

NSK TECHNICAL JOURNAL

NOVEMBER • 2006

No. 681

創立90周年—NEXT 10



NSK TECHNICAL JOURNAL

NOVEMBER・2006

No. 681

創立90周年記念号

NEXT 10

CONTENTS

巻頭言

NSKの歩み

－国産第一号の軸受から－ 取締役 代表執行役社長 朝香 聖一 1

NSK 技術開発の歩み

－2016年 NEXT 10 への挑戦－ 取締役 代表執行役専務 町田 尚 3

寄稿文

水素と材料：水素社会実現のための課題

..... 九州大学 理事・副学長 村上 敬宜 5

解説・論文

NSK技術革新の歴史

..... 執行役常務 正田 義雄 11

炭素鋼の繰返し応力－ひずみ特性および疲労挙動に及ぼす水素チャージの影響

..... 宇山 英幸, 峯 洋二, 村上 敬宜, 中島 優, 森重 利紀 26

単一細胞を対象とした細胞内部構成物質のオンチップ抽出

..... 池田 憲文, 柳田 保子, 初澤 毅 33

Surface Integrity Control of Piezoelectric Materials in Ultra Precision Grinding

－Based on Tooling Design Analysis ... S. Arai, J. Corbett, R. W. Whatmore, S. A. Wilson and J. Hedge 37

真空環境対応位置決めテーブル用差動排気シールに関する基礎研究

..... 中村 剛, 佐治 伸仁 41

Research of New Factors Affecting Rolling Contact Fatigue Life

..... S. Fujita, N. Mitamura and Ya. Murakami 48

Preface

The 90-Year Heritage of NSK—From the First Bearing Made in Japan
 President and Chief Executive Officer S. Asaka **1**

90 Years of NSK Technology—The NEXT 10 Road Map as 2016 Approaches
 Director, Executive Vice President H. Machida **3**

Contribution

Hydrogen and Materials—The Challenges in Achieving a Hydrogen Society
 Kyushu University Trustee, Vice President Yu. Murakami **5**

Technical Papers

NSK Technical Innovation History
 Senior Vice President Y. Shoda **11**

**Effects of Hydrogen Charge on Cyclic Stress-Strain Properties and Fatigue Behaviour
 of Carbon Steels** H. Uyama, Y. Mine, Yu. Murakami, M. Nakashima and K. Morishige **26**

On Chip Extraction for Intracellular Material from the Single Cell
 N. Ikeda, Y. Yanagida and T. Hatsuzawa **33**

**Surface Integrity Control of Piezoelectric Materials in Ultra Precision Grinding
 —Based on Tooling Design Analysis** ... S. Arai, J. Corbett, R. W. Whatmore, S. A. Wilson and J. Hedge **37**

**Basic Study on Differential Pumping Seal for Precision Positioning Table
 in Vacuum Environment** T. Nakamura and N. Saji **41**

Research of New Factors Affecting Rolling Contact Fatigue Life
 S. Fujita, N. Mitamura and Ya. Murakami **48**

NSKの歩み

— 国産第一号の軸受から —

本年、日本精工株式会社は創立90周年を迎えることができました。90年という長い歳月に亘り、当社製品が日本および世界の産業発展に些かなりとも貢献できたことは、関係各位のご厚情の賜物と深く感謝申し上げます。

歴史を振り返りますと、当社創立に先立ち、その前身である日本精工合資会社が1915年に日本で初めてアンギュラコンタクト玉軸受の試作品を完成させました。外国から技術導入することもなく、暗中模索の中で、工具研削盤に新たに開発した手動の首振り装置を取り付け、揺動運動を与えながら玉軸受のボールみぞを研削したそうです。そして、転がり軸受の生産の目途がついた1916年11月に当社が創立されました。日本にとって全く未開発の軸受技術確立することに注がれた先輩諸氏の技術屋魂は、現在も当社のDNAとして引き継がれております。

その後、第一次世界大戦の反動不況や、第二次世界大戦後の混乱など幾多の困難を乗り越えて、日本の産業の成長とともに当社は発展を続けてまいりました。終戦の1945年11月に操業を再開すると、鉄道、石炭、鉄鋼業などの基礎産業、あるいは繊維産業など国民生活に直結した産業の復興を、用途に適した各種の軸受を開発して供給することによって支えてまいりました。高度成長期に入り、モータリゼーションが本格化すると、自動車の各種用途に対応した専用軸受やステアリング、ワンウェイクラッチ、フリクションプレートなどの自動車部品の生産を本格化致しました。1973年の第一次オイルショック以降、低燃費に向けた製品開発に力を注ぎ、密封クリーン軸受やHi-TF軸受などの耐久性の高い軸受を開発することにより、軸受の小型化と低トルク化を同時に実現致しました。ホイール用軸受であるハブユニットでは、周辺部品を取り込むことで部品点数の削減と軽量化を進めてまいりました。ステアリングでは、自動車の燃費向上に大きく貢献する電動パワーステアリング（EPS）を開発致しました。当社は安全性や操舵性に優れたEPSの高出力化開発を進め、現在では3リッタークラスの乗用車にまで可能性を広げております。

鉄鋼業においては、粗鋼生産量の増加に伴い生産性の向上が急務になりました。圧延機に使用されるロールネック軸受は外部からの異物や水の浸入との戦いですが、軸受周辺を含めた設計提案を行なうとともに密封4列円錐ころ軸受を開発することで、大幅な寿命延長と潤滑グリースの削減に成功致しました。1964年の新幹線の開通は、高速鉄道時代の幕開けとなりました。現在は、開業

取締役 代表執行役社長

朝香 聖一



当時の1.5倍程度の最高速度で運行されておりますが、車軸軸受の重量は当時の1/3近くにまで軽量化されております。主電動機用では、セラミックコーティングを施した絶縁軸受を開発し、日本初の新幹線用絶縁軸受として300系新幹線に採用されました。この絶縁軸受は、300系以降の全ての新幹線に使用されております。工作機械においては、1970年代以降、NC工作機械が飛躍的に発展しました。当社は高速で高精密な軸受やボールねじの開発を進め、工作機械の高効率・高精度加工に寄与してまいりました。今や1970年代の5倍以上の主軸回転速度と送り速度が実現しております。

また、当社は戦後の早い時期から軸受研究体制の整備に努め、世界一小さな音・振動を実現させる生産技術および製品技術の研究開発を進めてまいりました。この静音技術はエアコンを中心とした家電モータ用軸受に適用されております。さらに、極めて高精度の軸受を開発することで家庭用ビデオ装置の普及に貢献し、この技術をナノメートルレベルの精度にまで進化させることでコンピュータ用ハードディスクドライブ装置に展開致しました。

これら戦後の急速な技術進歩と外部環境の変化に対応できましたことは、先輩諸氏や関係各位のご尽力により、基盤となる技術力を継続的に強化してきた賜物と確信しております。

現在、NSKグループは国内21拠点、海外37拠点で生産活動をさらに活発化しております。テクノロジーセンターも米州、欧州、アジア、中国の各拠点に設置して、お客様への技術対応のスピードアップを進めております。また、経営体質をより健全で強固なものとするため、当社は「生産力の強化」、「製品開発力の強化」、「グローバルマネジメントの強化」、「海外事業の収益力強化」の4つの経営課題を推進しております。さらに、地球環境の保全を社会的責任として捉え、世界中のエネルギーロス削減に貢献してまいります。

NSKは2016年に100周年を迎えます。90周年にあたって次の10年間をさらに躍進するための「NEXT 10」と位置付け、技術のみならず全てのビジネスプロセスにおいてさらなる成長と進化を遂げ、社会的責任の遂行と企業価値の向上に努めてまいります。今後とも一層のご支援を賜りますようお願い申し上げます。

NSK 技術開発の歩み

—2016年 NEXT 10への挑戦—

当社が、1978年にトロイダル型無段変速機の研究を始めたころは日本の自動車における自動変速機の比率はまだ17%程度と記憶しています。夢の自動変速機としてトラクションドライブによる無段変速機の研究を始めたわけですが、当時は油膜で動力を伝えるという概念はあったものの実証することは全く出来ていませんでした。

この基礎となる弾性流体潤滑理論は1960年代前半から研究され、回転体間に存在する油膜厚さを求める理論式が確立された時代でした（1966年Dowson-Higginson）。同時期に、理論検証のために油膜厚さを実験的に確認する研究（1958年A. W. Crook、1961年L. B. Sibley-F. K. Orcutt）も盛んに行なわれていました。また、材料内の微小体積部分では強さにバラツキがある（1939年W. Weibull）という考えを用いて、鋼中の非金属介在物を基点とする疲労寿命に関する研究が1940年代後半から50年代にかけて進められてきました（1947年G. Lundberg-A. Palmgren）。X線を用いて金属材料の疲れ機構および損傷の進行度を非破壊的に知ろうという試み（1960年平、本田）、いわゆるX線疲労解析も研究されていました。さらに、潤滑油に関しても合成油の研究が盛んになった時期でもありました。摩擦と潤滑という言葉がトライボロジーと新しくなり、本当の意味でのトライボロジーの基礎研究が盛んに行なわれた時代であったと思います。

こういった基礎研究の成果として、転がり軸受の寿命は飛躍的に向上しました。当社も長

取締役 代表執行役専務
町田 尚



寿命鉄鋼設備用軸受（Super-TF）、自動車トランスミッション用軸受（密封クリーン、Hi-TF）、工作機械用ロバスト軸受などの新製品を市場に送り出すことが出来ました。またVTR、ハードディスクドライブ用軸受、半導体製造装置用直動製品などの研究開発が現在のIT時代に貢献できたと考えています。おかげさまで、1999年に21年かけて研究を重ねた油膜で動力を伝達するトラクションドライブ式無段変速機が世に出ることになりましたが、研究着手当時と比べれば技術の進化は隔世の感があります。

いまや街では誰もがパソコンで仕事をし、ハイブリッドカーを人工衛星からのナビゲーションシステムで運転し、時速300kmの新幹線で移動します。クリーンエネルギーは風力発電で作られ、CTスキャナーで健康診断ができる時代となりました。これら時代の先端製品全てに私たちの転がり軸受が使われていますが、これを成し遂げたのは継続的な研究開発の成果だと思えます。

これからの10年、100周年に向かって、自動操縦する車、一つの細胞からDNAを取り出すチップ、さまざまな機械情報を診断して送ってくれる軸受など夢の研究開発を進めています。第一線に立って研究開発を行なっているのは若き研究者たちです。「今日出来なくても明日はきっとやってみせる」と思う勇気ある挑戦者たちの未来に期待しています。

水素と材料：水素社会実現のための課題

九州大学 理事・副学長
 独立行政法人 産業技術総合研究所
 水素材料先端科学研究センター センター長



村上 敬宜

はじめに

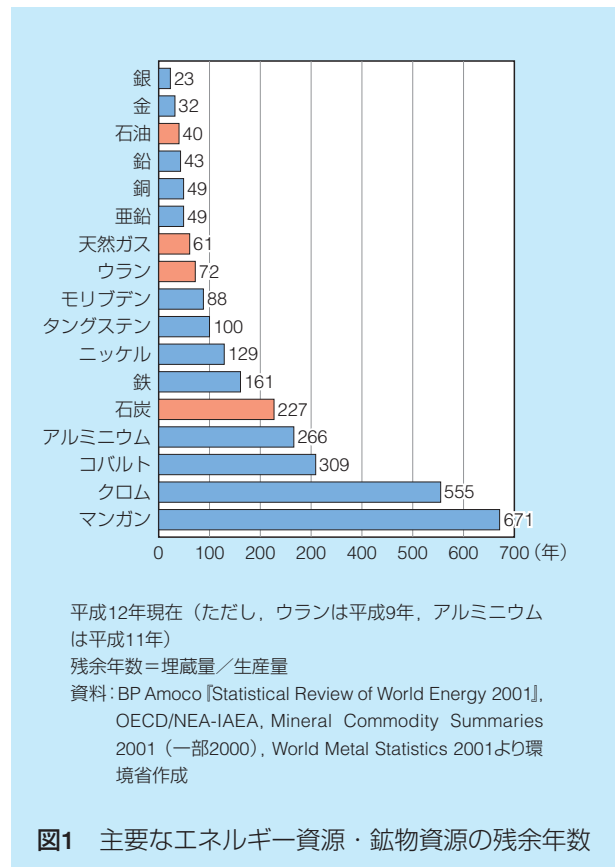
人類は長年にわたって、地球の多くの資源を食いつぶしてきた。

色々な調査によって、石油が使えるのはあと40~50年といわれている(図1)。日本は近い将来、エネルギー確保において大変厳しい状況に置かれることは目に見えている。一方で、地球温暖化も進行している。エネルギー問題も地球温暖化問題も各方面で議論されているが、両者ともに台風や地震被害のように一過性のものではないことを認識しなければならない。問題が顕在化したときには後戻りが不可能である。2001年度ノーベル経済学賞を受賞したコロンビア大学 J. E. Stiglitz 教授は、「地球温暖化問題は経済問題と比較にならないほど世界にとって緊急の課題である」「その惨禍はどんな戦争がもたらす惨禍より大きい」¹⁾と警告している。にもかかわらず、今日明日の問題でないとの認識で毎日少しずつ破局へと向かうのが人類の習性であるとの思いがつのる。このような事情で水素をエネルギーとして利用する社会を実現することが必須となっている。

しかし、水素利用社会実現には多くの科学的・技術的課題がある。一方で、社会受容性を高める啓発活動も必要である。国民(一般市民)の協力的なしに安全な水素利用社会実現はあり得ない。定置用燃料電池システムの普及にはパイプラインの安全確保が必要であり、車両用燃料電池システムの普及には車両そのものの安全対策の他に利用者の使い方、トンネル、地下駐車場、水素ステーションなどのインフラの安全確保が必須である。安全にかかわる純粋な技術的対策の他にマン・マシンシステムからみた安全対策や啓発が必要である。

このように考えてくると、水素社会実現のためには基礎から実証までの科学的・技術的研究開発と並行して国をあげての国民の理解を得る活動を早期には始めることが重要であることがわかる。エネルギーと地球環境問題は、内閣府の主要政策でも取り上げられている。日本の将来の根幹にかかわる問題なのであり、ナノ、バイオ、IT、ロボットなどの科学・技術問題とは次元が異なるものである。

本稿では、水素利用技術の基盤を支える水素と材料に関わる技術的問題を取り上げる。



1. 水素と材料：未知の世界

私たちは水やお湯をパイプに流しても重大な事故の心配はしない。漏れることはあまりないし、漏れたとしても危険が少ないからである。高温高圧の蒸気やプロパンや天然ガスなどが漏れると事故につながるが、それでも防止法は確立している。これに対して、**水素は大変やっかい者**である。他のガスよりはるかに少ないエネルギーで着火する。空気中の濃度も薄い状態（4%）から濃い状態（75%）までが可燃範囲である。ゴム風船に入れてふくらませても翌日はしぼんでしまうのは、水素がゴムの分子の間を抜けて外に出るからである。水素が素通り、あるいは侵入するのはゴムだけではない。**金属にも侵入**するのである。

金属に水素が侵入すると、強度が著しく低下することが知られている。破壊を起こしたときの状況はマクロ的には一見金属が脆く壊れたような様相を呈するので「**水素脆化**」という用語が使用されるようになった。ところで、金属に侵入した水素は、金属中でどのような振る舞いをするのであろうか。残念ながら正確なことは未だわかっていないのである。よく知られた実験は次のようなものである。

「金属を水素ガス中で極めてゆっくり引張ると、空気中で引張った場合と比べて伸びが著しく減少する」

この現象の解釈についても議論が分かれているが、水素がいたずらしていることは明らかな事実である。

もう一つよく知られた実験として次のようなものがある。

「切欠きあるいはき裂を付けた鋼の試験片に水素ガス中で荷重をかけると、荷重が一定値でも時間の経過とともにき裂がゆっくり進展し、最終的には試験片は脆く破壊する」

この現象には「遅れ破壊」という名前がつけられている。

上記二つの例にはいずれも「…極めてゆっくり引張ると…」、「…時間の経過とともに…」という**時間のファクターが関係しているところが特徴**である。このことは現象の解釈に多くの誤解を生む原因になっているが、ここではそのことには触れない。

上に紹介した二つの例は比較的古くから知られ

ているもので、燃料電池システムではなく多くの化学プラントや原子力プラントで話題になってきた。これらの機器では、水素が金属中に侵入することでき裂が発生し荷重負担能力が低下し、破壊事故に至ることが問題とされた。ところが、燃料電池システムにおいては水素と金属の関係はより直接的である。多くの部品や機器が直接低圧、高圧の水素に曝されるのである。しかも、これらの部品には繰返し荷重がかかる。繰返し荷重を受ける金属の破壊現象は、「**金属疲労**」と呼ばれている。金属疲労の研究の歴史は古く、約150年であるが、現在でも破壊事故の80~90%は金属疲労が原因である。多くは空気中の実験データについての研究がなされてきたが、液体中やガス中での研究もあり、色々な現象が解明されてきた。

しかし、水素が金属疲労に及ぼす影響についてはこれまでほとんど研究がなされていない。それほど必要にせまられなかったからである。それでは「研究をすればすぐ解決できるのではないか」ということになる。私たちは10年ほど前から関心を持ち、特に、ここ数年は集中的に研究グループの総力をあげて研究を行っている。現在の感想は「**これは大変やっかいで難しい問題**」ということである。燃料電池システムに関わるほとんどの企業は、部品や機器、装置の開発は従来技術の延長でいけると考えているふしがある。これは全くの誤りである。「**空気中と水素中は別世界**」と考えて、技術開発に基礎から取り組むことが解決への近道である。学問的裏づけもなく、部品や機器を製作しては試験する、膨大な試行錯誤はエネルギーの無駄遣いであるばかりでなく、自分たちが前進しているのか後退しているのかわからない状況にはまり込むことになる。

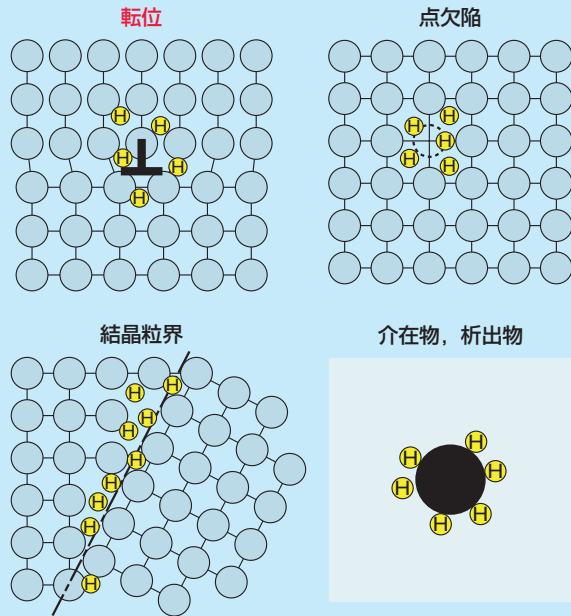
2. 水素利用社会実現のための課題

九州大学は今年7月1日、経済産業省、NEDOの支援を受け、(独)産業技術総合研究所と共同で伊都キャンパスに水素材料先端科学研究センター（Research Center for Hydrogen Industrial Use and Storage, 略称：HYDROGENIUS）を設立した。今年から7年間、材料強度特性、トライボロジー特性に及ぼす水素の影響、高圧水素物性そのものの計測などの研究開発に取り組む。

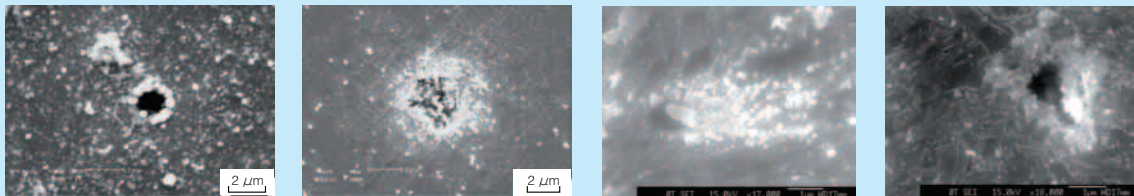
水素エネルギーを利用する社会の実現に最も困難な課題は次の3つである。

- ・ 低コストで信頼性の高い燃料電池の開発
- ・ 安価な水素の製造
- ・ 水素の安全な輸送・貯蔵技術の確立

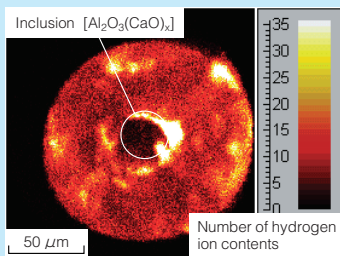
特に、水素の安全な輸送・貯蔵技術の確立のためには水素と材料の関係、トライボロジー特性への水素の影響を基本から解明しなければならぬ。我々はある現象に出会うとまず自分が持っている知識だけでそれを理解・説明しようとする。



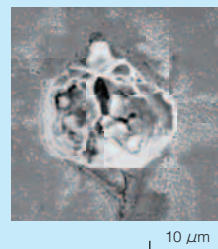
(a) 金属中の水素トラップサイトの種類



Al₂O₃ Al, Ca duplex oxide MnS Cr carbide
 Autoradiographic observations of tritium absorption around various inclusion in SCM435 (Ohtsuka et al)



Secondary ion image of inclusion at fracture origin by SIMS measurement [Al₂O₃(CaO)_x], (SCM435)



Autoradiographic observation of tritium absorption near the inclusion at fracture origin Al₂O₃(CaO)_x (SCM435) ($\sigma_a = 480$ MPa, $N_f = 9.61 \times 10^8$, Courtesy of H. Kawazoe et al.)

(b) 介在物にトラップされた水素

図2 介在物にトラップされた水素³⁾

水素エネルギーを利用する関連技術も従来の学問体系的適用、従来技術の延長で行けると考えていた。しかし、産業界も最近の実証試験からの経験で、単なる従来技術からの延長と耐久試験では本質的解決にはならないことを悟ってきた。

水素の原子番号は1でヘリウムの原子番号は2であり、1番だけしか違わない。しかし、この1番違いがもたらす現象の違いは桁違いである。

トライボロジーの視点から水素特有の影響を2,3あげると次のようことがある。

1) 空気中と水素中では摩擦係数が異なる。

一般に、水素中では摩擦係数が空気中よりも高い。これは水素の影響というより酸素の不在の影響と見ることができる。

2) 水素には還元作用がある。

水素は接触面の酸化、潤滑剤の酸化、還元作用に影響する。

3) 水素は材料中に侵入し、強度特性を劣化させる。

3. 水素は材料中で何をしているのか？

金属が高圧水素に曝されているとき、その金属の表面から水素が侵入する。水素は分子として金属表面に吸着し、原子として金属中に侵入するといわれている。水素の侵入量は水素ガスの圧力の平方根に比例する（Sievertsの関係）ことが知られている。

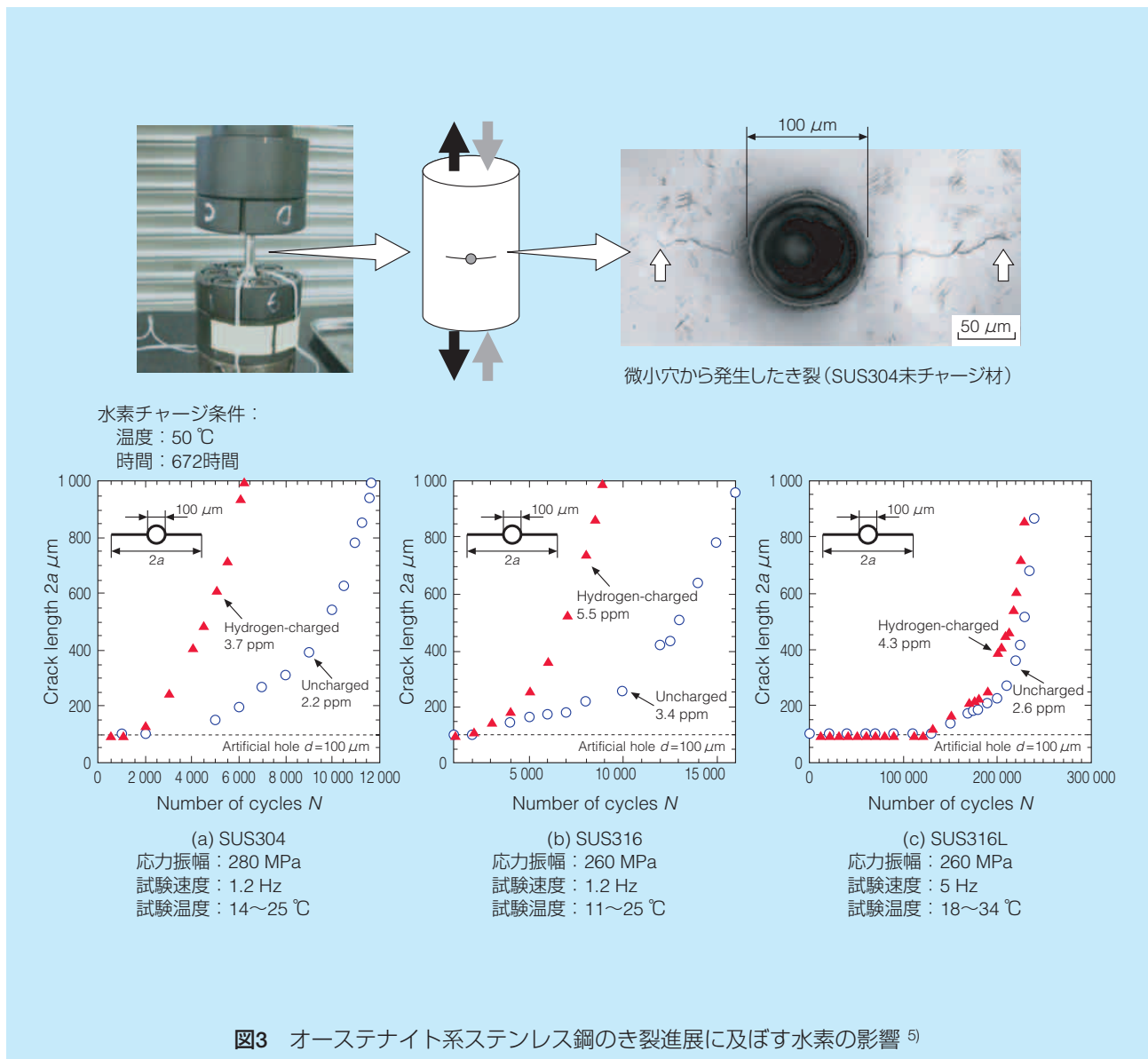


図3 オーステナイト系ステンレス鋼のき裂進展に及ぼす水素の影響⁵⁾

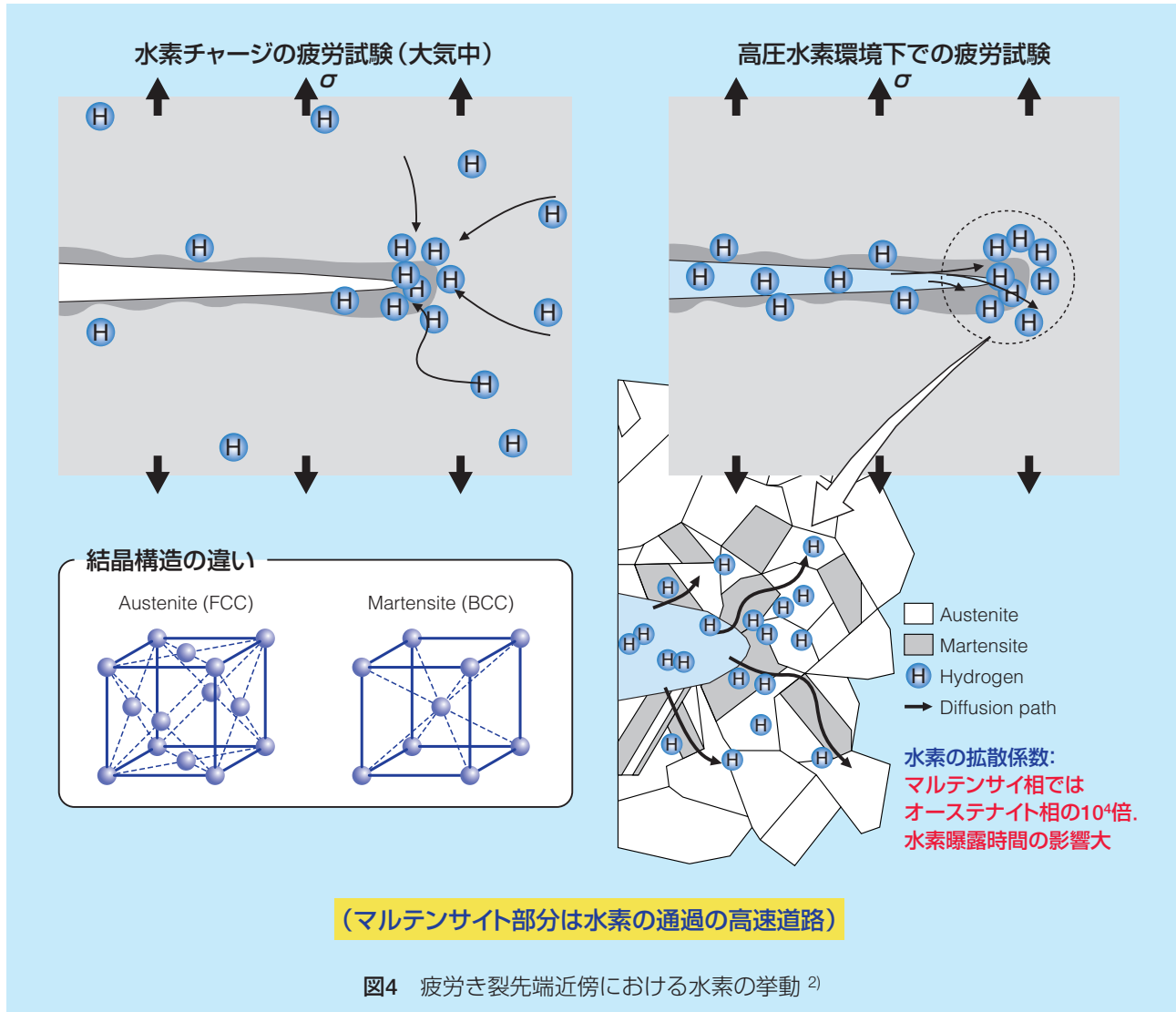


図4 疲労き裂先端近傍における水素の挙動²⁾

金属中に固溶する平衡水素濃度は材料中の転位、空孔、結晶粒界、介在物などのトラップサイトの数や大きさによって変わる(図2)^{2),3)}。トラップされた水素が応力の負荷とともにどのような挙動をするのか正確にはわかっていないが、最近の著者らの研究室の研究結果は従来のいわゆる水素脆化説による説明とはかけ離れたものである。いわゆる水素脆化説のもとになっているのは格子脆化説(Decohesion theory)⁴⁾であるが、起きている現象を注意深く観察すればDecohesion Theoryに当てはまるものはほとんどない。水素が材料の強度特性に及ぼす影響については、いわゆる水素脆化(Hydrogen Embrittlement)という用語で表現されてきた。しかし、透過電子顕微鏡(TEM)中での水素雰囲気In-Situ実験における水素による局所すべりの発達や金属疲労、衝撃

