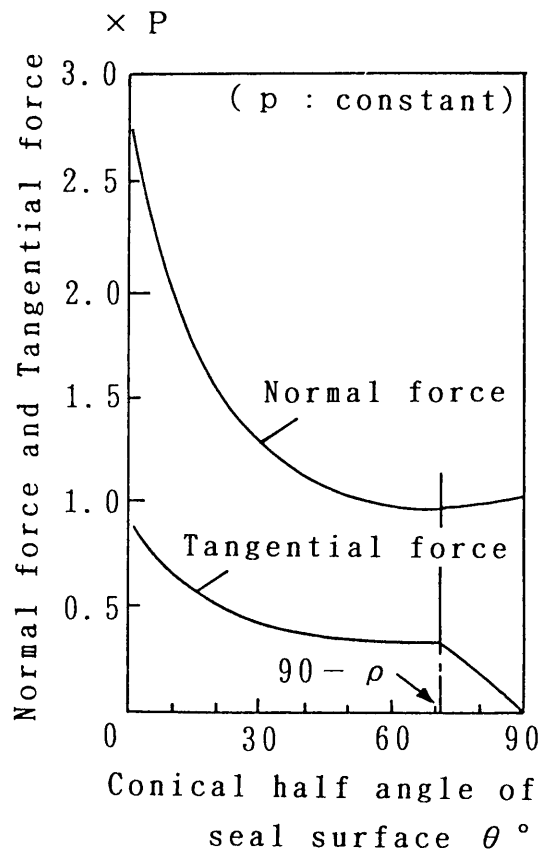


図9-8 垂直力，接線力と θ の関係（図7-9の再録）

設定押し付け力を計算するに際し，くさびに関する次のような仮定をたてる。

- (1) くさび表面は凹凸がなく滑らかである。
- (2) くさびの接触幅は環状くさび稜線部の直径および球面の直径に比べて小さいことから，くさびの接触幅の計算は，くさびと平面の二次元接触問題に置換する。
- (3) くさび表面の粗さ突起群の加工硬化は，くさび母材の変形には影響を与えない程度であると考え，くさび母材の塑性変形が加工硬化に及ぼす影響は微少なものとする。

この仮定を用いると，設定押し付け力 P_c/l は次の計算式で求まる。

(1) $\theta < 90^\circ$ - ρ の場合

$$\frac{P_c}{\ell} = \frac{w_c}{4.1 \sqrt{1 + 3 \mu^2}} (\sin \theta + \mu \cos \theta) \quad (9.3)$$

(2) $\theta \geq 90^\circ$ - ρ の場合

$$\frac{P_c}{\ell} = \frac{w_c}{4.1 \sin \theta \sqrt{1 + \frac{3}{\tan^2 \theta}}} \quad (9.4)$$

ここで、 w_c は密封に必要なくさびの接触幅、 μ は密封面の摩擦角であり、本実験では $w_c = 95 \mu\text{m}$ 、 $\mu = 0.32$ である。

軟質環状くさびと硬質球面のメタルシールの実験を行った結果、計算値は大體実験値に近い値となった（図7-10参照）。式(9.3)および(9.4)の計算結果を図9-9に示す。図中の d_s は環状くさびと球面

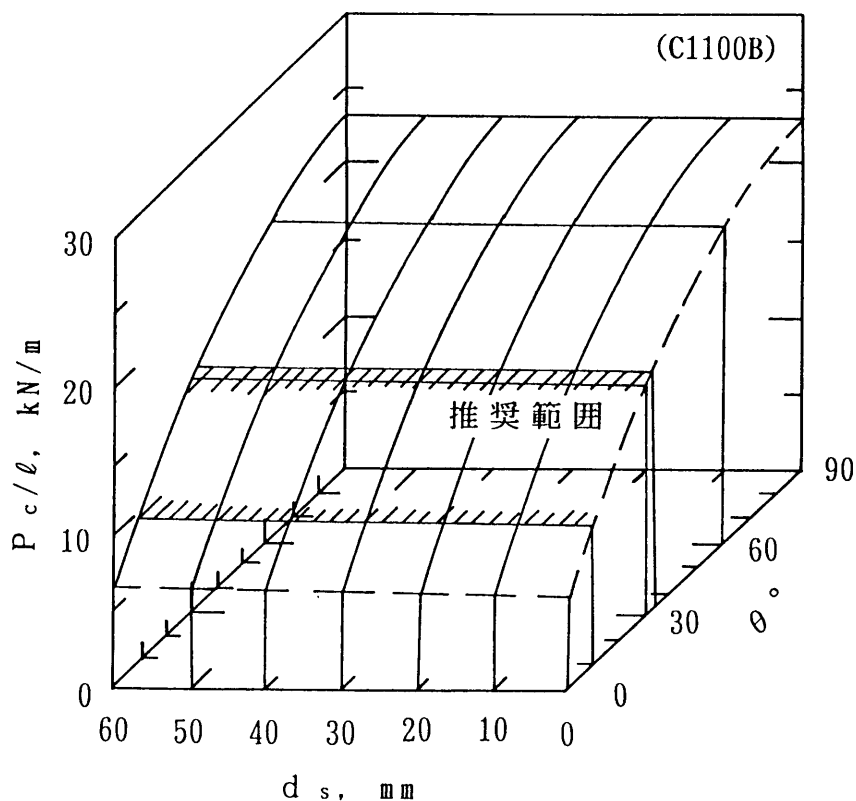


図9-9 設定押し付け力 (P_c/ℓ)、仮想接触円すい半頂角 (θ) および環状接触部の直径 (d_s) の関係 (環状くさび形ガスケットの場合、図9-7参照)

