セルフローディング形浮動ヘッド機構の浮揚特性*
(第1報, その基礎的検討)多 川 則 男^{*1}, 橋 本 雅 伸^{*1}Submicron Spacing of Self-Loading Flying Head Slider Mechanism
(1st Report, Fundamental Research)

Norio TAGAWA and Masanobu HASHIMOTO

This paper proposes a self-loading flying head slider mechanism, which operates under the non-contact start stop mode conditions with magnetic disk media in magnetic recording disk storage. Fundamental research was carried out. The flying head slider mechanism consists of a negative pressure air bearing slider, a slider suspension mechanism and a twin-structure piezoelectric actuator as the head-loading mechanism. The head-loading mechanism for the twin-structure piezoelectric actuator is confirmed to have good characteristics, simulating the mechanisms analysis. Furthermore, microdynamics and static characteristics for self-loading phenomenon of a negative pressure air bearing slider were computed and static and dynamic flying characteristics for self-loading flying head slider mechanism were analyzed, using the finite element method. As a result, it became clear that the self-loading negative pressure flying head slider mechanism proposed in this paper had good flying characteristics and high reliability. The feasibility for realizing a self-loading flying head slider mechanism, which operates under non-contact start stop mode conditions with magnetic disk media, was shown.

Key Words: Lubrication, Numerical Analysis, Flying Head Slider Mechanism, Negative Pressure Slider, Self-Loading, Piezo Actuator, Air Bearing Dynamics, Finite Element Method, Magnetic Disk Storage

1. 緒 言

磁気ディスク装置の大容量高密度化は著しい。その大きな要因はサブミクロン領域のヘッド・ディスクインタフェースの浮揚量実現によるところは周知の事実である。最近では0.2~0.3 μm 程度の浮動ヘッドスライダの浮揚量が実用化されている⁽¹⁾が、さらに0.1~0.15 μm レベルを目ざす研究が行われている。また、磁気記録媒体に対する浮動ヘッドスライダの起動停止方式はスライダと磁気記録媒体とが接触したままで行われるコンタクトスタートストップ方式(CSS方式)が採用されている。このCSS方式は、機構が簡単でローコスト化がはかれるという利点をもっているが、最近の薄膜媒体の実用化にともなう浮揚量超微小化の動向につれて、大きな問題点が顕著なものとなってきた。それはCSS時における浮動ヘッドスライダと磁気記録媒体との境界潤滑マイクロトライボロジ技術およびスライダ・ディスクの吸着の問題である。これらの問題はヘッド・ディスクインタフェースの浮揚量が微小化されればされるほど、すなわち高密度記録を

実現しようとするほど、顕著なものとなる。したがって今後の磁気ディスク装置の大容量高密度化を推進するためには、磁気記録媒体と非接触で起動停止し、しかもサブミクロンあるいはサブサブミクロンで安定に空気膜浮揚する浮動ヘッド機構の実現がのぞまれる。

本報はこのような観点から、磁気記録媒体と非接触で作動する浮動ヘッド機構実現の可能性を明らかにするとともに、負圧浮動ヘッドスライダのセルフローディング現象の静特性、動特性の解明とその信頼性の検討を行うため、セルフローディング現象を利用した負圧浮動ヘッド機構の基礎的検討を行ったので報告する。

2. セルフローディング形浮動ヘッド機構の構成

2・1 機構の概要 磁気記録媒体と非接触に起動停止する浮動ヘッド機構を実現するためには、3000~3600 rpm という高速回転を行っている磁気記録媒体に浮動ヘッドスライダをアクセスさせるローディング機構が必要になる。これまでに種々の機構が提案されてきている⁽²⁾が、本報では圧電素子アクチュエータを採用している。

図1に本報で考えるセルフローディング形浮動ヘッ

* 昭和63年11月26日 関西支部第248回講演会において講演、原稿受付 昭和63年2月4日。

^{*1} 正員、日本電気(株)C&Cシステム研究所 (〒213 川崎市宮前区宮崎4-1-1)。

ド機構を示す。同図から明らかなように、本報で提案する機構は、負荷荷重 0 mN で作動する負圧浮動ヘッドスライダ、ヘッド支持機構、ツイン構造圧電素子アクチュエータ、そして圧電素子アクチュエータとスライダとを取りつけるバインダとから構成されている。スライダは正圧発生面にもリセス溝を設けるデュアルリセス形の負圧浮動ヘッドスライダ⁽³⁾を考えた。図2にスライダ形状および寸法諸元を示す。