特性などに及ぼす水素の影響の最近の研究⁵⁾⁻⁷⁾によれば、実際にミクロのレベルで起こっていることは、いわゆる脆性破壊的な現象ではなく、ミクロな延性破壊である。

SUS304, SUS316 オーステナイト系ステンレス鋼の疲労き裂進展速度は水素チャージによって著しく速くなる。SUS316Lでは通常の実験室の試験条件では水素の影響はほとんど見られない(図3)。しかし、ひずみ速度を遅くするとき裂進展速度の著しい加速が起こる^{2),8)}。これらの鋼の破面には明瞭なストライエーションが現れる。まさに典型的な延性破壊が起こっているのである。SUS316Lは圧延や引張り試験によってもマルテンサイト変態しないので、疲労試験のような微小ひずみの繰返しではマルテンサイト変態しないものと考えられていた。しかし、実際に疲労破面を

調べてみると10~20%のマルテンサイト変態が生じていることがわかってきた⁵⁾。

このことは水素ステーションのように1サイクルの水素充填時間が8~10分程度の場合には極めて重要な意味を持つことになる。愛・地球博の水素ステーションの水素充填ホースからの水素漏れトラブルの調査では次のようなことがわかってきている²⁾。約280回のバスへの水素充填に対して破面には約270個のストライエーションが観察されている。1サイクルに8分間要する遅い負荷速度、SUS316Lのマルテンサイト変態、マルテンサイト中における水素の早い拡散などが重畳して通常の実験室レベルの試験では起こらないほどのき裂進展の加速が起こることがわかってきた。マルテンサイト中の水素の拡散速度はオーステナイト中より約 10^4 倍大きい。組織の一部がマルテンサイト変態し、き裂面(材料表面)に35 MPaの高圧水素が存在すればマルテンサイトはオーステナイト基地組織の中で水素の高速道路ができたのと同じ効果を持つ(図4)^{2),8)}。このようなメカニズムで疲労き裂進展に水素の関与が重大なものとなる。

4. 新しい現象と新しい技術

以上の現象は、これまで我々が従来の技術で経験したことがないものである。これらの問題には取り組む必要もなかった。しかし、水素エネルギー利用の問題がクローズアップされるにつれ、水素の問題は避けて通ることはできなくなり、水素と材料の関係の全貌が具体的に解明されつつある。

今になって振り返ってみると、従来の技術の中に水素の問題がなかった訳ではないことがわかる。ある種の軸受と潤滑剤の問題、ハーフトロイダル型CVTの超長寿命疲労破壊の問題など水素の問題はこれまでもそこかしこに顔を見せていたのである。

我々技術者は良くも悪くも既存の知識、技術、経験だけで当面の問題を乗り切ろうとする習性を持っている。新しい発見、技術の革新はこの習性から一時離れてみることから生まれることをまたまた思い知らされた。私は水素の問題と出会い、これまでの自分の研究姿勢を反省し、

全く初学者の気分にならされている。しかし、研究者としては若返った気持ちで日々新しい現象にわくわくしている。

「7年間では水素脆性の問題は解決不可能」という声もあるが、NSKのハーフトロイダル型CVTの開発の歴史⁹⁾は、そんな声など気にならない勇気を私たちに与えてくれる。現象は目の前にあるのである。これが解明できないわけではない。

文献

- 1) 日本経済新聞, 2006年7月4日, 経済教室.
- 2) 村上敬宜, 福岡水素エネルギー戦略会議資料, 2006年7月26日
- 3) Y. Murakami, The effect of hydrogen on fatigue properties of metals for fuel cell system, International Journal of Fatigue, 138: pp.167-195, 2006
- 4) R. A. Oriani and P. H. Josephic, Acta Metallurgica, Vol.22, pp. 1065-1074, 1974
- 5) 金崎俊彦他, 投稿中
- 6) 宇山英幸, 峯洋二, 村上敬宜, 水素チャージした焼入れ焼戻しマルテンサイト鋼の疲労挙動に及ぼす繰返し速度の影響, 材料, Vol.55, No.8, pp.726-731, 2006
- 7) 松岡三郎他, 投稿中
- 8) 村上敬宜他, 投稿中
- 9) H.Machida, Technology of a traction drive CVT—Past, Present and future, Life Cycle Tribology, Proc of the 31st Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 2004

著者略歴

1943年生まれ。
1968年九州大学大学院修士課程修了。同年日立製作所入社。1971年九州大学助手, 1975年九州工業大学講師, 1977年同助教授, 1982年九州大学助教授を経て, 1984年同教授。1999年九州大学大学院教授。2001-2004年工学研究院長。
2005年11月より九州大学理事・副学長。
2006年7月より(独)産業技術総合研究所水素材料先端科学研究センター・センター長。
1994年よりSheffield大学名誉教授。
2002年より日本工学アカデミー会員。

(2006年8月原稿受領)

NSK技術革新の歴史



執行役常務
正田義雄

1. まえがき

当社は1916年に創業し、本年11月に創立90周年という節目の時を迎えた。ライト兄弟が初の動力飛行に成功したのは1903年、T型フォードの誕生が1908年であるから、航空機や自動車とほぼ肩を並べるような歴史を積み重ねてきたことになる。

その後の航空機や自動車の凄まじいばかりの進歩に比べると、転がり軸受（以後、軸受）や機械部品などの当社の製品群にかかわる技術開発は、地味で目立ちにくい。しかし、世の中あるいはお客様の製品の進化とともに、当社の製品およびそれに駆使されてきた技術も着実な進展を遂げている。ここでは、社内関係者各位の協力を得て、各産業分野を代表するような製品群にスポットを当てながら、それらに使用される当社の製品あるいは技術開発の足跡をたどってみる。

2. あらゆる機械産業とともに歩む転がり軸受

2.1 自動車の進歩とともに

自動車が日本で工業的に生産されるようになったのは1910年代からである。使用された軸受は円すいころ軸受や深溝玉軸受などの標準軸受が多く、自動車専用軸受としては、キングピンスラスト軸受やクラッチリリース軸受が見られる程度であった。

戦後になって民間用の自動車の生産が本格化するにつれ、自動車専用軸受の要求が増えた。1947年にはハンドル操作を軽くするために、ステアリング用ウォームセクタ玉軸受（図1）が乗用車や1 tトラックに採用された。1950年代になると、日本の自動車メーカーは、乗用車に関する海外メーカーとの技術提携により生産を増やしていく中で、日本車独自の機能を確保するための組立法の確立や耐久性向上を目指していった。デフピニオン用軸受では、適正な剛性を与える予圧取付け法の確立や軸受の耐焼付き性の向上が図られた。耐はく離性を向上させた後輪専用の深溝玉軸受が開発されたのもこのころである。

大きな変化は、1973年のオイルショックをきっかけとして現れた。低燃費化と同時に、環境に配慮した排気ガス規制を満足しつつエンジンの高出力化が進められ、さらに快適性も追求されるようになった。また、多様化したニーズに応えるために、前輪駆動化が進んでいった。

トランスミッション用軸受は、この変化の影響を大きく受けた。前輪駆動化・小型化が志向される中で軸受のスペースは制限され、エンジンのトルクが増大したため軸受に対する負荷は大きくなった。その結果、それまでの軸受では必要な寿命の確保が困難になり、耐久性の向上が課題となった。

軸受の寿命を延ばす一般的な方法には、軸受の定格荷重を大きくすること、たとえば大きなサイズの軸受にする、あるいは軸受の内部設計を変えて転動体の径を大きくすることなどがある。しかし、トランスミッション実機では、軸受のサイズアップをしても、十分な寿命延長が得られないという結果に直面した。

このころ、当社では、軸受の疲労についての基礎的な研究を進めており、軌道面にX線を照射して回折線半価幅および残留オーステナイト量を測定し、疲

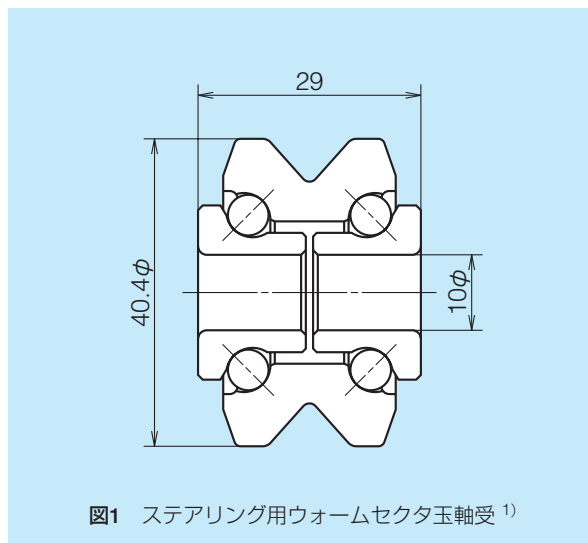
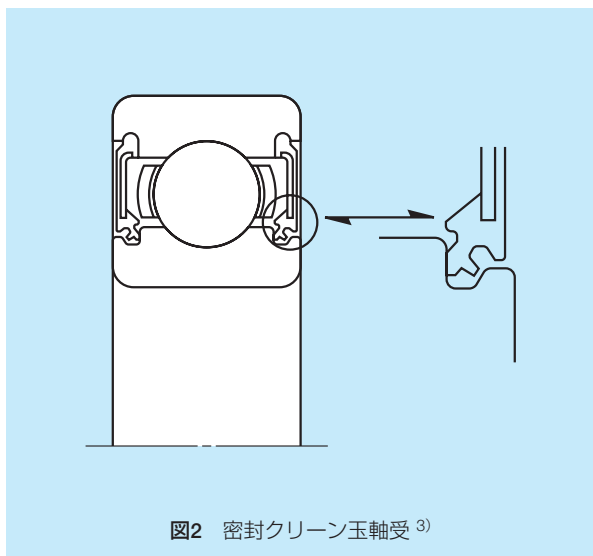


図1 ステアリング用ウォームセクタ玉軸受¹⁾

図2 密封クリーン玉軸受³⁾

劣の形態や疲労の程度を定量化することができる疲労解析技術²⁾を確立していた。この解析により、トランスミッション用軸受の短寿命は、ギヤオイルに混入した歯車の摩耗粉などのコンタミネーションが軸受表面に圧痕を発生させ、圧痕の応力集中部分が起点となってクラックが発生することが原因であることを突き止めた。

この発見が、オイルの流入を可能にしながらオイル中のコンタミネーションの侵入を防止するという、密封クリーン玉軸受³⁾の誕生に結び付いた(図2)。密封クリーン玉軸受では、接触シールの摩擦を小さくするとともに、ギヤオイルと親和性のあるグリースを封入して、潤滑油の入らない初期にも潤滑機能を確保した。この軸受の長寿命化の効果はきわめて大きく、従来の密封機構の無い軸受に比べ、20倍以上の飛躍的な長寿命が達成できた。1978年にこの軸受の量産が始まり、その後採用が次第に広がって、1980年代には欧州の高級車にも使われるようになった。

トランスミッション用軸受ではこの他にも長寿命



写真1 分割タイプケージ&ローラ軸受

化にかかわる開発を行っている。マニュアルミッションでは、ギヤとシャフトの間に使われているニードル軸受の中で、歯車と同時に回転する部位の軸受は、内外輪が相対的に回転しないためフレッチングが起きていた。これを解決するために、きわめてユニークな軸受が開発された。保持器を2つに分割にすることにより、内外輪軌道とニードルの相対位置が少しずつ移動して、フレッチングを防ぐことができたのである。この分割タイプケージ&ローラ軸受も非常に多く採用された(写真1)。

ホイール用軸受は、1973年のオイルショック後に変化が始まった。それまでの後輪駆動車の時代は、前輪は円すいころ軸受2個、後輪は深溝玉軸受1個を使用することが多かった。前輪駆動化によって前輪の取付け周りが複雑となったため、日本車の海外での生産が開始されると、自動車メーカーの生産工程ですきま調整、グリース充填、シール圧入といった軸受組み込み時の複雑な作業の単純化が必要になった。また、駆動輪となる前輪は操舵輪でもあるため、車軸周辺のコンパクト化や軽量化も求められた。

これに応じてハブユニット軸受が開発された。ハブユニット軸受は、第一世代、第二世代、第三世代とユニット化が進展してきた⁴⁾(写真2)。第一世代は、複列のアンギュラ玉軸受あるいは複列の円すいころ



第一世代



第二世代



第三世代

写真2 ハブユニット軸受

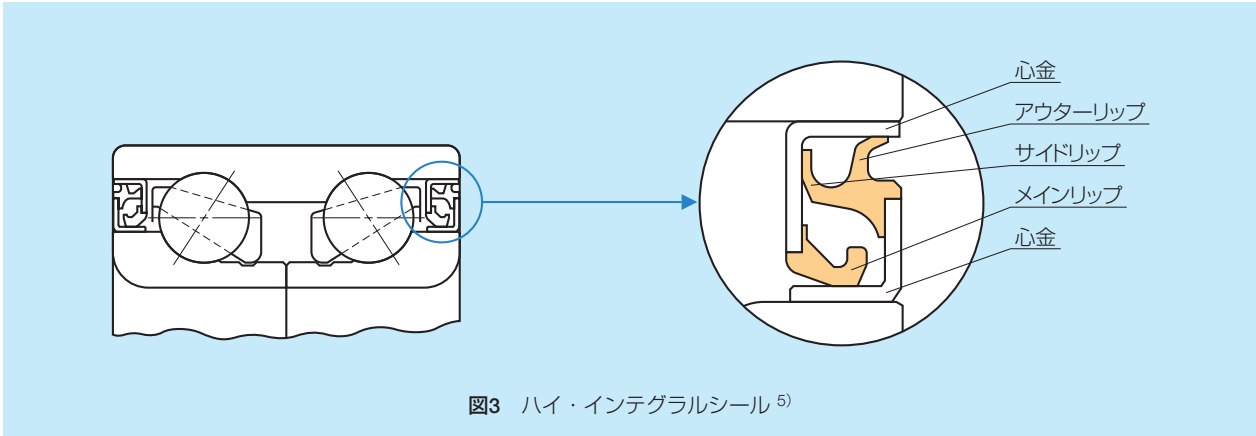


図3 ハイ・インテグラルシール⁵⁾

軸受をユニット化したもので、シールを内蔵したものが主流である。第二世代は、ハブあるいはナックルのいずれかを軸受の軌道輪と一体化することで部品点数が削減されており、軽量化にも貢献する形式である。第三世代では、ハブとナックルの両方を軌道輪と一体化しており、さらなる省スペースと軽量化を達成している。

第一世代のハブユニット軸受は、日本では1980年ころから採用されるようになったが、当社が画期的なシール機構を開発したことによって、シール付きハブユニット軸受が主流になった。このシールは、内輪と外輪の間の限られたスペースに収まり、十分な耐泥水性を持ち、摩擦トルクが小さいという優れた特徴がある。ハイ・インテグラルと銘打たれたこのシール⁵⁾ (図3) は、幅4 mmの中に外輪、内輪と接するシール構造を有し、従来シールに比べて格段に省スペースで、かつ10倍以上の泥水耐久性を示した。このシール構造は、その後、第二世代・第三世代にも引き継がれ、ハブユニット軸受の全盛期を築くの

に貢献した。

1990年代はさらなる低燃費化とともに、安全が追求され始めた時代であった。ブレーキはアンチロックブレーキシステム (ABS) が急速に普及し、車輪の回転数を測定するセンサが付けられるようになった。

ハブユニット軸受でも、外部からの泥水や小石の巻き上げなどの影響を無くし、組付けや調整の工数も削減できるように、センサを内蔵した軸受 (図4) が開発された。センサは初期のコイル型から次第に半導体化され、エンコーダには、小さな径で多くのパルスを出せるように、多極磁石が用いられるようになっていった。

1990年代のトランスミッションの分野では、新しい軸受材料や熱処理技術によって異物混入潤滑下での長寿命化が可能になった。はく離には、表面起点型と内部起点型があり、異物混入潤滑下のはく離は前者に分類される。潤滑油中の異物は転動体と軌道輪の間にかみ込まれると、転走面・軌道面に圧痕を形成する。一種の塑性加工によって生じた圧痕の縁は盛り上がり、応力集中源となって過大な応力を発生してしまう。この応力集中を緩和する技術として圧痕の縁の曲率半径を大きくするTF (タフ) 化技術が開発された⁶⁾。材料・熱処理技術によって残留オーステナイトという金属組織を適量コントロールし、圧痕の影響をほとんど無くすことのできるこの技術を用いてTF軸受は開発された。独自鋼種・浸炭窒化技術の開発によってHi-TF (ハイタフ)、Super-TF (スーパータフ) 軸受としてさらに進化し市場に展開されている。円すいころ軸受や円筒ころ軸受は、前述の密封クリーン化ができず長寿命化が実現できていなかったが、TF (タフ) 化技術により、長寿命化やサイズダウン・小型軽量化が可能になった。

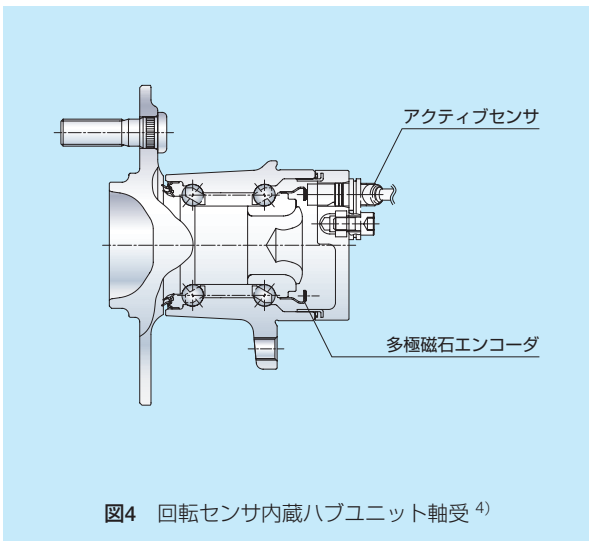


図4 回転センサ内蔵ハブユニット軸受⁴⁾

2.2 製鉄工場の現場とともに

1973年のオイルショック後、鉄鋼業界は、量の拡

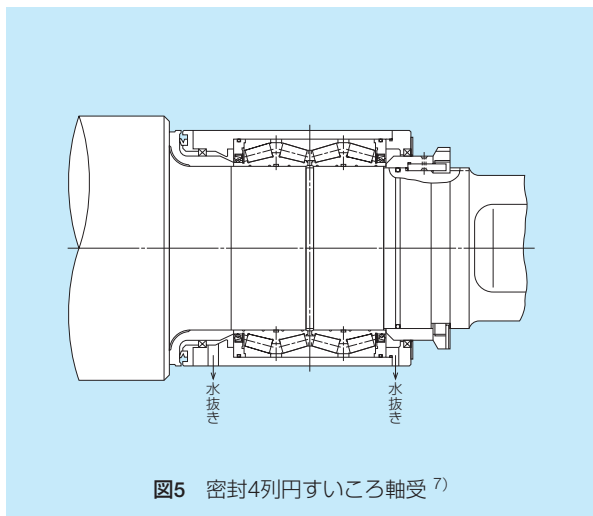


図5 密封4列円すいころ軸受⁷⁾



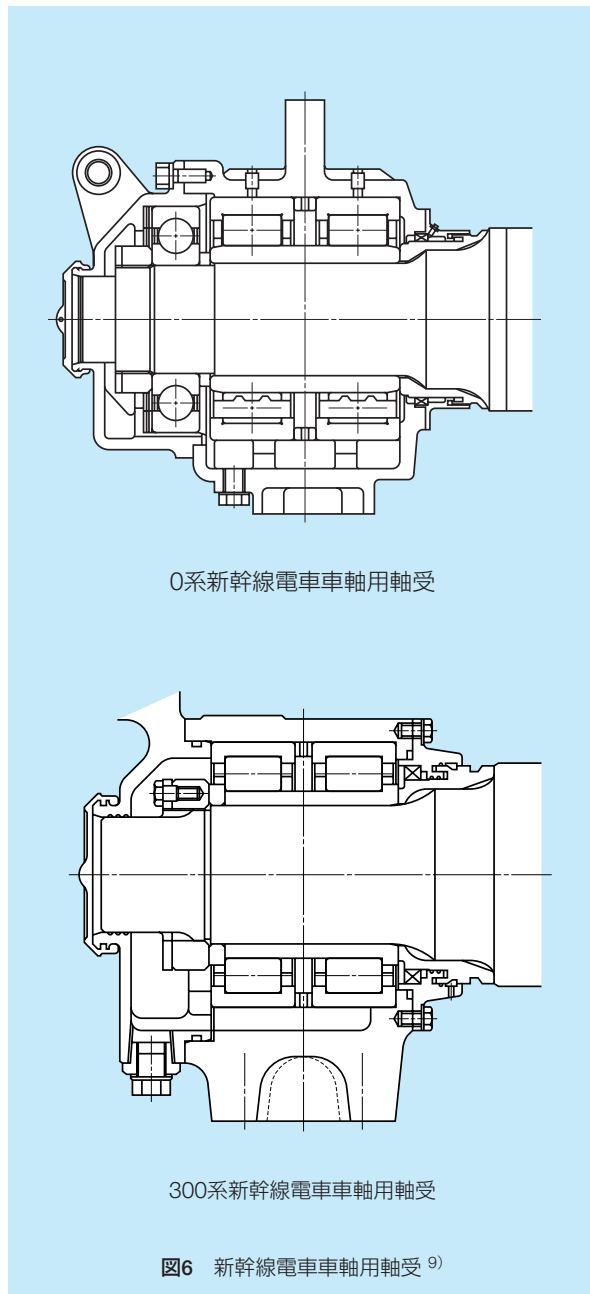
写真3 エクストラキャパシティー®密封4列円すいころ軸受⁸⁾

大から質の追求へと転換が図られ、軸受に対しては、長寿命化や分解点検期間の延長が求められるようになった。

故障頻度が高かった圧延機用ロールネック軸受の改善は急務であったが、鉄鋼設備用軸受の中でもその使用条件が最も厳しいとされるこの軸受の長寿命化は、簡単なものではなかった。

当社では、過去から蓄積してきた軸受の使用状況や損傷状況を克明に解析し、軸受および軸受周りに対する改善策を探った。その結果、軸受内に侵入してくる水、水蒸気や鉄粉塵などの遮断が最重要との結論に達し、シールを内蔵したロールネック軸受の開発に行き着いた。こうして、1978年に世界で初めてチョック（軸受ハウジング）の構造を配慮した独自の密封4列円すいころ軸受を世に出した（図5）。製鉄工場の現場とともに積み重ねてきた経験の集大成であった。

この軸受には、各圧延機の使用条件、運転状況に



0系新幹線電車車軸用軸受

300系新幹線電車車軸用軸受

図6 新幹線電車車軸用軸受⁹⁾

合わせて細かい対応が図られた。これにより、本来のメリットである寿命の延長に加え、ミルスタンドへのロール挿入時のグリース配管が不要となった。また、使用グリース量の大幅な削減も可能になり、コストダウンに貢献するとともに、製鉄工場内の環境浄化に寄与した。

その後、密封4列円すいころ軸受はグローバルに普及拡大し、最近では開発初期に比べて2倍以上の寿命を有するエクストラキャパシティー密封4列円すいころ軸受（写真3）に進化を遂げている。

2.3 新幹線の高速化とともに

新幹線は、1964年に商業運転されてから、常に高

速化の歩みが続けた。1992年300系が登場すると、新幹線の速度は開業時の210 km/hから約1.3倍の270 km/hにまで上がった。実用化に際しての試験では、さらに高速の300 km/hを超える走行が行われた。

300系の高速化を実現するには、それまでの新幹線軸受を越える新たな技術への挑戦が必要であった。高速化には、走行安定性向上と車両の軽量化が必須であり、車軸用軸受には、出来る限りの軽量化が求められた。0系新幹線の車軸用軸受は玉軸受と複列円筒ころ軸受の組み合わせであった（図6）が、当社では既に、玉軸受を省略するために円筒ころ軸受のつばのアキシャル負荷能力を向上させる技術開発に取り組み、耐焼付き性に優れたつば端面と端面の形状を見出していた。そして、在来線電車で実績を重ねていたこの開発技術を、高速新幹線用の試作軸受に適用し、社内台上試験で325 km/hに挑戦した。その結果、温度上昇は80℃以下を達成し、実車搭載の目処がつけられた。さらに、新幹線の実車試験でも温度上昇は許容値以下に収まり、耐焼付き性が十分であることが確認された。これによって、アキシャル荷重を円筒ころ軸受のつば面で受ける形式（図6）が300系に採用され、軸受重量は81 kgから31 kgにまで軽減でき、超軽量化を実現することができた。

300系では、同時に車両の主電動機も軽量化と高速化が進められ、モータはインバータ制御（可変電圧可変周波数）の交流形式となった。その結果、軸受に耐電食性の向上が求められた。

