

情報機器ハードウェアのナノテクノロジー — 分子流体潤滑理論との40年 —

福井 茂寿

鳥取大学大学院工学研究科 機械宇宙工学専攻 応用数理工学講座

Nanotechnology for Information Storage Equipment
- Struggling with the Molecular Fluid-Film Lubrication Theory for 40 Years -

Shigehisa FUKUI

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Graduate School of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: fukui@damp.tottori-u.ac.jp

Abstract: This paper states the research and development (R&D) of the flying head sliders with nanometer spacing in the HDD (Hard Disk Drive) and its generalized gas-film lubrication theory based on the molecular gas dynamics, which the author experienced and struggled in NTT laboratory and Tottori University for these 40 years.

Key Words: Molecular gas-film lubrication, Long wave equation, Lubrication, Tribology, Head disk interface, Hard disk drive

1. まえがき

筆者は、NTT 研究所および鳥取大学で 40 年の間、情報ナノシステムの微小メカニズムの高機能化の研究を進めてきた。具体的には、コンピュータ用記憶装置であるハードディスク装置（HDD：Hard Disk Drive）の機構部の中枢である浮動形磁気ヘッドと記録ディスク間のトライボロジー（摩擦潤滑学）であり、特に超微小すきまで空気浮上するメカニズムの作動性解析である。以下では、まず、企業の研究所で開発しその後も研究を深化させた、微小すきまを対象にした分子気体潤滑（MGL）理論の構築について述べ、さらに大学に移ってからの気体および液体薄膜の特性の解明について、折々の出来事を思い起こしながら述べる。

2. 学生時代

2.1 中学高校のころ

高校 2 年生の進路を考えている時期が、明治元年から数えて 100 年目である「明治百年」（1968 年）であった。たまたま見た NHK のドキュメンタリーで、日本が明治初年に外国人技術者による技術指導により先進国の仲間入りとなった様子に感激し、自分にも将来何か後進国に技術指導がで

きればと考えた。道路や建物を造る土木・建築技術もさることながら、これからは飛行機などもよいのではと考え、大学は航空工学科を選んだ。航空や宇宙ということばに、かっこよさを感じたのも手伝った。

小中学生の頃は、工作少年であった。テレビ番組で鉄道模型（O ゲージ）を知り、簡単な O ゲージ鉄道模型組立キットから始まり、ゲルマニウムラジオ、月刊誌「模型とラジオ」、「初歩のラジオ」を経てアマチュア無線に興味を持ち、中 1 で電話級アマチュア無線技士の試験に合格した。真空管（MT 管）式の受信機製作のパーツ購入のため、小遣いをため込んで大阪の日本橋の電気街（東京の秋葉原に相当）によく通った。高校では勉強が忙しくなり、無線いじりをやや休止していた時期の進路選択が上記の航空工学ということであるが、所詮工作少年の延長線上であった。

2.2 大学のころ

京都大学に入学したのは 1970 年。学生紛争のためその前年には東大の入試がなく、入学した頃も学生運動で学内は騒然としていた。高校時代に縁がなかった運動部に入部しようと思い、目新しかったカヌー部に入った。500 m や 1,000 m の平坦な水路でタイムを競うカヤックカヌーで、練習には京都市内から滋賀の琵琶湖南の瀬田川に足しげ

く通った。当時はまだカヌーの競技人口が少なく、インカレにも出場し3回生後半からは主将も務めた。主将の約1年間は下宿を瀬田川近くに移し、1時間近くかけて大学に通った。4回生の最後まで部に残った同期の4人とは、今も親しい。そんな学生生活のお蔭で、勉強は随分おろそかになり、講義に出るのがやつの学生であった。しかも、筆者の4回生の時には、大学紛争のあおりで卒論が簡略化され(?)、輪講そのものは密度濃くやるものの、卒業時には卒論を書くこともなくタイトルと名前を書いた表紙1枚だけを卒論代わりに提出して卒業できた。今ではとても考えられないことであろう。

大学院修了までに、流体力学や熱統計力学を興味を持って勉強した。流体力学では、玉田珖教授の講義と今井功先生の「流体力学」(岩波全書)を精読し、学部の卒論では徳岡辰雄教授の元でランダウ・リフシッツの「流体力学 I, II」(ランダウの理論物理学教程の1冊)を輪講した。徳岡先生は有理連続体力学が専門であるが、卒論(輪講)で取り上げる本は学生が相談して選べた。ランダウの流体力学は、それまでに読んだどの流体力学の本とも一味違い、独特の洗練されたスタイルに感激した。

また、神元五郎教授の熱統計力学の講義では、久保亮五先生の「統計力学」(共立全書)や V. Kruger の Physical Gas Dynamics を解読した内容に妙にひかれ、その後の Kinetic Theory of Gases (気体分子運動論) や分子気体力学の勉強への導入となった。修士論文では、二つの緩和時間を持つ粘弾性流体における衝撃波の構造というテーマを自ら設定し、数値解析を試みた。当時の計算機はごく簡単な演算しかできなかったので、小さなプログラムを組み、なんとかか形を作って修了した。

3. NTT 研究所その1：磁気記録研究室

3.1 HDD 用浮動ヘッドの開発

修士課程を修了して入社したのは、電々公社(現 NTT)の武蔵野電気通信研究所で、航空や宇宙には関係なさそうであった(高校時代の将来に対する志も変わっていた)。当時から、NTT 研究所は日本の電気通信事業の中心で、研究所の規模は東洋一といわれ、優秀な

学生を沢山採用しているとされていた。同期入社には、井元信之(阪大教授)、向井孝彰(大阪市大教授)、桑野博喜(東北大教授)などの各氏がおり、各分野で活躍している。

また、その頃 NTT 研究所は国内の大手電気メーカを牽引して国産初のコンピュータである DIPS を開発しつつあった。配属された研究室は電子装置研究部の磁気記録研究室で、DIPS コンピュータ用記憶装置としてハードディスク(HDD: Hard Disk Drive)の研究実用化を進めていた(図1参照)[1-3]。特に、この HDD の機構部分を担務したが、その重要課題は、記録密度を向上させるため、記録再生を行う磁気ヘッドを0.1ミクロン(10⁻⁷m)程度の超微小な浮上すきまで、回転する磁気ディスク上に浮上させる技術であった(一般に、(ピッ

