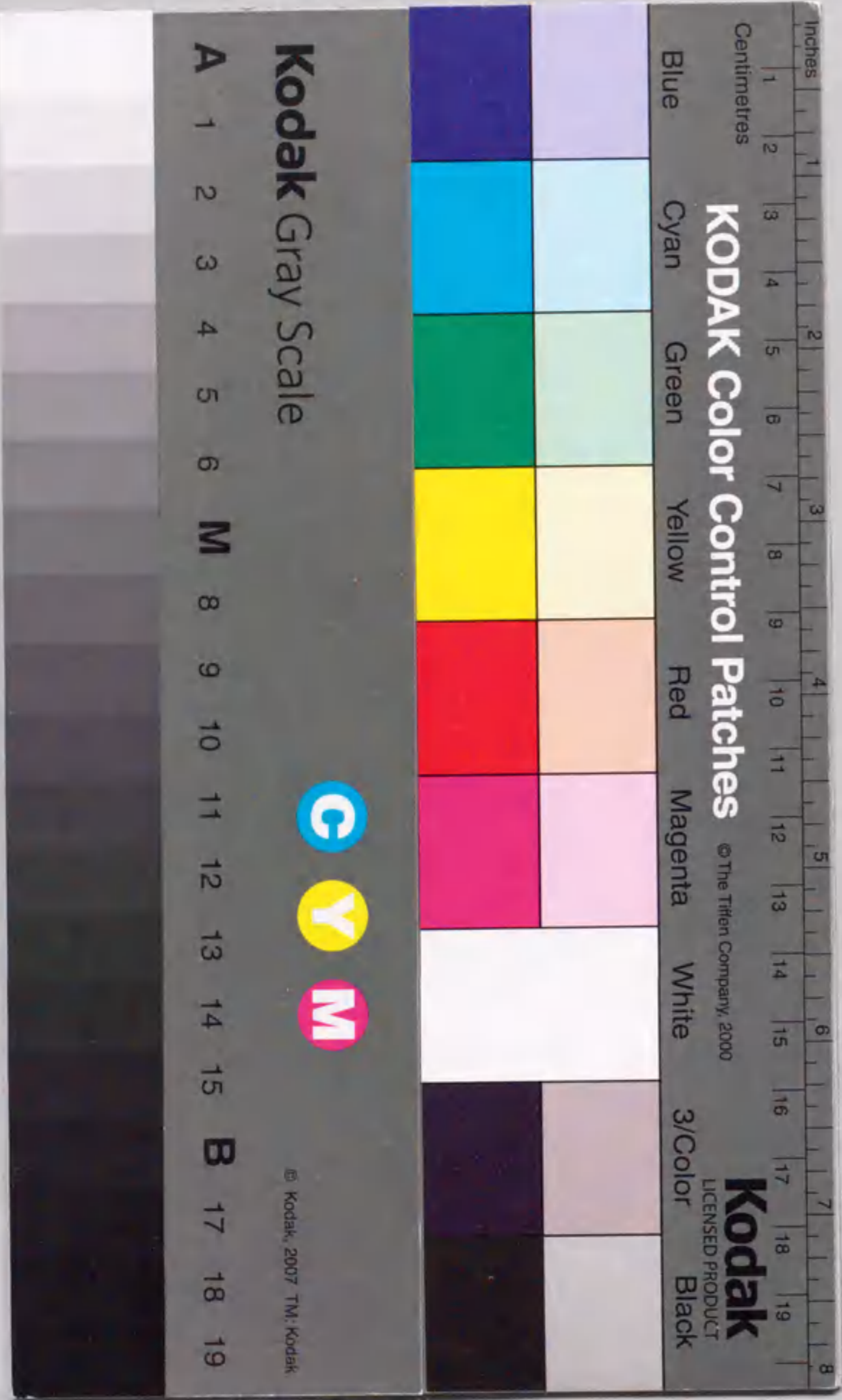


磁気ディスク装置の浮動ヘッドとディスク
のインタフェースに関する研究

北 寿 郎



報告番号 乙第 3367 号

①

磁気ディスク装置の浮動ヘッドとディスク
のインタフェースに関する研究

平成2年8月

北 寿 郎

目 次

記 号

| | |
|-------------------------------|----|
| 第1章 序 論 | 1 |
| 第2章 浮動ヘッドと磁気ディスクの接触検出 | 12 |
| 2.1 緒 言 | 12 |
| 2.2 AEによるヘッド・ディスク接触の測定原理および方法 | 13 |
| 2.3 AEによる接触状態の検出 | 16 |
| 2.4 AEによるディスク面の突起頻度分布の測定 | 25 |
| 2.4.1 AE計測法による突起の検出 | 25 |
| 2.4.2 測定装置と測定条件の設定 | 27 |
| 2.4.3 各種ディスクの突起頻度分布の測定結果 | 29 |
| 2.5 結 論 | 29 |
| 第3章 浮動ヘッドの混合潤滑特性 | 32 |
| 3.1 緒 言 | 32 |
| 3.2 混合潤滑特性の解析 | 33 |
| 3.2.1 混合潤滑モデルと解析手法 | 33 |
| 3.2.2 混合潤滑モデルの妥当性の検証 | 38 |
| 3.3 浮動ヘッドの摩耗に関する実験的検討 | 41 |
| 3.3.1 浮動ヘッド材料の摩耗に及ぼす速度と荷重の影響 | 41 |
| 3.3.2 混合潤滑状態におけるヘッドの摩耗 | 44 |
| 3.4 結 論 | 50 |
| 第4章 浮動ヘッドの動的な浮き上がり特性 | 51 |
| 4.1 緒 言 | 51 |
| 4.2 浮き上がり時の動特性の解析 | 51 |
| 4.2.1 解析手法 | 51 |

| | | |
|----------------------------|----------------------|----|
| 4. 2. 2 | 計算結果 | 55 |
| 4. 3 | 浮上量変動が浮き上がり特性に及ぼす影響 | 61 |
| 4. 3. 1 | うねりがあるディスク上での浮き上がり速度 | 61 |
| 4. 3. 2 | 実験 | 62 |
| 4. 3. 2. 1 | 実験方法 | 62 |
| 4. 3. 2. 2 | 実験結果と考察 | 62 |
| 4. 4 | 結論 | 66 |
| 第5章 塗布ディスクによる浮動ヘッドの摩耗 | | 67 |
| 5. 1 | 緒言 | 67 |
| 5. 2 | 実験方法 | 67 |
| 5. 2. 1 | 摩耗試験 | 67 |
| 5. 2. 2 | 摩擦試験 | 68 |
| 5. 3 | 磁性塗膜中のアルミナ粒子の影響 | 68 |
| 5. 3. 1 | 供試ディスク | 68 |
| 5. 3. 2 | 摩耗特性 | 71 |
| 5. 3. 3 | 摩擦特性 | 74 |
| 5. 4 | 表面潤滑剤の影響 | 76 |
| 5. 4. 1 | 供試ディスク | 76 |
| 5. 4. 2 | 摩耗特性 | 76 |
| 5. 4. 3 | 摩擦特性 | 84 |
| 5. 5 | 結論 | 84 |
| 第6章 薄膜ディスクの強度と耐久性に及ぼす基板の影響 | | 86 |
| 6. 1 | 緒言 | 86 |
| 6. 2 | 実験方法 | 86 |
| 6. 2. 1 | 試料 | 86 |
| 6. 2. 2 | 引っかき試験 | 88 |
| 6. 2. 3 | 摩耗試験 | 91 |
| 6. 3 | 実験結果および考察 | 91 |

| | | |
|--|----------------------|-----|
| 6. 3. 1 | 引っかき硬度に及ぼすアルマイト膜厚の影響 | 91 |
| 6. 3. 2 | 耐摩耗性に及ぼすアルマイト膜厚の影響 | 98 |
| 6. 4 | 結論 | 101 |
| 第7章 薄膜ディスク用アルマイト基板の亀裂発生メカニズム | | 105 |
| 7. 1 | 緒言 | 105 |
| 7. 2 | 実験方法 | 106 |
| 7. 2. 1 | 引っかき試験機 | 106 |
| 7. 2. 2 | 供試アルマイト基板の特徴 | 106 |
| 7. 3 | 実験結果 | 107 |
| 7. 4 | 応力解析および考察 | 114 |
| 7. 5 | 結論 | 126 |
| 第8章 3. 2ギガバイト集合形磁気ディスク装置用浮動ヘッドと 薄膜ディスクの開発 | | 127 |
| 8. 1 | 緒言 | 127 |
| 8. 2 | 浮動ヘッド | 128 |
| 8. 3 | 薄膜ディスク | 131 |
| 8. 3. 1 | 設計方針および仕様 | 131 |
| 8. 3. 2 | 表面平滑化技術 | 132 |
| 8. 3. 3 | 表面潤滑技術 | 137 |
| 8. 4 | 結論 | 142 |
| 参考文献 | | 143 |
| 謝辞 | | 151 |

記号

本論文で使用する主な記号は次のとおりである。

a: ランアウト振幅
A: 接触面積
b: ヘッド幅
d: ピン摩耗痕の直径
 d_i : 圧子押し込み深さ
 d_s : 引っかき深さ
 d_t : 浮上面から押付荷重作用点までの高さ
 d_w : ディスク摩耗深さ
D: δ_t /設定浮上量
e: 接触状態をあらわす定数
 E_f : 膜の弾性定数
 E_s : 下地の弾性定数
 F_a : 吸着力
 F_h : 浮上力
 F_n : 混合潤滑時の実効接触荷重 ($= F_s - F_h$)
 F_p : ピン押し付け荷重
 F_s : ヘッドの押し付け荷重
h: 浮上量
 h_0 : 最小浮上量
 h_1 : ヘッド流入端の浮上量
 h_1' : ヘッドフラット部先端の浮上量
 h_m : 仮想潤滑膜の厚さ
 h_s : 平衡状態における浮上量
H: 引っかき硬度
 H_a : アルマイトの引っかき硬度
 H_0 : $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の引っかき硬度

H_v : ビッカース硬度
I (V_{th}): AE振幅分布
J: 重心まわりのヘッド慣性モーメント
k: ジンバルばねの剛性
 k_θ : ジンバルばねの回転剛性
l: ヘッド長
 l_1 : テーパ長
L: 接触走行距離
 L_s : ヘッド位置でのディスク周長
m: ヘッド等価質量
n: ディスク1周当りのランアウト個数
p: 空気膜圧力
 p_a : 周囲圧力 (大気圧)
 p_s : 平衡状態での圧力
P: ピン試験片の直径
 P_m : メジアン亀裂発生圧力
Q: 潤滑剤塗布量
r: 圧子曲率
R: 最大突起高さ
 R_a : 中心線平均あらさ
 R_{max} : 最大高さ
t: 時間
U: ディスク走行速度
 U_f : 浮き上り速度
V: 摩耗量
 V_{AE} : AE実効電圧
 V_d : ディスク摩耗量
 V_p : ピン摩耗量
 V_{th} : AEしきい値電圧
 w_d : ディスク摩耗率

w_p : ピン摩耗率
 W : 荷重
 W_b : 円弧亀裂の発生臨界荷重
 W_m : メジアン亀裂の発生臨界荷重
 x : ヘッド長手方向座標
 x_0 : 押付荷重の作用位置
 x_1 : ヘッド圧力中心位置
 X_0 : x_0/l
 y : ヘッド幅方向座標
 Y_f : 膜の降伏応力
 Y_s : 下地の降伏応力
 z : ヘッド変位(上下方向)
 z_1 : ディスク面変位
 δ : アルマイト膜厚
 δ_t : テーパ高さ
 Δh : 浮上量変動
 Δp : 圧力変動
 ϵ_f : 膜のひずみ硬化係数
 ϵ_s : 下地のひずみ硬化係数
 ν_f : 膜のポアソン比
 ν_s : 下地のポアソン比
 λ : 空気の分子平均自由行程
 η : 空気の粘性係数
 μ_k : 動摩擦係数
 μ_s : 静摩擦係数
 θ : ヘッド変位(ピッチング方向)
 σ : 応力

第 1 章 序 論

情報化社会の進展に伴い、大形計算機からパーソナルコンピュータやワープロにいたるまで、各種のデータを蓄積するファイル記憶装置の需要が急速に伸びている。特に、磁気ディスク装置は大量のデータを記憶し、ランダムアクセスが可能で高速なメモリとしてその中核的な役割を果たしている。

磁気ディスク装置は図 1. 1 に示すように、高速回転する磁気ディスク上に気体軸受の原理により浮上して情報の記録再生を行う浮動ヘッド、浮動ヘッドを所定のトラックへ位置決めするポジションナ、および積層した磁気ディスクを回転させるスピンドル等で構成されている。磁気ディスク装置の性能は、面記録密度(線記録密度×トラック密度)と平均アクセス時間(浮動ヘッドを所定のトラックに位置決めするのに要する時間の平均値)および転送速度(計算機本体と情報を受渡しする速度)で評価される。表 1. 1 に大容量磁気ディスク装置の性能諸元の年次推移を示す。1957年に世界最初の磁気ディスク装置 IBM350 が発表されてからこの30年間に驚異的な性能向上が図られてきたが、なかでも面記録密度の向上はめざましく、1987年にNTTが実用化したGEMMYディスク装置(JS4470)では6.2万bit/mm²となり、IBM350の3.1bit/mm²に比べ2万倍の高記録密度化が達成されている⁽¹⁾。2万倍という高記録密度化を実現するため、ヘッドは、この間、パーマロイの記録再生エレメントをステンレスやセラミックス製の気体軸受スライダに埋込んだ埋込み形ヘッドから記録再生エレメントとスライダをMn-ZnフェライトやNi-Znフェライトのような軟磁性材料で一体に形成したモノリシックヘッドを経て、現在はLSIのフォトリソグラフィ技術を応用してアルミナチタンカーバイト製のスライダ上に記録再生エレメントを形成した薄膜ヘッドが使われ始めている。一方、磁気ディスク側も、磁性膜の薄膜化という高密度化の大命題を実現するため、 γ -Fe₂O₃の針状磁性粉を高分子バインダの中に分散させた塗布形磁気ディスクから金属や酸化物の様な磁性膜をめっき法やスパッタ法で形成した薄膜形磁気ディスクへと進化してきている。このような電磁変換的なヘッド・ディスクの改良もさることながら、高記録密度化の原動力となったのは浮上すきまの微小化である。IBM350の浮上すきま20 μ mの静圧形の浮動ヘッドからはじま

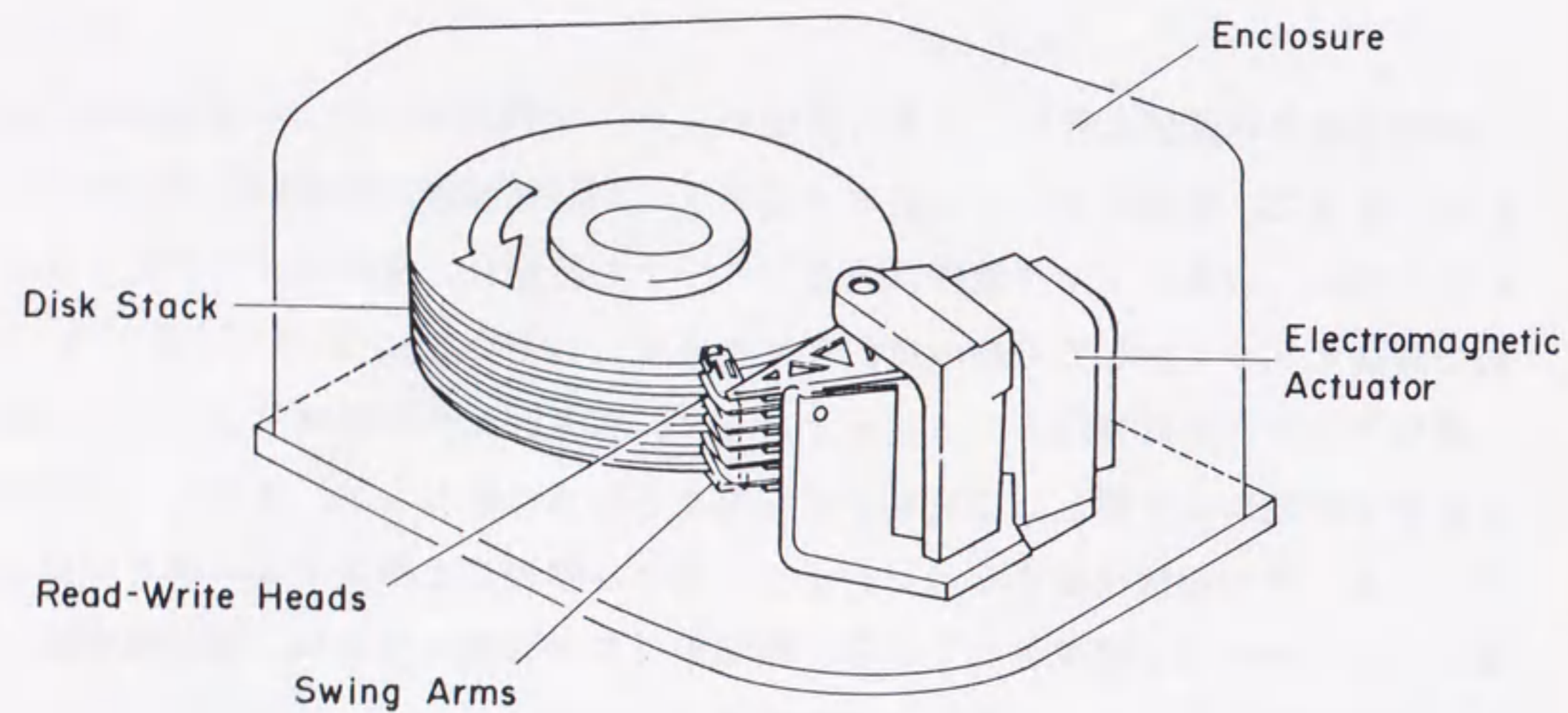


図1.1 磁気ディスク装置の構成
(回転ポジションナの例)

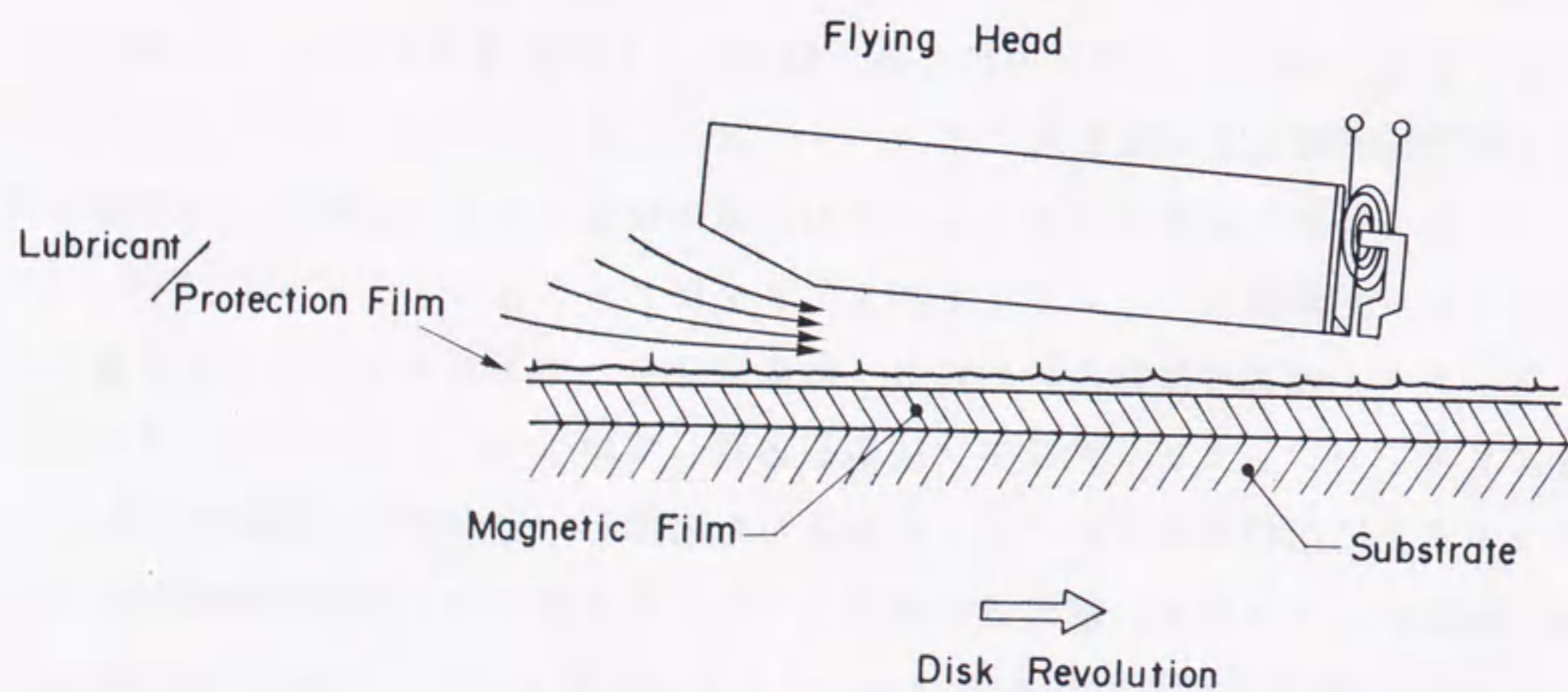


図1.2 ヘッド・ディスクインタフェース

表1.1 大容量磁気ディスク装置の性能諸元の推移

| 項目 | I B M | | | | | | N T T | |
|----------------------------|--------|------|------|--------|------|--------|-------------|---------|
| | 350 | 1311 | 2314 | 3330-1 | 3350 | 3380 | JS 4380 | JS 4470 |
| 発表年(西暦) | 1957 | 1963 | 1965 | 1970 | 1975 | 1980 | 1980 | 1986 |
| 容量 MB/スピンドル | 5* | 3* | 29 | 100 | 317 | 1260 | 400 | 2200 |
| 線記録密度 bit/mm | 3.9 | 34.9 | 86.6 | 159 | 253 | 598 | 550 | 1240 |
| トラック密度 track/mm | 0.8 | 2.0 | 3.9 | 7.6 | 18.8 | (31.1) | 43 | 50 |
| 面記録密度 kbit/mm ² | 0.0031 | 0.07 | 0.34 | 1.20 | 4.76 | (18.6) | 23.6 | 62.0 |
| ヘッド浮上量 μm | 20.0 | 5.0 | 2.2 | 1.2 | 0.46 | (0.33) | 0.22 ~ 0.27 | 0.2以下 |
| 平均アクセス時間 ms | 600 | 150 | 60 | 30 | 25 | 16 | 18 | 12 |
| データ転送速度 kB/s | 8.8 | 69 | 312 | 806 | 1198 | 3000 | 1344 | 4400 |
| ディスク回転速度 rpm | 1200 | 1500 | 2400 | 3600 | 3600 | 3620 | 3000 | 3600 |

括弧内は推定値. * : × 10⁶ characters

り、ヘッドをディスクから離れた状態でディスク回転の起動停止を行うランディング・オン・オフ方式により μm オーダーの浮上すきまを実現した高荷重高面圧動圧形浮動ヘッドを経て、現在では、ディスクにヘッドを押し付けた状態で起動停止を行うコンタクト・スタート・ストップ方式(CSS方式と略す)の低荷重高剛性浮動ヘッドを用いることによりGEMMYディスク装置では $0.2\mu\text{m}$ 以下の浮上すきまを実現している。高記録密度化のための浮上すきまの微小化は、その反面で、ヘッドクラッシュと呼ばれる激しい摩耗損傷を引き起こす原因となってきた。ヘッドクラッシュに対する信頼性を保証しつつ浮上すきまの微小化による高記録密度化を可能としてきたのがヘッド・ディスクインタフェースにおけるトライボロジー技術である。

図1. 2にヘッド・ディスクインタフェースを模式的に示す。磁気ディスクは、一般に、ダイヤモンド研削で平滑に仕上げられたアルミニウム合金の基板に磁性膜を形成しさらにその上に保護膜や潤滑層を形成した構造になっている。磁気ディスクの表面は、工業製品の中では、最も平滑なもののひとつであるが、それでも微小な凹凸やうねりの存在は避けられない。さらに、積層されたディスクが密閉されたディスクエンクロージャ(DE)内で高速で回転することによる高周波の振動も生じる。このような磁気ディスク上で浮動ヘッドを浮上させた時のディスク回転速度とヘッド浮上すきまおよびヘッド・ディスク間の摩擦係数の関係を図1. 3に示す。浮動ヘッドは一種の動圧形気体軸受であり、回転停止時にはディスクと接触している。ディスクが回転し始めても最初のうちはヘッドはディスク上を接触しながら走行し、ある程度の速度以上になると浮き上がり始める。摩擦係数は、ディスクの回転が始まると同時に急激に立ち上がるが、その後ディスク回転速度が上がるにつれて減少する傾向を示す。そして、ヘッドが浮き上がり始める速度あたりから徐々にではあるが再び摩擦係数が増加する傾向に転じる。この摩擦係数の変化はすべり軸受におけるストライベック(Stribeck)曲線そのものであり、ヘッドとディスクが停止時の潤滑膜等を介した接触状態から混合潤滑状態を経て流体潤滑状態へと移行していることを示している。

このようなヘッド・ディスクのインタフェースの各々の状態において、ヘッドクラッシュの原因となるものとして以下の三つが考えられている。

(1) 停止状態：ヘッドとディスクの吸着

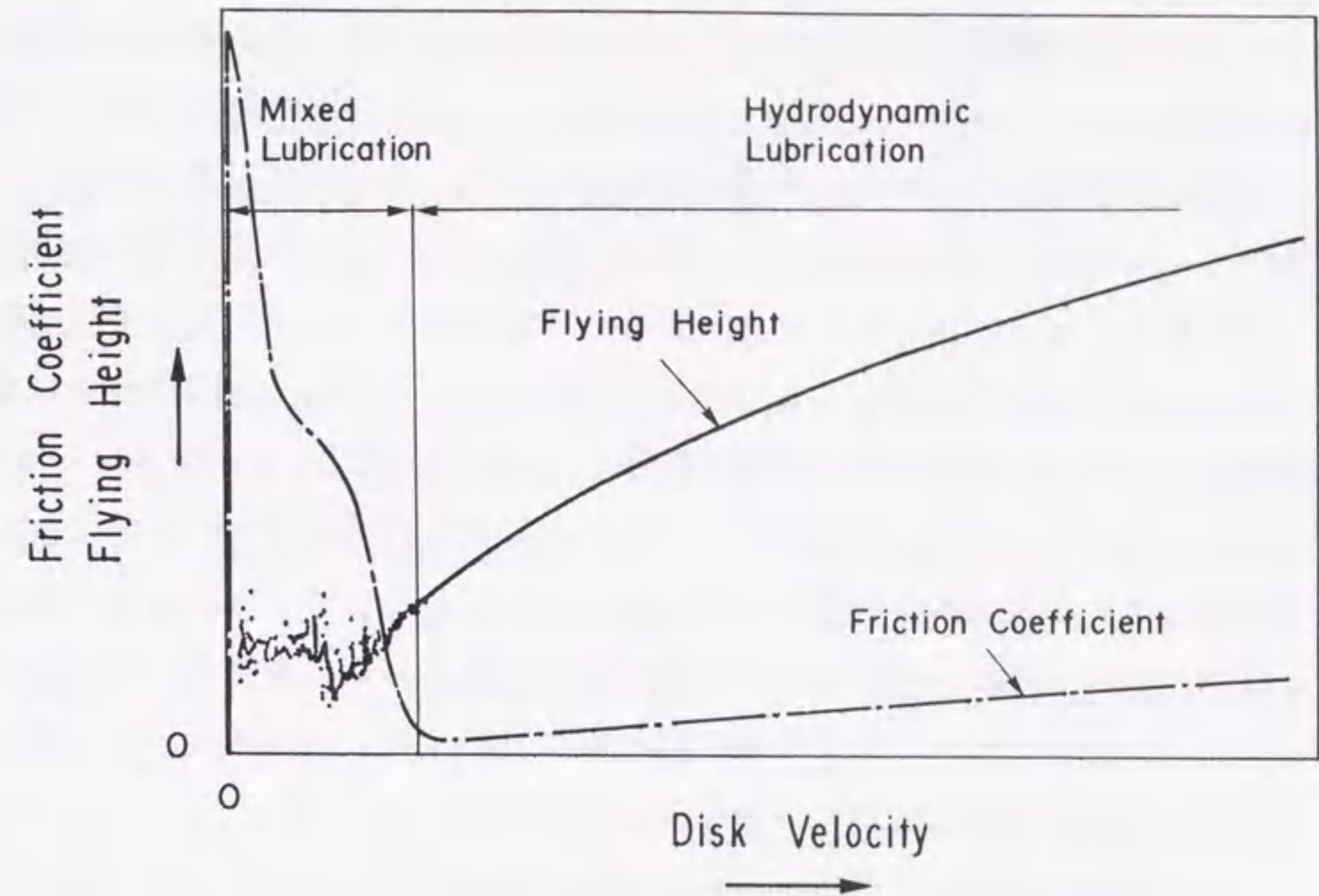


図1. 3 ヘッド・ディスクの潤滑状態

(2) 混合潤滑状態：ヘッドとディスクの摩耗

(3) 流体潤滑状態：ヘッドとディスクの間欠的な接触

浮動ヘッドを磁気ディスク上に押しつけたまま長時間放置すると、ヘッドとディスクの間に潤滑剤や周囲の水蒸気によってきわめて薄い液体膜が形成され、油を薄く塗った二つのブロックゲージを対向させた時と同様な激しい吸着が発生する。吸着が起こると、ディスク回転起動時にスティックスリップが起こってヘッドがディスク面を叩いたり、もっと激しい場合にはヘッドの支持機構が破損し、ヘッドクラッシュに到る事態が発生する。吸着の発生はディスクの潤滑状態あるいは湿度等の周囲環境によって大きな影響を受けるため、表面潤滑剤の種類と膜厚の適正化、湿度の管理が重要な課題となる。田子⁽¹²⁾らは、塗布形ディスクにおいて潤滑剤の付与量や湿度が吸着に及ぼす影響を詳細に調べ、吸着に対して安全なディスクの潤滑条件や装置の運転条件を明らかにしている。表面がより平滑な薄膜ディスクでは、吸着の回避が塗布形ディスク以上に重要な問題としてクローズアップされており、従来の液体潤滑剤に代わる新しい固体潤滑剤の採用や、より厳しい湿度条件の設定などの検討が必要となる。

CSS方式の浮動ヘッドにおいては、起動停止時のヘッドとディスクの摩耗は避けて通れない問題である。ディスク表面が理想的な平面であれば、ディスクが回転を開始すると同時にヘッドとディスクの間には完全な空気膜が形成され、非接触の流体潤滑状態が実現される。しかし、実際のディスクの表面には微小な凹凸が存在しており、また大きなうねりや、ところどころにヘッドの浮上すきまオーダの高い突起も見られる。したがって、図1-3に示したように、ディスク回転の起動後かなりの速度になるまでヘッドとディスクの間には完全な空気膜が形成されず、固体接触と流体潤滑が混在するいわゆる混合潤滑状態が続くことになる。TsengとTalke⁽³⁾は電気抵抗法を用いて導電性の模擬ヘッドと模擬ディスクのCSS時の接触状態を実験的に明らかにするとともに、その際のヘッドの摩耗量を測定し、ヘッド・ディスクの潤滑状態と摩耗量の間には明確な対応関係があることを示したが、ヘッドに加えられているばね荷重や接触走行速度と摩耗の関係など、CSS時の混合潤滑下でのヘッド摩耗についての定量的な議論は十分でない。

混合潤滑下におけるヘッドとディスクの摩耗現象の複雑さは摩耗を支配する二

大因子である速度と接触荷重がともに変化するところにある。混合潤滑状態における速度と接触荷重の関係を求めるためには、浮動ヘッドに働く動圧力を計算することが必要となる。流体潤滑状態における動圧力は、レイノルズの潤滑方程式を解くことによって求められるが、この式では、本質的に、局所的にでもすきまが零となるような接触を含む潤滑現象を取り扱えない。したがって、混合潤滑状態における摩耗現象を定量的に取り扱うためには、レイノルズ方程式を接触を含む潤滑問題に適用し、速度と接触荷重の関係を求める方法を見いだすことが重要な研究項目になる。

ヘッドとディスク自体の摩耗損傷特性を明らかにし、それを向上させることも装置の高信頼度化のための重要な課題である。磁気テープ装置においては、磁気ヘッド材料としてもっとも良く用いられるフェライトの摩耗に及ぼす速度と荷重の影響⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾や、フェライトの組成や結晶粒径の影響^{(8),(9)}、あるいは磁気テープの種類によるフェライトの摩耗形態の違い⁽¹⁰⁾などがかなり詳細に調べられている。フェライト以外のセンダストやパーマロイといったヘッド材料についても、磁気テープによる摩耗試験結果^{(11),(12)}が報告されている。磁気テープ自身についても磁性膜や保護層と耐摩耗性の関係あるいはヘッドの形状や材質がテープの耐摩耗性に及ぼす影響などが明らかにされている^{(13),(14)}。また、ヘッドとテープの耐久性試験法についての検討も多い⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾。それに比べ、磁気ディスク装置のヘッドとディスクの摩耗に関しては、ステンレス製の擬似ヘッドを用いて塗布形ディスク上でのヘッドの摩耗形態を調べたTalkeらの報告⁽¹⁸⁾やWeissによる塗布形ディスク上でのCSS時のヘッド摩耗形態についての報告⁽¹⁹⁾が代表的なものとして挙げられるものの、塗布形ディスクの潤滑剤や磁性膜の構造等がヘッド摩耗に及ぼす影響等は未だほとんど明らかになっていない。また、塗布形ディスクに代わる高密度記録用媒体である薄膜ディスクとヘッドの摩耗損傷についても小口らの報告⁽²⁰⁾以外には、ほとんどないといってよい状況である。

理想的には、磁気ディスク装置が定常運転状態に達し、ヘッドとディスクが流体潤滑に移行した後は両者は非接触状態に保たれることになる。しかし、ディスク表面にはヘッドの浮上すきまオーダの突起が確率的に存在し、また外部から塵埃が混入することもある。さらに、ヘッドシークにより支持機構が励振されて浮上すきまも変動する。このようないくつかの条件が重なりあった時、定常浮上状

態においてもヘッドとディスクの接触が起こる。定常状態におけるヘッドとディスクの接触は間欠的であるが相対速度が高いこともあり、ヘッドクラッシュに結びつくことが多い。TsengとTalke⁽³⁾は、電気抵抗法を用いてヘッドとディスクの接触現象の解明を試みている。また最近では、レーザドップラやレーザ干渉、あるいはコンダクタンス法を用いた動的なヘッド浮上すきまの測定により間接的にヘッドとディスクの接触状態を明らかにしようとする試みもなされている。しかしながら、その多くは、接触測定を可能にするためにヘッドやディスクの双方あるいはいずれかに装置に搭載されているものとは異なる擬似ヘッドや擬似ディスクが使用されていたり、実際のヘッドやディスクが使われていても測定を可能にするための補助的な加工や細工が施されていることが多く、実際の磁気ディスク装置のヘッドとディスクのインタフェースで起こっている接触現象を正確に再現しているかという点については疑問がある。ヘッドとディスクの接触を正確にかつ定量的に検出して接触を引き起こす要因を明らかにすることは、磁気ディスク装置の実用化や磁気ディスクの品質管理上の重要な課題であり、実用的なヘッド・ディスクの接触検出法の確立が強く望まれている。

本論文では、このような磁気ディスク装置の高性能化・高信頼化の鍵を握るヘッド・ディスクのインタフェースにおけるトライボロジーに関する研究結果について論じる。

まず、第2章においてヘッドとディスクのインタフェースで生ずる現象を調べる上での必須なツールとして開発したヘッド・ディスクの高精度な接触検出法について述べる。この接触検出法は材料試験に用いられているアコースティックエミッション法を応用したものであり、実機に用いられる浮動ヘッドと磁気ディスクの接触を初めて可能にしたものである。ここでは、ヘッドとディスクが接触した場合にも、材料が変形破壊した時と同様な超音波放出（アコースティックエミッション：AE）が起こることに着目し、それを検出することによってヘッドとディスクの接触状態の把握や接触回数の測定が可能であることを示すと同時に、接触検出の高精度化の手法等についても言及する。さらに、この方法の磁気ディスク品質管理への適用についても述べる。

第3章では、最初に、CSS時の混合潤滑特性を解析する手法について述べる。レイノルズ方程式による解析を混合潤滑領域まで適用するため、ここでは実際の

磁気ディスク上におけるヘッドの浮き上がり試験結果に基づく潤滑モデルを提案した。このモデルはディスクの平均的な表面突起に相当する厚さを持ち、潤滑的には空気膜と等価な剛体膜が平滑な仮想ディスク上を一様に覆い、その上をヘッドが走行すると仮定したものである。このモデルの妥当性を混合潤滑特性の計算結果と実際のヘッドによる実験結果との比較により確認した。つぎに、一般的なヘッド材料であるフェライトの摩耗試験を行い、フェライトの摩耗形態がマイルド摩耗からシビア摩耗に遷移する速度-荷重条件が存在することを示した。そして、ここで提案した混合潤滑モデルを用いて計算した混合潤滑状態におけるヘッドの速度と接触荷重の関係を表す曲線がフェライトのマイルド摩耗領域にあれば、CSS時のヘッド摩耗は実用上無視できるほど小さいことを実際のフェライト製の浮動ヘッドのCSS試験によって立証した。本章で示した一連の結果はヘッド材のマイルド摩耗条件と混合潤滑モデルに基づく接触荷重の計算値とから、信頼性の高い浮動形ヘッドの設計が可能であることを示している。

第4章では、ヘッドの動的な浮き上がり特性を解析と実験の両面から検討した結果について述べる。一般に起動停止時の接触走行距離は、ヘッドの浮上特性とディスクの表面あらさによって決まるが、ディスクの加工上の不整や取り付け誤差によるうねり、あるいはディスクの回転に伴う非同期な振動がある場合にはヘッドの浮上量変動によって起動停止時の接触走行距離が長大化する。ここでは、うねりがあるディスク上での起動停止時のヘッドの動的な浮上特性を数値解析的に求めることにより、接触状態から非接触状態へ移行する浮き上がり速度を求め手法を提案した。さらに、人為的にうねりを設けたディスク上でヘッドを走行させた時の浮き上がり特性をアコースティックエミッション法を用いて測定し、上述の解析手法の妥当性を実証した。

第5章では、浮動ヘッド材料として用いられることの多い磁性フェライトの摩耗形態に及ぼす塗布形磁気ディスクの構成パラメータの影響について述べる。塗布形ディスクの磁性塗膜中には、強化材として微量のアルミナ粒子が加えられている。ここでは、その混合量がヘッド用のフェライト材とディスクの摩耗特性に及ぼす影響を調べ、アルミナ量の増加に伴って摩耗の形態が凝着摩耗からアプレッション摩耗へと変化することを示した。凝着摩耗からアプレッション摩耗への遷移によってフェライトの摩耗は急増するが、その反面ディスク側の損傷は軽微なも

のとなる。ここで用いたヘッド用フェライト材とディスクの組合せでは約8%のアルミナの混合量が摩耗損傷の観点からの最適値であった。また、磁気ディスクには、CSS時のヘッドとディスクの摩耗損傷を軽減する目的でパーフロロ・ポリエーテル(PFPE)系の液体潤滑剤が用いられている。ここでは、その塗布量をパラメータとしてヘッド用フェライト材の摩耗試験を行い、潤滑剤の付与によってフェライトの摩耗を無潤滑の場合の1/20以下に軽減できることを示した。

第6章では、近年、塗布形ディスクに代わる高密度記録用磁気ディスクとして注目を集めている薄膜ディスクの強度と耐久性について述べる。薄膜ディスクはアルミニウム合金の表面を硬質処理した基板の上にスパッタあるいはめっき法で磁性膜を形成したものである。塗布形ディスクに比べ均質で薄い膜が得られることから高密度化に適した記録媒体であるが、その反面、膜厚が薄いことと塗布形ディスクにおけるアルミナ粒子のような強化材を持たないことからその磁性膜そのものの強度や耐久性は塗布形ディスクに比べかなり劣る。そのため、基板や保護膜あるいは表面潤滑剤などの対策が重要となる。ここでは $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ スパッタ形薄膜ディスクを対象に、その基板として用いられているアルマイト基板のアルマイト膜厚がディスクの強度と耐久性に及ぼす影響を引っかき試験とピン・ディスク形の摩耗試験によって評価し、アルマイト膜厚が約 $10\mu\text{m}$ の時に薄膜ディスクの強度と耐久性が最も高くなることを明らかにした。アルマイト膜厚が $10\mu\text{m}$ 以下の領域ではアルマイト層の下地である軟らかいアルミニウム合金の影響が顕在化し実効的な基板の硬度が低下すること、また $10\mu\text{m}$ 以上の領域ではアルマイト自身の強度劣化が起こること、がこの原因である。

第7章では、スパッタ形の薄膜ディスクの信頼性に影響を及ぼす亀裂の発生メカニズムについて述べる。スパッタ形の薄膜ディスクは軟質なアルミニウム合金の表面を陽極酸化して硬質なアルマイト層を形成した基板の上に $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の磁性膜がスパッタ法で形成されている。アルマイトおよび $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ とも硬質な材料に特有な脆性を示し、この脆性に起因する亀裂の発生が磁気ディスクとしての信頼性に大きな影響を及ぼす。スパッタ形の薄膜ディスクでは、アルミニウム合金下地とアルマイトおよび $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁性膜との硬度差がきわめて大きいため、通常のセラミックスのような均質な硬脆性材料における亀裂の発生形態とは

かなり異なる様相を呈する。ここでは、連続的に印加荷重を増加できる引っかき試験機を用いて圧子の先端曲率とディスク基板のアルマイト膜厚をパラメータとした引っかき試験を行い、アルマイト基板については、先端がかなり鈍な圧子で引っかいた場合でも、円弧状亀裂の発生に先立ってメジアン亀裂と呼ばれる圧子の進行方向に沿ってアルマイト膜の厚さ方向に進展する亀裂が発生することを明らかにした。均質な脆性材料の場合、このような亀裂の発生はビッカース圧子のような鋭い圧子の時にのみ見られるものであり、軟質下地の上に形成された硬脆性膜に特有な亀裂の発生形態といえる。また、脆性膜で見られるメジアン亀裂の発生形態には、亀裂が表面から垂直下方に進展するものと、亀裂が膜と下地の界面から上方に進展するものの2種類があることを引っかき痕断面の観察結果から明らかにするとともに、有限要素法による応力解析を行い、この二つのメジアン亀裂の発生メカニズムを考察した。

第8章では、3.2ギガバイト集合形磁気ディスク装置用に実用化した浮動ヘッドと磁気ディスクについて述べる。3.2ギガバイト集合形磁気ディスク装置は、従来の塗布形ディスクに代わる高密度記録媒体として注目されてきた薄膜ディスクを世界で初めて搭載した磁気ディスク装置であり、 $0.3\mu\text{m}$ 以下の微小浮上すきまの浮動ヘッドとの組合せにより、 $2.4 \times 10^6 \text{ bit/cm}^2$ という高記録密度を実現している。ここでは、このような微小なヘッド浮上すきまを実現した浮動ヘッド設計および、ディスク面の平滑化のためのヘッドバニッシュ技術について述べるとともに、平滑なディスクで問題となる吸着を防止し、かつ十分な耐摩耗性を実現した表面潤滑技術について述べる。

第2章 浮動ヘッドと磁気ディスクの接触検出⁽²¹⁾

2.1 緒言

磁気ディスク装置の大容量化・高記録密度化のためには、浮動ヘッドと磁気ディスクの間隙すなわち浮動ヘッドの浮上すきまを微小化することが必要であり、最近では0.20 μ mの微小浮上すきまの浮動ヘッドも実用化されている。磁気ディスク装置に用いられている浮動ヘッドは動圧形の気体軸受の原理を応用したものであり、ディスクとの相対速度が変化するにつれて、通常の動圧形のすべり軸受と同様に、固体接触状態から混合潤滑を経て流体潤滑へ到る潤滑状態の遷移が起こる。浮上すきまの微小化は、起動停止時の混合潤滑状態のヘッドとディスクの接触走行距離を長大化させ、摩耗を増大させるだけでなく、流体潤滑状態にあるはずの定常浮上時においてもヘッドがディスクにまれに存在する突起や外部から混入した塵埃と高速で接触する確率を高め、ヘッドクラッシュにつながるヘッドの欠けやディスク面の損傷を発生させる危険性をはらむ。磁気ディスクの高性能化・高信頼化のためには、浮上すきまの微小化に伴って顕在化するヘッドとディスクの摩耗損傷のメカニズムの解明が重要な研究課題であり、そのツールとしてのヘッド・ディスクの接触検出法の確立が強く望まれている。

浮動ヘッドとディスクの接触に関する報告としてはTsengとTalkeの研究⁽³⁾がある。彼らは、導電性を持つ金属ディスクとトライパッドの軸受面を持つステンレス製の模擬ヘッドを用い、ディスク回転起動時から定常回転に到る間のヘッド・ディスクの接触頻度を電気抵抗法によって計測し、ヘッドの浮上特性や摩耗量との関係を調べている。電気抵抗法は接触検出法としてきわめて感度が良い優れた方法であり、金属同士の摩擦における接触状態の解明にもしばしば用いられているが、磁気ディスクと浮動ヘッドの接触検出に應用するには、彼らが用いたような導電性を持つ特殊なディスクやヘッドを用いることが必要となり、ほとんど導電性のないNi-Znフェライトの浮動ヘッドや塗布形の磁気ディスクの接触検出への適用は困難である。また最近では、単色光およびレーザー干渉法⁽²²⁾⁻⁽²⁴⁾やレーザードップラ法⁽²⁵⁾あるいは静電容量の変化を検出する方法⁽²⁶⁾などにより実

際の浮動ヘッドと磁気ディスク間の浮上すきまの変動を測定し、その測定値から間接的にヘッド・ディスクの接触を論じた研究結果も報告されているが、測定を可能とするためにヘッドやディスクに特別な加工が必要なことや、測定装置がかなり大がかりになるのに加え、あくまで間接的にしかヘッドとディスクの接触現象を捉えていないところに問題が残されている。

本章では、実際の磁気ディスク装置内で起こっている浮動ヘッドと磁気ディスクの接触現象を解明することを目的に開発した新しいヘッド・ディスクの接触検出法について述べる。この方法は、近年、材料試験をはじめとするいろいろな分野で注目を集めているアコースティックエミッション（以下、AEと略す）計測法を浮動ヘッドと磁気ディスクの接触検出に應用したものである。ここでは、まず、AEによる接触の検出原理と測定装置の構成について述べるとともに、この方法を用いて起動停止時から定常浮上に到るまでのヘッド・ディスクの接触状態を調べた結果について述べる。また、この手法によって、磁気ディスクの品質管理の上で重要な課題となっているヘッドの浮上保証を規定するディスク面の突起高さの頻度分布が測定可能であることを示す。

2.2 AEによるヘッド・ディスク接触の測定原理および方法

AEとは本来材料の変形・破壊に伴う歪エネルギーの解放によって高周波の弾性波が放出する現象を指す言葉である。AEは変形・破壊等の材料内部の動的な構造変化にきわめて鋭敏であり、それゆえに、AE計測法は材料研究の一段としてばかりでなく、大形構造物のオンライン欠陥探索法としても近年注目されてきている。また最近では熔接割れ、圧力リーク、亀裂破面の摩擦等によって生じる擬似AEをも包括してAEとして取り扱うことが一般的となってきており、切削工具のインプロセス異常検出等、AE計測法の適用範囲が急速に拡大している。

ヘッド・ディスクの接触検出にAE計測法を適用する利点としては次のことが挙げられる。

- (1) 浮動ヘッドあるいは支持アーム部にAEセンサを貼付けるだけで、それ以外には特殊な加工が不用。
- (2) いかなる材質のヘッド・ディスクの接触も検出可能。

(3) 通常の機械的雑音に比べAE波は高周波であるため、機械的雑音の除去が容易で高いS/N比がとれる。

またこの方法は、ヘッドとディスクの接触時の衝撃あるいは摩擦のエネルギーの相対比較ができる可能性も持っている。

図2. 1に圧電形AEセンサの構造図を示す⁽²⁷⁾。(a)は不平衡形、(b)は差動形のAEセンサである。両構造にはそれぞれ利点・欠点があり用途に応じて使い分けられる。圧電素子としてはチタンジルコン酸鉛(PZT)が用いられることが多いが、その他チタン酸バリウム、LiNbO₃系の圧電素子も用いられる。浮動ヘッドとディスクの接触によって生じたAE波は、この圧電素子で電気信号に変換される。

AEによるヘッド・ディスクの接触検出で最も問題となるのは、接触検出に適したAEセンサの選定と、そのAEセンサを取付ける場所の選定である。ヘッド・ディスクの接触によって生じるAEは、後に述べるようになりに広い周波数帯域に渡ってスペクトラムをもつため、特定の周波数に鋭い感度のピークをもつAEセンサでは接触を正確に検出できないおそれがある。またAEセンサの取付け場所に関しては、浮動ヘッドの浮上特性をそこなわず、かつAE波がセンサに伝搬するまでの減衰ができるだけ少ない場所を選定する必要がある。

AEセンサを浮動ヘッドに直接取り付けることができれば、高感度なヘッド・ディスクの接触検出が可能になる。この方法では、AEの減衰はほとんど無視できるが、きわめて軽量のAEセンサを使わないかぎり浮動ヘッドの浮上特性に悪影響が及ぶことは避けられない。現在市販されているAEセンサで最も小形のものでも重量は170mg程度であり、浮動ヘッドそのものの重量80mg~160mgに比べかなり大きい。したがって、この方法を採用するためには圧電素子を浮動ヘッドの浮上特性に影響を及ぼさない程度の大きさに加工し、それを直接ヘッドに取付ける必要がある⁽²⁸⁾。しかしこのような圧電素子は感度および周波数特性のバラツキが大きい上に、素子自身あるいはリード線のシールドがきわめて難しく、雑音対策の点に課題が残っている。

図2. 2は、浮動ヘッドの浮上特性をそこなわずかつAE波の減衰を小さくするためウィンチェスタ形の支持ばねの根元を長くしてAEの導波板とした接触検出用のAEヘッドアセンブリである。このアセンブリを採用することによって、