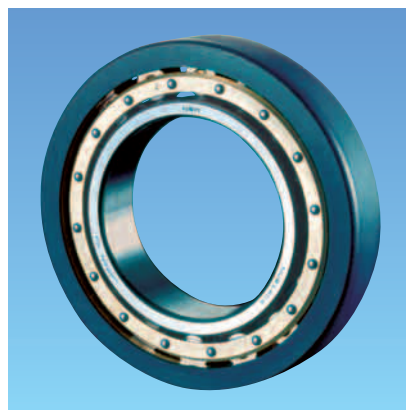
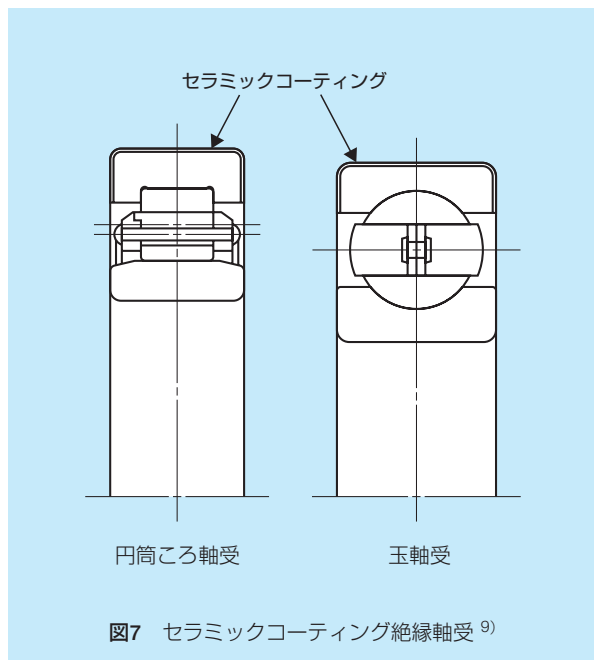
主電動機用軸受の耐電食性向上には、当社が過去から蓄積してきた技術が活用された。当社では、そ

の当時アルミナ系セラミックスを軸受外輪の外径部と端面部にプラズマ溶射した絶縁軸受（図7）を開発していた。

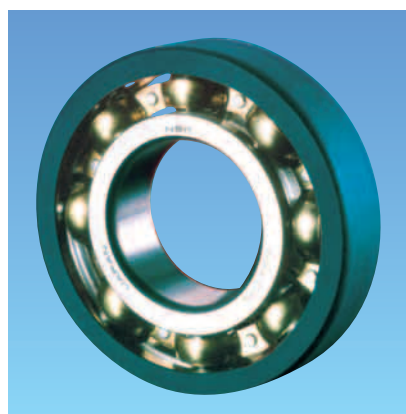
絶縁軸受では、被膜に存在する気孔の処置や密着性の向上が課題であり、最適な被膜厚さの検討も必要であった。内部に水分を保持して絶縁性を低下させる気孔には樹脂を含浸させ、また、密着性向上のためには下地処理を施すことでこれらを克服した。被膜厚さに関しては、実験を重ねることにより、被膜の生成条件を考慮すると0.5 mmが有効であることを見出した。このセラミック被膜を施した軸受は組み込み性にも優れ、私鉄の電車での実績を積み重ねていた。この軸受で培われた技術を用いて試作と社内評価を繰り返し、実用可能な新幹線用軸受を完成させた。

新幹線の主電動機用軸受に絶縁軸受が採用されたのは、300系新幹線に採用されたこのセラミックコーティング絶縁軸受（写真4）が初めてであった。

絶縁軸受は、高速化に貢献した技術として高い評価を受け、その後新たに開発された全ての形式の新幹線主電動機に使用されている。



円筒ころ軸受



玉軸受

写真4 300系新幹線電車の主電動機用軸受

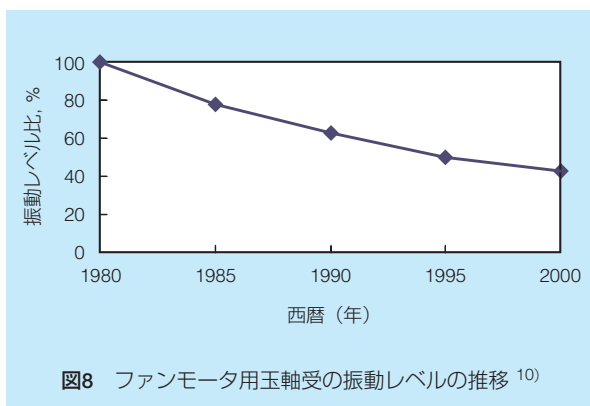
2.4 家電製品の普及とともに

家電・情報機器に使用される軸受のルーツをたどれば、標準電動機用の玉軸受に行き着く。電動機用玉軸受の性能向上の歴史は、低騒音・低振動化の歴史でもある。当社では1950年ころより、研究部門に音圧測定器、音響分析器、振動測定器、無響室などの新しい研究設備が続々と設置され、軸受の低騒音・低振動化に関する活発な研究が展開された。その成果は、最終工程での超仕上げ加工法導入として、ただちに生産に反映された。同時に品質保証用測定器の開発にも結び付き、当社の転がり軸受の音響品質は、このころから飛躍的に向上した。

電動機用軸受は1960年代から洗濯機、扇風機、クリーナ用モータに、1970年代にはエアコンなどのファンモータへと用途を広げた。家電製品の中でも、エアコンや空気清浄機は、軸受に対する低騒音化の要求が特に厳しい。これらの機器のファンモータに使用されている内径8 mmの玉軸受の振動レベルは、**図8**のように年々低減しており、家電製品の静粛性向上に大きな役割を果たしてきた。

1970年代の後半に入ると映像機器用のビデオテープレコーダ（VTR）が出現し、その心臓部であるドラムスピンドルモータに玉軸受が使われた。さらに1980年代に入るとレーザービームプリンタ用スキャナモータや情報機器用固定ディスク装置（HDD）のスピンドルモータなど、情報機器分野へと用途が広がった。それまでの家電用軸受は音響性能が最重要であったが、VTRや情報機器用軸受は、NRRO（Non-Repetitive Run-Out）と呼ばれる比較的低周波で、回転に同期しない振動の抑制が必要とされた。このために、軸受内部寸法の適正化、構成部品の高精度化、封入グリースの性状・量・封入形態の改良、軸受の清浄度の向上など、多くの対策や改善が精力的に進められた。

NRRO性能に最も影響の大きい部品精度に関して



は、その時々限界を次々と突破しながら向上が図られてきた。たとえば、HDDスピンドルモータ用玉軸受では、1990年代には真球度が0.05 μm 以下、表面粗さが0.008 μm Ra以下の高精度鋼球が用いられた。さらに2000年代に入ると、真球度は0.01 μm 、粗さが0.002 μm Raレベルの超精密鋼球が使用されるようになった。鋼球に関するISO、JIS規格の最高等級の真球度と粗さは、それぞれ0.08 μm 、0.012 μm Ra以下であることから、文字通り桁違いの高精度であることが理解される。

家電・情報機器の中でも、クリーナ、エアコン、VTR、HDDなどは、その機能が毎年向上し、軸受技術向上の牽引役を果たしてくれた。それと同時に、高機能な日本製の家電製品は世界市場へと広がり、軸受の生産数量も飛躍的に増大した。電動機用軸受の変遷は、高機能を保証した玉軸受を大量生産した歴史でもある（**写真5**）。

2.5 工作機械主軸の高速化とともに

転がり軸受が日本で初めて工作機械主軸へ使用されたのは1930年代前半のことである。その後1950年代後半から工作機械の国産化が活発になり、1970年代後半になると、数値制御を装備した、いわゆるNC工作機械が飛躍的な発展を遂げた。このころから、NC工作機械の中でも代表的なマシニングセンタの台数が伸び始めた。マシニングセンタには、加工の高効率化や加工面の精度向上のために、加工速度の高速化が求められた。加工速度を上げるためには、主軸用軸受の高速化が最優先の課題であった。**図9**は、主軸の高速化の変遷と当社開発の主軸用軸受の $d_m n$ 値（転動体のピッチ円直径と回転速度の積）を示したものである¹¹⁾。1980年代初頭から主軸の高速化が本格化していることが分かる。この時代に、小径ボール

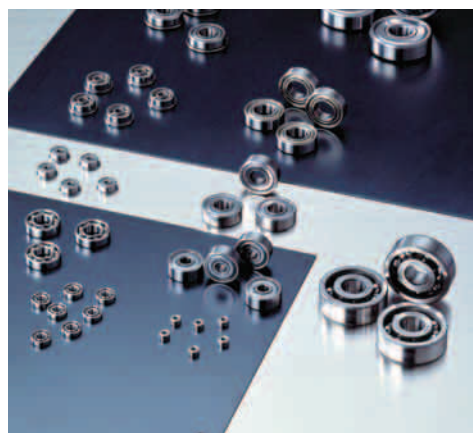


写真5 小径・ミニチュア玉軸受

高速アンギュラ玉軸受 (BNC)¹²⁾ が誕生した。

“BNC” の設計思想は、当社が世界に先駆けて唱えた、「高速回転条件下では、玉と内外輪みぞの転がり接触部のジャイロ滑りが軸受の発熱を支配し、焼付きの有無を左右する」という理論を基本としている。これは、それまでの負荷容量を重視する旋盤やフライス盤用軸受の設計思想を覆すものであった。BNCでは、接触角を15°とし、玉径を一気に30%小さくすることにより、高速回転下におけるジャイロ滑りを抑制した。これにより、高速回転時に発熱の少ない、主軸用に好適な軸受が完成した。図10にBNCの温度上昇を標準軸受と比較して示す。この斬新な発想から生まれた新軸受は、グリース潤滑において $d_m n$ 値80万を達成し、マシニングセンタの主軸用を皮切りに次々と採用された。

その後1985年には、セラミックボール (窒化ケイ素) を用いたハイブリッドセラミックアンギュラ玉軸受が開発され、 $d_m n$ 値100万を超える高速主軸が生まれた。BNCの誕生が、工作機械主軸用軸受の高速化の先鞭をつけたと言っても過言ではない。

その後、オイルエア潤滑やスピッシュット潤滑などの潤滑法の工夫もあって、工作機械主軸用軸受の高速限界はますます向上した。2000年には、当社独自の軸受動解析プログラムBRAINを駆使して超高速ロバス

ト玉軸受 (写真6) を設計・開発し、この軸受を用いたスピンドルでは、 $d_m n$ 値400万 ($n=40,000 \text{ min}^{-1}$) も実現している。超高速主軸用ロバスト軸受には、高速回転に適した軸受内部寸法とともに、内外輪に耐熱・耐摩耗特性に優れた特殊浸炭窒化材料 (SHX材) を採用している。この当社開発のSHX材は2005年 (平成17年度) の科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞 (開発部門) を受賞する栄誉に浴した。

2.6 国際共同開発ジェットエンジンの誕生とともに

1983年、米英日独伊の五カ国共同による150人乗り民間航空機用ジェットエンジンV2500の開発プロジェクトが発足した。

V2500エンジン (図11) の開発には、日本のエンジンメーカー3社が参加し、当社は、離陸時の推力の大部分を受けるファンを支持するNO.1軸受と、世界最高速レベルの高圧圧縮機を支持するNO.3軸受の開発を担当した。

これらの軸受には、従来の2倍以上の長寿命材が必要とされた。当社は、材料メーカーと共同で非金属介在物を極限まで減らした高纯净度のM50材の開発に成功し、この材料を使用したNO.1軸受は、フルスケールの寿命試験にてその有効性が実証され実用化された。

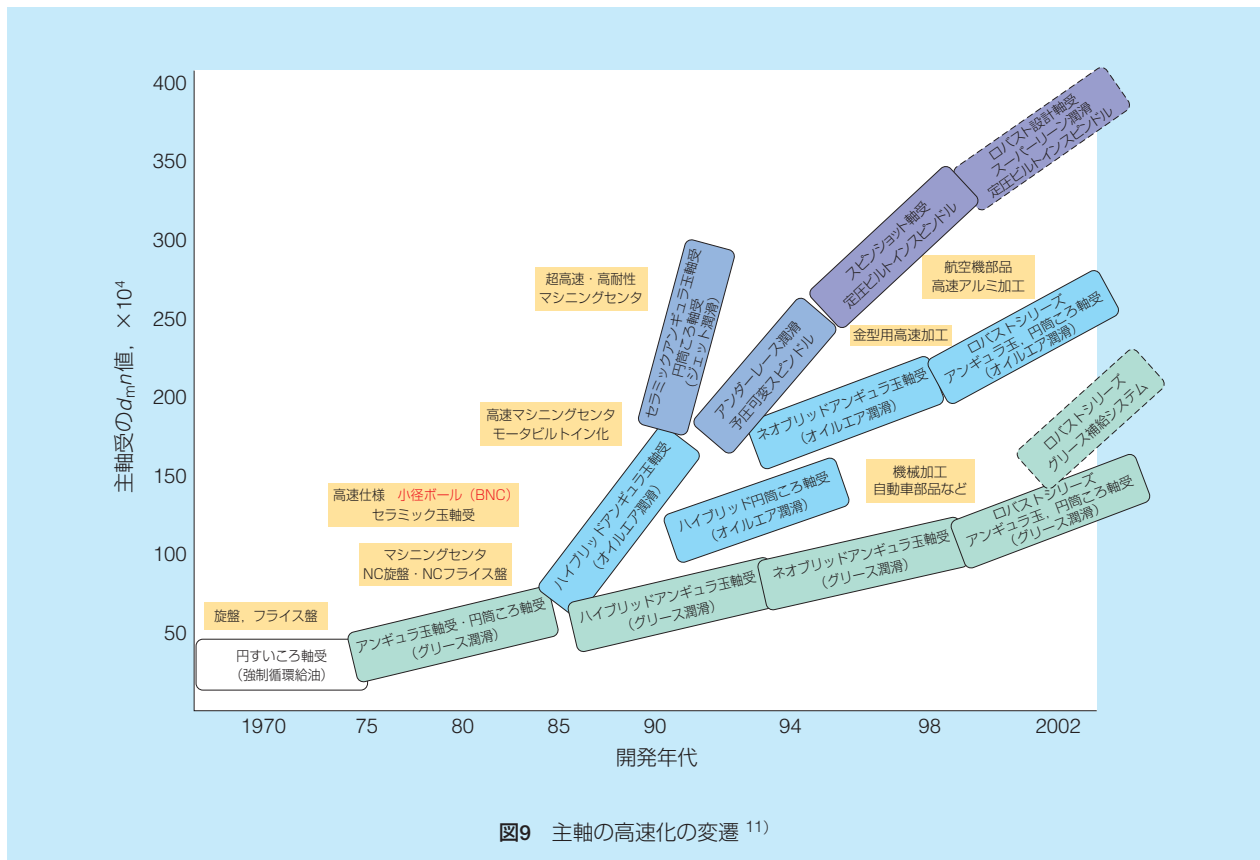


図9 主軸の高速化の変遷¹¹⁾

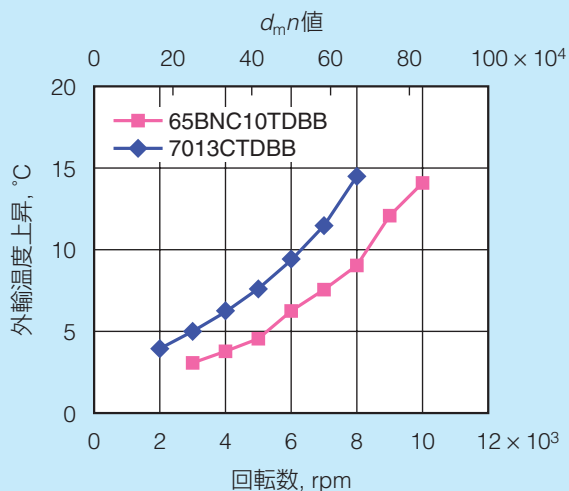
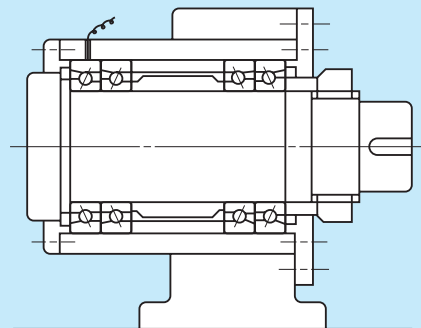


図10 BNCの回転数と温度上昇



一方で、給油遮断要求（給油を一定短時間遮断しても、再給油後は正常のまま機能を復帰できること）を満足する仕様の確立には困難を極めた。高精度で高価な軸受が一瞬のうちに焼付き、がれきの山を造っていった。しかしながら、その中で偶然にも焼付かない軸受が見出された。この軸受の徹底的な調査・分析を続けていくうちに、その表面に特殊な反応膜が形成されていることが突き止められた。そこで、この膜を人工的に生成し、軸受の表面改質膜として適用したところ、ついに給油遮断要求を満足することができた。

この膜は、給油遮断試験において焼付き防止に有効であるだけでなく軸受の温度上昇が小さいことから、低摩擦であることも分かった（図12）。

さらに、この表面改質膜は、自己再生能力があり表面が摩耗して膜が除去されてもすぐに再生されるという特筆すべき特徴を持っている。残念ながらNO. 3軸受は開発のみで量産には至らなかったが、この改質膜は、その後の純国産エンジンの主要で過酷な使用部位に必須の仕様として適用され、エンジンの信頼性向上に重要な役割と貢献を果たし続けている。

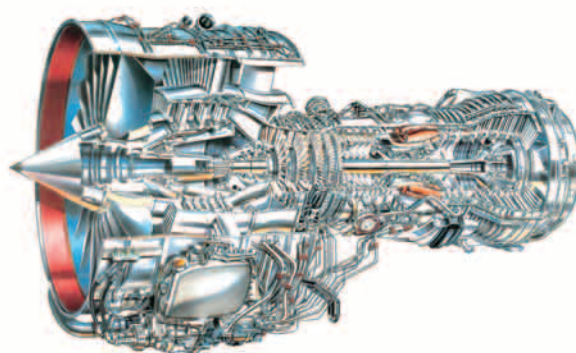
当社の軸受が組み込まれたV2500エンジンは、エアバスA320などに搭載され世界中のエアラインで使用されている。

3. 夢の無段変速機ハーフトロイダルCVT

1990年過ぎには、地球環境問題やエネルギー問題を背景にして、ハイブリッド車や無段変速機（CVT）など新しいパワートレインの実用化が進んだ。トラクション式のCVTは当社が開発に着手してから21年7ヶ月目に世界で初めて乗用車に搭載された。当社が



写真6 超高速口バスト玉軸受



提供：（財）日本航空機エンジン協会

図11 V2500ジェットエンジン

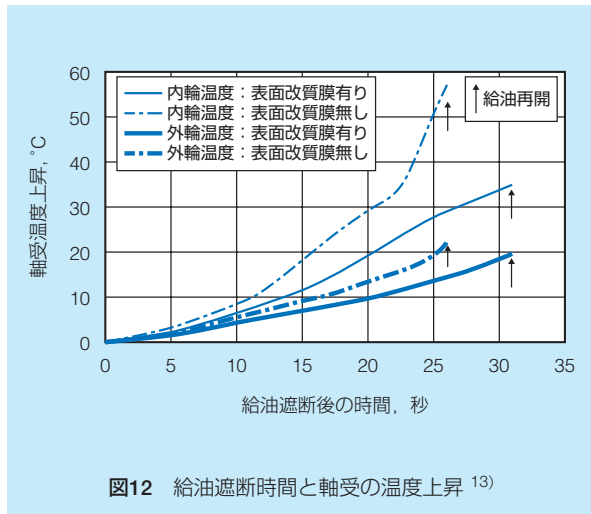


図12 給油遮断時間と軸受の温度上昇¹³⁾



図13 ハーフトロイダルCVTの構造

開発したCVTはトラクション式ハーフトロイダルCVTで、図13の構造である¹⁴⁾。入出力ディスク間に2つのパワーローラが配置され、ディスクとパワーローラ間はトラクションドライブにより動力を伝達する。パワーローラの傾き角度を変化させることで、連続した速度比を得ることができる。当社はCVTの開発着手にあたって、多くの形式の中からハーフトロイダル形式を選択した。動力伝達部の損失が小さいことに加え、転がり軸受に似た構成であるため当社のコア技術が活用できるとの見通しを立てたのがその理由である。

最大の課題はトラクション動力伝達部の転がり疲れ寿命の向上であった。最初のプロトタイプは約1 000 kmの試験走行で、はく離が発生した。自動車に搭載可能なサイズと伝達動力を実現するためにはトラクション動力伝達部に大きな押付け力を与えなければならない。このため、最大接触面圧は約4 GPa、周速度は約30 m/s、油膜厚さは約0.4 μmとなる。さらに、高温で周りの振動も大きく、油膜部は非常に厳しい条件となっている。軸受開発で培った超高清浄度鋼技術や熱処理技術を駆使してこの過酷な条件を克服し、転がり疲れ寿命の向上は達成された。

開発の過程では数十mmの肉厚を持つ高強度鋼のディスクやパワーローラが真っ二つに割れるというトラブルも起きた(写真7)。鋼材中の非金属介在物周りの応力集中による破壊であることを突き止め、応力解析による形状の最適化に加え、超高清浄度鋼技術を組み合わせてこの問題を解決した。また、村上敬宜教授(現九州大学副学長)による最新の疲労強度理論を駆使して、自動車用として必要な信頼性が確保されていることを証明した。

1999年、日産自動車より世界で初めてトラクション式ハーフトロイダルCVTを搭載した高級セダンが

発売された。この車はレスポンスの良い加速などの優れた動力性能を示しながら、その背反事項である燃費を従来のAT車に比べ10 %向上させ、環境にも貢献した。

この技術は内外から注目を受け、日本自動車技術会技術開発賞、日本機械学会賞、日本トライボロジ学会技術賞などを受賞した。2005年にはものづくり日本大賞優秀賞にも選ばれた。

4. ものづくりを支える直動製品

4.1 工作機械と直動製品

4.1.1 高精度化への対応

NC工作機械にボールねじが使用されたのは、1954年に米国のギディングルイス社がNCスキミング機に利用したのが始まりと言われている。

日本では、1960年ころからNC工作機械の開発が始まり、これらの動きに合わせて当社では、1960年に日本で初めて精密ボールねじを開発した。1961年に牧野フライスのK5形汎用立てフライス盤に、1963年には池貝鉄工のA20形汎用旋盤にNSKボールねじが採用され、精密ボールねじの量産が始まった。当時、国内では富士通信機製造(現ファナック)がオープンループ方式のNC装置を推進していた。この方式では特に、ボールねじの精度が重要であるため、当社は1968年に恒温工作室や超恒温検査室を設けたボールねじ専用工場を建設し、研削液温度管理技術と合わせて高精度ボールねじの生産体制を整えた。1971年にUUP級の精度等級と、ねじ全長にわたる累積リード誤差を保証する社内規格を制定し、1975年には、レーザ干渉計を用いた連続リード測定システムを開発し、リード精度世界一のボールねじ量産体制を確立した。



写真7 割れたディスク

当社のボールねじは各社のNC工作機械に採用され、日本の工作機械が世界一となっていく基盤技術の一つとなった。

4.1.2 送り系高速化への対応

工作機械の送り系の高速化は著しく進展してきた。図14にその変遷を示す。マシニングセンタの早送り速度は1970年代には十数 m/minであったものが、1980年代には30 m/min付近まで高速化し、現在、高速機はボールねじ駆動では50~60 m/minが主流となっている。

このような高速化の実現には、NC装置・主軸の高速化や工具の高性能化とともに、ボールねじや案内系の高速化対応による貢献が大きい。当社では、ボールねじの循環部の強度を上げるとともに、大リード化して多条ねじとすることによって高速化と負荷容量確保の両立を図った。1994年に高速工作機械用ボールねじHMCシリーズを発表し、高速マシニングセンタを中心に数多く採用され、JIMTOF2000では90 m/minの早送りを実現したマシニングセンタにも

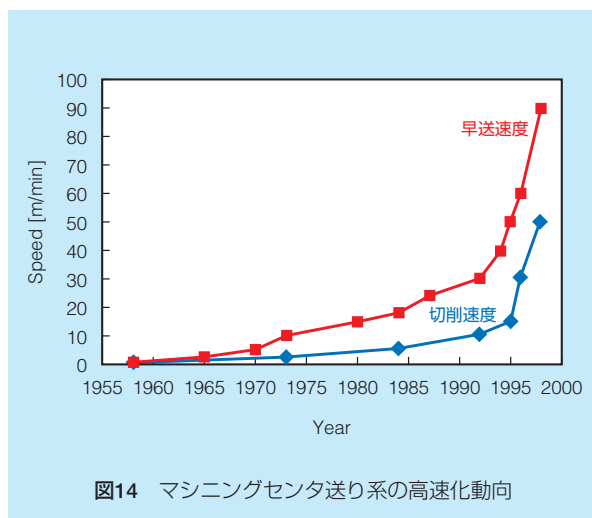


図14 マシニングセンタ送り系の高速化動向

採用された。ボールねじの高速化には、発熱や騒音・振動の増加という技術課題がある。発熱の問題に対しては、ねじ軸を中空として軸芯冷却する中空ボールねじを世界で初めてシリーズ化し、1982年に発表した。ボールねじの騒音については、多くの蓄積データを基に、騒音レベルの実験式の提案を行った。2003年には新しい循環方式を採用することで騒音レベルを6 dB以上低減した「高速静音ボールねじBSSシリーズ」を発表した¹⁵⁾(写真8)。

機械の高速化と高精度化要求が高まってくると、それまで主流であった滑り案内では精度の不安定さや発熱・摩耗の問題があるため、転がり案内が多く採用されるようになった。さまざまなタイプの転がり案内が試みられたが、現在のリニアガイドが本格的に実用化されたのは、1980年代に入ってからである。

当社では、長年にわたる転がり軸受とボールねじの製造技術を基盤として、長尺品の熱処理技術、大型の溝研削盤、各種測定器を開発して高度な生産・品質保証体制を確立し、1981年にNSKリニアガイドを発表した。1983年には工作機械用としてLYタイプをシリーズ化した。このタイプのリニアガイドは4溝がゴシック形状となっているので、高剛性であると同時に適度な摩擦を持ち減衰性に優れている。この特性により、当時の工作機械の要求に合致した転がり案内として、多くのNC工作機械に採用されることとなった。1990年代に入ると、高速化に伴う工作機械の高加減速化によって案内系への負荷が増大し、さらなる高精度化のために案内系の高剛性の要求が強くなってきた。これらに対応して1997年に、6溝を配置することでボールガイドでは最高レベルの剛性と負荷容量を達成したLAタイプをシリーズ化した。また、2003年にはローラガイドRAシリーズの販売を開始した¹⁶⁾(写真9)。RAシリーズは、FEM解析を用いた部材の高剛性設計を盛り込むことにより、コロの接触部ばかりではなくガイド全体の高剛性を達成している。

4.2 電機・半導体産業と直動製品

半導体の製造には数多くの工程があり、微細な位置決めを必要とする装置が多い。1970年代に米国で半導体産業が大きく発展し、その製造装置にはNC装置とボールねじの組み合わせによる高精度位置決めシステムが使われることとなった。当社の高精度ボールねじは、ここでもその真価を発揮し大きく貢献した。

1980年代になると、米国での技術が日本にも導入され、民生用半導体やメモリーの需要拡大とともに生産は急速に拡大した。当社では、世界で初めて超仕上げを施したボールねじを開発し、半導体製造の基幹装置であるステッパーに採用された。また、メ



写真8 高速静音ボールねじ

カトロ技術やロボットの発展により、ボールねじを使用した位置決め送り機構は、半導体製造工程のみならずその後工程や搬送装置などにも数多く使用されることとなった。当社では、設計の簡素化や部品の共通化に対応するため、世界に先駆けてボールねじの標準化を進め、1983年には標準Aシリーズを開発した。さらに、軸端を支持する軸受部をユニット化したサポートユニットの販売を開始した。カタログから、ボールねじとそれに適合するサポートユニットを選定することで送り機構の設計ができるようになった。

このような市場の用途拡大に対応すべくリニアガイドのシリーズの拡大を積極的に推進した。1984年にはミニアチュアLUシリーズが開発され、小型HDDの読み取り機構にも採用された。1988～1991年にかけて開発したLH/LSシリーズは、摩擦を小さくして調心性を持たせ、組立てやすく汎用性の高いリニアガイドとした。さらに、LH/LS予圧互換シリーズを開発してレールとベアリングのランダムマッチングが可能となった。リニアガイドの互換シリーズは当社が世界で初めて製品化したものであり、NSKリニアガイドはさらに使いやすいものとなった。