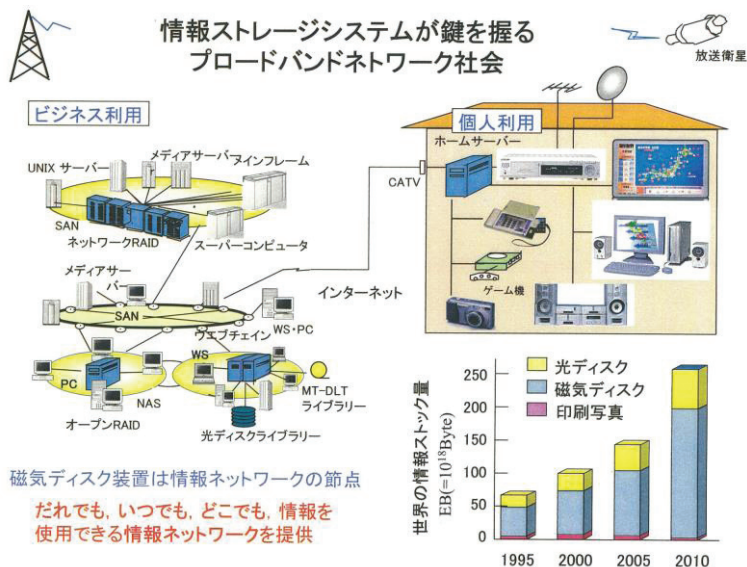


図1 ネットワーク社会における情報ストレージシステム[2]

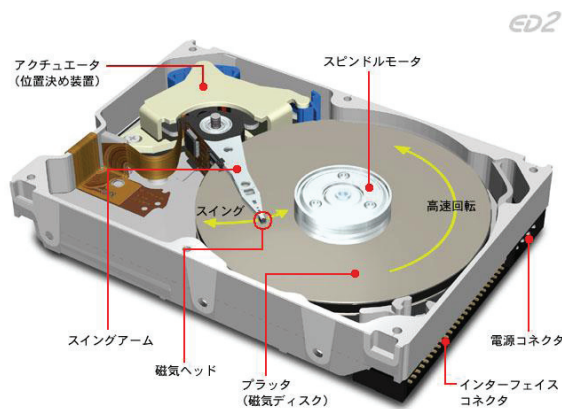


図2 パソコンの中のハードディスク装置

ト価格) = 1 / (面記録密度) = (浮上すきま量)^{2.4} であるとされており、すきま量の低減が必須である。図2、3参照)。このような相対運動する二物体間の界面現象は「トライボロジー (摩擦潤滑学)」と呼ばれ、対象とする微小すきま量からナノトライボロジーと呼ばれる[4-7]。面記録密度およびすきま量の年次推移は、図4、5の様に、著しい[8]。

所属した研究室では、故金子礼三 (和歌山大名誉教授)、小野京右 (東工大名誉教授)、三矢保永 (名大名誉教授)、木暮賢司 (元日本工学会事務長) 等の諸先輩の指導を受けたが、いずれも個性豊かで、あたかも研究技術者の梁山泊のようであった。

筆者は、入社3年目から NTT 研究所で開発中の HDD (愛称 PATTY) の浮動形磁気ヘッドの浮上設計と試作を担当した。PATTY 装置の記憶容量が 800MB で、大きさは湯たんぽ大であったが、そこに搭載した浮上すきま量 0.2 μm 程度の浮動ヘッドを設計し、当時では世界一の記録密度を持つ HDD 開発の実現に寄与できた。

(HDD の記録密度競争は熾烈で、残念ながらその後米国企業に抜かれてしまったのだが・・・)

更なる大容量 HDD (愛称 GEMMY) では、開発ターゲットを、安定浮上が期待できる負圧利用形スライダの開発研究、発熱振動の低減を狙いにヘリウムを装置内に封入した HDD の実現などとして進められた。いずれも実用化には至らなかったが、後年米国企業で実用化されたものも多く、先駆的な開発戦略であった。筆者にとっては実用化研究で得るところが大きかった。この挑戦の終盤で、新たに金子特別研究室が開設され、研究開発の現場からより研究に近い環境に異動することになる。

3.2 気体潤滑理論との対峙 [9]

話は前後するが、筆者は NTT 入社時点では超微小すきまの気体の発生圧力の理論式 (修正レイノルズ方程式) どころか、そもそも流体潤滑理論 (レイノルズ方程式) も知らなかった。少し勉強してみたが、粘性流体力学の基礎を勉強していた筆者には、流体潤滑理論が大胆な仮定に基づいているため、正直こんな理論でよいのかと思えた。その後現在に至るまで、その潤滑理論の革新と精緻化を進めることになるのだから、妙なものである。しかも、対象とする浮上量は航空機の高度 1 万 m (10⁴ m) の飛行から HDD の 0.1 ミクロン (10⁻⁷ m) 程度の超低空飛行に軌道修正にな

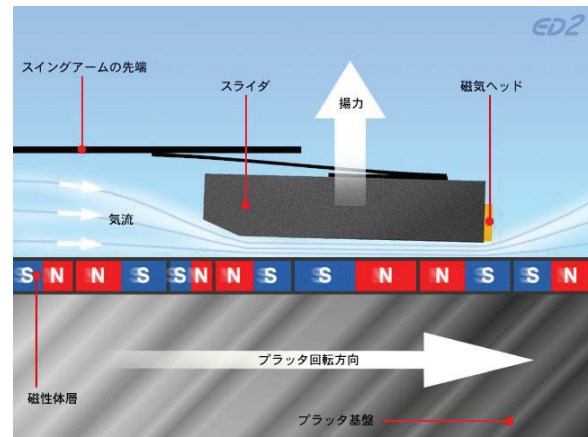


図3 回転走行する記録ディスク上を浮上する浮動型磁気ヘッド

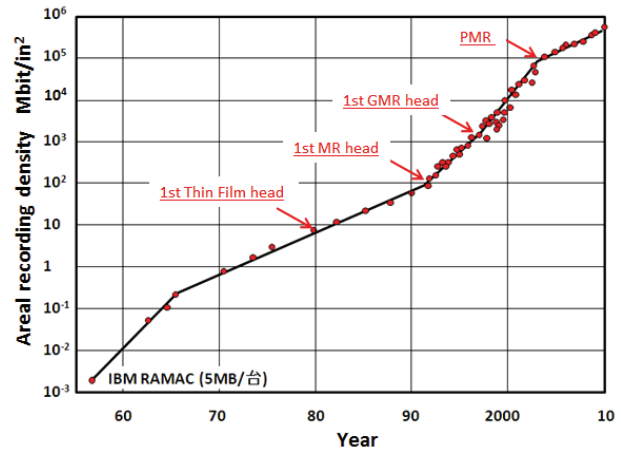


図4 面記録密度の年次推移 [8]