の線接触部の直径（図9-7参照）であり， $d_s = 0$ mmおよび $\theta = 0^\circ$ に対する P_c/l 値は実際に存在しないので，破線で示す。 P_c/l は θ の減少に伴って低くなり， $\theta = 15^\circ$ の P_c/l は $\theta = 90^\circ$ の値と比べて約50%まで減少させることが可能である。斜線部は θ の推奨値に対する P_c/l 値で， θ の下限値として，球面がどんなに強く押し込まれても，球面が環状くさびを突き抜けないための安全性を考慮して $\theta = 15^\circ$ を， θ の上限値として，その目安として $\theta = 90^\circ$ の P_c/l 値の約0.7倍として $\theta = 35^\circ$ を選定することが望ましい。

9.3.2 円すい内側密封面の設定押し付け力について（図8-2参照）

設定押し付け力を計算するに際し，円すい内側密封面のスパイラル状の旋削仕上げ面突起に関する次のような仮定をたてる。

(1) 密封面のスパイラル状の旋削山は，一個のスパイラル状のくさびから成る。

(2) くさびの接触幅が球面の直径と比べて小さいことから，くさびの変形量の計算は，くさびと平面の二次元接触問題に置換できる。

(3) 接触状態のくさびは，くさびの全接触長さにおいては，変形量は均一である。

この仮定を用いると，設定押し付け力 P_c/l は第8章で示した式(8.7)および(8.8)の計算式で求まる。軟質円すい内側密封面と硬質球面からなるシールの実験を行った結果，計算値は大体実験値に近い値となった（図8-8参照）。式(8.7)および(8.8)の計算結果を図9-10に示す。図中の d_s は円すい内側密封面と球面の線接触部の直径であり， $d_s = 0$ mmに対する P_c/l 値は実際に存在しない。破線は $d_s = 0.5$ mm， $\theta = 0^\circ$ に対する値である。各 d_s （ d_s ；一定）に対する P_c/l は θ の減少に伴って低くなり， $\theta = 15^\circ$ の P_c/l は $\theta = 60^\circ$ の値と比べて約40%まで減少させることが可能である。斜線部は θ の推奨値に対する P_c/l 値で， θ の下限値として，モールステーパの約 1.5° ，傾斜角度誤差の約 1° および密封面の加工精度などを考慮して $\theta = 5^\circ$ を， θ の上限値として，その目安として θ の下限値の

2倍の P_c/l を示す θ 値として $\theta = 35^\circ$ を選定するのが望ましい。

以上，設定押し付け力の低減因子について述べたが，本研究の特徴は，図9-6，9-9，9-10に示したように，軟質材料側に銅を選定した場合，その設定押し付け力を簡単に評価できることである。

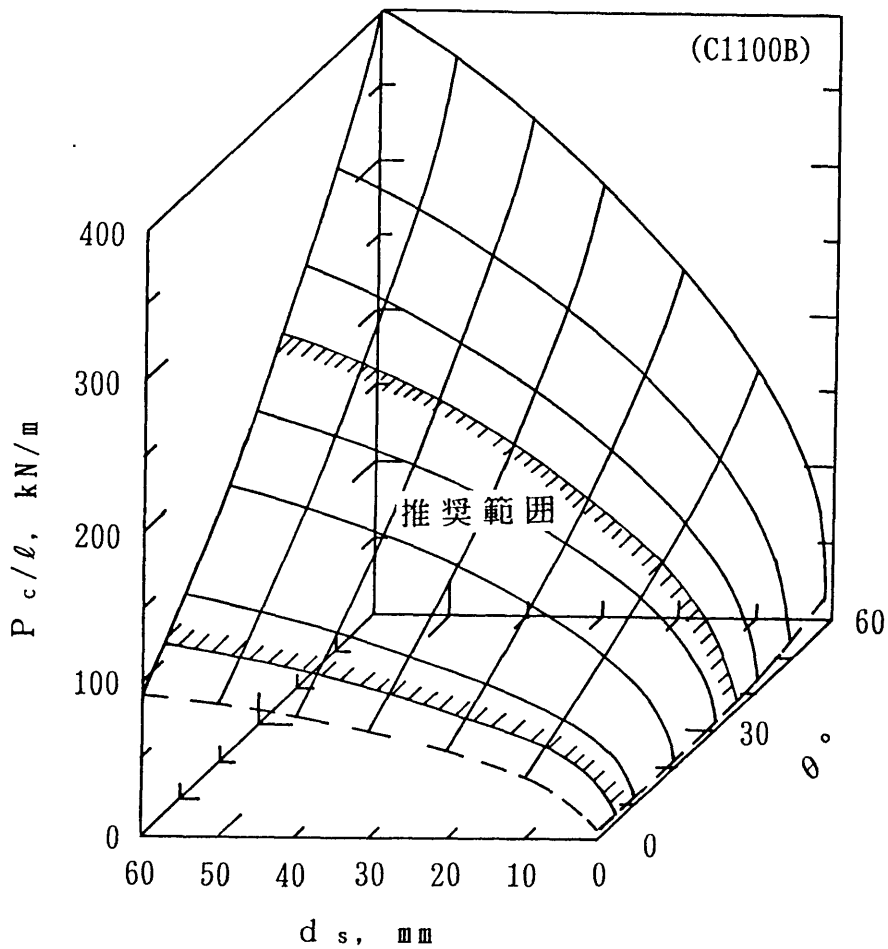


図9-10 設定押し付け力 (P_c/l)，円すい半頂角 (θ) および環状接触部の直径 (d_s) の関係 (円すい内側密封面の場合，図8-2参照)