使いやすさやダウンサイジングの要求は、その後さらに強くなっていった。当社では、これらの要求に応えるため、機能融合製品の開発を進めてきた。1987年にボールねじとボールスプラインを融合したロボット、1990年にはボールねじとリニアガイドを融合したモノキャリア（写真10）を、世界で初めて開発した¹⁷⁾。ロボットは、ロボットや実装機に、モノキャリアは各種位置決め装置として、数多く使用されるようになってきた。



写真9 ローラガイド

半導体・液晶の製造設備ではクリーンな環境が要求される。半導体の微細化が進むにつれて、要求されるクリーン度はますます厳しくなっている。当社では、転がり製品のさまざまな用途に適した潤滑剤の開発を行ってきた。

1994年には、潤滑性能・防錆能力と低発塵を両立させたLG2グリースを開発した。

また、2001年には、真空環境での薄膜潤滑としてV-DFOを開発・製品化した。さらに市場ニーズに対応するため、2005年にはV-DFOより数倍以上の長寿命であるE-DFOを開発し、真空中での潤滑性を有しながら低発塵・低アウトガスを達成した。

これらの製品・技術は、クリーン環境や真空環境で使用される装置で用いられ、半導体製造の主要装置の性能向上と長寿命に貢献している。NSKの真空用DFO技術は、2005年の日本トライボロジー学会の技術賞を受賞した。

4.3 自動車製造設備、一般搬送、その他装置と直動製品

直動製品による駆動装置は、油空圧やベルト駆動装置に比較して高剛性・高精度であり、自動車製造設備や一般の搬送装置などにおいても採用が増加してきた。

これらの設備では、高速で長ストロークを移動するため、大リードのボールねじが使用される。当社では、大リードのナット溝研削技術を確立し、これを用いて1981年に、リード/軸径=1の大リードシリーズを、さらに1993年と1995年に、それぞれリード/軸径=2と3の超大リードシリーズを開発した。また、軸が長くなるとナットを回転させたほうが制御が容

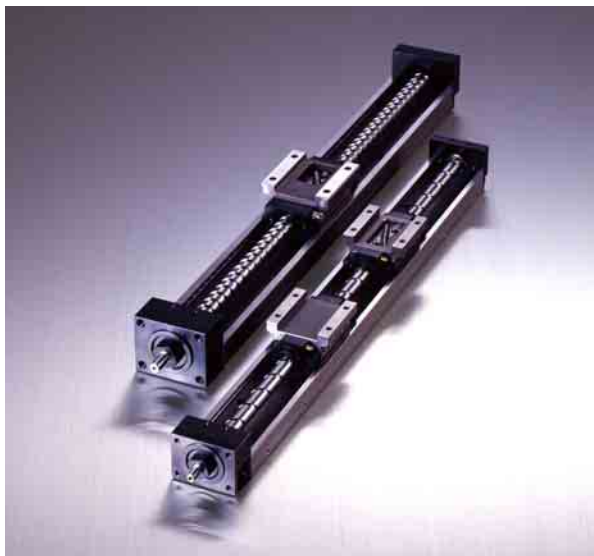


写真10 モノキャリア

易となることから、1992年にナット回転ボールねじをシリーズ化した。さらに、軸が長くなると危険速度が低下し高速回転が出来ない問題に対応するため、1994年に世界で初めてダンパ付きのナット回転ボールねじを開発し、危険速度の2倍以上の回転を可能にした。

これらの設備では、連続稼動のためにメンテナンスフリーが求められる。当社ではこれらの要求に応えるため、1996年に世界で初めて自己潤滑ユニットNSK K1付きリニアガイドを開発し、1997年にはボールねじも加えてMFシリーズを製品化した。自己潤滑ユニットNSK K1は、重量比70%の潤滑油を含む合成樹脂で形成されており、転がり面に接触して潤滑油を継続的に供給し、5年間10,000 kmの走行距離を可能にする。MFシリーズは、メンテナンスフリー化のためだけでなく、潤滑剤を大幅に削減し外部環境の汚染を少なくする環境対応型製品としても数多く使われるようになっている。

5. 安全・快適な運転を実現するステアリング

ステアリングは自動車の運動制御を行う機能部品であり、自動車の重要保安部品として重要な位置を占めている。自動車の進行方向を決めるという基本的な役目は不変であるが、その歴史は自動車用軸受と同様に自動車の変遷に伴う機能革新の連続であり、自動車の安全性や快適性の向上に寄与してきた。

5.1 ステアリングコラム

リジットタイプと呼ばれ回転を伝達する役目を持ったステアリングコラムに、安全性という新たな機能が求められるようになったのは、米国で安全基準

が制定されたことがきっかけであった。1967年にアメリカ連邦自動車安全基準（FMVSS）が発布され、衝突時にステアリングから人体に作用する力の上限が設定された。

当社は、その1年前の1966年にエネルギー吸収コラムの開発に着手し、当時の日本に多い小型車への装着を目指していた。当時の通産省の鋳工業試験所研究補助を受けた開発研究でもあった。従来はコラムの塑性変形でエネルギーを吸収していたが、当社は、塑性変形と滑り摩擦の2つの機構を備えた従来にない構造のコラムの開発を進めた。その結果、衝突時には内側のテーパ状のコラムが外側のコラムを押し広げることでエネルギーを吸収する機構を持つ、画期的な衝突エネルギー吸収コラムを開発した（図15）。板厚、形状、潤滑剤などに関しては、解析・実験・分析などを繰り返し、実用的な仕様を導いた。

衝突時に作用する力は安全基準上限の60～70%になり、開発したエネルギー吸収コラムは安全性を十分に満足した。さらに、乗用車搭載時の効果を確認するため、ダミーを用いた衝突試験や自動車メカによる実車衝突試験が行われた。防錆性、耐振動、耐久性などの環境評価を経て、1968年に日本で初めて、エネルギー吸収の機能を持つコラムの量産化に成功した。

コラムには衝突安全性を具備すべきとの基本思想は、その後も現在まで引き継がれている。

1970年代に入ると、運転操作性向上のためにコラム位置の調整機能が求められ、この機能は1980年代の高級化志向の下で広まっていった。コラムにはチルトテレスコ機能と呼ばれるコラム位置を変える機構が付加された。

その一例として、ギヤ式のチルトコラムが開発された。このコラムには、固定ギヤと可動ギヤが取り付けられており、ギヤのかみ合わせでコラムの位置を変えることができる。モジュールの小さい歯を活用し、チルトポジションがきめ細かく調整できる特徴を有している。

エアバッグが1987年ころから搭載されるようになると、エアバックの反力に耐えるようにコラムに高剛性が求められるようになった。これはコラムの振動特性の向上にも共通する課題であり、これをきっかけとして、コラムの肉厚などの寸法や形状の最適化を追求していくことになった。

5.2 ステアリングジョイント・中間シャフト

前述のステアリングへの衝突安全機能の付与にもまして、ステアリング全体の構成を大きく変えた出来事は中間シャフトの出現である。

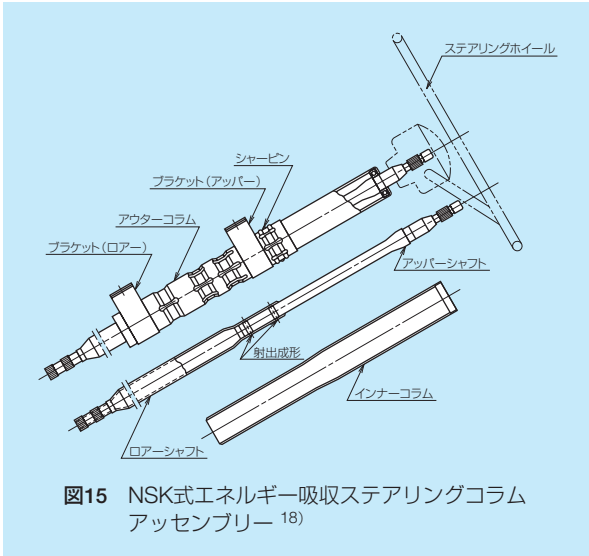


図15 NSK式エネルギー吸収ステアリングコラムアッセンブリー¹⁸⁾

自動車は1973年のオイルショックを契機に省エネルギー志向となり、省エネルギーにも有利な前輪駆動車が着目された。前輪駆動化されると、運転席の足元近くにステアリングギヤ部が組み込まれるので、これまでのようなステアリング構成ではステアリングギヤ部にコラムを接続できなくなった。そこで、コラムとギヤ部を接続するために中間シャフトが必要となり、中間シャフトの両側をコラムおよびギヤ部と接続するためのジョイント部品も必要となった。

当社は1973年、ジョイント部品であるプレスヨークジョイント(写真11)を、日本で初めて鋼板のプレス加工により量産化した。

その後、ノイズ・振動吸収機構が設けられるなどの改善が行われたが、プレスヨーク形式は、現在もジョイントの基本構造となっている。

中間シャフトでは、ハンドルに伝わる振動防止や位置決め用の微調整機能が求められ、低スライド力と高耐久性を両立させる必要があった。

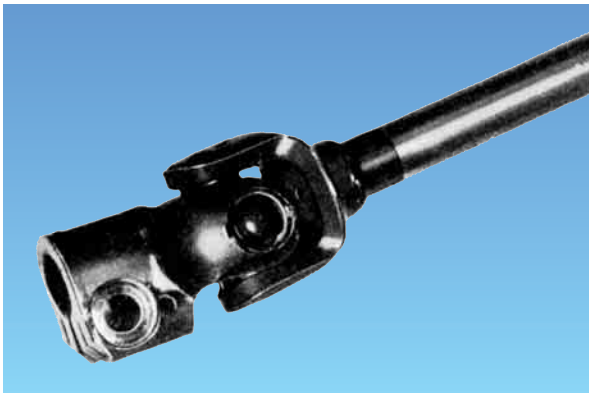


写真11 プレスヨークジョイント

当社は、トライボロジー技術を活用して「滑り部品」と「転がり部品」を組み合わせた画期的な機構を持つボールローラスライダを開発した(図16)。スライドする際には、ボールが転走することで、スムーズなスライドを行い、トルクが負荷された際には、ピンが接触することで確実にトルクを伝達する構造である。実車ででの評価で、操作性に飛躍的な向上が認められ、高級車に実用化されている。

5.3 電動パワーステアリング (EPS)

これまでコラムやステアリングの部分的な変遷を見てきたが、システム全体が大きく変化するステアリングのイノベーションは1980年代に始まった。油圧パワーステアリング(HPS)に代わる電動パワーステアリング(EPS)の誕生がそれである。HPSは、1968年には米国の乗用車の8割弱に搭載されており、日本でも運転者の疲労軽減や高速時の安全性から普及する傾向にあった。パワーステアリングでも、安全性、操作性に加えて、時代とともに省エネルギーの要求が強まっていった。電動方式は、油圧方式に比べてエネルギーロスが激減することから、当社はモータを使ったEPSに着目し、1980年代に開発に着手した。

EPSの実用化のためには、安全で高出力のモータ、出力を効率よくステアリング系に伝達する減速歯車機構、ステアリングの操舵トルクを検出するトルクセンサ、操舵力と車両走行情報によりモータ出力を制御するコントローラ(ECU)などの基盤要素の開発という乗り越えるべき課題が山積していた。

その一つである減速歯車機構の開発では、ヘリカルギヤ・ウォームギヤ方式がモータトルクを効率よく伝達し、耐久性があることを見出した。ギヤ樹脂材料や潤滑機構の開発に加えて、ギヤ部の打音防止が重要課題であったが、衝突音を低減できるダンピ



図16 ボールローラスライダ¹⁹⁾



写真12 高出力コラムタイプEPS

ング機構を見出し騒音低減に成功した。この開発過程では、転がり軸受の数値解析技術や静音化技術が活用された。

EPSの開発では、ステアリングのロック、セルフステアリング、ステアリングの逆転などハンドル制御に致命的な欠陥が発生することが最も懸念された。このため安定した品質を目指し、多極化および高磁束密度化を図った対ロック仕様のモータやフェイルセーフ機能を新規に盛り込んだモータコントローラ（ECU）などの採用により信頼性を向上させた。また、円滑な操舵のため、モータのコギングトルクやトルクリップルの低減などを図った。

当時、軽自動車はエンジンパワーが小さく、エンジンルームのスペースも限られていたことからHPSを搭載する余裕が無かった。一方、快適な操舵性への要求が高まり、軽自動車では動力補助のパワーステアリングが必要とされていた。当社が開発したラック出力約3 000 NのEPSは、軽自動車に適した出力であり、ニーズに合致していた。1988年この開発品は、世界で初めて軽自動車用ピニオンタイプEPSとしての量産化に結び付いた。

こうした実績を積み重ねる過程において、EPSは従来のHPSに比べて約1/6の省エネルギーであり、自動車の燃費が3~5 %向上する効果が得られるという利点も明確になってきた。

燃費向上やクリーン化の要求がますます高まる中で、排出量の大きい車両へもEPSの搭載が求められた。当社はEPSの高出力化を進め、小型車~中型車への拡大を目指した。2004年にはラック出力8 500 NのブラシレスモータコラムタイプEPSを量産化し、2005年には量産品でラック出力9 000 Nを達成し2リッタークラスまで実用化した。

さらなる高出力化達成には、大出力のモータおよび無駄なく出力を伝達し大出力に耐える強度を持つ機構部品が必要であった。当社は、小型・軽量であ

りながら1.3倍もの高出力のブラシレスモータを実現し、材料メーカーとの高強度樹脂材開発とギヤ歯型形状の最適化により2005年に世界最大出力のコラムタイプEPSを開発した（写真12）。

2006年には世界で初めてラック出力10 000 N以上のコラムタイプEPSを量産化して3リッタークラスまで可能性を広げた。

このような発展も今振り返ると、1980年代の軽自動車用EPSの開発が起点であった。

6. あとがき

軸受や機械部品などの当社製品とそれにかかわる技術の変遷を回顧し、その時々刻まれた技術の歴史の一端を紹介した。振り返ってみて、現在の保有技術が、多くの先輩諸氏の努力と情熱によって産み出され、培われ、そして連綿と引き継がれてきたものであることに改めて気付かされる。

今後も、これらの貴重な財産の伝承を絶やさず、さらに新たな技術の歴史を加えながら、社会に貢献し続けていきたい。また、これからのNEXT 10へ向けて、さらに、それに続く未来を切り開いていくために一層の技術開発に取り組んでいきたい。

文 献

- 1) 日本精工五十年史(1967)
- 2) 古村恭三ほか、転がり軸受の疲労解析(第一報)、NSK BEARING JOURNAL, No.643 (1982)
- 3) 大熊健夫、"トランスミッション用密封クリーン玉軸受", NSK BEARING JOURNAL, No.641 (1981)
- 4) 坂本潤是、"ハブユニット軸受の動向と最新技術", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.677 (2004)
- 5) 製品紹介"ホイール軸受ユニット用ハイ・インテグラルシール", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.647 (1987)
- 6) 村上保夫、松本洋一、古村恭三郎、"こみ入り環境下での長寿命TF軸受", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.650 (1989)
- 7) 内田権一、"圧延機ロールネック用四列円すいころ軸受の密封クリーン化", NSK BEARING JOURNAL, No.639 (1980)
- 8) 相澤知之、赤上和夫、田中貞雄、"NSKエクストラキャパシティー密封ロールネック用軸受"の開発", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.669 (2000)
- 9) 鈴木寿雄、"最近の鉄道車両用軸受の動向", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.661 (1996)
- 10) 野田万栄、"低騒音・低振動化に貢献する商品・技術", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.672 (2001)
- 11) 西端伸司、"工作機械の動向と軸受技術", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.676 (2003)
- 12) 小野瀬喜章、"工作機械主軸の高速化に対応した軸受と潤滑", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.646 (1986)
- 13) 伊集院誠司、正田義雄、"表面化学改質による高速回転玉軸受の給油停止時における耐焼付き性向上", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.657 (1994)
- 14) 町田尚、村上保夫、"トラクションドライブ式無段変速機パワートロスユニットの開発第1報", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.669 (2000)
- 15) 加藤将人、"高速静音ボールねじの開発", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.676 (2003)
- 16) 商品紹介、"NSKローラガイドRAシリーズ", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.676 (2003)
- 17) 製品紹介、"モノキャリア", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.653 (1992)
- 18) 大越秀雄、岡本健次郎、"NSK式エネルギー吸収ステアリングについて", NSK BEARING JOURNAL, No.623 (1969)
- 19) 山田康久、山田貴次、"ステアリングコラム/ジョイントの動向と最新技術", NSK TECHNICAL JOURNAL, No.677 (2004)

論文

NSKでは、100周年を迎える2016年までの次の10年間を「NEXT 10」と位置付け、若手技術者がこの「NEXT 10」に向けた様々な革新的研究テーマに取り組んでいます。90周年特集号として、これらの未来に向けた研究の中から5件を紹介します。

炭素鋼の繰返し応力ひずみ特性および疲労挙動に及ぼす水素チャージの影響

総合研究開発センターの宇山所員が、九州大学大学院に留学中に、鋼の疲労メカニズムにおける水素の基本的な役割を解明しようと試みた研究の成果をまとめたものです。本研究により、水素は繰返し応力下での微視的な塑性変形に関係していることを示唆するデータが得られ、今後の水素利用技術の発展のための貴重な知見が得られました。

単一細胞を対象とした細胞内部構成物質のオンチップ抽出

メカトロ技術開発センターの池田部員が、東京工業大学 初澤教授、柳田助教授のご指導を仰ぎながら、共同研究として行ったものです。この研究は、バイオテクノロジー分野での検査・分析方法として、細胞の増殖を何日も待つ必要がない単一細胞解析の実現を目指したもので、ここでは、その初期プロセスの確立に取り組みました。このために作製した実用的なマイクロ流体チップ上で、細胞を狙った場所へ捕獲し狙ったタイミングで破碎できることが確認され、単一細胞解析の実現に繋がる結果を得ることが出来ました。

圧電 MEMS デバイスの超精密研削加工精度向上への機械設計的アプローチ

生産技術センターの新井部員が、英国 Cranfield Universityに留学中にまとめたものです。同大学において、MEMS (Micro-electro Mechanical Systems) デバイスを航空分野に実用化するプロジェクトに携り、主にデバイスの超精密研削における仕上げ精度向上のための技術開発を担当しました。本研究では、仕上げ精度向上のためには、加工時の材料除去点周りのループ剛性だけでなく、工具とワークの接触状態を含めてコントロールすることが重要であることを明らかにしました。本研究は、Mackeown Prize for the Best Thesis in Precision Engineering 2005 を受賞しました。

真空環境対応位置決めテーブル用差動排気シールに関する基礎研究

システム製品事業本部の中村部員が、半導体の微細化にともなって必要となる真空環境用の超精密位置決め装置において、nmオーダの精度達成のためのキーポイントになるとされる静圧案内内部のシール手法について検討したものです。直線運動形のシールを採用した位置決めテーブルの試作を行い、このシールが高いシール性能を有することを確認しました。静圧案内位置決めテーブルの開発内容の発表により、国際会議 LEM21において、The Outstanding Young Researcher Award を受賞しました。

転がり疲れ寿命に影響する新因子の研究

総合研究開発センターの藤田所員が、深溝玉軸受を用いて転がり疲れ寿命に支配的な因子を検討した結果をまとめたものです。従来の「面圧」と「応力繰返し数」の他に、「滑り」という因子も重要な場合があり、PV値(面圧と滑り速度の積)がある値以上になると、PV値の最大位置でフレーキング(はく離)が起こるといふ新しい知見が得られました。このフレーキングは、白色組織を起点としており、従来の法則に当てはまらないこともわかりました。

炭素鋼の繰返し応力-ひずみ特性および疲労挙動に及ぼす水素チャージの影響

宇山 英幸*, 峯 洋二**, 村上 敬宜**, 中島 優***, 森重 利紀***

Effects of Hydrogen Charge on Cyclic Stress-Strain Properties and Fatigue Behaviour of Carbon Steels

H. Uyama, Y. Mine, Yu. Murakami, M. Nakashima and K. Morishige

Effects of hydrogen charge on fatigue behaviour of two carbon steels, JIS-S10C (SAE1010) and JIS-S45C (SAE1045) were investigated. There was no hydrogen effect in the cyclic stress-strain hysteresis loops of S10C hydrogen-charged with 0.2 ppm. On the other hand, the strain amplitude was decreased in S45C hydrogen-charged with 0.8 ppm. The delayed yielding and the decrease in the saturated value of the strain amplitude were observed in the hydrogen-charged specimen (H: 0.5 ppm) of S45C under the constant stress amplitude tests. It is supposed that the degree of influence of hydrogen on cyclic stress-strain properties depends material structure and/or hydrogen content. The effect of hydrogen charge (H: 0.5 ppm) on the fatigue life, the fatigue limit and the crack growth curves of S45C were not remarkable, while there was a distinct difference in the morphology of the slip bands between the hydrogen-charged and uncharged specimens. The localized slip bands were observed in the hydrogen-charged specimen of S45C. Therefore, it is presumed that the decrease in the strain amplitude in hysteresis loop by hydrogen charge is caused by the localization of slip bands. More crack initiations from ferrite grains were observed in the hydrogen-charged specimen (H: 0.5 ppm) of S45C. This phenomenon also corresponds to the localization and the formation of slip bands.

Key words: hydrogen, slip band, localization, fatigue crack, hysteresis loop, ferrite, pearlite, carbon steel

社団法人日本材料学会の転載承認を得て、日本材料学会誌 Vol. 54, No. 12 (Dec. 2005) から転載

1. 緒言

高強度鋼においては、繰返し数 $N > 10^7$ でも疲労限度を示さず、材料内部の介在物を起点として疲労破壊を起こすことが知られている。村上らは、高強度鋼の超長寿命疲労破壊において、破壊の起点となった介在物の周囲に Optically Dark Area (ODA) が存在し、ODAの形成機構では、介在物によってトラップされた水素が重要な役割を果たしていることを指摘している^{1)~6)}。したがって、ODAの形成機構を特定するためには、微視的な疲労挙動に及ぼす水素の影響を明らかにすることが重要である。一方、近年、燃料電池 (Fuel Cell) システムなどの水素利用技術の開発が精力的に進められている。これらのシステムでは、水素雰囲気下で使用される金属部品も多いため、水素の影響による材料の強度低下を考慮した安全性と信頼性の評価が求められている。静的応力下において、鋼の機械的性質に及ぼす水素の影響やそのメカニズムに関する研究は多数報告されており^{7)~13)}、繰返し応力下の疲労挙動についても、水素によるき裂進展の下限界値の低下¹⁴⁾、き裂進展速

度の増加¹⁵⁾および疲労寿命の低下¹⁶⁾などが報告されている。しかしながら、疲労き裂の発生および進展において重要な役割を果たす繰返し応力下での微視的な塑性変形挙動の変化に注目した研究は数少ない¹⁷⁾。また、水素によって転位の運動が変化する直接的な観察結果も報告されている⁹⁾が、転位の運動に対して水素が影響することがわかっても、それが疲労き裂の発生と進展にどのように関わっているかは、必ずしも明らかにはならない。本研究は、水素チャージした炭素鋼を用いて、繰返し応力下での塑性変形挙動における水素の基本的な役割について調査したものであり、特に、転位よりも、もう一つ階層が上のすべり系全体の挙動に注目して、水素が疲労き裂の発生と進展に影響をもたらすとしたら、どのような形態に注目すべきかを調べたものである。

2. 実験方法

本研究に用いた供試材は、S10Cおよび2種類のS45Cであり、それぞれ1173 Kおよび1117 Kで焼鈍した後、試験片に加工した。表1に化学成分を示す。S45Cは2種類使用しているが、一方は引張圧縮試験

* 九州大学大学院 (現在 日本精工株式会社)

** 九州大学大学院工学研究院機械科学部門

*** 九州大学大学院

用, もう一方は, 小野式回転曲げ試験用に使い分けられている。S10CおよびS45Cは共に, 長手方向に, 丸棒材の圧延時に形成されたと思われる層状組織が残っており, フェライトとパーライトからなる縞状組織を呈している。また, 焼鈍後のS10C, 引張圧縮試験に用いたS45C, および回転曲げ試験に用いたS45Cのヴィッカーズ硬さは, 荷重2.94 N, 10点平均で, それぞれHV105, HV170およびHV185であった。また10点測定した硬さのばらつきは, それぞれ±4%, ±6%および±5%であった。

図1に試験片形状を示す。図1(a)は引張圧縮試験用の平滑試験片, (b)は引張圧縮試験用の浅い円周切欠き試験片(切欠き半径R5, 切欠き深さ0.2 mm), そして(c)は, 小野式回転曲げ試験用の浅い部分切欠き試験片(切欠き半径R5, 切欠き深さ0.3 mm)である。(b)および(c)の切欠きは, すべり帯の発生やき裂発生起点を制限して, 観察を容易にすることを目的として導入した。

疲労試験は室温, 大気中で, 応力比 $R = -1$ の引張圧縮試験と回転曲げ疲労試験により行った。繰返し応力-ひずみ特性を調べるため, 図1(a)の引張圧縮試験用の平滑試験片を用いて, 繰返し速度 $f = 1$ Hz の応力制御試験を行い, クリップゲージを用いてヒステリシスループを取得した。また, 上記の応力-ひずみ特性に対応させるため, 比較的高い応力の領域において, 図1(a)の引張圧縮試験用の平滑試験片を用いて, 繰返し速度 $f = 20$ Hz でS-Nデータを取得した。さらに図1(b)の浅い円周切欠き試験片を用いて, すべり帯の形成過程ならびにき裂の発生・伝ば挙動をレプリカ法により観察した。

また, 疲労限度付近での疲労挙動に及ぼす水素の影響を調べるため, 図1(c)の小野式回転曲げ試験用の浅い部分切欠き試験片を用いて, 繰返し速度 $f = 45$ Hzで, 疲労限度付近の応力領域における寿命試験を行い, すべり帯の形成過程ならびにき裂の発生挙動をレプリカ法により観察した。

水素チャージは20 mass %チオシアン酸アンモニウム水溶液に, 約310 Kで1日間浸漬して行った。水素含有量の測定は, 四重極質量分析方式の昇温脱離分析装置(TDS)を用いた。また, 水素含有量の測定には, 直径が疲労試験片の試験部と同じ8 mmで, 長さ約60 mmの丸棒試料を別に準備し, これに疲労試験片と同様の条件で水素チャージした後, 厚さ0.8 mmに切り出した試料を用いて行った。

表2に予疲労と水素チャージの組み合わせによる, S10CおよびS45Cにおける水素含有量の変化をまとめて示す。測定は水素チャージ後2時間以内に測定したものである。また, 水素チャージによって鋼中に

Table 1 Chemical compositions of materials (mass %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni+Cr	Fe
S10C	0.13	0.22	0.39	0.013	0.022	0.09	0.10	Bal.
S45C-1*	0.47	0.19	0.70	0.012	0.024	-	0.12	Bal.
S45C-2**	0.45	0.25	0.79	0.010	0.010	0.09	0.21	Bal.

*S45C-1 is used for tension-compression tests.