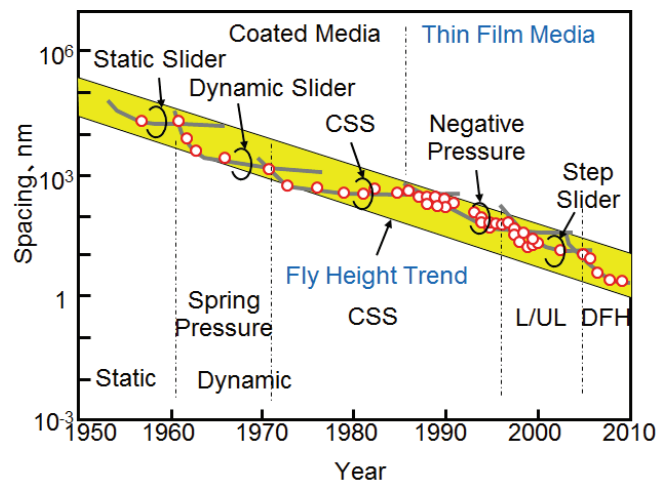


図5 磁気ヘッドすきま量の年次推移 [8]

った。高度が 10^{10} 以上も減少し、筆者の浮かない人生の始まりである。

さて、超微小すきまの浮上理論の構築には、気体の粒子性のパラメータであるクヌッセン数 Kn (式(1)) が無視できない場合を扱う「希薄気体力学 (分子気体力学)」の知見が必要である[10]。

$$Kn = \lambda/h, \quad (1)$$

ここで、 λ は分子平均自由行程、 h は代表長である。

この希薄気体力学 (分子気体力学) では、クヌッセン数 Kn が同じであれば、真空装置や宇宙空間における現象 (λ : 大) と、大気圧環境下の超微小すきまにおける現象 (h : 小) を等価的に扱える。すなわち、HDD の超微小すきまの現象は、小さな宇宙の現象とも言えるのである。

筆者が NTT 研究所に入所した 1970 年代後半の当時は、微小すきまに対する気体潤滑理論として、流体力学で著名な Reynolds による古典的な気体潤滑理論を修正した「修正レイノルズ方程式」(Burgdorfer, 1959) しかなかった[11]。この修正レイノルズ方程式では、クヌッセン数 Kn が十分小さい場合、すなわち大気圧では数ミクロン程度で成り立つ「スリップ流れ近似」を用いており、方程式の妥当性も数ミクロン程度であろうとされていた。1 ミクロン以下の超微小すきままでの妥当性についての実験的検証が行われ[12, 13]、更なる超微小すきま量に対する理論展開が望まれていた。

古典的な気体潤滑理論およびスリップ流れ近似に基づく修正レイノルズ方程式の基本形は、それぞれ以下のようなものである。

$$\frac{d}{dX} \left(PH^3 \frac{dP}{dX} - \Delta PH \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dX} \left\{ \left(1 + \frac{6Kn}{PH} \right) PH^3 \frac{\partial P}{\partial X} - \Delta PH \right\} = 0 \quad (3)$$

ここで、 P は発生する圧力、 H はすきま量で、超微小なすきまで浮上する物体の発生圧力を与える式である。式(2), (3)の左辺第1項はともに圧力差による流れ (ポアズイユ流れ) の流量、第2項はせん断流れ (クエット流れ) の流量であり、すきま形状 H から発生圧力 P の分布が算出できる (表 1 右蘭参照)。非線形方程式であるため、大型コンピュータによる数値解析によって特性解析や設計を行った。

ナノすきま複合分子膜潤滑問題の概念図

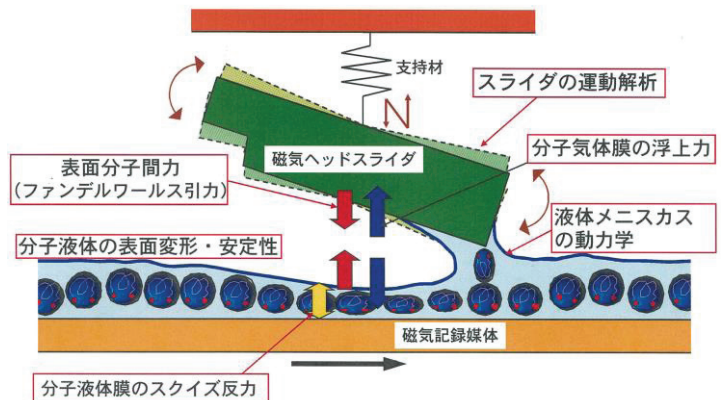
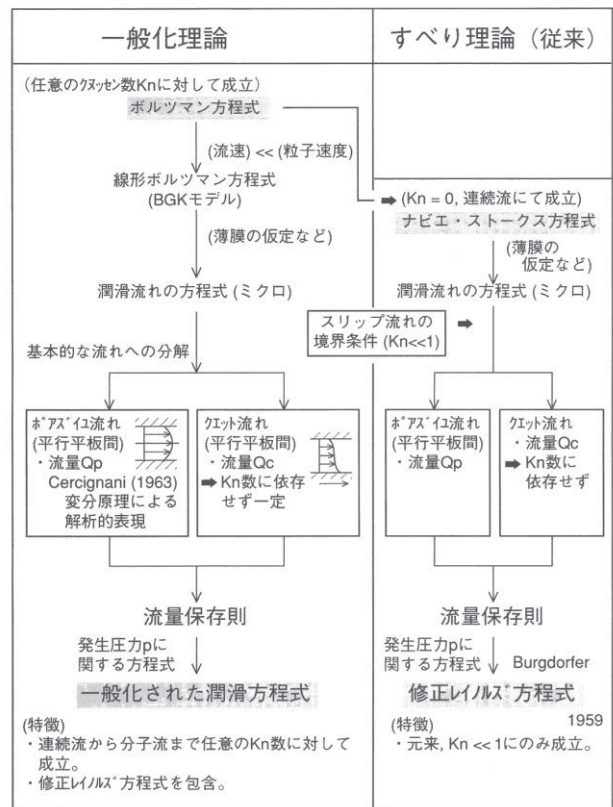


図 6 ナノメートルすきまの気液潤滑問題

表 1 一般化された潤滑方程式の導出



4. NTT 研究所その 2 : 金子特別研究室

4.1 新しい気体潤滑理論の構築

更なる超微小すきまの浮上理論の構築には、任意のクヌッセン数（任意のすきま量）における気体の確率統計的挙動を記述する「ボルツマン方程式」を取り扱う必要があるが、その分子気体力学の基礎については、大学院当時に曾根良夫先生（京大名誉教授）から手ほどきを受けていた [10]。ボルツマン方程式に基づいた超微小すきまの潤滑理論の構築に取り組んでいる際に、京大に曾根先生を何度か尋ね、有益な指針を頂いていたのだが、筆者の理解度が及ばずしばらくの間模索を続けた。

