磁気ディスク浮動ヘッド揚力の数値解析に関する研究*
(第1報)藤 沼 隆 二*¹, 中 村 輝 男*²A Computational Analysis for Thin Air Film Lubrication of Magnetic
Recording Disk Memory
(1st Report)

Ryuji FUJINUMA and Teruo NAKAMURA

The rarefied gas lubrication was analyzed based on modified Reynolds equation and a FEM formulation was adopted for the computation with a trial function separated locally. The air film under the slider has such a thin dimension as 1/3 000 (depth/width) and flows in one direction. Therefore the distribution of the pressure in transversal direction is almost constant except the boundary region. Typical two dimensional FEM formulation is not adequate for this type of problem. Results presented in this report show the above perspective. The computational analysis was done for three types of sliders, that is, a tapered flat slider, a two rail slider and a zero load slider. All results reveal the applicability of the present method of computation.

Key Words: Thin air film, rarefied gas, FEM, hat function, magnetic recording disk memory

1. 著 言

電子計算機の外部記憶装置の一つ、磁気ディスクメモリーに情報を書込みあるいは読取るための中枢的役割を担うヘッドの設計に際して、ディスクの高速回転に伴って発生する空気流による揚力を解析することが重要な問題となって久しい。歴史の頭初では、ディスク磁気面とヘッド下面のクリアランスは3 μm 程度で運転されていた。しかし計算機的能力向上に伴って記憶装置の性能、特に情報の書込み読取り速度の高速化、記憶の高密度化への要請は必須であり、これを実現する方法として、上記クリアランスを可能な限り小(0.3 μm 程度)に保ち、ディスクを高速回転する方法が研究されてきた。

揚力解析の問題も、基礎式をレイノルズ方程式とする限り、高ベアリング数に対して安定した解析が困難であり⁽²⁾⁽³⁾⁽⁵⁾、境界で気体分子のスリップを考慮した形式で希薄気体としての扱いが追求され、修正レイノルズ方程式を基礎式とする揚力解析が試みられてきた⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽²²⁾。またボルツマン方程式に基づいた解

析もなされている⁽¹⁶⁾。

しかし、発生する高揚力に対して、ヘッドスライダを安定に保つことは困難であり、揚力を低減するためのヘッド形状が追求され、下面中央部に溝もしくはリバースステップを設ける試みがなされた。これらのヘッド形状に対応する揚力解析には、FEMが有力な手段として利用されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

しかし、これらの解析結果の中で、スライダの幅方向圧力分布が余弦的な曲線で示されているのは、現象の性質(高さ1に対し幅数千の比率をもった一次元流)を考えると、現象に合致したものとは言えない⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾。

境界のごく近傍において、急激な圧力変動を示すほかは分布形状はフラットでなければならず、台形的な分布が現象を表すものである。

以上の点を除けば、定常的な問題の扱いは実用的見地からほぼ完成されているとみなされる。残された問題点は速度零の状態から定常状態に至る過程をヘッドの支持構造と流体力との相互作用を含めた非定常問題として扱うことである。ヘッドの支持システムの振動解析はなされた例があるが⁽³⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾、流体力とヘッド支持システムとの相互作用を考慮し、ヘッドの安定、不安定までを追求した例はない。

本研究はこの問題を解析する前段階として、非定常

* 昭和63年11月11日 北陸信越支部北陸地方講演会において講演、原稿受付 昭和63年4月5日。

*¹ 准員、日本大学大学院 (〒275 習志野市泉町1-2-1)。

*² 正員、日本大学生産工学部。

シュミレーションへ発展応用可能な解析法を検討するものである。結果は4章以後に示されているが良好な結果が得られている。

2. 基本式

基礎方程式として空気の境界でのスリップを考慮した次の修正レイノルズ方程式を基本式(1)とする。

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[PH^3 \frac{\partial P}{\partial X} + 6CH^2 \frac{\partial P}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[PH^3 \frac{\partial P}{\partial Y} + 6CH^2 \frac{\partial P}{\partial Y} \right] = \Lambda \frac{\partial(PH)}{\partial X} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\Lambda = 6\mu UL/p_a h_m^2$$