**S45C-2 is used for rotating bending tests.

Table 2 Hydrogen contents (mass ppm)

Material	Uncharged	Hydrogen-charged	Prefatigued + Hydrogen-charged
S10C	0.02	0.18	0.24
S45C-1	0.05	0.52	0.84

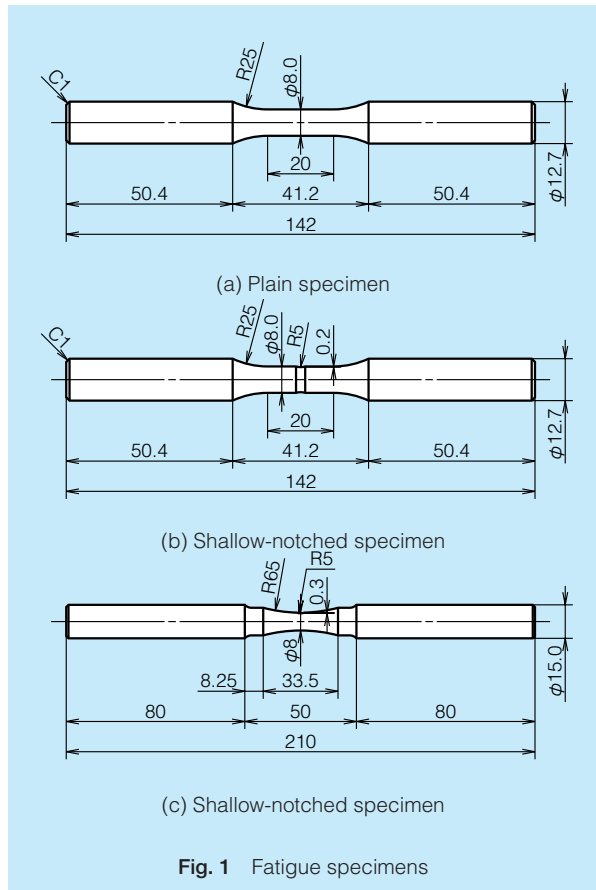


Fig. 1 Fatigue specimens

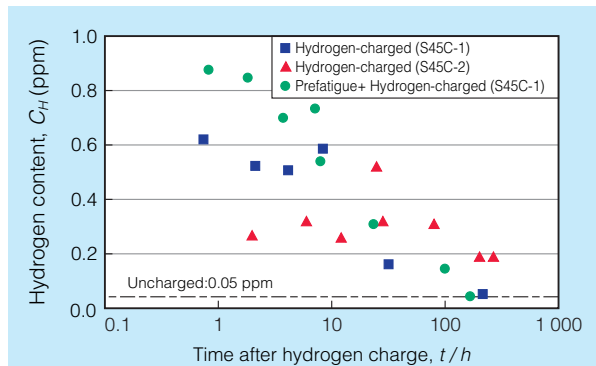


Fig. 2 Variations of hydrogen contents after hydrogen-charge of S45C

侵入した水素は、時間の経過に伴い、試験片の外に拡散するため、試験開始時と試験終了時では鋼中の水素含有量は異なる。図2に水素チャージ終了後の経過時間と鋼中の水素含有量の関係を示す。

水素チャージした試験片を疲労試験に供する際には、水素チャージによって生じた生成物や腐食ピットを取り除くため、表面を再研磨した後、試験を開始した。水素チャージ終了後から疲労試験を開始するまでの時間は、2~4 hとした。

3. 実験結果および考察

3.1 繰返し応力-ひずみ特性に及ぼす水素の影響

図3にS10CおよびS45Cにおける水素チャージ材および未チャージ材の応力-ひずみヒステリシスループを示す。ここで、ひずみ値を安定させるため、ヒステリシスループ計測前に、S10CおよびS45Cでそれぞれ、応力振幅260 MPaと300 MPaで $R = -1$, $f = 1$ Hz, $N = 300$ の予疲労を与えた。水素チャージ材は、予疲労を与えた後、水素チャージを行った。未チャージ材は、予疲労の後、ひずみ時効の影響を考慮して、水素チャージ時間と同じ時間（1日間）室温に放置してから測定を開始した。図3(a)に示すS10Cにおいては、水素チャージ材と未チャージ材のヒステリシスループに明確な相違が認められないのに対して、図3(b)に示すS45Cにおいては、いずれの応力振幅においても、水素チャージ材のほうが未チャージ材に比べて、一定応力振幅に対するひずみ振幅が小さくなった。

次に、図4は、繰返し応力下での塑性変形開始時の挙動を調べるために、予疲労なしで水素チャージを行った場合の一定応力振幅試験における全ひずみ幅の変化を示したものである。応力振幅値は、静的降伏応力よりやや低い値で行っている。S10Cの未チャージ材では、試験開始直後は全ひずみ幅が0.002程度であるが、百数十回の繰返し応力で全ひずみ幅は加速的に増大し、極大に達した後、徐々に減少して試験終了時の繰返し数 $N = 1500$ では0.0037程度になる。この未チャージ材の全ひずみ幅の急激な増加は、いわゆる微小な繰返し変形がきっかけになった降伏現象に対応したものと考えられる。すなわち、すべりが発生しやすい結晶方位をもった結晶粒で塑性変形を開始し、それが徐々に試験片全体に広がることで、全ひずみ幅が加速的に増大したものと考えられる。一方、水素チャージ材では、全ひずみ幅の増加がやや遅れて開始し、その後、全ひずみ幅は徐々に増加しており、 $N = 1200$ 程度で、未チャージ材の全ひずみ幅と同等になっている。

S45Cについては、未チャージ材ではS10Cの場合と同様に、全ひずみ幅は急激に増加し、降伏現象に起因すると思われる挙動を示す。一方、水素チャージ材の全ひずみ幅も、S10Cの場合と同様に徐々に増加する挙動を示すが、その飽和値は、S10Cの場合と異なり、未チャージ材の飽和値よりも小さな値となる。

図3および図4に示したように、S10CとS45Cとでは、水素チャージの影響が異なる。表2より、S45Cの水素チャージ後における水素含有量は、S10Cのそれよりも大きい。これは、S45Cは、S10Cよりも、水素のトラップサイトとなるパーライト組織を多く含むためであると考えられる。これらの結果から、材料の金属組織あるいは水素含有量によって、繰返し応力-ひずみ特性に及ぼす水素チャージの影響が異なることが考えられる。

3.2 疲労寿命に及ぼす水素の影響

図5に、S45Cにおける予疲労なしの水素チャージ材、未チャージ材、および水素チャージ後大気中で約270 h放置して拡散性水素を放出させた時効材の

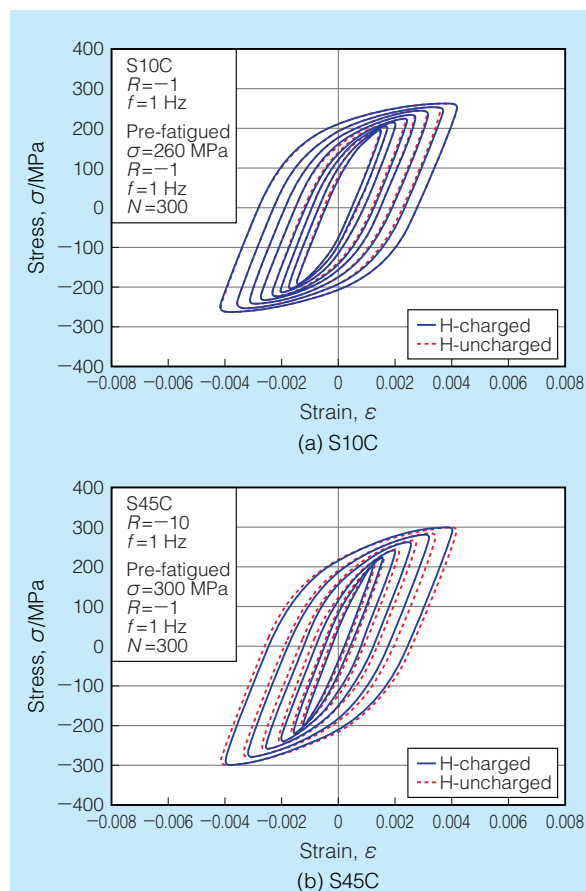


Fig. 3 Cyclic hysteresis loops of the hydrogen-charged and uncharged specimens of (a) S10C and (b) S45C

S-Nデータを示す。図5には、引張圧縮疲労試験で行った平滑試験片および浅い円周切欠き試験片の結果と、回転曲げ疲労試験で行った浅い部分切欠き試験片の結果を併せて示している。引張圧縮疲労試験と回転曲げ疲労試験を比較すると、応力こう配による^{18), 19)}と考えられる疲労寿命の違いが生じているが、それぞれの試験においては、未チャージ材、水素チャージ材、および時効材で疲労寿命および疲労限度に明らかな違いは見られない。

3.3 引張圧縮試験における微視的疲労挙動に及ぼす水素の影響

次に、微視的な疲労挙動への水素の影響を検討するため、引張圧縮疲労試験用の浅い円周切欠き試験片を用いて、すべり帯の発生形態とき裂の発生および伝ば挙動の関係を調べた。図6に、予疲労なしのS45Cの未チャージ材および水素チャージ材におけるき裂進展曲線を示す。応力振幅は229 MPaである。疲労寿命は未チャージ材および水素チャージ材でそれぞれ $N_f = 2.38 \times 10^5$ と $N_f = 3.15 \times 10^5$ であり、多少のばらつきがあるため、横軸は、疲労寿命に対する

繰返し数の比 N/N_f で表している。未チャージ材と水素チャージ材のき裂進展曲線は、よく似た挙動を示しており、巨視的なき裂伝ば挙動に明らかな違いは見られなかった。

図7はS45Cにおける予疲労なしの未チャージ材および水素チャージ材におけるすべり帯とき裂の発生・伝ば過程を示した光学顕微鏡写真である。応力振幅 $\sigma = 230$ MPaのときの結果で、疲労寿命は、未チャージ材および水素チャージ材でそれぞれ $N_f = 2.53 \times 10^5$ と $N_f = 2.16 \times 10^5$ であり、大きな差はないが、すべり帯の形態には明確な相違が観察された。未チャージ材ではすべり帯が結晶粒程度の単位で密に発生しており、広く分布している。一方、水素チャージ材では、局所的に、比較的疎に形成されている。

次に、これらのすべり帯の発生形態と、上述のひずみ振幅の挙動(図3および図4)との関係について考察する。未チャージ材では、すべり易い結晶方位を有する結晶から塑性変形を開始し、結晶粒単位ですべり帯が次々に伝ばすることで、降伏挙動に対応する加速的なひずみ振幅の増加をもたらすと考えられる。一方、水素チャージ材では、すべり帯の局在化が生じているため、試験片全体で見たとき、すべり変形を起こしている部位が少なくなる。よって、水素チャージ材では、すべり帯に対応するひずみ量の合計が、未チャージ材のひずみ量の合計より小さくなると考えられる。したがって、水素チャージによるヒステリシスループのひずみ振幅の減少は、炭素や窒素を固溶した鉄などで発現する転位の固着機

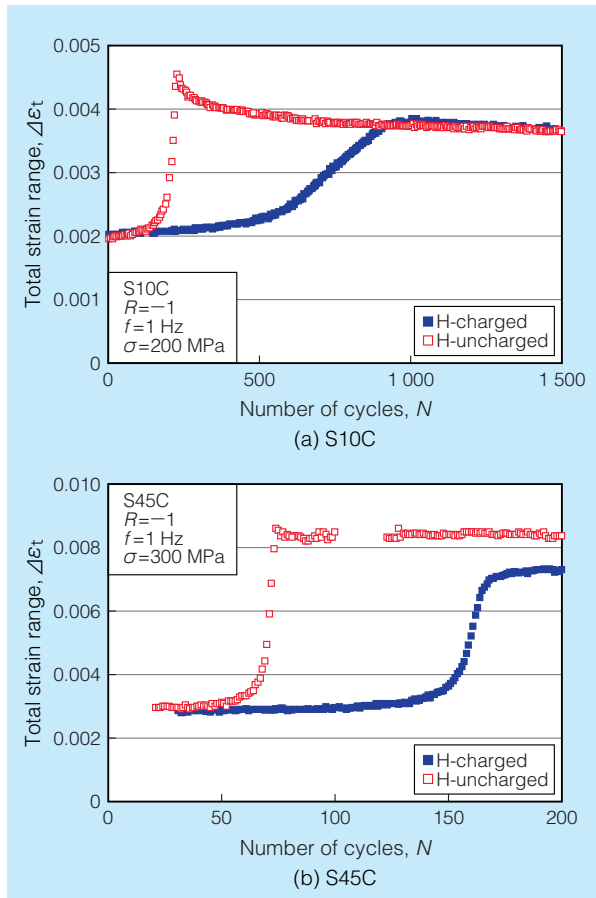


Fig. 4 Total strain range responses of the hydrogen-charged and uncharged specimens of (a) S10C and (b) S45C for constant stress amplitude tests

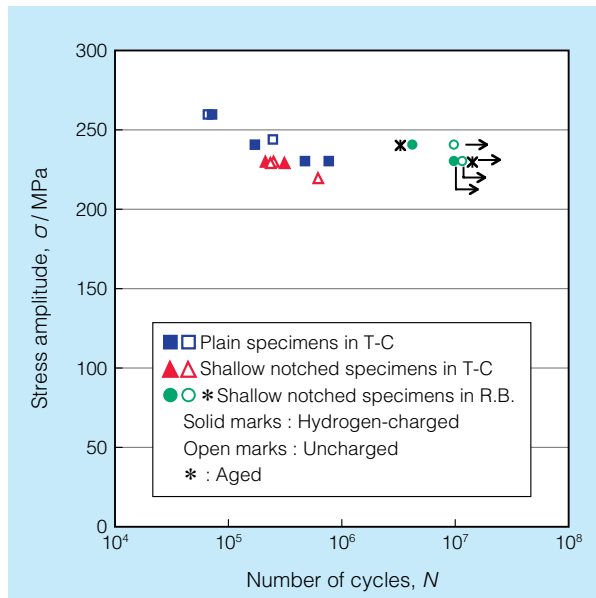


Fig. 5 S-N data for hydrogen-charged, uncharged and aged specimen of S45C in tension-compression (T-C) tests and rotating bending (R.B.) tests

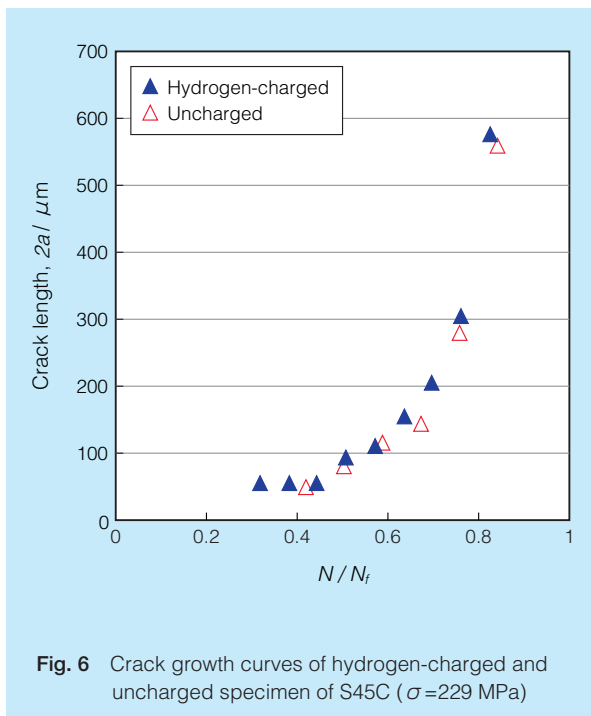


Fig. 6 Crack growth curves of hydrogen-charged and uncharged specimen of S45C ($\sigma=229$ MPa)

構による硬化現象ではなく、すべり帯の局在化によりもたらされたものであると考えられる。

3.4 回転曲げ試験における微視的疲労挙動に及ぼす水素の影響

回転曲げ疲労試験用の浅い部分切欠き試験片を用いて、疲労限度付近の応力振幅における水素の影響を微視的に観察した結果を示す。引張圧縮試験と回転曲げ試験で、現象に基本的な差がある訳ではないが、回転曲げ試験では観察部位をより狭く限定し、疲労試験中の観察をより迅速にできるようにした。

図8は、レプリカ法で試験片の切欠き底表面を採取し、形成されているすべり帯をレーザー顕微鏡を用いて詳細に観察した写真である。繰返し数 $N = 0$ と $N = 6 \times 10^5$ を比較すると、明瞭なすべり帯は、フェライト・パーライト組織の主にフェライト部に形成されており、以下に述べるタイプA、タイプBおよびタイプCの3種類の形態が観察された。

タイプA：図8(a)に示すように、フェライト粒全体にすべり帯が形成され、すべり線は複数の方向のものが重なっている。

タイプB：図8(b)に示すように、フェライト粒全体にすべり帯が形成されているが、すべり線は、ほぼ同じ方向にそろっている。

タイプC：図8(c)に示すように、フェライト粒の一部のみに局所化してすべり帯が形成され、すべり線の方向もほぼ一方向に限定されている。

次に、水素チャージ材、未チャージ材および時効材のそれぞれにおいて、切欠き底付近にある直径 $5 \mu\text{m}$

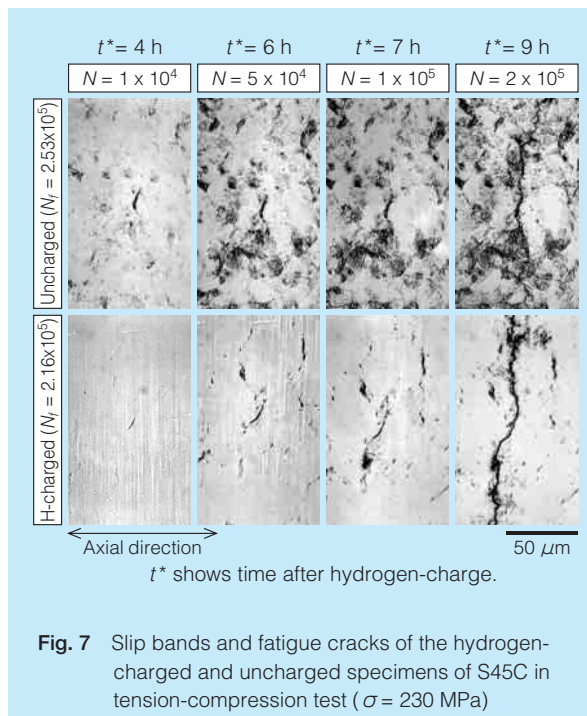


Fig. 7 Slip bands and fatigue cracks of the hydrogen-charged and uncharged specimens of S45C in tension-compression test ($\sigma = 230$ MPa)

以上のフェライト粒を無作為に100個選び、形成されているすべり帯を上述の3種類に分類し定量化した。図9に、レプリカ法を用いて採取した応力振幅 $\sigma = 230$ MPa、繰返し数 $N = 6.0 \times 10^5$ におけるすべり帯の度数分布を示す。未チャージ材では、主にタイプAのすべり帯が観察されたが、タイプCのすべり帯は観察されなかった。一方、水素チャージ材では、49%のフェライト粒にタイプCのすべり帯が観察された。また、時効材ではタイプAのすべり帯が主体であるが、タイプBおよびタイプCのすべり帯も観察された。

一般に α -Feでは、図8(a)に示すタイプAのように、複数のすべり系が動くことと交差すべりを起こしやすいことに起因するペンシルグライドと呼ばれる形態のすべり帯が観察される。また、タイプBのような、すべり線がほぼ同じ方向にそろったすべり帯は、一次すべり系が優先的に働き、二次すべり系の活動の程度が少ないものと考えられる。一方、水素チャージ材で多く観察された図8(c)に示すタイプCのすべり帯は、水素によって、一次すべり系がより優先的に活動し、さらに塑性変形の局所化が生じたものであると考えられる。図2より、水素チャージ後大気中で270 h放置した時効材にも、試験開始時に約0.2 ppmの水素が残留していたと考えられるため、タイプCのすべり帯が7%観察されている。本研究では、転位の構造を直接観察していないため断定はできないが、これらの結果は、水素が転位の運動およびそれに伴い形成される転位構造を変化させていることを示唆している。Birnbaum⁹⁾らは、TEMを用いた直接観察によって、水素によって転位の易動度が増加するこ

とを示している。通常、繰返し応力下においては、一つのすべり系で転位が動きにくくなると、他のすべり系の活動を伴いながら、すべり帯が結晶粒全体に広がっていく。よって、転位の易動度の変化は、活動するすべり系の変化やすべり変形の局在化などをもたらす可能性がある。

図10に、水素チャージ材、未チャージ材、および時効材において、応力振幅 $\sigma = 230$ MPaで繰返し数 $N = 1 \times 10^7$ 後の試験片に生じていた停留き裂の本数とき裂発生箇所を示す。き裂本数の測定は、結晶粒2個以上にまたがるものをき裂と定義し、切欠き底付近の 0.65 mm^2 の範囲をレプリカ法で観察することによって行った。どの試験片においても、結晶粒界からのき裂発生が最も多くなっている。しかし、未チャージ材においては、フェライト粒内から発生するき裂の数は非常に少ないのに対して、水素チャージ材では、発生したき裂の約20%がフェライト粒内から発生したものであった。また、発生したき裂の総数も、水素チャージ材は、未チャージ材と時効材と

比較して多い結果となっている。水素チャージ材において、フェライト粒内からのき裂の発生が増加した原因は、前述したフェライト粒に生じたすべりの形態の変化に起因すると考えられる。つまり、水素によって、局在化され、限定されたすべり系においてすべりが繰返し生じたことによって、フェライト粒内からのき裂が発生したと考えられる。

以上より、本研究に用いた供試材あるいは試験方法においては、疲労寿命、疲労限度および巨視的なき裂の伝ば挙動には明らかな違いは見られなかったが、水素によるすべり帯の形態の変化が観察され、繰返し応力-ひずみ特性およびき裂の発生挙動とよく対応した結果が得られた。

水素によって微視的なすべり変形挙動が変化することは、金属組織の違いあるいは水素含有量の増加により顕在化する可能性があり、水素が疲労に及ぼす影響を検討する際には無視できない現象であると考えられる。よって、金属組織の影響や、さらに高い水素含有量の影響も含めてさらに検討が必要である。

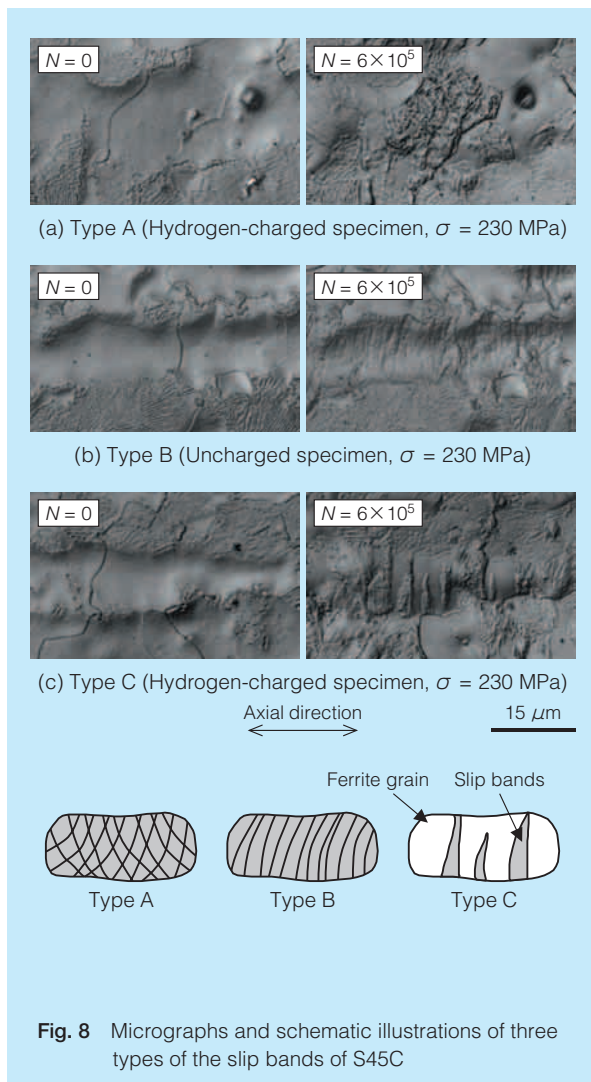


Fig. 8 Micrographs and schematic illustrations of three types of the slip bands of S45C

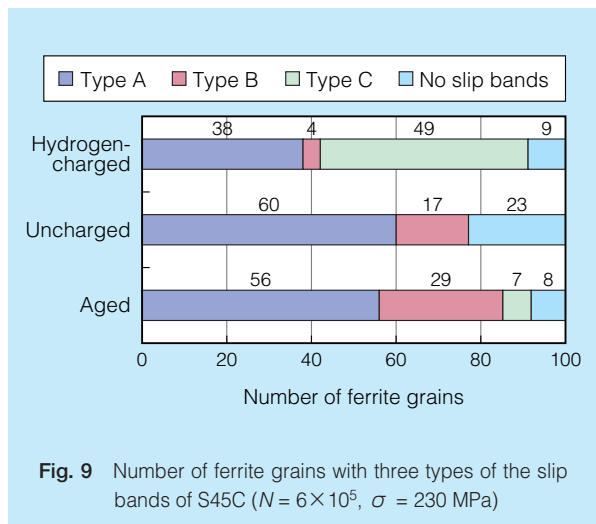


Fig. 9 Number of ferrite grains with three types of the slip bands of S45C ($N = 6 \times 10^5$, $\sigma = 230$ MPa)

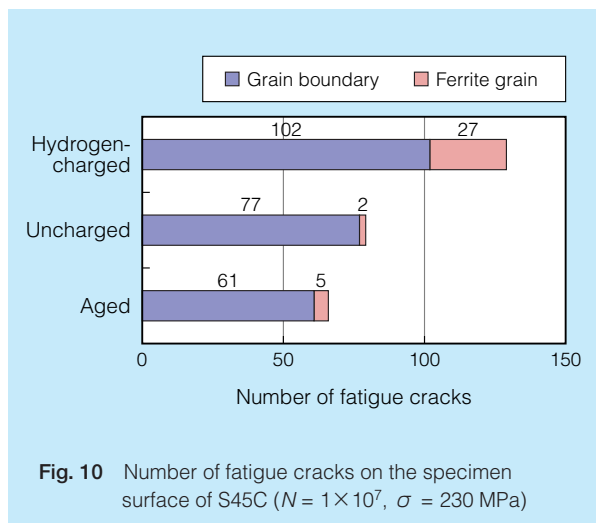


Fig. 10 Number of fatigue cracks on the specimen surface of S45C ($N = 1 \times 10^7$, $\sigma = 230$ MPa)

4. 結 言

疲労機構における水素の基本的な役割を把握することを目的として、焼鈍した炭素鋼について、繰返し応力ひずみ特性および疲労挙動に及ぼす水素チャージの影響を調査した。その結果、以下に示す結論が得られた。

- (1) 約0.2 ppmの水素をチャージしたS10Cの繰返し応力ひずみ特性には、水素チャージの影響は現れなかった。一方、約0.8 ppmの水素をチャージしたS45Cに関しては水素チャージによるひずみ振幅の減少が認められた。この相違は、水素含有量の多少と組織に依存した水素の影響に起因すると考えられる。
- (2) 約0.5 ppmの水素をチャージしたS45Cを用いた静的降伏応力直下の応力における一定応力振幅試験の結果、未チャージ材では降伏現象に対応した急激なひずみ振幅変化を示すのに対して、水素チャージ材では、ひずみ振幅は徐々に増加し、その飽和値は未チャージ材のそれよりも小さくなった。
- (3) 約0.5 ppmの水素をチャージしたS45Cの疲労挙動に及ぼす水素の影響については、疲労寿命に明瞭な差異は認められなかったが、すべり帯の発生形態が大きく異なることがわかった。未チャージ材では、すべり帯が結晶粒単位で広く分布するのに対して、水素チャージ材に形成されるすべり帯は局在化していた。水素チャージ材におけるヒステリシスループのひずみ振幅の減少は、このすべり帯の局在化により生じるものと考えられる。
- (4) 約0.5 ppmの水素をチャージしたS45Cの疲労限度直下における停留き裂の発生箇所は、結晶粒界が支配的であるが、水素チャージ材では、フェライト粒内からのき裂発生も多く観察された。これは、水素によってすべり帯の形態が変化したことにより起因していると考えられる。

上記(1)~(4)の現象は、材料の組織とチャージされた水素量との組み合わせに関連して生じたと考えられる。今後、すべり変形およびき裂発生に及ぼすフェライト、オーステナイト、マルテンサイトなどの金属組織と水素量の関係についての詳細な調査が必要である。

本研究は平成14~18年度科学研究補助金「特別推進研究」課題番号14001002の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) Y. Murakami, Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions, Elsevier Ltd., Oxford(2002)
- 2) Y. Murakami, T. Nomoto and T. Ueda, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 22, 581 (1999)
- 3) 村上敬宜, 野本哲志, 植田徹, 村上保夫, 大堀学, 材料, 48, 1112 (1999)
- 4) 村上敬宜, 小西寛, 高井健一, 村上保夫, 鉄と鋼, 86, 777 (2000)
- 5) 村上敬宜, 横山ナンシー尚子, 高井健一, 材料, 50, 1068 (2001)
- 6) Y. Murakami, N. Yokoyama and J. Nagata, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 25, 735 (2002)
- 7) R. A. Oriani and P. H. Josephic, Acta Metall., 22, 1065 (1974)
- 8) C. D. Beachem, Metall. Trans., 3, 437 (1972)
- 9) H. K. Birnbaum and P. Sofronis, Mater. Sci. Eng., A176, 191 (1994)
- 10) M. Nagumo, M. Nakamura and K. Takai, Metall. Mater. Trans., A32, 339 (2001)
- 11) 浅野滋, 西野洋一, 大塚陸郎, 日本金属学会誌, 3, 241 (1979)
- 12) H. Matsui, H. Kimura and S. Moriya, Mater. Sci. Eng., 40, 207 (1979)
- 13) 松山晋作, 遅れ破壊 (1989) 日刊工業新聞社
- 14) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 藤本知司, 松田良信, 日本機械学会論文集, A45, 1152 (1979)
- 15) 吉岡純夫, 出水通之輔, 熊沢道夫, 土方明躬, 材料, 29, 628 (1980)
- 16) 福山誠司, 横川清志, 工藤清勝, 材料, 32, 430, (1983)
- 17) M. Nagumo, H. Shimura, T. Chaya, H. Hayashi and I. Ochiai, Mater. Sci. Eng., A348, 192 (2003)
- 18) 日本材料学会編, 疲労設計便覧, p.32 (1995) 養賢堂
- 19) 大内田久, 日本機械学会誌, 64, 263 (1961)

単一細胞を対象とした細胞内部構成物質の オンチップ抽出

池田 憲文*, 柳田 保子**, 初澤 毅**

On Chip Extraction for Intracellular Material from the Single Cell

N. Ikeda, Y. Yanagida and T. Hatsuzawa

Investigation of a single-cell is widely recognized in biotic research field as essential to understanding in detail, the functionality of the cellular systems. In this study, the micro-fluidic chip for a single-cell capturing and lysis has been developed using a glass substrate and a photoresist (SU-8). And then, the function of this chip is studied using a plant cell (protoplast). The chip is able to guide a single-cell into the channel using low-voltage electro-osmotic flow, and the cell is captured mechanically by a pinched structure in the channel. Finally, the captured single-cell is successfully lysed by the flow movement and the electrical field.