9.4 メタルシール設計の指針

本研究では，低い押し付け力で密封が可能な，静的メタルシールの開発に指針を与える設計基礎データの確立を目的に，接触面間のシーリング機構を解明し，設定押し付け力に及ぼす低減因子の影響について調べた。ここに，本研究で得られた知見をもとに，新規のメタルシールを開発するための指針を示し，将来を展望する。

(1) 接触面に垂直力だけが作用するメタルシールに関し，接触幅は前章までの考察結果によれば，機能的にみて $50\mu\text{m}$ を境に，二つに分けることができると考えられる。

すなわち，接触幅が狭い場合（ $50\mu\text{m}$ 以下），ナイフエッジシールの設定押し付け力は，従来の接触幅が広いものと比べて，低い値で良いことが明らかとなった（第6章）。この結果，形状的にみるとナイフエッジの半頂角は 30° ，稜線部の幅は約 $35\mu\text{m}$ ，稜線部平面はラップ仕上げ，材料は，熱処理を施して硬くした合金工具鋼の表面に，耐食性，耐摩耗性に優れたTiNやTiCなどの硬質被膜層を形成した新しいタイプのナイフエッジ型メタルシール（図6-6参照）を提案できる。本研究で供したナイフエッジを備えたメタルシールは，相手密封面の材料は銅，アルミニウムなどの軟質材料はもちろん，フランジ材料に広く使用されている鋼，ステンレス鋼でも良いため，密封面材料の選定範囲が広がること，さらに，設定押し付け力は従来のものと比べて $1/3$ 以下となり，密封装置の小型化が実現できることが特徴である。

また，接触幅が広い場合（ $500\mu\text{m}$ 以上），設定押し付け力は，硬質材料の表面粗さ（旋削仕上げで $R_{\text{max}} \approx 2 \sim 224\mu\text{m}$ ）にあまり影響を受けず，その設定接触圧力は軟質材料（研摩仕上げで $R_{\text{max}} < 1.5\mu\text{m}$ ）の引張強さにほぼ等しいことが明らかとなった（第4章）。この結果，軟質材料側に引張強さの低い材料を選定し，硬質材料側に旋削仕上げを施したメタルシールを配すると，粗さに起因する凹凸が軟質材により完全に埋まるので，機構的に完全なシールが確保されることになる。この種のメタルシールとして，最近では，ステン

レス鋼の環状パイプに金，銀，鉛，錫，アルミニウムなどの軟質材料を被覆した中空リングガスケット，コイルスプリングをアルミニウム板で被覆した金属ガスケットの開発が行われ，設定押し付け力を低くする努力がなされている。本研究で得られた特性をうまく利用し，密封材料の組み合わせや密封面の表面粗さを考慮すれば，さらに新規のメタルシールの開発が可能になると考えられる。例えば，材料の引張強さは普通高温では低くなるので，熱サイクルを受ける密封装置においては，ガスケット側に高温域でさらに軟らかくなる材料を，一方旋削仕上げ密封面を持つフランジ側に高温域でも硬い材料を選定したメタルシールを開発すれば，その設定押し付け力は高温域の値で決まり，設定押し付け力を低い値に留めることができる。

上述した2特性（接触幅が狭い場合の特性と広い場合の特性）の組み合わせを考慮した場合，具体的には，稜線部幅が狭く，硬い材料でナイフエッジを作り，その表面に軟らかい材料を被覆したメタルシールを開発すれば，その設定押し付け力を現状のシールでは実現できないほど低くすることができ，密封性能が上昇し，極限状態での使用も可能であろう。

(2) 接触面に垂直力と接線力が作用するメタルシール

設定押し付け力と密封面の傾き角（押し付け荷重方向に対し密封面を傾けると，接触面に垂直力の他に接線力が作用する）の関係を調べた。その結果，傾き角の減少に伴い設定押し付け力が低くなることが明らかとなり，軟質環状くさびと硬質球面のメタルシールの場合，傾き角の推奨値を $10\sim 35^\circ$ （第7章），軟質円すい内側密封面と硬質球面のメタルシールの場合，傾き角の推奨値を $5\sim 35^\circ$ （第8章）とした。密封面の傾き角は，JIS，JPI，APIおよびDINで 23° ， 30° ， 45° などが規格化されているが，その値には理論的根拠は明らかでないようである。実験と計算から求めた本研究の傾き角の推奨値（ $10\sim 35^\circ$ あるいは $5\sim 35^\circ$ ）を考慮すれば， $23\sim 45^\circ$ よりもさらに小さな傾き角を持つメタルシールを開発すれば，

密封性能がさらに高くなるであろう。

以上，本研究によって，これまで未知であった”密封面の接触突起の変形によるシーリング機構”が明らかとなり，その結果として，極限環境下において使用が安全で信頼性があり，押し付け力が低い静的メタルシールを開発するための指針を示すことができた。ここで提案したメタルシールは，今後具体的に開発しなければならないが，その使用範囲は広く，従来の機械装置や化学反応装置だけでなく，近年の過酷な使用条件下にある超高真空装置，極低温あるいは高温の化学反応装置，宇宙開発機器，深海開発機器あるいは原子力機器などの密封装置類で使用されることが期待され，工業界の発展に大いに寄与できるものと考えられる。