2.2 機構の動作原理 本機構においては磁気ディスク装置が稼動していない時には、負圧浮動ヘッドスライダは磁気記録媒体より離れた状態にある。磁気記録媒体が起動し、定常回転に達した時にツイン構造圧電素子アクチュエータに印加電圧が加えられ、スライダは磁気記録媒体面の方へアクセスする。そしてある路離までスライダがアクセスすると、空気の流体潤滑作用によりスライダに負圧吸引力がはたらき、スライダのセルフローディング現象が励起される。したがってスライダは磁気記録媒体面上に自己吸引され、自

ら空気膜潤滑状態に移移し、サブミクロン領域の微小すき間で浮揚することとなる。磁気記録媒体が停止する時には圧電素子アクチュエータに印加している電圧を除去することになる。そして負圧浮動ヘッドスライダは磁気記録媒体の回転が低速になるにつれ負圧吸引力が減少していき、支持ばね機構の反力より小さくなった時点で磁気記録媒体よりアンロードする。

3. セルフローディング形浮動ヘッド機構の静的浮揚特性

3.1 セルフローディング現象の静解析 本報の浮動ヘッド機構では負圧浮動ヘッドスライダのセルフローディング現象を利用している。したがってセルフローディング現象静特性の解析を行う。

図3はデュアルリセス形負圧浮動ヘッドスライダの最小浮揚量 h_m と浮揚力 w_p 、負圧による吸引力 w_n との関係を磁気記録媒体の周速度 u をパラメータとして求めたものである。なお数値計算は以下に示す修正レイノルズ方程式を有限要素法により解いた。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \left(1 + 6 \frac{\lambda}{h} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \left(1 + 6 \frac{\lambda}{h} \right) \right] = 6\mu u \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + 12\mu \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで

p : 圧力

h : 浮揚すき間

λ : 空気の分子平均自由行程

μ : 空気の粘性係数

図1 セルフローディング形浮動ヘッド機構

図2 供試負圧浮動ヘッドスライダ形状諸元

図3 負圧浮動ヘッドスライダの負荷容量特性

u : 磁気記録媒体走行速度

同図より浮揚量の大きい領域($1\mu\text{m}$ 以上)では, w_n の方が w_p よりきわめて大きくなることからわかる。このことは負圧浮動ヘッドスライダを磁気記録媒体よりある距離はなして設定しておけば, 磁気記録媒体が定常回転数に達した時には w_n が大きき発生し, スライダは負の剛性をもちセルフローディング現象が励起されることが可能であることを表している。

図4は支持ばね機構に取りつけられた負圧浮動ヘッドスライダがセルフローディング現象を励起するのに必要となる磁気記録媒体面とスライダ面との距離を静的に求めたものである。同図実線はスライダピッチ角 θ を 0° とし, 媒体面周速度 u をパラメータとした時のスライダ吸引力 w_n , 破線は支持ばね機構の反力 w_s である。なお発生するスライダの浮揚力 w_p は小さいとして無視している。負圧浮動ヘッドスライダの w_n が, スライダが変位することにより発生する支持ばね機構の反力 w_s より常に大となる点でセルフローディング現象が励起されることになるから, 同図より磁気記録媒体・スライダ間隔が概略 $40\sim 50\mu\text{m}$ 以下レベルでセルフローディング現象がおこることがわかる。また磁気記録媒体の周速度が低速になるにつれて発生する w_n は小さくなるため, セルフローディング現象励

図4 負圧浮動ヘッドスライダのセルフローディング現象励起のための必要条件

起に必要となる磁気記録媒体・スライダ間隔は小さくなることもわかる。

3.2 ヘッドローディング機構の静的変位特性
圧電素子アクチュエータにより負圧浮動ヘッドスライダを磁気記録媒体面にアクセスする時には, スライダを磁気記録媒体面に平行に移動させる必要がある。この観点から本報で提案するヘッドローディング機構の変位特性を有限要素法により調べた。

図5に本報で行った構造機構解析モデルを示す。圧電アクチュエータおよび支持ばね機構は薄肉シェル要素, スライダは厚肉シェル要素, バインダは薄肉, 厚肉シェル要素でモデル化した。計算にあたっては圧電素子アクチュエータの端部を6自由度完全拘束とした。そして電圧を印加してたわませる圧電素子アクチュエータ端に強制変位を与え, その時のスライダ中心部での変位量およびあおり角について計算し求めた。

図6にスライダあおり角の意味について示す。同図から明らかなように, あおり角とはスライダが圧電素子アクチュエータにより磁気記録媒体面にアクセスした時に付与されるロール角であり, この角度が小さいほど, スライダ面は磁気記録媒体面に対して平行にアクセスしていくことになる。