社団法人精密工学会の転載許諾を得て、2005年度 精密工学会秋季大会 学術講演会講演論文集中から転載

1. はじめに

バイオテクノロジーの進展に伴い、個々のサンプルをより詳細に解析することが重要になってきた。特に、生体の基本構成単位である細胞を個別に解析することは、生体全体の複雑な挙動メカニズムを知る上で重要な意味を持っている。

一方で、マイクロ/ナノテクノロジーの進展に伴って、煩雑なバイオ実験のプロセスをチップ上に集約し、高速解析、サンプル量の極小化、検出精度の向上などを目的とした研究が盛んに行われている。

こうした背景から、単一細胞を対象とした解析をサポートするためのチップ技術も多くの研究者によって研究対象とされてきた。細胞の選別、破碎、抽出、分離、精製、解析をチップ上で行うことも可能になりつつある¹⁾。

しかし、これらのチップの多くは構造や作製プロセスが複雑で、短期での実用化は難しい。また、これらのチップ技術の実用化を考えた研究は数少ない。

そこで本研究では、光硬化性樹脂とリソグラフィ技術を用いた極めて単純なプロセスを用いて、単一細胞から内部構成物質を抽出するためのチップを作製し、その機能を評価した。

2. 実験用チップの作製

2.1 構造

実験に用いたチップ、およびそのチップを装着し

た実験装置の外観を、それぞれ図1(a), (b)に示す。

基板には、市販のピアレックスガラス(#7740)を用い、サイズは短辺10 mm, 長辺20 mm, 厚さ1.0 mmで、並列処理が可能な様に同様の流路パターンが4つ実装されている。電極は、Ti/Ptの2層スパッタ膜で、チップの左端に外部機器からの入力ポート(電極)を設けてある。流路構造はネガ型の永久レジスト(化薬マイクロケム社製 SU-8 3050)で形成されている。

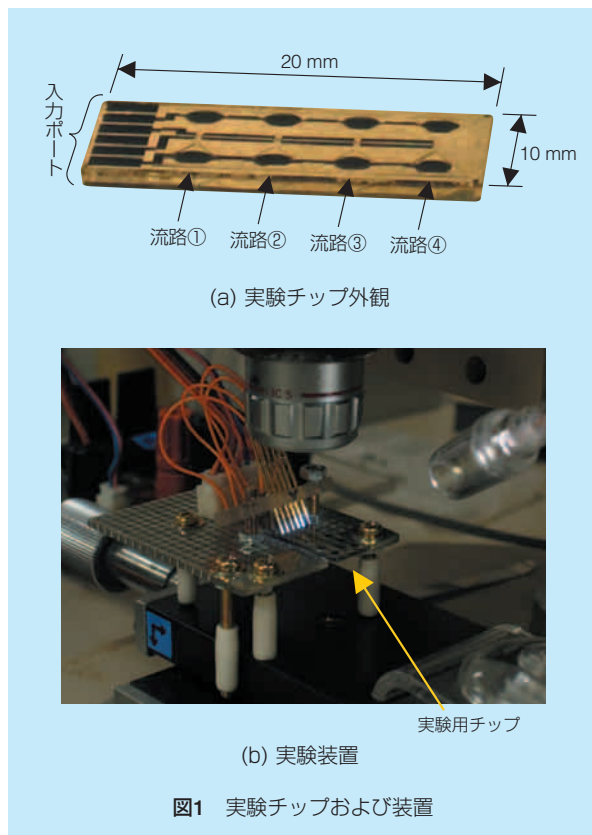
図2(a)に流路パターンの詳細を示す。灰色で示している部分は電極パターンである。両端の溶液槽をつなぐ流路は幅100 μm , 深さ約60 μm で、途中で細胞を捕獲・破碎するための突起(図2(b))が設けてある。突起部には捕獲した細胞に電界を印加できるように幅50 μm , 間隔50 μm の平行電極が敷設してある。また、両端の溶液槽に設置してある流体駆動用の電極は、 $\phi 2$ mmの円形状になっており、両電極の中心間隔は6 mmである。

2.2 作製方法

まず、ガラス基板の表面をアセトンで洗浄し、HMDSで疎水化処理した後、ポジレジスト(東京応化製 OFPR800)を約2 μm の厚さでスピンコートした。その後、フィルムマスク(PET製)を用いて露光、現像を行い、電極パターンの逆構造を基板上に形成した。この上にTi/Ptの2層スパッタ膜を全厚で約1 μm 程度になるよう作製し、リフトオフで不要部分のスパッタ膜を除去して基板上へ金属電極パターン

* 日本精工株式会社

** 東京工業大学



を作製した。この後、電極パターンを作製したガラス基板上へ、流路となる上記ネガレジストを、約 $60 \mu\text{m}$ の厚さでスピコートし、電極パターンと同様にフィルムマスクを用いて露光、現像を行い、流路パターンを作製した。

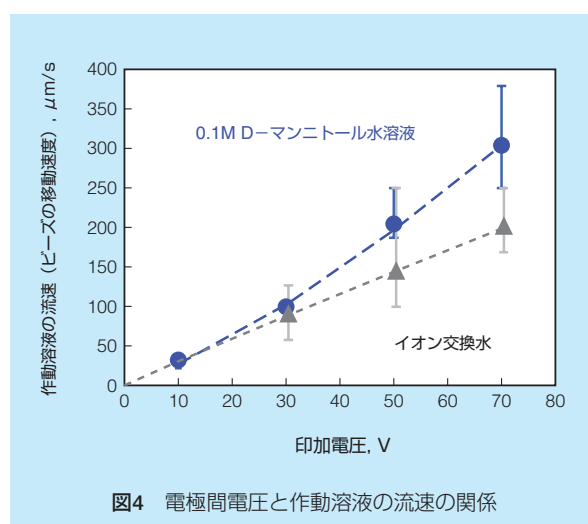
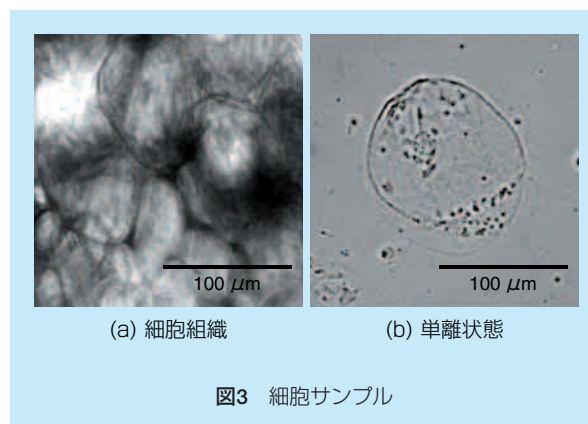
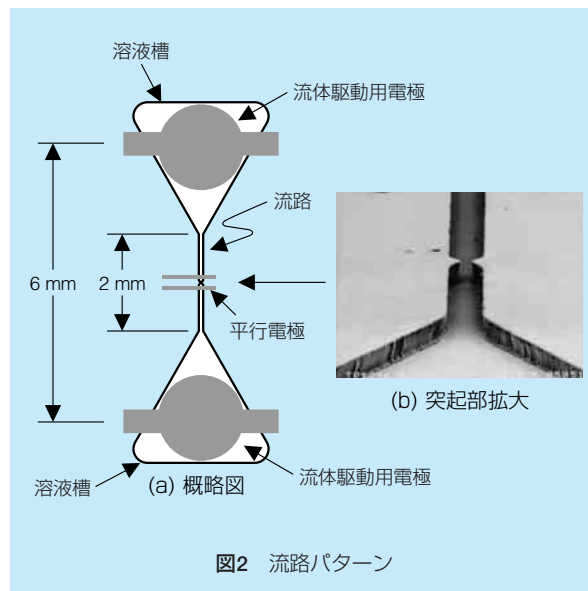
2.3 実験用サンプル

細胞実験用のサンプルには、ズッキーニの果肉を酵素処理して得られる植物由来の単離細胞（プロトプラスト）を用いた。ズッキーニの細胞組織と採取した単離細胞の写真をそれぞれ図3(a)および(b)に示す。ズッキーニの果肉からは直径約 $100 \mu\text{m}$ 程度の適当なサイズの細胞が比較的高収率で採取できた。

3. 実験結果および考察

3.1 作動溶液の駆動特性

プロトプラストが突起部で捕獲されるまで破碎しないよう、チップの作動溶液にはD-マンニトール ($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$) で浸透圧を高めた水溶液を使用する。この作動溶液のチップ内での駆動特性を観察するため、 0.1 M のD-マンニトール水溶液に蛍光ビーズ試薬 (Invitrogen社製 MolecularProbes A7305 粒子直径 $6 \mu\text{m}$) を25 vol. %混合したトレーサ溶液を作製して、電圧と流速（ビーズの移動速度）の測定を行った。トレーサとして用いた蛍光ビーズは、溶液内で



電氣的にほぼ中性であることを予備実験で確認している。また、比較サンプルとして、イオン交換水でも同様のトレーサ溶液を作製して実験を行った。両溶液のpHは、いずれも6程度で差異はなかった。

実験結果を図4に示す。

チップ内の流路および溶液槽へ各トレーサ溶液を

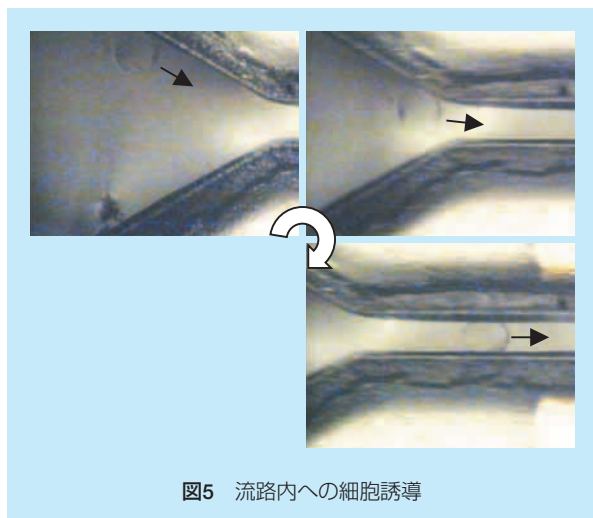


図5 流路内への細胞誘導

満たし、容量バランスによる自然流動がおさまるまで静置したのち、電極間に電圧を印加した。粒子はいずれも正極から負極の方向へ移動した。基板のガラス面は水溶液中で負に帯電しているものと考えられるため、これは電気浸透流による流体移動をトレースしていると思われる。両壁をレジスト材料で構成した流路でも、流体の駆動が確認できた。また、0.1 MのD-マンニトール水溶液は、イオン交換水に比べ直線性に劣ったが、同等以上の流速を確保できることがわかった。

3.2 細胞の誘導

ズッキーニの果肉を酵素処理して得られる細胞溶液から適当なサイズの細胞をマイクロピペットで採取し、実験用チップの溶液槽へ導入した。ここで、実験用チップの流路内には予め作動溶液を満たしてある。その後、流体駆動用電極へ10~30 V程度の電圧を印加し、2つの溶液槽間に電気浸透流を発生させ、細胞を流路内へ誘導した。

3.3 細胞の破碎

流路内に誘導された細胞は、流路中央部に設けた突起部に衝突し一時捕獲されるが、一部の細胞は衝突の衝撃のみで破碎した。その様子を図6に示す。今回用いたプロトプラストの様に、強固な外殻を持たない細胞であれば、捕獲後に特別な刺激を与えなくても破碎できることがわかった。また、破碎後に流出した内部構成物質は電界の影響を受けて電気浸透流とは逆向きに移動する現象も観察された。

一時捕獲後、交流電圧 (25 Vp-p, 100 kHz) を印加して細胞を破碎した時の様子を図7に示す。本条件では細胞破碎と同時に内部構成物質が飛散し観察領域外へ排出された。また破碎後、電極近傍からバブルの発生が確認された。

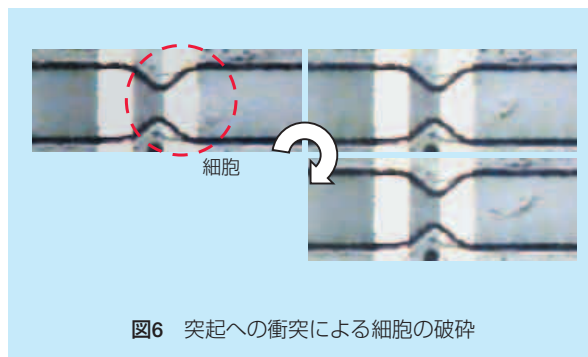


図6 突起への衝突による細胞の破碎

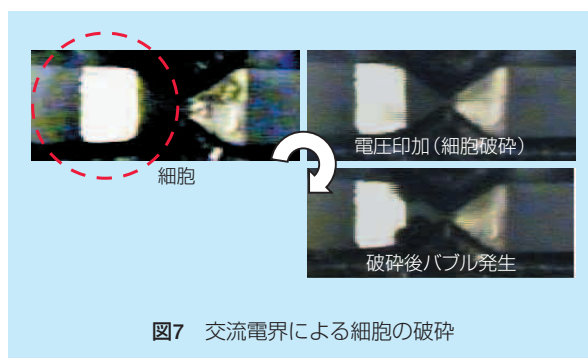


図7 交流電界による細胞の破碎

4. まとめ

レジスト材料を用いてガラス基板上に突起形状を有する微細流路を作製し、単一細胞の破碎テストを行った結果、

- ①ガラス基板（底面）とレジスト材料（流路壁）の組合せで構成した流路で電気浸透流現象を観察した。
- ②発生した電気浸透流を用いて、細胞を流路内に導入できた。
- ③流路内に設けた突起を利用して、細胞を捕獲・破碎できた。

参考文献

- 1) Gao, J ら : PROGRESS IN CHEMISTRY, 16 (6): 975-983 NOV 2004 など

Technical paper

Surface Integrity Control of Piezoelectric Materials in Ultra Precision Grinding – Based on Tooling Design Analysis

The research investigated the precision machining of PZT, including the design requirements for a machine tool to achieve nanometer surface finishes economically e.g. to eliminate polishing. PZT is an advanced material which is critical for many advanced miniature components, including micro actuators and sensors. The work showed that with the correct design of machine tool PZT could be precision ground to the surface finishes required with minimum sub surface damage, without the need for further polishing. Critical requirements for an appropriate machine tool were found to include high dynamic acceptability and the minimization of thermal effects. The research has led to a major break through in the understanding of the design requirements for a machine tool and the process for the machining of ultra precision macro and micro components in brittle materials. Such components have included large space telescope mirrors to micro sensors for measuring airflow across aeroplane wings.

Former Professor, Consultant at Cranfield University / John Corbett

Surface Integrity Control of Piezoelectric Materials in Ultra Precision Grinding – Based on Tooling Design Analysis

S. Arai* / **, J. Corbett*, R. W. Whatmore*, S. A. Wilson* and J. Hedge*

Abstract

This work verifies the interaction between the ground surface integrity (surface roughness and flatness) of piezoelectric materials and the design influence of the tooling. A statistical design array was applied in order to identify significant grinding factors, and the results led to the development of a new material removal model, in which a combination of brittle and ductile material removal modes was preferable, and this resulted in an optimised surface roughness and flatness. Concerning the tooling design influence, a vacuum chuck with a visco-elastic damping polymer layer was designed to dampen the vibrations generated during grinding. The developed new vacuum chuck demonstrated improvements in both the surface roughness and flatness. In addition, defects on the ground surfaces were categorized in order to optimise the grinding parameters.

"Reprinted with permission from Proc. of 4th euspen International Conference-Glasgow, 2004
the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology"

Introduction

Ultra precision grinding has the potential to finish the surface of brittle materials to a high surface integrity. Many research programmes have been carried out to investigate how to grind various brittle materials precisely and smoothly, analysing material damage induced in the surface and subsurface ¹⁾. PZT is a brittle material which can transform electric energy to a mechanical deformation depending on its piezoelectric properties, and it has been utilized for precision mechanisms and small electric sensors. Their requirements for a high surface integrity have recently become much more stringent. For example, MEMS (micro-electro mechanical systems) is one of the main fields for the use of PZT materials, and for such fine applications, it is necessary to finish each device with fewer defects, which could lead to a deterioration of their function ^{2) 3)}.

Statistical Grinding Experiments and Material Removal Modelling

Fundamental grinding experiments were carried out in order to identify the significant factors affecting the grinding process. All experiments were completed in a traverse mode with cup grinding wheels (vertical Z axis for in-feed and horizontal X axis for traverse). A Taguchi array of L^{16} (2^{15}) was arranged for the analysis of variance with regard to the surface roughness, flatness and textural damage, paying attention to the interactions of single factors (defined factors : A - feed rate, B - spindle speed, AxB, C - work piece material,

AxC, BxC, AxBxC, D - abrasive grit size, AxD, F - work depth of cut, AxBxD, G - chuck design for work piece, AxG, CxF, AxBxG). There were two sets of statistical experiments with / without ELID (electrolytic in-process dressing). Resin and cast iron bonded cup grinding wheels (diamond abrasive grit size : 3 ~ 6 and 6 ~ 12 micrometer) were used for each set of experiments, and un-poled hard and soft PZT work piece disks (diameter 50 mm, thickness 2.0 mm), each with a grain size of approximately 5 ~ 7 micrometer, were prepared for both experiments.

It was statistically confirmed that (i) there were severe fractural damage and burnishing on the ground surfaces due to worn abrasive grits and loading of the grinding wheel when ELID was not utilized, (ii) coarser abrasive grits were preferable even with ELID, (iii) in general, a faster feed rate was preferable for the surface flatness whereas a slower feed rate showed improved results for the surface roughness, and (iv) a deeper work depth of cut (a_p) was desirable for the surface flatness whereas a shallower work depth of cut resulted in the improved surface roughness. **Fig.1** shows the basis for the material removal model taking account of these tendencies. When the deeper work depth of cut (5.0 micrometer) is applied, abrasive grits attached to the peripheral area of the grinding wheel contribute to the main material removal, which initiates defects, such as grain pull out and micro cracks, particularly around the leading edge. However, once the grinding wheel edge is worn, the frequency of severe defects becomes relatively low because of the decrease of abrasive protrusion. Meanwhile, the

* Cranfield University, School of Industrial & Manufacturing Science

** NSK Ltd.

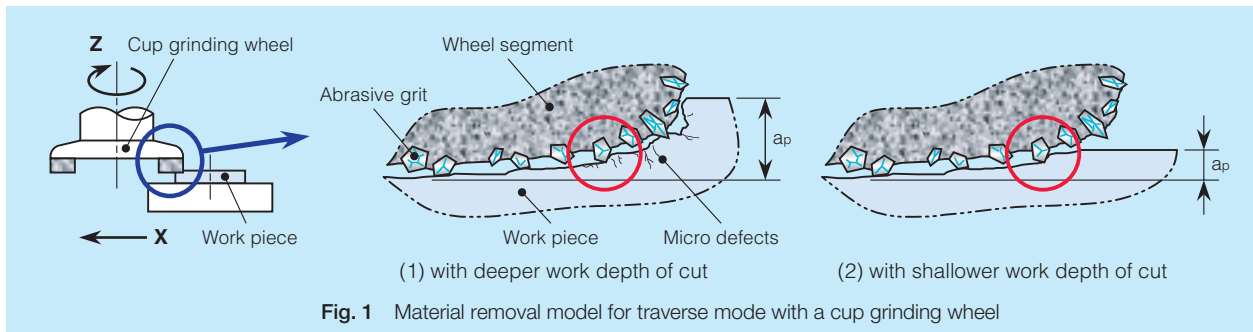


Fig. 1 Material removal model for traverse mode with a cup grinding wheel

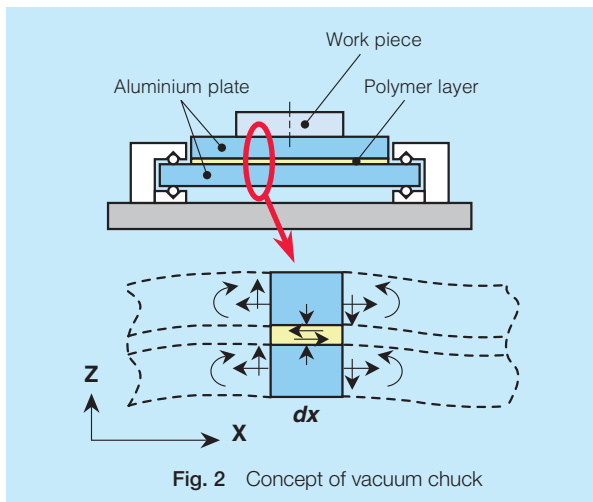


Fig. 2 Concept of vacuum chuck

remaining smaller defects are subjected to a secondary finishing process via the abrasive grits on the bottom of the cup grinding wheel⁴⁾. If the defects generated around the leading edge are sufficiently small, then ductile material removal can be accomplished smoothly in the subsequent finishing zone because of the decreased mechanical toughness of the work piece material. Furthermore, once the edge wear on the grinding wheel face occurs, the protrusion of abrasive grits will gradually decrease from the centre of the cup grinding wheel to the external edge of each segment. This variation will result in finer work depths of cut in the secondary finishing zone, and remove material from the surface of the work piece more gradually. However, when the shallower work depth of cut (0.5 micrometer) is applied, the main material removal and finishing are accomplished simultaneously by the abrasive grits attached around the bottom of the cup grinding wheel. In this case, the actual work depth of cut depends on the variation of each abrasive protrusion. It is thought that this induces an increased heat generation within the work piece due to the large contact area and relatively high mechanical toughness of the work piece material, and consequently varies the distribution of residual stress within the surface. Therefore, it is possible to conclude that the deeper work depth of cut results in a decreased surface temperature of the work piece, which contributes to a better surface flatness, although scratches due to debris and subsurface

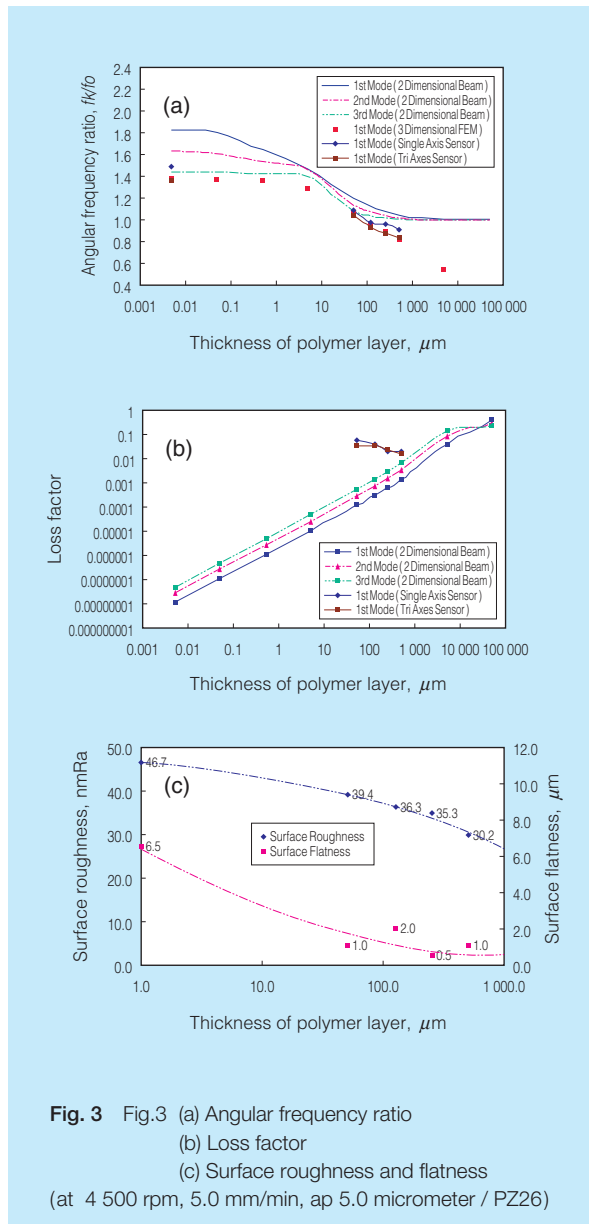


Fig. 3 (a) Angular frequency ratio
(b) Loss factor
(c) Surface roughness and flatness
(at 4 500 rpm, 5.0 mm/min, a_p 5.0 micrometer / PZ26)

damage in the work piece increase, leading to a slight deterioration of the surface roughness value.

Development of a Vacuum Chuck with a Visco-Elastic Damping Polymer Layer

The development of a vacuum chuck with a visco-elastic damping polymer layer was undertaken in an

attempt to minimize the deterioration of the surface flatness of the work piece due to grinding. Fig.2 shows a general view of the designed vacuum chuck. The structure consists of two aluminium plates, between which an acrylic synthetic substrate is inserted. When each aluminium plate vibrates in the same bending mode, the shear forces caused within this polymer layer dissipate the vibration energy due to its internal friction, and this dampens the vibration efficiently. The polymer layer used for this application has to be carefully chosen paying attention to its variable shear storage modulus and loss factor. Fig.3 (a) and (b) shows the simulated and measured results of the angular frequency ratio and the loss factor of the structure, plotted against variations of the polymer layer thickness (f_k : damped angular frequency of the structure, f_0 : natural angular frequency of a single aluminium plate). Measured results were obtained with polymer thicknesses of 50.8, 127, 254, 508 micrometer. It was found that solutions based on the developed equations for a 2 dimensional beam (3.5 ~ 4.0 kHz) did not fit either measured result or solutions of a finite element analysis (2.8 ~ 3.6 kHz). It is thought that this is because of the difference in the defined boundary conditions and the limitation of the modelled shape. Meanwhile, although the first modes (simple bending shape) acquired experimentally showed rocking modes at each support element, their frequencies were consistent with those acquired with the finite element models. This implied that the dynamic behaviour of the polymer compound vacuum chuck could be estimated sufficiently in the design stage. Concerning the loss factor of the structure, the simulated performances did not fit experimental results because of the geometrical limitation of the numerical model. However, it can be stated that the experiments demonstrated that polymer thicknesses of 254 ~ 508 micrometer gave the best damping performances. Fig.3 (c) shows grinding

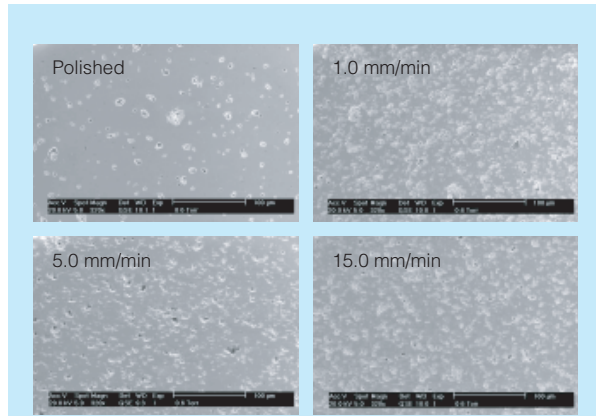


Fig. 5 Secondary electron image (6 000 rpm / PZ26)

results with each vacuum chuck. With regard to both the surface roughness and flatness values in the grinding direction (X axis), substantial improvements were achieved depending on the thickness of the polymer layer.

