

# 気体潤滑技術の源流から現在まで

## Gas Film Lubrication Technology

### - From its Headspring to the Present Current -



矢部 寛\*

Prof. Hiroshi YABE

The development of gas film lubrication technology is briefly reviewed in this article. Some noteworthy studies (by Hirn, Tower, Reynolds, Kingsbury and Harisson) before the "dawn" in the history of gas lubrication are summarized, then the current of the development of gas lubrication after the "burst" of the technology in 1950's is outlined with referring to a number of papers appeared in the Transactions of ASME as a measure of the trend of the technology.

## 1. はじめに

気体潤滑技術は、その特異な長所を生かせば、通常の転がり軸受やすべり軸受では達成できないような応用展開ができ、現在、工業のいろいろな分野で用いられている。このような気体潤滑技術の開発が本格的に取り組まれた年代は比較的明確であり、それは1950年代後半であるとされる。

この気体潤滑技術開発の黎明期を「気体潤滑紀元」とするならば、全ての技術がそうであるように、それまでの「紀元前」にも「紀元後」の発展の礎となるいくつかの道標的な研究があった。

本稿では、そのような、「紀元前」の研究を振り返るとともに、「紀元後」の気体潤滑技術の開発の流れについてごく簡単に考えてみることにしたい。

## 2. 「紀元前」の時代の流体潤滑の研究

図1に、気体潤滑技術と、いくつかの潤滑関係の研究の源流(一応、1960年までとした)を年表の形で示す。

### 2.1 イルンのつづやき

気体潤滑の可能性を初めて指摘したのはイルン(G. A. Hirn)<sup>1)</sup>で、1854年のことである。イルンはジャーナル軸受の摩擦仕事を、彼が「摩擦バランス」と呼んでいる方法で測定した。摩擦バランス法は、後の図2のタワーの実験装置と同列の形式であり、詳しくは文献2)を参照されたい。

報告の中で、イルンは『油の痕跡を拭ってから

実験をしたところ、軸受は空気潤滑され、摩擦力は油やグリースの場合の1/300程度にまで下がった』、『水や空気も潤滑剤となりうるが、その場合は、それらを軸受の中に引き込むために十分速く軸を回転しなければならない。速度を下げるやいなや、粘性的でないそれらの流体は圧力によって押し出され、両面はすぐに接触し、摩擦は一挙に大きくなる』というような主旨のことを述べている。

1850	1854	Hirn	軸受摩擦発熱の実験
	1873	Thurston	潤滑剤の摩擦係数の測定
	1881	Hertz	弾性接触理論
	1883	Petrov	流体軸受摩擦の理論
	1883	Tower	軸受摩擦の実験
	1885	Tower	油膜圧力測定
	1886	Reynolds	流体軸受理論
	1897	Kingsbury	空気軸受の実験
1900	1902	Stribeck	軸受摩擦特性
	1904	Sommerfeld	潤滑膜圧力分布解
	1905	Michell	傾斜パッド軸受、2次元流体潤滑理論
	1905	Kingsbury	傾斜パッド軸受
	1913	Harisson	気体潤滑理論
	1919	Hardy	表面吸着層による潤滑効果
	1925	Gümbel	流体軸受摩擦理論
1950	1946	Holm	真実接触面積の概念
	1950	Bowden & Tabor	境界潤滑モデル
	1953	Dubois & Ocavirk	短軸受理論
	1959		第1回気体軸受国際会議

図1 「紀元前」の研究の年表

Chronological table of the studies on lubrication before "dawn" age

\*京都大学大学院工学研究科 精密工学専攻 教授 工学博士

しかし、イルンは元来熱力学分野の研究者であり、彼の興味は「摩擦発熱」あるいは「機械仕事と熱量との関係」の方にあったようで、「軸受」についてはそれ以上追求しなかった。