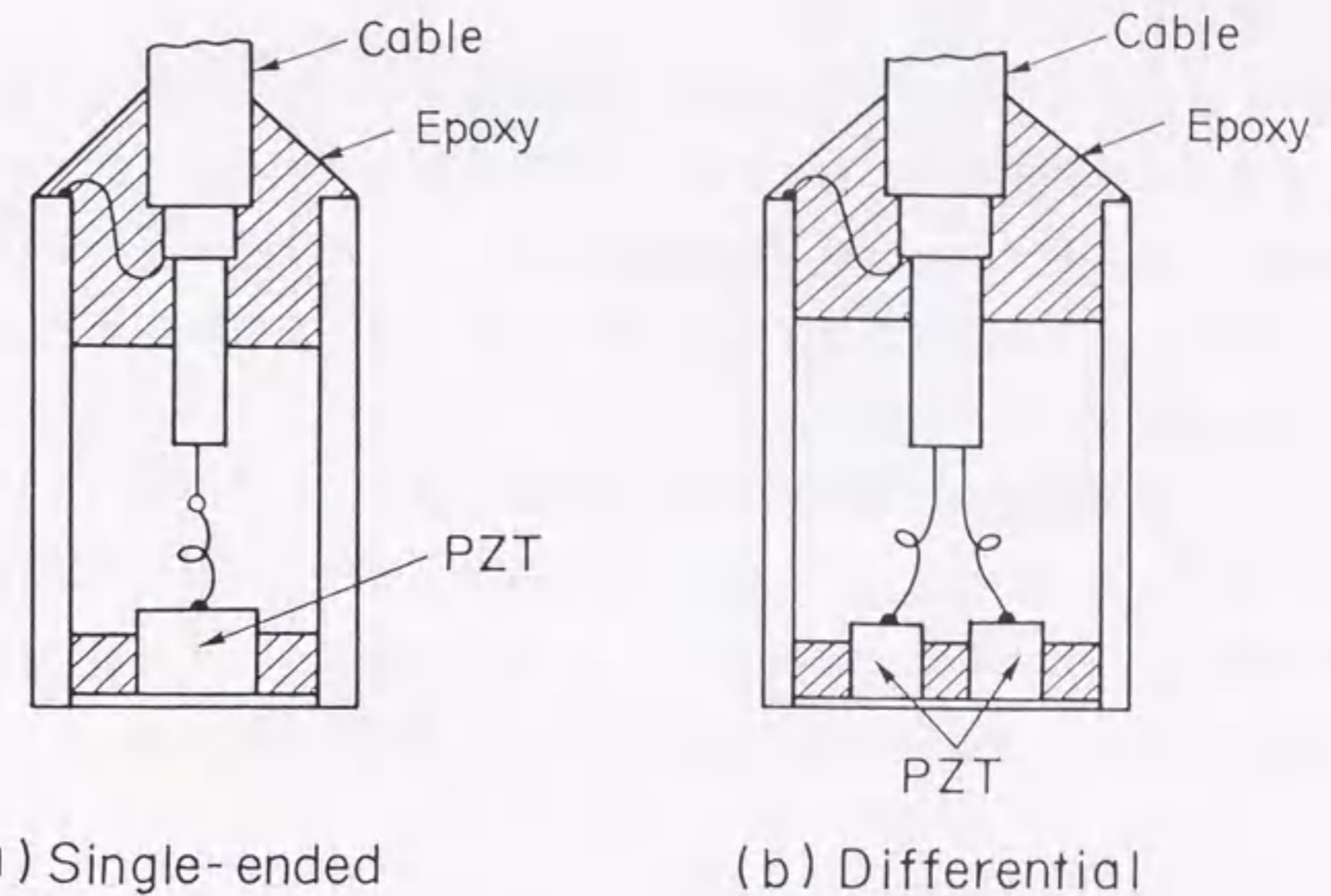


図2. 1 AEセンサの構造

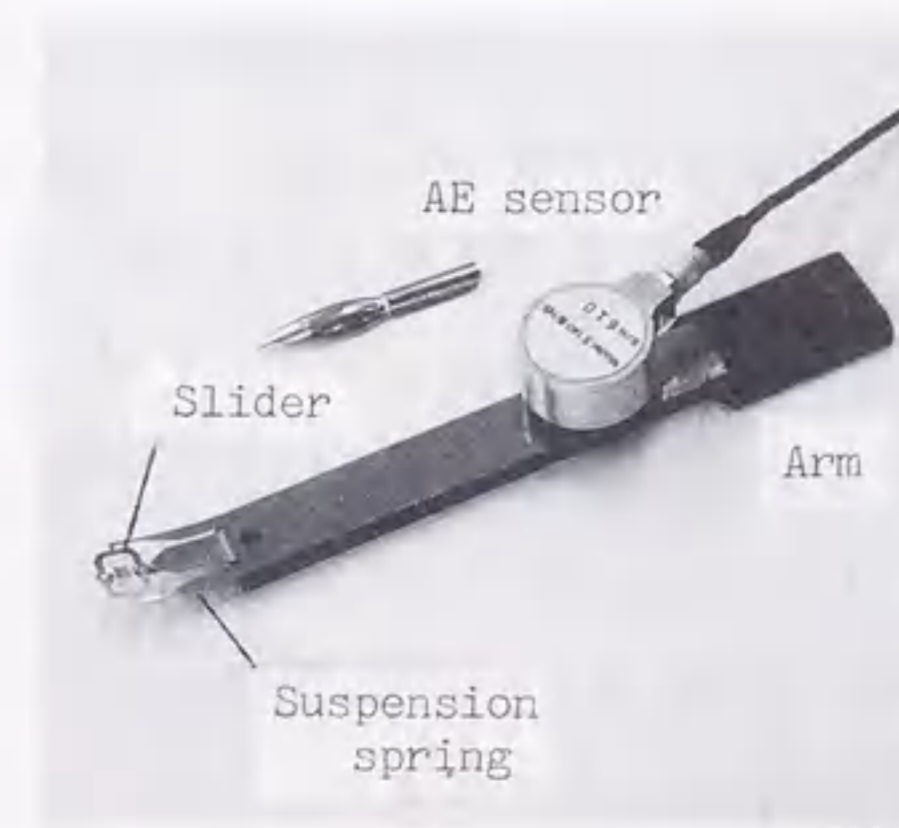


図2. 2 AEヘッドアセンブリ

感度の高い大形センサの使用が可能となるだけでなく、ディスク内周部における接触の検出も可能となる。

図2.3にここで用いた不平衡形の高感度AEセンサの感度・周波数の特性曲線を示す。不平衡形のAEセンサは、信号処理系をシンプルにできるという利点を持つ。このAEセンサは超音波法あるいはインパルス法のどちらの較正法でも100kHzから400kHzあるいは500kHz程度のかかなり広い周波数帯域で高い感度をもつことがわかる。

図2.4に接触検出に用いたAE計測装置を示す。図2.2のAEヘッドアセンブリはディスクの半径方向に移動可能な直動ステージに取付けられている。実際の浮動ヘッドの代わりに透明なサファイア製の擬似ヘッドを用いれば、白色光干渉法による浮上状態の監視と接触検出の同時測定も可能である。

2.3 AEによる接触状態の検出

図2.5は表面あらさ $0.2\mu\text{m}R_{\text{max}}$ の塗布形ディスク上でサファイア製の擬似ヘッドのCSS動作を行った場合のディスク回転速度 U とAE実効電圧 V_{AE} 、ヘッド浮上すきま h_0 、 h_1 'の関係を示したものである。浮上すきまは、透明なサファイア製のヘッドの背面から白色光干渉法によって測定した。塗布形ディスク上における浮動ヘッドの浮き上がり特性は、ほぼ理想的な平面と考えられるガラスディスク上におけるそれとはかなり異なっている。すなわち、ガラスディスクの場合にはヘッドはディスクの起動と同時に浮き上がり始めるのに対し、塗布形ディスク上では停止時から約 5m/s の速度までヘッド浮上面の全面がディスク表面に存在する突起と接触走行していることを示す $0.2\mu\text{m}$ のすきまに相当する干渉色が観測され(領域I)、速度が 5m/s を越えるあたりから浮動ヘッドの流入端が浮き上がり始める(領域II)。回転速度が 13m/s 以上になるとヘッド流出端も浮き上がり始め、その後はガラスディスク上での浮上すきまとほぼ一致する(領域III、領域IV)。この白色光干渉法による浮上すきまの測定結果をみるかぎり、 $U=13\text{m/s}$ 以上の速度域ではヘッドとディスクは非接触であるかのように見える。しかし実際には 13m/s から 23m/s の速度範囲(領域III)でも領域I、IIと同様にAEが発生している。この速度範囲におけるAE

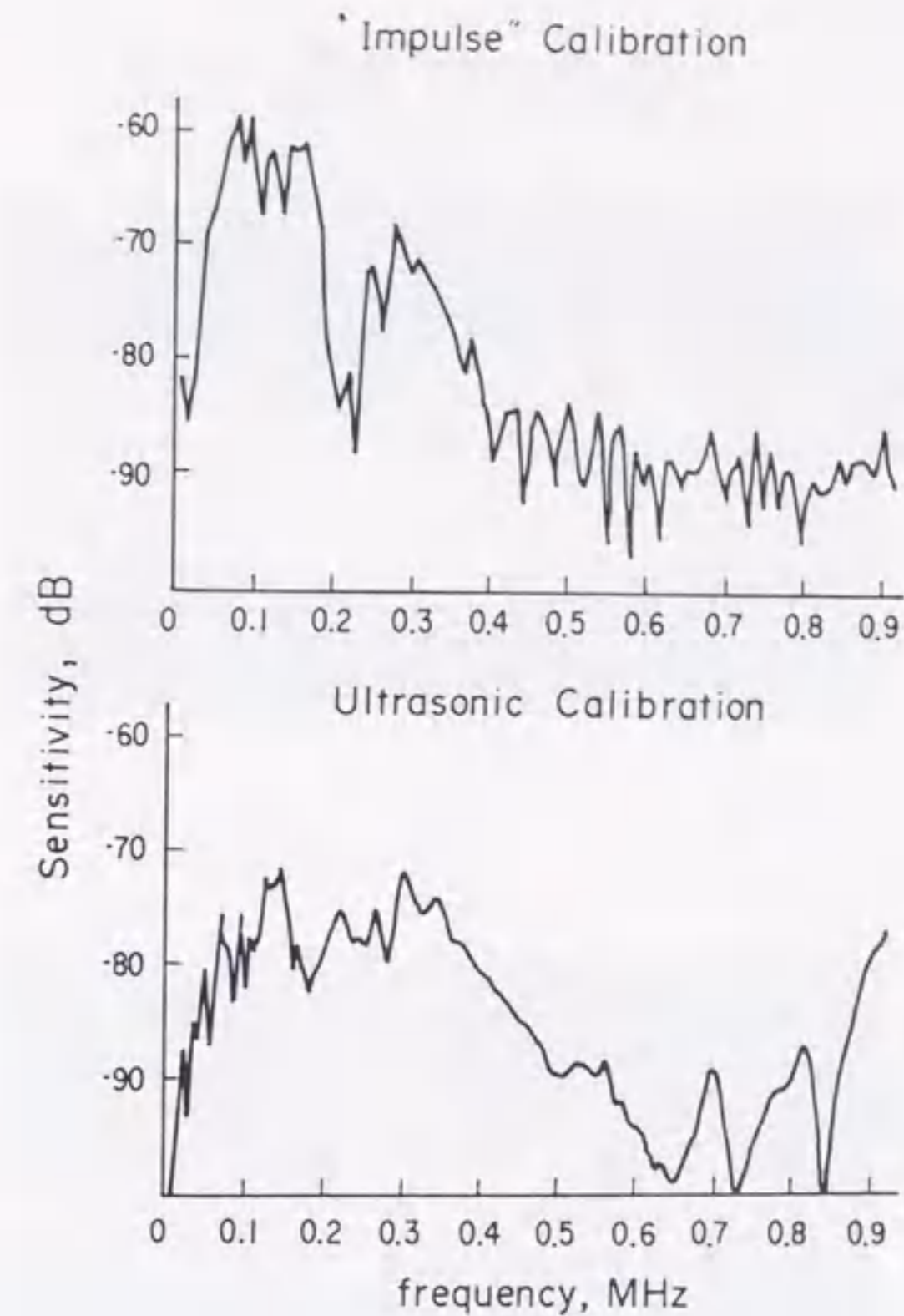


図2.3 AEセンサの周波数特性

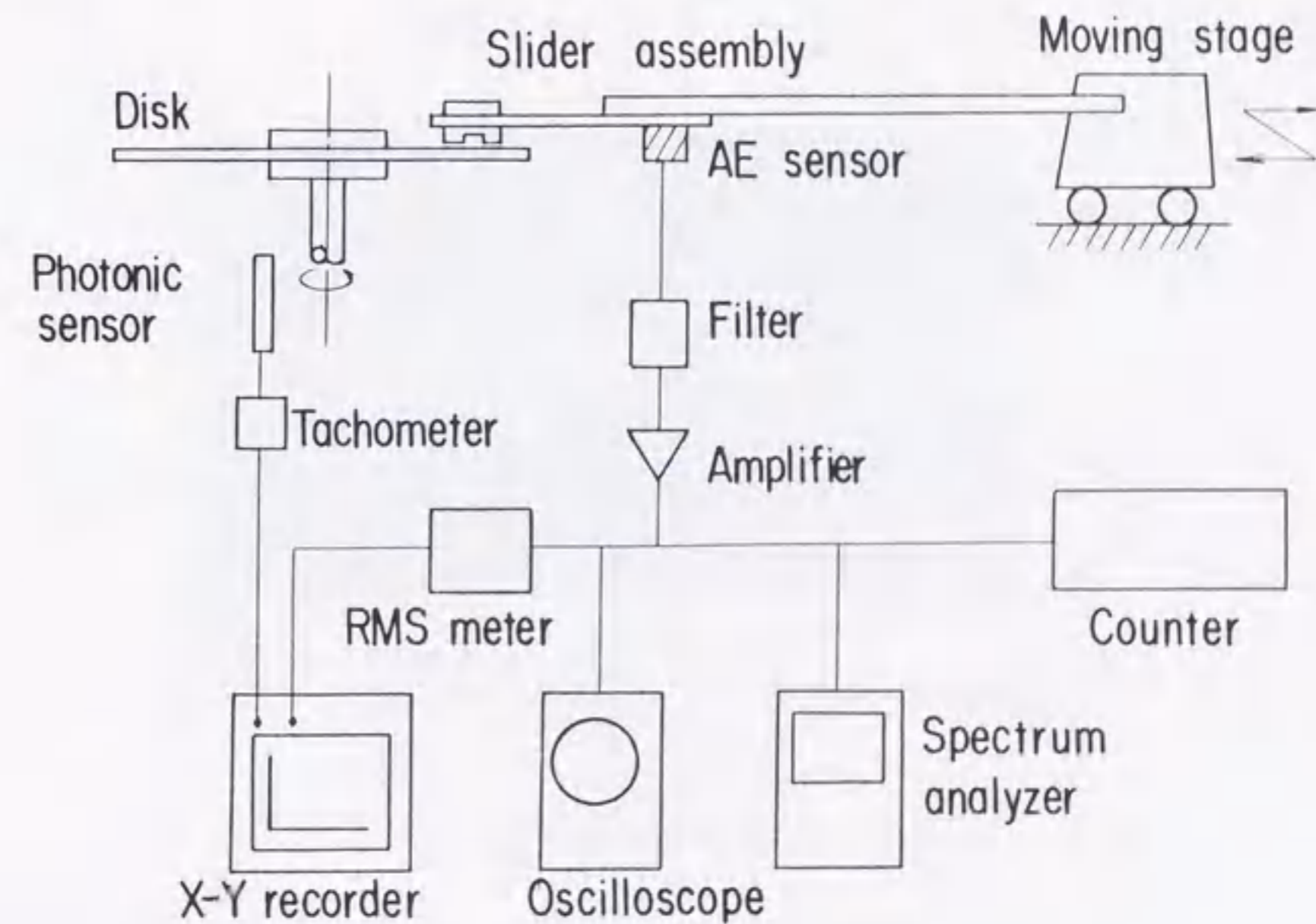


図2.4 AE測定装置の構成

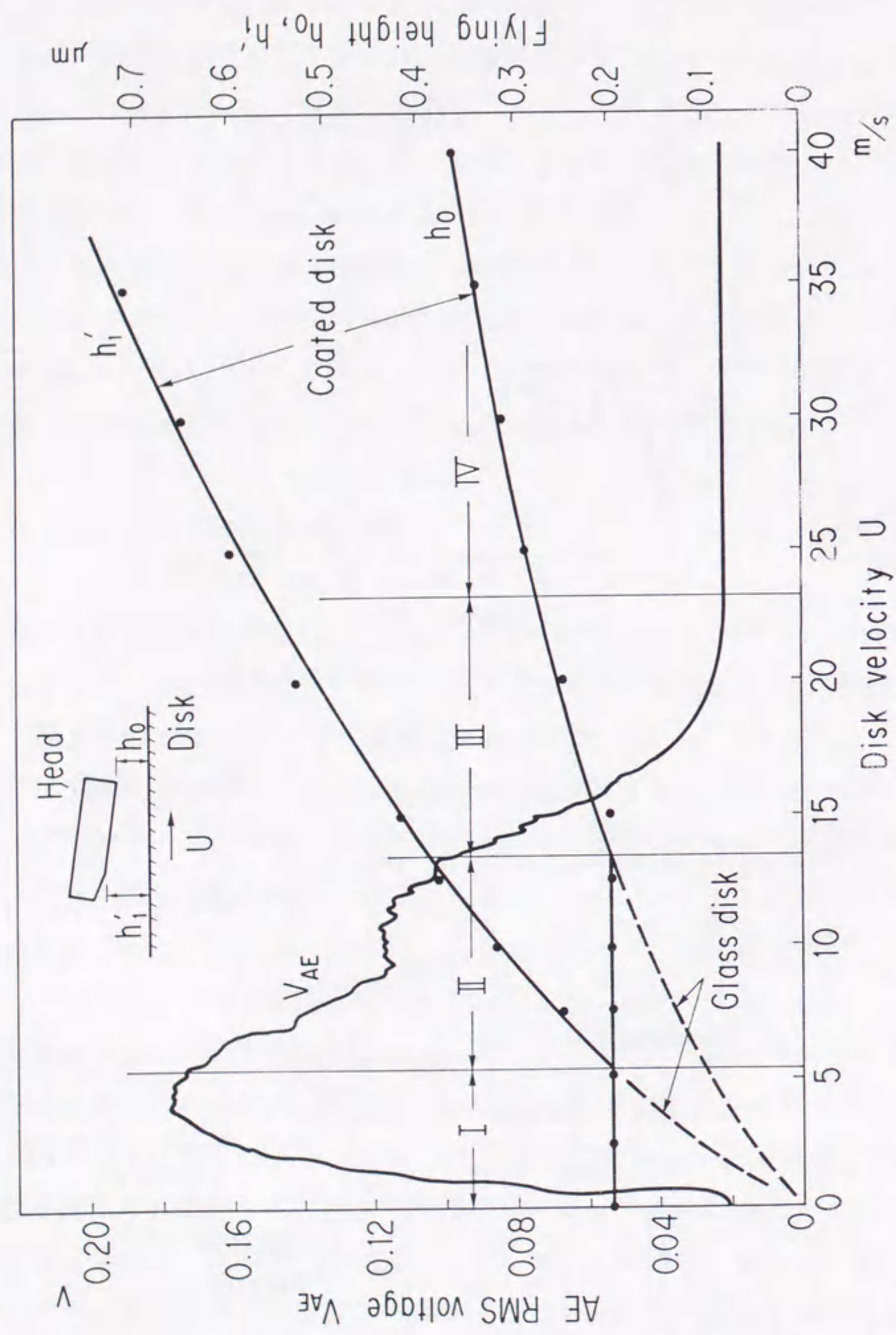


図2.5 ヘッド浮き上がり時の浮上すきまとAE実効電圧の関係

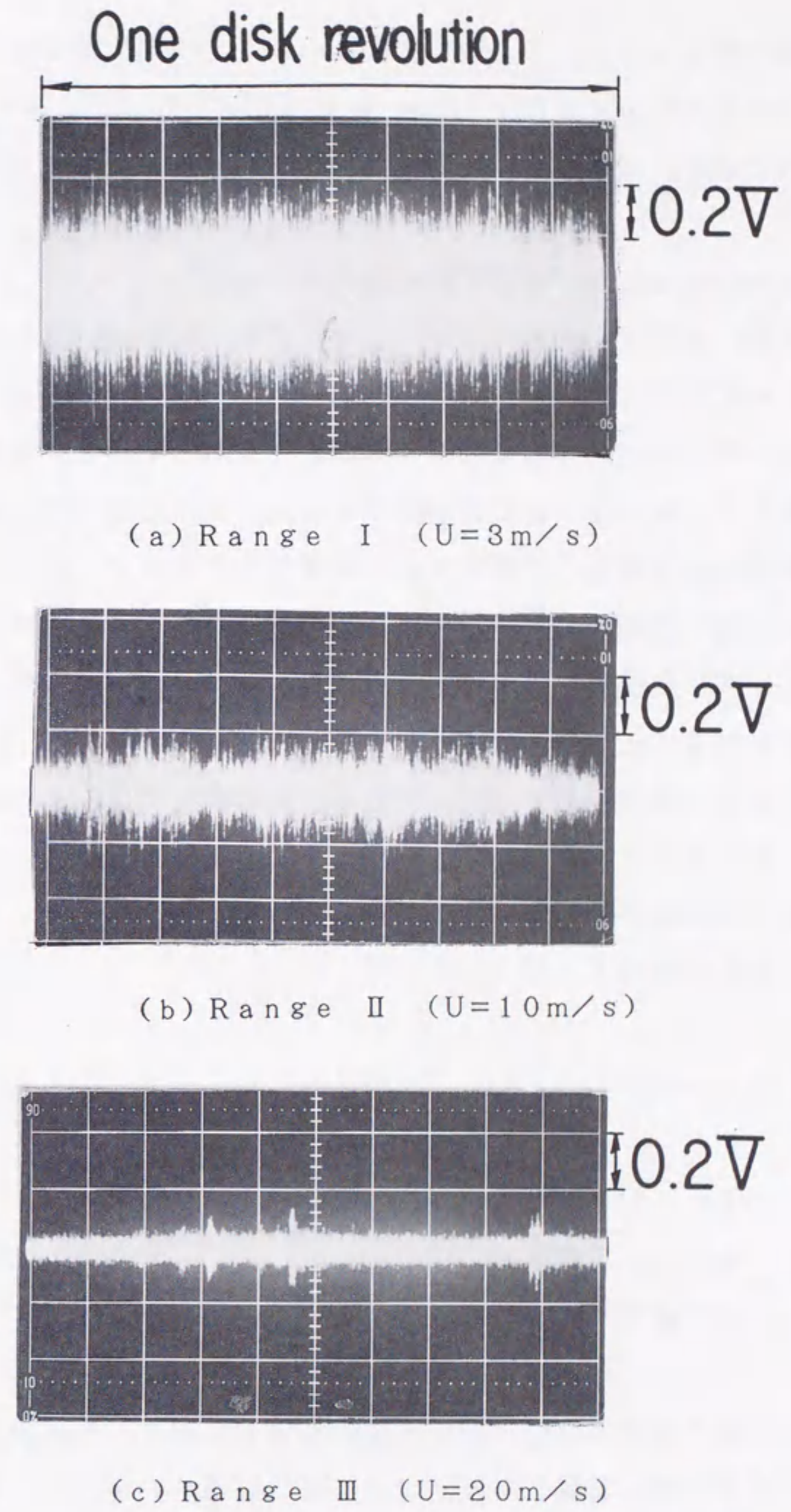


図2.6 各領域におけるAE波形

は、後に述べるようにディスク面の突起とヘッドとの間欠的な接触に起因するものである。U = 23 m/s 以上の領域 IV では A E 実効電圧はノイズの電圧レベルに落ち着いており、ここではヘッド・ディスクの接触が生じていないことがわかる。

図 2. 6 に各領域における A E 波形を示す。領域 I においては連続形の A E 波形が観測され、浮動ヘッドとディスクがほぼ連続的な摺動状態にあることがわかる。これに対し領域 III では、いわゆる突発形 A E が発生している。これは浮動ヘッドとディスクが間欠的な接触状態にあることを示している。領域 II では連続形 A E と突発形 A E が混在した波形が観測されている。この波形は領域 II が連続的な摺動から間欠的な接触へと移行する遷移状態であることを示している。以上の結果から、A E 計測法を用いることによって白色光干渉法ではとらえきれないヘッド・ディスクの接触が検出できるとともに、その波形からヘッド・ディスクの接触状態を知ることができることがわかる。

ところで材料が塑性変形する際に生じる A E に関しては、その変形様式と A E 波形さらには A E のリングダウン計数（しきい値電圧を超える A E パルスのカウント数）の振幅分布の間に密接な関係があることが報告されている⁽²⁹⁾。リングダウン計数の振幅分布 $I(V_{th})$ は

$$I(V_{th}) = k \cdot \exp(-a \cdot V_{th}^e) \quad (2. 1)$$

V_{th} : しきい値電圧、

k, a : 定数、

e : 変形様式を表す材料定数

で表される。様々な金属材料の塑性変形時の A E を測定した結果、連続形 A E の発生を伴う変形が起こる場合には $e = 2$ に近い振幅分布となり、突発形 A E を伴う変形の場合には $e = 1/2$ 、両者が混在する変形様式では $e = 1$ に近い振幅分布となることが明らかになっている。

図 2. 7 に、領域 I、領域 II、領域 III に対応するヘッド・ディスクの接触状態における A E のリングダウン計数の振幅分布を測定した結果を示す。この測定結

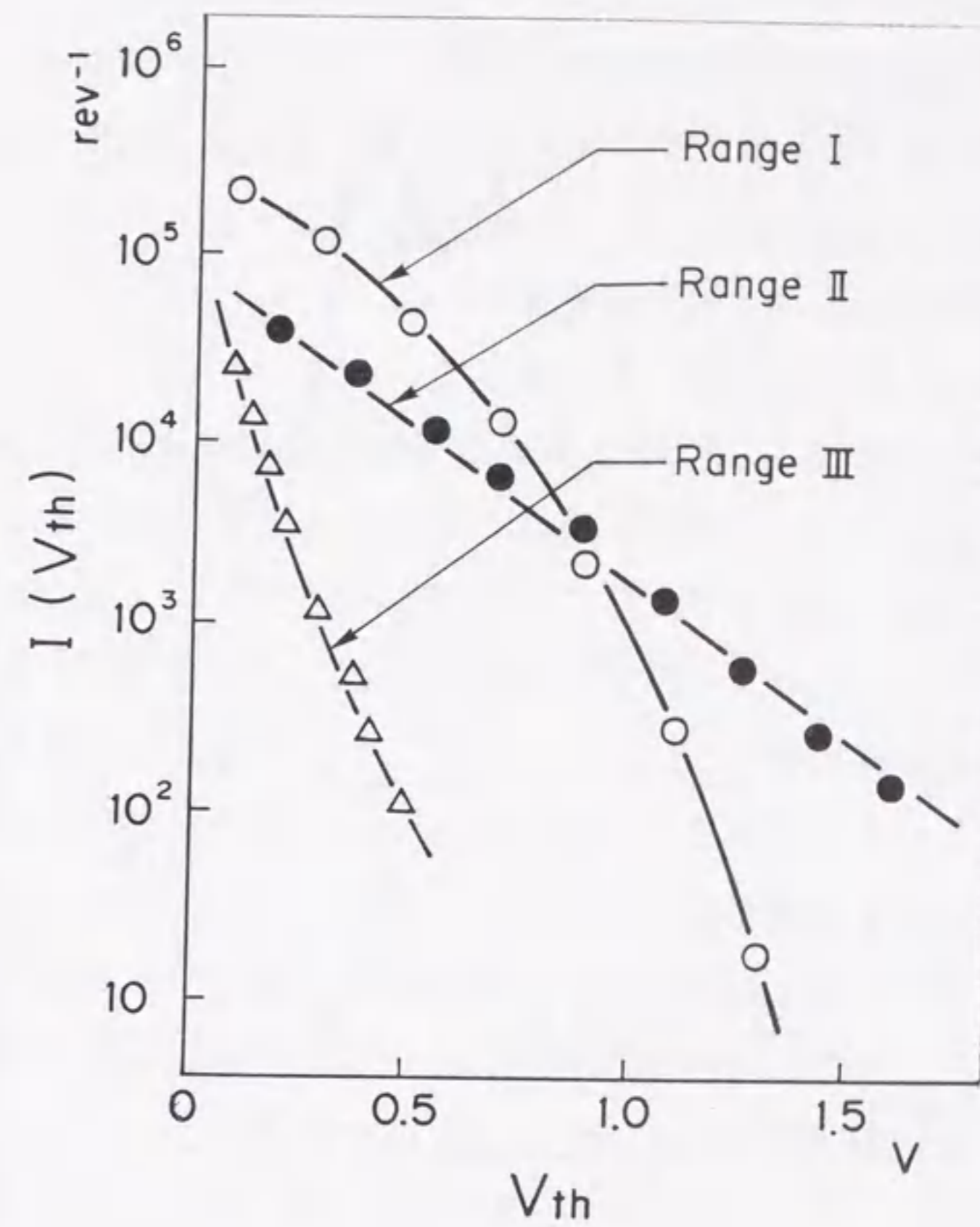


図 2. 7 A E 振幅分布

表 2. 1 接触状態と e 値

| Range | Contact state | e |
|-------|---------------------|--------|
| I | Continuous | 1. 8 1 |
| II | Transition (I → II) | 1. 2 8 |
| III | Intermittent | 0. 6 8 |

果を式(2.1)に最小自乗法で回帰させ、 e の値を求めると表2.1のようになる。連続形AEが支配的な連続摺動状態(領域I)では $e=1.81$ 、突発形AEが顕著な間欠接触状態(領域III)では $e=0.68$ 、その遷移状態(領域II)では $e=1.28$ であり、それぞれ $e=2$ 、 $1/2$ 、 1 に近い値となっている。この結果は、塑性変形の変形様式が e 値で表せるように、ヘッド・ディスクの接触状態も e 値の変化によって把握できることを示している。

図2.5に示した各接触状態におけるAEの周波数特性を図2.8に示す。浮動ヘッドとディスクが低速でかつ連続的に摺動している領域Iにおいては、100kHzから400kHzにわたって、いくつかのスペクトラムが認められる。なかでも低周波領域のスペクトラムが顕著に現れている。ヘッド・ディスクの接触状態が次第に間欠的な接触に移っていくにしたがって、低周波のスペクトラムが小さくなり、それに対して比較的高い周波数のスペクトラムが顕著になってくる。このことは、連続形AEと突発形AEとでは、その周波数特性にかなりの違いがあり、連続形AEと突発形AEが根本的に異質のものであることを示している。

図2.9は $U=1\text{ m/s}$ の低接触走行速度において、浮動ヘッドの押付力 F_s を変化させた場合のAE実効電圧 V_{AE} を測定したものである。ここではヘッドとディスク間の動摩擦係数 μ_k をパラメータとしている。 $U=1\text{ m/s}$ の走行速度は図2.5でいう領域Iに相当する速度であり、ここで発生するAEはほぼ完全に連続形AEであるとみなすことができる。したがってこの測定結果からは、連続形AEの実効電圧が浮動ヘッドの押付力に比例し、かつ押付力と実効電圧の比例関係を示す直線の勾配とディスクの摩擦係数の間にはきわめて強い相関があることがわかる。このことは連続形AEが本質的にヘッドとディスクの摩擦現象にかかわるものであることを示している。

これに対して突発的AEは、浮動ヘッドと磁気ディスクの間欠的な接触によって生じるものであることは、これまで述べてきた通りであるが、その詳細な発生機構については未だ明らかでない。またヘッドとディスクが間欠的に接触するときの衝撃力や衝撃エネルギーと突発形AEの実効電圧あるいはピーク電圧の関係についても、定量的な関係を導き出すまでには到っていない。

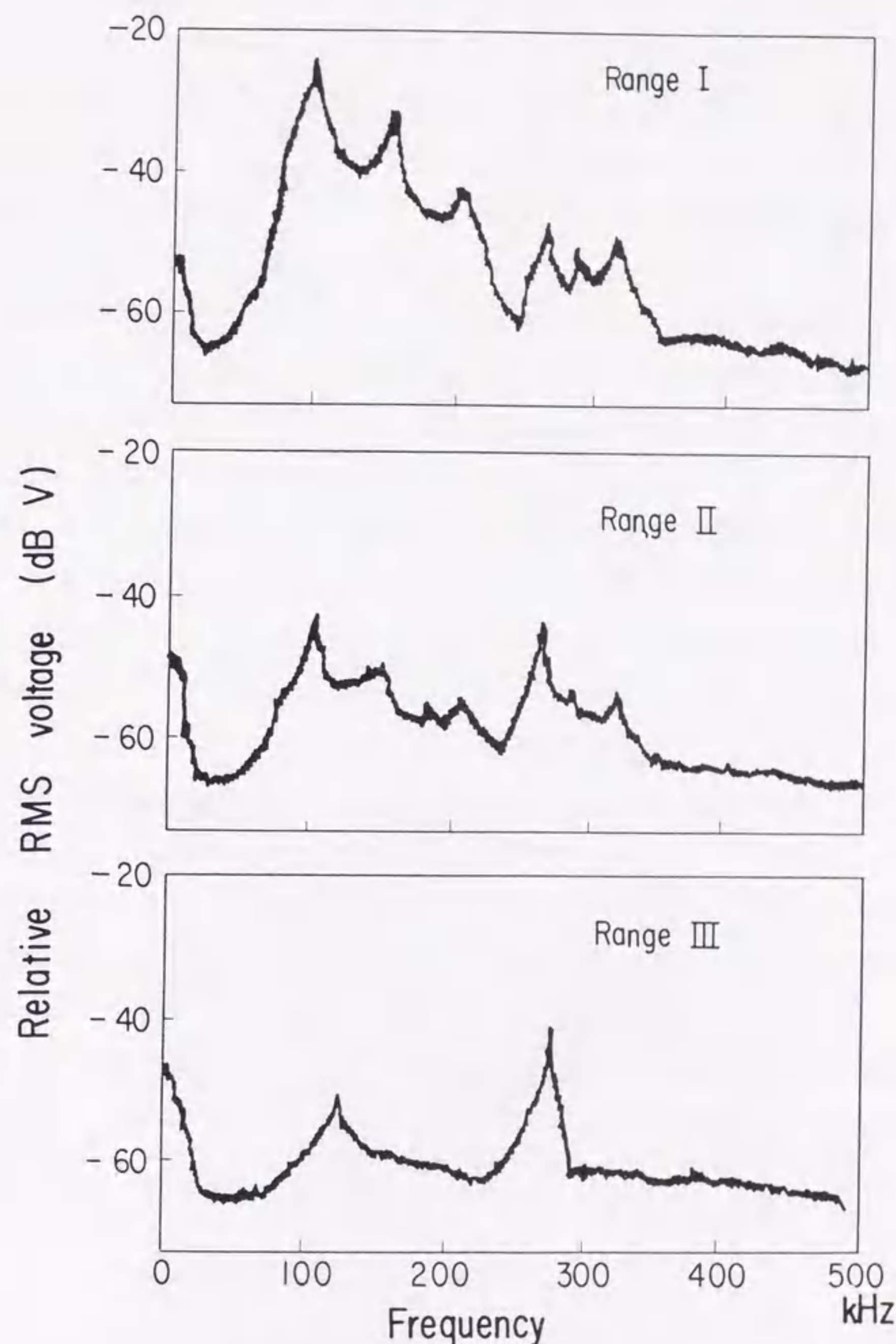


図2.8 接触状態におけるAE周波数特性

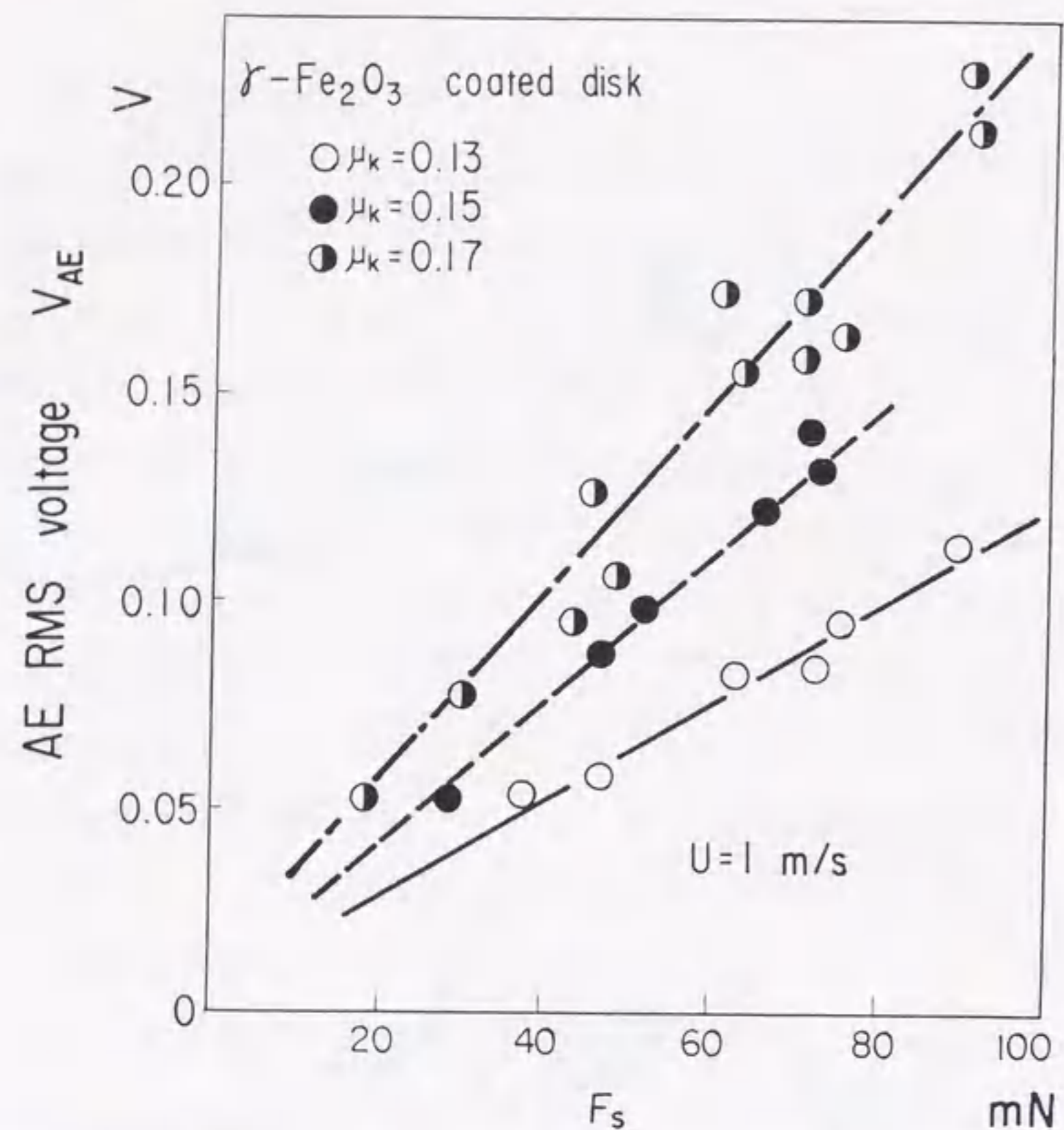


図2.9 ヘッド押し付け力とAE実効電圧の関係

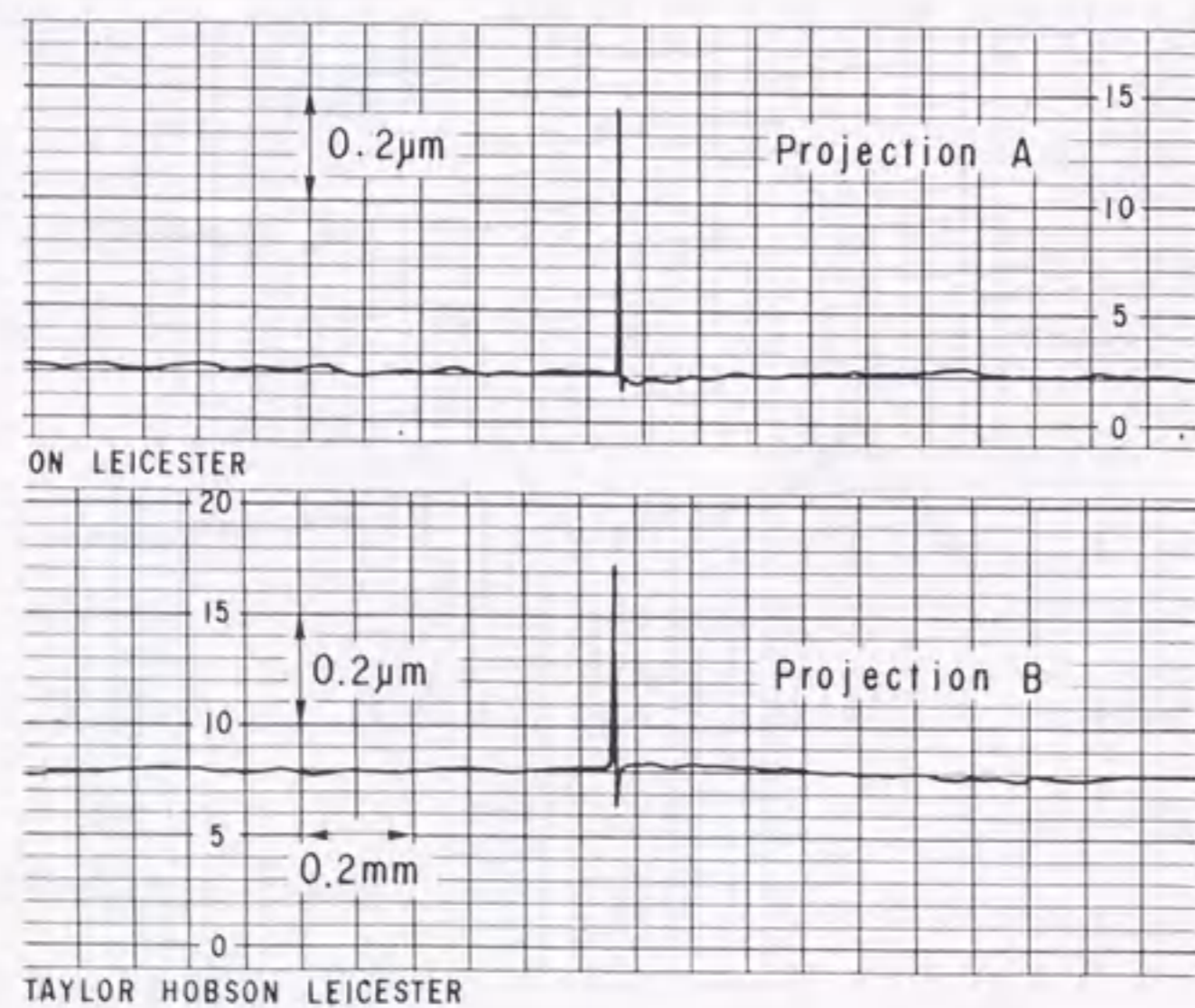


図2.10 モデル突起の形状

2.4 AEによるディスク面の突起頻度分布の測定

磁気ディスクに浮動ヘッドの浮上すきま以上の高さの突起が存在した場合、装置運転状態でのデータシーク中にヘッドと突起が接触が生じる。このような定常浮上状態における接触は、CSS時のヘッド・ディスクの接触に比べ頻度は少ないものの、高速であるため衝撃力としてはかなり大きく、浮動ヘッドの記録再生コア部あるいは磁気ディスクが破損して記録再生が不能となる事態に到る可能性がきわめて高い。したがって、磁気ディスクを製造する場合には、その最終工程において、ディスクに存在する突起の高さとその数、すなわち突起の頻度分布を調べて、ヘッドの浮上保証条件を明確にしておく必要がある。

磁気ディスクの表面あらさは、通常、機械的な触針式の表面あらさ計や光ヘテロダイン法を利用した光学式の表面あらさ計で測定される。触針式表面あらさ計は、鋭い先端をもつダイヤモンドスタイラスを微小な荷重で被測定物に押しつけながら移動させることにより表面あらさを測定するものであり、感度が高いことが特徴であるが、原理的に2次元的な表面の情報しか得られず、ディスクの突起分布のような3次元情報を得ることには本質的に無理がある。光学式表面あらさ計では、3次元的な表面あらさも測定できる利点はあるが、一回の測定で測定可能な面積が小さいため、3.56 mm径の磁気ディスクのような大径ディスクの突起分布の測定にはかなりの時間を必要とし、突起分布の測定法としては現実的とは言い難い。

ここでは、AE計測法によってディスク面に確率的に存在する突起を測定が可能であることを示すとともに、実際の磁気ディスクの突起の頻度分布を測定した例を示す。

2.4.1 AE計測法による突起の検出

AE計測法を応用してディスクの突起頻度分布が測定できることを次のような実験によって確認した。この実験は、 $R_a < 0.01 \mu\text{m}$ の平滑なディスク上に2個の突起を人為的に設け、その上で浮動ヘッドを浮上させたものである。図2.10に人為的に作った突起の形状を示す。突起Aは $0.50 \mu\text{m}$ 、突起Bは 0.3

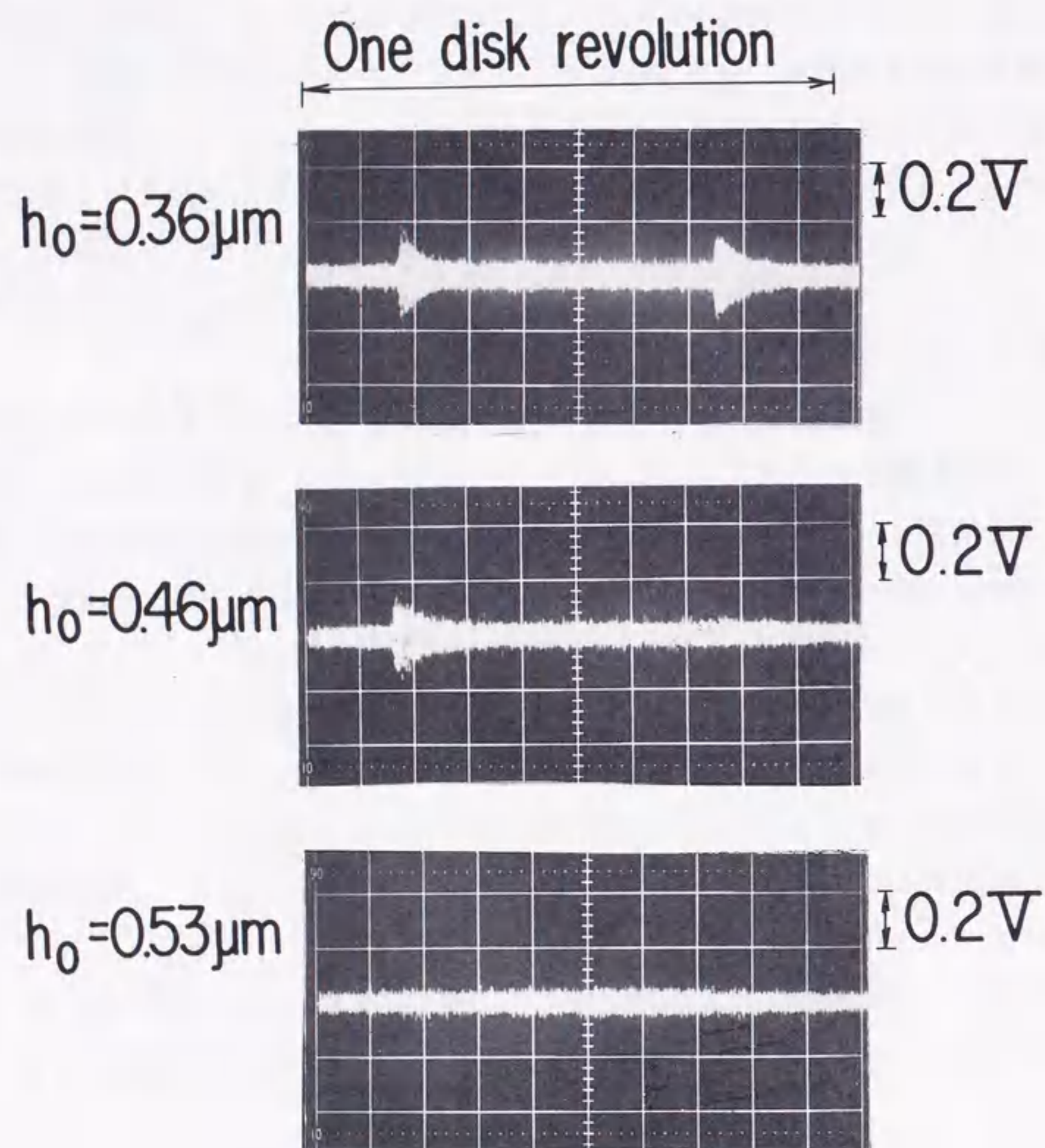


図2. 11 各浮上状態におけるヘッドと突起の接触

8 μm の高さをもつ。図2. 11に0.36 μm 、0.46 μm 、0.53 μm の浮上すきまで浮動ヘッドを浮上させた時のAE波形を示す。0.36 μm の浮上すきまでヘッドを浮上させた場合、ディスク1周当り二つの突発形AEが発生しており、人為的に作った二つの突起にヘッドが接触していることがわかる。浮上すきまが0.46 μm になると、突発形AEは一つだけになり、0.38 μm の高さの突起とは非接触となることがわかる。さらに浮上すきまが大きくなり0.53 μm となると、0.50 μm の高さの突起との接触も起こらなくなる。この結果は、浮動ヘッドの浮上すきまと突起の高さとの間にきわめて良い相関があり、なおかつ突発形AEと突起が1対1で対応していることを示している。したがってあらかじめ浮上すきまのわかっている浮動ヘッドで磁気ディスク全面を走査して、その時に発生する突発形AEを計数する操作を、何段階かの浮上すきまで繰返せば、ディスク全面の突起頻度分布の測定が可能となる。

2. 4. 2 測定装置と測定条件の設定

図2. 12に突起頻度分布の測定装置を示す⁽³⁰⁾。この装置にも図2. 2に示したAEヘッドアセンブリを用いている。AEヘッドアセンブリは、ステップモータによってディスク半径方向に移動するようになっている。接触によって発生したAE波はAEセンサによって電気信号に変換され、80 dB増幅される。増幅器の後には機械的雑音の除去、回路ノイズの減少のためのバンドパスフィルタが挿入されている。バンドパスフィルタのカットオフ周波数は、突発形AEの周波数特性にあった値に設定している。突起とヘッドの衝突に対応する突発形AEの計数回路は、しきい値電圧設定部、コンパレータ、カウンタ等から構成されている。測定結果はパルスモータからのディスク位置情報とともにプリンタに打ち出される。測定精度に大きな影響を及ぼすしきい値電圧 V_{th} の決定に際しては、図2. 13のような測定系のノイズの振幅分布を求め、ノイズのカウントが0となる電圧をもって、しきい値電圧 V_{th} としている。なおこの測定装置では、ディスクが10回転する間に、常にしきい値電圧を超える突発形AEのみを計数する。