その後、超微小すきまを対象にした薄い気体膜での流れ問題は、ボルツマン方程式に対しても潤滑問題の仮定（薄膜の仮定）に基づいて2つの基本的な流れであるポアズイユ流れとクエット流れの重ね合わせで表現でき、それぞれの流量を精緻に算出すればよいことが解り、ようやくボルツマン方程式に基づく気体潤滑方程式（分子気体潤滑 (MGL: Molecular Gas-film Lubrication) 方程式)が完成した[14-17]（表1左蘭、図7参照）。

$$\frac{d}{dX} \left(\frac{Q_p}{Q_{pcon}} PH^3 \frac{dP}{dX} - \Lambda PH \right) = 0 \quad (4)$$

ここで、 Q_p は、任意のクヌッセン数 Kn に対するポアズイユ流れの流量、 Q_{pcon} は連続流 ($Kn=0$)

のポアズイユ流れの流量である。この Q_p は、ボルツマン方程式を流れの問題に適用し、数値計算により高精度なデータベースも用意した[18, 19]。

この理論と実験的検証を、機械学会論文集3編として1987年に、また拡張した理論と精緻な流量データベースを米国機械学会 (ASME) Journal of Tribology に1988年と1990年に発表した。筆者自身の学位取得とほぼ同時に、日本機械学会論文賞（1987年度）、NTT研究開発賞（1988年度）を頂いた。国外でも評価を受け、ASMEに発表した最初の論文[16]は、分子動力学シミュレーションで著名な Alder (Lawrence Livermore Lab)らによる DSMC（直接シミュレーションモンテカルロ法）解析との比較によって妥当性が示され[20]、超微小すきまヘッドの浮上特性解析の分野のみならず、分子気体力学の分野、MEMS/NEMS（マイクロ/ナノ電気機械システム）分野[21]などの様々な分野で引用されていった。引用回数が現在までに約550回になり、流量係数データベースの論文[19]および関連論文数編を含め1,500回を超えている（Google Scholar）。この理論（方程式）については、第一人者である UC Berkeley 校の Prof. Bogy も注目し、論文著者の氏名（福井・金子）から FK 方程式と呼び始めたが、筆者は「分子気体潤滑 (MGL: Molecular Gas-film Lubrication)」と名付

分子気体潤滑 (MGL)

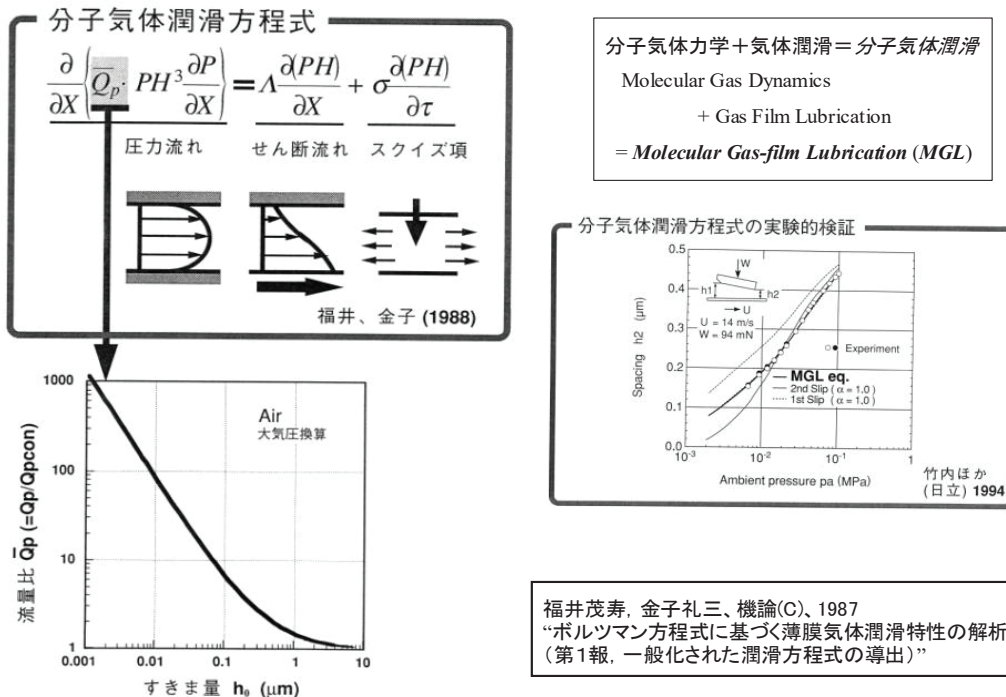


図7 分子気体潤滑 (MGL) 方程式と実験的検証 [14-16]

け、現在では MGL 方程式として広く用いられている。この MGL 理論の導出と様々な解析をまとめて、Handbook of Micro/nanotribology (1995)の1つの章 (Molecular Gas-film Lubrication (MGL)) として 50 ページ弱にまとめ掲載された[22]。

4.2 分子気体潤滑 (MGL) の水平展開

MGL方程式の基本形が出来上がった1990年代当時には、NTT研究所では電気通信の伝送路が電線から光ファイバに急速に変わりつつあり(光化)、オプティクス(光学)に基づく研究開発に力を入れ始めていた。筆者もこれまでの金子特別研究室を離れ、新設のオプトメカトロニクス研究部に異動し、部長補佐でのマネージメントの経験を経て、機構制御研究グループのリーダーとなって、新規な研究の展開に腐心した。

一方で、分子気体潤滑 (MGL) 理論の進展として、MGL理論の相補的な解析手法である「モンテカルロ直接シミュレーション (DSMC) 法」を用いた分子気体潤滑解析の予備検討を試みた。さらに特筆すべきは、グループに入ってきたばかりの渡辺敏雄君と行った「触感制御 (伝達) の研究」である[23]。遠隔地に触感を伝えることを目論んだもので、超音波振動子を用いて平板に進行波を発生させ、その振動面を指で触れると、触感が振動しない時の「ざらざら」から「つるつる」に変化することを、被験者を使って示した。振動板と指との間に生じる気体のスクイズ反力によるものと関連づけた。筆者がこの研究に関与したのは短い期間であったが、その後も渡辺君の研究がしばらく続き、論文は現在まで引用が続いている (google引用回数約150回)。

そうこうするうちに、金子特別研究室でプローブ型顕微鏡 (STMやAFM) 応用による超小型大容量の磁気記録装置の開発プロジェクトの話が始まり、筆者は再度金子特別研究室に復帰しリーダーとして活動を始めた。

まさにその矢先の1994年の12月に、当時鳥取大学の共通講座におられ大学の先輩でもある故大西善元教授から電話を頂き、4月から新設される応用数理工学科に来ないかとのお誘いを頂いた。上述の新規