### 2.2 タワーの意気込みといらだち

気体潤滑ではないが、流体潤滑の歴史を述べる上ではタワー(B. Tower)の実験の話は避けて通れない。

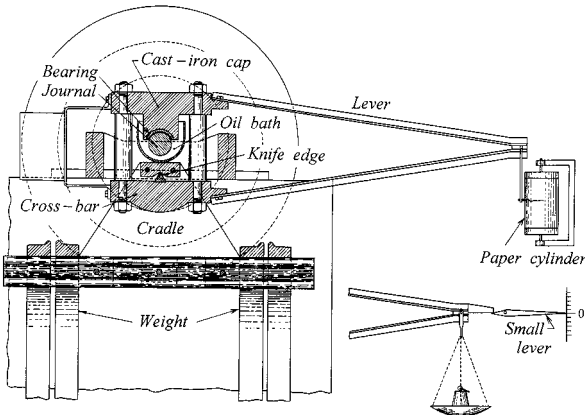


図2 タワーの実験装置

Schematic diagram of Tower's experimental apparatus

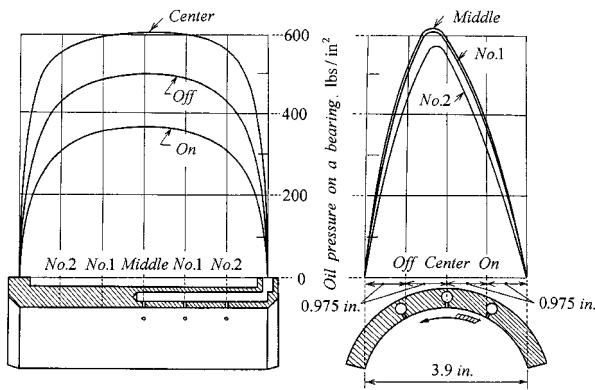


図3 タワーの実験結果

Experimental results by Tower

英国機械学会の摩擦委員会の委託により、タワーは鉄道車両用ジャーナル軸受(部分軸受形式)の摩擦の実験的研究に取り組み、1883年、委員会の前で結果を報告した<sup>3),4)</sup>。図2はその実験装置で、軸は径4 in(101.6mm)、長さ6 in(152.4mm)の鋼製、軸受は砲金-真鍮製である。軸受摩擦によるモーメントを下部の錘の移動と釣り合わせて測定する。タワーは軸受摩擦に関する基礎的な特性とともに、『非常に興味深い発見』として、『軸受すきま内の油には平均面圧の2倍以上にもなる油膜圧力が発生し、軸受は油膜の上(彼はこれを seat

of pressure と言っている)に浮いている状態にある』ことを報告した。これは「流体潤滑機構」に初めて注目したものであった。タワーは自分では流体潤滑の機構を理論的に説明することはできなかったが、流体潤滑の機構の存在とその重要性を直感的に、あるいは実験による経験から感じていたように思われる。タワーは、さらに、流体潤滑の存在を強調するため、軸受すきま内での圧力分布を測定して、約1年の後、再び委員会に報告している<sup>5)</sup>。図3はその結果である。

しかしながら、この報告を受けた委員会の面々にはこの実験が意味する工学的本質を理解できなかったようである。文献3)~5)には約半分を割いて委員会の方々のコメントが載せられているのであるが、現在の我々からみると、本当に重要な「流体潤滑」に関する議論とはほど遠い、かなりピントはずれなものばかりである。そのときのタワーのいらいらした気持ちが伝わってくるとともに、新しい技術の芽に対しては常に心して対さないと、今までの既成概念の陰につい見捨てがちになるという教訓を得た次第である。

### 2.3 レイノルズの才能

タワーの指摘は、レイノルズ(O. Reynolds)の解析<sup>6)</sup>によって流体潤滑機構の理論という見事な形にまとめられた。レイノルズの論文は大略3つの部分から成っている。

その1は潤滑油(オリーブ油)の粘度の温度依存性の実験である。軸受潤滑機構の定量的な評価には軸受すきま内での粘度の値が欠かせないという認識にたつものである。

その2は、勿論、くさび膜作用による流体潤滑膜圧力発生機構の説明で、その内容は、現在我々が機械要素学などの講義で行っている説明と全く変わらない。1世紀前にその本質が説明されている。

その3は圧力分布の理論と実験の比較で、実験値としてはタワーの結果を用いた(当然ながら、当時、それ以外に測定例がなかった)。タワーの実験は注意深く行われ、種々のデータが記録されているが、唯一つ、軸受すきまの値が不詳であった(もっとも、タワー自身は、軸と軸受は完全に密着している、すなわち軸受すきまはゼロであると考えていた)ことと、軸受すきま内での温度(粘度)は推定するより他になかったことが問題点であった。レイノルズは論文の後半をさいて、実験データから、半径すきまの大きさと軸受すきま内温度の推定を行い、理論と実験の比較を行っている。図4はその結果で、ここでは、軸温度70 F