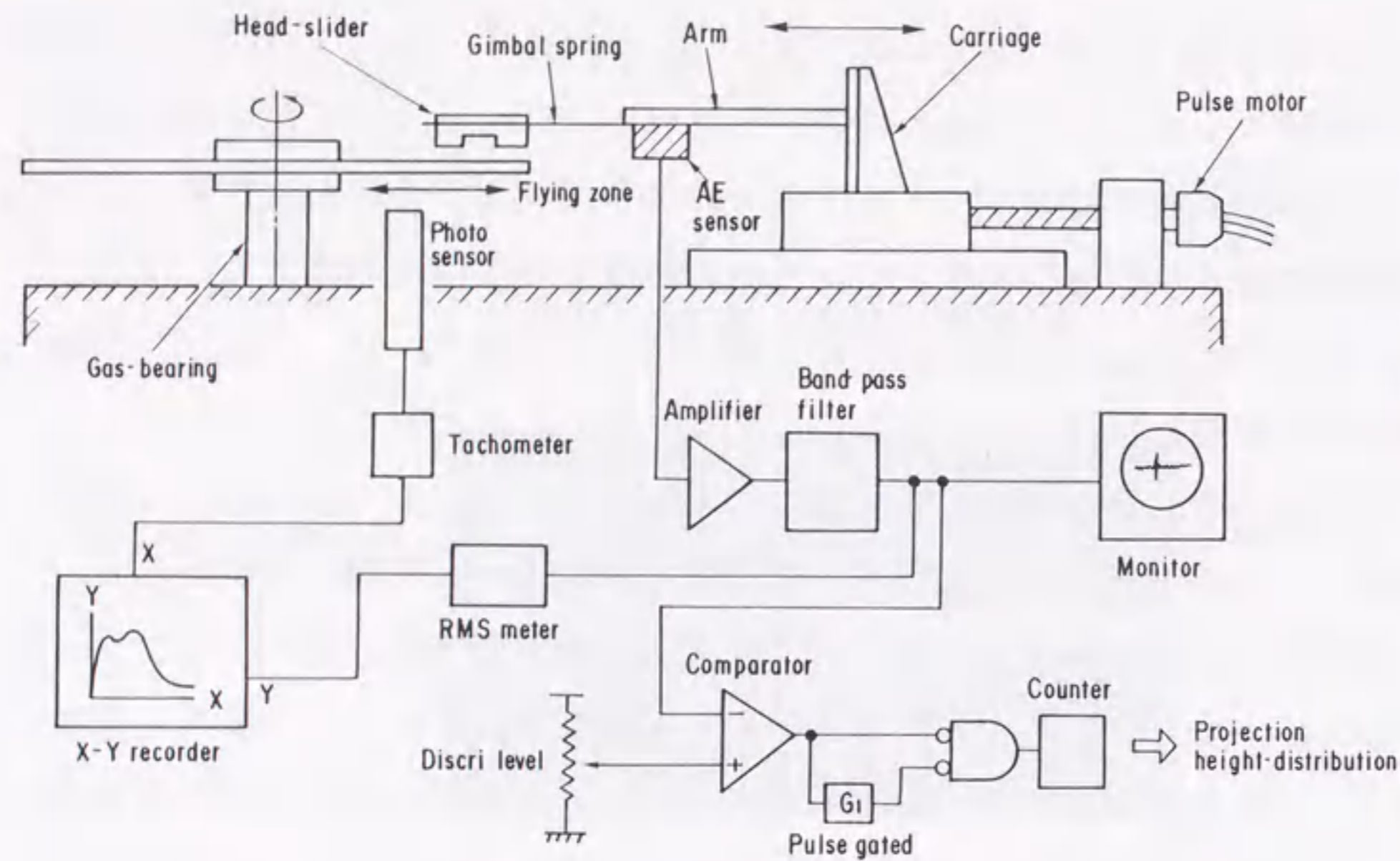


図2. 12 ディスクの突起分布の測定系

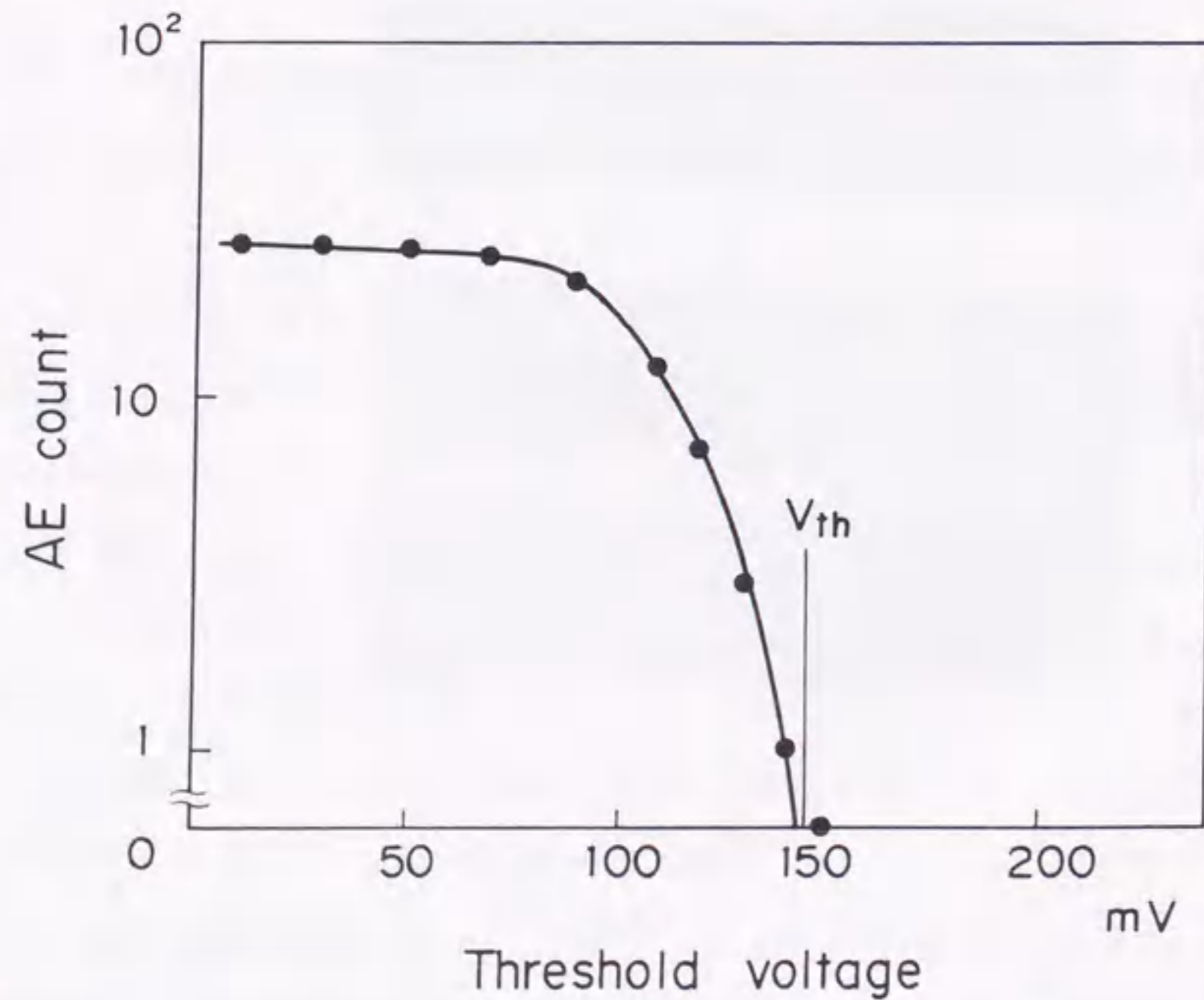


図2. 13 突起検出しきい値の決定

2. 4. 3 各種ディスクの突起頻度分布の測定結果

図2. 12の突起頻度分布測定装置を用いて3種類のディスクの突起頻度分布を測定した例を図2. 14に示す。

このようなディスクの突起の分布より、浮動ヘッドの浮上すきまの下限許容値を推定することができる。たとえば図中の14000 b p i (b p i: 1インチあたりのビット数)の線記録密度を有するNi-Co-Pめっき形ディスクに関しては、突起の個数が0となる突起高さ $0.20 \mu\text{m}$ が浮動ヘッドの下限許容浮上すきまとなる。このディスク上では、浮動ヘッドの浮上すきまが $0.20 \mu\text{m}$ を下まわれば、ヘッド・ディスクに損傷が生じる危険性が高くなる。

ここでは、100 kHzから500 kHzの周波数帯域に感度を持つAEセンサを用いて測定を行った。ここで得られた結果は、500 kHz以下のAEからだけでもヘッド・ディスクの接触についての多くの情報を得ることができ、また突起高さの測定等についても十分な精度が得られることを示している。今後、ヘッド・ディスクの接触に関するより多くの情報を得るためには、500 kHz以上の周波数のAEについても測定する必要があるが、800 kHz付近で-80 dB程度の感度をもつ市販のAEセンサを用いた予備検討では、センサを図2. 2のAEヘッドアセンブリのかなり浮動ヘッドに近い位置に取付けた場合でも伝搬中の減衰が大きく、AEがほとんど検出できないという結果が得られている。したがって、高周波のAEを高精度で検出するためには、より高感度のAEセンサの開発を急ぐとともに、より減衰の少ない導波板形状・材質等の検討を進める必要がある。

2. 5 結論

本章で得られた結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) AE計測法が浮動ヘッドと磁気ディスクの接触測定に適用可能であることを示すとともに、高精度に接触を検出するためのAEヘッドアセンブリの構成を明らかにした。

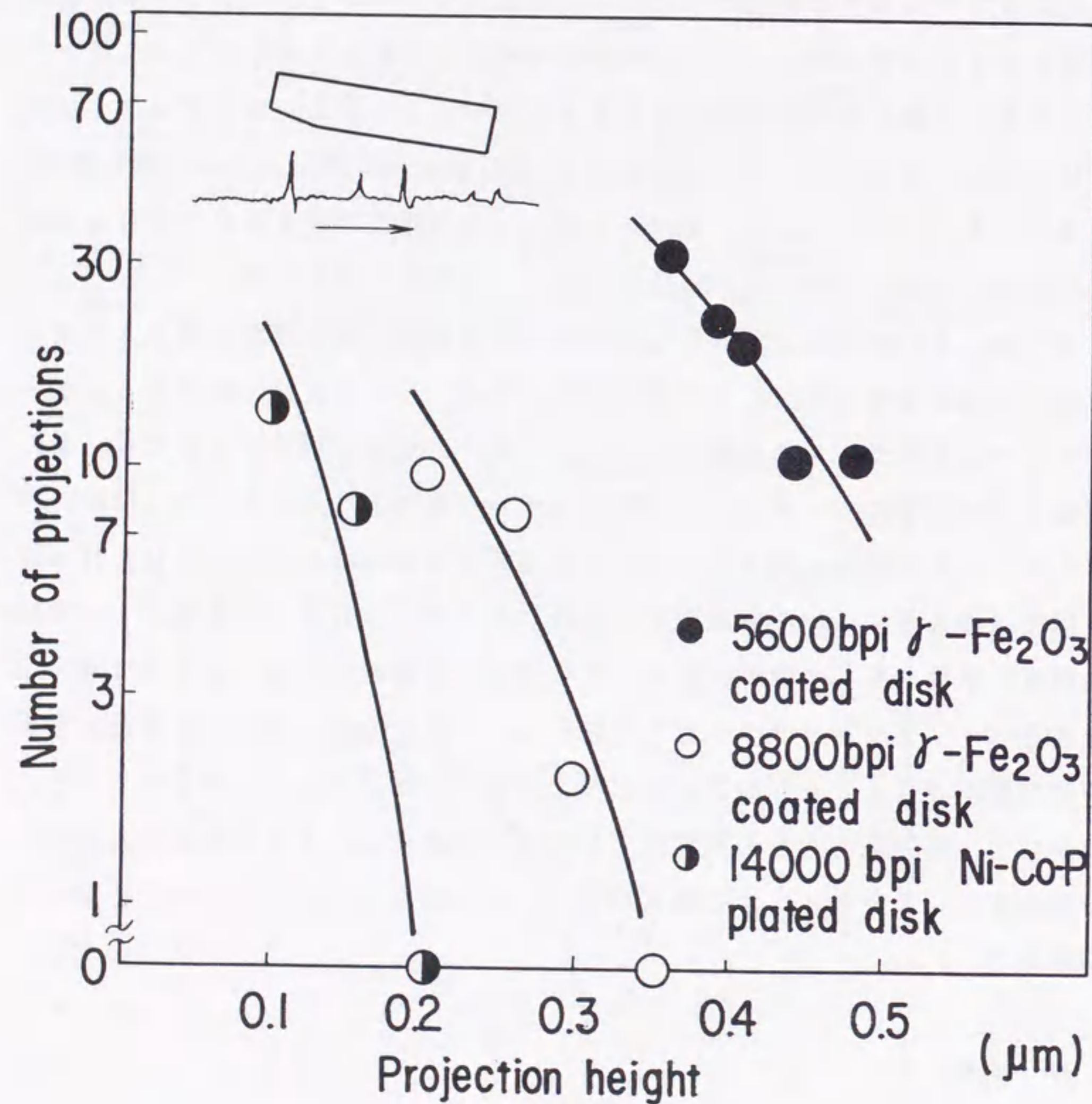


図2. 14 各種ディスクの突起分布の測定結果の例

(2) ヘッド・ディスクの接触によって生じるAEについては、

- ①低速時のヘッド・ディスクの摺動状態においては連続形AEが、ヘッドディスクの間欠的な接触状態においては突発形AEが発生する。
- ②AEのリングダウン計数の振幅分布のe値は、低速時の連続摺動領域で約2、間欠接触領域で約0.5、その遷移領域で約1の値をとり、e値の変化からヘッド・ディスクの接触状態の変化を知ることができる。
- ③連続形AEと突発形AEの周波数特性を比較すると、前者がかなり広い周波数帯域にわたってスペクトラムをもつのに対し、後者は比較的高い周波数に鋭いピークをもつ。
- ④連続形AEの実効電圧値は浮動ヘッドの押付力に比例し、かつ押付力と実効電力の比例関係を示す直線の勾配と磁気ディスクの摩擦係数の間には強い相関がある。このことは、連続形AEが本質的にヘッドとディスクの摩擦現象に関わるものであることを示している。

(3) 人工的な突起を作った平滑なディスク上でヘッドの浮上試験を行い、突発形AEを検出することによって突起の個数と高さを測定できることを明らかにした。これによって、従来測定が困難とされてきたディスク全面の突起頻度分布が測定可能となった。

本章で示したAE計測法を適用したヘッド・ディスクの接触検出法は、現在、磁気ディスクの浮上保証の検査法として内外の磁気ディスクメーカーで広く用いられている。

第3章 浮動ヘッドの混合潤滑特性^{(31), (32)}

3. 1. 緒言

磁気ディスク装置に用いられる浮動ヘッドは空気の動圧効果を利用して、回転するディスク上に記録再生エレメントを微小かつ一定のすきまで浮上させるものである。最近の磁気ディスク装置にはヘッドをディスクに押付けた状態で回転の起動停止を行うコンタクト・スタート・ストップ(CSS)方式が用いられており、起動停止に伴うヘッドの摩耗を軽減することが磁気ディスク装置の信頼性向上のための重要な課題となっている。しかし、従来の浮動ヘッドの設計は流体潤滑状態における浮上特性の改善を主眼に行われており⁽³³⁾、起動停止時のヘッド摩耗についてはCSS試験による安全性の確認がなされるのみであった⁽³⁴⁾。

CSS方式の浮動ヘッドでは、装置起動直後の低速回転時には押付荷重に合うだけの浮上力が発生せず、ヘッドはディスクと接触したまま走行し、ディスクの回転速度が上がるにつれて流体潤滑状態に移行する^{(3), (21), (33)}。接触走行時のヘッドには押付荷重から浮上力を差し引いた実効的な接触荷重が作用し、しかもその値は走行速度とともに変化する。したがって、ヘッドはこのような複雑な混合潤滑条件のもとに摩耗することになる。Tsengら⁽³⁾は混合潤滑状態における浮動ヘッドの摩耗量がヘッドとディスクの接触回数に依存することを報告しているが、混合潤滑条件下での実効接触荷重の影響は明らかにしていない。

本章では、まず、磁気ディスク上における浮動ヘッドの浮き上がり特性の測定結果に基づく混合潤滑モデルを導入し、レイノルズ方程式によって混合潤滑時の実効接触荷重を求める解析手法を示した。つぎに、浮動ヘッド材料であるフェライトの摩耗試験を行い、フェライトの摩耗形態がマイルド摩耗からシビア摩耗へ遷移する速度・荷重条件が存在することを明らかにした。そして、このマイルド摩耗/シビア摩耗の遷移条件と混合潤滑下における実効接触荷重の計算値を比較することにより混合潤滑状態における浮動ヘッドの摩耗状態を評価できることを明らかにした。さらに、これらの結果を基に、起動停止時の耐摩耗性を考慮した浮動ヘッドの設計指針についても示した。

3. 2 混合潤滑特性の解析

3. 2. 1 混合潤滑モデルと解析手法

図3. 1にCSS方式の浮動ヘッドを示す。テーパ部とそれに続くフラット部で形成された浮上面を持ち、これを二本平行に並べた双胴形としている。ヘッド材はフェライトで中央の狭い浮上面の後端に記録再生用のギャップが形成されている。

図3. 2のように座標軸をとり、空気の分子平均自由行程を λ とすれば浮動ヘッドの圧力に関するレイノルズ方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(ph^3 \frac{\partial p}{\partial x} + 6\lambda ph^2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(ph^3 \frac{\partial p}{\partial y} + 6\lambda ph^2 \frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ & = 6\eta U \frac{\partial(ph)}{\partial x} + 12\eta \frac{\partial(ph)}{\partial t} \end{aligned} \quad (3. 1)$$

平滑なガラスディスク上でのヘッド浮上特性は上式を数値解析した計算値と良く一致することが、すでに実験的にも実証されている^{(35), (36)}。しかし、実際の磁気ディスクの表面は工業製品としては最も平滑なものの一つであるが、ガラスディスクに比べるとかなり粗い表面になっている。図3. 3は直径356mmの2種類の磁気ディスクA、Bの表面あらさ曲線をガラスディスクのそれと比較して示したものである。この2種類の磁気ディスクは、アルミ合金の基板上に γ - Fe_2O_3 の針状磁性粉と少量のアルミナ粒子を高分子バインダ中に分散した磁性塗料をスピコートした後に焼成した塗布形磁気ディスクとよばれるものである。この図からも明らかのように、2種類のディスクとも平均あらさ R_a の5倍程度の高さの突起を持つことがわかる。

図3. 4に上記のディスクA上でのヘッド浮上特性を平滑なガラスディスク(R_a は $0.003 \mu m$ 以下)上での測定値および式(3. 1)に基づく計算値と比

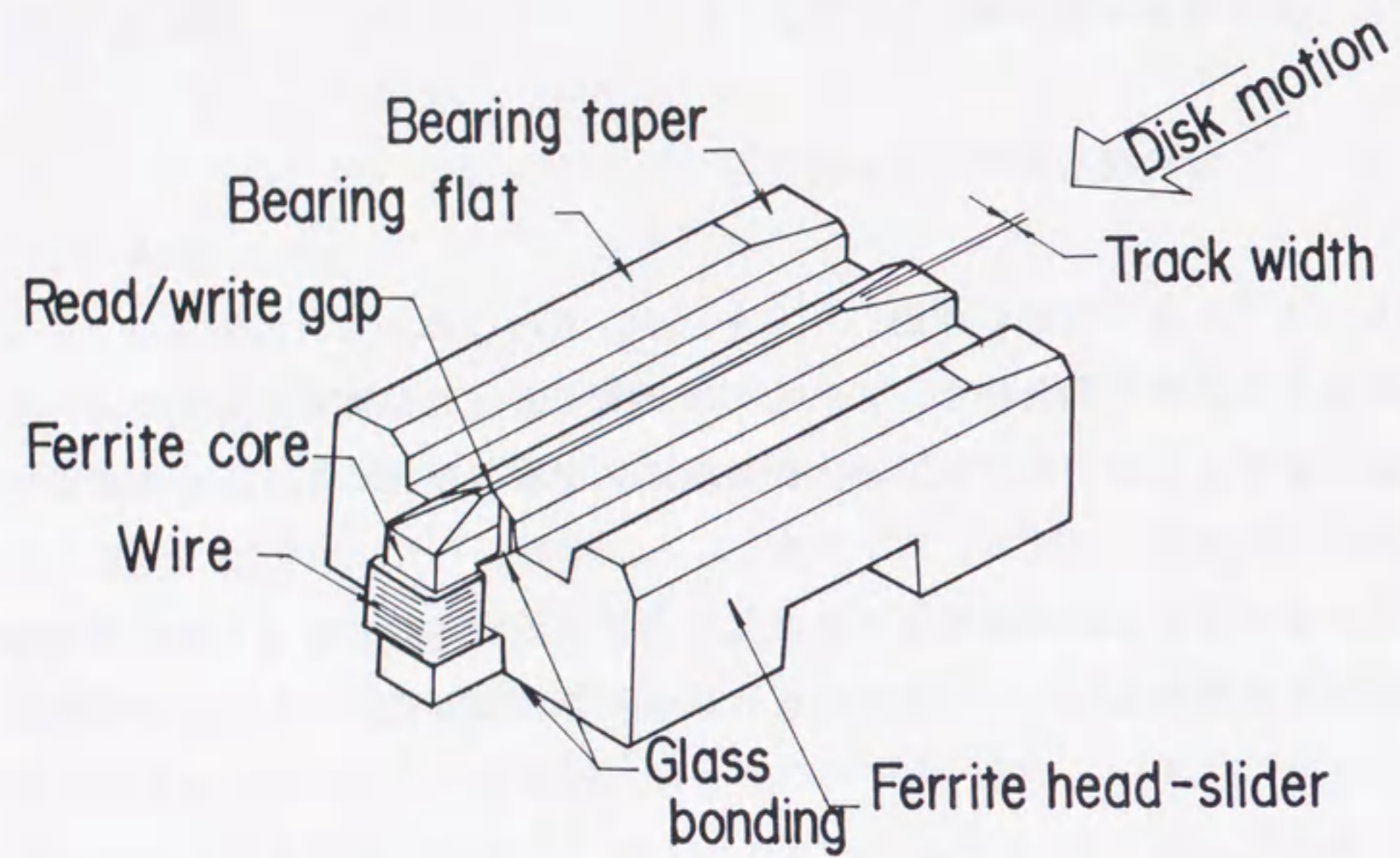


図 3. 1 CSS方式の浮動ヘッドの例

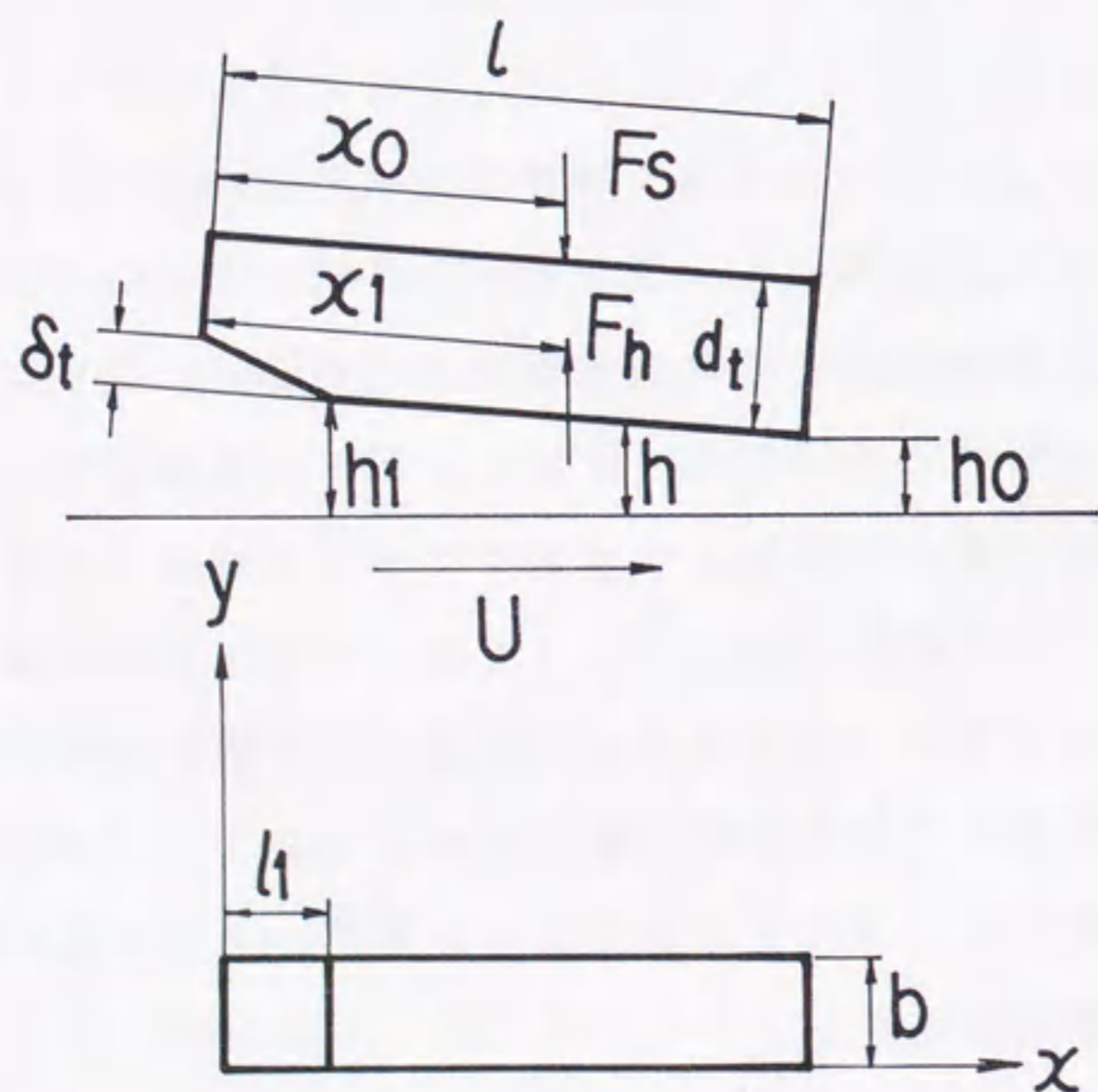
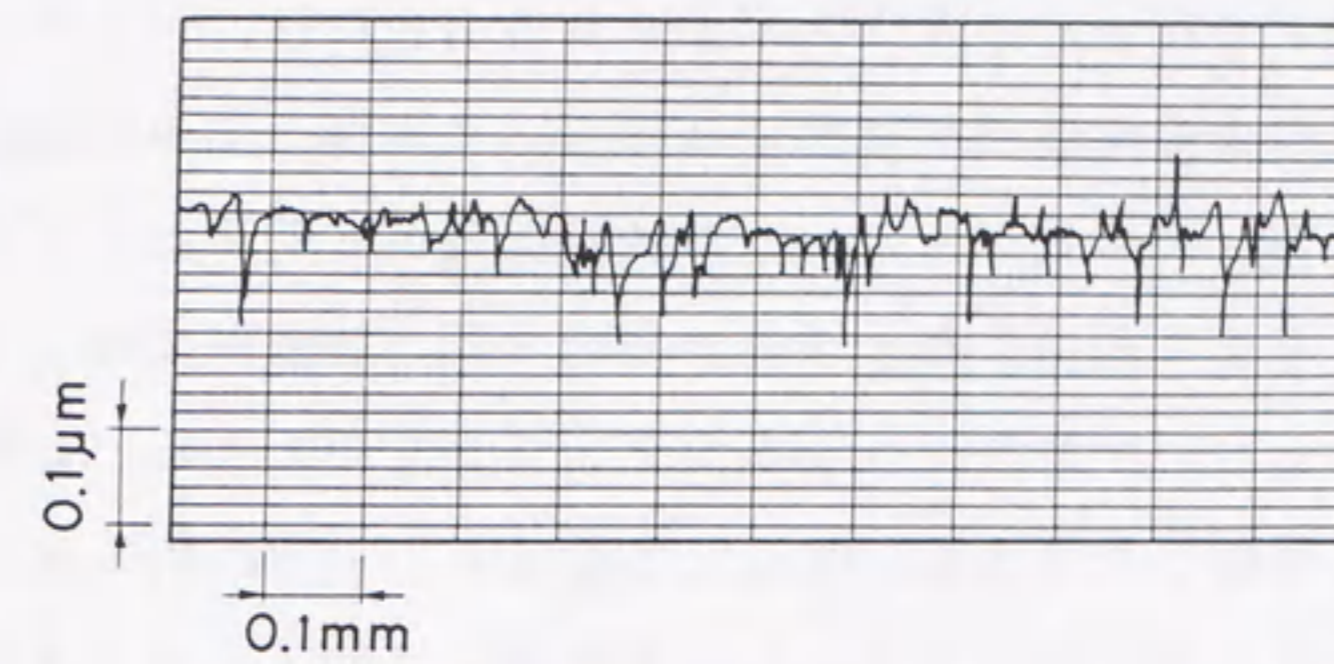
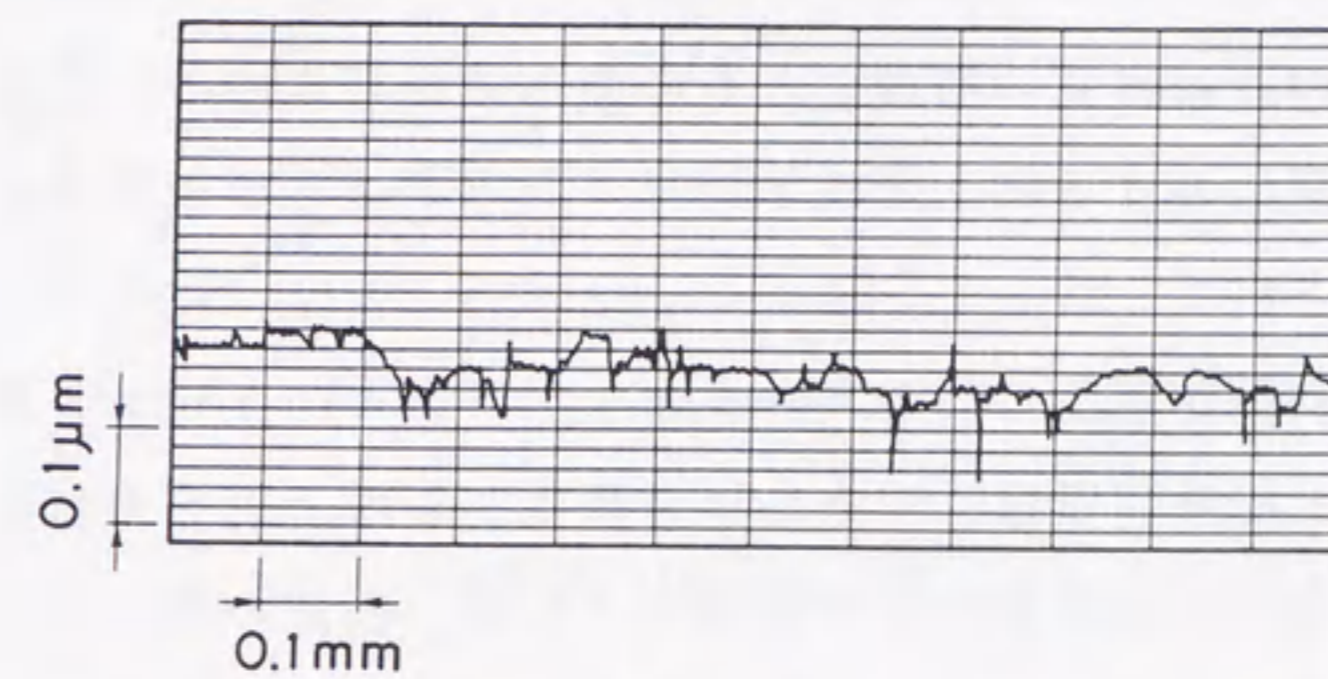


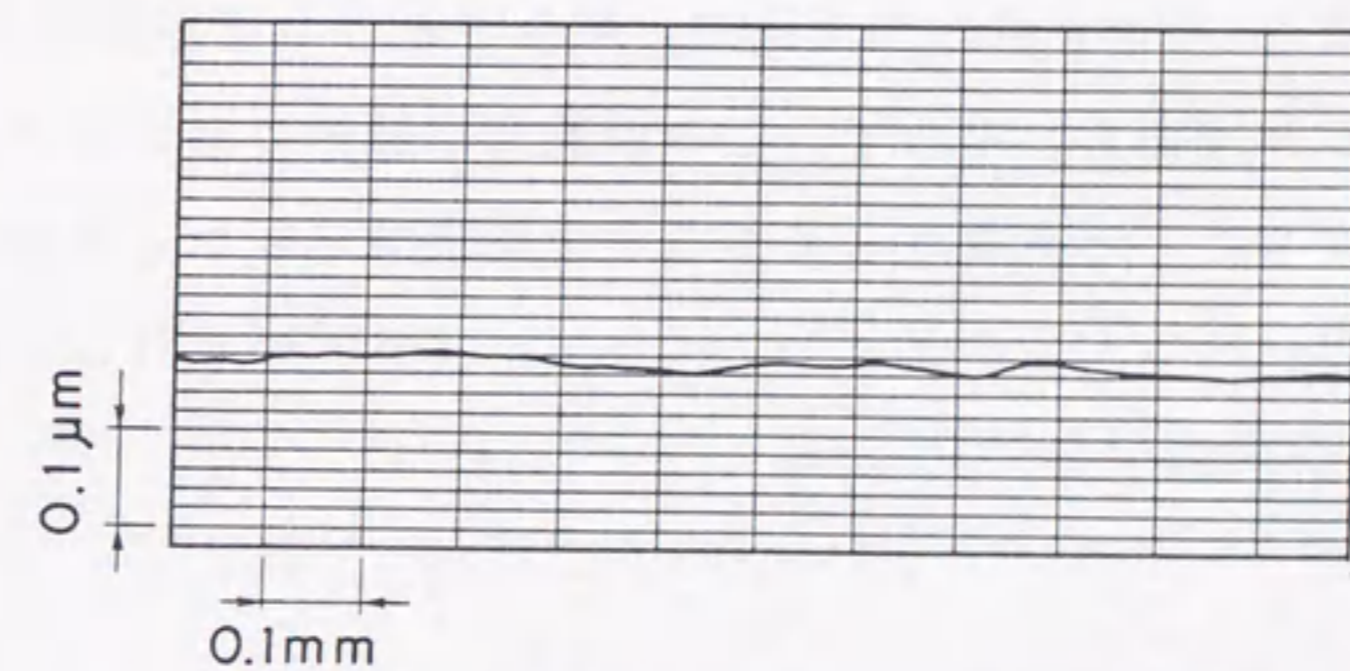
図 3. 2 座標系



(a) Disk A ($R_a=0.05 \mu\text{m}$)



(b) Disk B ($R_a=0.015 \mu\text{m}$)



(c) Optical flats ($R_a=0.003 \mu\text{m}$)

図 3. 3 磁気ディスクとガラスディスクの表面形状

較して示す。浮上量の測定は透明なヘッドを用い、その背面から白色光干渉法⁽³⁷⁾を適用することにより行った。ガラスディスクの場合には、ディスク回転の開始とほぼ同時に空気による流体潤滑状態に移行し、その浮上量の測定値は計算値と良く一致する。一方、ディスクAの場合には停止時から約7 m/sの速度まで約0.22 μmのすきまに相当する干渉色が観測され、速度が変わってもこの干渉色はほとんど変化しない。これはヘッドがディスク面のところどころに存在する高い突起の頂部と接触したまま走行することを示している。約7 m/sの速度ではテーパ部から浮き上がり始めるが、ヘッド後端には約14 m/sの速度まで0.22 μmのすきまに相当する干渉色が観測され、突起頂部との接触が続いていることがわかる。そして約14 m/sの速度ヘッドは混合潤滑状態から流体潤滑状態へ移行し、その後は速度の増加とともに浮上量が増大する。U = 14 m/s以上の流体潤滑状態における浮上量は平滑なガラスディスクの場合と同様に式(3.1)の計算値と良く一致している。

摩耗現象では接触荷重が重要なパラメータの一つである。ヘッドの混合潤滑条件下における実効的な接触荷重はヘッドの押付荷重から浮上力を差し引いたものとなる。ここでは、混合潤滑時の浮上力を求めるため、前述の塗布形ディスク上におけるヘッド浮上実験の結果に基づいた混合潤滑モデルを導入する。これは図3.5に示すように、接触走行時のヘッドフラット部あるいは後端にあらわれる干渉色に相当する厚さ h_m の仮想的な潤滑膜が、あらかの理想平面上を一様に覆っているとしたモデルである。そして、この仮想潤滑膜内ではレイノルズ方程式が成立し、浮上力が小さいときはヘッドがこの上を接触走行すると仮定する。

この仮定を用いれば、図3.5の(a)、(b)、(c)いずれの状態においても、浮上力 F_h および圧力中心 x_1 は、

$$F_h = 2 \int_0^l \int_0^b (p - p_a) dx dy \quad (3.2)$$

$$x_1 = l \frac{\int_0^l p x dx}{\int_0^l p dx} \quad (3.3)$$

で与えられる。

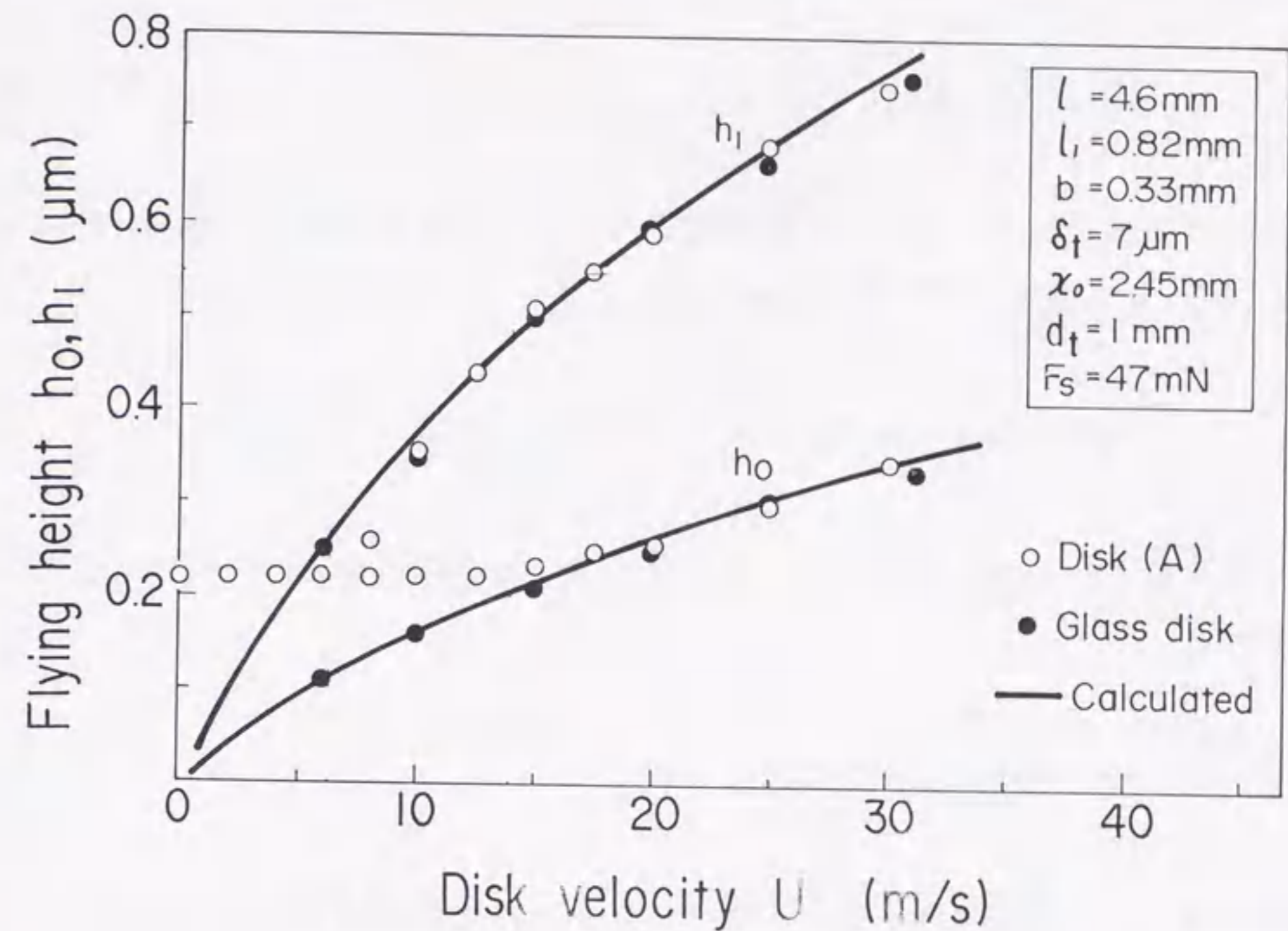


図3.4 ヘッドの浮上特性

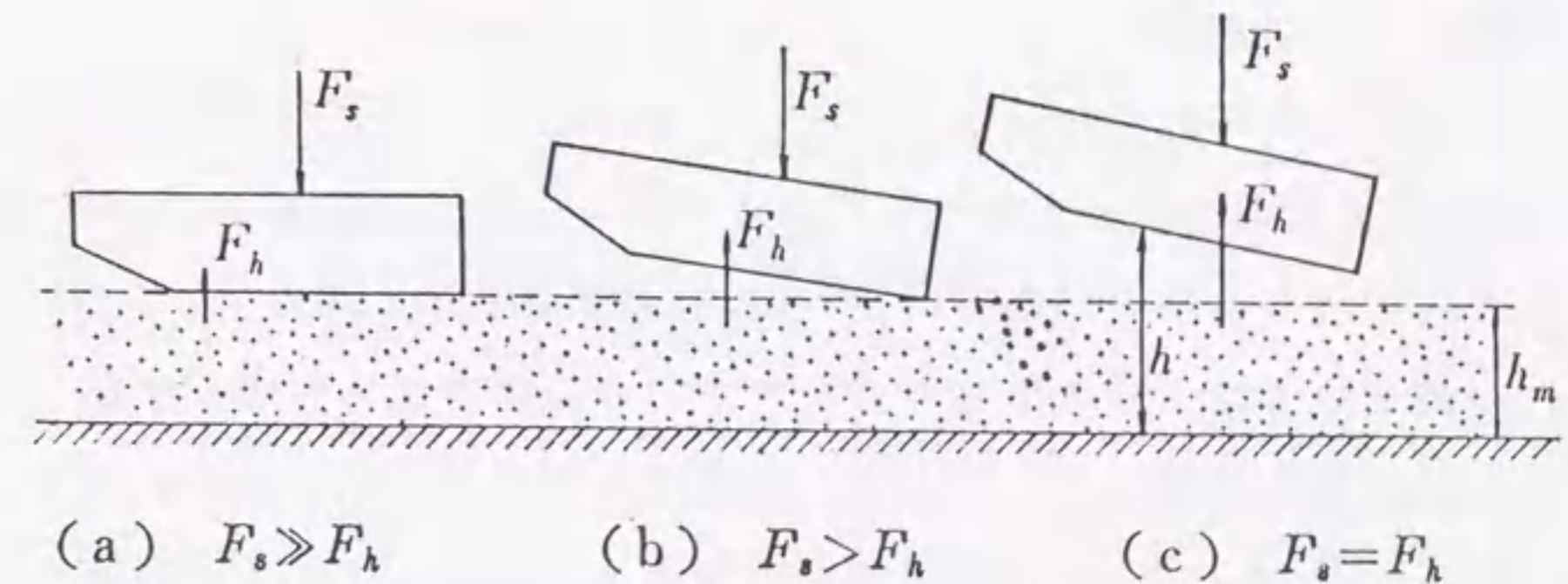


図3.5 混合潤滑モデル

したがって、図3.4の $U = 7 \text{ m/s}$ 以下の接触走行状態に対応する図3.5(a)における実効接触荷重 F_m は次式で与えられる。

$$F_m = F_s - F_h \quad (3.4)$$

また $U = 7 \text{ m/s} \sim 14 \text{ m/s}$ の接触走行状態に対応する図3.5(b)における F_m はヘッドとディスクの摩擦も考慮したモーメントのつり合い式、

$$F_s(l - x_0) + \mu_k \cdot F_m \cdot d_t = F_h(l - x_1) \quad (3.5)$$

から求められる。これらの式を解くことによって混合潤滑時の浮上特性も同時に計算できる。

3.2.2 混合潤滑モデルの妥当性の検証

混合潤滑モデルの妥当性を検証するために用いた実験装置を図3.6に示す。この実験装置は二つの測定系から構成されている。一つは白色光干渉法による浮上すきまの測定系であり、もう一つはヘッド・ディスクの接触を検出するAE（アコースティックエミッション）測定系である。実験には、前述の2種類の塗布形磁気ディスクのうちのディスクBと表3.1に諸元を示した2種類のテーパフラット形浮動ヘッドを用いた。

図3.7にディスクの回転速度 U を変化させた時のヘッドの浮上すきま h_a 、 h_i およびAE実効電力値の測定結果をここで提案した混合潤滑モデルに基づいて計算した h_a 、 h_i および実効接触荷重 F_m の計算値と比較して示す。計算に必要な h_m と μ_k の値としてはディスクBと供試ヘッドの組合せにおける実験値である $0.15 \mu\text{m}$ と 0.20 を用いた。この図からも明らかなように、混合潤滑モデルを用いて計算した $U-h_a$ 、 h_i の計算値は測定値とよく一致している。双方のヘッドとも実効接触荷重の計算値 V_{AE} は速度の増加とともに減少し、ヘッドの流出端が浮き上がり始める約 20 m/s の速度付近で0になっているが、その時点までのAEの実効電圧値を見ると接触荷重の大きいヘッド1の方が高い電圧値を示して

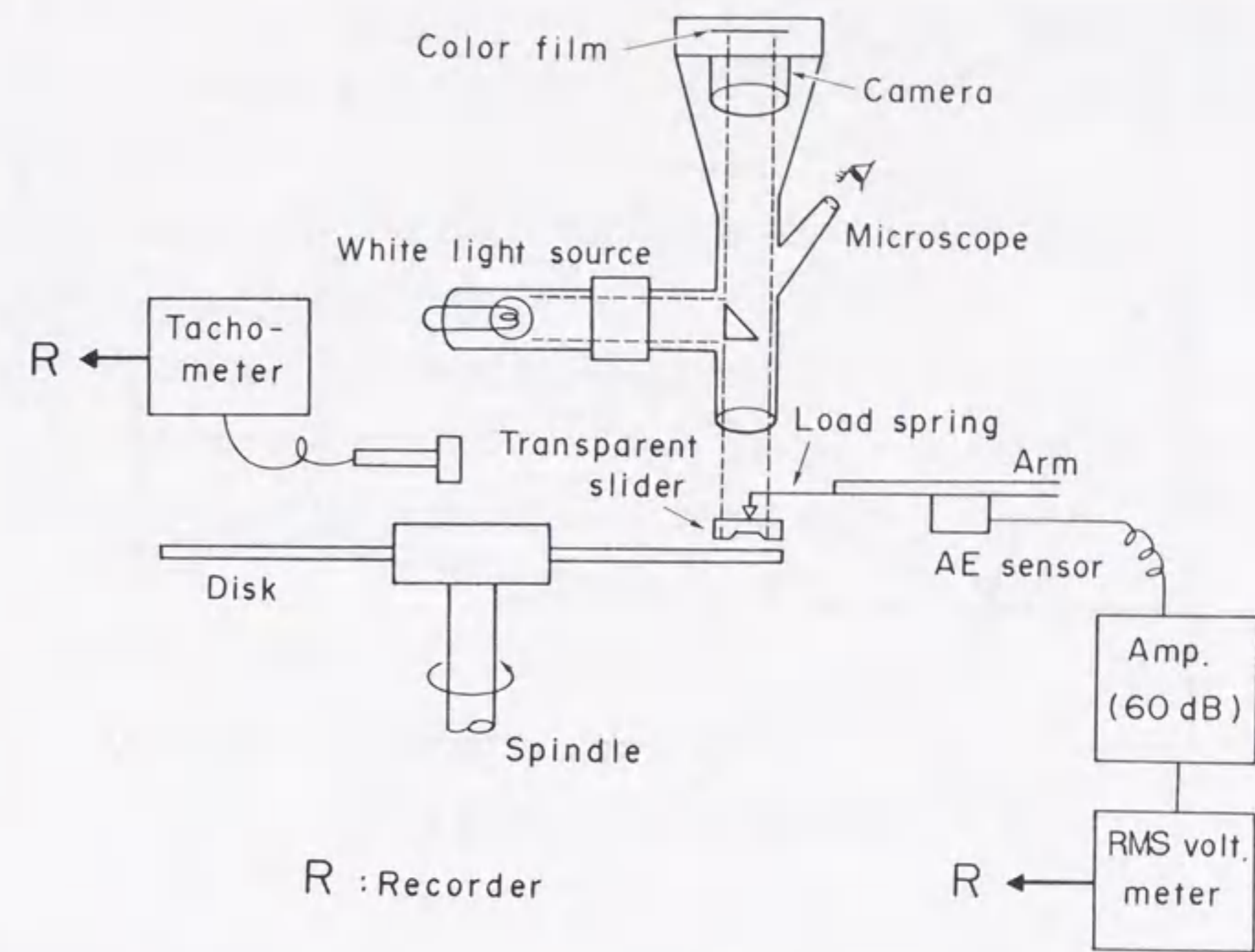


図3.6 ヘッド浮き上がり特性測定系の構成

表3.1 浮き上がり特性検討用浮動ヘッドの諸元

| Spec. \ Head | 1 | 2 |
|---|-------|-------|
| Head length l , mm | 4.0 | |
| Head width b , mm | 0.2 | |
| Taper length l_1 , mm | 0.8 | |
| Taper height δ_1 , μm | 4.0 | |
| Pivot position x_0/l | 0.472 | 0.516 |
| Head height d_1 , mm | 1.0 | |
| Spring load f_s , mN | 3.7 | 3.1 |

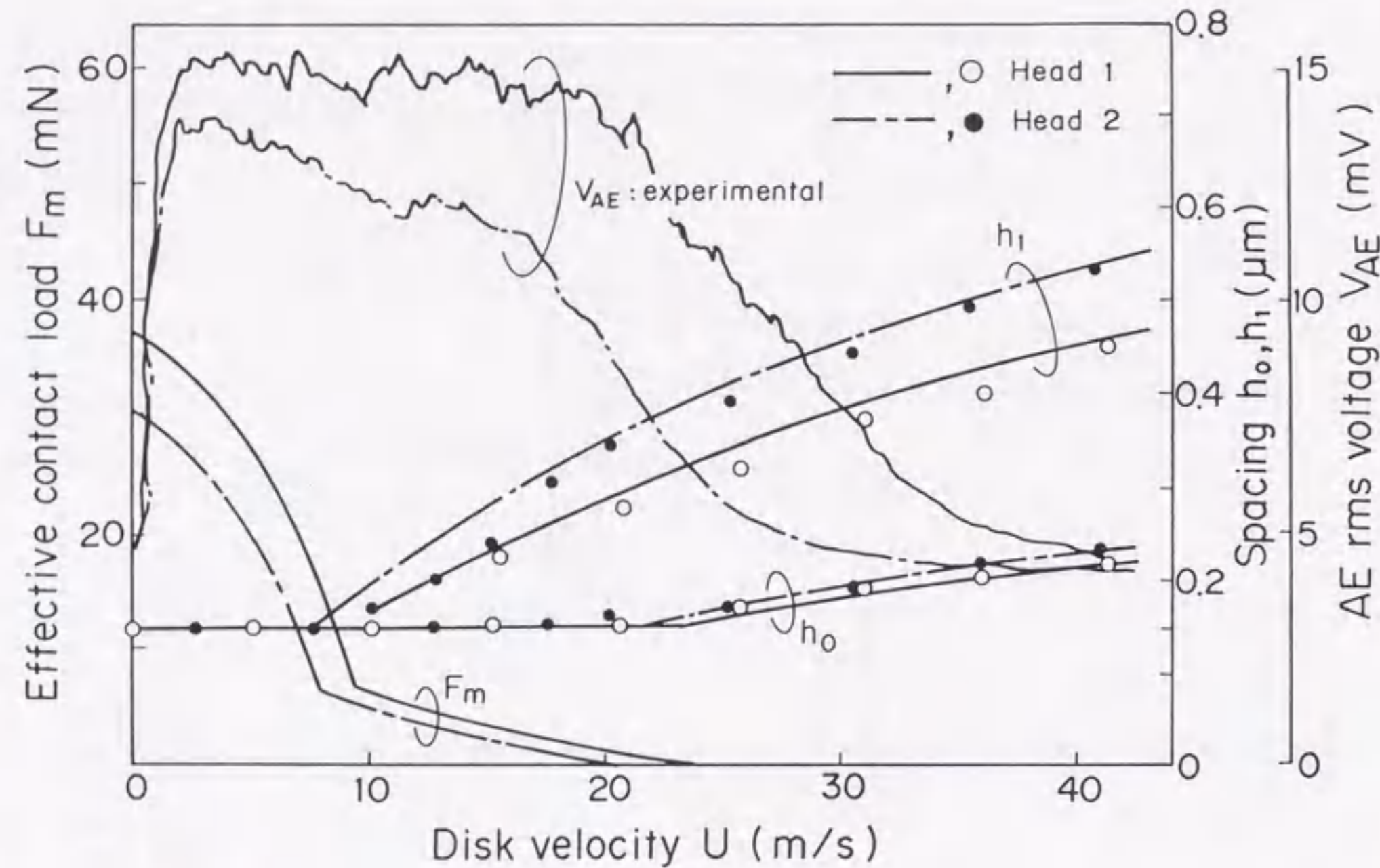


図3.7 浮き上がり特性の解析結果と測定結果の比較

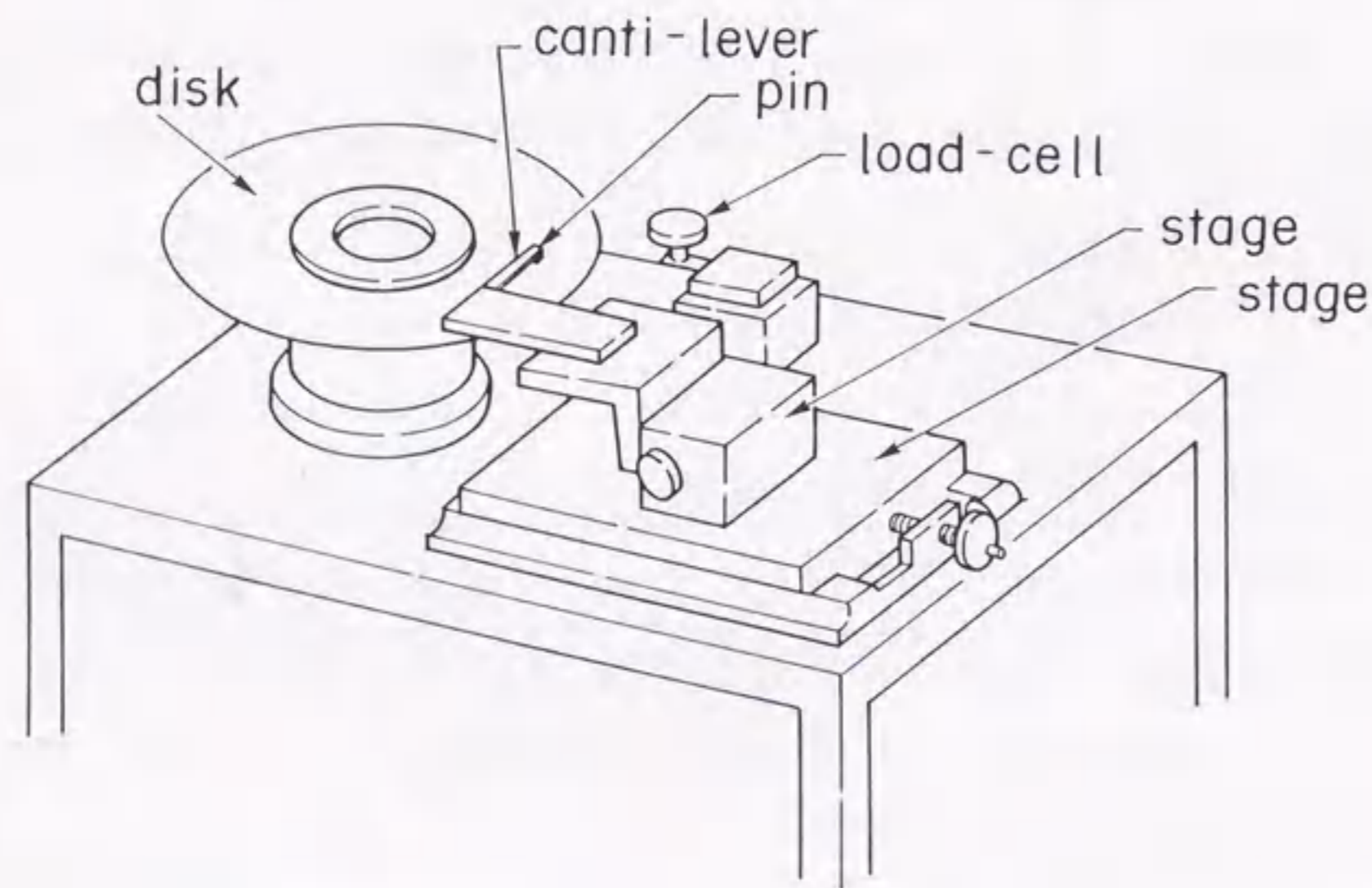


図3.8 ピン・ディスク形摩耗試験機の構成

いることがわかる。第2章で述べたように、AEの実効電圧値と接触荷重との間には比例関係が存在することを考えると、この測定結果はここで導入した混合潤滑モデルの妥当性を示している。