のプロジェクトが始まったばかりであったため、お断りする積りで年末に鳥取を訪れたのだが、金子礼三室長とも相談し温かい了解も頂き、大学に移ることを決意した。

5. 大学における教育と研究：鳥取大学の22年

5.1 新設の応用数理工学科へ

1995年(平成7年)4月に、工学部8番目の学科として応用数理工学科が発足し、筆者が赴任した。当時は、鳥取大学工学部に、NTT研究所同期入社で先輩である安東孝止(鳥取大学名誉教授)、高校の同級生の細井由彦(鳥取大学理事)の両氏が在籍しており、心強かった。その4年後(1999年3月)から卒業生を送り出し、同時に学年進行で応用数理工学専攻ができた。以来、2016年3月までに学部卒業生650名余り、大学院(修士)220名余りを世に送り出した。2015年春の改組により、学科は機械物理系学科に統合・再編され、応用数理工学科は現在の在学生の卒業とともに名実ともなくなる。

赴任当時は新設のため学生は1年生約40名のみで、担当講義はわずかであった。学年進行と共に増えていったが、数年間は卒業生もなく、就職支援も不要であった。また、当初は社会開発システム工学科棟の一部に居り、学科事務室も共用であった。1999年3月に応用数理工学科棟が新装さ

モンテカルロ直接シミュレーション(DSMC)法の潤滑問題への適用

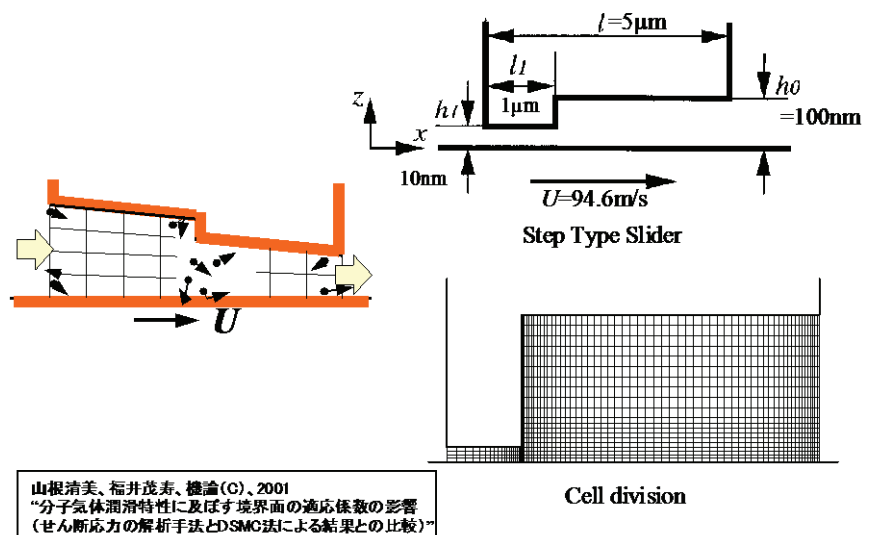


図8 モンテカルロ直接シミュレーション (DSMC) 法の分子気体潤滑問題への適用 [24, 25]

れ引っ越し、実験室を含め広く立派になった。

5.2 研究室の立ち上げ

学年進行で学生が増えていくまでは、研究室立ち上げに専念できたが、NTT 研究所の頃と比べ、何もないところから始まった。研究費は、幸いにして、筆者が大学に移った年に HDD 開発に関する産学連携の情報ストレージ研究推進機構 SRC (Storage Research Consortium) が発足し、それ以来毎年 SRC の助成金の恩恵に浴した。SRC の HDI (ヘッド・ディスク・インターフェース) 部会では、企業側約 6 社、大学側メンバーとして、NTT 研究所の先輩である金子、小野、三矢 (いずれも前出)、三宅正二郎 (日本工大教授) の諸先生の他、短期間であったが加藤康司 (東北大名誉教授)、加藤孝久 (東大教授)、中尾政之 (同) の各先生、後には NTT から福沢健二 (名大教授)、NEC から柳沢雅広 (早稲田大教授)、多川則男 (関西大教授)、日立から谷弘詞 (同) の諸先生方が参画した。いずれも、マイクロ/ナノトライボロジー (摩擦潤滑学) 分野で活躍する研究者である。

科学研究費も、基盤研究 C から基盤研究 A まで、ほぼ毎年 1 つか 2 つを頂いた。また人的にも、1996 年に修士学生として山根清美君 (現松江高専 教授) を受け入れた。NTT 研究所時代に始めていた直接シミュレーションモンテカルロ (DSMC) 法による分子気体潤滑解析を、1998 年からの博士課程の研究テーマとして精力的に進めてもらい、学位取得のみならず機械学会論文賞 (2003 年度) を受賞し [24, 25] (図 8 参照)、現在松江高専で教育研究に励んでいる。

分子気体潤滑 (MGL) の理論、DSMC 法による検証、MGL 方程式による浮上特性解析などの一連の展開に対し、米国機械学会 (ASME) トライボロジー部門シーゲート賞 (2005 年)、鳥取大学学長表彰・研究功績賞 (2005 年度)、機械学会船井特別賞 (2008 年度) を受けた。

5.3 液体薄膜・分子間力の研究への展開 [26]

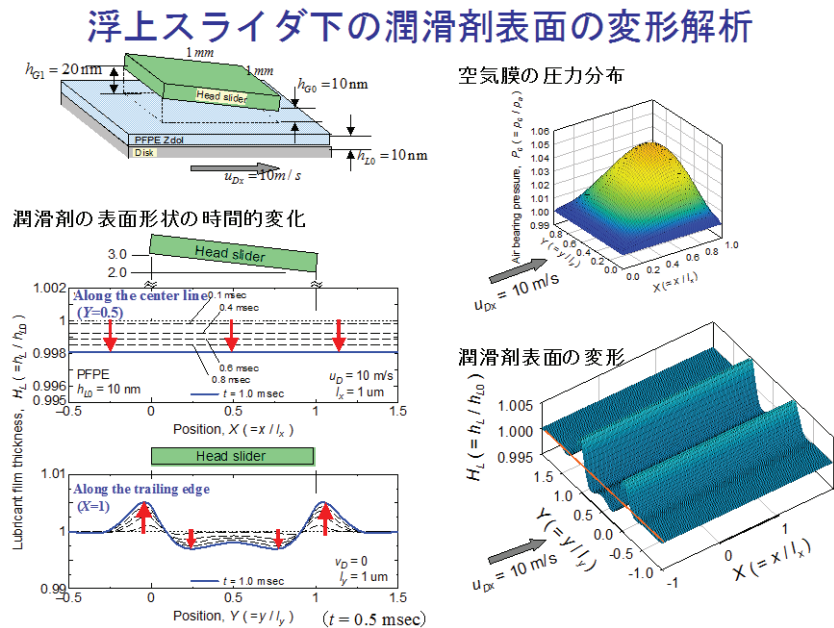
1999 年 4 月には、松岡広成先生 (現准教授) に加わって頂いた。松岡先生は、東大加藤孝久研究室で液体超薄膜の