図7にその数値計算結果を示す。同図実線はツイン構造圧電素子アクチュエータを用いた場合, 破線は比

図5 浮動ヘッド機構解析モデル

図6 負圧浮動ヘッドスライダに付与されるあおり角の意味

較のために一枚構造圧電素子アクチュエータを用いた場合の計算結果である。本報で考えたツイン構造圧電素子アクチュエータの場合一枚構造圧電素子アクチュエータの場合と比較してスライダの変位量は小さくなるものの、あおり角はきわめて小さくなることがわかり、磁気記録媒体面にスライダはほぼ平行にアクセスすることがわかる。また同時に同図からスライダの必要な変位量が与えられた時に逆に圧電素子アクチュエータをどの程度変位させれば良いかがわかる。それが決まれば圧電素子アクチュエータの変位-印加電圧特性の関係から印加すべき電圧の大きさを求めることができる。

3・3 セルフローディング形浮動ヘッド機構の静的浮揚特性 負圧浮動ヘッドスライダのセルフローディング現象励起の静特性が明らかにされたので、セルフローディング形浮動ヘッド機構の静的浮揚特性を調べる。

図8はスライダ最小浮揚量と磁気記録媒体周速度との関係を示したものである。従来のCSS方式で起動停止する浮動ヘッドスライダと異なり、負圧浮動ヘッドスライダを磁気記録媒体面からある距離はなして設定する。この位置を初期設定位置A点とする。この位置から磁気記録媒体面の回転数が一定になったところでツイン構造圧電素子アクチュエータに電圧を印加して、負圧浮動ヘッドスライダを磁気記録媒体面に近接さ

せ、同図B点までアクセスさせる。このB点は磁気記録媒体のランアウトがないとすれば、3・1節での解析から磁気記録媒体から40~50 μm の距離である。この時磁気記録媒体面の周速度に対応して負圧浮動ヘッドスライダに負圧吸引力が発生し、スライダはセルフローディングされる。そしてその時の磁気記録媒体面周速度に対する負圧浮動ヘッドスライダ0荷重の時の最小浮揚量および浮揚姿勢に遷移し、安定に浮揚することとなる。磁気記録媒体面周速度を増していけば、負圧浮動ヘッドスライダの最小浮揚量vs磁気記録媒体面周速度特性に従い、最小浮揚量は漸増していく。また一方磁気記録媒体面周速度を減少させていくと、次第に最小浮揚量は減少していき、周速度Dに対応する点で空気膜は破断し、アンローディング現象がおこる。そしてスライダはE点の初期設定位置にもどる。この一連の動作によりセルフローディング形浮動ヘッド機構のロード・アンロード作用が終了する。またより低速度領域でスライダをロードする時には、図8に示したごとく、負圧浮動ヘッドスライダのセルフローディング距離GHはより短くなるため、初期設定位置F点からG点までの圧電素子アクチュエータの変位量は大きくとらなければならない。

4. セルフローディング形浮動ヘッド機構の動的浮揚特性

4・1 セルフローディング現象の動解析 負圧浮動ヘッドスライダのセルフローディング現象に対しコ

図7 ツイン構造圧電素子アクチュエータヘッドローディング機構の変位特性

図8 セルフローディング形浮動ヘッド機構の静的浮揚特性

ンピュータシミュレーションを行い、そのマイクロダイナミクスを理論的に解析した。時間領域における負圧浮動ヘッドスライダのセルフローディングマイクロダイナミクスは、式(1)で示されるスライダと磁気記録媒体との空気膜潤滑特性を支配する修正レイノルズ方程式と以下に示すスライダの三自由度運動方程式とを数値的に連立して解くことにより求められる。すなわち

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + kz = w - mg - F \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$I_\theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} + k_\theta \theta = w(x_{cg} - \bar{x}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$I_\gamma \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + k_\gamma \gamma = w(y_{cg} - \bar{y}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで

$$w = \int_0^L \int_0^B (p - p_a) dx dy \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{w} \int_0^L \int_0^B x(p - p_a) dx dy \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{w} \int_0^L \int_0^B y(p - p_a) dx dy \quad \dots\dots\dots (7)$$

m : スライダ質量

g : 重力加速度

F : スライダ負荷荷重

x_{cg}, y_{cg} : x, y 方向スライダ重心位置

k : 支持ばね並進方向剛性

k_θ : 支持ばねピッチング方向剛性

k_γ : 支持ばねローリング方向剛性

I_θ, I_γ : スライダピッチング, ローリング方向慣性モーメント

L : スライダ長

B : スライダ幅

ここでは White により開発された手法⁽⁴⁾により数値計算を行った。スライダの初期設定浮揚量 $4 \mu\text{m}$ とし、初期設定ピッチ角およびロール角は 0° とし計算を行い、そのマイクロダイナミクスを求めた。