$$X = x/L, \quad Y = y/L, \quad P = p/p_a$$

$$H = h/h_m, \quad C = \lambda_a/h_m, \quad \lambda p = \lambda_a p_a$$

L : スライド長

U : 流速

P : 無次元圧力

p_a : 大気圧

h : 浮上間隔

h_m : 最小浮上量

λ : 分子自由行程

λ_a : 大気圧での分子自由行程

ρ : 粘性係数

Λ : ベアリング数

境界条件

境界条件としては、ヘッド周辺で大気圧に等しいとする。

$$P(0, Y) = P(1, Y) = P(X, 1/2) = P(X, -1/2) = 1 \quad \dots\dots\dots(2)$$

3. 解析方法

修正レイノルズ方程式(1)に重みつき残差法を適用する。現象の性質を考慮し、 X と Y 方向の圧力分布に顕著な相異があること、また、圧力 P を求めるのみでその導関数を求める必要はないことなどに基いて、 XY 直交2方向に変数分離した形式で、二次元のhatfunctionを試行関数として採用する。いわゆるweakformulationとなる。

残差の積分は部分積分を行ったあとで計算し、非線形連立方程式が導かれる。この解析は、Newton-Raphson法によって行われた。

試行関数

$$P = 1 + A_{ij} \phi_i(X) \phi_j(Y) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$R =$

$$\int_0^1 \int_{-1/2}^0 \left\{ \left[(PH^3 + 6CH^2) \frac{\partial P}{\partial X} - \Lambda HP \right] \frac{\partial \delta P}{\partial X} + (PH^3 + 6CH^2) \frac{\partial P}{\partial Y} \frac{\partial \delta P}{\partial Y} \right\} dXdY = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

4. 解析

4.1 解析例1 図1で示されるテーパードフラッドタイプのスライダをまず解析した。実験との比較および他の計算例との比較を行うためである。計算結果は、図2, 3, 11, 12で示されている。

図2は $Y=0$ (ヘッドの中心)における X 方向の圧力分布を示すものである。本計算によると X 方向30分割でほぼ一様の収束を示している。ただ最後の要素の収束性が少し悪いが総圧には影響を及ぼさないものである。

図3に示されるように Y 方向の収束状況は良く、13分割でほぼ一様に収束した。文献⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾によれば Y 方向は、余弦的な圧力分布が報告されているのに対して、本計算では、台形的な圧力分布が示された。このことは深さ1に対し数千の幅を持つ一次元流れということから、台形的圧力分布が妥当と考えられる。総圧を計算するうえで余弦的な分布と台形的な分布ではかなり異なるので重要な問題点である。図11には実験値と

$L = 1.0 \text{ mm}$	$W = 2.062 \text{ mm}$
$L1 = 0.350 \text{ mm}$	$h_1 = 9.875 \times 10^{-3} \text{ mm}$
$h_3 = 1.625 \times 10^{-5} \text{ mm}$	$\theta = 2.5 \times 10^{-5} \text{ radian}$
$\Lambda = 310$	$U = 42 \text{ m/s}$
大気圧 (空気) $P_a = 1.0135 \times 10^5 \text{ (N/m}^2\text{)}$	
粘性係数 (空気) $\mu = 1.806 \times 10^{-5} \text{ (N-s/m}^2\text{)}$	

図1 スライダ形状(解析例1)

図2 解の収束状況(X 方向, $Y=0$)

レイノルズ方程式および修正レイノルズ方程式による計算値との比較が示されている。

4.2 ブリードスロット部を持つスライダ ヘッドクリアランスを小に保ち、かつ高速運転を行う際に発生する高揚力を低減するために、中央に溝を設けたレッド形状が考案された。(図4)

溝の深さと総圧との相関を調べるのが解析の目的である。計算結果は、図5~7に示されている。図5, 6は最小クリアランスを $0.625\mu\text{m}$ とし、溝深さを $11\mu\text{m}$ としたときの圧力分布と収束の程度を示すものである。スライダ端部のピークは分割を細分すれば、消滅するものであるが、総圧への影響を無視できる範囲で計算は打ち切られている。