(21), 半径すきま $0.00077\text{in}$ ( $19.6\ \mu\text{m}$ ), 偏心率 $0.51$ , 偏心率 $48^\circ$ としている。

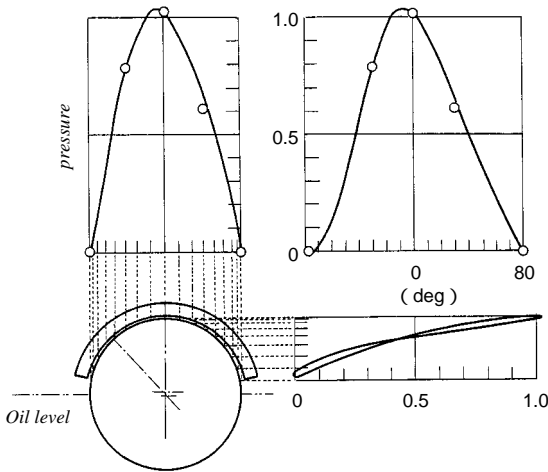


図4 レイノルズの計算結果  
Calculated results by Reynolds

### 2.4 キングスベリーのセンス

空気潤滑軸受を対象にした実験を最初に行ったのはキングスベリー(A. Kingsbury)である<sup>7)</sup>。図5はその実験装置で、軸は径 $6\text{in}$ ( $152.4\text{mm}$ ), 長さ $6.25\text{in}$ ( $158.8\text{mm}$ ), 重さ $50.5\text{lb}$ ( $224.4\text{N}$ ) [これが軸受負荷となる]の鋼製, 軸受は鋳鉄製, 直径すきま $0.0016\text{in}$ ( $41\ \mu\text{m}$ )であった。彼はこの装置を用い, 非常に苦勞して, 軸偏心率, 偏心率方向, 圧力分布, 最大圧力位置, 軸受摩擦等を測定している。圧力分布の測定結果の1例を後の図7中に示す。

図6は軸偏心率の測定原理を示す図である。軸受Rに取り付けられた微動ねじSを送ることによって, ねじの先と軸面とを接触させ(a), 通電によってそれを検知する。つぎに軸受を回転させ再び通電が生じる位置bを求める。a, bの位置を変えてこれを何度か行えば, 軸変位方向IJと最小すきまCHをかなりの確かさで測定できるという仕組みである。このような方法で, 彼はミクロン単位での軸偏心率の測定を行っている。

このような実験手腕の巧みさや論文に記載されている言葉の端々から, キングスベリーの極めてすぐれた工学的センスを伺うことができるのであるが, 特に, 気体軸受の研究に関して, 彼は, 『通常の目的のために空気を用いることを提唱しているのではない。しかし, 空気潤滑の利点が認められるような場合があれば, そこでは有益に使用されるようになるであろう』と語っている。誠にもって正鵠を射た言葉であると思う。