なお，現在，銅は密封材料として最適なものとして広く使用されているが，銅以上に密封性能を発揮できる密封材料を捜しだし，その軟質密封面と粗さのある剛体平面のメタルシールの基本特性を調べ，その得られた知見を基に，新しいタイプのメタルシールを開発することが期待されるが，この点に関しては，今後の研究課題としたい。

9.5 結言

第3章から第8章まで，個々の条件について検討したが，ここで，設定押し付け力を低くする因子に関して総括すれば，次のようになる。

(1) 軟質材料側に銅を選んだとすれば，その必要条件が求まり，密封に必要な信頼のある確実な設定押し付け力の $P_{c/l}$ 値は算出できる。

(a) 密封面に垂直力が作用する場合

設定押し付け力 $P_{c/l}$ を最も低くする影響因子は稜線部の幅 b で，硬質突起の b を $50\mu\text{m}$ 以下にすれば，従来のもの（ナイフエッジ型メタルシール）と比べて $P_{c/l}$ を $1/3$ 以下にすることができる。密封面（渦巻き状の旋削仕上げ）の表面粗さの影響は，硬質環状突

起と軟質密封面の組み合わせの場合、 R_{max} の減少に伴って P_c/l を低くすることができ、 $R_{max} < 10 \mu m$ では P_c/l は一定値に収束する。軟質環状突起と硬質密封面の組み合わせの場合、 R_{max} の影響を受けず P_c/l は一定値に収束する。

(b) 密封面に垂直力と接線力が作用する場合

軟質環状くさびと硬質球面からなるメタルシールの場合、接触面の傾き角 θ を減少させることにより P_c/l を低くすることができ、例えば $\theta = 15^\circ$ の P_c/l は $\theta = 90^\circ$ の値と比べて、約50%まで減少させることが可能である。 P_c/l を減少させる θ として $10 \sim 35^\circ$ を推奨する。

軟質円すい内側密封面と硬質球面からなるメタルシールの場合、接触面の傾き角 θ および環状線接触部の直径 d_s を減少させることにより P_c/l を低くすることが可能である。例えば、 d_s を一定とした場合、 $\theta = 15^\circ$ の P_c/l は $\theta = 60^\circ$ の値と比べて、約40%まで減少させることができる。なお、 d_s を減少させれば線接触長さが短くなるのであるから、必然的に P_c/l は低くなる。 P_c/l を減少させる θ として $5 \sim 35^\circ$ を推奨する。

(2) 本研究によって、これまで未知であった”密封面の接触突起の変形によるシーリング機構”が明らかとなり、極限環境下において安全で信頼性があり、押し付け力が低い静的メタルシールを開発するための指針を示すことができた。

第 10 章 結論

静的メタルシールのシーリング機構を解明し，低い押し付け力で密封を可能にする静的メタルシールを開発するための，設計基礎データの確立をめざして，最初に密封面に垂直力だけが作用するシールのシーリング特性実験を行い，基本特性であるシーリング特性，押し付け力および接触圧力に及ぼす表面粗さの影響について検討した。さらに，密封面に垂直力に加え接線力も作用するシールについてその作用機構に関して検討を加え，シールの基本特性を究明した。本論文の各章ごとに得られた知見を以下に要約する。

第 1 章では，緒論として本研究の概要と研究の目的を記した。

第 2 章では，実験装置と漏れ量測定方法について述べ，以下の結論を得た。

(1) ガスクロマトグラフにおける定量分析機能を利用して，微小漏れ量を測定することを検討した。その結果，ガスクロマトグラフは，測定時間が短く，連続測定記録が可能な実験装置およびその装置による漏れ量測定方法に適用できる。

(2) 本装置の漏れ検出ガスとして，窒素ガスを用いる。その理由はヘリウムキャリアガスとの熱伝導度の差が大きく，検出能力を大きくする利点があるからであり，その他のガスを用いることも可能である。密封部からの窒素ガスの漏れ量は，連続測定記録され，ガスクロマトグラフにおける漏れ量換算式

$$Q_0 = 1.027 \times 10^{-5} S \varepsilon \quad [\text{L/h}] \quad (2.8)$$

により算出される。その測定範囲は約 $10^{-5} \sim 5 \times 10^{-1} \text{L/h}$ ，測定精度は $\pm 5\%$ である。ここに， $Q_0 \text{ L/h}$ は標準状態 (0.101 MPa , 0°C) での漏れ量， $S\%$ および ε_0 はガスクロマトグラフのシーリング特性実験曲線の出力および減衰値である。

(3) 実験装置の漏れ量測定方法として，ここで考案したガスクロマトグラフによる測定方法の他に，従来からの浮力を利用する重量計測方法（漏れ測定範囲： $10^{-3} \sim 10^2 \text{ L/h}$ ）を併用すれば，漏れ量の

測定範囲は約 $10^{-5} \sim 10^2$ L/hに広げることが可能である。

第3章では、金属平面同士が接触する場合の基本特性について、ガスケットを装着しないで金属平面同士を圧着する基礎実験を行い、金属平面同士からなるシールの密封面の表面粗さが設定接触圧力に及ぼす影響について検討した。得られた結果は次の通りである。

(1) 接触面からの漏れを許容量以下に留めるのに必要な設定接触圧力 p_c は、材質の組み合わせ（銅とステンレス鋼、銅と合金工具鋼との組み合わせ）や表面粗さ（ただし、 $R_{max} < 50 \mu m$ ）に関係なく、軟らかい材質（銅）の引張強さ σ_B 以下である。すなわち、 $K_c = p_c / \sigma_B$ と定義して、設定接触圧力を無次元表示すれば、 $R_{max} < 50 \mu m$ の範囲で $K_c \leq 1$ となる。