図7は溝の深さが総圧へ及ぼす影響を示したものであるが、溝深さが $4\mu\text{m}$ 近辺を超えたとき総圧は溝深さと無関係になるのをみれば明らかなように、溝の内部の圧力は零に近く、総圧は2本のレールの圧力と前部テーパの圧力との積分で求められることを示している。したがって溝深さを $4\mu\text{m}$ 以上としたタイプのスライダについては溝を無視して、1本のレールについて圧力を解析するのみで十分であることが示されている。

4.3 リバースステップ面を持つスライダ 解析例3としてヘッド下面中央部に負圧を発生させ、より総圧を低減させる目的として、多川・佐藤⁽¹⁰⁾によって

図3 解の収束状況 (Y方向, $X=0.5$)

図4 スライダ形状 (解析例2)

考案されたリバースステップを持つヘッド形状が取り上げられている。

図9, 10, 13に計算結果が示されている。図9, 10は圧力の分布状態を示すものである。

リバースステップ深さと総圧との関係は図13に示されている。4.2節の例とは異なり、深さが $0.4\mu\text{m}$ のとき、総圧が最も低減された状態になることが明らかにされている。同一結果が報告されているが⁽¹⁰⁾, これを裏付けるものともなっている。

5. 結果の考察

浮動ヘッドに関する流体潤滑問題は、他の潤滑問題とは異なり、非定常として考えられなければならない要素がある。デスクの回転が零から立ち上がり、定常状態に至ったときの圧力と、はじめからクリアランスを与えて、定常問題として圧力を解析した結果とは、

図5 X, Y方向圧力

図6 圧力分布

図7 溝の深さが総圧へ及ぼす影響

ヘッドを固定しているときのみ一致するはずである。

しからざるときは、定常問題の解析は実験値より上まわるものでなければならない。本研究の歴史の当初、レイノルズ方程式の解析結果が実験値より上まわるものであったのは当然であるとも言える。したがってこのことのみで、レイノルズ方程式の是非を論ずるわけにはいかないが、ディスクの回転速度を高め、クリアランスを小にしていくとレイノルズ方程式の解は収束が困難となってくる。図 11, 12 にテーパードフラッドタイプのスライドについてその総圧と最小クリアランスもしくはベアリングナンバとの相関が示されているが、レイノルズ方程式の解の収束は、クリアランス $0.25 \mu\text{m}$ 程度までである。流体分子の運動を連続体とみなせる限界、Knudsen 数 $1/5$ をもとに考えると、この限界をやや超えたところと言うことができる。これに対して修正レイノルズ方程式の解は平均自由行程 λ

$=0.19$ (ヘリウム) の場合に最小クリアランス $0.1 \mu\text{m}$ まで、また空気 $\lambda=0.07$ の場合最小クリアランスは $0.15 \mu\text{m}$ まで解は収束した。流体の希薄度に応じて連続体の仮定が成立する限界をはるかに超えて解の収束が見られる。さらに、総圧はレイノルズ方程式の解よりは低めになり実験値に近づく方向を示している。

一方ベアリング数で見ると、レイノルズ方程式の解はほぼ 2 000 程度、修正レイノルズ方程式の場合は、12 000 程度まで解の収束が見られた。ディスクの回転速度、クリアランス、共に必要とされる範囲 ($U=60 \text{ m/s}$, $h_m=0.3 \mu\text{m}$) までの解析は十分可能であることを示している。

これらはすべて修正レイノルズ方程式の妥当性を示すものである。

rarefied gas の領域で修正レイノルズ方程式の解の実験値との比較に関する報告例は少ない。文献 (9) はその一つであるが、この報告例に示されるような最小クリアランス $0.32 \mu\text{m}$ 以下においての、レイノルズ方程式と修正レイノルズ方程式の相異は本研究の解析結果では見られなかった。解の収束する範囲では、レイノルズ方程式の解は、修正レイノルズ方程式の解の $\lambda \rightarrow 0$ に対する収束値的位置にあるということができ