研究で 1996 年 3 月に学位取得後、その当時は出光興産の研究所に在籍した。松岡先生の学生時代の成果は、すでに米国機械学会 (ASME) の Best paper award (1997) [27]、日本トライボロジー学会奨励賞 (1998)、英国機械学会 (IMEchE.) の論文賞 (1998、2000) を受賞していた。

研究室では、それまでの気体薄膜による潤滑理論・浮上特性解析が中心であったが、松岡先生が着任後には、液体超薄膜の諸特性・分子間力の解明の研究が開始された。研究室のコンセプトを、情報ナノシステムにおける気体や液体の超薄膜の特性の解明に拡張し、後には大学院改組の際に研究室名もそれまでのシミュレーション力学研究室からナノシステム解析学研究室に変更し、よりパワフルになっていった。

まず、液体薄膜の変形・流動現象については、気体潤滑の場合と同様、潤滑理論が適用されるが、厚膜に対する古典的な扱いと異なり、液体の分子間力の統計的な発現であるラプラス圧や界面に働く分子間力 (分離圧) など薄膜特有の力をも考慮した理論展開 (長波方程式) がある [28]。この方程式を一般化し、HDD 用の液体薄膜の変形や流動現象の詳細な解析を試みた (図 9 参照) [29-31]。

2006 年 10 月には、佐伯文浩君 (現津山高専 准教授) が博士課程に入学し、液体超薄膜の長波方程式による液膜流動と安定性の研究を進め [32]、



学位を取得し混相流学会の学生優秀講演賞を受賞した(2011年度)。現在は津山高専で教育研究を続けている。

つぎに、液体メニスカスや分子間力の研究では、松岡先生は鳥取大学着任後にも、液体メニスカスの振動伝達特性のテーマでトライボロジー学会論文賞(2001年度)を[33](図10参照)、表面力ダイナミクスについて機械学会奨励賞(2003年度)、同船井賞(2003年度)を、物体間に働く分子間力の一般化理論とその浮動ヘッドへの応用で機械学会論文賞(2004年度)[34](図11参照)、鳥取大学科学研究業績表彰(2004年度)を、それぞれ受賞した。また、それまでの一連の業績に対し、船井情報科学振興賞(2009年度)の受賞に至った。

5.4 研究の更なる充実のためのマネージメント

これらの研究を成功裏に遂行するため、研究費の獲得に種々苦心し、特に科研費申請に積極的にチャレンジした。筆者が研究代表者として大学在籍の22年間で、科研費A、科研費B(4回)、科研費C(3回)に恵まれ、また上述のSRC助成金を現在に至るまで頂いている。

さらには、2001~2003年度までは、三矢保永先生(当時名大教授)を中心に文部科学省の「革新的技術開発研究推進費(21世紀COE)補助金に参加し[2]、プロジェクト「複合ナノ構造表面による磁気記録用機能性トライボシステムの開発」を関連する4つチームで推し進めた。この期間を一つのピークとして、多様な研究者と様々な議論を重ね、人・もの(設備・お金)ともに充実していき、自ずと学術的な成果も挙がっていった。

(4つのチームは、以下である。i) 評価システム：名大三矢保永・福沢健二、ii) 形成法：東大加藤孝久・東工大益子正文、iii) 潤滑シミュレーション・アクティブヘッド：福井茂寿・東大鈴木健司、iv) 実用化構成：日立GST三枝省三・富士通研千葉洋(敬称略。所属は当時)。

メニスカスを有する液体薄膜のダイナミクス(実験観察)

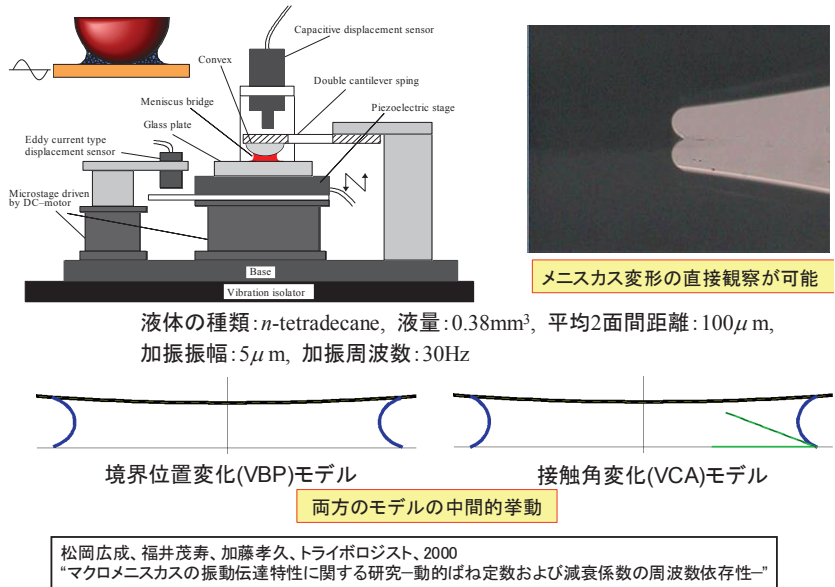


図10 液体メニスカス架橋を有する液体薄膜のダイナミクス [33]

表面力算出の汎用化と浮動ヘッド浮上特性解析への適用

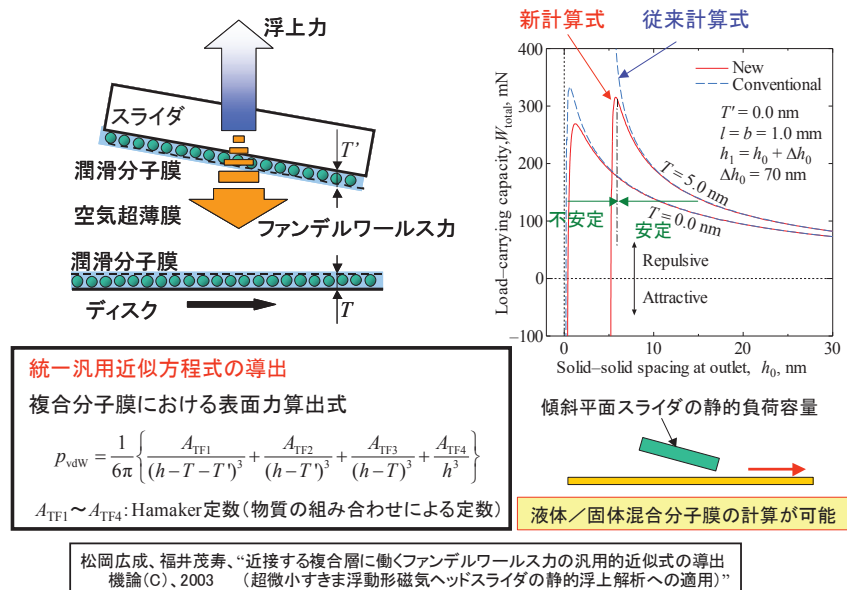


図11 表面力算出の汎用化と浮動ヘッド浮上特性解析への適用 [34]