(2) 銅を研磨紙による研磨仕上げ、相手材のステンレス鋼を旋削仕上げした場合（通常の金属平形ガスケット装着状態に相当）には、ステンレス鋼の表面粗さ（ $R_{max} \approx 2 \sim 110 \mu m$ ）に関係なく、 $K_c \approx 1$ と大略一定値を示す。

(3) 銅とステンレス鋼の密封面をともに旋削仕上げで同一表面粗さの組み合わせ（ $R_{max} \approx 2 \sim 110 \mu m$ ）の場合には、 R_{max} が約 $10 \sim 50 \mu m$ の範囲内で $K_c \approx 0.5$ と最小となる。この理由は、旋削山同士の交差による密封効果が顕著になるためと考える。

第4章では、金属ガスケットを適用した場合の基本特性について、ステンレス鋼あるいは合金工具鋼で作製した金属平面間に銅の金属ガスケットを挿入した場合の、シーリング特性を調べる実験を行い、金属平面の表面粗さが設定接触圧力および設定押し付け力に及ぼす影響を検討した。得られた結果は次の通りである。

(1) 一体形ガスケットの設定接触圧力は、金属密封平面の表面粗さ（ $R_{max} \approx 0.3 \sim 224 \mu m$ ）およびガスケット断面形状（平形、オーバル形）に関係なくそれぞれ一定値を示し、 $K_c \leq 1.3$ である。

(2) 平形ガスケットの場合、表面粗さ（ $R_{max} \approx 0.3 \sim 224 \mu m$ ）に関係なく $K_c \approx 1$ と大略一定値を示す。

(3) 銅線を半ひねり成形したガスケットの場合、 K_c は R_{max} が大

きくなると低くなり，有効な K_c は $R_{max} \geq 110 \mu m$ で $K_c \approx 1.5$ となる。この理由は，合わせ部の溝に対する密封効果のためと考える。すなわち，金属密封面の旋削山突起群が，ガスケット合わせ部の溝部に食い込み，溝部の漏れ通路を閉塞するためである。

(4) オーバル形ガスケットの場合，設定押し付け力 P_c/l は， $R_{max} \approx 2 \sim 20 \mu m$ で最小値が得られ，その値は $P_c/l \approx 210 kN/m$ である。この理由は，金属密封面の旋削山突起群が，ガスケット表面に食い込み，ガスケット表面に存在する放射状傷による漏れ通路を閉塞し，また，ガスケットが塑性変形することにより，金属密封面の旋削谷部の漏れ通路が埋まるためである。

第5章では，硬いくさび形突起と軟らかい平面の組み合わせに関するメタルシールの基本特性を，くさび形突起の半頂角，銅材密封面の表面粗さおよび加工方法を変えて実験的に調べた。得られた結果は次の通りである。

(1) 設定接触圧力 p_c は，くさび形突起の半頂角 α が $15 \sim 60^\circ$ の範囲では，密封面の表面粗さ ($R_{max} \approx 1 \sim 100 \mu m$) に関係なく，銅材密封最表面層におけるマイヤー硬さの約 $0.8 \sim 1.1$ 倍に相当する。

(2) $\alpha = 90^\circ$ (平面) の p_c は，密封面の表面粗さ ($R_{max} \approx 1 \sim 100 \mu m$) および加工方法 (旋削と研削仕上げ) に関係なく，銅材素地の引張強さの約 $0.9 \sim 1.5$ 倍に相当する。

(3) 設定押し付け力 P_c/l は， $R_{max} \leq 14 \mu m$ でほぼ一定値を示し， $R_{max} > 14 \mu m$ で R_{max} が大きくなれば高くなる。研削仕上げ面に対する P_c/l は旋削仕上げ面に対する値より高い値を示す。また， $\alpha = 15 \sim 60^\circ$ の P_c/l は， α にあまり関係なく同程度の値を示し， $\alpha = 90^\circ$ (平面) の P_c/l の約 $1/5$ と低い値を示す。

第6章では，ナイフエッジシールの基本特性を密封面の仕上げ方法およびナイフエッジ稜線部の幅を変えて実験的に調べ，最適なナイフエッジの形状と寸法を求めた。その最適な形状と寸法に対し，さらに材料を硬質とした場合の特性を密封面の粗さに着目して検討した。この結果は，

(1) 銅材密封面に対する，炭素鋼製ナイフエッジ（ナイフエッジの半頂角が 30° ）のシーリング機構は，密封面の仕上げ方法（旋削仕上げ面 $R_{max} \approx 8 \mu m$ および研削仕上げ面 $R_{max} \approx 3 \mu m$ ）に関係なく，ナイフエッジ稜線部の幅 b （ $b \approx 30 \sim 500 \mu m$ ）の大きさにより，3型式に分類される。

(a) 密封最表面層への食い込み型シール； b が狭い（ $b \leq 50 \mu m$ ）場合に該当。設定接触圧力 p_c は接触部における密封最表面層のマイヤー硬さ $p_m = 586 \text{MPa}$ の約 $0.8 \sim 1.4$ 倍と高くなるが，接触面積 A_c が狭いため，設定押し付け力 P_c/l は低くなる。

(b) 密封面の母材への押し込み型シール； b が広い（ $b \geq 500 \mu m$ ）場合に該当。 p_c は密封面の母材の引張強さ $\sigma_B = 212 \text{MPa}$ の約 $0.9 \sim 1.1$ 倍と低くなるが， A_c が広いため， P_c/l は高くなる。