図 8 スライド形状 (解析例)

図 9 X, Y 方向圧力

図 10 圧力分布

図 11 総圧と最小クリアランスもしくはベアリング数との関係

図 12 境界でのスリップが総圧に及ぼす影響

る。

次に総圧を低減するための溝およびリバースステップの効果に関する問題であるが、解析例2で示されているようにブリーズスロットの深さが0.4 μm 以上となると、溝の前部の圧力が総圧へ与える影響はほとんどなくなり、総圧は溝の深さと無関係となる。(図7)したがって、このタイプのスライダの総圧低減に関する有効性は認められない。溝の深さを前部より後部へと深くする逆テーパの形にすれば効果が得られるものとする。本研究その2で検討する予定である。

これに反してリバースステップの場合解析例3に見られるように、負圧が発生する。これらの総圧への影響をステップ深さと総圧の相関で調べた結果が図13である。ステップ深さの最適値が存在して、その値が4 μm であることが示されている。この最適値に関しては、レイノルズ方程式と修正レイノルズ方程式との解による相異は見られない。いずれも総圧の最適値がステップ深さ4 μm に対応していくことを示している。

6. 結 び

本研究の最終の目的は、ヘッドの挙動を非定常問題として解析することにある。

ヘッドの形状を種々変えて解析できる手法はFEMが最もすぐれているが、通常の二次元的フォーミュレーションでは、現象にそぐわない。計算が大規模であ

図 13 スライド正特性に及ぼすリバースステップ面深さの影響

るわりには、現象を十分把握し得たものとは言えぬ。流れの方向と、これに直交する方向に変数分離した形式の試行関数が有用であることは、著者らがY方向をフーリエ級数に展開し、X方向のみhat functionとする手法で確認済であった⁽¹²⁾⁽¹³⁾。溝もしくはリバースステップを有するヘッド形状の解析には、この方法はそのまま適用できないが、同様に立脚点に立って、本解析の試行関数が選ばれている。結果は解析例に示されているが、現象が矛盾なく表されていると言えよう。収束性、精度とも良好なので、今後非定常問題の解析に同手段を発展応用するつもりである。

文 献

- (1) Burgdofer, A., The Influences of the Molecular Mean Free Path on the Performance of Hydrodynamic Gas Lubricated Bearing, *ASME J. Basic Eng.*, 81-1, (1959), 94-100.
- (2) Tseng, R. C., Rarefaction Effects of Gas-Lubricated Bearings in a Magnetic Recording Disk File, *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, 97 (1975), 624-629.
- (3) Ono, K., Dynamic Characteristics of Air Lubricated Slider Bearing for Noncontact Magnetic Recording, *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, 97 (1975), 250.
- (4) Mituya, ., Molecular Mean Free Path Effects in Gas Lubricated Slider Bearings, *Bull. JSME*, 22-168 (1979).
- (5) Sereny, A. and Castelli, V., Experimental Investigation of Slider Gas Bearings With Ultra-Thin Films, *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, 101 (1979), 510.
- (6) Kita, T., Kogure, K., Mituya, Y. and Nakanishi, T., New Method of Detecting Contact between Floating-Head and Disk, *IEEE. Trans. Mag.*, 16-5 (1980), 873.
- (7) White, J. W., Flying Characteristics of the "Zero-Load" Slider Bearing, *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, 105 (1983), 484.