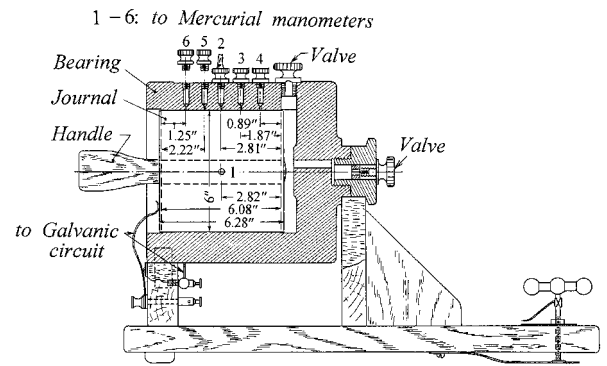


図5 キングスベリーの実験装置  
Schematic diagram of Kingsbury's experimental apparatus

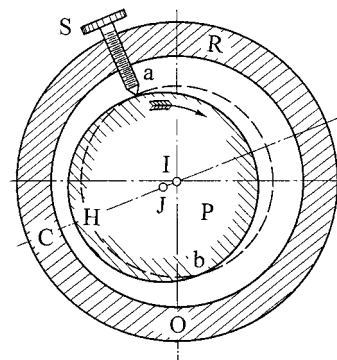


図6 偏心率の測定原理  
Explanatory diagram for measurement of the displacement of rotor

### 2.5 ハリソンの努力

気体潤滑ジャーナル軸受の特性解析に取り組んだのはハリソン(M. A. Harrison)である<sup>8)</sup>。非圧縮性流体によるジャーナル軸受すきま内圧力分布解は, すでにゾンマーフェルトが発表していた(1904年)が, ハリソンはそれをもとに, 今日, ハリソンの式として知られる圧縮性流体潤滑の基礎方程式を導き, また, 境界条件として, 圧力の周期条件と, 軸受すきま内で気体の質量が保存されるという条件式を示した。しかし, 基礎式は非線形方程式であり, 解析解を得ることはできなかった。そこで, 彼は, 手計算でルング法によって数値的に解を求めることにしたが, 2個の積分定数を逐次近似で決定する必要があり, 一本の圧力分布解を得るのに, 約12000個の数字を書いたと述懐している。ともあれ, ハリソンはそのような苦勞の末にキングスベリーの実験結果と対照すべき理論解を得た。図7はその結果の1例である。



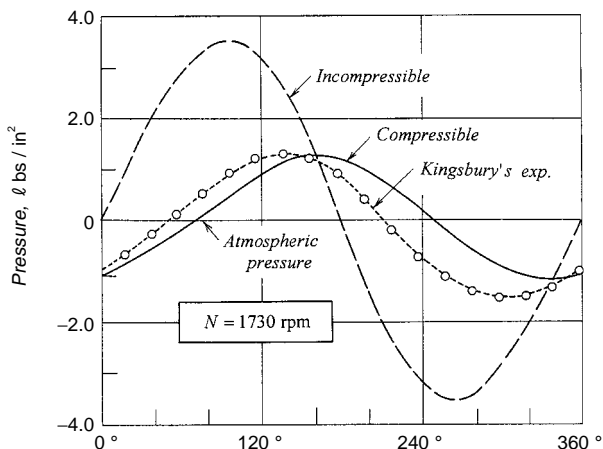


図7 ハリソンの計算結果  
Calculated results by Harisson

注：キングスベリーの実験結果によると偏心率約0.1，偏心角約52°である。

### 3. 「紀元後」の気体潤滑技術

#### 3.1 気体潤滑技術開発の駆動源(その1)

このように、気体潤滑問題については、偉人たちの才能と努力によって、その時点ではいつ誰が通るか分からない道に道しるべが建てられていった。そして、気体潤滑技術は、1950年代後半、「発明の母」とも言うべき開発の必要性から、急激に、クローズアップされることとなる。

この「紀元期」の気体潤滑技術開発の駆動源は、米国における宇宙航行用ジャイロ軸受としての必要性和英国における原子炉用炭酸ガス循環機軸受としての要請であったと言われている。東西冷戦や原子力開発という国家的背景を受け、キングスベリーが言う「気体潤滑による以外にはない」という条件にマッチして、気体潤滑の開発が始められた。当初は国家の機密技術とされていたようであるが、やがて民生用に開放され、また、時をほぼ同じくしてIBM社が磁気記録開発の旗揚げを発表したこともあって、気体潤滑技術は華々しく採り上げられることとなった。1959年には、気体潤滑技術開発のその後の指針を明らかにする上で意義深い第1回気体軸受国際会議がワシントンで開催され、一方、英国では、1963年以降、隔年ごとに気体軸受シンポジウムが開催されるなど、活発な活動が続いた。

#### 3.2 気体潤滑技術の進展

図8に、ごく概略の流れを知るために、Trans. of ASMEに発表された潤滑関係論文数とその中のすべり軸受関係の論文、および、さらにその中の気体潤滑関係の論文の数の推移を示した。勿論、他の雑誌にも多くの成果が報告されているし、また、会議のProceedingとして別にまとめられている場合も多い。したがって図8は単にごく概略の指標と考えていただきたい。

1960年前後から気体潤滑関係の論文が発表されはじめ、1960～1965年では、潤滑関係論文総数が年平均20件程度である中、気体潤滑関係が6～7件であるから、気体潤滑関係は論文数自体はそんなに多くないが、それが占める割合から見るとかなり多いと言え、その傾向は1970年頃まで続く。J. of Lub. Tech. が発刊されることによって、1967年を境に潤滑関係論文数の絶対量はかなり増加している。1968年には第2回気体潤滑国際会議が開催されたこともあって、気体潤滑関係の論文数はピークを迎えている。

このようにして、1960年代に気体潤滑技術は著しい進展を遂げ、ほぼその全容が明らかにされた。軸受基礎特性の解析をはじめとし、静圧および動圧の種々の形式の軸受の特性、動特性解析法や高速安定化法、あるいは気体軸受の応用、さらには、自動調整形式や自動制御形式の工夫など、研究は多方面にわたっている。