ところで、速度とAE実効電圧の測定結果は、ヘッドの流出端が浮き上がった後の20 m/s以上の速度でもヘッドとディスクの接触が起きていることを示している。この速度領域におけるAEは第2章でも示したように、ディスクに確率的に存在する高い突起との衝突によるものであり、ヘッド損傷という観点からみると、摩耗よりは記録再生部の欠けに大きな影響を与える。

3.3 浮動ヘッドの摩耗に関する実験的検討

3.3.1 浮動ヘッド材料の摩耗に及ぼす速度と荷重の影響

摩耗試験には、図3.8に示すピン・ディスク形摩耗試験機を用いた。試験片はヘッド材として一般に用いられるホットプレス Ni-Zn フェライト ($H_v=820$) を直径2.29 mmの球に加工したものである。ピン試験片の表面は浮動ヘッドの浮上面と同等の表面精度に仕上げてある。この試験片をカンチレバーでディスク面に押付け、ひずみゲージを内蔵した微小荷重計で接触荷重を測定した。なおピンの曲率半径は小さいため、浮上力の発生は無視できる。

ピン試験片は図3.9のように摩耗するため、摩耗痕の大きさを測定すれば、ピンの摩耗量は次式によって計算される。

$$V_p = \pi \{ 2P^3 - (2P^2 + d^2)(P^2 - d^2)^{1/2} \} / 24 \quad (3.6)$$

摩耗試験には図3.3に示した2種類のディスクのうちのディスクAを供した。塗布形ディスクは通常ふっ化炭素系の潤滑剤をオーバコートして使用されるが、本試験では潤滑剤オーバコート量のわずかな違いがフェライトの摩耗に及ぼす影響を除くため、潤滑剤をオーバコートしないものを用いた。試験は、ヘッドのCSSがディスクのある決まった半径上でのみ行われることを考慮し、ディスク同一円周上を繰返し摺動させる方式で3回づつ行い、その平均値をとって測定値と

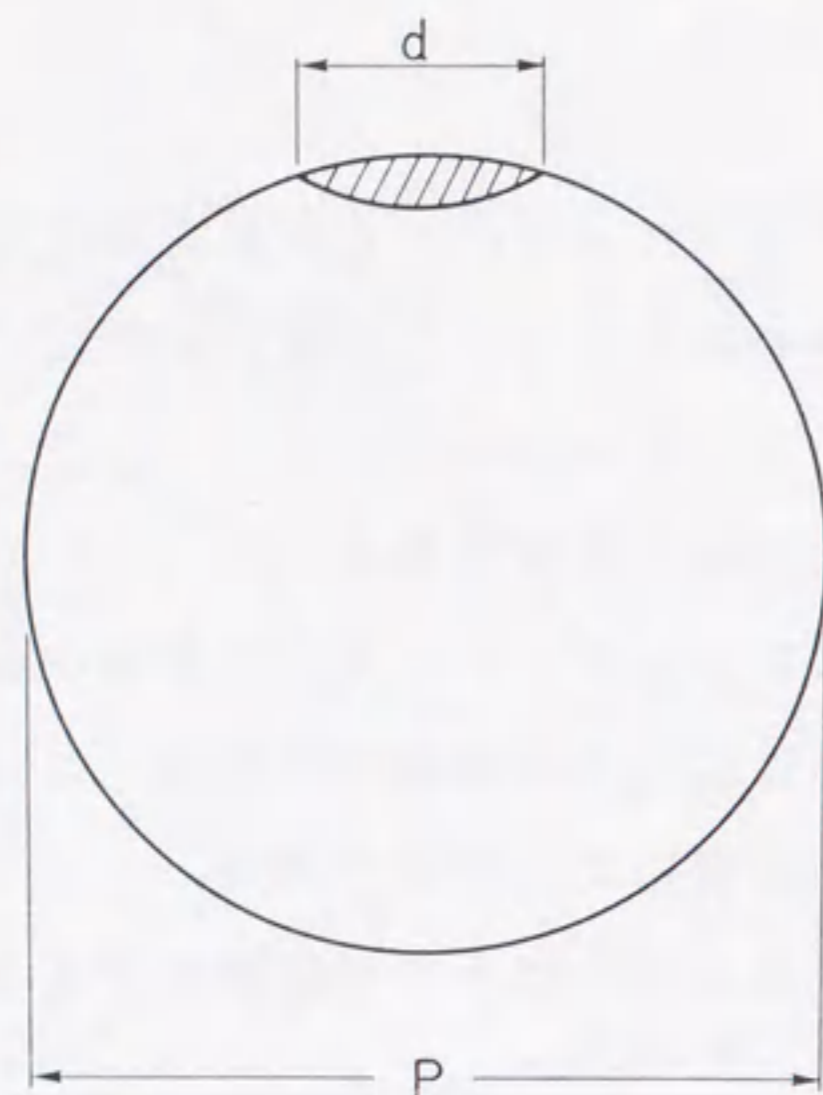


図 3. 9 ピン試験片の摩耗痕の形状

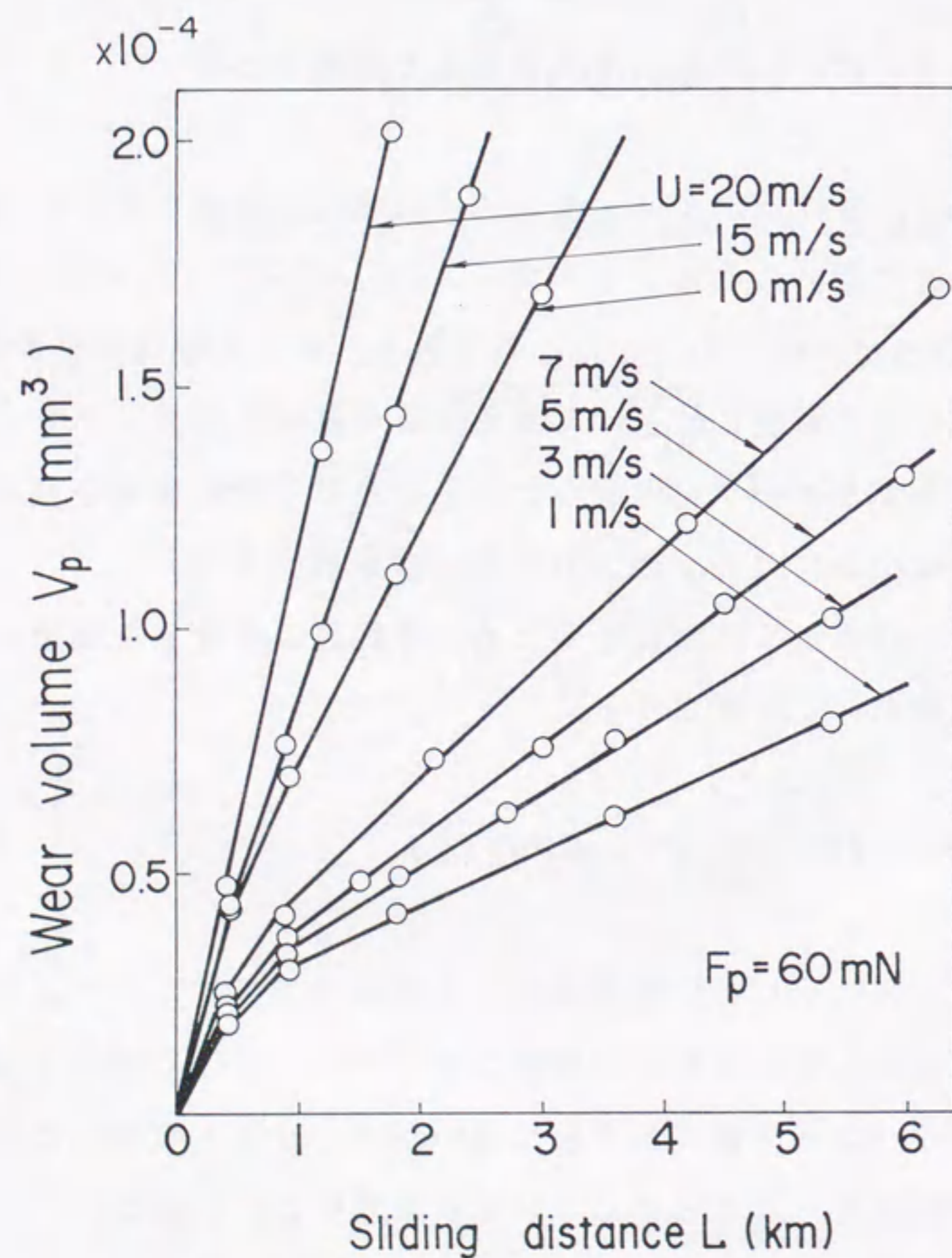


図 3. 10 ピン試験片の摩耗推移曲線

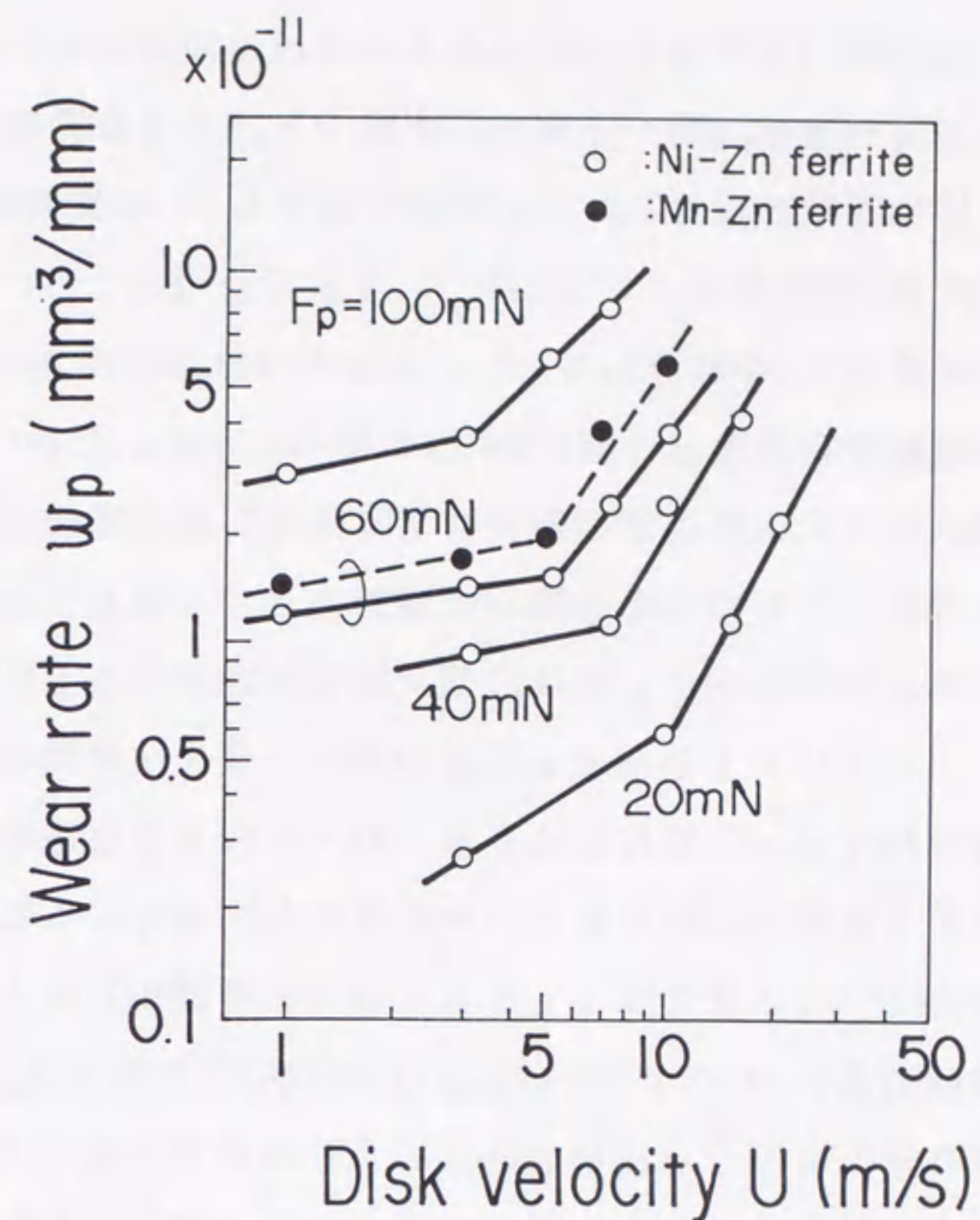


図 3. 11 接触走行速度とピン試験片の摩耗率の関係

表 3. 2 CSS試験用浮動ヘッドの諸元

| Spec. \ Head | A | B | C | D |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| Head length l, mm | 5. 6 | | | |
| Head width b, mm | 0. 36 | 0. 40 | 0. 44 | 0. 50 |
| Taper length l₁, mm | 1. 0 | | | |
| Taper height δ, μm | 10 | | | |
| Pivot position x₀/l | 0. 55 | | | |
| Head height d, mm | 1. 2 | | | |

した。半径位置としては、160 mmから140 mmの間の任意の場所を選んで行った。したがって同一速度、同一接触走行距離でも、半径位置によってディスク回転数と繰返し摺動回数は異なるが、その違いは10%程度であり、試験結果にはほとんど影響を及ぼさない。

図3. 10に接触荷重 F_p を60 mNとし、速度 U を1 m/sから20 m/sまで変化させた時の接触走行距離 L と摩耗量 V_p の関係を示す。 $U=7$ m/s以下では、接触走行距離が約1 kmに達する前に初期摩耗から定常摩耗に移行し、その後の摩耗量は L の増加とともにほぼ直線的に増加する。このような初期摩耗から定常摩耗への移行が起こる理由としては、ピン試験片表面の加工変質層の影響などが考えられる。一方、 $U=10$ m/s以上の場合には初期摩耗から定常摩耗への顕著な移行はみられないが、摩耗量は $U=7$ m/s以下の定常摩耗の場合と同様に L の増加とともに直線的に増加する。また速度が大きくなるにしたがって、この直線の傾き $w_p = dV_p / dL$ (フェライトピンの摩耗率)は大きくなる。

図3. 11に接触荷重 F_p をパラメータとした速度 U と摩耗率 w_p の関係を示す。実験の荷重範囲20 mN~100 mNでは、いずれの荷重においても摩耗率は速度の増加とともに直線的に増加し、ある速度を超えると摩耗率が急増する。また、接触荷重が大きいほど低い速度から摩耗率が急増する。この摩耗率が急増する現象はマイルド摩耗からシビヤ摩耗へ移行する遷移現象と考えられる。図中の●印は $F_p=60$ mNにおけるホットプレスMn-Znフェライト($H_v=630$)の測定結果であり、Ni-Znフェライトの場合と同様にマイルド摩耗からシビヤ摩耗への遷移が起こることがわかる。このような現象が起こる理由としては、摩擦熱によるフェライトの硬度低下の影響等が考えられるが、この詳細についてはさらに検討する必要がある。

3. 3. 2 混合潤滑状態におけるヘッドの摩耗

混合潤滑状態におけるヘッドの摩耗に及ぼす実効接触荷重の影響を明らかにするため、表3. 2に示すヘッド幅 b の異なる4種類のヘッドとディスクAの組合せでコンタクト・スタート・ストップ(CSS)試験を行った。ヘッド材はピン・ディスク形摩耗試験に用いたホットプレスNi-Znフェライトと同じもので

ある。試験条件は最高速度20 m/s、起動および停止時間はともに7秒、CSS回数は2000回とした。ヘッドの摩耗量は試験前後のヘッド形状を触針式表面あらさ計で測定し、テーパ高さ δ_t の変化から求めた。

ヘッドAについての押付荷重 F_p と摩耗量 V の関係を図3. 12に示す。 $F_p=40$ mN、60 mNの場合の摩耗量はきわめて小さいが、80 mN以上では押付荷重の増加とともに急増する。この実験における $F_p=40$ mN、80 mN、120 mNの場合の試験前後のヘッド表面状態を図3. 13に示す。 $F_p=40$ mNの場合には試験前後で表面状態がほとんど変化しないのに対し、押付荷重が増加するに従って表面の摩耗損傷が激しくなっている。図3. 14に $F_p=100$ mNとした場合のヘッド幅 b と摩耗量 V の関係を示す。 $b=0.50$ mmの場合の摩耗量はきわめて小さいが、0.44 mm以下のヘッド幅で摩耗量が急増する。これは b が小さいヘッドほど浮上力の発生が少なく、同一速度での実効接触荷重が大きくなることに起因したものである。このようにヘッド幅を固定した場合にはある押付荷重以上で、押付荷重を固定した場合にはあるヘッド幅以下で摩耗量が急増する現象は、ピン・ディスク形摩耗試験におけるマイルド摩耗からシビヤ摩耗への遷移に対応したものと考えられる。これは、図3. 13において $F_p=80$ mN以上でCSS時の摩耗が急増することに対応している。

図3. 15にヘッドの押付荷重 F_p をパラメータに式(3. 1)~式(3. 5)を用いて実効接触荷重 F_m を計算した結果を示す。 h_m と μ_s 値はそれぞれ0.22 μ mと0.2とした。また図中にはピン・ディスク形摩耗試験において摩耗の遷移が起こる速度 U と接触荷重 F_p の関係も示す。実験値を結ぶ曲線(一点鎖線で示す)の上側が摩耗率が急増するシビヤ摩耗領域、下側がマイルド摩耗領域に相当する。図3. 12のCSS試験においてヘッドの摩耗量がきわめて小さい $F_p=40$ mN、60 mNの場合には、実効接触荷重がマイルド摩耗領域にあるのに対し、摩耗量が急増し始める $F_p=80$ mN以上で計算値がシビヤ摩耗領域に入ることがわかる。

図3. 16は、図3. 14のCSS試験に対応する実効接触荷重 F_m の計算結果にピン・ディスク形摩耗試験結果を重ね合わせたものである。この場合も図3. 15と同様に、2000回のCSS後もヘッドがほとんど摩耗しない $b=0.5$ mmのヘッドの実効接触荷重はマイルド摩耗領域にあるのに対し、摩耗量の急増

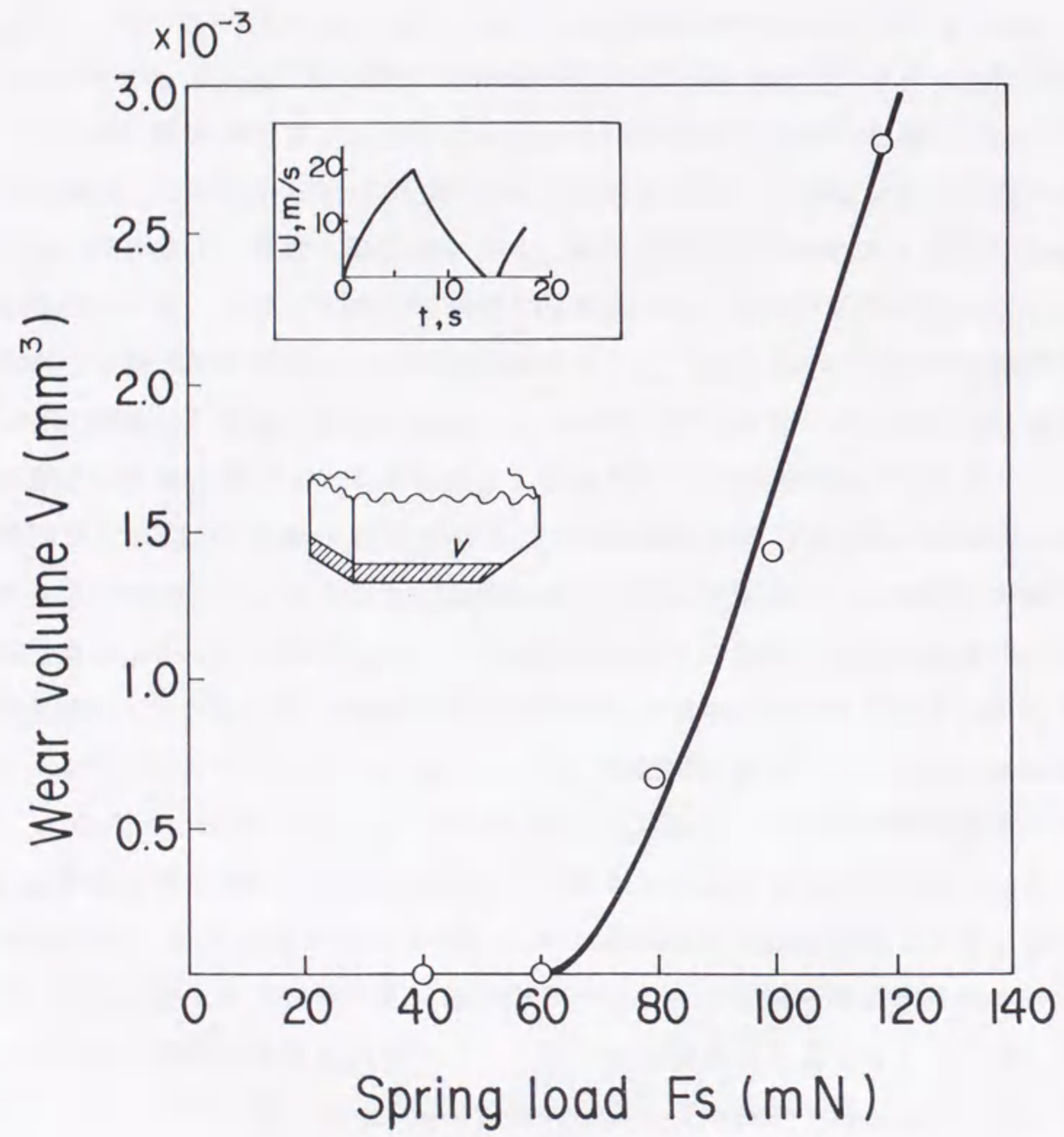


図3. 12 CSS時のヘッド摩耗に及ぼす押し付け力の影響

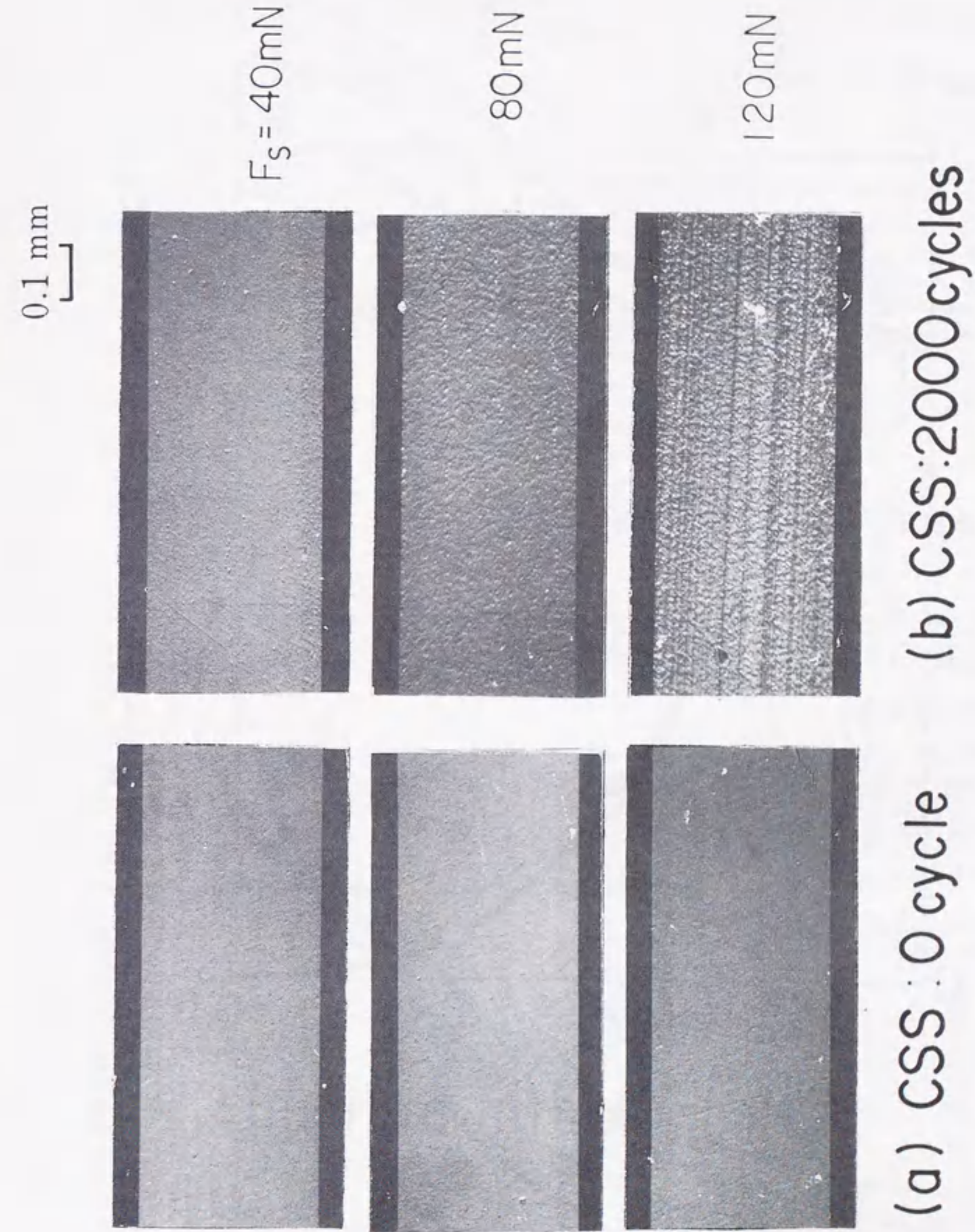


図3. 13 CSS試験前後の浮上面写真

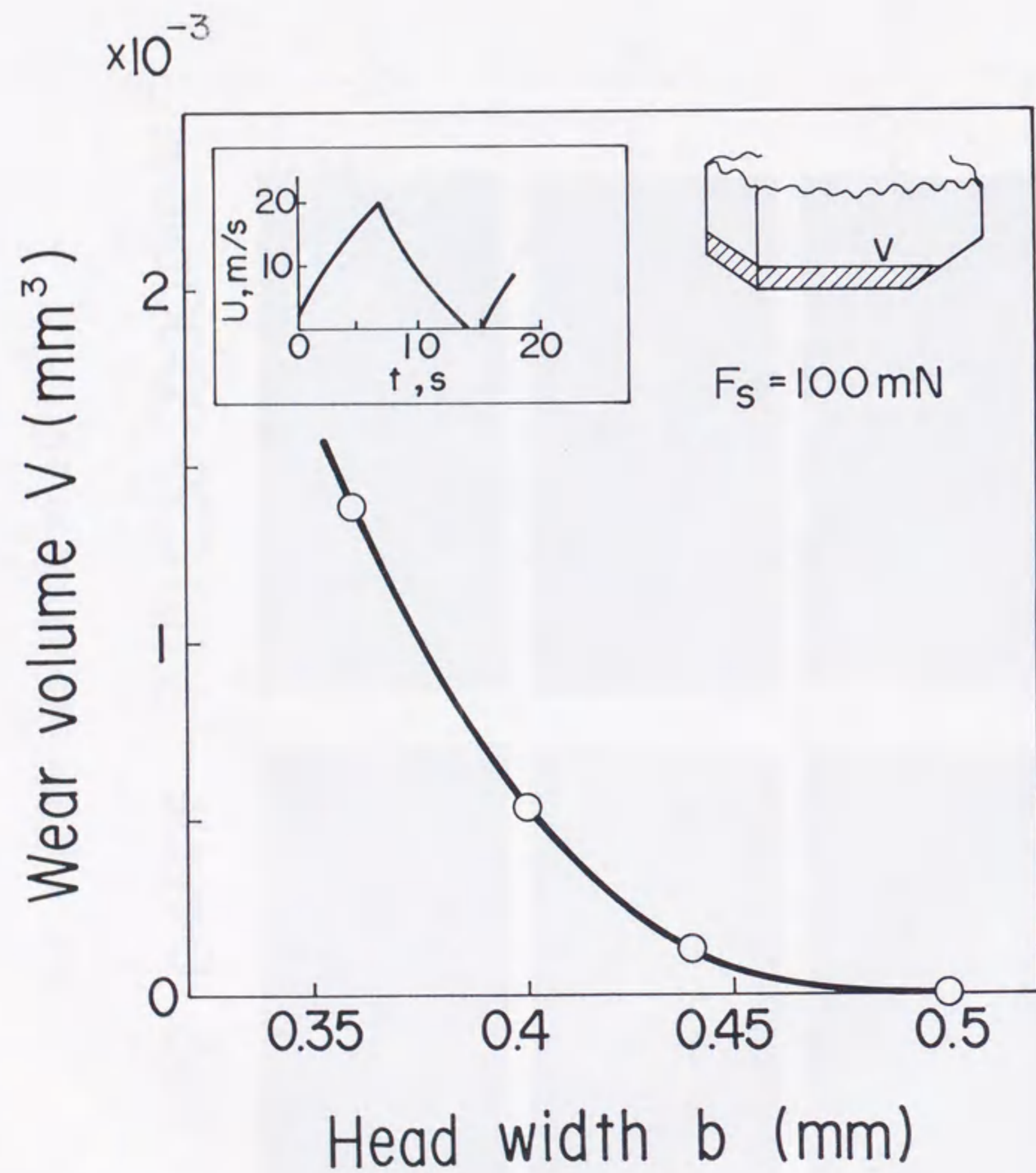


図3. 14 CSS時のヘッド摩耗に及ぼすヘッド幅の影響

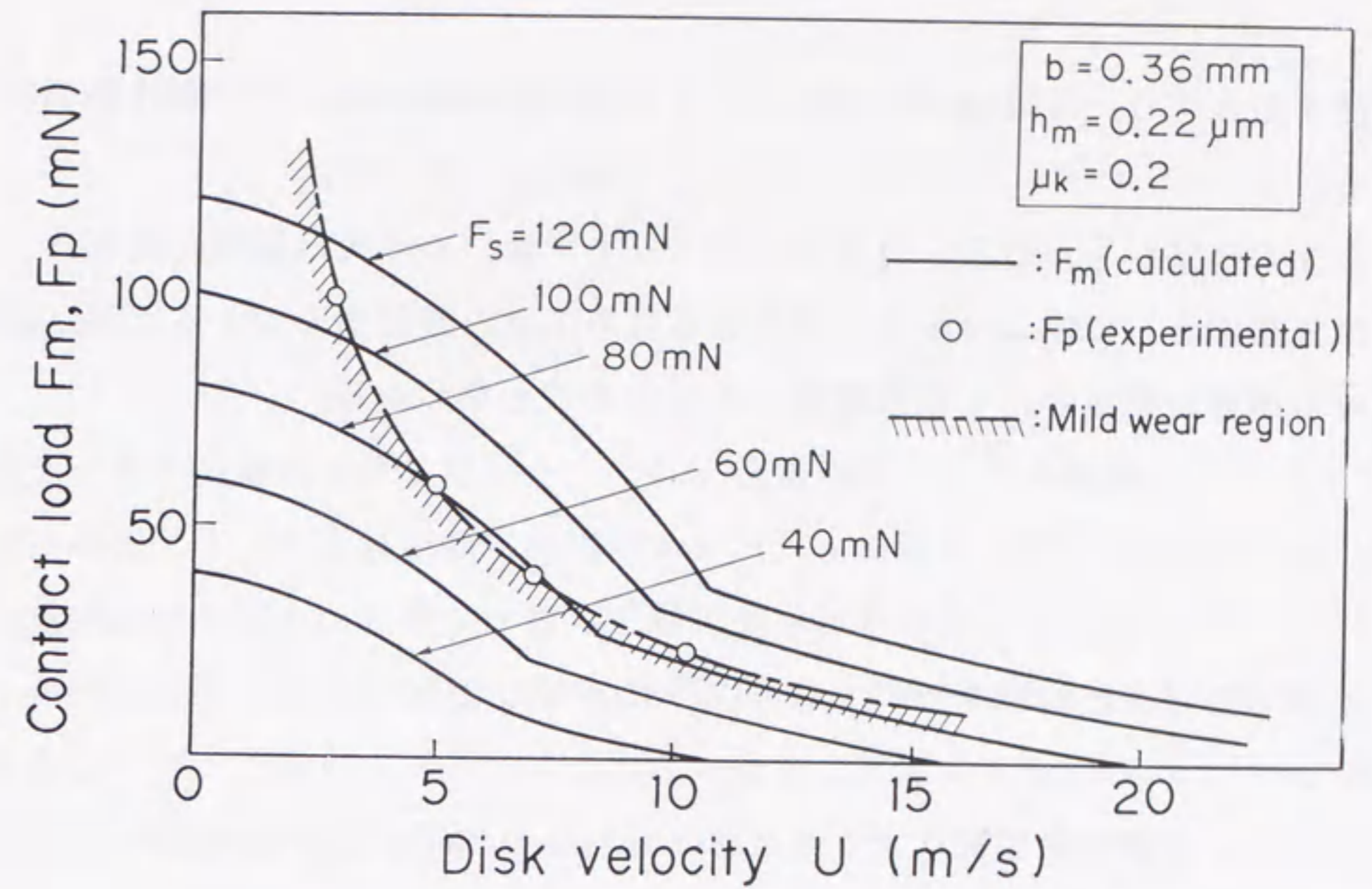


図3. 15 ヘッドAの実効接触荷重とマイルド摩耗領域

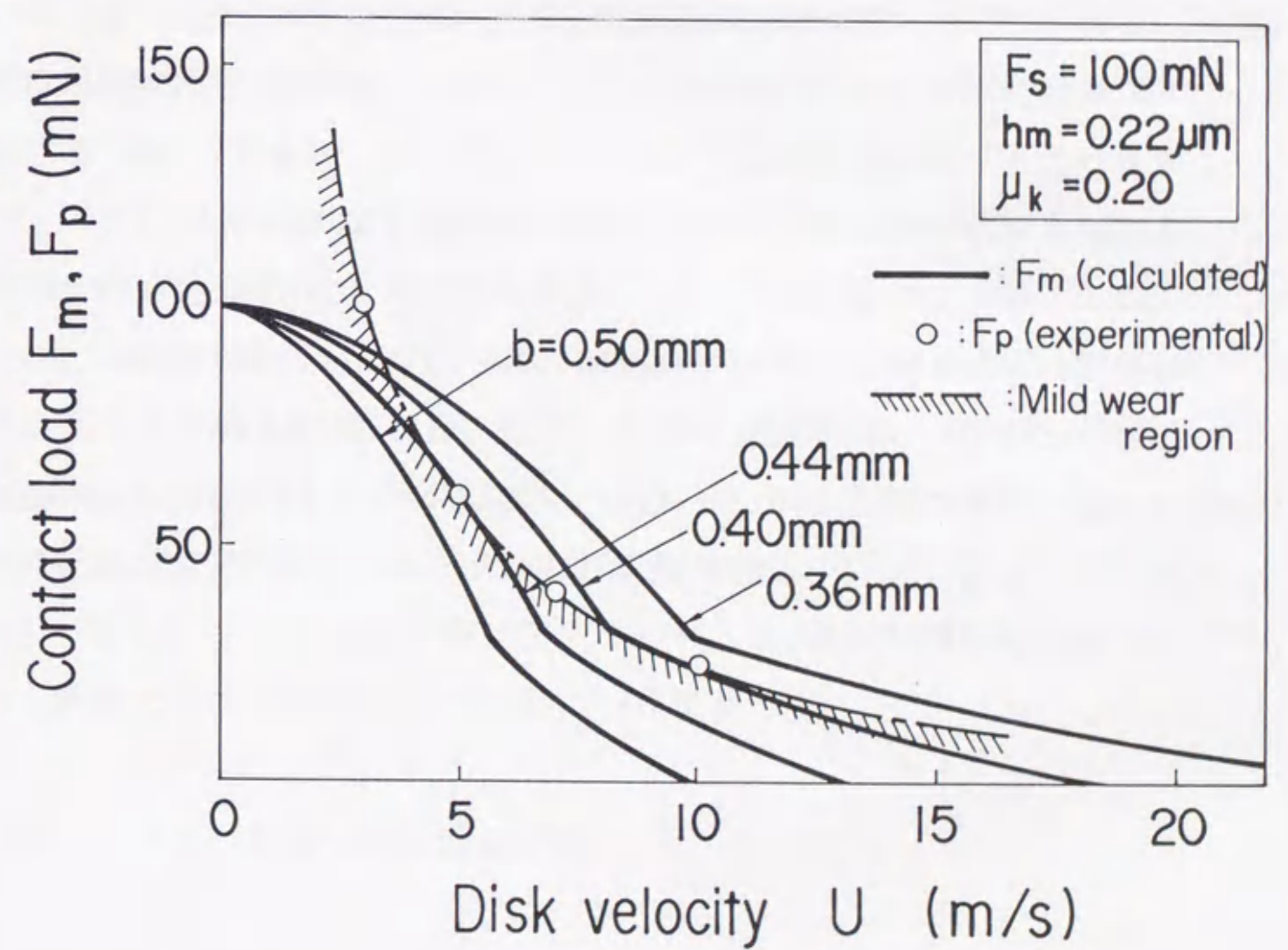


図3. 16 各種ヘッドの実効接触荷重とマイルド摩耗領域

が始まる $b = 0.44 \text{ mm}$ 以下のヘッドの実効接触荷重はシビア摩耗領域に入っている。

以上の結果から、CSS方式の浮動ヘッドでは、その実効接触荷重がヘッド材の摩耗形態として常にマイルド摩耗領域にあるよう設計することにより、起動停止時の摩耗を軽減し、その信頼性を高め得ることがわかる。

3. 4 結論

本章で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 実際の磁気ディスク上におけるヘッドの浮き上がり特性の測定結果に基づく混合潤滑モデルを導入し、従来のレイノルズ方程式を用いて起動停止時の混合潤滑特性を解析する手法を示すとともに、白色光干渉法とAE法を用いた実験によりこのモデルの妥当性を検証した。
- (2) ピン・ディスク形摩耗試験においては、速度の増加とともにフェライトの摩耗形態がマイルド摩耗からシビア摩耗に遷移し、この遷移は接触荷重が大きいほど低い速度で起こる。遷移が起こる速度と接触荷重の関係は混合潤滑状態におけるヘッド摩耗量の急増条件を与える。
- (3) ここで導入した混合潤滑モデルを用いて計算した接触走行中の実効接触荷重がピン・ディスク形摩耗試験におけるマイルド摩耗領域にあれば、起動停止時のヘッド摩耗量は実用上無視できるほど小さい。
- (4) 上記(3)の関係を用いれば、ヘッド材のマイルド摩耗条件と混合潤滑モデルに基づく実効接触荷重の計算値とから、信頼性の高い浮動ヘッドの設計が可能である。

第4章 浮動ヘッドの動的な浮き上がり特性⁽³³⁾

4. 1 緒言

磁気ディスク装置における浮動ヘッドは、空気の動圧効果を利用して、高速で回転する磁気ディスク上に記録再生用のエレメントを微小なすきまで位置付ける一種の気体軸受である。安定な情報の記録再生を行うためには、ディスクの回転に伴う機構振動等の外乱に対しても常に一定の浮上すきまを保つ良好な動特性を実現することが、浮動ヘッドの設計における重要な課題である。Tang⁽³⁸⁾は、時間項を含むレイノルズ方程式をRunge-Kutta法を用いて直接数値積分し、ディスク面の不整による浮動ヘッドの過渡応答を計算している。最近では、White⁽³⁹⁾らが、より効率的に動特性を計算するAlternative Direction Implicit Method (ADI)法を提案している。一方、小野ら^{(40), (41)}は、微小振動を仮定した摂動法に基づいて、空気膜の動的な圧力分布に関する微分方程式を導き、その動的特性を周波数領域で解析する手法を確立し、サブミクロンの浮上すきま領域での浮動ヘッドの動特性を計算している。

ディスクに大きなうねりや不整が存在したり、機構振動が激しい場合には、浮上すきまの変動によって、定常浮上状態における記録再生上の問題が生じるだけでなく、起動停止から定常浮上状態に到るまでの混合潤滑領域における接触走行距離の長大化による摩耗も問題となってくる。前章では、理想的な平面上に平均的な表面あらさに相当する仮想領域が存在するという混合潤滑モデルを導入して、起動停止時の静的な浮き上がり特性を解析したが、本章では、ディスクのうねりによる浮動形ヘッドの動的な浮上量変動が浮き上がり特性に及ぼす影響について、解析と実験の両面から検討した結果について述べる。

4. 2 浮き上がり時の動特性の解析

4. 2. 1 解析手法

浮動ヘッドに上下およびピッチング方向の振動を許した場合、浮動ヘッドは、
図4. 1の2自由度振動モデルに置き換えられる。

この振動系に外力が加えられた時の浮上量変動および圧力変動をそれぞれ Δh 、
 Δp とすれば、それが微小な値であるかぎり、浮上量 h と圧力 p は、

$$h = h_s + \Delta h \quad (4. 1)$$

$$p = p_s + \Delta p \quad (4. 2)$$

の線形和で表わせる。

また、ここで外力に相当するディスク面のうねりの変位 z_1 による浮上量変動は
図4. 1の座標系に従えば、

$$\Delta h = z + \theta(x_0 - x) - z_1 \quad (4. 3)$$

となる。ところでディスク面変位は一般的に次式で表示できる。

$$z_1 = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \sin \omega_n t + b_n \cdot \cos \omega_n t) \quad (4. 4)$$

ここでは線形範囲のみを問題としているので、

$$z_1 = a_n \cdot \sin \omega_n t \quad (4. 5)$$

に対する追従特性が求めれば、後は任意のディスク面変位についても、これを重ね合わせるにより追従特性が得られる。ここでは、うねりによるディスク面変位として、

$$z_1 = a \cdot \sin 2n\pi \frac{U}{L_s} t \quad (4. 6)$$

の正弦波変位を仮定し、以下の解析を行う。

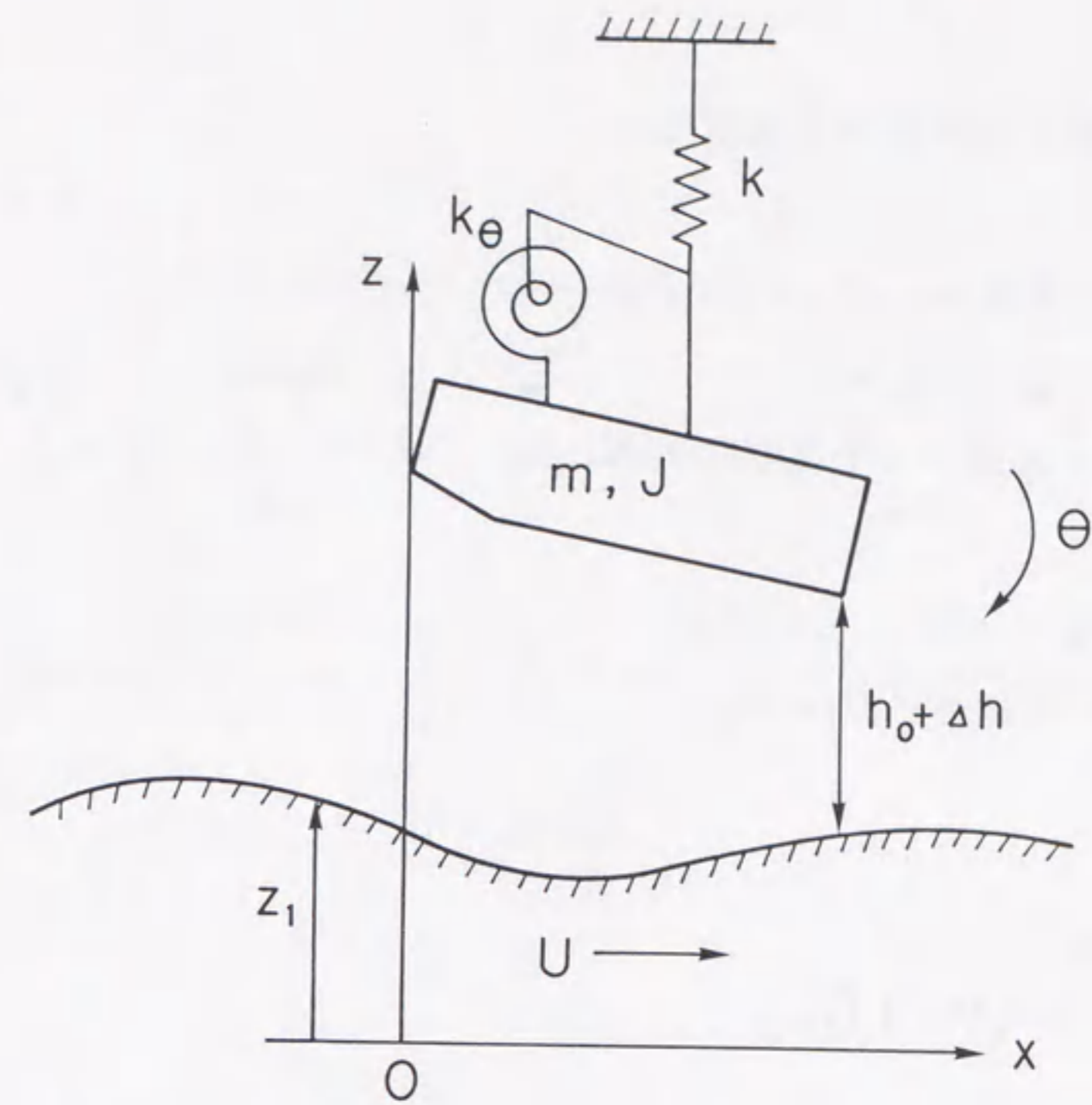


図4. 1 浮動ヘッドの振動モデル

表4. 1 浮動ヘッドの諸元

| Spec. | Head A | Head B |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Head length l | 4. 6 mm | 4. 0 mm |
| Taper length l_1 | 0. 8 2 mm | 0. 7 mm |
| Taper height δ_1 | 7 μ m | 4 μ m |
| Head width b | 0. 3 3 mm | 0. 2 mm |
| Spring load F_s | 4 7 mN | 3 4 mN |
| Load position $X_0 = x_0/l$ | 0. 5 3 2 6 | 0. 5 2 5 |
| Spacing h_0 | 0. 35 μ m (at 31. 4m/s) | 0. 2 μ m (at 40m/s) |

ディスク面変位に対する浮上量変動は、

$$\Delta h = z + \theta(x_0 - x) - a \sin 2n\pi \frac{U}{L_s} t \quad (4.7)$$

となり、その時の浮動ヘッドの運動方程式は、

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + kz = \iint \Delta p dx dy \quad (4.8)$$

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + k_\theta \theta = \iint \Delta p (x_0 - x) dx dy \quad (4.9)$$

となる。

空気の分子平均自由行程 λ を考慮したレイノルズ方程式は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(ph^3 \frac{\partial p}{\partial x} + 6\lambda ph^2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(ph^3 \frac{\partial p}{\partial y} + 6\lambda ph^2 \frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ & = 6\eta U \frac{\partial(ph)}{\partial x} + 12\eta \frac{\partial(ph)}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.10)$$

これに式(4.1)、式(4.2)を代入すれば、 p_s 、 Δp に関する偏微分方程式が得られる。 p_s に関しては、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(p_s h_s^3 \frac{\partial p_s}{\partial x} + 6\lambda p_s h_s^2 \frac{\partial p_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(p_s h_s^3 \frac{\partial p_s}{\partial y} + 6\lambda p_s h_s^2 \frac{\partial p_s}{\partial y} \right) \\ & = 6\eta U \frac{\partial(p_s h_s)}{\partial x} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Δp に関しては、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ p_s h_s^3 \frac{\partial(\Delta p)}{\partial x} + h_s^3 \frac{\partial p_s}{\partial x} (\Delta p) + 6\lambda h_s^2 \frac{\partial(\Delta p)}{\partial x} \right\} \\ & - 6\eta U \frac{\partial[(\Delta p)h_s]}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ p_s h_s^3 \frac{\partial(\Delta p)}{\partial y} + h_s^3 \frac{\partial p_s}{\partial y} (\Delta p) \right. \\ & \left. + 6\lambda h_s^2 \frac{\partial(\Delta p)}{\partial y} \right\} - 12\eta \frac{\partial[(\Delta p)h_s]}{\partial t} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} (3p_s h_s^2 \frac{\partial p_s}{\partial x} + 12\lambda h_s \frac{\partial p_s}{\partial x}) (\Delta h) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (3p_s h_s^2 \frac{\partial p_s}{\partial y} + 12\lambda h_s \frac{\partial p_s}{\partial y}) (\Delta h) - 12\eta \frac{\partial[(\Delta p)h_s]}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