- (8) Ogure, K. K., pukui, S., Mitsuya, Y. and Kaneko, R., Desing of Negative Pressur for Magnetic Recording Disks, *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, **105** (1983), 496.
- (9) Hisa, Y. T. and Domot, G. A., An Experiemental Investigation of Molecular Rarefaction Effects in Gas Lubricated Bearings at Ultra-Low Clearances, *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, **105** (1983), 120.
- (10) 多川・佐藤, リバースステップ面をもつ負圧利用ヘッドスライダの浮揚特性, 潤滑, **29-8** (昭59), 591-598.
- (11) 多川・荻原・松原・伊藤, 浮動ヘッドスライダ浮揚特性におよぼすブリードスロット部の影響, 機論, **50-449, C** (昭59), 160.
- (12) Nakamura, T., An Anaraysis of Gas Lubricated Bearings in a Magnetic Recording Disk File, *Proc. 1985 Numer. Methods Lamnar Tubulent Fiow Pruc of 4th, Int Conf. at Swansra* (1985), Pineridge Press.
- (13) 中村, 空気流による潤滑問題の一解析例, 日本機械学会第937回講演流体機械講演概要集, No. 860-4 (昭61).
- (14) Boggy, D. B. and Talke, F. E., Mechanics-Related Problems of Magnetic Recording Technology and Ink-Jet Printing, *Appl. Mech. Rev.*, **39-11** (1986).
- (15) 多川・三橋, レーザ誘起エッチング法による負圧浮動ヘッド試作, 機講論, No. 860-6 (昭61), 13.
- (16) 久保・川島・丸茂, 無限幅テーパスライダ軸受の希薄気体潤滑理論解析, 機講論, No. 860-6 (昭61), 19.
- (17) Mituya, Y. and Ohokubo, T., High Knudsen Number Molecular Rarefaction Effect in Gas-Lubricated Slider Bearings for Computer Flying Heads, *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, **109** (1987), 276.

討 論

〔質問〕 川 端 信 義 (福井大学工学部)

(1) X (滑り) 方向の分割が粗いため, 図5, 6, 9, 10に見られるような流出端における圧力分布の数値的な発振が生じるものと思われる。揚力は圧力分布の積分から得られるため, 影響が少ないとはいうものの, 精密な議論をするためには, また今後非定常解析へ拡張されるためにも, 物理的に正しくない発振は取り除く必要があると思うが, いかがか。

(2) 本文1章緒言の中で, “スライダの幅方向圧力分布が余弦的な曲線で示されているのは, 現象の性質(高さ1に対し幅数千の比率をもった一次元流れ)を考えると, 現象に合致したものとは言えない。”と述べられているが, 幅方向の圧力分布は付図1のように, Λ 値が小さい場合は放物線分布, $\Lambda = \infty$ の場合は両端でギャップを生じて潤滑面で一定となる。 Λ が有限の場合は破線で示したように両者の中間となる。したがって, 幅方向の圧力分布が平たんに近づくのはベアリング数 Λ 値が大きくなるためと考えたほうがよいのではないか。

(3) Y (幅) 方向の圧力分布に関して, 図3で示されている Λ が300程度の比較的低い Λ 値では, 他の論文の結果ではもっと丸みをもった分布となると思われる。また, 付図1のように, 有限の Λ 値では両端で圧力のギャップを生じることはないと思われる。貴論文と他論文の違い, また両端で生じる圧力のギャップの原因は何か。ご教示いただきたい。

〔回答〕 (1) X 方向の収束性が悪いところは, 流出端の最後の一要素だけで, 本計算では, ヘッド下面の総圧に対してこの発振による誤差が1%未満とな

付図1 幅方向の圧力分布

ったときの分割数を示したものである。この発振を取り除くためには, X 方向は不等分割要素とし, 流出端を密に分割することで解決できると思われる。

(2) 本研究で示した $\Lambda = 310$ は, ヘッドのクリアランスが $0.625 \mu\text{m}$ での計算例で, このとき流れは高さ1に対し幅数千の比率をもった一次元流れとなっており, このような流れでは幅方向に境界からの粒子の運動量が内部へ及ぼす影響は高さの数倍程度であることを考慮すれば, このときの Λ では幅方向の圧力分布は境界近傍で急激に変化して内部は一様となるものであり, 放物形より台形に近い圧力分布となるのが妥当だと考えられる。放物形の圧力分布となるのは, Λ がかなり小さいときだけだと思われる。

(3) 本計算によるスライダ幅方向の圧力分布は境界近傍で急激に変化しているため分割数の関係上, 角ばった台形分布になっているが, 実際には角は丸みをもっている形になっていると考えられる。