図9にその計算結果を示す。同図(a)は最小浮揚量の、同図(b)はスライダピッチ角のそれぞれ過渡応答である。負圧浮動ヘッドスライダは浮揚量 $4 \mu\text{m}$ の時には負荷容量は負であり、負の空気膜剛性をもつため $100 \mu\text{sec}$ 程度の間に浮揚量 $0.8 \mu\text{m}$ 程度まで浮揚量が減少する。しかし空気膜のスクイズ効果により浮揚量は増加し、 $1.2 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 程度まで上昇する。その後、再びスライダは負の空気膜剛性となり浮揚量は減少し、 $160 \mu\text{sec}$ 程度で約 $0.45 \mu\text{m}$ の浮揚量となる。そして若干の浮揚量増減をくり返すスライダのリバウンド現象を呈しながらスライダは $350 \sim 400 \mu\text{sec}$ レベルで一定浮揚量に漸近していくことがわかる。またピッチ

角は 0° からまず負のピッチ角となり、 $60 \sim 70 \mu\text{sec}$ で最大の負ピッチ角となる。その後ピッチ角は増加し、 $100 \mu\text{sec}$ 後の浮揚量 $0.8 \mu\text{m}$ のところで正のピッチ角の第一のピークに達する。そして浮揚量の増加とともにピッチ角は減少し、浮揚量 $1.2 \sim 1.3 \mu\text{m}$ で負ピッチ角の第二のピークとなる。それ以降は正のピッチ角の増減をくり返し、浮揚量 $0.5 \mu\text{m}$ 程度のところで最大

(a) セルフローディング時最小浮揚量変動

(b) セルフローディング時スライダピッチ角変動

図 9

図 10 負圧浮動ヘッドスライダのセルフローディングマイクロダイナミクス

図 11 セルフローディング形浮動ヘッド機構の動的浮揚特性(定常浮揚時)

の正ピッチ角をとり、次第に定常浮揚時のピッチ角に漸近していくことがわかる。

図 10 はセルフローディング時のスライダの動的挙動の軌跡を示したものである。セルフローディング現象においてはスライダと磁気記録媒体との間歇的な接触はおこらない。

4・2 定常浮揚時の動的浮揚特性 本報で提案するセルフローディング形浮動ヘッド機構の定常浮揚時の動特性を検討した。特にツイン構造圧電素子アクチュエータが支持ばね機構の端に取りつけられているため、スライダの磁気記録媒体面加振に対する追従性にそれがどのような影響があるかを調べた。解析モデルは図 5 に示したモデルを用い、空気膜の部分は近似的に線形ばねと考えるモード合成法⁽⁵⁾⁽⁶⁾により行った。

図 11 にその計算結果を示す。同図には同時に支持ばね機構のみからなる従来の負圧浮動ヘッド機構の動特性を破線で示してある。同図より 1 kHz 以上の高周波数領域では本報で提案する浮動ヘッド機構と従来の機構とほとんど同様なスライダ追従性を示すことがわかる。すなわちツイン構造圧電素子アクチュエータは磁

気記録媒体面の振動に対するスライダの追従性に対しては大きな悪影響はないことが明らかとなり、良好な動的浮揚特性を有していることがわかる。

5. 結 論

本報は次世代の磁気ディスク装置用浮動ヘッド機構として磁気記録媒体と非接触で作動する、負圧浮動ヘッドスライダを利用したセルフローディング形浮動ヘッド機構を提案し、その基礎検討を行ったものである。その結果、本報で提案する浮動ヘッド機構は良好な浮揚特性を示すことが明らかとなった。このセルフローディング形浮動ヘッド機構により、従来の方式とは大きく異なり、磁気記録媒体と CSS 方式を行わず、常に非接触に作動する浮動ヘッド機構実現の可能性が示されたと考える。この浮動ヘッド機構の実現により、磁気記録媒体保護膜の超薄膜化が可能となるのみでなく、スライダと磁気記録媒体との吸着問題や CSS 時の摩擦摩耗トライボロジ問題など今後の大容量高密度磁気ディスク装置の開発に際して最近深刻な問題となっているものが解消される可能性がある。

終わりに、日頃ご指導ご鞭撻を賜わっている東京大学工学部産業機械工学科堀幸夫教授に深謝いたします。

また本研究において種々ご指導いただいた日本電気(株)C&C システム研究所ターミナルシステム研究部福地弘道部長 堀口敏男課長に感謝する。

さらに数値計算を行うにあたりご協力いただいた日本電気技術情報システム開発(株)早川誠一氏に感謝する。

文 献

- (1) Harker, J. M., et al., *IBM J. Res. Dev.*, 25, 5 (1981), 677.
- (2) 例えば Root, R. R., et al., USP428 6297(1981).
- (3) 多川・三橋, 機講論, No. 860-6, (1986), 18.
- (4) White, J. W., *ASLE SP-16*, (1984), 77.
- (5) Tagawa, N., et al., *IEEE Trans. MAG*, MAG-21, No. 5 (1985), 1506.
- (6) Tagawa, N., et al., *STLE SP-22*, (1987), 40.