Optimization of the Grinding Parameters

Experiments using ELID were carried out for a work depth of cut of 5.0 micrometer in order to optimise the grinding parameters. The spindle speed was varied from 1 500 to 6 000 rpm, and the feed rate from 1.0 to 15.0 mm/min. The vacuum chuck with a damping polymer layer of 508 micrometer was utilized for these experiments based on the design analysis. Fig.4 shows typical results of the surface roughness and flatness values for different spindle speeds and feed rates. The theory that a fast spindle speed and slow feed rate are preferable to obtain improved surface integrity appears to be generally correct. However, the fastest spindle speed of 6000 rpm indicated a saturation of the surface roughness values on hard PZT (PZ26), and a deterioration of the surface roughness values on soft

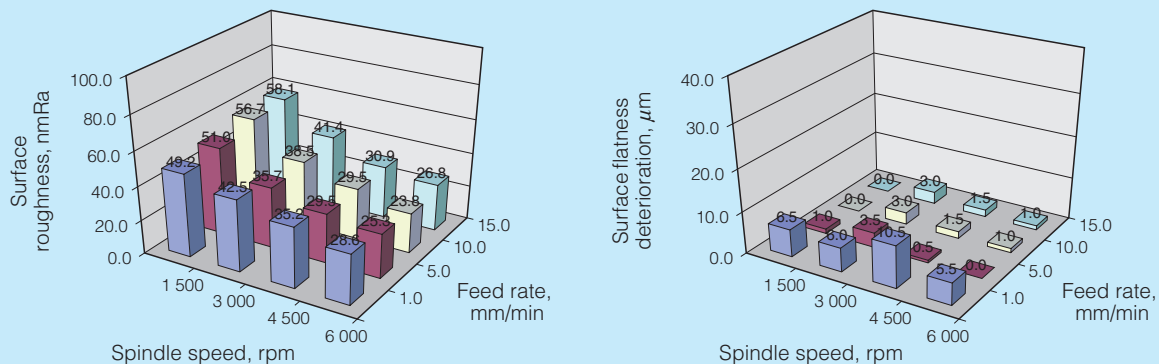


Fig. 4 Surface roughness and flatness (Hard PZT / PZ26)

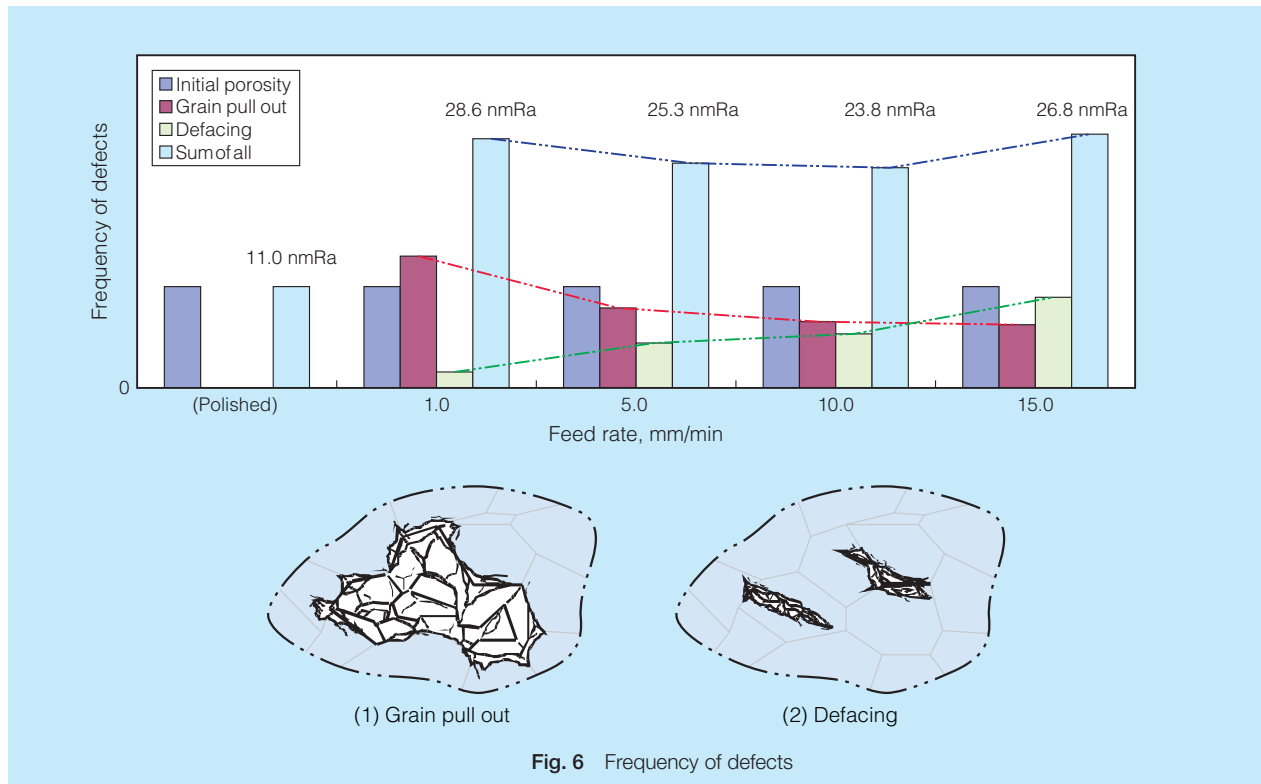


Fig. 6 Frequency of defects

PZT (PZ27). Concerning the surface flatness, consistent best values were achieved with feed rates of 5.0 to 15.0 mm/min in both materials, whilst the worst surface flatness values were observed repeatedly at the feed rate of 1.0 mm/min. **Fig.5** shows secondary electron images of the ground surfaces. The material removal model suggested via **Fig.1** predicts the initiation of micro defects at the leading edge of the cup grinding wheel, and observed results indicated the generation of such subsurface damage. **Fig.6** indicates the frequency of defects visually, based on evaluation of these images. If the machined defects are divided into two groups, grain pull out and defacing, adding to the initial porosity generated in the sintering process, and they comply with this chart, it is possible to show that feed rates of 5.0 to 10.0 mm/min give the optimum surface roughness and flatness, and this agrees with the values shown in **Fig.4**.

Conclusions

A practical material removal model for the multi point grinding was suggested, based on a statistical investigation of experimental results. A vacuum chuck with a visco-elastic damping polymer layer was developed in order to enhance the damping characteristics, and it was confirmed that the device performed effectively for the improvement of ground surface integrity. Furthermore, defects induced on the ground surfaces were evaluated and this led to a recommendation for the grinding parameters with regard to optimising the surface roughness and flatness.

References

- 1) I. Inasaki (1987) ' Grinding of Hard Brittle Materials ' *Annals of the CIRP*, Vol.36/2, 463 - 471
- 2) Paulo A. Beltrao et al. (1999) ' Ductile Mode Machining of Commercial PZT Ceramics ' *Annals of the CIRP*, Vol.48/1, 437 - 440
- 3) Takeshi Tanaka, Yoshitada Isono (2001) ' A Study of Ductile / Brittle Modes Grinding of PZT Ceramics ' *Journal of the Society of Grinding Engineers*, Vol.45 Aug. No.8, 391 - 396
- 4) D. J. Stephenson et al. (2001) ' Ultra - Precision Grinding of Hard Steels ' *Precision Engineering*, 25, 336 - 345

真空環境対応位置決めテーブル用差動排気シールに関する基礎研究

中村 剛*, 佐治 伸仁*

Basic Study on Differential Pumping Seal for Precision Positioning Table in Vacuum Environment

T. Nakamura and N. Saji

With high integration of a semiconductor, the development of an aerostatic bearing used for ultra-precision positioning table system in vacuum environment is needed. In order to make it possible to an aerostatic bearing in vacuum environment, a differential pumping seal, which is one of the seal method, is needed. In this study, the differential pumping seal of linear motion type was developed, and then its performances in a stop and a movement states were evaluated. As a result, we clarified that it achieves the vacuum degree of 10^{-5} Pa order and quantified influence of a pressure change over travel length and moving speed in a movement state. Furthermore, we identified the main factor of this pressure change and confirmed the effectiveness of dehumidifying surrounding air space to restrain this pressure change.

Key Words : Ultra-precision, Positioning, Hydrostatic Bearing, Differential Pumping Seal

社団法人日本機械学会の転載承認を得て、日本機械学会論文集(C編) 71巻710号(2005-10)から転載

1. 緒 論

従来から真空環境で使用される位置決めテーブルには、転がり案内が多く適用されている。しかし、半導体の微細化・高集積化の進展と共に、半導体製造装置では真空容器内の軸受など摺動部から発生する絶縁性塵埃や摺動部潤滑油の分解によるハイドロカーボン系物質の発生が問題視され始めている。これらの発生物は、チャンバが大気と真空の雰囲気変化を繰り返すことにより生じる気流によって舞い上がり、ウエハ等の試料面上に付着するなどのさまざまな悪影響を与える。その結果、装置の精度・信頼性は大きく低下し、製品の歩留まりを低下させることになる。

この問題を根本的に解決できる有用な案内系として、非接触式の静圧軸受が注目されている。静圧軸受を真空環境で使用するためには、数百kPaの軸受部と例えば 10^{-5} Paオーダの高真空とのシール要素が必要である。このシール要素として差動排気シールが着目されている^{1),2)}。しかし、それらの多くは 10^{-3} Paから 10^{-4} Paオーダの真空への適応が中心で、静圧軸受の適用が強く望まれる電子ビーム描画装置に求められる 10^{-5} Paオーダを実現した報告はなされていない。また、テーブル運動時における圧力上昇が報告されているものの、テーブルの運動条件と圧力上昇の因果関係については、ほとんど明確にされて

いない²⁾。

そこで本研究では、従来よりも高性能なシール機構を組み込んだ位置決めテーブル系を試作し、テーブルの静止時及び運動時におけるシール性能について検討を行った。その結果、差動排気シールが 10^{-5} Paオーダの高真空環境に対して十分に適用可能なシール技術であることを確認した。また、従来ほとんど検討されていない直線運動形の真空シール固有の圧力上昇問題を定量化するとともに、圧力上昇の低減法を提案し、その有効性を明らかにしている。

2. 差動排気シール

図1に差動排気シールの基本原理である差動排気法の模式図を示す。差動排気法とは、高真空チャンバのポンプの排気速度 S に対して連通した低真空チャンバ(差圧溝)の連通導管のコンダクタンス C を著しく小さくすることで、低真空側 P_L から高真空側 P_H への気体の流入量を著しく小さくし、圧力差を大きくする手法である³⁾。本研究では図2に示すように、連通導管に相当する部分を、真空チャンバと可動部の間に設けた微小隙間とすることにより、静圧軸受に適用可能な非接触式の差動排気シールを構成している。

3. 差動排気シールの性能計算

一般に、微小隙間を採用した差動排気シールの性

* 日本精工株式会社

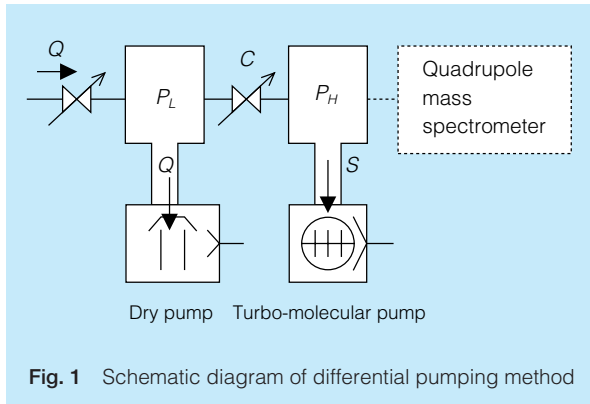


Fig. 1 Schematic diagram of differential pumping method

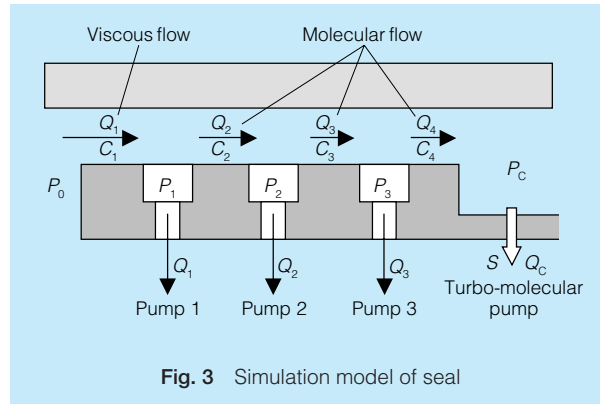


Fig. 3 Simulation model of seal

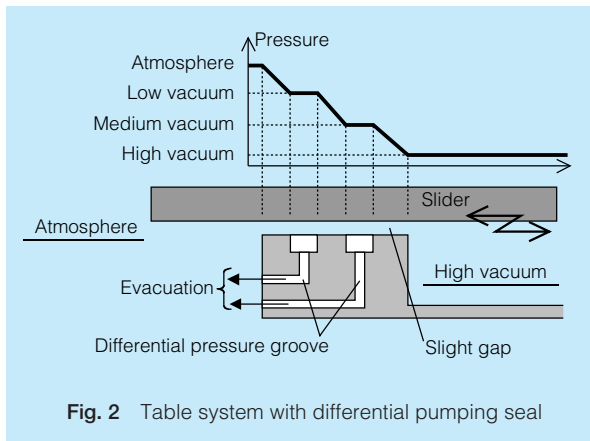


Fig. 2 Table system with differential pumping seal

能予測法として、スリップ流れを考慮した手法が提示されている¹⁾。本研究ではより簡素化したモデルにより、シール性能の予測を行うとともに、最適な実験機のシール形状を決定した。

3.1 差動排気シールのモデル化と性能計算

シール性能の計算は図3のようにモデル化しており、平行平板流れとした微小隙間部からの漏れ込み流量を算出し、その漏れ込みがすべてポンプによって排気されると仮定して各差圧溝の圧力を算出した。この圧力の導出を圧力の高い側から順に行い、真空チャンバ内の圧力を計算した。微小隙間部の流れの状態は、 Q_1 は粘性流、 Q_1 より真空側の Q_2, Q_3, Q_4 は分子流として各差圧溝及びチャンバの圧力を算出した。

粘性流領域の平行平板の流れはポアズイユ流れ⁴⁾と仮定できることから、流量 Q_1 は式(1)であらわされる。

$$Q_1 = \left(-\frac{dp}{dx} \right) \frac{a^3 b}{12 \mu} \left(\frac{P_0 + P_1}{2} \right) = \frac{a^3 b}{24 \mu L} P_0^2 \quad [\text{Pam}^3/\text{s}] \quad (1)$$

ここに、

- a : シール微小隙間 [mm],
- b : シール部横幅 (外周長さ) [mm],

L : シール方向長さ (ランド部の幅) [mm],

μ : 流体の粘度 = 空気の粘度 [Pa·s],

P_0 : 周囲圧力 = 大気圧 [Pa],

P_1 : 1段目の差圧溝圧力 [Pa].

なお、式(1)は、 $P_0 \gg P_1$ と仮定して簡略化している。次に分子流領域の平行平板の流れは、コンダクタンスが式(2)で定義されているため、流量 Q_2, Q_3, Q_4 は、式(3)であらわされる。

$$C_i = 309 \left(\frac{3}{8} \ln \left(\frac{L}{a} \right) \right) \frac{a^2 b}{L} \quad (i=2, 3, 4) \quad (2)$$

$$Q_i = C_i (P_i - P_{i-1}) = 309 \left(\frac{3}{8} \ln \left(\frac{L}{a} \right) \right) \frac{a^2 b}{L} P_{i-1} \quad (i=2, 3, 4) [\text{Pam}^3/\text{s}] \quad (3)$$

なお、式(3)は、式(1)と同様に各差圧溝間の圧力差が十分に大きいと仮定している。

差圧溝内の圧力計算は、ポンプの排気速度の非線形性を考慮し、次の手順で行った。まず、各ポンプの排気速度曲線からポンプの吸い込み口の圧力を算出する。そして各配管のコンダクタンスを算出し、差圧溝の圧力を算出する。各配管内の流れの状態は、採用した排気ポンプの性能から粘性流と分子流に分類し計算を行った。

3.2 シール部の設計

本研究では、 10^{-5} Paと大気圧(10^5 Pa)の圧力差をシールする差動排気シールを試作し、シール性能の計算の検証をねらいとした。シールの形状は、微小隙間をスペーサの厚さによって管理し、容易に変更できるように平面形とした。真空チャンバ側の開口部は、幅40 mm、長さ100 mmのスリット状とし、開口部の周囲に差動排気シールを配置した。

排気ポンプは、真空チャンバに設置するターボ分子ポンプに $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ のポンプを選定し、各差圧溝を排気するポンプは、排気量が多くとも連続運転が可能ないように、大形のルーツポンプを3台選定した。特

Table 1 Specifications of vacuum pumps

	Pump 1	Pump 2	Pump 3
Flow rate	1.3 m ³ /min	1.3 m ³ /min	4.2 m ³ /min
Ultimate pressure	2.7 Pa	2.7 Pa	0.27 Pa

に、最も真空側のポンプ3には、到達圧力として1 Pa以下を得られ、分子流領域の排気が行えるブースタ付タイプを選定した。表1に選定したポンプの様一覧を示す。

シールのランド部の幅 L と差圧溝の溝幅 W は、各段で同一の長さとし、微小隙間を10~40 μm とし、 L 、 W をそれぞれ変数に予想真空度の算出を行った結果を図4に示す。Lの長さは、各差圧溝の圧力に影響し、Lが長いほど高いシール性能を得られる傾向にあるが、 $L = 10 \text{ mm}$ 以上では、最も真空側の差圧溝の圧力が排気ポンプ3の性能上、ほぼ到達圧力に達しているため、その効果が減少した。

溝幅 W を変化させた場合、差圧溝からポンプへ繋がる配管に W に比例した直径とする配管部が構成され、この部分での圧力損失が差圧溝の圧力上昇をもたらす、高いシール性能を得にくいという結果となった。

本研究では、3段排気でチャンバの到達圧力が 10^{-5} Paオーダを得ることを目標とし、微小隙間20 μm の

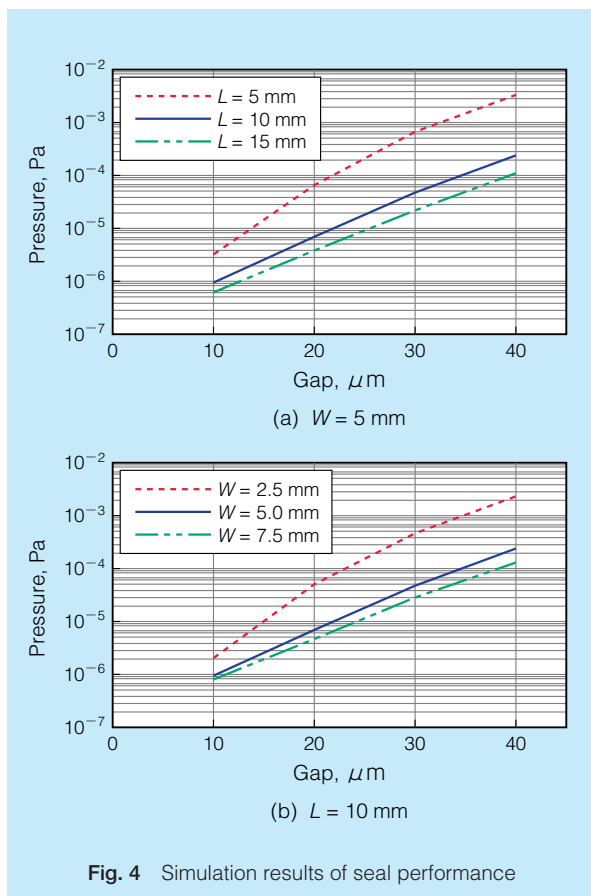


Fig. 4 Simulation results of seal performance

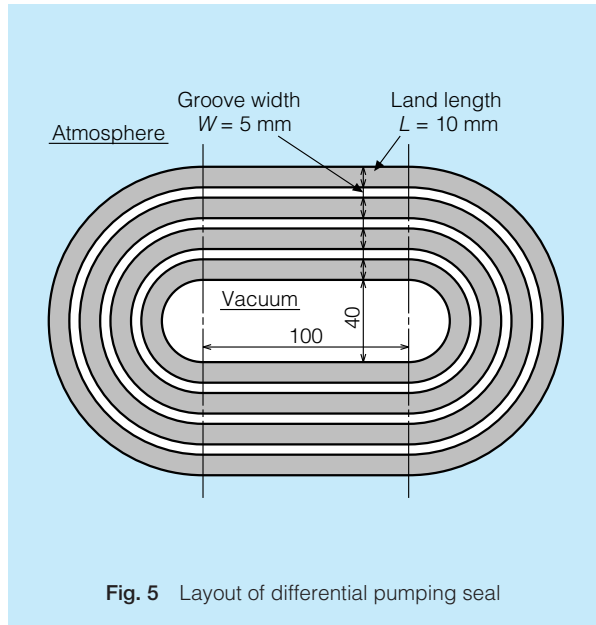


Fig. 5 Layout of differential pumping seal

シールからの漏れ込みによる圧力で 10^{-5} Pa以下が得られるように、図5に示すようにランド部の幅 $L = 10 \text{ mm}$ 、差圧溝の溝幅 $W = 5 \text{ mm}$ をシール形状に決定した。

4. 実験装置概要

実験装置の概略図を図6に示す。実験機の構成は、真空チャンバの上面に1軸テーブルから構成される平面形の差動排気シールを配置している。シール部の形状は、図5に示すように幅40 mm、長さ100 mmのスリット状開口部の周りに差動排気シールが設けられている。差圧溝となる溝は3段設けられており、それぞれ幅 5 mm、溝深さ10 mm、微小隙間部のランド部の幅10 mmと設定した。微小隙間を構成する固定（排気）側の上面の面精度は、平面度 3 μm 以下、ステンレス製スライダの下面の面精度は、平面度 2 μm 以下を実現できた。

本装置は、差動排気シール部の微小隙間を維持したまま可動部が移動できるように、転がり案内によるテーブルを構成している。テーブルの上下方向の案内精度を測定した結果、ピッチング精度が3.2 μrad 、微小隙間の変化が約 1 μm と、テーブル移動時の隙間変化を十分に小さくすることができた。

差動排気シールの排気は、配管の途中に配置したバルブによってポンプ3台を選択的に使用し、排気段数を任意に切替できるようになっている。真空度の測定は、チャンバ内の圧力を電離真空計にて測定し、各差圧溝の圧力は、差圧溝と排気ポンプとの配管の途中の圧力を隔膜真空計にて測定した。チャンバ単体の到達圧力は、Oリングによるシール状態で 2.4×10^{-5} Paを実現している。

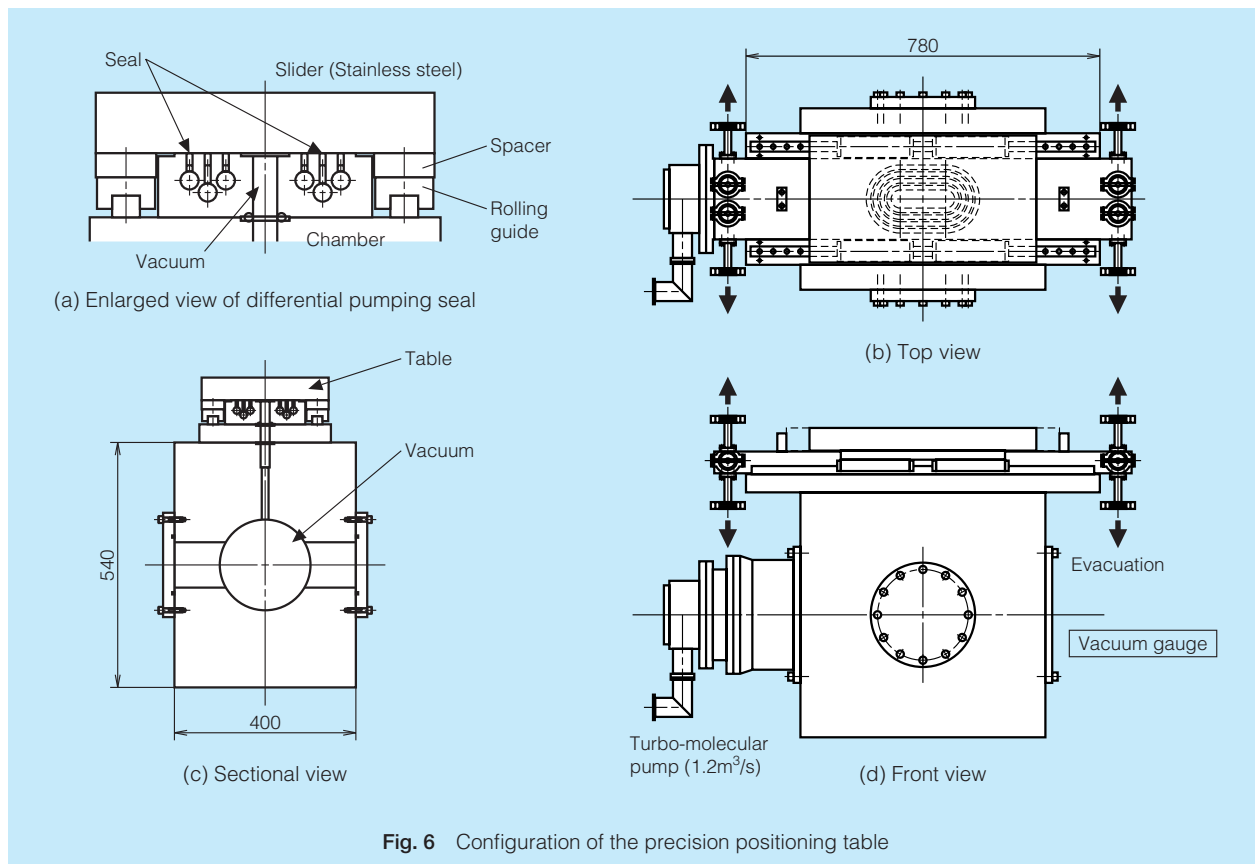


Fig. 6 Configuration of the precision positioning table

4.1. 固定隙間実験

差動排気シールの微小隙間と排気段数を変数として実験を行った。なお、微小隙間はスペーサの厚さにより5~40 μmに設定した。実験は、3段の真空排気によって真空チャンバ内を定常状態にした後、排気段数を変更し、真空チャンバ内の圧力を測定した。この結果から、差動排気シールの性能を評価した。

4.2. テーブル移動実験

テーブルの移動に伴う圧力上昇量を測定した。微

小隙間は15 μmに設定し、排気段数は3段階排気にて実験を行った。評価項目は、チャンバ内の圧力（全圧）と分圧を測定した。テーブル移動速度は、10、25、50、100 mm/sの4条件にて各移動距離において圧力が平衡値に達するまでテーブルを折返し運転し、定常状態からの圧力上昇量を測定した。

テーブル周囲の雰囲気として、湿度を50%に管理したクリーンルーム内における実験のほか、テーブルの周囲に覆いを設け、窒素ガス雰囲気（露点温度：-65℃）及び乾燥空気雰囲気（露点温度：-15℃）において実験を行った。