となる。以上の二つの式に、参考文献(40)、(41)の解析手法を適用すれば、動的な圧力分布 Δp を求めることができる。これを式(4.8)、式(4.9)に代入して、この2自由度系の振動方程式を解けば、 z 、 θ が、求まる。さらに、この結果を式(4.7)に代入すると、所定の浮上量変動 Δh が求まる。

4.2.2 計算結果

表4.1に諸元を示す2種類の浮動ヘッドを対象に、その浮き上り時の追従特性に及ぼすディスクのうねりの影響を計算した。ここでは前にも述べたように、うねりによるディスク面変位を、

$$z_1 = a \cdot \sin 2n\pi \frac{U}{L_s} t \quad (4.6)$$

の正弦波として計算を行った。したがってうねりの周波数 f は、

$$f = nU / L_s \quad (4.13)$$

になる。また計算にあたっては実験結果との対応をみる関係から $L_s = 1 \text{ m}$ とし、ディスク回転数が周速に一致するようにした。

図4.2に浮動ヘッドA、図4.3に浮動ヘッドBの浮き上り時の追従特性を計算した結果を示す。ここでは横軸に浮上量 h_0 、縦軸にうねり振幅 a に対する浮上量変動 Δh の比の絶対値をとり、ディスク1周当りのうねり個数 n をパラメータとして整理した。

この結果から浮動ヘッドA、Bとも1周当りのうねり個数 n が増加するにしたがって追従特性が劣化することがわかる。 n の増加による追従特性の劣化の度合はきわめて大きく、図4.4に示すように、追従特性はほぼ n の自乗に比例して劣化する。

ところで、浮動ヘッドとディスク面間の空気膜の剛性は一般に浮上量が小さくなるにしたがって高くなる。また浮上量は周速 U に依存する値であり、浮上量が減少するにつれ、うねりの周波数 $f = nU / L_s$ は減少する。振動学的に考えれば、剛性が増加し、外力の周波数も単調に減少する低浮上領域では追従特性が向上し、浮上量変動が小さくなることが期待される。しかし、 $n = 1$ の場合の浮動ヘッドAとBの計算結果を比較すると、Aでは浮き上り過程の途中で追従特性が最も良くなる浮上量が存在するのに対し、Bでは反対に最も追従特性が悪くなる浮上量が存在しており、予想とは異なる結果となっている。

これに関して、浮動ヘッドの追従特性の周波数依存性を浮上量をパラメータとして計算すると図4.5、図4.6の結果が得られる。浮動ヘッドA、Bともその共振曲線には低周波数域に反共振点が存在する。この反共振周波数は支持バネの剛性、空気膜の剛性と減衰定数および外力によって、それぞれに決まる値であり、浮動ヘッドA、Bとも浮上量が小さくなるにつれ反共振周波数も減少する。

ここで浮き上り過程にある各浮上量に対応する周速から求まるうねりの周波数

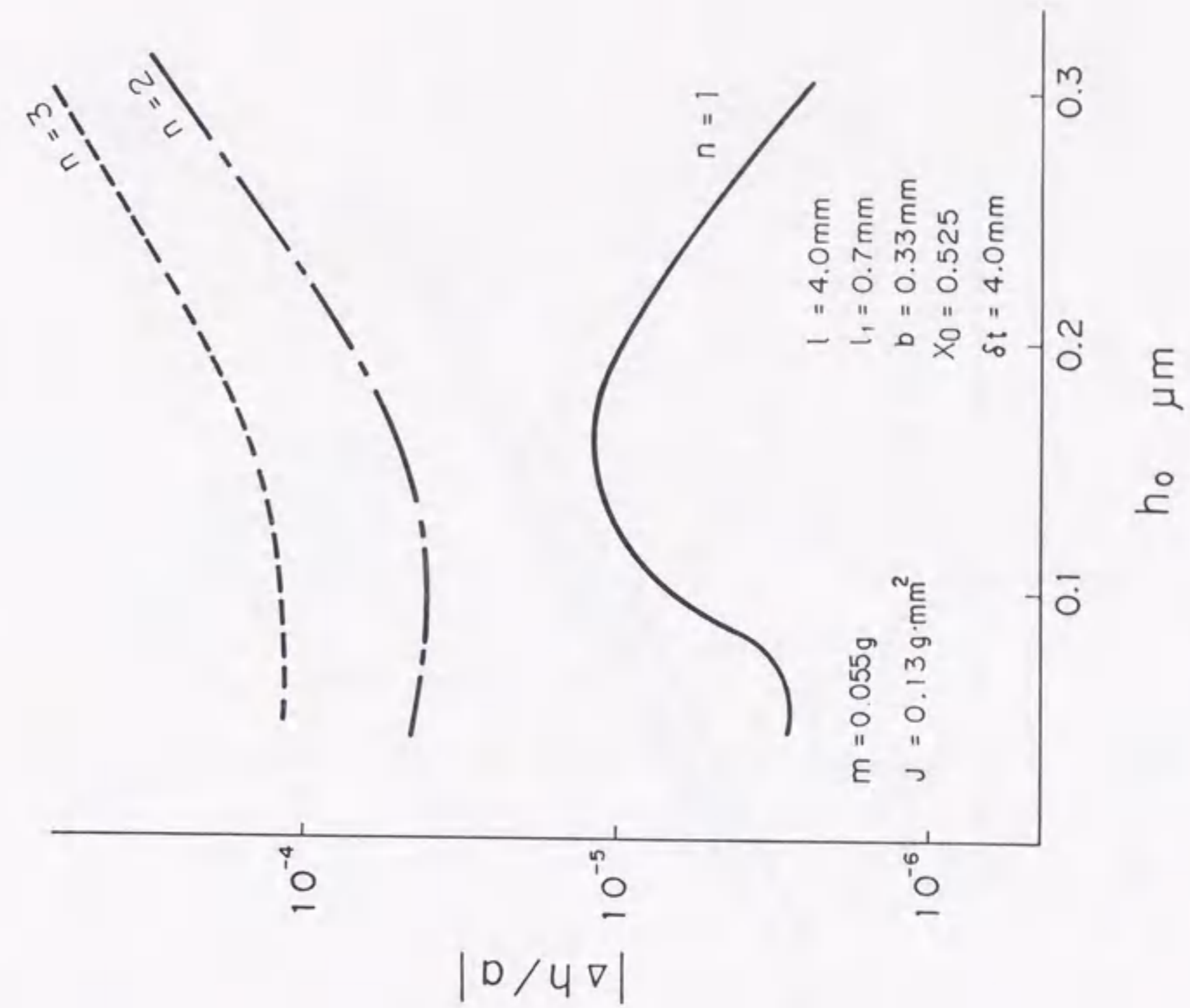


図4.3 ヘッドBの追従特性の計算結果

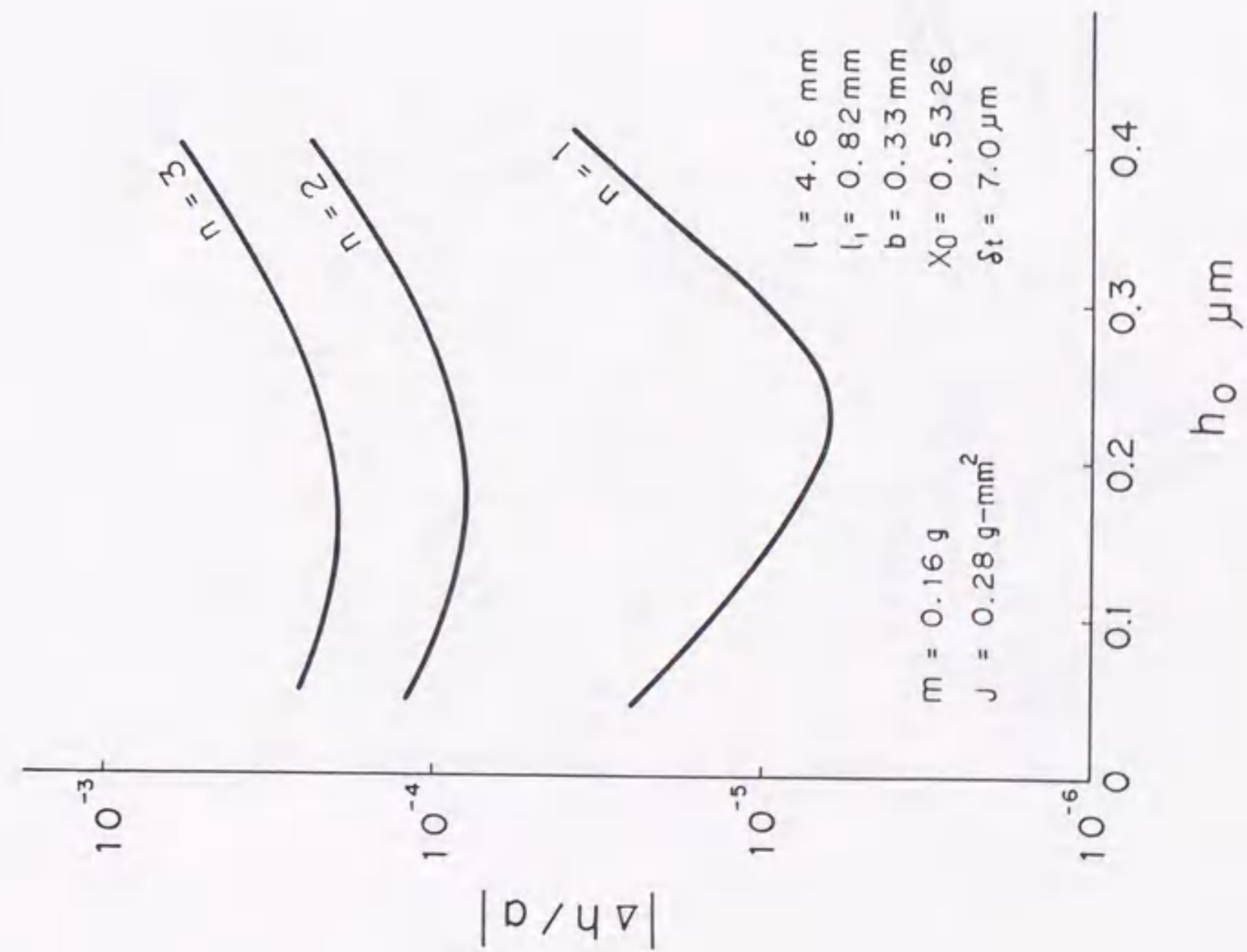


図4.2 ヘッドAの追従特性の計算結果

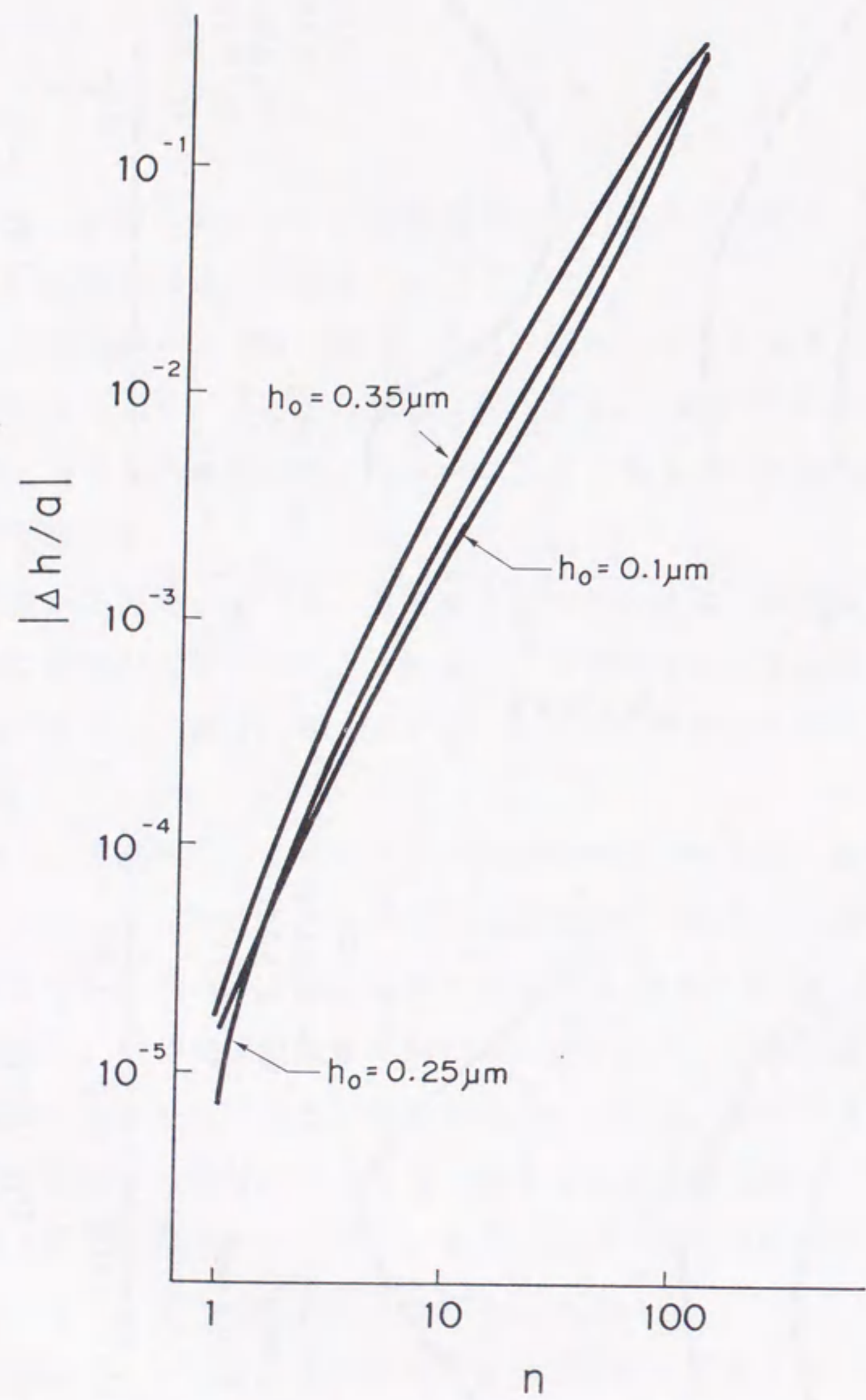


図4.4 ヘッドAの追従特性に及ぼすうねり数nの影響

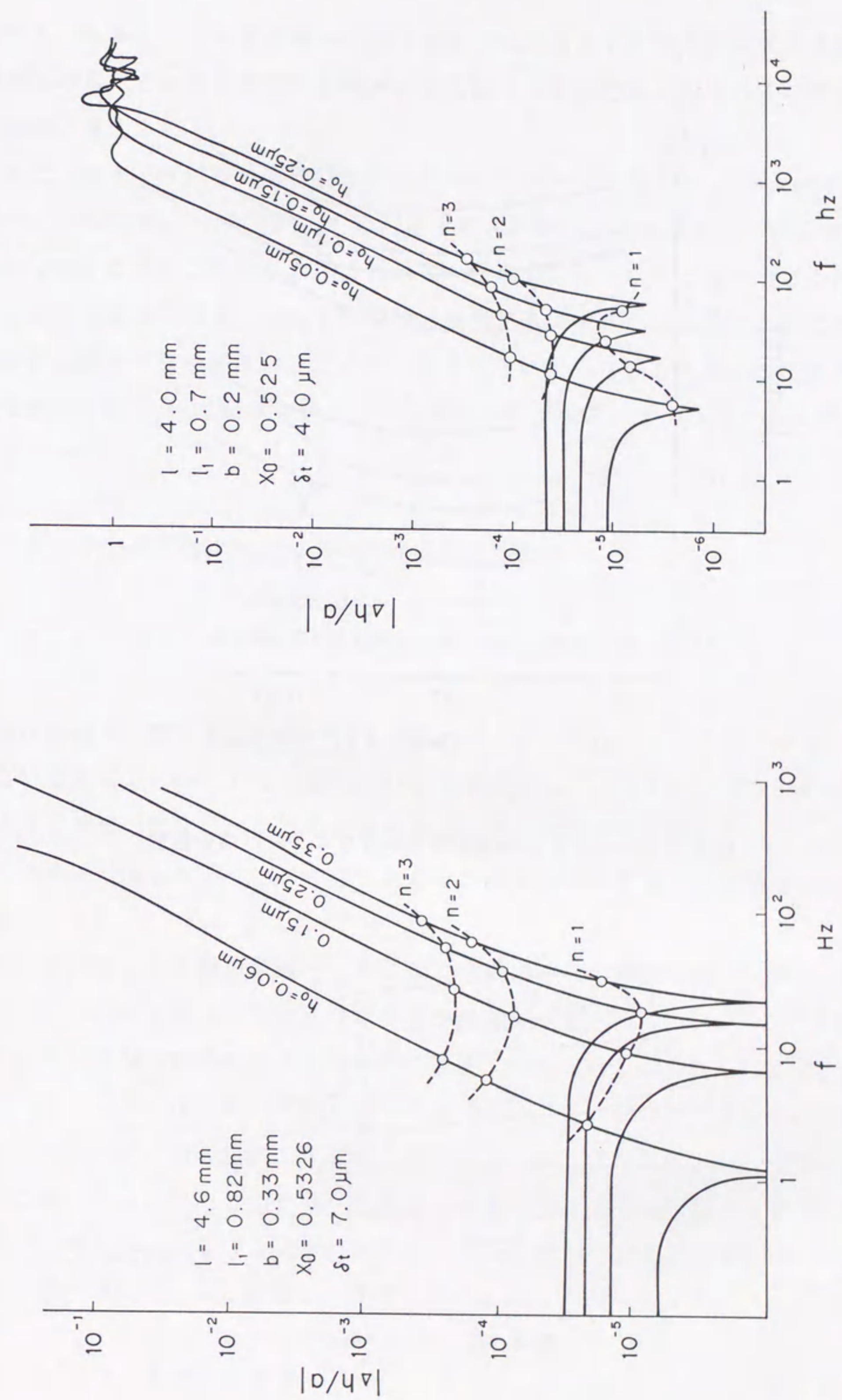


図4.5 浮上量変動の周波数依存性(ヘッドA)

図4.6 浮上量変動の周波数依存性(ヘッドB)

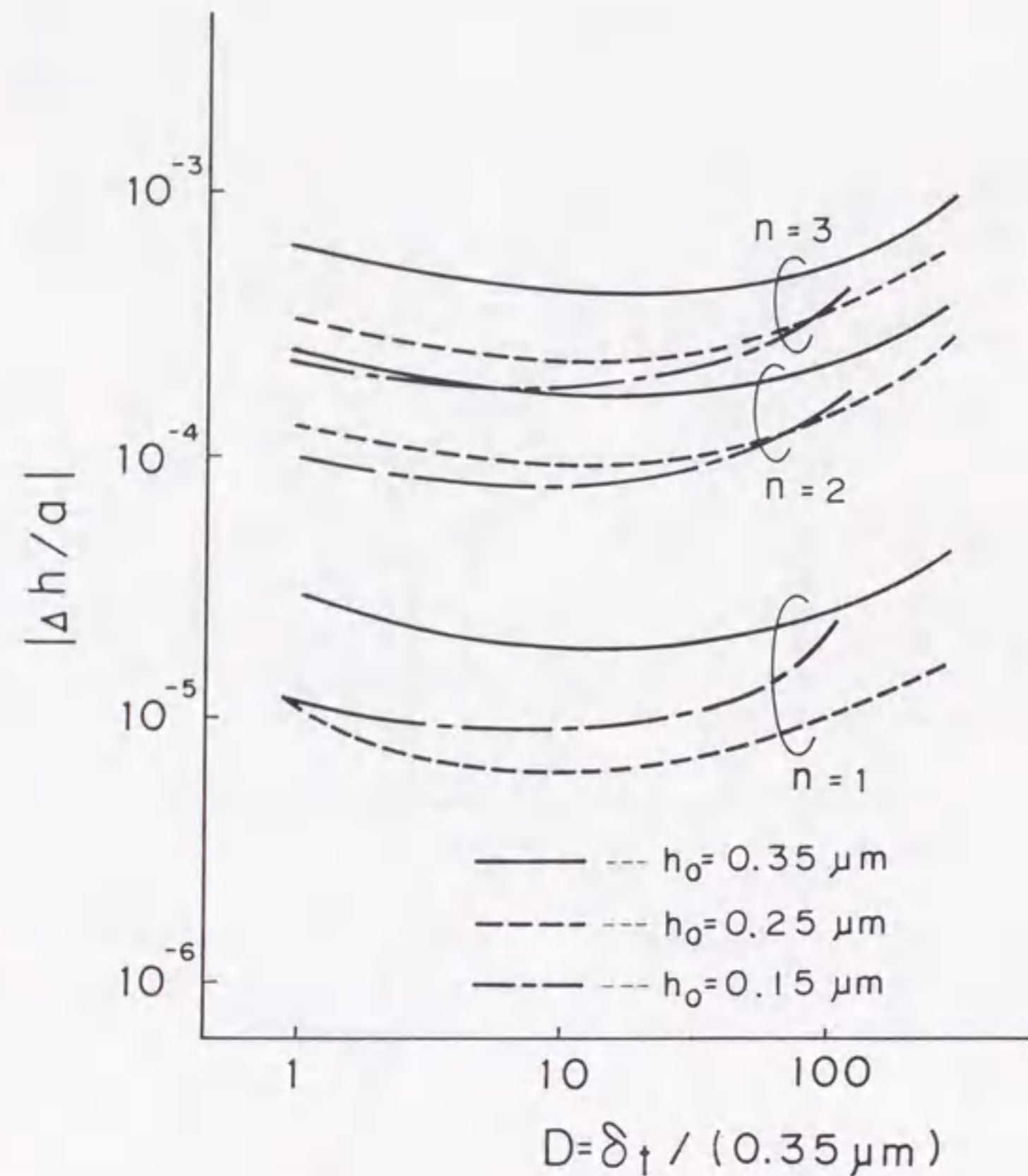


図4.7 ヘッドAの追従特性に及ぼすテーパ高の影響

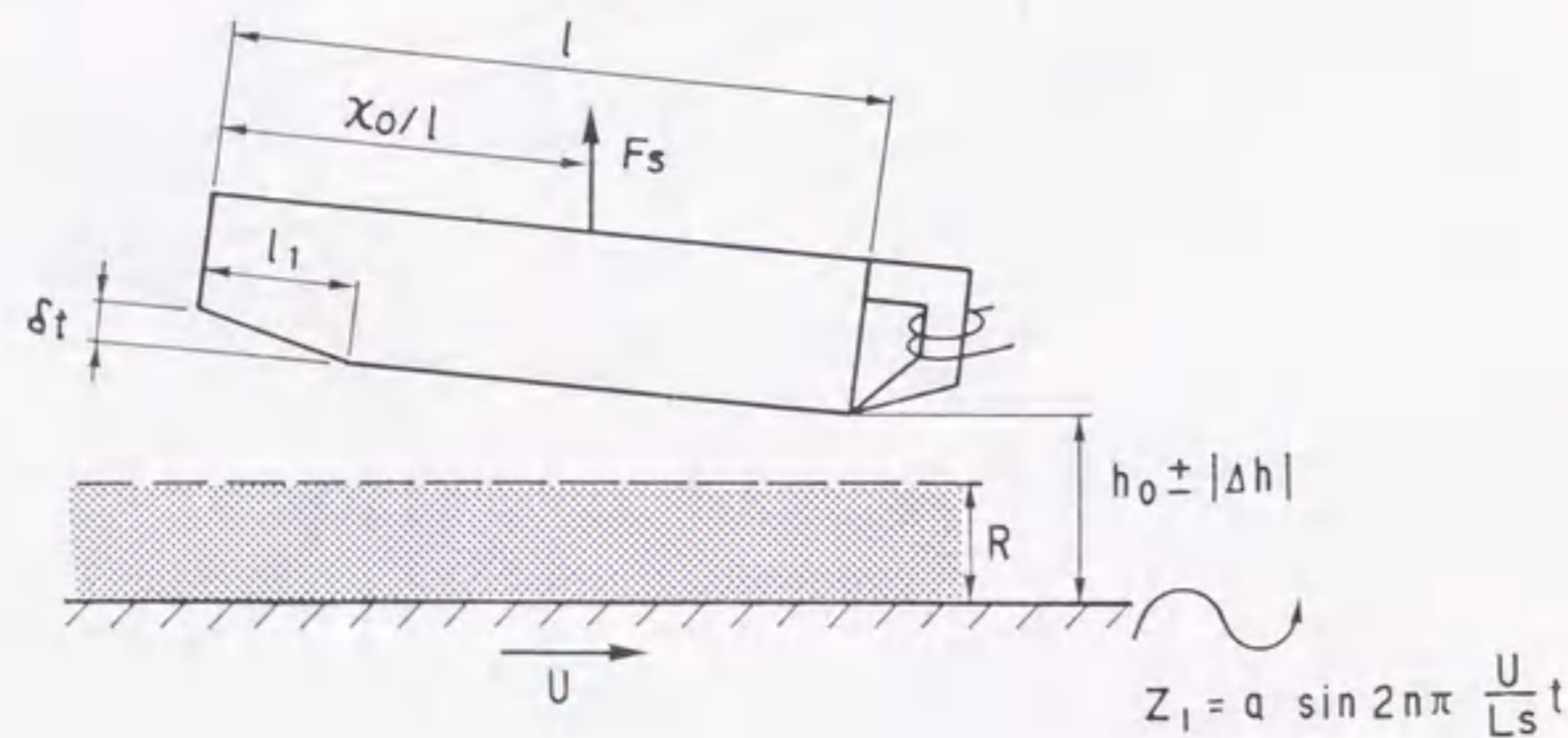


図4.8 ディスクのモデル

を考えると、 $n=1$ の場合の追従特性はA、Bとも変化の大きな反共振点の近傍にある。この反共振点の影響が計算結果と振動学的に予想される結果の違いの原因と考えられる。

次に、浮き上り過程の追従特性に浮動ヘッドのテーパ高さ δ_t のおよぼす影響を図4.7に示す。ここでは δ_t を設定浮上量(浮動ヘッドAでは $0.35\mu\text{m}$)で無次元化した値Dで整理した。これからも明らかなように浮上量が小さくなるにしたがって追従特性上の最適なDの値は減少する。すなわち設定浮上量におけるDの値は浮き上り過程において必ずしも最適とはならないことを示しており、追従特性上最適な δ_t の値はいかなる浮上量においても常にその10~20倍であることがわかる。

4.3 浮上量変動が浮き上がり特性に及ぼす影響

4.3.1 うねりがあるディスク上での浮き上がり速度

動圧形気体軸受である浮動ヘッドでは、ディスクに存在する突起のため、かなり高い速度までディスクとの接触しながら走行する。ヘッドとディスクの接触走行による摩擦の発生は、装置の信頼性を左右する要因の一つであり、ヘッドとディスクが非接触となるヘッドの浮き上がり速度を明確にすることが重要な課題となる。

ヘッドの浮上量変動の原因となるうねりや振動のない理想的なディスクであれば、ヘッドが非接触となる速度(浮き上がり速度: U_r)は、ヘッドの浮上量とそのディスクの最大の突起高さになる時の速度で与えられる。しかしながら、外乱によってヘッドの浮上量変動している場合には、ヘッドの浮上量変動の位相とディスク面における突起の位置関係まで考えないと正確な浮き上がり速度を求めることはできないが、そこまでして厳密な浮き上がり速度を求めるのも現実的ではない。そこで、ここでは図4.8に示すような最大の高さがRの突起がディスクを一様に覆っていると仮定した理想的なディスクモデルを考え、

$$h_0 - |\Delta h| = R \quad (4.14)$$

となる速度を浮き上がり速度 U_f と定義した。

4. 3. 2 実験

4. 3. 2. 1 実験方法

4. 3. 1 で定義したうねりや振動があるディスク上での浮き上がり速度を実験的に求める手段として、ここでは第2章で述べたAE計測法を用いた。 U_f の決定に際しては、接触時に生ずるAE波の波形観察およびその実効電圧を記録して、AE出力がそのノイズレベルに等しくなる時の周速を U_f とした。

またディスク面のうねりはディスク取付部に段差を設けることにより強制的に与えた。うねりのプロフィールは静電容量形の微小変位計で測定した。

なお、ここでは、最大高さ $R = 0.28 \mu\text{m}$ の突起を持つ 356 mm 径の塗布形の磁気ディスクと、ヘッド長 4.6 mm 、ヘッド幅 0.33 mm の浮動ヘッドを用いた。

4. 3. 2. 2 実験結果と考察

図4.9にうねりのあるディスク上で速度を変えながらヘッドを浮上させた時の、うねりの形状とその時に観測されたAE信号を示す。 $160 \mu\text{m}$ のうねりを与えたディスクの $U = 15 \text{ m/s}$ の時のAE信号を見ると、うねりの谷に相当する部分で大きな振幅のAEが発生している。AEの振幅はヘッドとディスクの接触の強さに対応しており、この結果は、うねりの谷の部分でヘッドの浮上量変動が最も大きくなり、激しいヘッドとディスクの衝突が起こることを示している。したがって、最大の高さの突起がうねりの谷の部分に存在する場合に、最も浮き上がり速度が大きくなることがわかる。

図4.10にうねりの数をパラメータとした浮き上がり速度 U_f の測定結果を示す。横軸にはうねりの振幅を μm 単位で、縦軸には U_f をとった。またここには4.3.1で定義した U_f の計算値をも同時に示した。また、図4.11に、このディスクに強制的に与えたうねりの形状の測定結果を示す。実験結果は、うねりの振

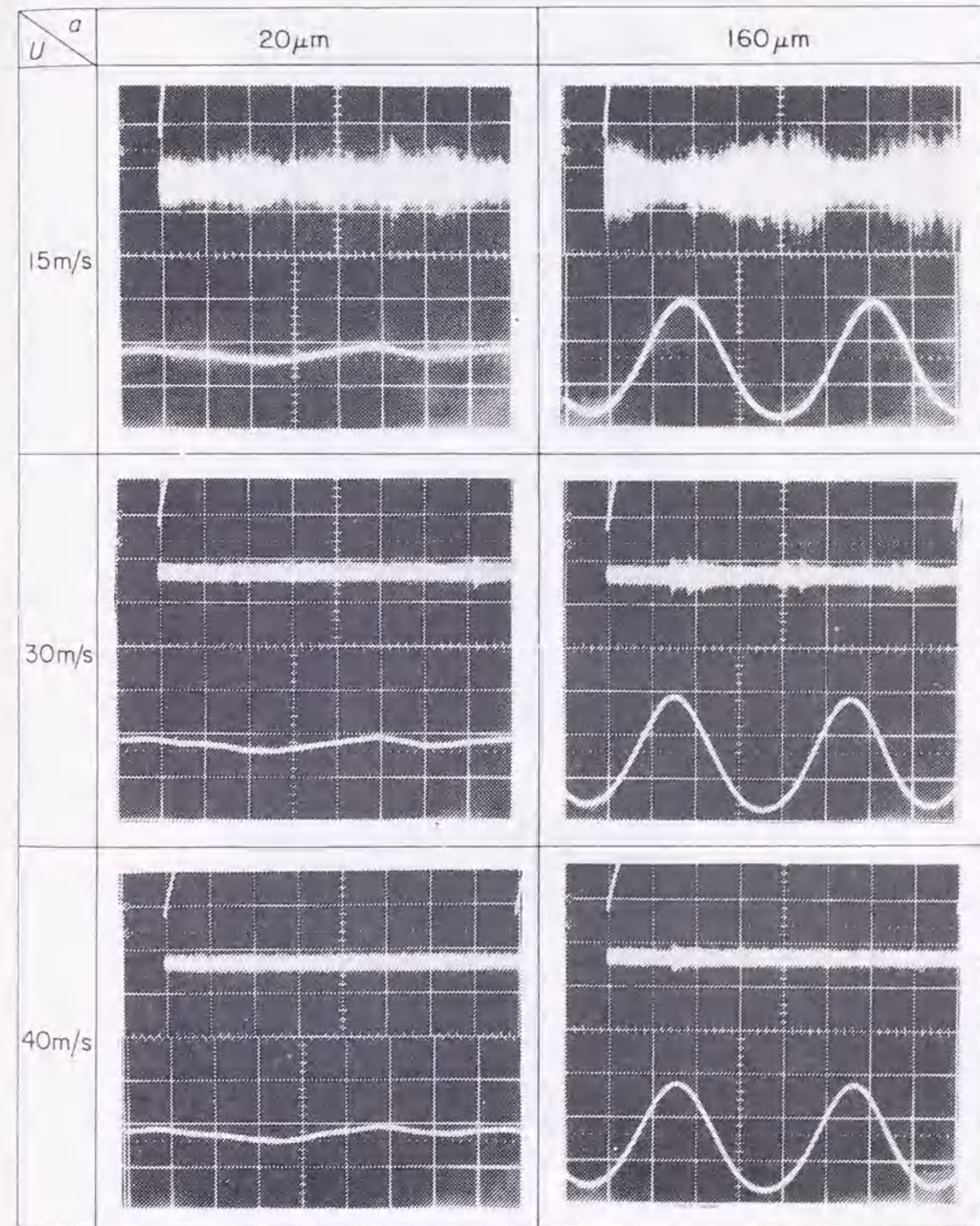


図4.9 うねりのあるディスク上でのヘッドとディスクの接触

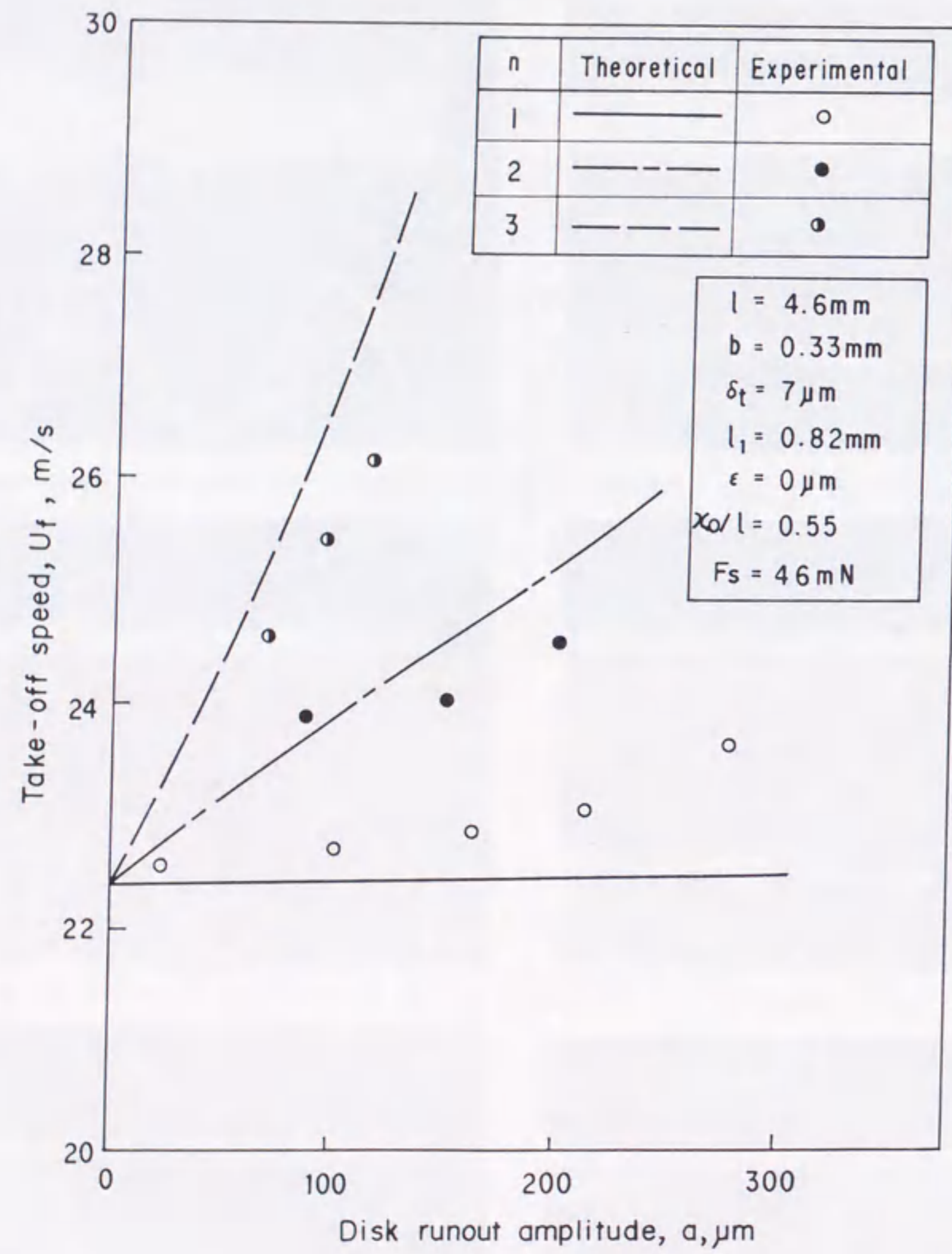


図4. 10 浮き上がり速度 (実験値と計算値の比較)

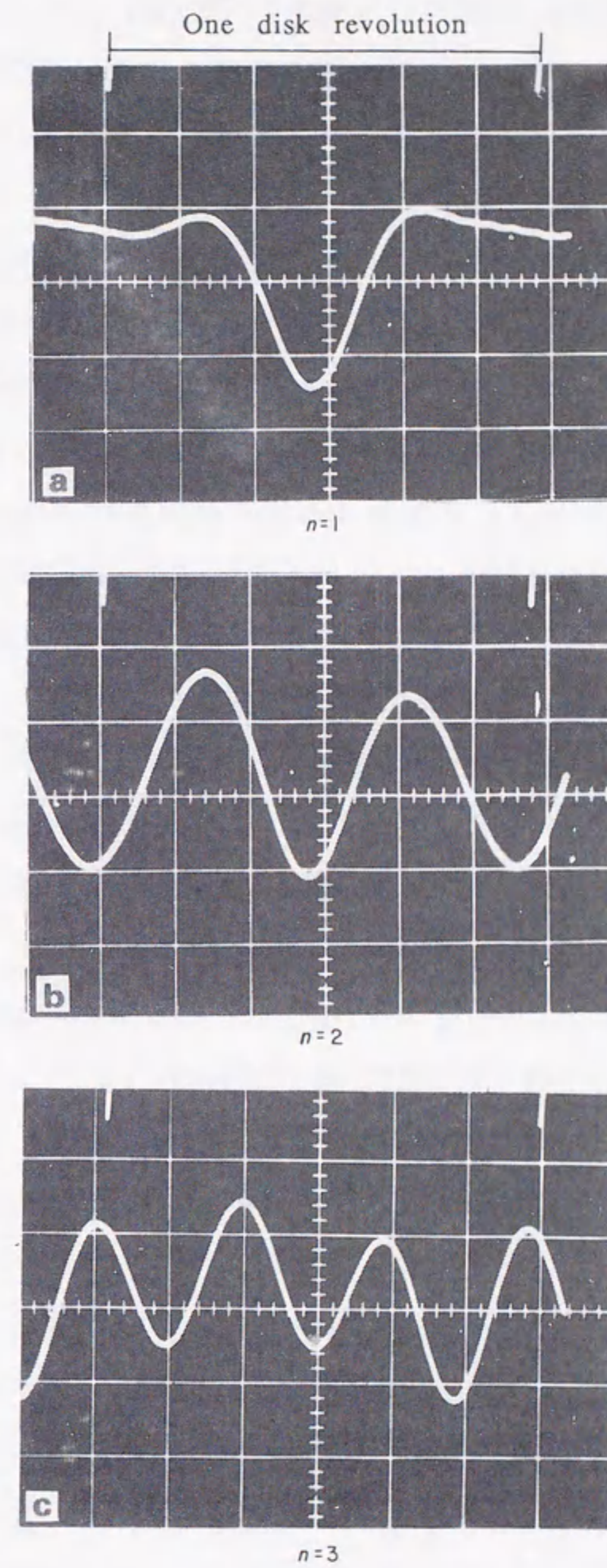


図4. 11 うねり形状

幅の増加とディスク1周当りのうねりの数の増加によって浮動ヘッドの追従特性が劣化し、高い速度まで接触走行が続くことを示しており、これは計算結果とも傾向的にはよく一致している。しかし、個々の実験値と計算値の関係を比較すると、うねりの数 n が1の場合には実験値の方が計算値よりも大きい値を示すのに対し、 $n=2$ および3の場合にはそれが逆転している。実際のディスク上では、図4.9の結果が示すように、うねりの谷の部分に最大高さの突起が存在する場合に最も浮き上がり速度が大きくなる。ここで用いた図4.8のディスクモデルは実際のディスク面上に局所的にしか存在しない高さ R の最大突起が平面上を一樣に覆っているとしたものであり、このモデルから求められる U_f の値は、いわゆる U_f の最悪値と考えられ、 $n=2, 3$ における計算値と実験値の関係は妥当なものであることが理解できる。これに対し、 $n=1$ の場合のうねりの形状の測定値(図4.11-a)を見ると、 $n=2$ および $n=3$ のそれが、ほぼ正弦波に近い形をしているのに比べ、高周波成分をかなり多く含んだうねり形状になっており、これが計算値よりも実験値が大きくなった原因であると考えられる。

4.4 結論

浮動ヘッドの浮き上り過程において、その追従特性にディスク面のうねりが及ぼす影響を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) うねりはその振幅値よりもディスク1周当りの個数が追従特性を大きく左右する。
- (2) うねりがディスク1周に1個の場合の追従特性は、変化の激しい反共振点近傍にあるため、特異な挙動を示す。
- (3) 最大の高さの突起が一樣にディスクを覆っているとしたモデルを仮定することによって得られる浮き上がり速度 U_f の値は、強制的にうねりを与えたディスク上での浮き上がり速度の実測値とよく対応しており、このモデルによって浮動ヘッドの信頼性に影響を及ぼす浮き上がり速度を評価することが可能である。

第5章 塗布ディスクによる 浮動ヘッドの摩耗^{(42), (43)}

5.1 緒言

塗布形の磁気ディスクは、円盤状のアルミニウム合金素材の表面をクロメート処理した基板に $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の針状磁性粉と少量のアルミナ微粒子を高分子樹脂のバインダ中に分散した磁性塗料を $1\mu\text{m}$ 程度の厚さにスピコートした後、焼成、研磨したものである。図5.1に模式的な塗布形ディスクの構造図を、図5.2に表面あらさ曲線の測定例を示す。磁気ディスクは一般的な工業製品としてはかなり平滑な表面に仕上げられてはいるが、微視的に見れば、ところどころに研磨工程で取りきれなかった突起が認められる。これらの突起の多くは硬いアルミナ粒子である。このアルミナ粒子は磁性塗膜の機械的な強度を向上させる目的で混合されているものであるが、ヘッド側からみると起動停止時の摩耗損傷を引き起こす主たる原因であると考えられている⁽⁴⁴⁾。

磁気ディスクの表面には、摩耗損傷を低減する目的で化学的に安定でかつ蒸発しにくいフロロカーボン系の液体潤滑剤がオーバコートされているが、最適な潤滑条件を決定することは磁気ディスクの製造工程上きわめて重要な課題である。すなわち、潤滑が不足すれば期待どおりの摩耗損傷の低減効果が現れないし、過剰な潤滑剤を付与するとヘッドとディスクの吸着という新たな問題が生じる⁽²⁾。

本章ではまず、塗布形ディスクの塗膜強化材として用いられているアルミナ粒子の混合量がヘッドおよびディスクの摩擦・摩耗に及ぼす影響を定量的に明らかにする。次に、磁気ディスクの表面潤滑剤が浮動ヘッドの摩耗に及ぼす影響を明らかにするとともに、摩耗とともに装置の信頼性上重要な課題である吸着現象に関連するヘッド・ディスク間の摩擦に及ぼす潤滑剤の影響についても述べる。

5.2 実験方法

5.2.1 摩耗試験

摩擦試験には、第3章でも用いたピン・ディスク形の摩擦試験機を使用した。ベリリウム銅製のカンチレバーの先端に取り付けたピン試験片をDCモータで回転するディスクに押し付けられる方式をとっており、押し付け荷重は半導体ゲージを内蔵したロードセルで0.1mNの精度で測定される。

ピン試験片としては、磁気ヘッド材であるNi-ZnフェライトとMn-Znフェライトを直径2.29mmの球に加工したものを供した。各フェライト材の特性を表5.1に示す。球状ピンの表面は浮動ヘッドのスライダ面と同等の精度に仕上げられている。

なお、試験の形式としては、同一のディスク周上を走行させるシングルパス方式を採用し、同一条件で3回の試験を行い、その平均値を測定値とした。

5.2.2 摩擦試験

図5.3にここで用いた摩擦試験機⁽³⁰⁾の概要を示す。この試験機は、供試ディスクとピン試験片あるいは実際の浮動ヘッド間の摩擦力を正確に測定するため、ディスクを取り付けた静圧軸受の回転体を同じく静圧軸受の直線案内で駆動する構造としている。摩擦力は半導体ゲージのロードセルを用いて0.1mNの精度で測定した。駆動速度は可変であるが、本章の試験では0.05mm/sとした。

ここでの全ての摩擦および摩擦試験は、温度25℃、相対湿度50%の条件のもとにクラス100の清浄空気環境中で行った。

5.3 磁性塗膜中のアルミナ粒子の影響

5.3.1 供試ディスク

塗布形ディスクの磁性塗膜中のアルミナが、ヘッド材であるフェライトの摩擦や摩擦特性に及ぼす影響を調べるため、表5.2に示す4種類のアルミナ混合率を持つ356mm径のディスクを用意した。磁性塗膜中のアルミナ混合率はX線マイクロ分析装置(EPMA)で測定した。なお、これらの供試ディスクは全て無潤滑である。

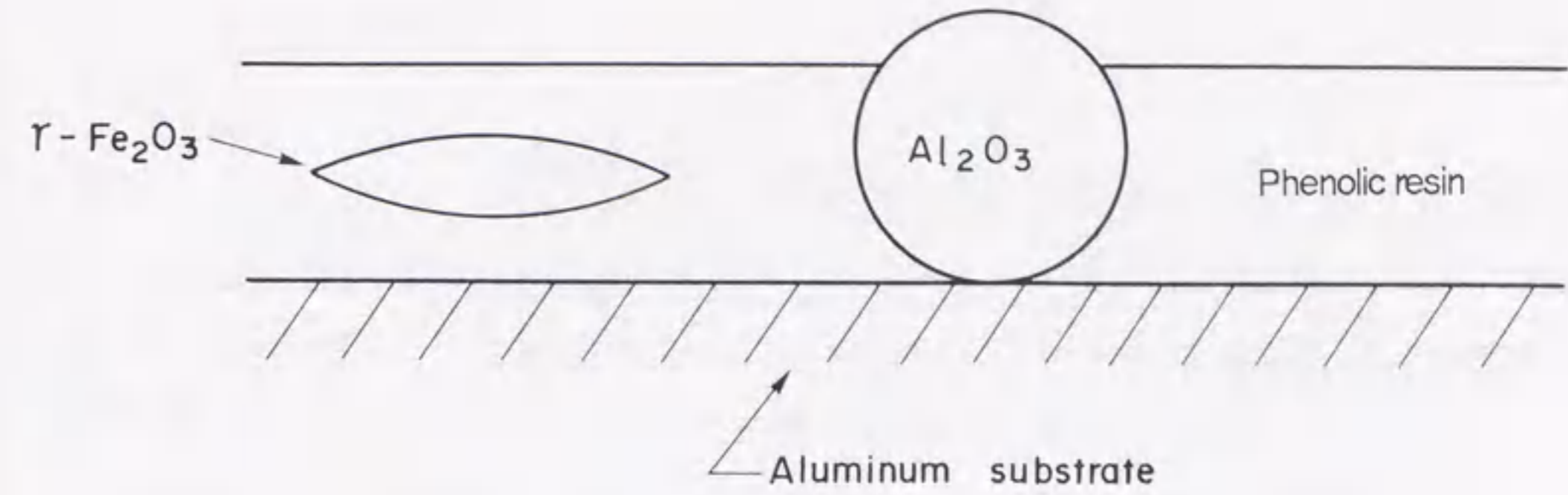


図5.1 塗布形ディスクの構造

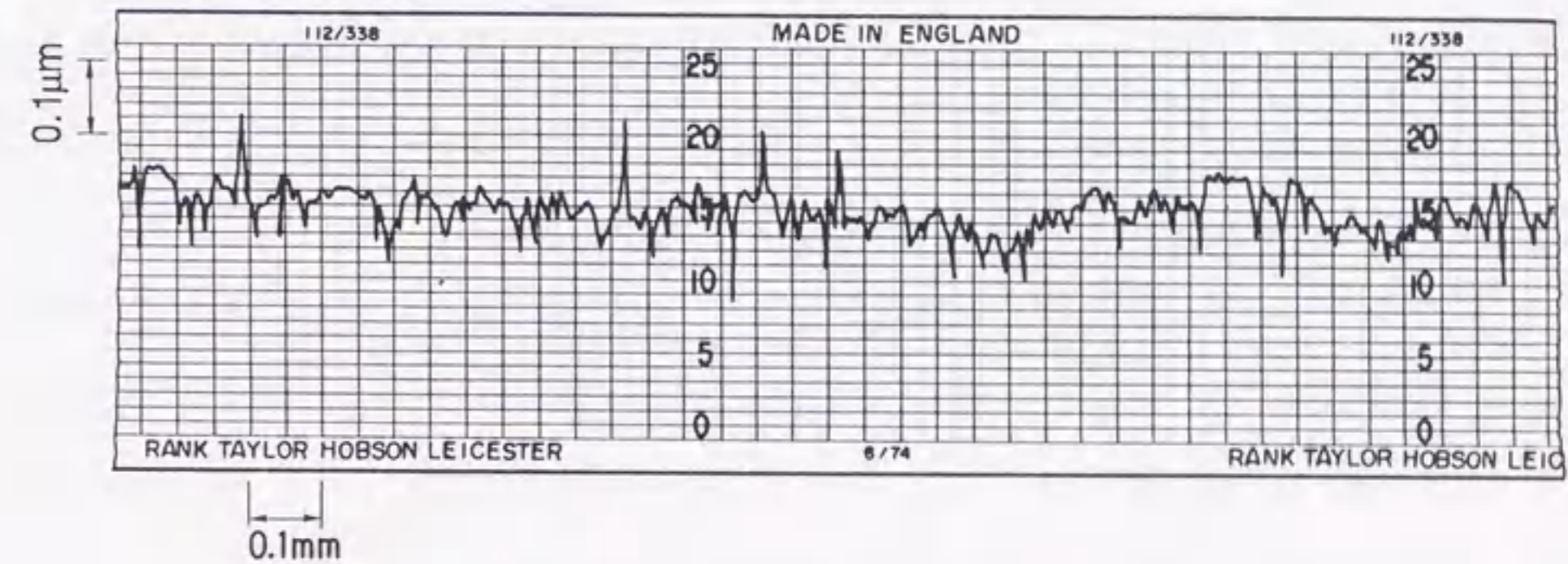


図5.2 塗布形ディスクの表面あらさ

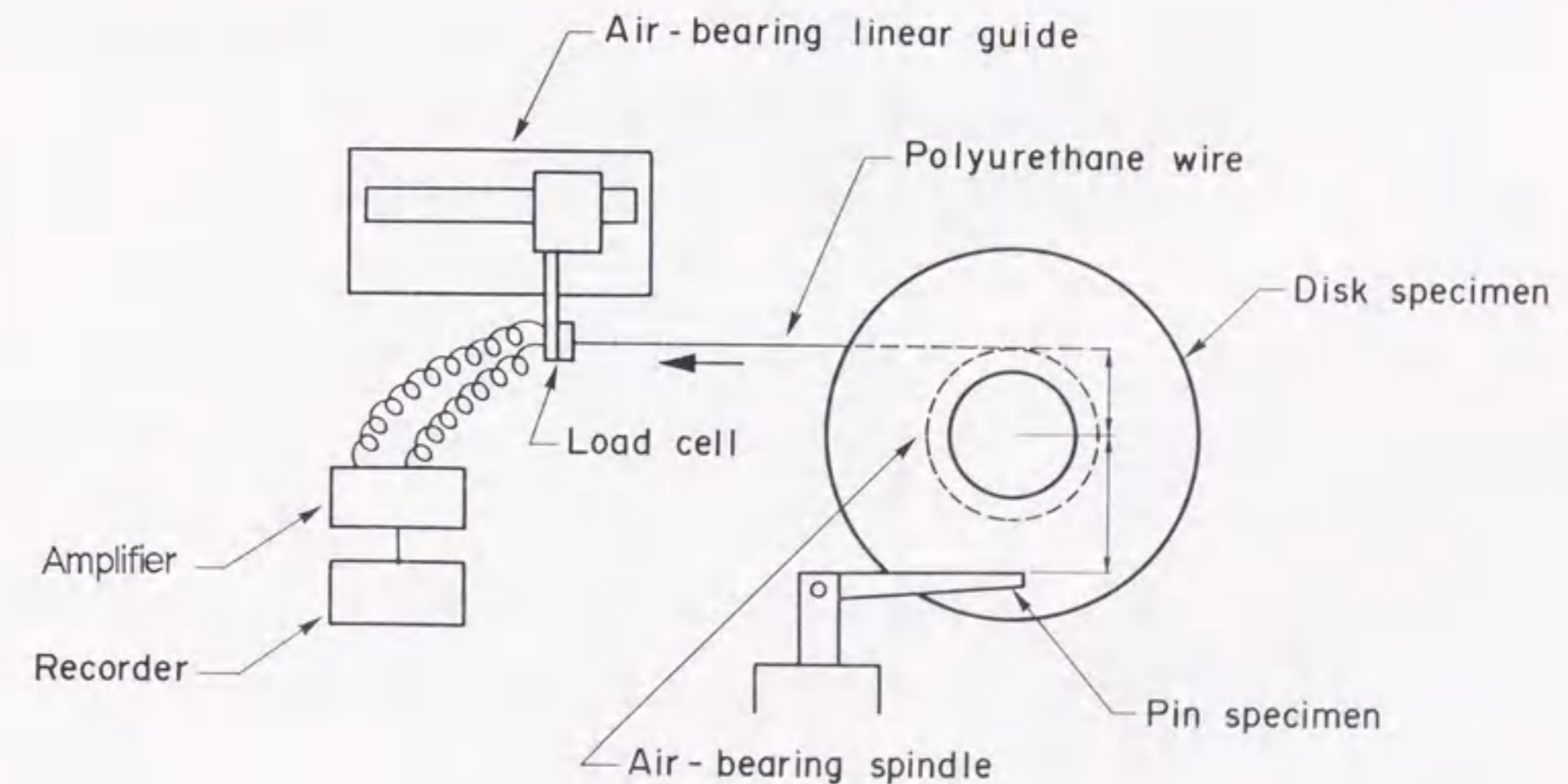


図5.3 摩擦試験機の構成

表5.1 供試フェライトの特性

| Property | Mn-Zn ferrite | Ni-Zn ferrite |
|--|----------------------|---------------------|
| Permeance, μ | 2,500 | 1,700 |
| Flux density, B_s (Oersted) | 5,500 | 3,400 |
| Coercive force, H_s (Gauss) | 0.05 | 0.19 |
| Curie temp. T_c ($^{\circ}\text{C}$) | 200 | 150 |
| Vickers Hardness, H_v | 30 | 20 |
| Thermal expansion, α ($1/^{\circ}\text{C}$) | 130×10^{-7} | 90×10^{-7} |
| Grain size (μm) | 50 | 15 |
| Porosity, P (%) | 0.05 | 0.1 |
| Density, d (g/cm^3) | 5.1 | 5.3 |