(c) 中間型シール；(a)と(b)の中間のシーリング機構で， P_c は P_m より低く σ_B より高い値となる。

上記(1)の分類により，設定押し付け力が低くなる最適なナイフエッジの形状と寸法は，ナイフエッジの半頂角 30° ，稜線部平面はラップ仕上げ，稜線部の幅を約 $50 \mu m$ 以下とするのが良い。

(2) ナイフエッジの半頂角， 30° ，ラップ仕上げの稜線部平面を持ち，稜線部の幅が狭く（ $b \approx 35 \mu m$ ），硬い合金工具鋼の表面にTiC, TiNの硬質被膜層が形成されたナイフエッジの場合， $R_{max} \approx 4 \sim 40 \mu m$ （旋削仕上げ）および $R_{max} \approx 3 \mu m$ （研削仕上げ）において，つぎの結果が得られた。

(a) 密封面の材質が銅，炭素鋼，ステンレス鋼の場合，設定接触圧力 p_c は粗さに関係なくほぼ一定値を示し，それぞれ，密封面材質に対する p_m の約 $0.9 \sim 1.3$ ， $0.8 \sim 1.2$ ， $0.8 \sim 1.1$ 倍に相当する。

(b) 密封面の材質が銅，炭素鋼，ステンレス鋼に対する設定押し付け力 P_c/l は，粗さの増加（ $R_{max} \approx 4 \sim 40 \mu m$ ）に伴い高くなる傾向にある。しかし，それらの P_c/l は，銅では約 $15 \sim 40 \text{ kN/m}$ ，炭素鋼では $45 \sim 110 \text{ kN/m}$ ，ステンレス鋼では $80 \sim 190 \text{ kN/m}$ と，従来のナイフエッジシールの P_c/l と比べて，低い値となる。

第7章では、接線力が作用する環状くさび形ガスケットの場合の基本特性を軟らかい材料で作られた環状くさび形ガスケットと球面形状の硬質材（鋼球）のあいだの特性を、密封面の仮想接触円すい半頂角 θ を変えて実験的に調べ、密封に必要なくさびの接触幅と設定押し付け力 P_c/l との関係を検討した。得られた結果は次の通りである。

(1) くさび表面の粗さ突起が加工硬化するため、漏れ量を許容量以下に留めるためには、くさびの塑性変形による、所定の接触幅（本実験ではその平均値が約 $95\mu\text{m}$ ）が必要となる。

(2) くさびの接触幅の変形量に関する計算と実験結果から、くさびの接触幅は θ の減少に伴い増加する。この結果、 P_c/l は θ の減少に伴って低下する。たとえば、 $\theta = 15^\circ$ の P_c/l は $\theta = 90^\circ$ の値と比べて約50%となり、密封効果の向上が認められる。

(3) θ の推奨値は $10\sim 35^\circ$ で、その推奨値の範囲に対応する P_c/l を計算することができる。

第8章では、接線力が作用する円すい内側密封面の場合の基本特性に関し、銅のような軟らかい材料の旋削仕上げ面と硬い鋼球面間の静的密封面に、垂直力と接線力の両者が作用する場合の、密封面の表面粗さがシールの基本特性に及ぼす影響を調べた。密封面の旋削山をくさび突起にモデル化して、密封に必要な設定押し付け力 P_c/l を計算し、シーリング特性実験から求まる値と比較した。得られた結果は次の通りである。

(1) P_c/l は、円すい内側密封面の半頂角 θ の減少に伴って減少する。密封面の表面粗さが $R_{\text{max}} \approx 8\mu\text{m}$ の場合、 P_c/l は、 $\theta = 60^\circ$ では 160 kN/m 、 $\theta = 15^\circ$ では 65 kN/m となり、約40%に減少する。

(2) P_c/l を低くすることができる θ の推奨値は $5\sim 35^\circ$ で、その推奨値の範囲に対応する P_c/l を計算することができる。

第9章では、設定押し付け力の低減因子について考察した。

以上各章における実験と考察の結果の要点を記述したが、さらに

それらを総括して終章のまとめとする。

軟質材料側に銅を選んだとき，密封に必要な必要条件が求まり，信頼のある確実な設定押し付け力の P_c/l 値は算出できる。

(1) 密封面に垂直力が作用する場合

設定押し付け力 P_c/l を最も低くする影響因子は稜線部の幅 b で，硬質突起の b を $50\mu\text{m}$ 以下にすれば，従来のもので（ナイフエッジ型メタルシール）と比べて P_c/l を $1/3$ 以下にすることができる。密封面（渦巻き状の旋削仕上げ）の表面粗さの影響は，硬質環状突起と軟質密封面の組み合わせの場合， R_{max} の減少に伴って P_c/l を低くすることができ， $R_{\text{max}} < 10\mu\text{m}$ では P_c/l は一定値に収束する。軟質環状突起と硬質密封面の組み合わせの場合， R_{max} の影響を受けず P_c/l は一定値に収束する。

(2) 密封面に垂直力と接線力が作用する場合

軟質環状くさびと硬質球面からなるメタルシールの場合，接触面の傾き角 θ を減少させることにより P_c/l を低くすることができ，例えば $\theta = 15^\circ$ の P_c/l は $\theta = 90^\circ$ の値と比べて，約50%まで減少させることが可能である。 P_c/l を減少させる θ として $10\sim 35^\circ$ を推奨する。