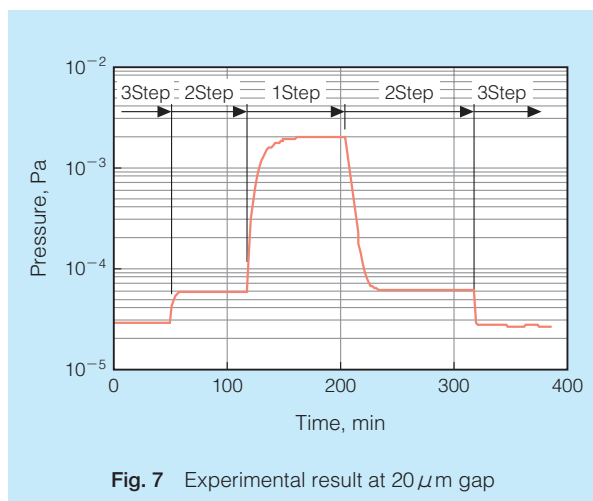


Fig. 7 Experimental result at 20 μm gap

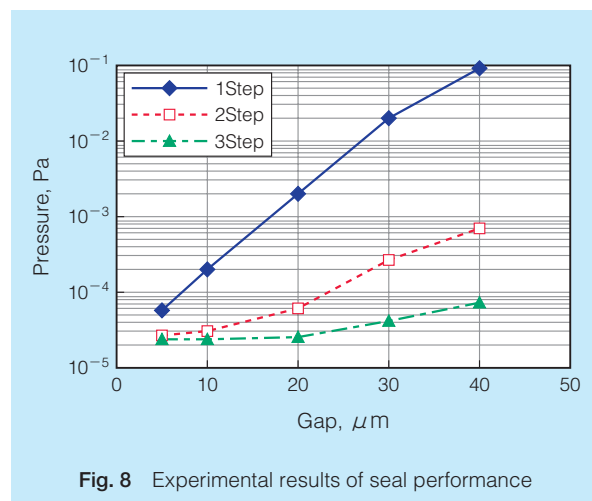


Fig. 8 Experimental results of seal performance

Table 2 Comparison between simulation and experimental results

Gap		1 Step	2 Step	3 Step
5 μm	Simulation	1.8×10^{-5} Pa	1.3×10^{-6} Pa	2.2×10^{-7} Pa
	Experiment	3.4×10^{-5} Pa	—	—
10 μm	Simulation	2.0×10^{-4} Pa	7.3×10^{-6} Pa	8.7×10^{-7} Pa
	Experiment	1.8×10^{-4} Pa	6.0×10^{-6} Pa	—
20 μm	Simulation	2.8×10^{-3} Pa	8.1×10^{-5} Pa	6.5×10^{-6} Pa
	Experiment	2.0×10^{-3} Pa	3.5×10^{-5} Pa	3.0×10^{-6} Pa
30 μm	Simulation	1.7×10^{-2} Pa	4.1×10^{-4} Pa	4.5×10^{-5} Pa
	Experiment	2.0×10^{-2} Pa	2.5×10^{-4} Pa	1.9×10^{-5} Pa
40 μm	Simulation	6.4×10^{-2} Pa	1.4×10^{-3} Pa	2.3×10^{-4} Pa
	Experiment	9.4×10^{-2} Pa	6.9×10^{-4} Pa	5.1×10^{-5} Pa

5. 実験結果

5.1. 固定隙間実験結果

固定隙間実験の実験結果の一例（隙間20 μm）を図7に、各微小隙間及び排気段数におけるチャンバの到達圧力を図8に示す。

微小隙間20 μmにおいて、シール部設計時の目標である 10^{-5} Paオーダの真空度を達成することができた。20 μm以下の隙間では、シール性能が本装置の真空チャンバの到達圧力に対して過剰性能であったため、2段排気は5 μm、3段排気については、10 μm以下のシール性能を適切に確認することができなかった。これは、時間の経過とともに圧力が徐々に低くなることと、室温変化の影響で圧力が 1.0×10^{-6} Pa程度変化したためである。

到達圧力をシール性能に換算すると、隙間20 μm、3段排気の場合、到達圧力が 2.7×10^{-5} Paであったことから、チャンバ単体の到達圧力を 2.4×10^{-5} Pa、ターボ分子ポンプの排気速度を $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ とすると、 $3.6 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ のシール性能を有していると計算される。この値は、 10^{-5} Paオーダの高真空環境を

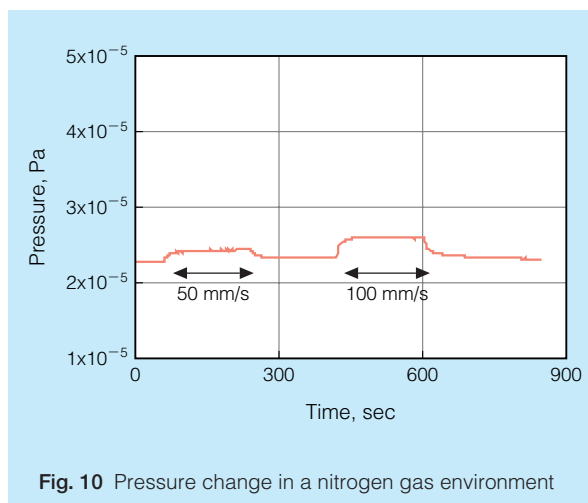
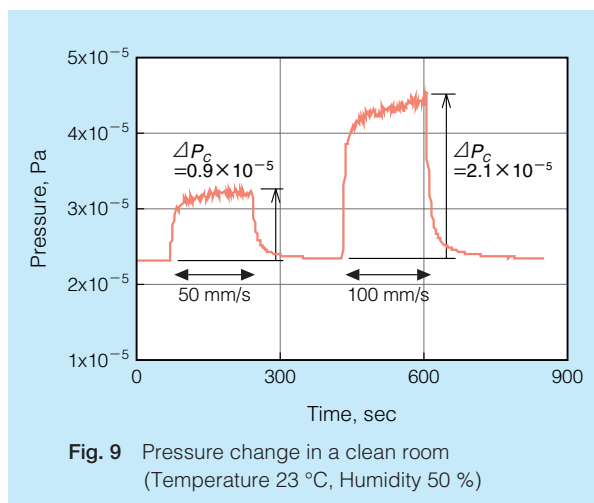
要求する真空装置においても、十分に使用可能なシール性能である。

固定隙間時の差動排気シールのシール性能を算出した結果と実際の実験結果を比較した結果を表2に示す。計算結果は差動排気シールによる圧力を示し、実験結果は、実際に測定された到達圧力とチャンバ単体の到達圧力 2.4×10^{-5} Paの差による差動排気シールのみによる圧力を示している。

表2に示すように計算値と実験値は良く一致しており、簡素化したシール性能の予測法が大概妥当であることがわかる。差圧室を排気する配管の途中に設けられた真空計による計測値も計算としており、中間流を考慮しないモデルでも十分な性能計算ができることを確認した。

5.2. テーブル移動実験結果

移動距離100 mm、湿度50 %の雰囲気の中で実験した結果を図9に示す。テーブルの往復運動につれて、真空チャンバ内の圧力上昇 ΔP_c 確認され、50 mm/sにおいて 0.9×10^{-5} Pa、100 mm/sにおいて 2.1×10^{-5} Paというテーブルの移動速度に依存した



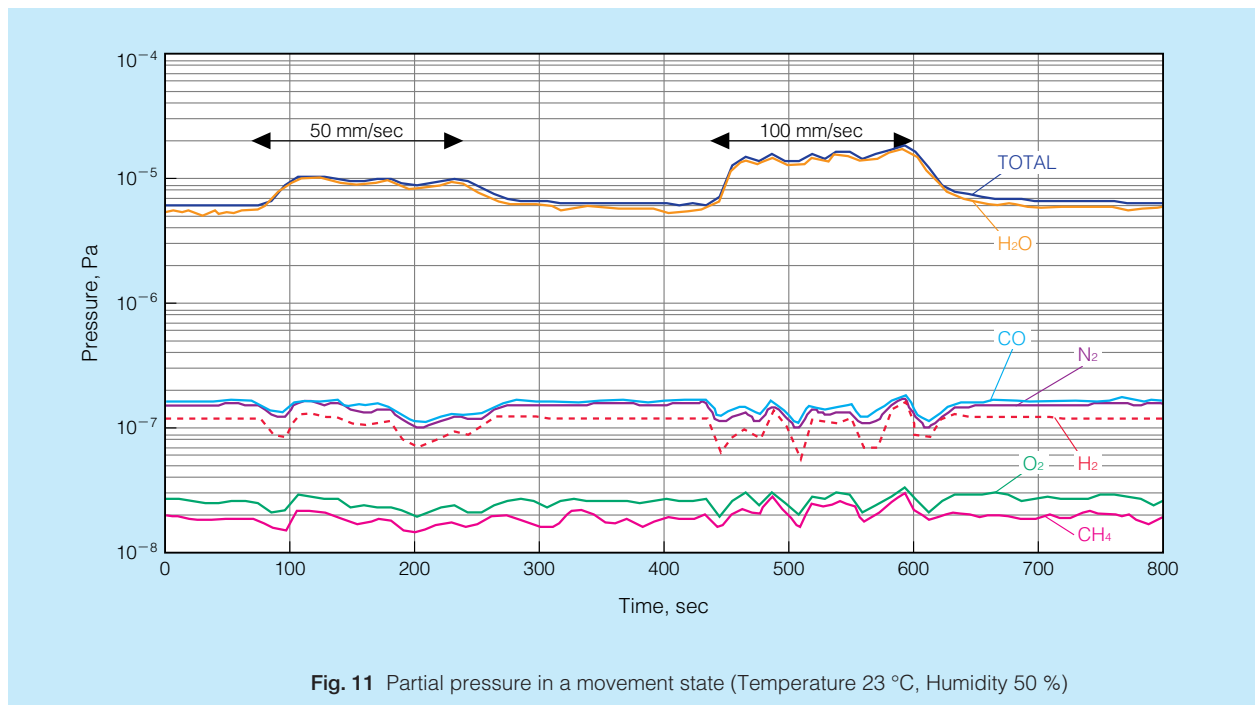


Fig. 11 Partial pressure in a movement state (Temperature 23 °C, Humidity 50 %)

Table 3 Difference of pressure change by atmosphere

	Moving speed	
	50 mm/s	100 mm/s
Air (Humidity : 50 %)	0.90×10^{-5} Pa	2.1×10^{-5} Pa
Air (Dew-point : -15°C)	0.25×10^{-5} Pa	0.46×10^{-5} Pa
N ₂ (Dew-point : -65°C)	0.18×10^{-5} Pa	0.33×10^{-5} Pa

結果が得られた。このような圧力上昇量は、 10^{-5} Pa オーダの高真空環境が要求される真空装置には大きな問題となる。

一方、この圧力上昇 ΔP_c は、テーブルの移動に伴う微小隙間の変化によっても生じる。しかし、テーブルの移動に伴う微小隙間の変化は $1 \mu\text{m}$ 程度であり、静止時の真空度にテーブル移動時のような明確な変化がないことから、測定された圧力上昇は微小隙間の変化によるものではない。そのため、この圧力上昇は大気圧雰囲気に出た際に、表面に吸着した分子が真空内で放出された脱離によるものと考えられる。

そこで、大気圧雰囲気での吸着分子量を低減する効果が期待される不活性ガスの一種として、窒素ガス雰囲気にて実験した結果を図10に示す。その結果、50 mm/sにおいて 0.18×10^{-5} Pa、100 mm/sにおいて 0.33×10^{-5} Paと圧力上昇量が1/5以下に抑制されることを確認できた。

次に吸着分子の種類を明らかにするために、湿度50%環境下におけるテーブル移動時のチャンバ内の分圧を質量分析計で測定した結果を図11に示す。結果は、各質量数の分圧を存在比から各分子の圧力に

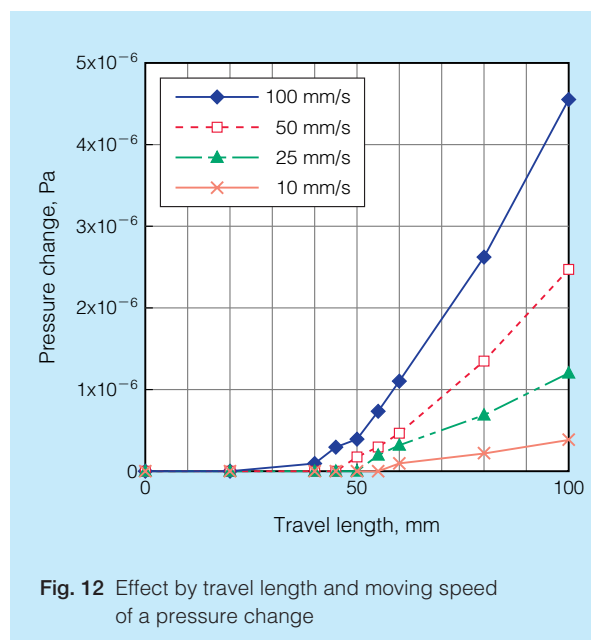


Fig. 12 Effect by travel length and moving speed of a pressure change

換算してある。水 (H_2O , OH^- , H^+) に関わる分圧が、静止時及び移動時ともにチャンバ内の圧力の90%以上を占めており、テーブルの移動に伴って全圧と水の分圧の両方がほぼ同一量の変化をしていることが分かる。この結果から、大気圧側を十分に乾燥させた気体で覆うことで圧力上昇量を低減できるものと考えられる。窒素ガスによる圧力上昇の抑制効果は、露点温度 -65°C と除湿された気体によるものと考えられる。

以上の推測を確認するために十分に乾燥させた空気 (露点温度 -15°C) にて実験を行ったところ、圧力上昇量を湿度50%雰囲気と比べ1/3以下に抑制す

ることができた。各雰囲気による圧力上昇量を表3にまとめる。大気圧雰囲気の除湿の度合いが圧力上昇量に大きく影響する結果が得られている。

乾燥空気中での圧力上昇量を移動速度と移動距離に対して評価した結果を図12に示す。圧力上昇量は、移動速度に概比例しており、移動距離からシール部の全体長さ55 mmを引いた長さに比例した傾向を示すことが明らかになった。移動距離と上昇量の関係からも、この圧力上昇は、大気圧雰囲気に面していた表面が真空チャンバ内に移動することで、吸着分子が真空チャンバ内へ脱離することで生じていると考えられる。

本装置では、移動速度に対して移動可能距離が比較的短い。そのため、シール長さを越えた距離から線形的に上昇量が増加する傾向が得られている。一般に、真空中の金属表面からの吸着分子の脱離は反比例的に減少することから、移動距離が増えた場合は、圧力上昇量は一定の値へ収束すると推測される。

6. 結 論

10^{-5} Paオーダの高真空環境に適用可能な差動排気シールの実現と運動時における圧力上昇の低減を目的として、直線運動形の差動排気シールに関する評価を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 差動排気シールは、 10^{-5} Paオーダの高真空環境を必要とする真空装置に対して十分に適用可能なシール技術であることを確認した。例えば、シール部の微小隙間20 μm 、3段排気の場合、 3.0×10^{-6} Pa $\cdot\text{m}^3/\text{s}$ のシール性能を有していることを確認した。
- (2) 中間流を考慮しない簡素化したモデルによるシール性能計算法の妥当性を、 10^{-5} Paオーダの高真空と大気圧をシールする高性能な差動排気シールにおいて確認することができた。
- (3) テーブル運動時における、大気圧中の吸着ガスが、真空中で脱離することによる圧力上昇を確認した。更に、圧力上昇量を移動速度と移動距離に対して定量化した。圧力上昇量は、移動速度に概比例しており、移動距離からシール部の全体長さを引いた長さに比例した傾向を示すことが明らかになった。

- (4) テーブル運動時における圧力上昇の主要因は、水に関する成分が大半を占めており、大気圧雰囲気に含まれる水分量（湿度）を少なくすることで圧力上昇を抑制できることを確認した。その抑制効果は、露点温度 -65 度の窒素ガスを用いた場合、圧力上昇量を湿度50 %に対して1/5以下に抑制できた。

今後は、更なるシール性能計算の精度向上とテーブル移動に伴う圧力上昇、特に移動距離を長くした場合の特性を明確にするために、現在よりも大形の差動排気シールを備え、静圧軸受と組合せた実験装置を製作する予定である。

最後に、本差動排気シールの開発にご協力をいただいた(株)荏原製作所に謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉本成香・吉田雄一・壇原伸補・三上喜秋・岩崎健一、高真空対応型静圧空気ジャーナル軸受の排気システムに関する研究、精密工学会誌、68-4 (2002)、597-601
- 2) 岩崎健一、真空対応型静圧気体軸受、油空圧技術、42-3 (2003)、44-51
- 3) 実用真空技術総覧編集委員会、実用真空技術総覧、(1990)、98-99、産業技術サービスセンター。
- 4) 富田幸雄、水力学、(1982)、72-73、実教出版

本社	TEL.03-3495-8200(代)	FAX.03-3495-8240	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
軸受販売統括部	TEL.03-3779-7282(代)	FAX.03-3779-8698	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
アフターマーケット統括部	TEL.03-3779-7278(代)	FAX.03-3495-8241	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
営業推進部	TEL.03-3495-8216(代)	FAX.03-3495-8241	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
第一営業部	TEL.03-3779-7251(代)	FAX.03-3495-8241	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
第二営業部	TEL.06-6945-8158(代)	FAX.06-6945-8175	大阪府大阪市中央区北浜東1-26(大阪日精ビル8F) 〒540-0031
販売技術統括部	TEL.03-3779-7315(代)	FAX.03-3779-7437	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
中部地域	TEL.052-249-5720(代)	FAX.052-249-5711	愛知県名古屋市中区新栄2-1-9(雲電フレックスビル西館2F) 〒460-0007
西日本地域	TEL.06-6945-8168(代)	FAX.06-6945-8177	大阪府大阪市中央区北浜東1-26(大阪日精ビル5F) 〒540-0031
東北支社	TEL.022-261-3735(代)	FAX.022-261-3768	宮城県仙台市青葉区一番町1-2-25(仙台NSビル) 〒980-0811
日立支社	TEL.0294-28-1501(代)	FAX.0294-28-1503	茨城県日立市大みか町4-13-23(ナフコビル3F) 〒319-1221
北関東支社	TEL.027-321-2700(代)	FAX.027-321-2666	群馬県高崎市栄町16-11(高崎イーストタワー3F) 〒370-0841
長岡営業所	TEL.0258-36-6360(代)	FAX.0258-36-6390	新潟県長岡市東坂之上町2-1-1(三井生命長岡ビル7F) 〒940-0066
上田営業所	TEL.0268-26-6811(代)	FAX.0268-26-6813	長野県上田市常磐城4-4-23(YJMビル) 〒386-0027
東京第一支社	TEL.03-3779-7324(代)	FAX.03-3779-7437	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
札幌営業所	TEL.011-231-1400(代)	FAX.011-251-2917	北海道札幌市中央区北二条東11-23 〒060-0032
宇都宮営業所	TEL.028-624-5664(代)	FAX.028-624-5674	栃木県宇都宮市今泉3-9-4(NA宇都宮ビル1F) 〒321-0966
東京第二支社	TEL.03-3779-7312(代)	FAX.03-3779-7437	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
東京第三支社	TEL.03-3779-7327(代)	FAX.03-3779-7435	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8575
西関東支社	TEL.046-223-9911(代)	FAX.046-223-9910	神奈川県厚木市中町2-6-10(東武太朋ビル5F) 〒243-0018
長野支社	TEL.0266-58-8800(代)	FAX.0266-58-7817	長野県諏訪市中洲5336-2(諏訪貿易流通会館轟ビル4F) 〒392-0015
静岡支社	TEL.054-253-7310(代)	FAX.054-257-6030	静岡県静岡市葵区伝馬町9-1(河村ビル4F) 〒420-0858
名古屋支社第一営業部	TEL.052-249-5740(代)	FAX.052-249-5826	愛知県名古屋市中区新栄2-1-9(雲電フレックスビル西館2F) 〒460-0007
名古屋支社第二営業部	TEL.052-249-5742(代)	FAX.052-249-5741	愛知県名古屋市中区新栄2-1-9(雲電フレックスビル西館2F) 〒460-0007
大阪支社第一営業部	TEL.06-6945-8154(代)	FAX.06-6945-8173	大阪府大阪市中央区北浜東1-26(大阪日精ビル7F) 〒540-0031
京滋営業所	TEL.077-564-7551(代)	FAX.077-564-7623	滋賀県草津市大路1-8-1(南洋軒ビル5F) 〒525-0032
大阪支社第二営業部	TEL.06-6945-8164(代)	FAX.06-6945-8176	大阪府大阪市中央区北浜東1-26(大阪日精ビル6F) 〒540-0031
松山営業所	TEL.089-941-2445(代)	FAX.089-941-2538	愛媛県松山市千舟町4-6-1(フコク生命ビル6F) 〒790-0011
兵庫支社	TEL.079-289-1521(代)	FAX.079-289-1675	兵庫県姫路市南駅前町100(パラジオ第2ビル8F) 〒670-0962
中国支社	TEL.082-285-7760(代)	FAX.082-283-9491	広島県広島市南区大州3-7-19(広島日精ビル) 〒732-0802
福山営業所	TEL.084-954-6501(代)	FAX.084-954-6502	広島県福山市曙町5-29-10 〒721-0952
九州支社	TEL.092-451-5671(代)	FAX.092-474-5060	福岡県福岡市博多区博多駅東2-10-35(JT博多ビル8F) 〒812-0013

NSKプレジジョン株式会社

本社	TEL.03-3779-7219(代)	FAX.03-3779-7434	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
営業本部	TEL.03-3779-7402(代)	FAX.03-3779-7434	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
販売技術部	TEL.03-3495-8144(代)	FAX.03-3779-7434	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
中部地域	TEL.052-249-5710(代)	FAX.052-249-5711	愛知県名古屋市中区新栄2-1-9(雲電フレックスビル西館2F) 〒460-0007
西地域	TEL.06-6945-8164(代)	FAX.06-6945-8176	大阪府大阪市中央区北浜東1-26(大阪日精ビル5F) 〒540-0031
西日本地域	TEL.092-451-5671(代)	FAX.092-474-5060	福岡県福岡市博多区博多駅東2-10-35(JT博多ビル8F) 〒812-0013
東日本支社	TEL.03-3779-7289(代)	FAX.03-3779-7435	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
宇都宮営業所	TEL.028-624-5664(代)	FAX.028-624-5674	栃木県宇都宮市今泉3-9-4(NA宇都宮ビル1F) 〒321-0966
西東京支社	TEL.042-645-7022(代)	FAX.042-645-7022	東京都八王子市明神町4-7-14(八王子ONビル8F) 〒192-0046
厚木営業所	TEL.046-223-9914(代)	FAX.046-223-9910	神奈川県厚木市中町2-6-10(東武太朋ビル5F) 〒243-0018
北関東支社	TEL.027-321-2700(代)	FAX.027-321-2666	群馬県高崎市栄町16-11(高崎イーストタワー3F) 〒370-0841
長野支社	TEL.0266-58-8800(代)	FAX.0266-58-7817	長野県諏訪市中洲5336-2(諏訪貿易流通会館轟ビル4F) 〒392-0015
甲府営業所	TEL.055-222-0711(代)	FAX.055-224-5229	山梨県甲府市住吉2-3-23(中沢ビル) 〒400-0851
静岡支社	TEL.054-253-7310(代)	FAX.054-275-6030	静岡県静岡市葵区伝馬町9-1(河村ビル4F) 〒420-0858
名古屋支社	TEL.052-249-5710(代)	FAX.052-249-5711	愛知県名古屋市中区新栄2-1-9(雲電フレックスビル西館2F) 〒460-0007
北陸支社	TEL.076-242-5261(代)	FAX.076-242-5264	石川県金沢市八日市1-770 〒921-8064
関西支社	TEL.06-6945-8164(代)	FAX.06-6945-8176	大阪府大阪市中央区北浜東1-26(大阪日精ビル5F) 〒540-0031
京滋営業所	TEL.077-564-7551(代)	FAX.077-564-7623	滋賀県草津市大路1-8-1(南洋軒ビル5F) 〒525-0032
西日本支社	TEL.092-451-5671(代)	FAX.092-474-5060	福岡県福岡市博多区博多駅東2-10-35(JT博多ビル8F) 〒812-0013
広島営業所	TEL.082-285-7760(代)	FAX.082-283-9491	広島県広島市南区大州3-7-19(広島日精ビル) 〒732-0802
福山営業所	TEL.084-954-6501(代)	FAX.084-954-6502	広島県福山市曙町5-29-10 〒721-0952
熊本営業所	TEL.096-337-2771(代)	FAX.096-348-0672	熊本県熊本市楠8-16-50 〒861-8003

日本精工株式会社

本社	TEL.03-3779-7111(代)	FAX.03-3779-7431	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
産業機械軸受本部	TEL.03-3779-7227(代)	FAX.03-3779-7644	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
アフターマーケット事業本部	TEL.03-3779-8893(代)	FAX.03-3779-7644	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
自動車事業本部	TEL.03-3779-7189(代)	FAX.03-3779-7917	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
二ードル軸受事業本部	TEL.03-3779-7288(代)	FAX.03-3779-7917	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
精機本部	TEL.03-3779-7163(代)	FAX.03-3779-7644	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
東日本自動車第一部(厚木)	TEL.046-223-8881(代)	FAX.046-223-8880	神奈川県厚木市中町2-6-10(東武太朋ビル5F) 〒243-0018
東日本自動車第一部(富士)	TEL.0545-57-1311(代)	FAX.0545-57-1310	静岡県富士市永田町1-124-2(明治安田生命富士ビル2F) 〒417-0055
東日本自動車第二部(大崎)	TEL.03-3779-7361(代)	FAX.03-3779-7439	東京都品川区大崎1-6-3(日精ビル) 〒141-8560
東日本自動車第二部(東海)	TEL.0566-71-5351(代)	FAX.0566-71-5365	愛知県安城市三河安城町1-9-2(第2東祥ビル5F) 〒446-0056
東日本自動車第二部(熊谷)	TEL.048-522-8070(代)	FAX.048-522-8071	埼玉県熊谷市筑波3-4(熊谷朝日八十二ビル7F) 〒360-0037
東日本自動車第三部(宇都宮)	TEL.028-624-4270(代)	FAX.028-624-4271	栃木県宇都宮市今泉3-9-4(NA宇都宮ビル3F) 〒321-0966
東日本自動車第三部(東海)	TEL.0566-71-5260(代)	FAX.0566-71-5365	愛知県安城市三河安城町1-9-2(第2東祥ビル5F) 〒446-0056
中部日本自動車部(豊田)	TEL.0565-31-1920(代)	FAX.0565-31-3929	愛知県豊田市下市場町5-10 〒471-0875
中部日本浜松自動車部	TEL.053-456-1161(代)	FAX.053-453-6150	静岡県浜松市板屋町111-2(浜松アクタワー19F) 〒430-7719
西日本自動車部(大阪)	TEL.06-6945-8169(代)	FAX.06-6945-8179	大阪府大阪市中央区北浜東1-26(大阪日精ビル5F) 〒540-0031
西日本自動車部(広島)	TEL.082-284-6501(代)	FAX.082-284-6533	広島県広島市南区大州3-7-19 〒732-0802

お問合せは ☎ 0120-502260 コールセンターまたは、もよりの支社・営業所にお申し付けください。

日本精工株式会社は、外国為替及び外国貿易法等により規制されている製品・技術については、法令に違反して輸出しないことを基本方針としております。規制に該当する当社製品を輸出される場合は、同法に基づく輸出許可を取得されますようお願い致します。なお、当社製品の輸出に際しては、兵器・武器関連用途に使用されることのないよう十分留意下さるよう合わせてお願い致します。

NSK TECHNICAL JOURNAL

NOVEMBER 2006 No. 681

印刷 平成18年11月2日
発行 平成18年11月8日
編集人 正田 義雄
発行人 永島 雅美
印刷所 久下印刷株式会社
発行所 **日本精工株式会社**
広報部 TEL 03-3779-7050
東京都品川区大崎1-6-3日精ビル

非売品

無断転載を禁ずる

このジャーナルの内容については、技術的進歩及び改良に対応するため製品の的外観、仕様などは予告なしに変更することがあります。
なお、ジャーナルの制作には正確を期するため細心の注意を払いましたが、誤記脱漏による損害については責任を負いかねます。



日本精工株式会社