表5.2 アルミナ混合率

| Disk | Al_2O_3 content (wt.%) |
|------|--|
| A | 1.4 |
| B | 4.8 |
| C | 7.8 |
| D | 19.2 |

5.3.2 摩耗特性

図5.4に、押し付け力 $F_p = 60\text{ mN}$ 、速度 $U = 3\text{ m/s}$ 、接触走行距離 $L = 5.4\text{ km}$ の条件でMn-Znフェライトの摩耗試験を行った結果を示す。図中、上段がフェライトピンの摩耗痕、中段と下段がディスクの摩耗痕写真とその断面形状である。フェライトピン試験片の摩耗痕の大きさはアルミナ混合率が増えるにしたがって大きくなっており、摩耗が増加している。個々の摩耗痕を見ると、単に大きさが変化しているだけでなく、摩耗の形態が変化している様子がわかる。すなわち、アルミナ混合率の高いディスクCおよびDに対応するフェライトピンの摩耗痕にはアブレシブ摩耗に特有な条痕が見られるのに対し、アルミナ混合率の低いディスクAあるいはBに対応するフェライトピンの場合には摩耗痕の上あるいはその周辺にフェライトとディスクの摩耗粉が移着しており、典型的な凝着摩耗の様相を呈している。特に、ディスクAの場合には、フェライトピンに明らかに磁性塗膜とわかる鱗片状の摩耗粉が強固に移着しており、これに対応するディスク側の摩耗痕にも、磁性膜がひきむしられたような状況が認められる。それに対し、ディスクCやDではこのようなディスクの磁性塗膜の移着はほとんど認められない。

以上の結果から、フェライトピン試験片と塗布形ディスクの摩耗について、次のような知見が得られる。

- (1)アルミナ混合率が低い場合には、凝着摩耗が支配的である。
- (2)アルミナ混合率が増加するにしたがって、凝着摩耗からアブレシブ摩耗に移行する。
- (3)凝着摩耗からアブレシブ摩耗への遷移は、フェライトのピン試験片側の摩耗は増加させるものの、凝着によるディスクの摩耗・損傷は大幅に軽減している。

図5.5にディスク摩耗痕の断面形状から求めたディスクの摩耗量を示す。アルミナ含有率の低いディスクA、Bの摩耗量が大きいのにに対し、アルミナ含有量7.8%のディスクC、19.2%のディスクDの摩耗はほとんどない。ここで用いたディスクとフェライトの場合、凝着によるディスクの摩耗・損傷を防止するためには、7.8%程度以上のアルミナ含有率が必要であることがわかる。

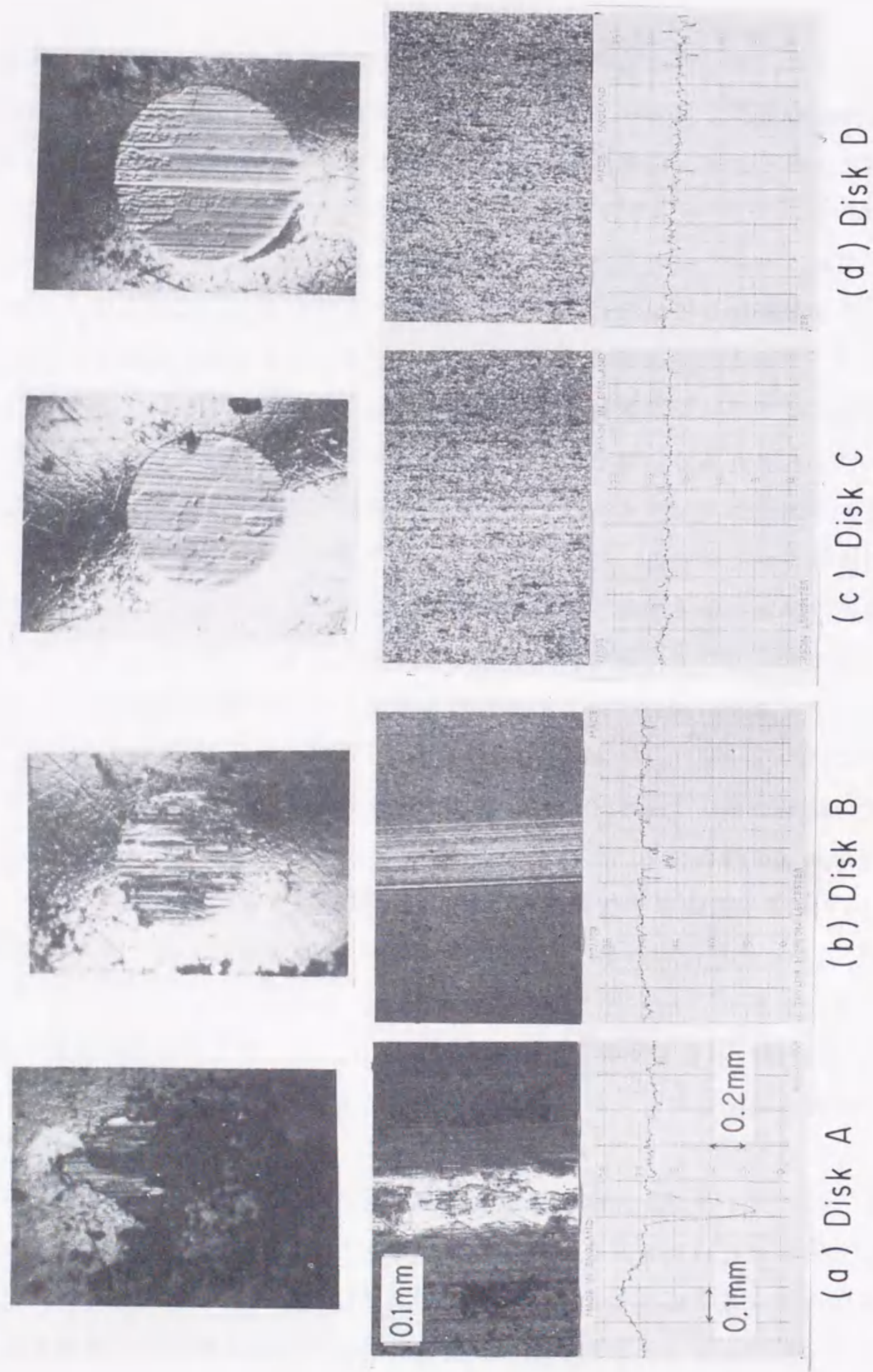


図5.4 摩耗試験後の試験片の状態

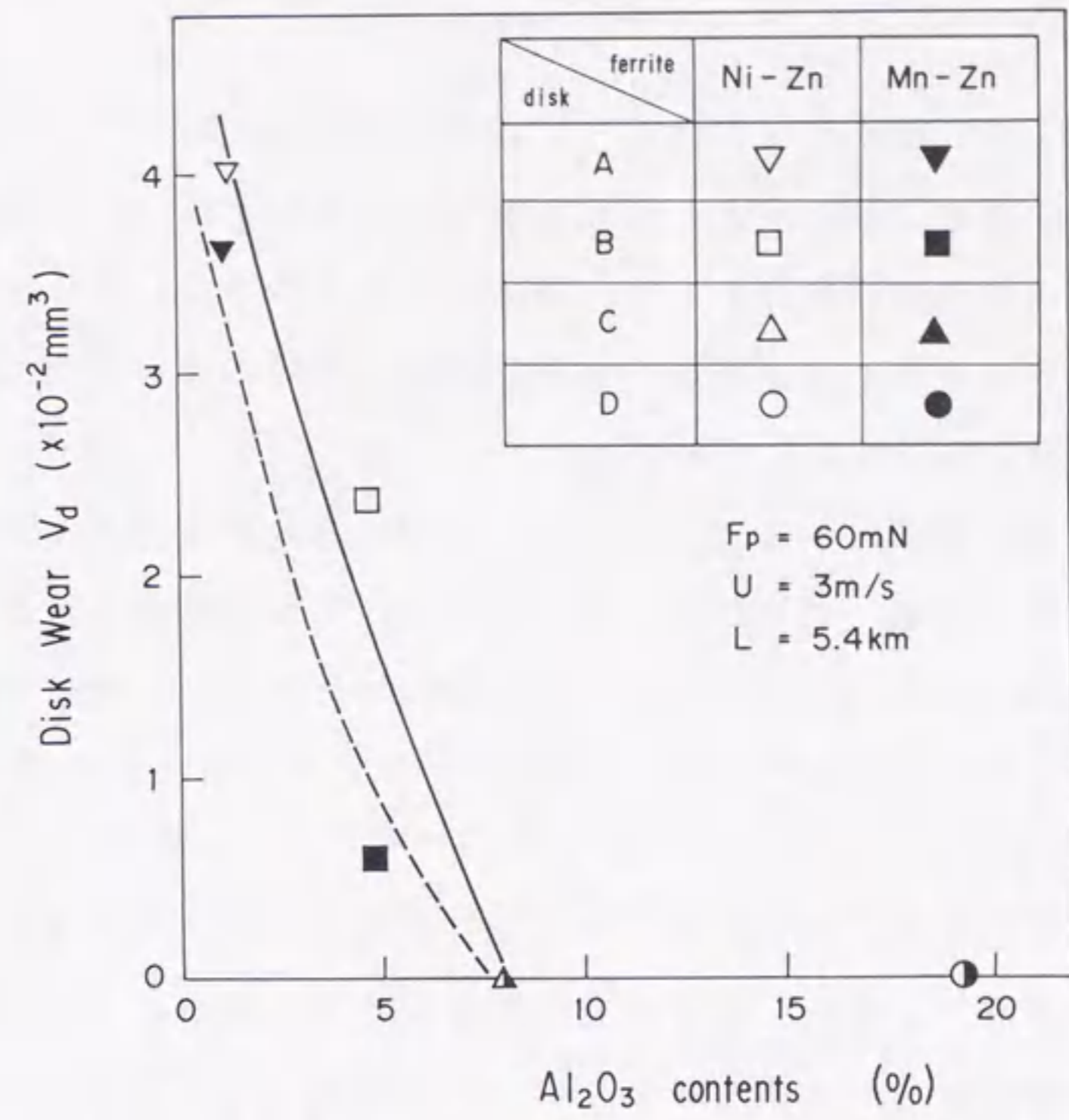


図5.5 ディスクの摩耗に及ぼすアルミナ量の影響

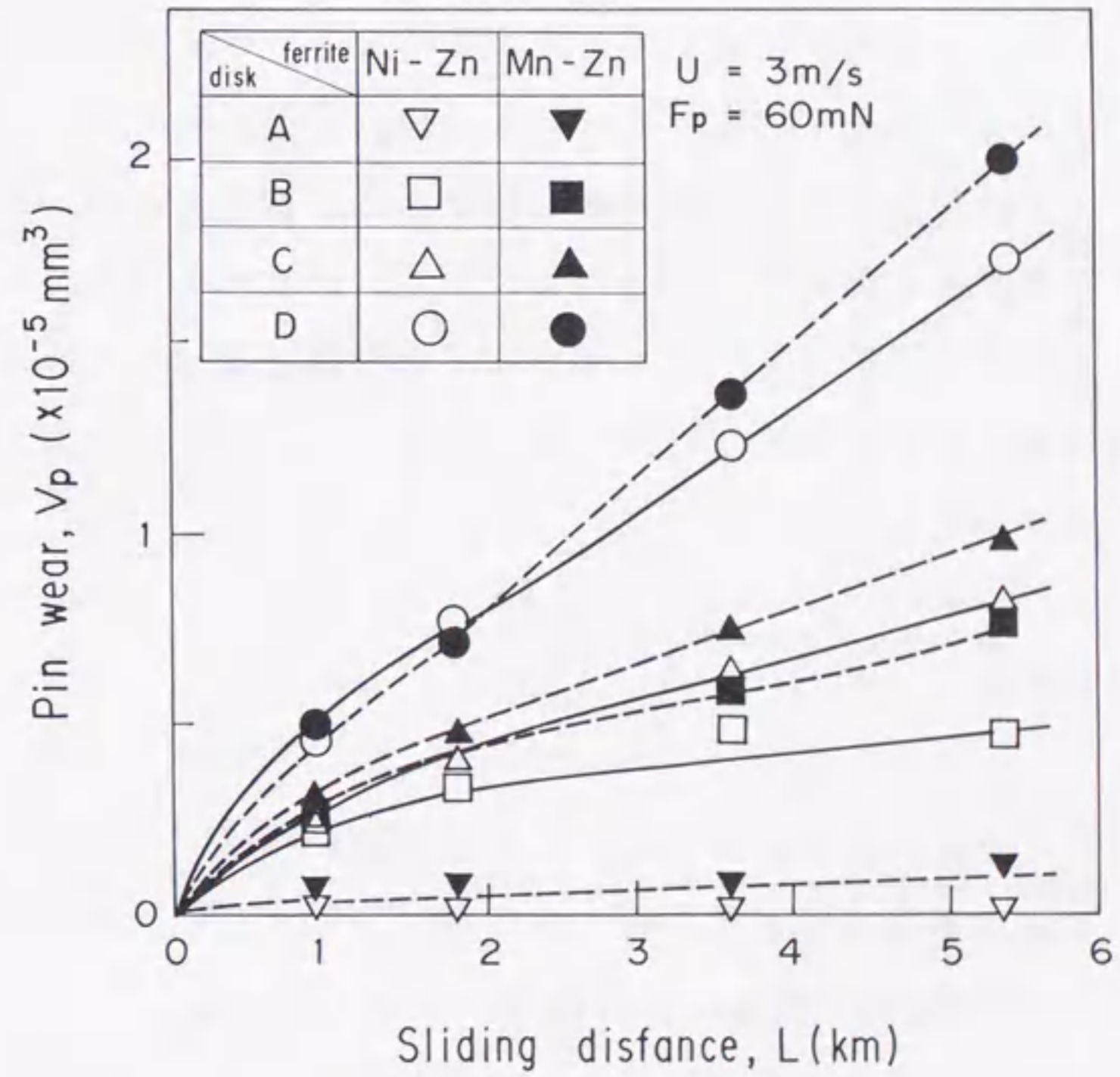


図5.6 フェライトピン試験片の摩耗推移曲線

次に4種類のディスク上におけるNi-Znフェライト、Mn-Znフェライトの摩耗推移曲線を図5.6に示す。摩耗量を個々に比較すると、高硬度のNi-Znフェライトの方が摩耗量が小さく、特にアルミナの少ないディスクAにおいては、Mn-Znフェライトは僅かであるが摩耗しているのに比べて、Ni-Znフェライトはほとんど摩耗していない。

この理由としては、以下に示すような γ -Fe₂O₃磁性粉と各フェライトの硬度の大小関係が考えられる。すなわち、 γ -Fe₂O₃のモース硬度は約6であり、Taborの実験⁽⁴⁵⁾によれば、そのピッカース硬度H_vは500~700程度と推定される。これに対しNi-ZnフェライトはH_v=820と γ -Fe₂O₃よりも硬く、H_v=630の硬度を有するMn-Znフェライトは γ -Fe₂O₃とほぼ同程度の硬さと考えられる。したがってアブレッシブ砥粒であるアルミナが少ないディスクAとNi-Znフェライト試験片を接触走行させた場合には、Ni-Znフェライトに比べ軟い γ -Fe₂O₃はアブレッシブ砥粒として作用しないのに対し、ほぼ同等の硬さのMn-Znフェライトに対しては、僅かではあるがアブレッシブ砥粒として作用したものと考えられる。

図5.7に、アルミナ含有率に対する定常摩耗時のフェライトの摩耗率を示す。Ni-Znフェライト、Mn-Znフェライトの場合とも、低アルミナ含有率の領域ではアルミナが増えるにつれて摩耗率の急増がみられる。これは摩耗形態が凝着からアブレッシブへと移行しているためである。いずれの場合にも7.8%以上のアルミナ含有率ではほぼ完全にアブレッシブ摩耗に遷移している。また、どのアルミナ含有率においても硬度の高いNi-Znフェライトの方が摩耗の進展が少ないとの結果が得られた。

5.3.3 摩擦特性

図5.8に、フェライト試験片とディスクの動摩擦係数 μ_k に及ぼすアルミナ量の関係を示す。アルミナ含有率が7.8%以下のディスクの場合にはアルミナ量が増すにつれ μ_k が急激に低下する。それに対し19.2%という大量のアルミナを含むディスクでは7.8%の場合とほとんど変わらない μ_k の値を示している。これは図5.5のディスク摩耗量の大小関係とも傾向が一致している。

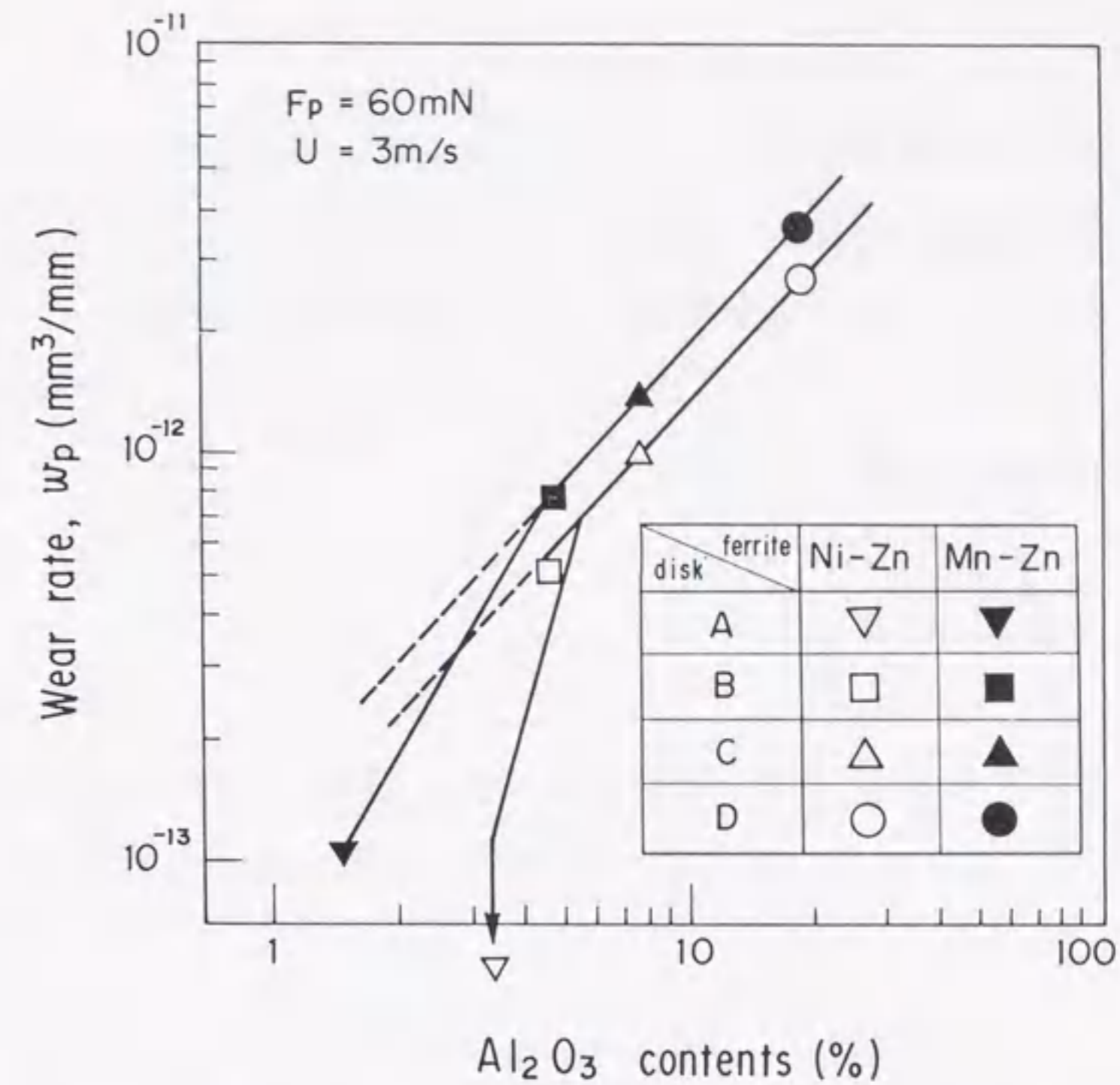


図5.7 フェライトの摩耗に及ぼすアルミナ量の影響

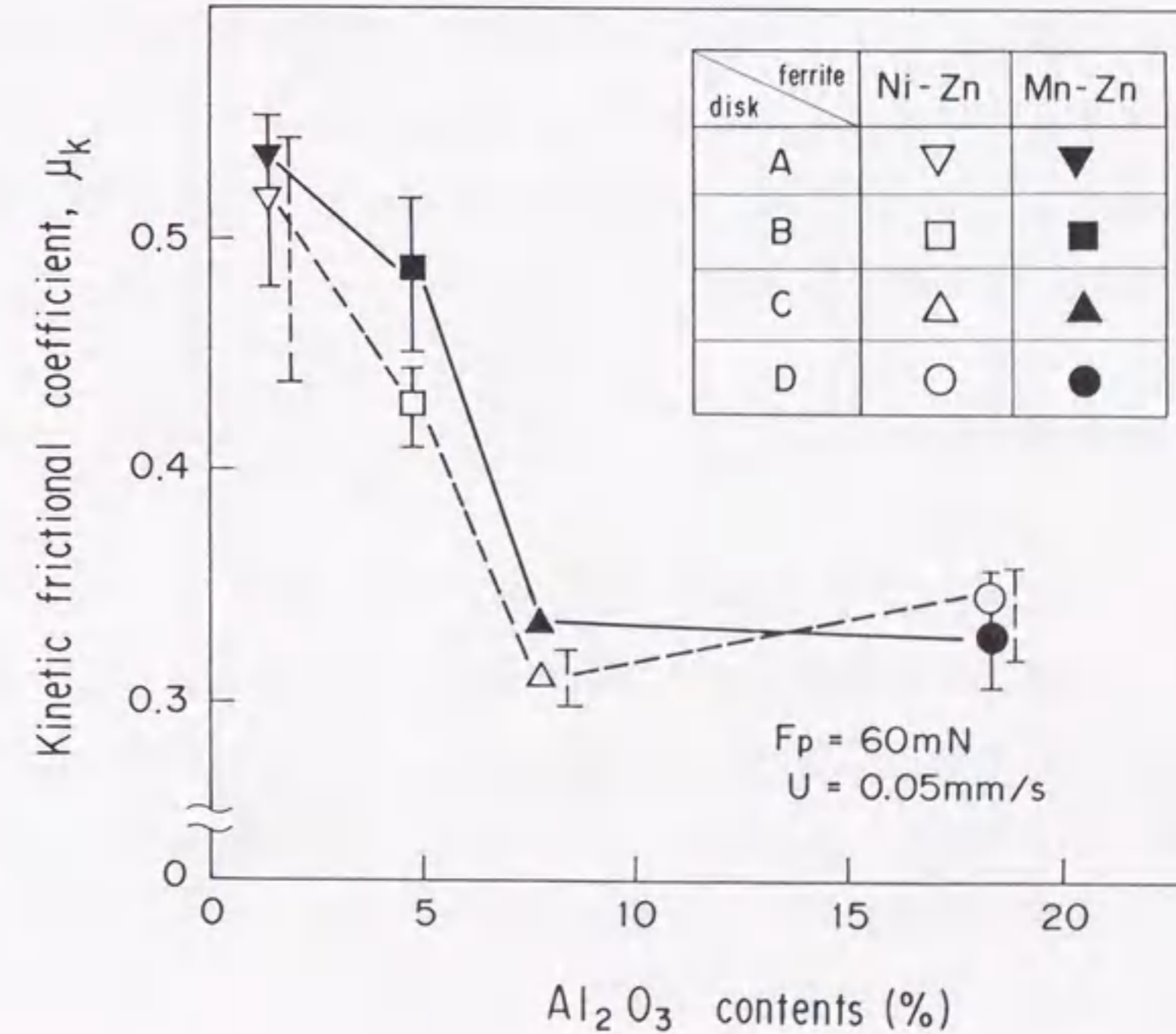


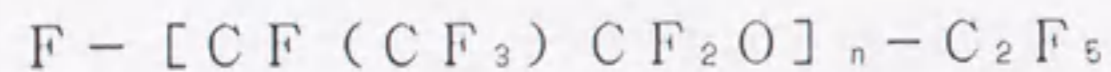
図5.8 フェライトとディスクの摩擦に及ぼすアルミナ量の影響

低アルミナ含有率の領域において、アルミナが増えるにつれて μ_k が急減する原因は、前述の摩耗試験の場合と同様に、アルミナが増えることによって、フェライト試験片とディスクの凝着力が減少するためと考えられる。

5. 4 表面潤滑剤の影響

5. 4. 1 供試ディスク

試験には、317MB磁気ディスク装置用の356mm径の塗布形ディスク($R_a=0.05\mu\text{m}$)を用いた。表面潤滑剤としては以下の分子構造



を持つフロロカーボン系の液体潤滑剤を用いた。その主要な性質を表5.3に示す。

ディスクへの塗布は、ディスクを回転させながら潤滑剤を含浸させた不織布を押しつけるワイブ法と呼ばれる方法で行い、さらに120~140°Cで2~4時間の熱処理を行うことによって均一な潤滑膜を形成することとした。潤滑剤の塗布量は最小目盛0.1mgの直示天秤で測定した。

5. 4. 2 摩耗特性

図5.9に、押付力 $F_p=60\text{mN}$ 、走行速度 $U=3\text{m/s}$ におけるNi-Znフェライトピンの摩耗推移曲線を潤滑剤塗布量をパラメータとして示す。なおここでは潤滑剤塗布量を単位面積当りの重量で示す。またこの図中には比較のため、無潤滑ディスクによる摩耗推移曲線⁽³¹⁾も示した。いずれの場合にも摩耗距離Lが約1kmの時点で初期摩耗から定常摩耗への遷移がみられる。しかし無潤滑の場合と潤滑剤を塗布した場合を比較すると、摩耗量の絶対値およびその増加の割合(摩耗率)とも潤滑下の方が格段に小さい。

図5.10に、定常摩耗時の摩耗率 w_p と潤滑剤塗布量Qの関係を示す。この結

表5.3 供試潤滑剤の性質

| | |
|-----------------------|----------------------------|
| <u>Viscosity</u> | |
| -18°C | 40,000 cSt |
| 20°C | 1,500 |
| 99°C | 30 |
| <u>Vapor pressure</u> | |
| 20°C | 9.9×10^{-15} Torr |
| 50°C | 1.4×10^{-11} |
| 80°C | 8.5×10^{-10} |
| <u>Density (24°C)</u> | 1.91 g/ml |

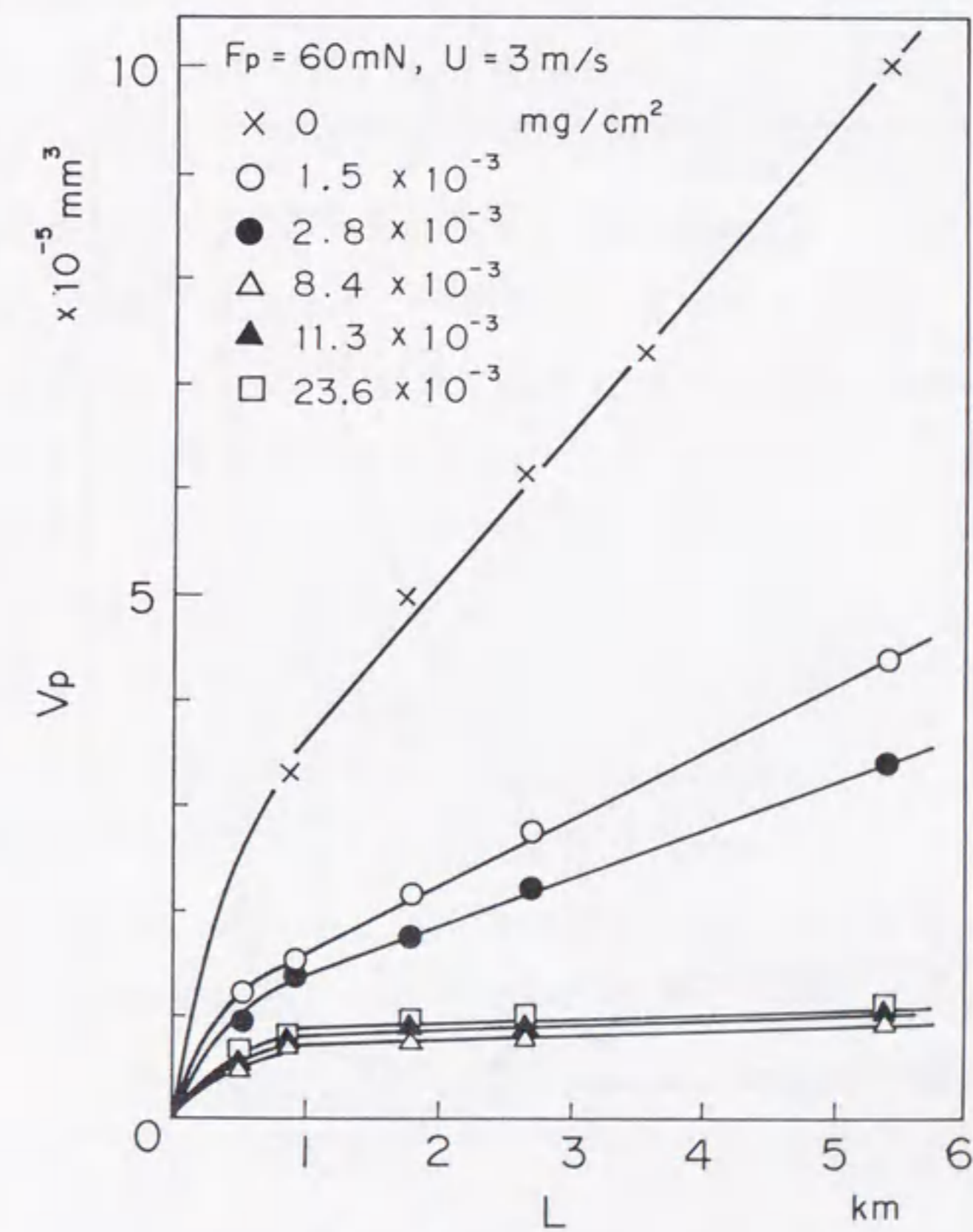


図5.9 摩耗推移曲線

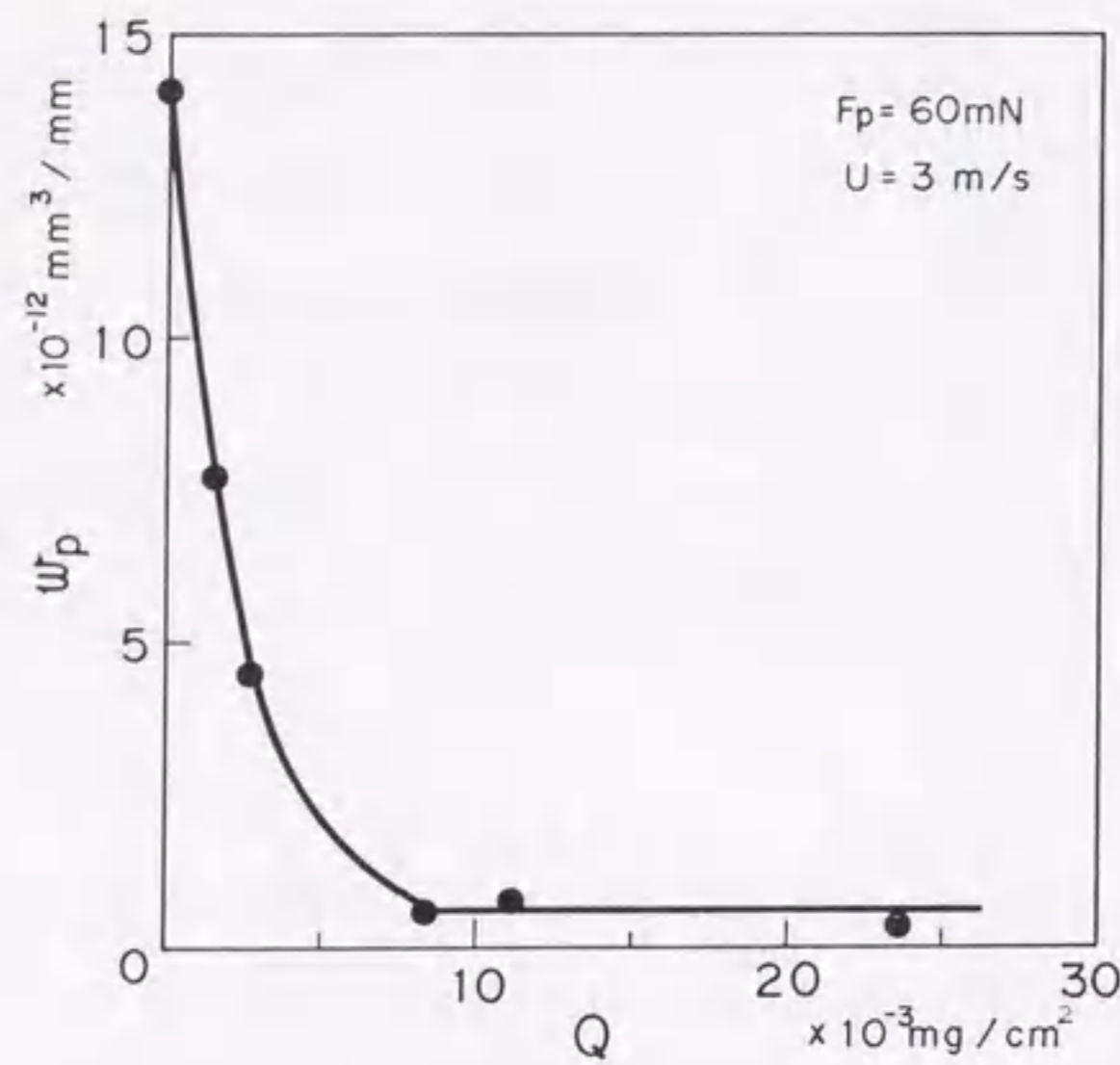


図5. 10 Ni-Znフェライトの摩耗率に及ぼす潤滑剤塗布量の影響

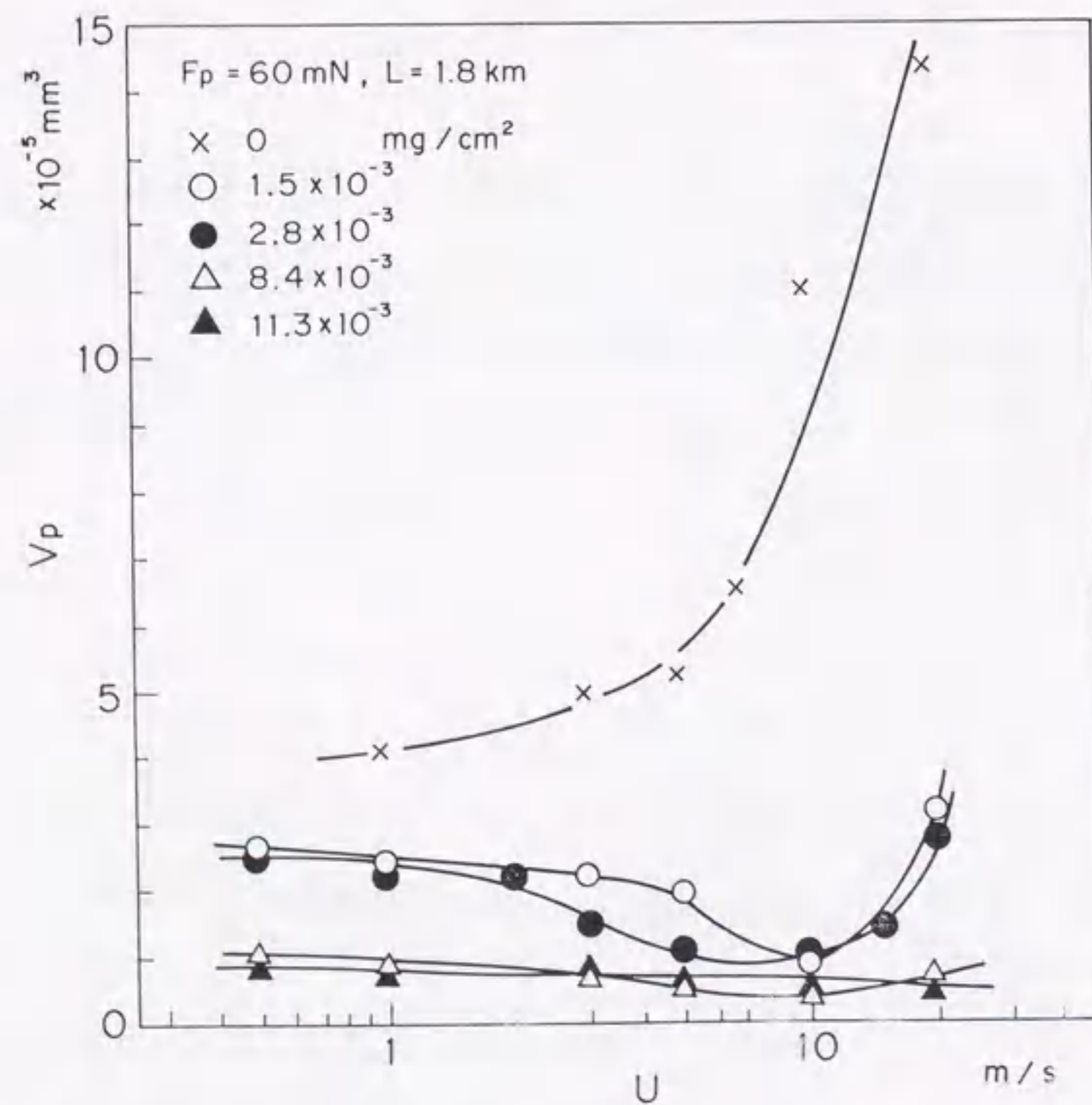


図5. 11 Ni-Znフェライトの摩耗率に及ぼす速度の影響

果から、微量な潤滑剤が塗布されるだけで摩耗率が急激に下ること、また潤滑剤の塗布量が多くなると摩耗率がほぼ一定の値になることがわかる。なおその時の摩耗率は無潤滑時の1/20以下である。

図5. 11に、フェライトピンの摩耗に及ぼす速度の影響を潤滑剤の塗布量をパラメータとして示す。ここでは摩耗距離 $L=1.8$ kmの摩耗量で比較している。無潤滑時には速度が増すにつれて摩耗量が急増するのに対し、 $1.1.3 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ の潤滑剤を塗布した場合には速度が上るにつれて摩耗量の減少がみられる。これは速度とともに流体潤滑的な効果が増すためと考えられる。また潤滑剤量が少ない場合には 10 m/s 程度までは摩耗量は減少していくが、それより高速の領域では摩耗量が増加していく傾向がみられる。潤滑剤が少ない場合の高速域における摩耗の原因としては、高速接触走行時の摩耗熱によって潤滑剤の粘度低下が起こり、潤滑膜が破れ易くなること等が考えられる。

図5. 12は、 $U=10 \text{ m/s}$ におけるフェライトの摩耗推移曲線を潤滑剤の塗布量をパラメータとして示したものである。比較のため図5. 13に同一条件における無潤滑時の摩耗推移曲線を示す。塗布量が 2.8×10^{-3} 、 $8.4 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ の場合には $L=2 \text{ km}$ で定常摩耗へ移行しているのに対し、 $1.5 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ の場合には摩耗量の絶対値にはかなりの開きはあるものの、無潤滑時と同様に初期摩耗が続いており、潤滑剤としての効果が薄れていることがわかる。

図5. 14、図5. 15に $F_p=60 \text{ mN}$ 、 $U=10 \text{ m/s}$ で 5.4 km 接触走行させた時のフェライトピンの摩耗痕とディスク摩耗トラックの顕微鏡写真を示す。図5. 15には摩耗トラックの表面あらさ曲線も示す。顕微鏡写真からは潤滑剤の塗布量が少ないとフェライトの摩耗量が増えるだけでなく、ディスクも損傷することがわかる。 5.4 km 程度の摩耗距離では、摩耗トラックの損傷は表面あらさ曲線には顕著にあらわれていないが、さらに摩耗距離が増すにつれ損傷が進展していくと考えられる。

図5. 16に、押付力を変化させた時のフェライトの摩耗量を潤滑剤の塗布量をパラメータに示す。無潤滑時には押付力の増大に伴う摩耗量の急増がみられる。それに対し、潤滑剤が存在する場合には、その量が少ない場合でも摩耗量が飽和していく傾向を示す。これはここで用いた潤滑剤が押付力の増加に伴う摩耗量の

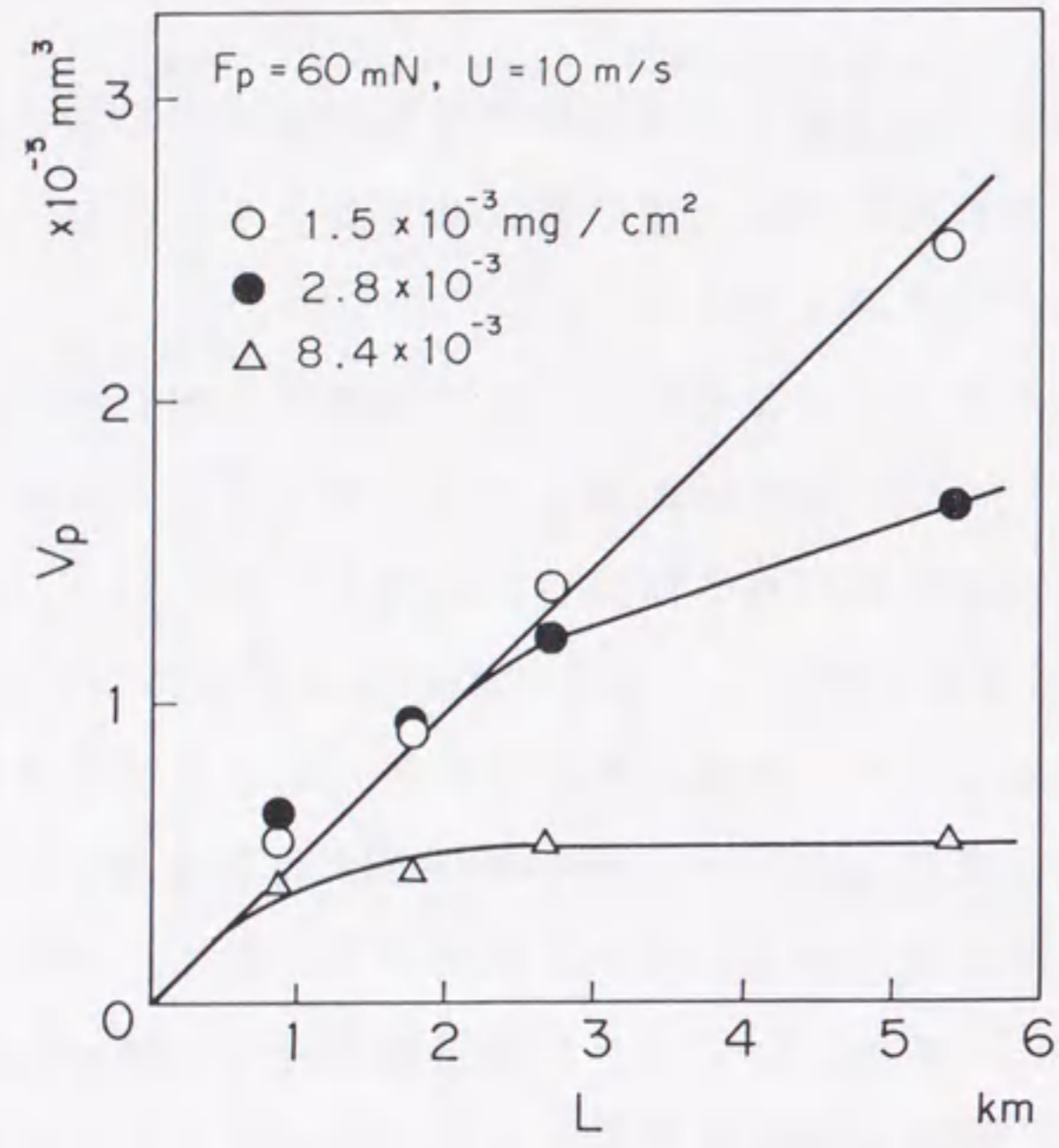


図5. 12 潤滑時のフェライトの摩耗推移曲線

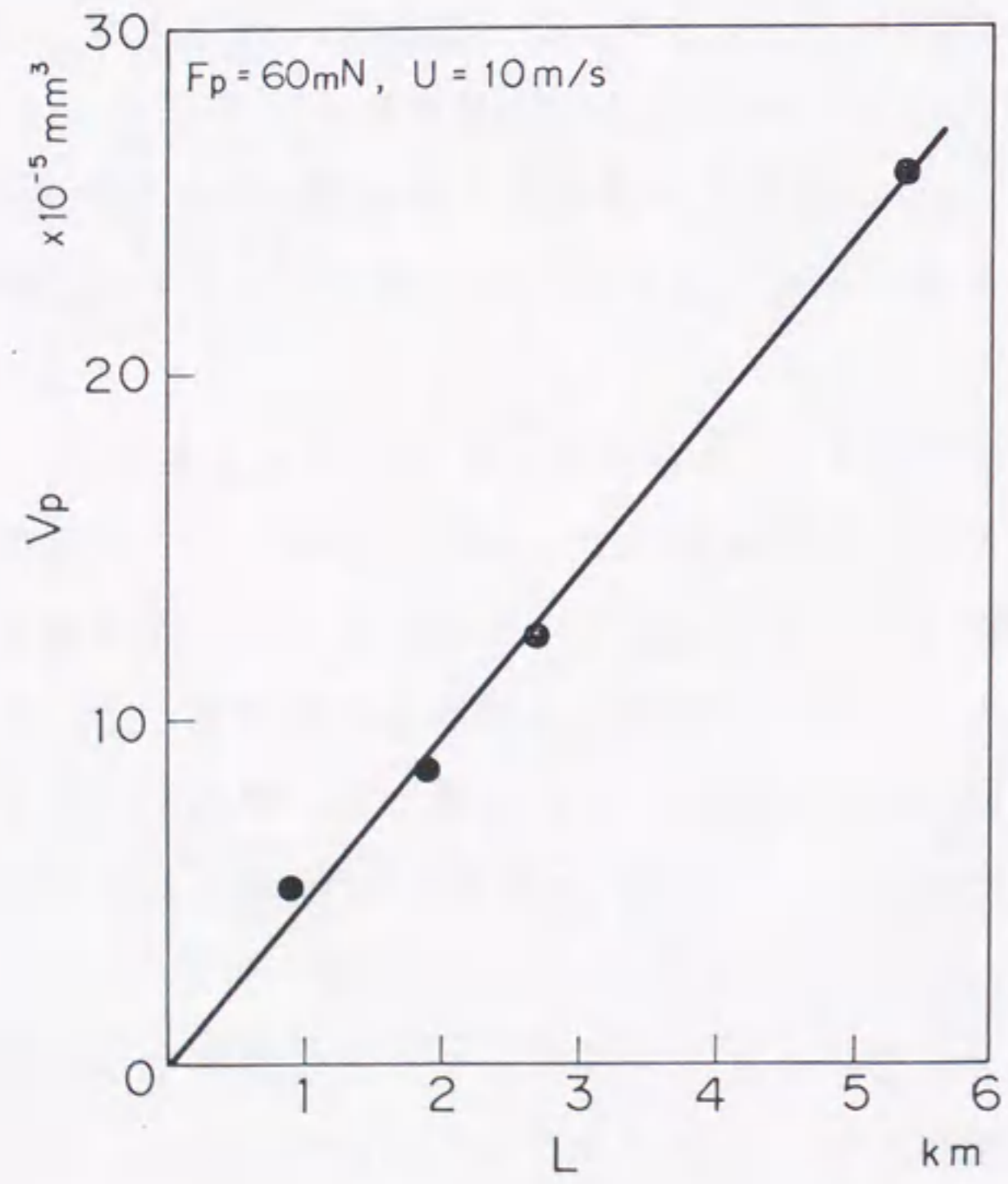
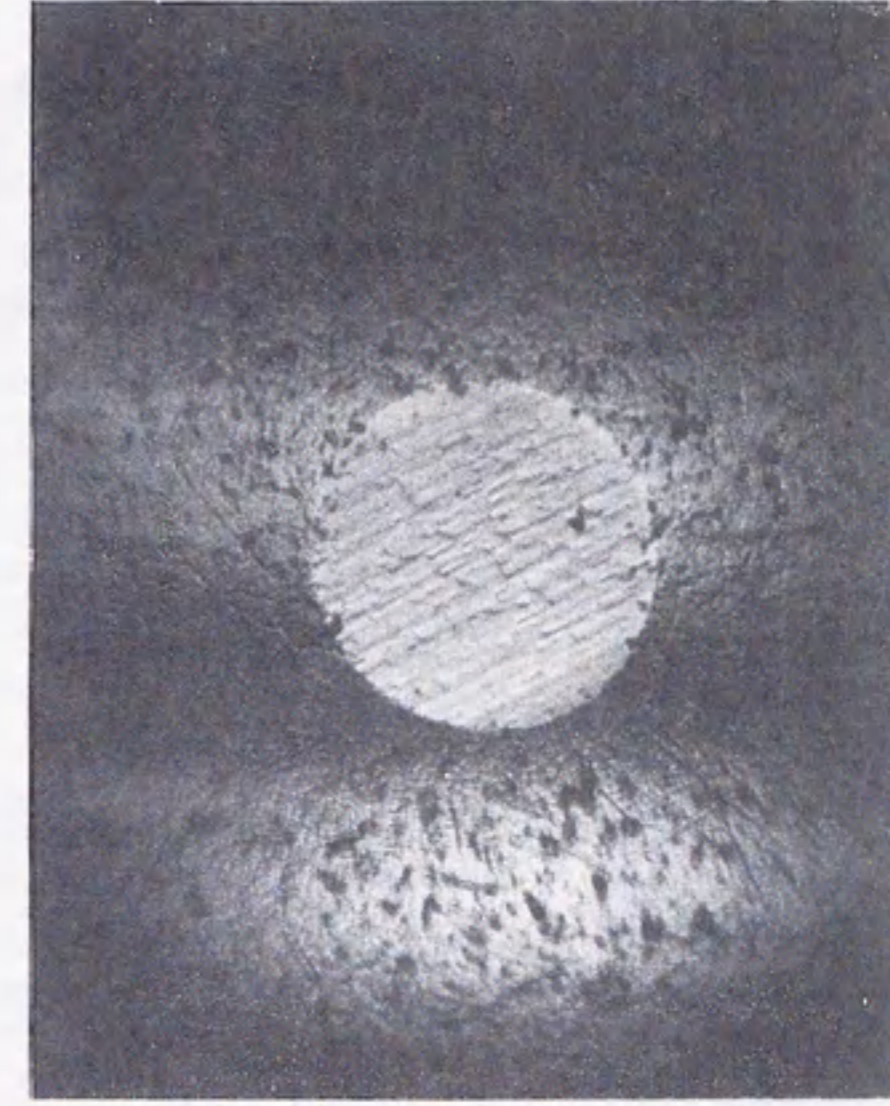
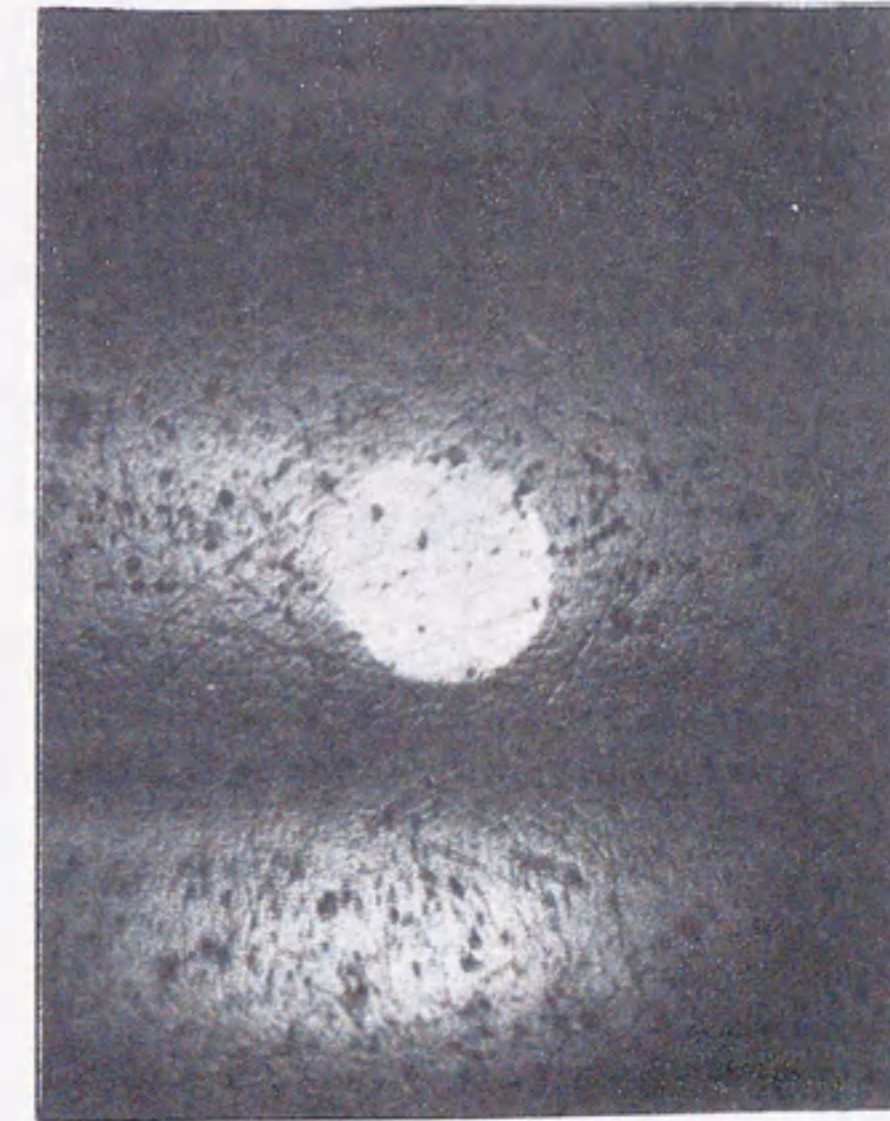