軟質円すい内側密封面と硬質球面からなるメタルシールの場合，接触面の傾き角 θ および環状線接触部の直径 d_s を減少させることにより P_c/l を低くすることが可能である。例えば， d_s を一定とした場合， $\theta = 15^\circ$ の P_c/l は $\theta = 60^\circ$ の値と比べて，約40%まで減少させることができる。なお， d_s を減少させれば線接触長さが短くなるのであるから，必然的に P_c/l は低くなる。 P_c/l を減少させる θ として $5\sim 35^\circ$ を推奨する。

”密封面の接触突起の変形によるシーリング機構”が明らかとなり，極限環境下において安全で信頼性があり，しかも押し付け力が低い静的メタルシール設計の指針を示すことができた。

参考文献

- (1) JIS B8363 (1988), 液圧用ホースアセンブリ継手金具及び附属金具. (日本工業規格)
- (2) JPI-7S-23-83, 石油工業用リングジョイントガスケットおよびみぞ. (石油学会規格)
- (3) JVIS 003 (1982), 真空装置用ベークブルフランジの形状・寸法. (日本真空協会規格)
- (4) API Standard 6 BX, API Specification for Ring Joint Flanges for Drilling and Production Service for Extreme Pressure(1000 lb and 1500 lb). (America Petroleum Institute)
- (5) DIN 2696 (1972), Linsendichtungen. (Deutsche Normen)
- (6) ISO 3669-1986(E), Vacuum Technology-Bakable Flanges -Dimensions. (International Organization for Standardization)
- (7) Forrest, O. and Rathbun, Jr., Metal-To-Metal and Metal Gasketed Seals, SAE Trans., 74(1966), 196.
- (8) Buchter, H. H., Fundamental Principles for Static Sealing with Metals in the High Pressure Field, ASLE Trans., 16-4(1973), 304.
- (9) 小谷敏雄, 超高圧装置用ガスケットに関する研究, 千葉大学工業短期大学部報告, 8-8(1968), 51.
- (10) 遠藤外雄・梅田 洋, 金属製のご歯形ガスケット, 立命館大学理工学研究所紀要, 18(1969), 59.
- (11) 遠藤外雄・梅田 洋, 金属製平形ガスケットの密封性能, バルカーレビュー, 14-6(1970), 1.
- (12) Tückmantel, H. J., All-Metal Gasket for Flanged Joints, 8th Int. Conf. Fluid Sealing, (1978), Paper G2, BHRA.
- (13) Elsworth, L., Holland, L. and Laurenson, L., Bakable Vacuum

Seals Using Aluminium Wire Gaskets, 3th Int. Conf. Fluid Sealing, (1967), Paper C3, BHRA.

- (14) 久呉高博, 超高真空用メタル中空リング《シュアケット》の開発について, 真空, 24-6(1981), 341.
- (15) 酒井 泉・石丸 肇・堀越源一・玉井国夫, アルミニウム超高真空系の金属ガスケットのシール機構と繰り返し使用が可能な金属ガスケットの開発, 真空, 24-7(1981), 408.
- (16) 南 正晴・河野 広・河合久孝・山中敏行, 真空用メタルシールに関する一実験, 日本潤滑学会研究発表会予稿集(九州大会), A11(1983), 41.
- (17) 小原健治朗・中村和幸・村上義夫・長沼正光・喜多村和憲・内田孝穂・近藤光昇, ナイフエッジ型メタルシールフランジの改良に関する検討, 真空, 32-1(1989), 2.
- (18) 岩浪繁蔵・近森徳重, パッキン技術便覧, (1974), 71, 産業図書.
- (19) 堀越源一, 真空技術, (1983), 183, 東京出版会.
- (20) 築添 正・久門輝正・中原耕作, 金属接触面の気体漏れ機構に関する研究, 日本機械学会論文集, 32-239(1966), 1083.
- (21) 風巻恒司, 接触面の流体漏れ論, 日本機械学会論文集, 35-269(1969), 59.
- (22) 風巻恒司, 接触面の流体漏れ論(第2報, 突出部の弾塑性変形による修正), 日本機械学会論文集, 38-309(1972), 1087.
- (23) 風巻恒司, 接触面の流体漏れ論(第3報, 押し付け材が鋳鉄および銅系材の加工方法の影響), 日本機械学会論文集, 40-330(1974), 546.
- (24) 風巻恒司, 接触面の流体漏れ論(第4報, カーボン・アルミ材の加工方法による影響), 日本機械学会論文集, 40-336(1974), 2369.
- (25) 田中章浩・山下 巖, 静止接触面でのガスの漏れについて, 潤滑, 33-7, (1988), 555.

- (26) 船橋 鉦一・中村 隆・村井智哉・馬淵英二, 金属接触面間の密封特性 (第1報, あらさの方向性の影響), 潤滑, 33-10 (1988), 776.
- (27) 井上 滉, 大径円筒面用自緊式金属シールの研究, 日本機械学会講演論文集, 814-7(1981), 73.
- (28) 花田達道・南 正晴・大園勝成・甫出 秀, 二重被覆メタルシールの特性試験 (その1), 日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集, (1992), 639.
- (29) Johnson, K. L., Deformation of a Plastic Wedge by a Rigid Flat Die under the Action of a Tangential Force, *J. Mech. Phys. Solids*, 16-6(1968), 395.
- (30) Funabashi, K. and Nakamura, T., Microscopic Normal Displacement of Contacting Bodies with Tangential Load, *Wear*, 114(1987), 339.
- (31) 船橋 鉦一・中村 隆・馬淵英二, 金属接触面間の密封特性 (第2報, 接線力の影響), 潤滑, 33-10(1988), 783.
- (32) Nakamura, T. and Funabashi, K., Effects of Directional Properties of Roughness and Tangential Force on Pressure Flow Between Contacting Surfaces, *Proceedings 5th International Congress on Tribology*, 2(1989), 165.
- (33) 船橋 鉦一・中村 隆, 接線力負荷による固体接触部の変形について (第1報, 単一円すい圧子の微視的変位についての理論的検討), 潤滑, 29-8(1984), 613.
- (34) 船橋 鉦一・中村 隆, 接線力負荷による固体接触部の変形について (第2報, 準静的な実験と計算結果との比較検討), 潤滑, 29-8(1984), 617.
- (35) 船橋 鉦一・中村 隆・本田 伸, 接線力負荷による固体接触部の変形について (第3報, あらさの大きいかたい面の接触における微視的変位), 潤滑, 29-9(1984), 657.
- (36) 船橋 鉦一・中村 隆・増田 修, 接線力負荷による固体接触