研究室の最近の研究テーマは、やはり HDD 用ヘッド・ディスク・インターフェースの諸現象や将来方式を見据えて、次のようである。1) 境界面温度を考慮した分子気体潤滑理論 (t-MGL 理論) の構築、2) BPM ディスク上の浮動ヘッドスライダの動特性、3) 液体超薄膜の変形・流動特性の解明、4) 液体メニスカス架橋の静・動特性、5) 潤滑材の浮動ヘッドスライダへの移着現象 (Lub Pick-up) の解明、6) 媒体分布を有しナノメートルオーダーで隣接する物体間の分子間力解析などがある [35-39]。

5.5 大学での教育および管理運営

教育の一環として、院生・学生諸君の研究成果を可能な限り高め、学会発表を積極的に進めた。院生・学生諸君にとっては、外部からのコメントを受ける刺激と充実感が味わえ、また研究の取りまとめ・発表の準備を含め教育効果が高いと考えた。様々に獲得した研究費の中から、学生諸君の出張費等を捻出し、学生の負担が殆どない様にした。22 年間の院生・学生の学会発表件数は、260 件余りである。ベストプレゼンテーション賞、優秀講演論文賞なども多数頂き、院生・学生諸君のインセンティブを高められたと思う。このようにしてナノシステム解析学研究室から卒業・修了した学生は、約 140 名に達する。

また、学会活動の場は、機械学会、トライボロジー学会および米国機械学会 (ASME) であるが、学会の役職として、機械学会の部門長 (2005 年度)、トライボロジー学会の理事 (2003-04 年度)、機械学会の理事 (2013-14 年度) を務め、また国内会議 (2004)・国際会議 (2009) の実行委員長等も可能な限り引き受けた。

近年、大学では教育 (講義) をきちんと行うことの重要性が叫ばれ、筆者も様々に努力して講義を続けた。TA (Teaching Assistant) のおかげで、随分助かっている。授業アンケートも講義の工夫により何とか及第点を続けている。研究室の院生・学生とのゼミ・輪講も時間をかけて丁寧に進めたいと思っていた (学生諸君には迷惑な話だったろうと思うが、愛のムチと思ってほしい)。

教授になり何年か経つと、管理的業務も増え、各種委員会の委員、学科長 (コース長)・専攻長や副学部長・副研究科長などの役職を務めた。所属学科の事情もあり、筆者は学科長 (コース長) を都合 8 年間、副学部長・副研究科長を 2005-06 年度の 2 年間務めた。お陰で工学部・工学研究科の大体のことは解るようにはなった。副学部長・副研究科長を務めた時は、大学が独立行政法人化さ

れた直後で、当初は副学部長・副研究科長は 2 名体制でスタートしたが (もう一人は、田中久隆 現研究担当理事)、全く忙殺されてしまい、任期 2 年途中で負担軽減のため 3 人体制となったが (細井由彦 現企画担当理事が加わる)、任期終了時にはもう沢山という感じであった。院生・学生と研究テーマを少しずつ推し進めるのが性に合っているようだ。これ以降も学科長 (コース長) を務めたが、執行部の方々に色々注文を付け続けた。

6. 最後に

本稿では、学生生活を終わってから 40 年間の、NTT 研究所での研究開発、鳥取大学で教員・院生・学生との教育研究を振り返り、微力ながらも様々に知恵を絞って続けた「研究」の流れをまとめた。振り返ってみると、実に色んなトライアルがあったという実感とともに、うまく行かなかったことや判断のミス等も多々思い出される。本稿は、後者に余り触れていない、果敢に挑戦し奮闘努力した部分の記録である。

文 献

- [1] 日本機械学会編、究極のメカを追求する磁気ディスク装置「HDD」、先端事例から学ぶ機械工学、第 6 章 (2011) 丸善
- [2] 三矢保永 (代表)、「複合ナノ構造表面による磁気記録用機能性トライボシステムの開発—超高記録密度の小形大容量次期ディスク装置の開発—」、産学官連携イノベーション創出事業費補助金 (独創的革新技術開発研究提案公募: 21 世紀 COE) に係る総合研究報告書、2004
- [3] 小野京右・中山正之・吉村茂・多川則男・市原順一、記憶と記録—情報機械学のすすめ— テクノライフ選書、オーム社、1995
- [4] 金子礼三、ゼロ摩擦への挑戦 マイクロトライボロジーの世界、テクノライフ選書、オーム社、1995
- [5] 三矢保永、「ナノトライボロジー—ナノ分子膜潤滑の特徴—」、日本機械学会誌、第 105 巻、2002, pp. 466-469.
- [6] 福井茂寿、「磁気ヘッドとディスクのすきま: 10nm—ハードディスク装置のナノの世界—」、機械学会誌、Vol. 108, No.1042 (2005) pp. 718-719
- [7] 福井茂寿、「ハードディスクのナノテクノロジー—」、風紋 (鳥取大学広報誌)、24 号、2010
- [8] 多川則男・谷弘詞・小金沢新治、「磁気ディスク装置におけるトライボロジー技術の進展とそ

の将来展望”、トライボロジー会議 2015 春姫路予稿集 (2015) A24

[9] 福井茂寿、” ナノ気体潤滑膜”、マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック、分担執筆、エヌ・ティー・エス、(2006) pp.212-227

[10] 曾根良夫・青木一生、分子気体力学 (1994) 朝倉書店

[11] Burgdorfer, A. “The Influence of the Molecular Mean Free Path on the Performance of Hydrodynamic Gas Lubricated Bearings”, *ASME J. Basic Eng.*, Vol. 81 (1959) pp.94-100

[12] Hsia, Y-T. and Domoto, G.A., “An Experimental Investigation of Molecular Rarefaction Effects in Gas Lubricated Bearings at Ultra-Low Clearances”, *ASME J. Lubr. Technol.*, Vol. 105 (1983) pp.111-118

[13] 大久保俊文・岸上順一・福井茂寿・安田享祐、“可視レーザー干渉を利用した浮動ヘッドスライダ浮上特性の精密測定”、日本機械学会論文集 (C編), 53巻第487号 (1987) pp. 839-847