図5. 13 無潤滑時のフェライトの摩耗推移曲線

0.1mm



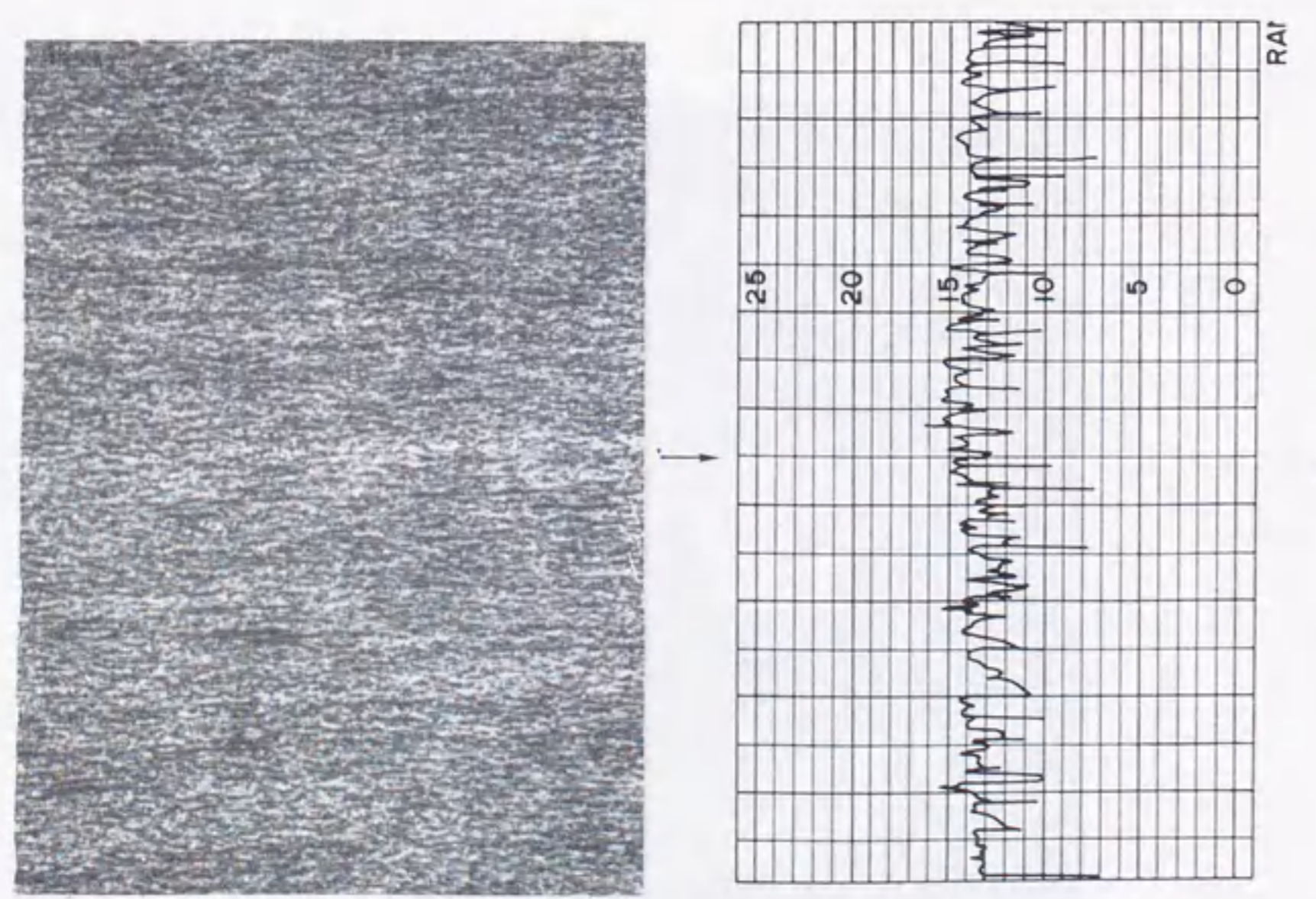
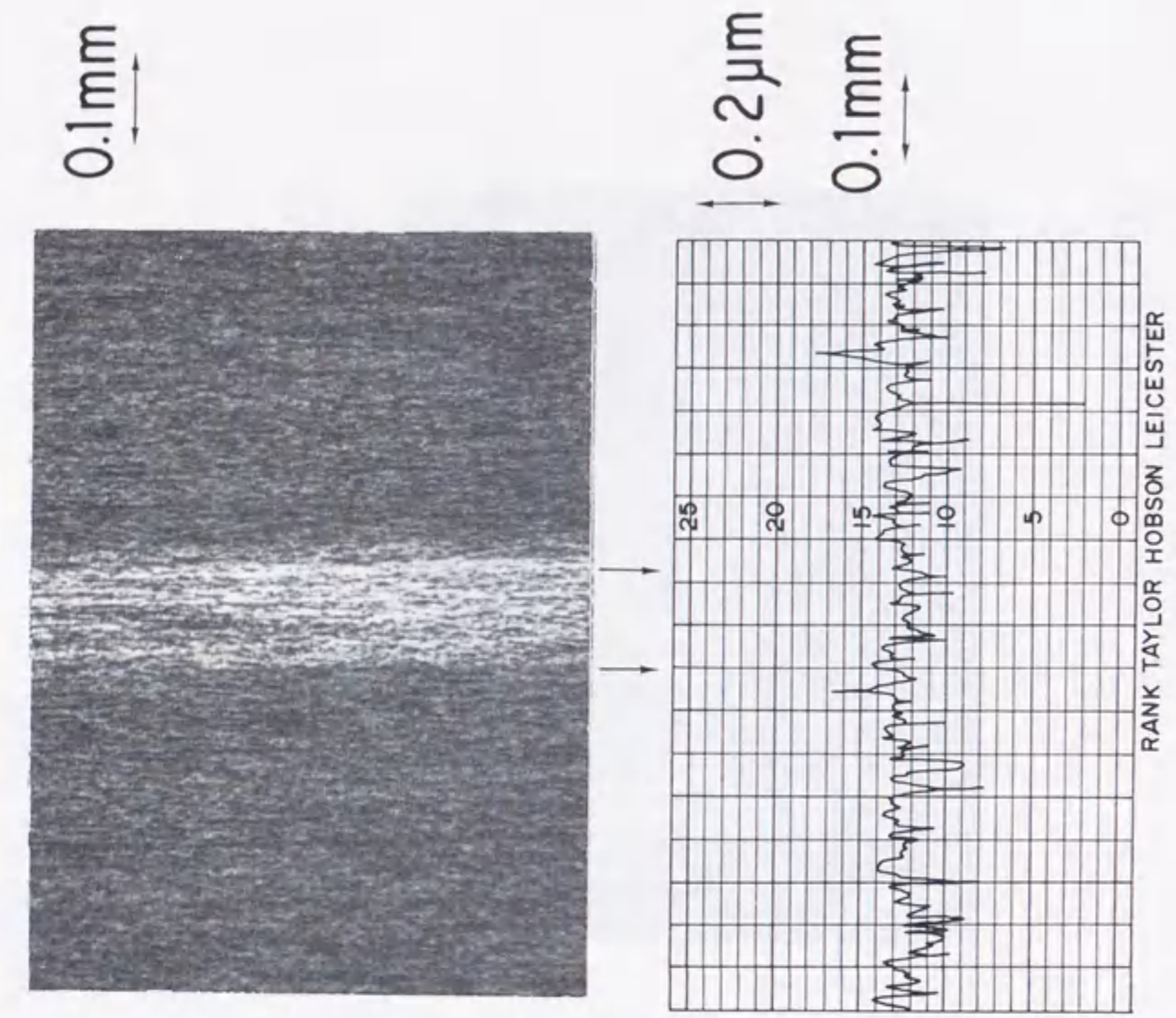
$1.5 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$



$8.4 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$

図5. 14 Ni-Znフェライトピン試験片の摩耗痕

($W = 60 \text{ mN}, U = 10 \text{ m/s}, L = 5.4 \text{ km}$)



$1.5 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$

$8.4 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$

図5. 15 ディスクの摩耗痕

($W = 60 \text{ mN}$, $U = 1.0 \text{ m/s}$, $L = 5.4 \text{ km}$)

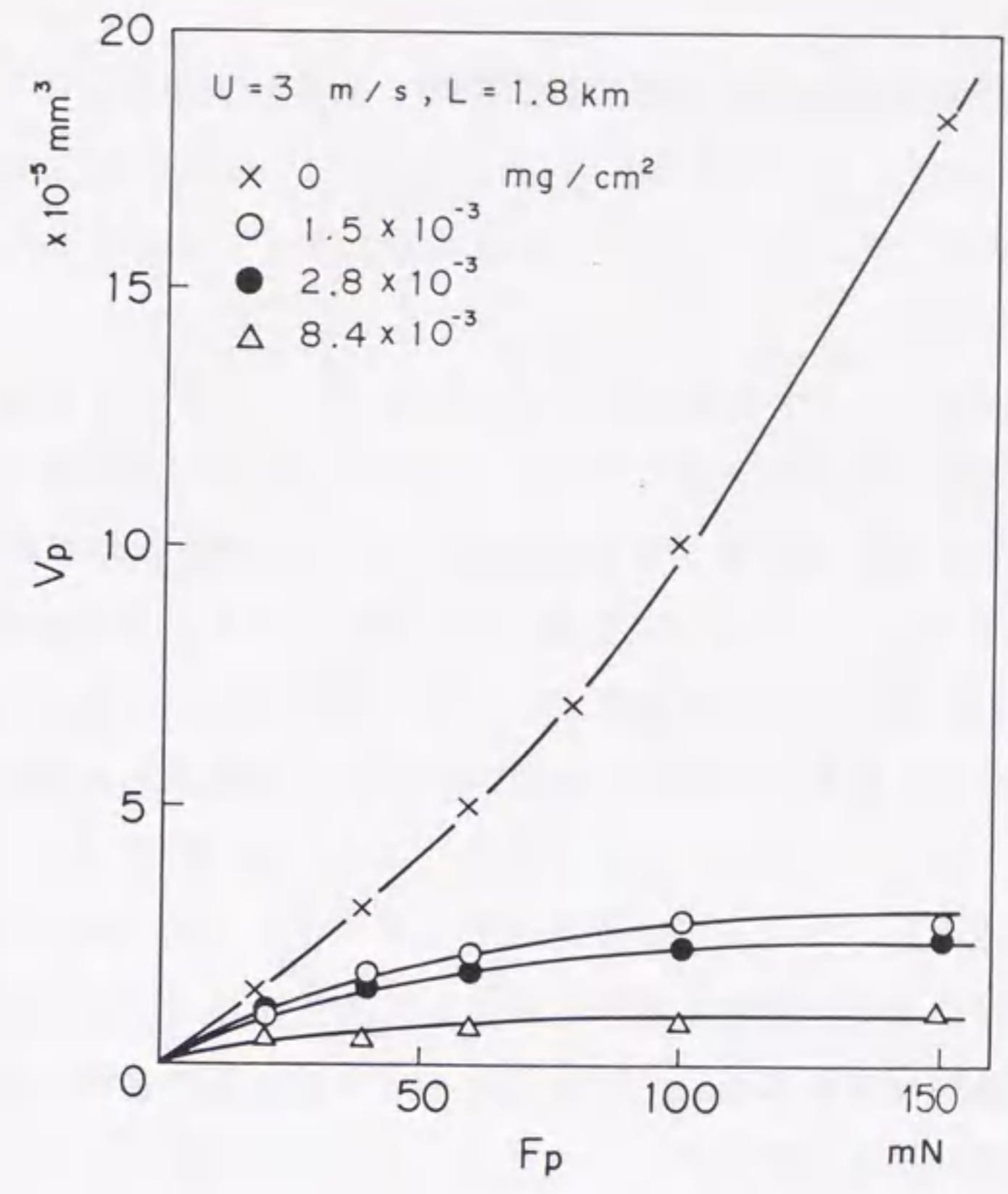


図5. 16 Ni-Znフェライトの摩耗量に及ぼす荷重の影響

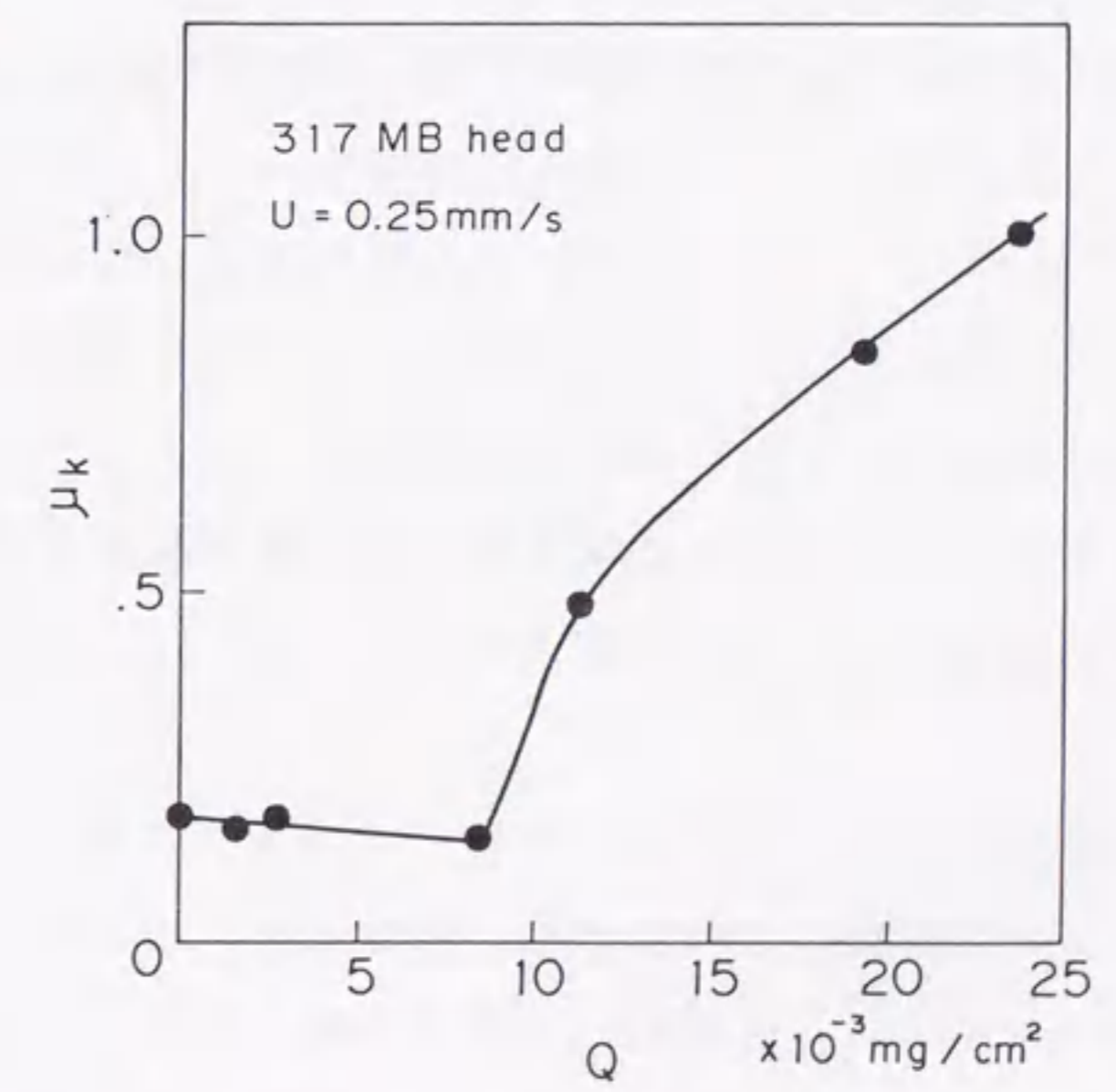


図5. 17 ヘッドとディスクの摩擦に及ぼす潤滑剤の影響

増大を抑圧する効果が高く、かつ高押付力下でも十分な潤滑性を持つことを示している。

5. 4. 3 摩擦特性

ディスク表面潤滑剤は摩擦だけでなく、ヘッド・ディスクの摩擦にも影響を与える。図5. 17に潤滑剤塗布量 Q と動摩擦係数 μ_k の関係を測定した結果を示す。ここでは317MB装置用のヘッド長5.6mmのCSS方式の浮動ヘッドを用いて実験を行った。潤滑剤の塗布量が $8.4 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ を越すと摩擦係数の急増がみられる。CSS方式のヘッドはジンバル効果をもつ薄い板ばねで支持されている。ヘッド・ディスクの摩擦係数が大きいと、CSS時に支持ばねが摩擦力によって変形し、ヘッドの不安定な浮上やディスクの損傷を引き起こし、ヘッドクラッシュに到る可能性が高い。特にヘッドをディスク上に長時間放置した場合、その危険性はさらに高まること、田子らによって指摘されている⁽²⁾。317MB装置用の塗布形磁気ディスクに関しては、ヘッドクラッシュにつながる危険を避けるために、動摩擦係数の上限を0.2とすることが、ISOの規格で定められており、塗布量と摩擦係数の関係を考慮すると、ここで用いた潤滑剤の場合 $8.4 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ が摩擦という観点からの塗布量の上限であることがわかる。

5. 5 結論

磁性塗膜中に含まれるアルミナ量が異なるディスクと浮動ヘッド材であるフェライトの摩擦・摩擦試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) アルミナの混合によってフェライトとディスクの摩擦形態は凝着摩擦からアブレッシブ摩擦へと移行する。その結果、フェライトの摩擦は増加するものの、ディスクの摩擦・損傷は大幅に軽減される。
- (2) Ni-ZnフェライトとMn-Znフェライトでは、硬いNi-Znフェライトの方が摩擦しにくい。特にアルミナ量の少ないディスクでは、

$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁性粉との硬度差のため摩擦がほとんど生じない。

- (3) 7.8%以下の低アルミナ含有率の領域では、アルミナ量が増すにつれディスクとフェライトの凝着力の低下が起こり、動摩擦係数が減少する。
- (4) 凝着によるディスクの摩擦・損傷を防止するためには、一定量のアルミナの混合が必要である。しかし過剰なアルミナの混合はフェライトの摩擦量の増大をまねく。ここで用いたディスクとフェライトの場合には、8%前後のアルミナ含有率が望ましい。

また、フェライトの摩擦に及ぼす潤滑剤の影響について以下のことを明らかにした。

- (5) 潤滑剤の摩擦低減効果はきわめて高い。特に $W=60 \text{ mN}$ 、 $U=3 \text{ m/s}$ の条件下では $8.4 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ 以上の潤滑剤を塗布すれば、摩擦率を無潤滑時の $1/20$ 以下にすることも可能である。
- (6) 摩擦量の速度依存性は潤滑剤の有無によって全く異なる。特に $11.3 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ の塗布量の場合には 20 m/s の速度まで速度の増加につれて摩擦量が減少する。これより少ない塗布量であっても、この潤滑剤は 10 m/s 程度の速度までは良好な潤滑性を示し、ヘッド摩擦・ディスク損傷の軽減がはかられる。
- (7) 潤滑剤の塗布によって押付力の増加による摩擦量急増を防止できる。また、ここで用いた潤滑剤は高押付力下でも十分な潤滑性を示す。
- (8) 摩擦を考慮した上での潤滑剤量の上限は $8.4 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ である。

第6章 薄膜ディスクの強度と 耐久性に及ぼす基板の影響⁽⁴⁶⁾

6.1 緒言

高密度記録用の磁気ディスクとしてスパッタ法やめっき法で薄く均一な磁性膜を形成した薄膜形磁気ディスクが注目を集めている⁽⁴⁷⁾。図6.1に代表的な薄膜形磁気ディスクの断面構造を従来の塗布形磁気ディスクのそれと比較して示す⁽⁴⁸⁾。 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の磁性粒子を高分子バインダ中に分散した磁性塗料を $1\mu\text{m}$ 程度の膜厚でスピコートした塗布形磁気ディスクに対し、めっき形の薄膜ディスクはアルミニウム合金下地表面に硬質めっきを施した基板上に金属磁性膜をめっき法で形成し、さらに防錆のための保護膜を持つ構造である。スパッタ形の薄膜ディスクはアルミニウム合金下地の表面を陽極酸化したアルマイト基板上に $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ を $\text{Ar} + \text{O}_2$ 雰囲気中の反応スパッタ法で形成した構造となっている。めっき形、スパッタ形とも塗布形ディスクに比べその磁性膜厚がかなり薄いことに加え、磁性膜中に塗布形ディスクにおけるようなアルミナ微粒子のような補強材を持たないため、基板や保護膜まで含めた構造を最適化することが、ヘッドクラッシュ等に対する信頼性の高い薄膜ディスクを実現する上での重要な課題となる。

本章では、スパッタ形の薄膜ディスクに用いられるアルマイト基板のアルマイトの膜厚がディスクの強度と耐久性に及ぼす影響をダイヤモンド圧子を用いた引っかかり試験とピン・ディスク形の摩耗試験で調べた結果について述べる。

6.2 実験方法

6.2.1 試料

試料としては、アルマイト膜厚をパラメータとした直径 210mm 、厚さ 1.9mm のアルマイト基板上に $0.17\mu\text{m}$ の膜厚の $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁性膜を形成したもの(以下、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 試料と呼ぶ)と、磁性膜を形成しない基板だけのもの

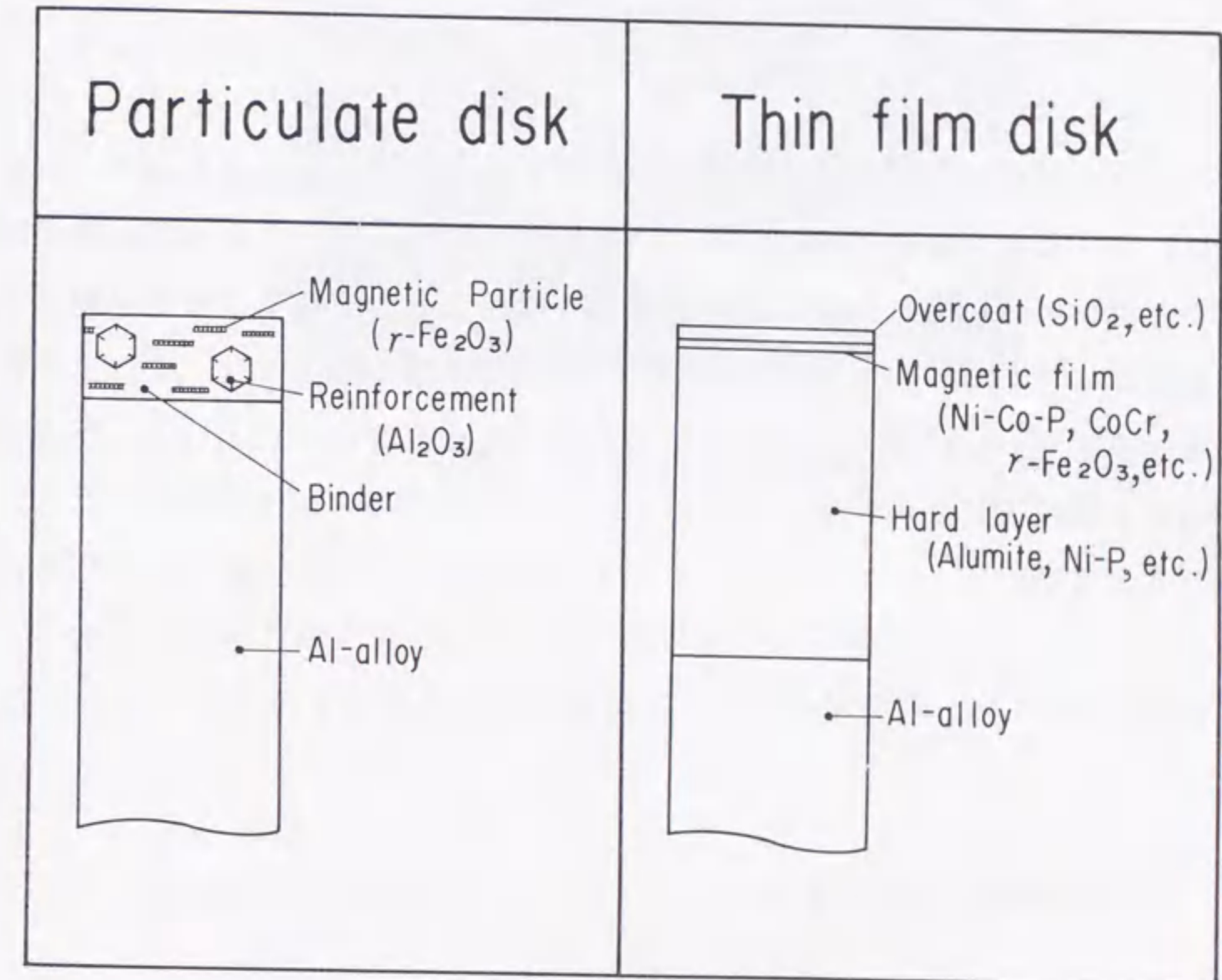


図6.1 磁気ディスクの構造

の(以下、アルマイト試料と呼ぶ)を用意した。アルマイト層は、不純物元素量 0.008 at% の Al-Mg 合金下地の表面を 5% CrO₃ 溶液中で陽極酸化して形成した⁽⁴⁹⁾。膜厚は、2 μm、5 μm、8 μm、10 μm、20 μm のものと、アルマイト層を形成しない 0 μm のものの計 6 種類である。なお、2 種類の試料とも、表面は中心線平均あらさ R_a が 0.01 μm の平滑さに仕上げている。

6.2.2 引っかき試験

図 6.2 に本試験に用いた引っかき試験機の外観と主要部の構成を示す。この試験機は、圧子に微小な荷重を精度良く印加するためのトーンアーム形の荷重機構、圧子と試料のスムーズな相対運動を実現する静圧形空気軸受けの直線案内とそれを駆動する DC モータで構成される。荷重荷重機構の感度は 0.1 mN であり、先端曲率 20 μm のダイヤモンド圧子とその先に取り付けられている。試料は直線案内の上面に固定され、0.13 mm/s の速度で引っかき試験を行なう。

図 6.3 は先端曲率 r のダイヤモンド圧子が荷重 W でディスク試料にくい込んでいるときの幾何学的な関係を示すものである。ダイヤモンド圧子による引っかき深さを d_s とすると、荷重 W を支える接触部分の投影面積 A は、以下の式で表わされる。

$$A = \pi(2rd_s - d_s^2) / 2 \quad (6.1)$$

ここで、 d_s が r に比べ、無視できるオーダーであれば、式 (6.1) は、次のように書き直される。

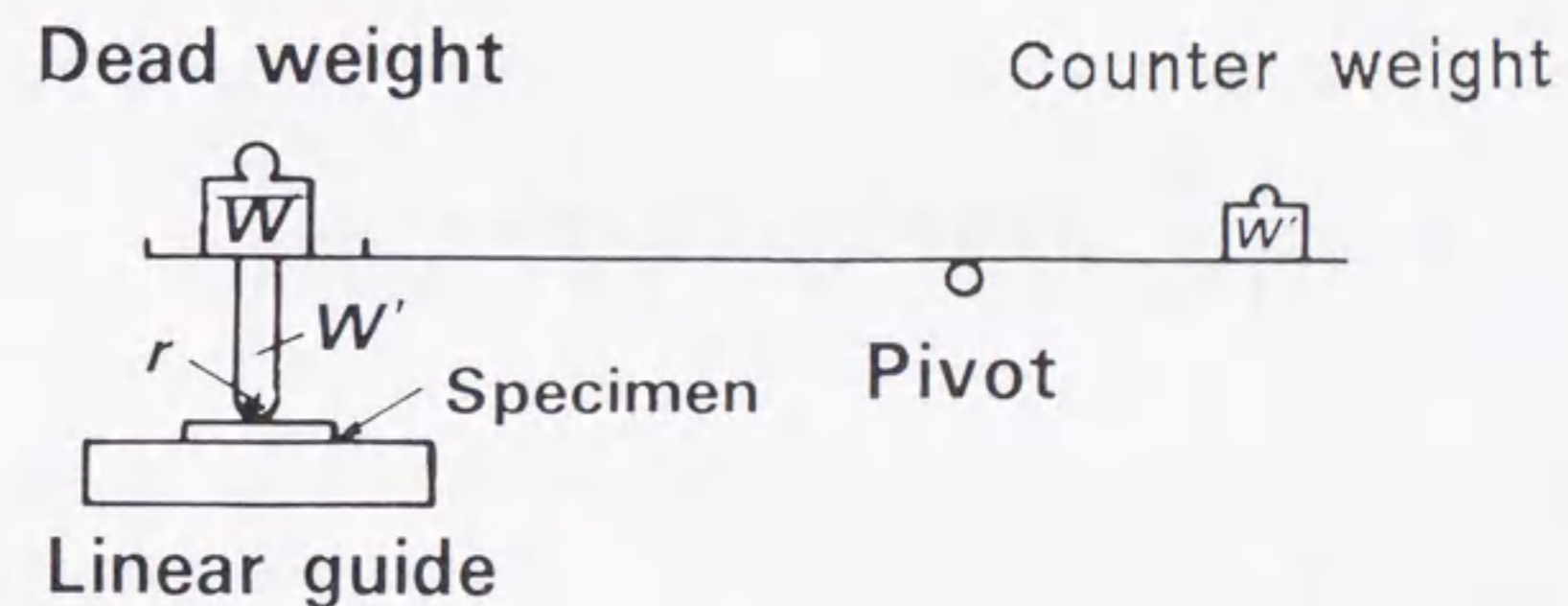
$$A = \pi rd_s \quad (6.2)$$

したがって、荷重を接触部の投影面積で除したものとして定義される引っかき硬度 H は次式で表される。

$$H = W / A = W / (\pi rd_s) \quad (6.3)$$



(a) Over view



(b) Arrangement of parts

図 6.2 引っかき試験機

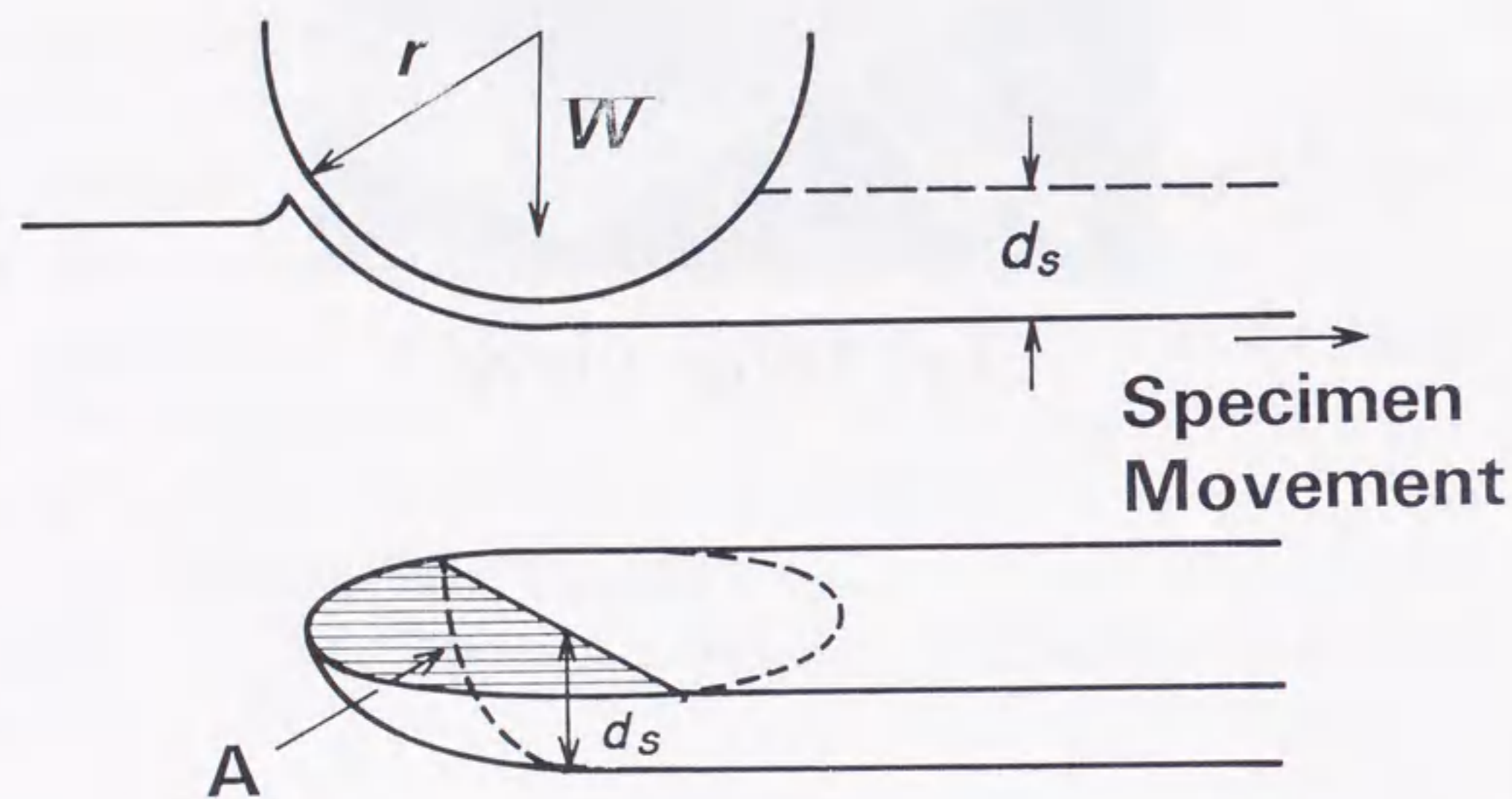


図6.3 引っかかり時の圧子と試料の幾何学的関係

均一な材料の場合、圧子への印加荷重 W を変化させながらその時の引っかかり深さ d_s を測定した時の W と d_s の関係は直線となり、その直線の傾きを式(8.3)に代入すれば、その材料の引っかかり硬度が求まる。Ahnら⁽⁵⁰⁾は、積層構造の多層膜について W を変化させながら d_s を測定すれば、各層の硬度に対応した傾きを持つ直線をつないだような測定結果が得られると主張しているが、後述するように、実際には各層の変形の影響が現われるため、第2層以下の膜についての W と d_s の測定値は彼らの主張どおりにはならないようである。

なお、測定は1荷重あたり3回づつ行ない、その平均をとった。また、引っかかり深さの測定には触針式の表面あらさ計を使用した。

6.2.3 摩耗試験

スパッタ形の薄膜ディスクの耐久性の評価には、第3章でも用いたピン・ディスク形の摩耗試験機を用いた。ピンとしては直径2.29mmのMn-Znフェライトの球状ピンを使用した。すべての摩耗試験はディスクとピンの相対速度1m/sの条件で荷重をパラメータとして行なった。ディスクの耐久性は1000回の接触走行回転後の摩耗深さで評価した。なお、ディスクの耐久性および引っかかり硬度の測定とも温度25℃、相対湿度50%の条件下で行なった。

6.3 実験結果および考察

6.3.1 引っかかり硬度に及ぼすアルマイト膜厚の影響

図6.4に、アルマイト膜厚 δ が2 μ m、5 μ m、20 μ mのアルマイト試料について印加荷重 $W=50$ mN, 100 mN, 150 mN, 200 mNで引っかかり試験を行った後の断面写真を示す。 $\delta=20$ μ mの試料の場合、 W の増加に伴って引っかかり痕の大きさも大きくなっているが、 $W=200$ mNの荷重でさえ変形はアルマイト層にとどまっておき、下地のAl-Mg合金には及んでいない。これに対して、 $\delta=5$ μ mの試料の場合には、50 mN、100 mNの荷重ではアルマイト層のみの変形しか認められないが、150 mNおよび200 mNの印

加荷重になるとAl-Mg下地層の塑性変形が起こっている。 $\delta = 2 \mu\text{m}$ の試料の場合には、 $W = 50 \text{ mN}$ の荷重でさえAl-Mg下地にまで及ぶ塑性変形が起こっていることがわかる。

図6. 5にアルマイト膜厚 δ の異なる6種類のアルマイト基板について、印加荷重 W とその時の引っかき深さ d_s の関係を測定した結果を示す。 $\delta = 0 \mu\text{m}$ 、すなわちアルマイト層が形成されていない均一なAl-Mg合金の試料では、 W の増加とともに d_s が直線的に急増しており、この直線の傾きがAl-Mg合金の引っかき硬度に対応していると考えられる。 $\delta = 2 \mu\text{m}$ の試料の場合には、 $W = 70 \text{ mN}$ 付近に折れ点が存在し、折れ点以上の荷重では $\delta = 0 \mu\text{m}$ の測定結果とほぼ同じ傾きを持ち、それ以下の荷重では多少緩やかな勾配を持つ2本の直線で表されるような W と d_s の関係が得られている。Ahnらの主張に従えば、 $W = 70 \text{ mN}$ 以下の領域における直線の傾きが $2 \mu\text{m}$ 厚のアルマイトの引っかき硬度に対応することになるが、図6. 4に示した $\delta = 2 \mu\text{m}$ の場合の断面写真を見ても明らかなように、 $W = 70 \text{ mN}$ 以下の領域においてもアルマイト層だけでなくAl-Mg合金下地が塑性変形を起こしており、この直線が $2 \mu\text{m}$ 厚のアルマイトそのものの引っかき硬度に対応しているとはいえない。

$\delta = 5 \mu\text{m}$ 、 $8 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 厚のアルマイト試料でも、 $W = 110 \text{ mN}$ 、 160 mN 、 190 mN 付近に折れ点が存在している。この折れ点以下の荷重領域における直線の傾きは、 $\delta = 0 \mu\text{m}$ および $2 \mu\text{m}$ のアルマイト試料のそれに比べかなり緩やか、すなわち引っかき硬度としては高い値を示すものになっている。図6. 4の $\delta = 5 \mu\text{m}$ の試料の断面写真において $W = 100 \text{ mN}$ では変形がアルマイト層のみにとどまり、 $W = 150 \text{ mN}$ になると変形がAl-Mg合金下地に達していることと上記の測定結果を考え合わせると、これらの測定結果における折れ点以下の直線の傾きはそれぞれの膜厚のアルマイトの引っかき硬度に対応していることがわかる。

$\delta = 20 \mu\text{m}$ のアルマイト試料の場合、ここでの測定範囲内には折れ点がなく W と d_s の関係は一本の直線で表されている。この直線の傾きが $20 \mu\text{m}$ 厚のアルマイトの引っかき硬度に対応することは、図6. 4の断面の観察結果からも明らかであるが、その傾きは $\delta = 5 \mu\text{m}$ 、 $8 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 厚のアルマイト試料のそれよりも多少急で、 $\delta = 20 \mu\text{m}$ の試料では引っかき硬度が低下していることがわ

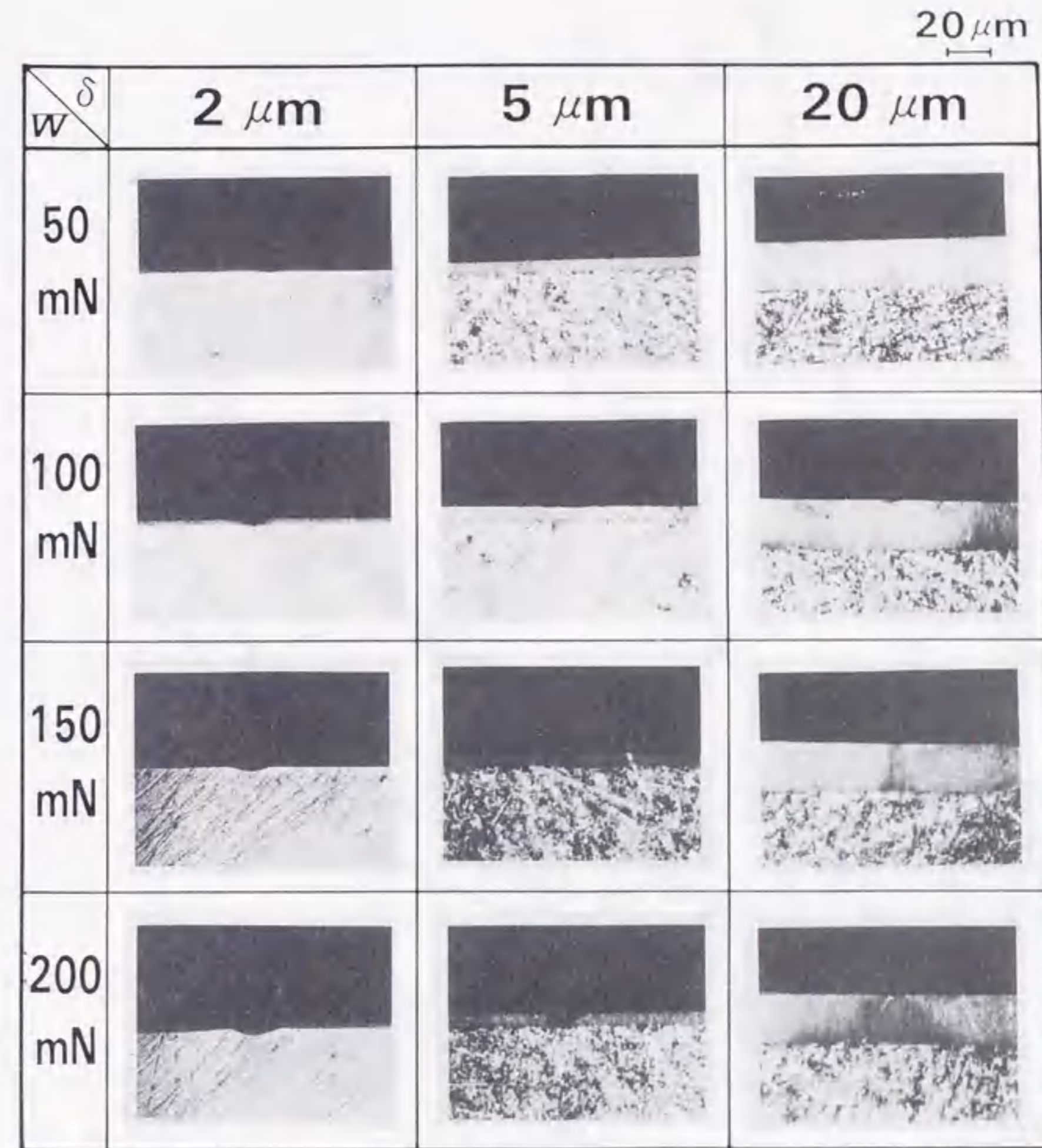


図6. 4 アルマイト試料の引っかき痕の断面観察結果

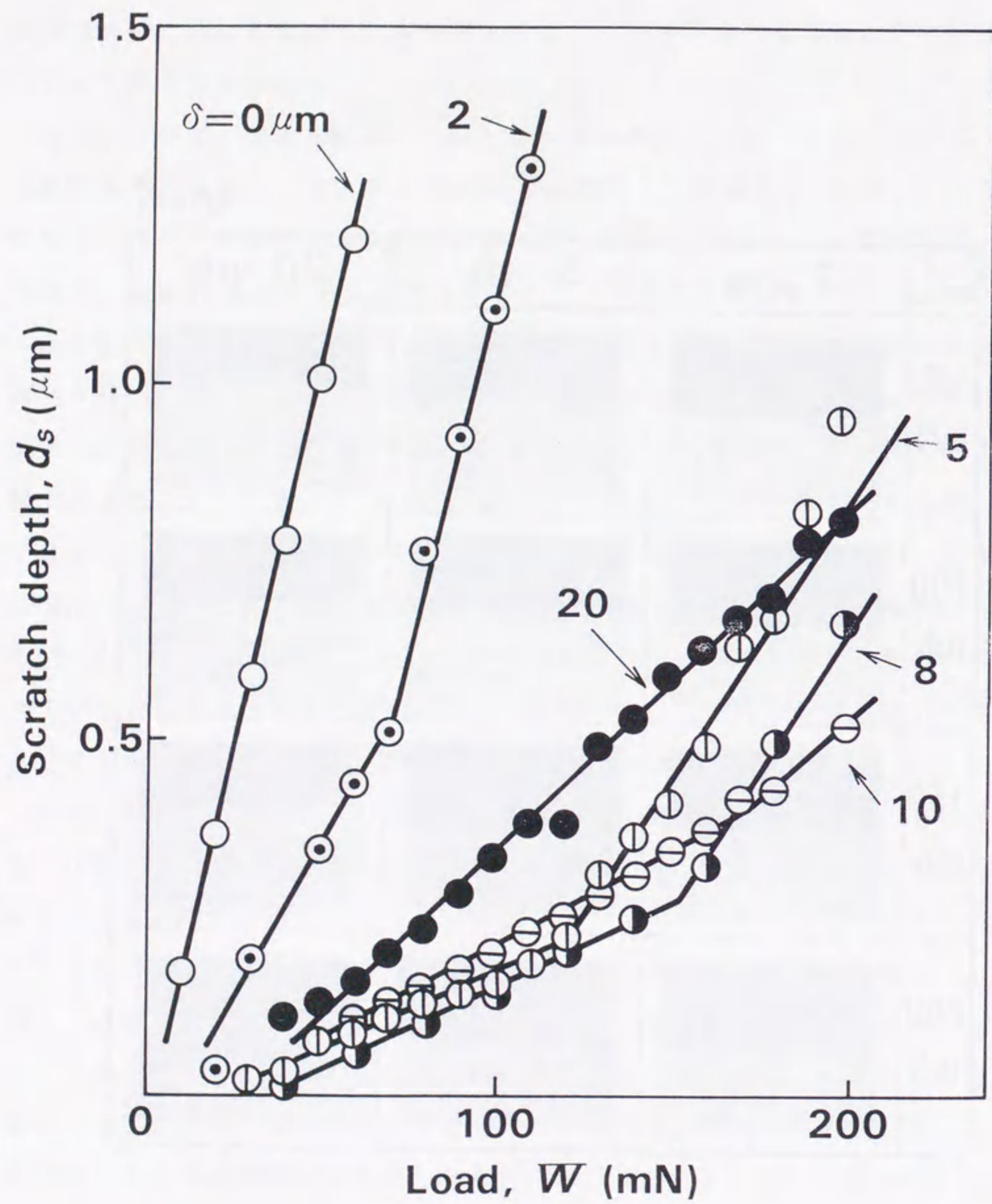


図6. 5 印加荷重と引っかき深さの関係 (アルマイト試料)