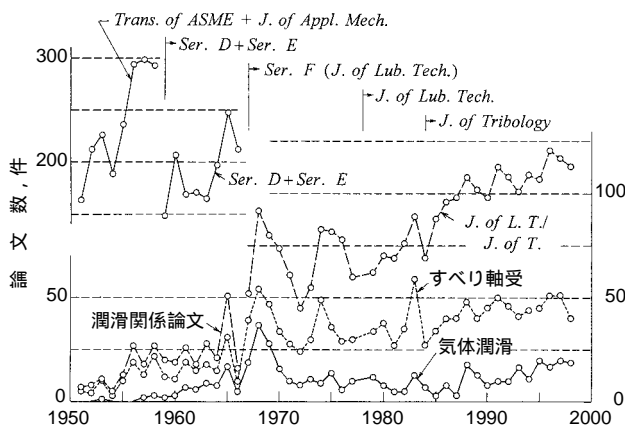


図8 Trans. of ASME掲載論文数

Trend of the number of papers appeared in Trans. of ASME

注：「すべり軸受」：油潤滑すべり軸受，スクイズフィルムダンパー等を含む。EHL関係は含まない。

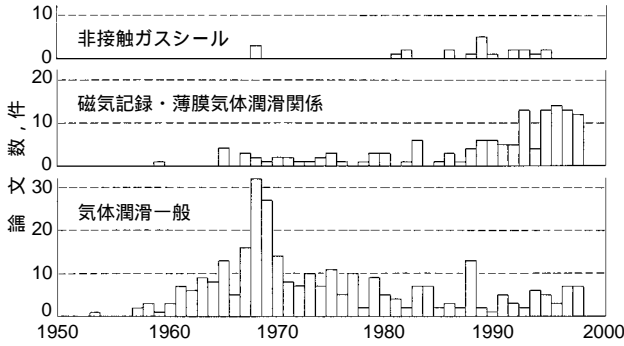


図9 気体潤滑関係論文数の内訳  
Number of papers concerning gas lubrication

### 3.3 気体潤滑技術開発の駆動源(その2)

気体潤滑技術開発の第2の駆動源は電子計算機の発達のための要請であった。

1つは、半導体部品の加工や検査のための超精密な支持と位置決めの一貫性によるもので、スライディングマシン、エアスライド、ロータリーテーブルなどの高精度な応用例が高度に発達した。

もう1つは、磁気記録関係、すなわち磁気ディスク上での浮動ヘッドスライダの浮上支持である。磁気記録装置の記録密度向上のためには浮動ヘッドの浮上量を極度に小さくすることが必要であり、浮上量低下の割合はおよそ10年間で1桁の割合で進み、現在  $0.02 \mu\text{m}$  程度に達しているが、まだその低下の割合は衰えていない。浮動ヘッドの浮上は気体潤滑技術を適用して行われているが、そのような極微小すきまでの気体潤滑の解析においては、気体を分子として扱う気体分子運動論に基礎を求めねばならず、薄膜気体潤滑という分野が展開した。この間の事情は他の種々の場で紹介されていることもあり、ここでは詳細は省略させていただき、図9を示すだけにとどめたい。

図9は図8の中、気体潤滑関係の論文をさらに分類し、磁気記録関係(磁気ディスク、磁気テープなど)、後で述べる非接触ガスシール関係、その他気体潤滑一般に分けて、その数を示したものである。1980年代後半からの電子計算機関係への気体潤滑技術の精力的な展開が読みとれる。

### 3.4 第3の駆動源は?

パン(C. H. T. Pan)は1990年の ASME-STLE Tribology Conference において、気体潤滑研究の流れについて総括し、その中で、気体潤滑技術開発の第3の駆動源は非接触ガスシールではないかと述べている<sup>9)</sup>。

非接触ガスシールは、気体軸受における軸受剛性を得る原理を援用してシールすきまを小さく安定に保ち、それによって高圧気体の漏れを抑えよ

うとするものである。確かに、近年、非接触ガスシールがかなり多くの分野で用いられるようになってきており、またその作動条件、すなわち回転速度やシール差圧が益々厳しいものになってきているということは耳にするが、学術誌で報告された論文数という点では意外に少ない。これは、非接触ガスシールの作動は基本的には気体軸受の場合と同じであり、理論的な面からの新しい知見が比較的少ないこと、それよりも、各社が各自のノウハウを蓄積し、公表したがないことがその一因ではないかと思う。ちなみに、Trans. of ASME 掲載の非接触シール関係の論文数は図9に示す程度である。