[14] 福井茂寿・金子礼三、“ボルツマン方程式に基づく薄膜気体潤滑特性の解析 (第1報, 一般化された潤滑方程式の導出) ”、日本機械学会論文集 (C編), 53巻第487号 (1987) pp. 829-838

[15] Fukui, S. and Kaneko, R., "Analysis of Ultra-thin Gas Film Lubrication Based on the Linearized Boltzmann Equation (Influence of Accommodation Coefficient)", *JSME International J.*, Vol. 30, No. 268 (1987) pp. 1660-1666

[16] Fukui, S. and Kaneko, R., "Analysis of Ultra-Thin Gas Film Lubrication Based on the Linearized Boltzmann Equation: First Report-Derivation of a Generalized Lubrication Equation Including Thermal Creep Flow", *Trans. ASME, J. Tribology*, Vol. 110 (1988) pp. 253-262

[17] Fukui, S. and Kaneko, R., "Experimental Investigation of Externally Pressurized Bearings under High Knudsen Number Conditions", *Trans. ASME, J. Tribology*, Vol. 110 (1988) pp. 144-147

[18] Cercignani, C. and Daneri, A., “Flow of a Rarefied Gas Between Two Parallel Plates”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 34, (1963) pp.3509-3513

[19] Fukui, S. and Kaneko, R., "A Database for Interpolation of Poiseuille Flow Rates for High Knudsen Number Lubrication Problems", *Trans. ASME, J. Tribology*, Vol. 112 (1990) pp. 78-83

[20] Alexander, FJ, Garcia, AL and Alder, BJ, “Direct simulation Monte Carlo for thin-film bearings”, *Phys.*

Fluids, Vol.6 (1994) 3854

[21] 福井茂寿、“MEMSへの空気軸受の適用”、トライボロジスト、第49巻第2号 (2004) pp. 134-140

[22] Fukui, S. and Kaneko, R., “Molecular Gas-Film Lubrication (MGL)”, in *Handbook of Micro/Nano tribology*, Chap. 13, ed. B.Bhushan, CRC Press, 1995, pp. 559-604

[23] Watanabe, T. and Fukui, S., "A Method for Controlling Tactile Sensation of Surface Roughness Using Ultrasonic Vibration", *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation* (1995) pp. 1134-1139

[24] 山根清美・福井茂寿、“分子気体潤滑特性に及ぼす境界面の適応係数の影響 (せん断応力の解析手法と DSMC 法による結果との比較) ”、日本機械学会論文集 (C編)、67巻、663号 (2001) pp. 3618-3626

[25] Fukui, S. and Yamane, K., "DSMC/MGL Comparisons of Stresses on Slider Air Bearing with Nano Meter Spacings", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 38 (2002) pp. 2153-2155

[26] 松岡広成、“マイクロ/ナノトライボロジーとその応用”、マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック、分担執筆、エヌ・ティー・エス、(2006) pp.504-538

[27] Matsuoka, H. and Kato, T., “An Ultrathin Liquid Film Lubrication Theory – Calculation Method of Solvation Pressure and Its Application to the EHL Problem”, *ASME J. Tribology*, Vol.119, No.1 (1997) pp. 217-226

[28] Oron, A., “Long-scale evolution of thin liquid films”, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 69, No.3 (1997) pp.931-980

[29] Saeki, F., Fukui, S. and Matsuoka, H., “Lubricant Deformation Analyses Caused by Gas Stresses and Surface Tension,” *IEEE, Trans. on MAG*. Vol. 45, No. 11 (2009) pp. 5061-5064.

[30] Fukui, S., Hitomi, K., Shimizu, S., Saeki F. and Matsuoka, H., “Three-dimensional deformation analyses of the ultra-thin liquid film surface (Linearized analyses for the steady state)”, *Microsyst Technol*, Vol. 16 (2010) pp.85-92, DOI 10.1007/s00542-008-0764-3

[31] Matsuoka, H., Oka, K., Yamashita, Y., Saeki, F. and Fukui, S., “Deformation characteristics of ultra-thin liquid film considering temperature and film thickness dependence of surface tension”, *Microsyst Technol*, Vol. 17 (2011) pp. 983-990,

Published online, 18 January (2011), DOI 10.1007/s00542-011-1223-0

[32] Saeki, F., Fukui, S. and Matsuoka, H., “Optical interference effect on pattern formation in thin liquid films on solid substrates induced by irradiative heating”, *Physics of Fluids*, Vol. 23, 112102 (2011).

[33] 松岡広成・福井茂寿・加藤孝久、“マクロメニスカスの振動伝達特性に関する研究－動的ばね定数および減衰係数の周波数依存性－”, トライボロジスト, 45 巻, 10 号, (2000) pp.757-768

[34] 松岡広成・福井茂寿, “近接する複合層に働くファンデルワールス力の汎用的近似式の導出 (超微小すきま浮動形磁気ヘッドスライダの静的浮上解析への適用)”, 日本機械学会論文集, 第 69 巻, 686 号, C 編, (2003), pp. 2810-2817.

[35] Matsuoka, H., Kitahama, N. Tanaka, T., Fukui, S., “Theoretical study of van der Waals dispersion pressures considering one-dimensional material distributions in the in-plane direction”, *Microsyst Technol*, Vol. 20, Issue -9, pp. 1397-1403, Published online, 30 March (2014), DOI 10.1007/s00542-014-2129-4

[36] Fukui, S., Wakabayashi, R. and Matsuoka, H., “Static Flying Characteristics of Heat-Assisted Magnetic Recording Heads in He-enclosed HDDs”, *IEEE Trans. Mag*, Vol.50, No.11, Article No. 3303204 (2014), DOI10.1109/TMAG.2014.2320961

[37] Fukui, S., Okamura, Y., Nakasuji, A. and Matsuoka, H., “Thermo-molecular gas-film lubrication dynamics considering boundary temperature and ambient gas (2-DOF numerical analysis by t-MGL equation)”, *Microsyst Technol*, Vol. 22 (2016) pp. 1337-1349, Published online, 09 Jan (2016), DOI 10.1007/s00542-015- 2808-9

[38] Matsuoka, H., Miyamoto, M. and Fukui, S. “Effects of surface roughness on characteristics of liquid transfer due to breakage of liquid meniscus bridge”, *Microsyst Technol*, Vol. 22 (2016) pp. 1397-1404, Published online, 13 Jan (2016), DOI 10.1007/s00542-015-2867-6

[39] Matsuoka, H., Kitahama, N. and Fukui, S., “Theoretical study of surface interaction pressures of two-dimensional periodic material distributions based on the Lennard-Jones potential” *Microsyst Technol*, Vol. 22 (2016) pp. 1419-1428, Published online, 02 Mar (2016), DOI 10.1007/s00542-016-2881-8

(受理 平成 28 年 11 月 4 日)