- 部の変形について（第4報，往復接線力を負荷したときの微視的変位），潤滑，29-9(1984), 664.
- (37) 松崎良男・風巻恒司，ガスケットの密封機構，潤滑，29-5(1984), 327.
- (38) 松崎良男・風巻恒司，静的シールの設定圧着応力に及ぼす表面粗さの影響（第1報，基礎実験），日本機械学会論文集，53-489, C(1987), 1091.
- (39) 松崎良男・風巻恒司，静的シールの設定圧着応力に及ぼす表面粗さの影響（第2報，金属ガスケットとしてのシール特性），日本機械学会論文集，53-491, C(1987), 1482.
- (40) Matsuzaki, Y. and Kazamaki, T., Effect of Surface Roughness on Compressive Stress of Static Seals, JSME Int. J. Series III, 31-1(1988), 99.
- (41) 松崎良男・風巻恒司，静的シールの設定圧着応力に及ぼす表面粗さの影響（第3報，硬いくさび形突起と軟らかい平面とのシール特性），日本機械学会論文集，55-515, C(1989), 1729.
- (42) 松崎良男・細川一夫・船橋鉦一，静的シールの設定接触圧力に及ぼす表面粗さの影響（第4報，ナイフエッジシールのシール特性），日本機械学会論文集，57-537, C(1991), 1723.
- (43) Matsuzaki, Y., Hosokawa, K. and Funabashi, K., Effect of Surface Roughness on Contact Pressure of Static Seals (Sealing Characteristics of Knife-Edge Seals), JSME Int. J. Series III, 35-3(1992), 470.
- (44) 松崎良男・船橋鉦一・細川一夫，環状くさび形ガスケットの密封特性，日本機械学会論文集，58-551, C(1992), 2186.
- (45) 松崎良男・船橋鉦一・細川一夫，静的シールの設定接触圧力に及ぼす表面粗さの影響（第5報，円すい内側シール面に作用する接線力の影響），日本機械学会論文集，57-543, C(1991), 3669.
- (46) Matsuzaki, Y., Funabashi, K. and Hosokawa, K., Effect of

Surface Roughness on Contact Pressure of Static Seals
(Effect of Tangential Force on Conical Inside Seal
Surface), JSME Int. J. Series III, 掲載予定.

- (47) 風巻恒司・松崎良男, 銅線をパッキン材として使用した際の漏れ特性, 流体工学, 11-11(1975), 681.
- (48) 微少漏洩に関する分科会, 原子炉用容器の微少漏えいに関する研究, 日本機械学会誌, 68-560(1965), 1321.
- (49) 雨宮, ガスクロマトグラフィー, (1974), 共立出版.
- (50) Courtney-Pratt, J. S. and Eisner, E., The Effect of a Tangential Force on The Contact of Metallic Bodies, Proc. R. Soc. London, 238(1957), 529.
- (51) Bowden, F. P. and Tabor, D., The friction and lubrication of solids, (1986), 20, Clarendon Press.
- (52) Roth, A., Vacuum Sealing Techniques, (1966), 306, Pergamon Press.
- (53) 日本機械連合会, 日本真空協会, 超高真空用フランジ及びシール材の標準化に関する調査事業報告書, (1983).
- (54) Roth, A., Sealing Mechanisms in Bakeable Vacuum Seals, J. Vac. Sci. Technol., A1(2), (1983), 221.
- (55) Matsuzaki, Y., Hosokawa, K. and Funabashi, K., Mechanism and Optimum Shape of Knife Edge for Metal Sealing, Tribology International, 掲載予定。

謝

辞

本研究と論文の完成にあたっては、名古屋工業大学 船橋鉦一教授より直接懇切な御指導を賜り、厚く御礼を申し上げます。また、本論文の完成に関し、有益な御教示ならびに御助言を賜った同大学 水野高爾教授、大河内禎一教授、後藤敬典教授に対し深い感謝を捧げます。

本研究を遂行するにあたり、学生のと時から今日に至るまで、御指導ならびに御激励を賜りました 前 富山大学教授 風巻恒司先生に深く謝意を表します。また、適切な御指導ならびに数多くの御助言を頂きました石川工業高等専門学校 細川一夫教授に心から感謝申し上げます。

さらに、本研究遂行上、終始暖かい御助言と御指導を頂きました富山大学 塩澤和章教授、ならびに富山県立大学 春山義夫助教授に深く御礼申し上げます。

また、本研究において、試料の提供に関して日本バルカー工業株式会社およびフジタ技研（株）に御世話になりました。なお、試料の作成に関して石川工業高等専門学校 荒崎武智氏に手伝って頂きました。ここに心から感謝いたします。