1980年代以降の気体潤滑関係論文はその多くが、上述のように、磁気記録関係なのであるが、その他の分野として、高速回転軸受を対象とする注目しておくべき一群の論文がある。それは、マイクロガスタービン等の軸受への応用のための研究であって、そこではリーフオイル軸受やバンブオイル軸受(図10参照)などが用いられている。

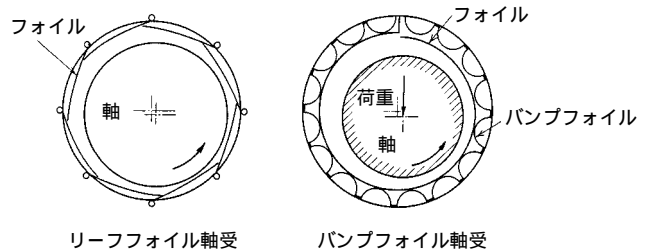


図10 フォイル軸受  
Schematic diagram of foil bearings

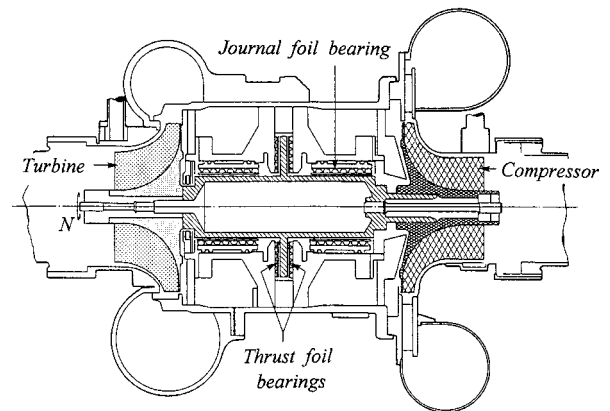


図11 小型ガスタービン用軸受への応用  
Application of foil bearing to a small-sized gas turbine machine

図11はその一例<sup>10)</sup>であって、これは航空機の空気循環機用の軸受として開発されたものでバンブフォイル軸受を用いている。ロータは重さ772g、ジャーナル軸径35mm、軸受長さ31mm、称呼直径すきま76 $\mu$ mで、約9万rpmの高速運転ができたと報告されている。この種の軸受の最大の特徴は面圧の大きさであって、同形式の軸受で、回転数6万rpmで約0.66MPaの高面圧を達成している。

#### 4. むすびに代えて

気体潤滑技術の開発が本格的に始められてからほぼ半世紀を経た。

よく言われるように、技術は何かの駆動源があって一段と発展する。気体潤滑技術発展の次の駆動源は何なのだろうか。多分真近に存在しているのだろう。マイクロマシン用軸受ではないかと言う声も聞く。超クリーンな軸受であることを売り込み文句にできないかとの意見もある。ここでは私見でもよいから何かの展望を述べて締めくくべきなのだが、凡庸の私にはそれを見極めることができない。願わくば、自分の力でそれを見付けられることを祈っている。

#### 参考文献

- 1) G. A. Hirn: Bulletin Soc. Ind. Mulhouse, 26 (1854) 188-237.
- 2) D. ダウソン: トライボロジーの歴史, 工業調査会 (1997) 140.
- 3) B. Tower: Proc. Inst. Mech. Eng., 36 (1883) 632-659.
- 4) Proc. Inst. Mech. Eng., 36 (1884) 29-35.
- 5) B. Tower: Proc. Inst. Mech. Eng., 37 (1885) 58-70.
- 6) O. Reynolds: Phil. Trans. Roy. Soc. of London, Ser. A, 177 (1886) 157-234.
- 7) A. Kingsbury: Journal of Am. Soc. Naval Eng., 9 (1897) 267-292.
- 8) M. A. Harrison: Trans. Cambridge Phil. Soc., 22 (1913) 39-54.
- 9) C. H. T. Pan : Proc. 1990 ASME/STLE Tribology Conference (1990) 31.
- 10) H. Hashmat & P. Hermel : Proc. of 19th Leeds-Lyon Symposium on Thin Film in Tribology, Elsevier (1993) 559.