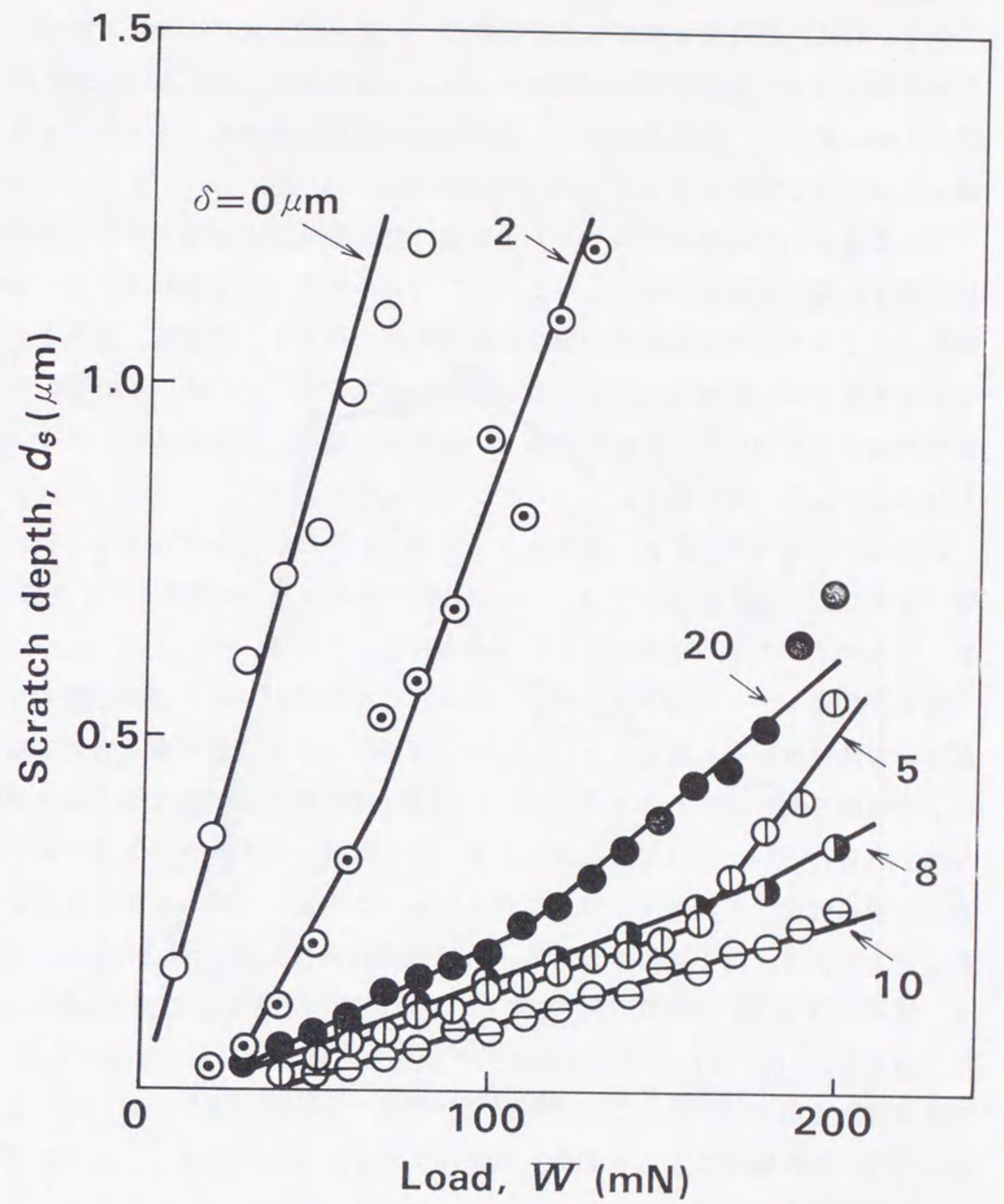


図6. 6 印加荷重と引っかき深さの関係 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 試料)

かる。

図6. 6に、磁性膜を形成した6種類の $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 試料について同様の引っかかり試験を行った結果を示す。 $\delta = 0\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ のアルマイト上に磁性膜を形成した $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 試料の場合、その測定結果は磁性膜がないアルマイト試料の場合とほとんど同じような W と d_s の関係になっている。

$\delta = 5\ \mu\text{m}$ 、 $8\ \mu\text{m}$ のアルマイト上に磁性膜を形成した試料では、磁性膜がないときと同様に折れ点が認められるが、折れ点の荷重はそれぞれ $170\ \text{mN}$ 、 $190\ \text{mN}$ と、アルマイトだけの場合に比べて高い値となっており、 δ が $10\ \mu\text{m}$ になるとこの測定範囲内には折れ点が認められなくなっている。折れ点より低い荷重領域での直線の傾きを比較すると、磁性膜を形成した試料の方がアルマイトだけの場合よりも多少緩やかになっていることがわかる。

$\delta = 20\ \mu\text{m}$ の場合には、アルマイトだけの場合には見られなかった折れ点が $W = 110\ \text{mN}$ 付近に現れており、折れ点以下の W と d_s の関係を示す直線の傾きも、アルマイトだけの場合に比べて緩やかになっている。

図6. 7に、アルマイト試料と $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 試料の引っかかり硬度とアルマイト膜厚 δ の関係を示す。ここでは、上記の二つの引っかかり試験結果における折れ点以下の直線の傾きがアルマイトと $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁性膜の実効的な引っかかり硬度に対応するものとし、その逆数を式(6. 3)に代入することにより計算した。Al-Mg合金(アルマイト試料の $\delta = 0\ \mu\text{m}$ に対応)の引っかかり硬度は $0.85\ \text{GPa}$ であり、この試料のビッカース硬度に対応した値となっている。アルマイト試料の引っかかり硬度 H_a はアルマイト膜厚の増加とともに急激に上昇し、 $\delta = 5\ \mu\text{m}$ で $H_a = 9.1\ \text{GPa}$ に達する。アルマイト膜厚が $5\ \mu\text{m}$ を越すと引っかかり硬度は低下を始め、 $\delta = 20\ \mu\text{m}$ では $3.5\ \text{GPa}$ 程度にまで下がっている。吉原⁽⁵¹⁾は、陽極酸化によって形成したアルマイト膜を断面研磨した試料を用意して、断面の様々な場所におけるビッカース硬度を測定し、アルマイト層とAl合金下地の界面からの距離が遠くなるにしたがって硬度が低下することを報告している。 $\delta = 5\ \mu\text{m}$ 以上の領域において、膜厚の厚い、すなわち界面からの距離が遠いアルマイト表面の引っかかり硬度が低下する現象は、吉原⁽⁵¹⁾が指摘した陽極酸化アルマイトの本質的な特性に起因すると考えられる。

$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の実効的な引っかかり硬度 H_g も、 $\delta = 0\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ の場合には

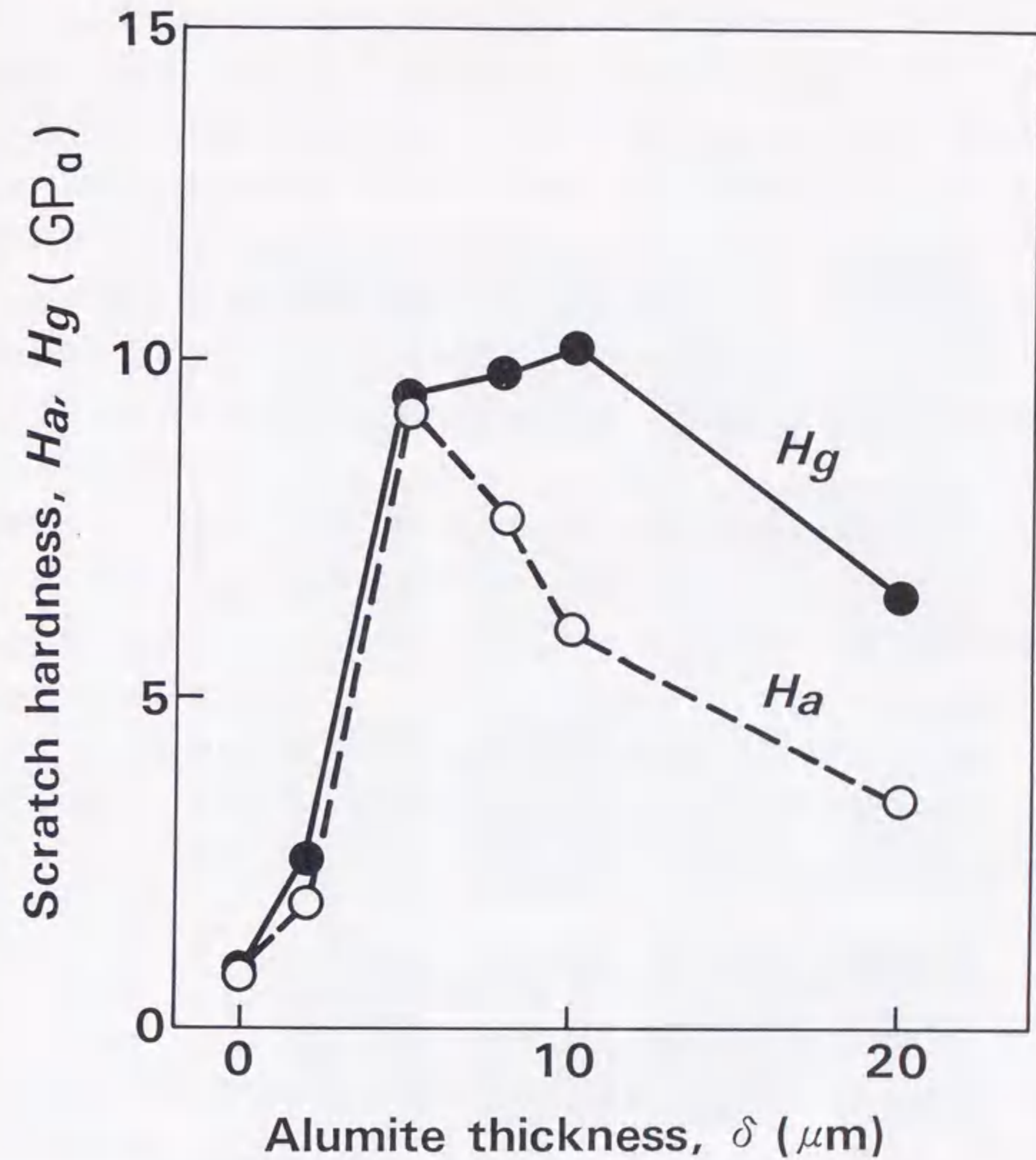


図6. 7 アルマイト試料と $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 試料の実効的な引っかかり硬度 H_a 、 H_g に及ぼすアルマイト厚の影響

Al-Mg合金下地の塑性変形の影響を受け、かなり低い値となっているが、 δ が $5\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ の領域では約 10GPa の高い値を示している。 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の膜厚は $0.17\mu\text{m}$ ときわめて薄いためその正確な硬度はこれまで明らかになっていなかったが、ここで得られた引っかき硬度は、Al-Mg合金下地の変形の影響がほとんど無いことを考えると、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 本来の硬度に近いものと考えられる。アルマイト膜厚が $20\mu\text{m}$ になるとアルマイトだけの場合と同様に実効的な引っかき硬度の低下がみられるが、その値は 6GPa 以上であり、摩耗試験用の試験片材料として用いたMn-Znフェライトの硬度とほぼ同じである。

図6.8は、アルマイト膜厚の異なる4種類の $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 試料の引っかき痕の走査形電子顕微鏡写真である。いずれの試料の場合も荷重の増加につれて引っかき痕は大きくなっているが、亀裂の発生状況は大きく異なっている。 $\delta = 10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ の試料の場合、 100mN 以上の荷重で引っかき痕内に圧子接触後端に生じる引張応力による円弧状の亀裂の発生が認められるのに対し、 $\delta = 5\mu\text{m}$ の試料ではこれ以外に、引っかき方向に沿った向きにメジアン亀裂と呼ばれる新たな亀裂が 200mN の荷重印加時に発生している。 $\delta = 2\mu\text{m}$ の試料では、このような亀裂が 100mN の荷重で発生し始めている。この亀裂はアルマイト層の下のAl-Mg合金下地の変形が発生原因である。メジアン亀裂の発生メカニズムについては次章で述べる。

6.3.2 耐摩耗性に及ぼすアルマイト膜厚の影響

図6.9、にアルマイト膜厚の異なる基板上に $0.17\mu\text{m}$ 厚の $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁性膜をスパッタ法で形成したディスクとMn-Znフェライトピンの組み合わせで、押し付け荷重 F_p をパラメータに摩耗試験を行った結果を示す。 $\delta = 10\mu\text{m}$ と $20\mu\text{m}$ の場合には、 $F_p = 180\text{mN}$ という過酷な荷重条件においても摩耗は軽微であるが、アルマイト膜厚の減少に伴い激しい摩耗が生じており、 $\delta = 5\mu\text{m}$ でも摩耗がほぼ磁性膜の下のアルマイト層にまで及んでいる。図6.7からも明らかなように、 $\delta = 5\mu\text{m}$ の $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 試料の実効的な引っかき硬度は $\delta = 10\mu\text{m}$ のものとはほぼ同等であり、 $\delta = 20\mu\text{m}$ の試料に比べればはるかに高いにもかかわらず、その硬度の高さが耐摩耗性には反映されていないという実

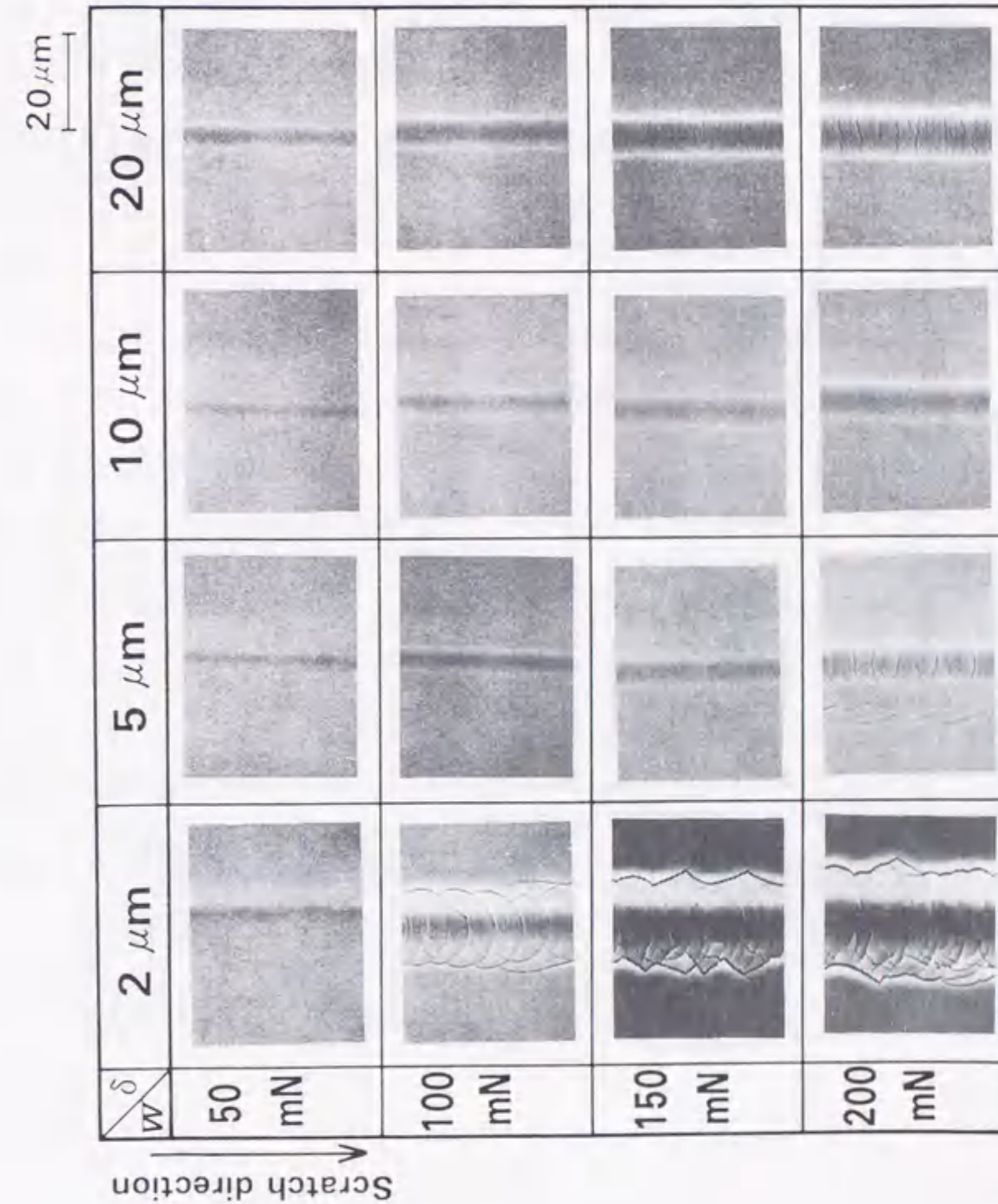


図6.8 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 試料の引っかき痕の走査形電子顕微鏡による観察結果

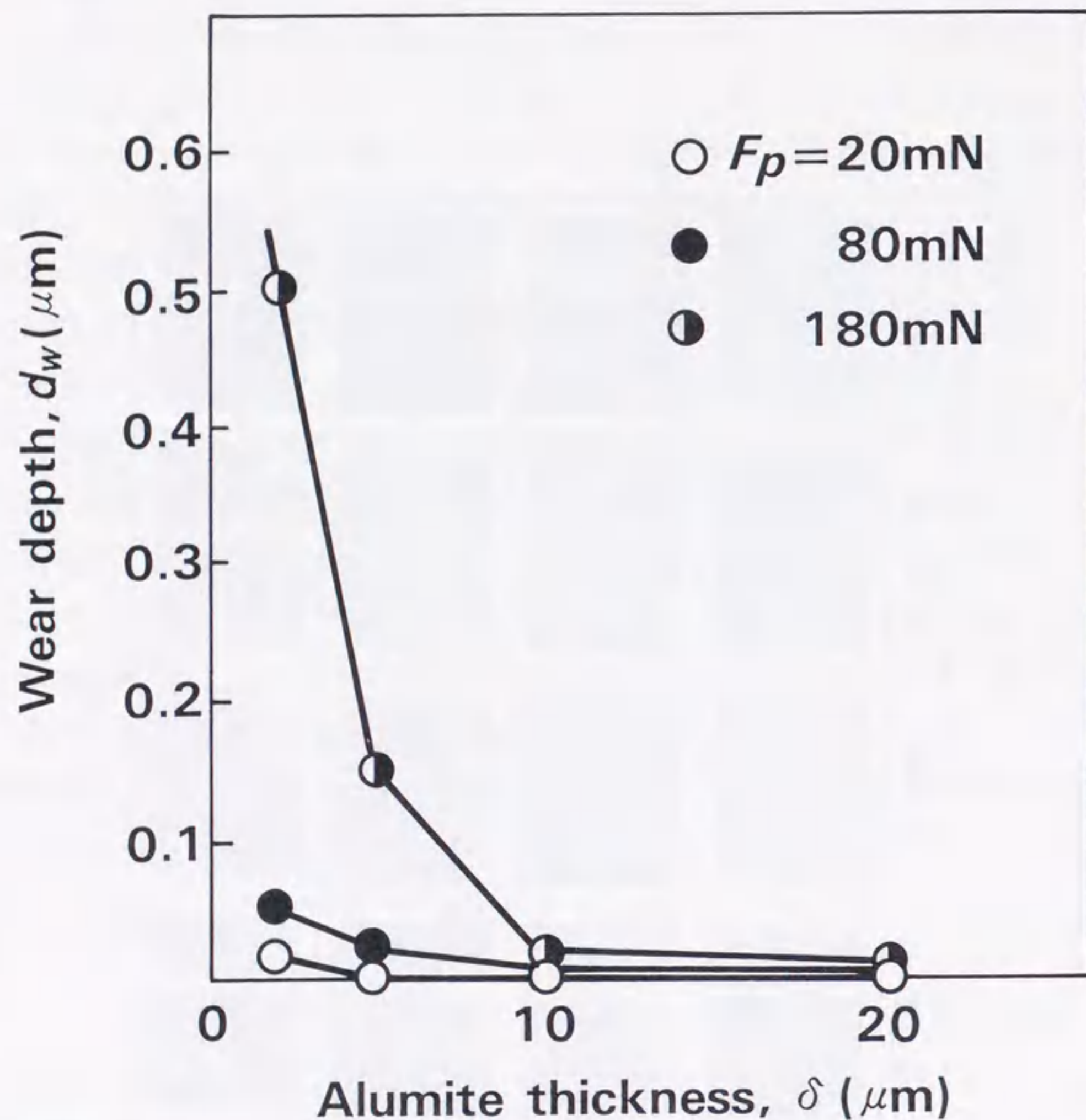


図6.9 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ スパッタ形薄膜ディスクの耐摩耗性に及ぼすアルマイト厚の影響

験結果となっている。

図6.10は、 $F_p = 180\text{mN}$ の荷重条件で試験を行った後の $\delta = 2\mu\text{m}$ と $5\mu\text{m}$ の試料の摩耗痕の断面を観察したものである。 $\delta = 2\mu\text{m}$ の試料では摩耗試験においても引っかき試験時と同じようなAl-Mg下地の塑性変形が認められる。 $\delta = 5\mu\text{m}$ の試料においても下地の微小な変形らしきものが認められる。図6.8に示したように、Al-Mg下地が塑性変形すると圧子接触部に生じる引張応力による亀裂以外に、それと交差する方向にメジアン亀裂が発生する。亀裂の交差は摩耗発生の主たる原因の一つであり、引っかき硬度としては高い値を示す $5\mu\text{m}$ 厚のアルマイト基板の上に磁性膜を形成したディスクの耐摩耗性が高荷重で急激に劣化する原因は、このような下地の変形によるメジアン亀裂の発生に起因しているとも考えられる。

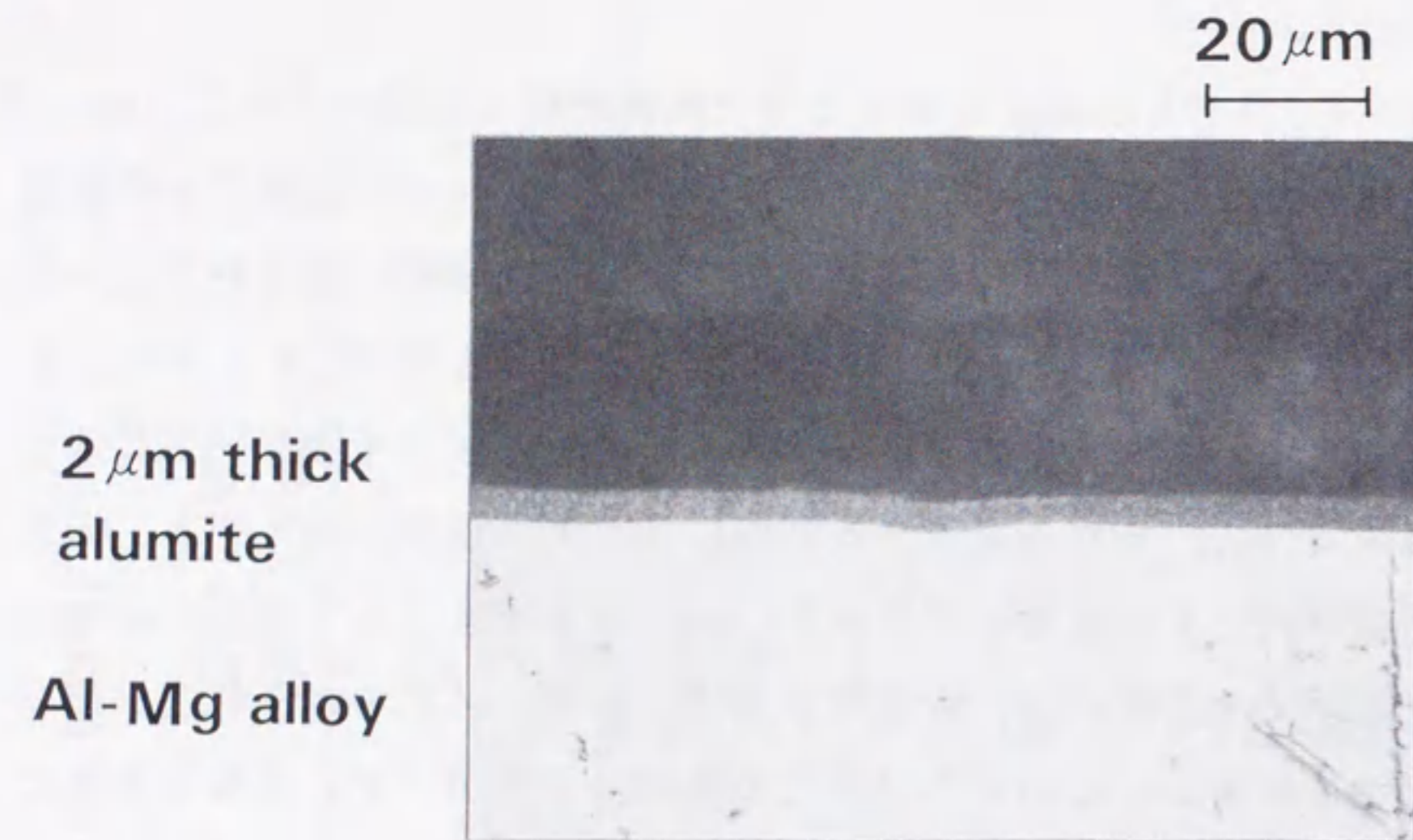
$\delta = 20\mu\text{m}$ のアルマイト層を持つスパッタ形ディスクは、図6.9に示したように $\delta = 10\mu\text{m}$ のものと同様の高い耐摩耗性を有しているが、陽極酸化アルマイトに特有な厚膜化に伴う硬度劣化に加え、磁性膜形成時の熱処理過程において厚膜化に起因する亀裂が発生するという問題が指摘されており、ディスクとしての総合的な観点からは $\delta = 10\mu\text{m}$ のものの方が優れていると考えられる。

図6.11は、 $10\mu\text{m}$ 厚のアルマイト層を持つ基板の上に $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁性膜を形成したスパッタディスクと塗布形ディスクの耐摩耗性を比較したものである。ここで比較の対象とした塗布形ディスクは2万回以上のCSSにも耐える信頼性の高い磁気ディスクであるが、 $10\mu\text{m}$ 厚のアルマイト基板の $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ スパッタ形ディスクはこの塗布形ディスクに比べてもかなり優れた耐摩耗特性を有していることがわかる。

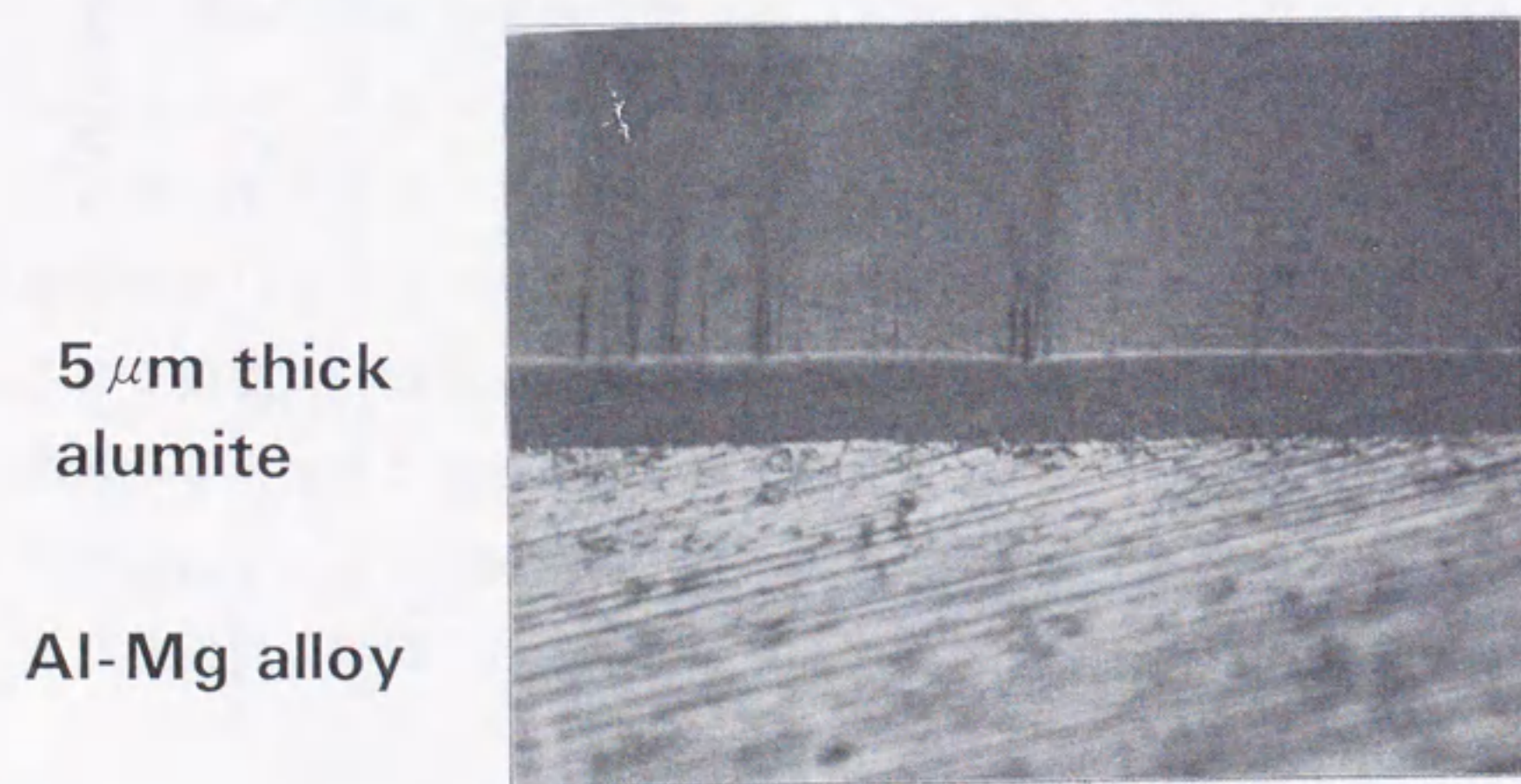
6.4 結論

スパッタ法により $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の磁性膜を形成した薄膜ディスクの強度と耐摩耗性に及ぼす基板のアルマイト膜厚の影響を引っかき試験とピン・ディスク形の摩耗試験によって調べた。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 基板のアルマイト膜厚が約 $10\mu\text{m}$ の時、スパッタ形薄膜ディスクの



(a) $\delta = 2 \mu\text{m}$



(b) $\delta = 5 \mu\text{m}$

図6. 10 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ スパッタ形薄膜ディスクの
摩耗痕の断面観察結果

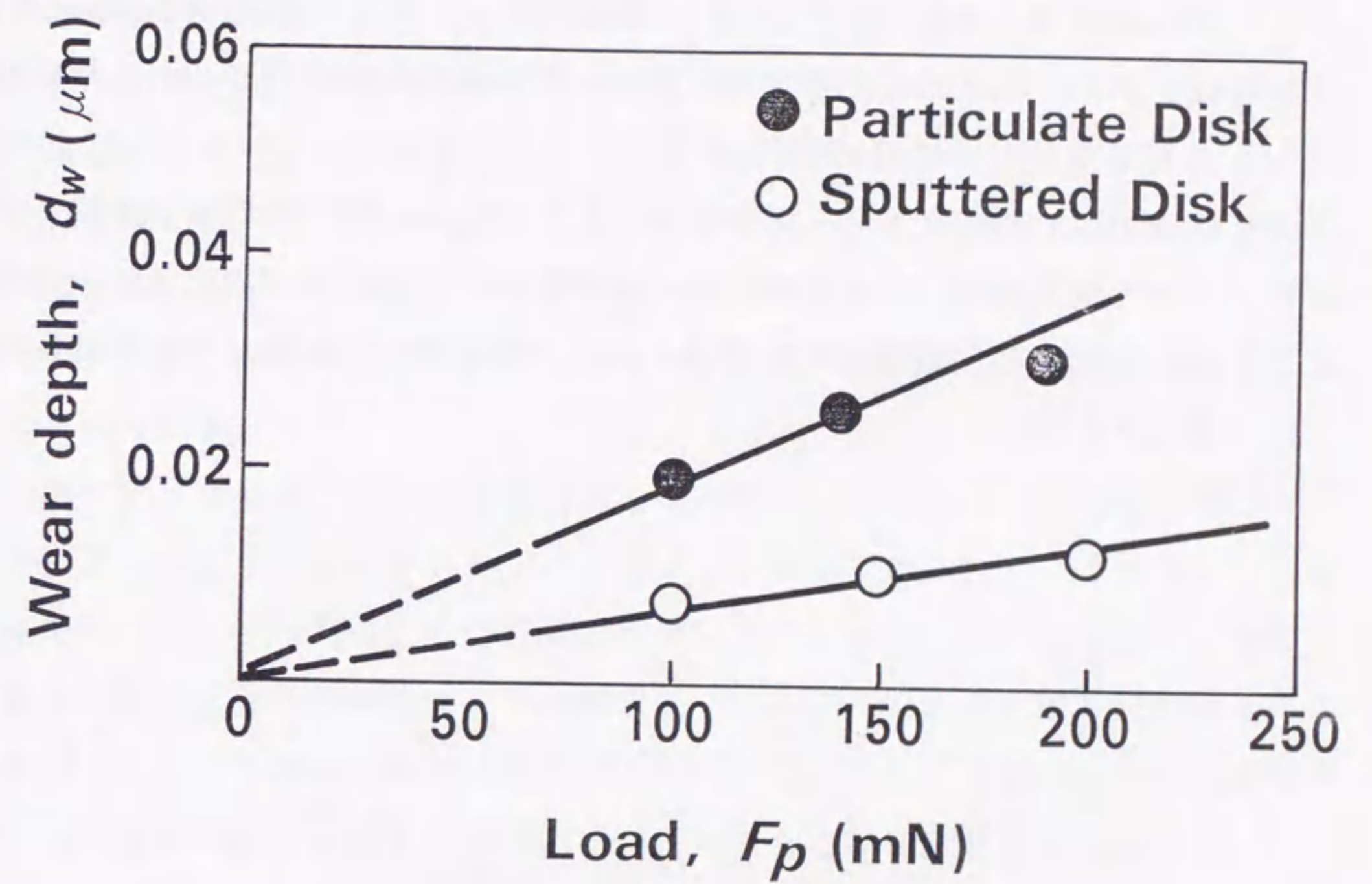


図6. 11 塗布形ディスクとスパッタ形ディスクの
耐摩耗性の比較

実効的な引っかき硬度は最大となる。10 μm 以下のアルマイト膜厚では、アルマイト層の下のAl-Mg合金下地の塑性変形の影響が顕在化するため、実効的な引っかき硬度は劣化する。また、アルマイト膜厚が10 μm 以上になると、アルマイト自身の硬度低下により、実効的な引っかき硬度が劣化する。

- (2) ピン・ディスク摩耗試験によるスパッタ形薄膜ディスクの摩耗深さはアルマイト膜厚の増加とともに減少し、10 μm 以上ではほぼ一定の値となる。10 μm 以下のアルマイト膜厚の場合、ピンの印加荷重が大きいと、Al-Mg合金の下地が変形し、磁性膜に亀裂が生じるため摩耗が急速に進展する傾向を示す。
- (3) 10 μm 厚のアルマイト基板の上に $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の磁性膜を形成したスパッタ形薄膜ディスクは、高い信頼性を有することが認識され、現在広く使われている塗布形の磁気ディスクに比較しても優れた耐摩耗性を有している。

第7章 薄膜ディスク用アルマイト基板の亀裂発生のメカニズム⁽⁵²⁾

7.1 緒言

スパッタリングやイオンプレーティングなどのコーティング技術の進展によって、TiCやSiCなどのセラミクスをはじめとする様々な材質の硬質膜が工具や歯車などの過酷な条件で用いられる機械部品に適用されている。また、使用条件はそれほど過酷ではないが、きわめて高い信頼性が要求される衛星用機器や情報機器においても摺動部品などにこれらの硬質膜が使われ始めている。とくに電子計算機のファイル記憶装置の中核をなす磁気ディスク装置では記憶媒体の基板や磁性膜をはじめ保護膜・潤滑膜に種々の硬質膜が用いられており、その機械的な性質を明らかにすることが磁気ディスク装置の信頼性を高める上で重要な課題となっている。

前章では、アルミニウム合金の表面を陽極酸化して μm オーダーの膜厚のアルマイト層を形成した磁気ディスク用アルマイト基板およびその上に $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁性膜をスパッタ法で形成した薄膜形磁気ディスクの引っかき試験を行い、軟質なアルミニウム合金下地の塑性変形が硬質なアルマイト陽極酸化膜や磁性膜の実効的な引っかき硬度におよぼす影響を明らかにするとともに、引っかきによって発生する亀裂が薄膜形磁気ディスクの耐久性に大きな影響を与えることを示した。

セラミクスなどの硬質膜の機械的な性質についてはHintermann⁽⁵³⁾が引っかき試験機を用いてその密着力を評価しているのをはじめ、Halling⁽⁵⁴⁾、⁽⁵⁵⁾も様々なコーティング膜の実効的な硬度やヤング率におよぼす膜厚の影響について研究しているが、均質なセラミクスなどで問題にされている亀裂の発生・進展といった脆性材料に特有な現象についての研究は少ない。特に、スパッタ形薄膜ディスクのように、下地とその上に形成された脆性膜の硬度が10倍以上も異なるようなものについての研究はほとんどなされていない。

本章では、薄膜ディスクを搭載した磁気ディスク装置の信頼性に影響を及ぼすこのような亀裂の発生形態を解明することを目的に、薄膜形磁気ディスク用の陽極酸化アルマイト基板の引っかき試験を行い、先端が鈍な圧子でアルマイト膜の

ような硬質脆性膜を引っ掻いた場合には円弧状亀裂の発生に先立って圧子進行方向に沿ったメジアン亀裂が発生することを明らかにした。これは均質な脆性材料を鈍な圧子で引っ掻いた時に一般に見られる亀裂発生とは逆な現象であり、脆性膜に特有なものといえる。さらに、硬質脆性膜におけるメジアン亀裂には二つの種類があり、膜厚が厚いアルマイト膜を鋭い圧子で引っ掻いた場合には亀裂が均質な脆性材料の場合と同様に表面から垂直下方に入ること、膜厚が薄いアルマイト膜を鈍な圧子で引っ掻いた場合には亀裂が膜と下地の界面から上方に入ること、を明らかにした。なお、後者の場合には亀裂の発生に先立って下地の塑性変形が起こっていることも特徴である。さらに、このような二つの形態のメジアン亀裂の発生が圧子押し込み時の応力状態から説明できることを有限要素法を用いた弾塑性応力解析により明らかにした。

7. 2 実験方法

7. 2. 1 引っかき試験機

引っかき試験としては前章で用いたものを改造し、一定荷重での試験だけでなく1.5 mN/sの割合で荷重を連続的に増加させる試験もできるようにした。試験は、0.13 mm/sという超低速での準静的な条件で行った。

圧子は先端の曲率半径 r の異なるダイヤモンド圧子 ($r = 32 \mu\text{m}$, $55 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$) およびルビー圧子 ($r = 500 \mu\text{m}$, $750 \mu\text{m}$) を用意した。

7. 2. 2 供試アルマイト基板の特徴

試験にはAl-Mg合金の表面をクロム酸浴で陽極酸化してアルマイト化した磁気ディスク用アルマイト基板を用いた。ここではアルマイト膜厚をパラメータとした5 μm , 10 μm , 20 μm の膜厚の3種類の試料を用意した。試料表面は中心線平均あらさで0.01 μm 以下の平滑な面に仕上げてある。

表7.1にアルマイト層を形成していないAl-Mg合金下地と3種類の試料の引っかき硬度を示す。Al-Mg合金下地の引っかき硬度は約0.85 GPa

であり、そのピッカース硬度に近い値を示している。膜厚 $\delta = 5 \mu\text{m}$ では9.1 GPaという高い値を示すが、膜厚が厚くなるにつれて引っかき硬度 H_a の値は低下し、 $\delta = 10 \mu\text{m}$ では $H_a = 6.0 \text{ GPa}$ 、 $\delta = 20 \mu\text{m}$ のアルマイトの場合には $H_a = 3.5 \text{ GPa}$ という値になっている。アルマイトの膜厚が厚くなるにつれて硬度の低下が起こる現象は、陽極酸化アルマイトに特有なものである。

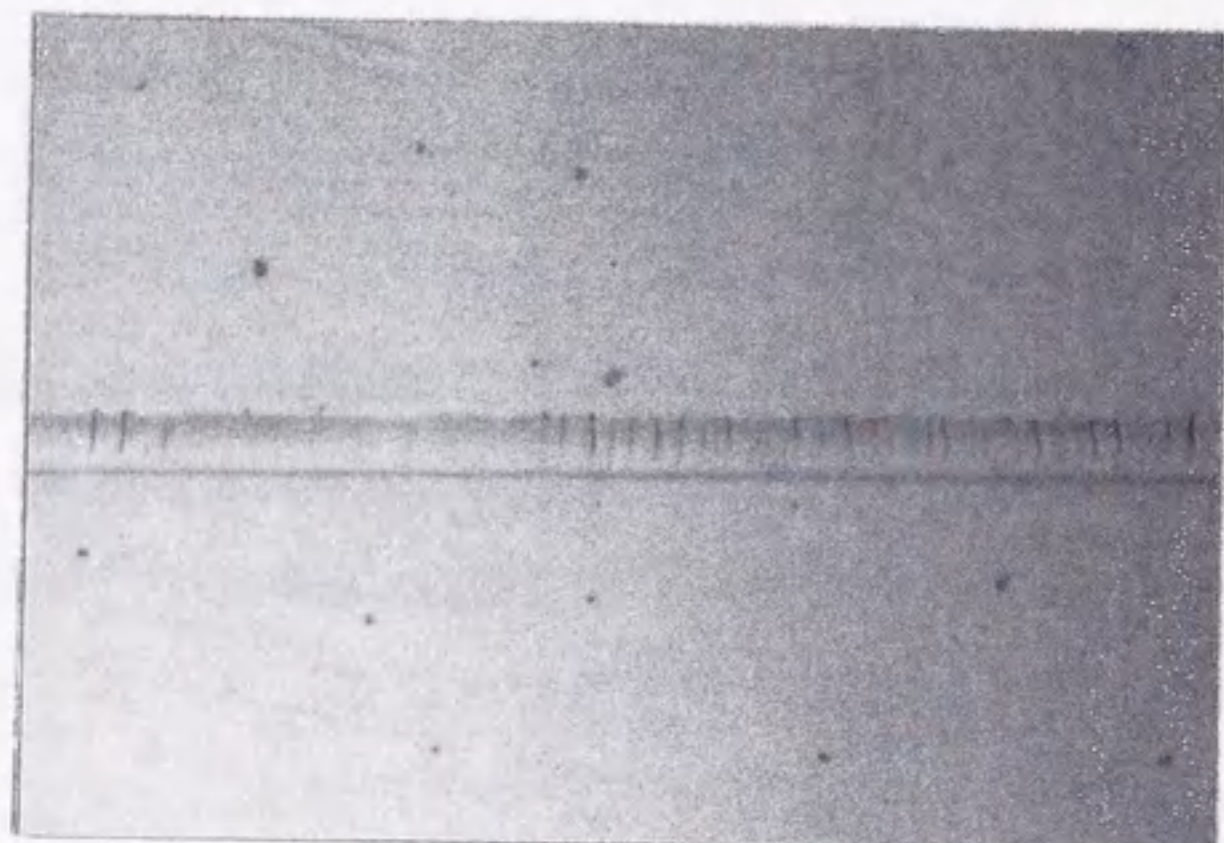
7. 3 実験結果

ガラスやセラミックスのような脆性材料の押し込み試験や引っかき試験では圧子先端の形状によって発生する亀裂の形態が異なることは良く知られている。たとえば、先端の鋭いピッカース圧子を用いた引っかき試験では、低荷重で圧子進行方向に沿って表面から下向きに垂直に入る亀裂（以下、メジアン亀裂：median crackと呼ぶ）が発生し、荷重を徐々に上げていくと接触部後端に生ずる引っ張り応力のため円弧状の亀裂（押し込み試験でよく見られるヘルツ亀裂に相当する。以下、円弧亀裂：bow crackと呼ぶ）が発生する。それに対し、先端が鈍な圧子の場合には、まず低荷重で円弧亀裂が発生し、荷重の増加とともにメジアン亀裂がそれに重畳してくる^{(56), (57)}。

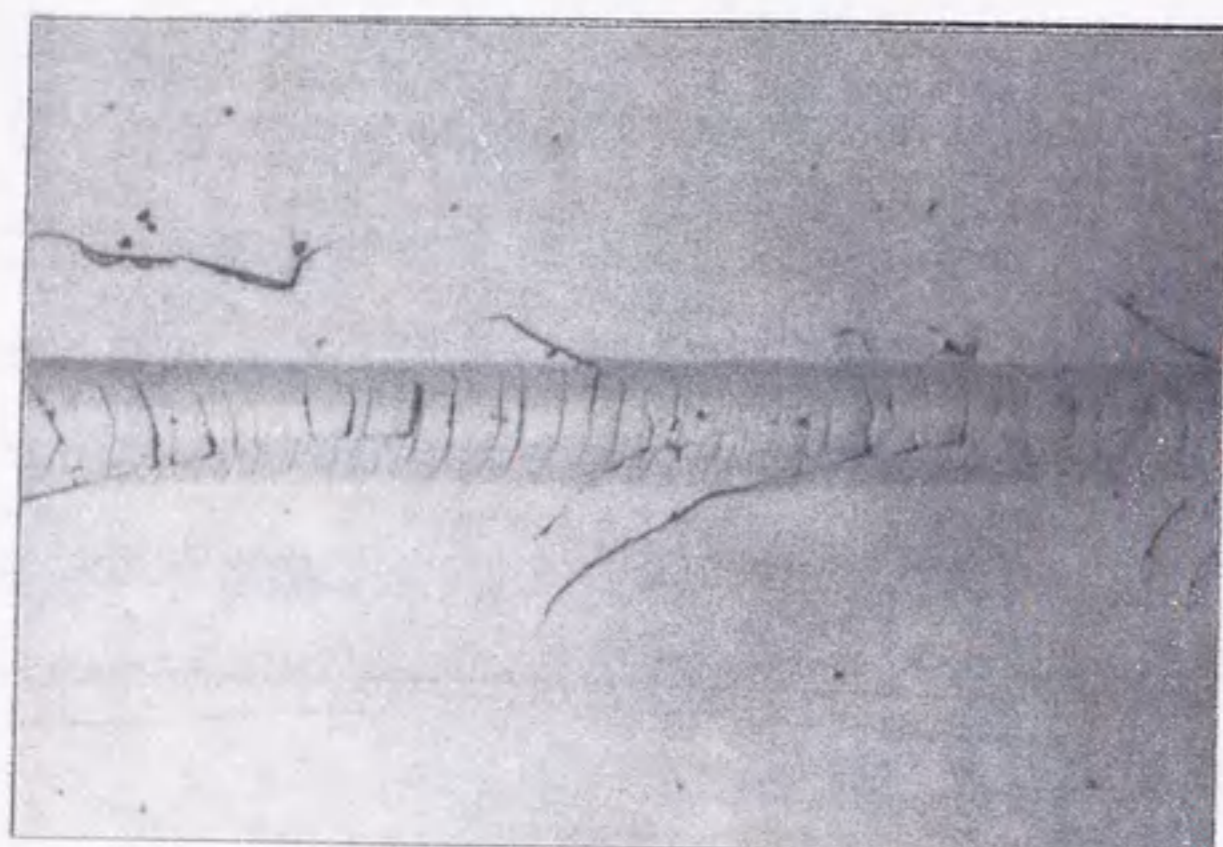
図7.1に代表的な磁気ヘッド材料であるMn-Znフェライトを先端曲率32 μm のダイヤモンド圧子で引っ掻いた時に発生する亀裂を観察した結果を示す。0.5 Nの荷重において引っかき痕内に円弧亀裂が、荷重が2 Nになるとメジアン亀裂が重畳してくることが観察され、この場合には鈍な圧子と均質な脆性材料の組み合わせにおける典型的な亀裂発生パターンとなっている。

これに対し、柔らかい下地の上に硬質な脆性膜が形成された磁気ディスク用の基板の場合には、均質な材料とは異なる亀裂の発生状況となる。図7.2は膜厚5 μm のアルマイト試料を同じく先端曲率32 μm のダイヤモンド圧子で引っ掻いた時の結果である。圧子の先端曲率が同じ32 μm にもかかわらず、この場合には、低荷重でメジアン亀裂が発生し、荷重を増加させるにしたがって円弧亀裂が重畳してきており、あたかも均質な脆性材料をピッカース圧子のようなきわめて鋭い圧子で引っ掻いた時と同様な亀裂発生パターンになっている。このように、同じ脆性を示す材料であっても膜構造をとる場合と均質な材料とでは亀裂の発生

┌ 50μm



(a) $W = 0.5 \text{ N}$



(b) $W = 2.0 \text{ N}$

図7.1 Mn-Znフェライト（均質材）の引っかき痕

┌ 50μm



(a) $W = 0.15 \text{ N}$



(b) $W = 0.5 \text{ N}$

図7.2 アルマイト基板の引っかき痕
(膜厚 $\delta = 5 \mu\text{m}$)

パターンが逆転していることがわかる。

図7. 3は引っかきによってメジアン亀裂が最初に発生する発生臨界荷重 W_m と円弧亀裂の発生臨界荷重 W_b に及ぼすアルマイト膜厚 δ の影響を示したものである。使用した圧子の先端曲率 r は $32\mu\text{m}$ である。いずれの場合もアルマイトが厚くなるにしたがって最初に亀裂が発生する臨界荷重が増加している。メジアン亀裂と円弧亀裂が発生する荷重を比べると、膜厚が薄い場合にはメジアン亀裂の方がかなり低い荷重で発生しているものの、膜厚が増すにつれてその差は小さくなり、 $20\mu\text{m}$ 付近の膜厚では円弧亀裂とメジアン亀裂の発生荷重が接近している。この結果からは、さらにアルマイトの膜厚が増すにつれて均質な材料に近づき、メジアン亀裂よりも円弧亀裂の方が低い荷重で発生する傾向がうかがえる。

図7. 4に、メジアン亀裂の発生臨界荷重と円弧亀裂の発生臨界荷重の比 W_m/W_b を3種類のダイヤモンド圧子について調べた結果を示す。いずれの圧子の場合もアルマイト膜厚 δ が大きくなるにしたがって W_m/W_b が増加している。また圧子の先端が鋭いほど W_m/W_b は大きな値をとる。とくに $r=32\mu\text{m}$ の圧子の場合には、 $\delta=20\mu\text{m}$ 付近で W_m/W_b がほぼ1に近い値となっており、図7. 3のMn-Znフェライトの場合と同じく、アルマイト膜厚が増加するにつれて、円弧亀裂の方がメジアン亀裂より早く発生し始める傾向を示している。

図7. 5は、膜厚 $5\mu\text{m}$ のアルマイト試料においてメジアン亀裂が最初に発生した時の荷重をその時の接触面積で除した平均接触圧力 P_m （式(6. 3)に示した引っかき硬度 H と同じ定義となる）と圧子先端曲率の逆数 $1/r$ の関係を示したものである。この図からは r が大きい、すなわち圧子の先端が鈍なほど P_m の値が小さくなっていることがわかる。

アルマイト試料の引っかき硬度 H_0 は下地のアルミニウム合金の塑性変形がなければ、膜厚に対応したアルマイト固有の硬度に近い値をとるのに対し、アルミニウム合金下地の塑性変形量が大きくなるにしたがってその値は急激に小さくなる。すなわち、 $P_m (=H)$ が小さいということは、メジアン亀裂が発生した時には引っかきによってアルマイト層が変形しているだけでなくアルミニウム合金下地までが塑性変形をしていたことを意味している。したがって図7. 5の結果は、先端が鈍な圧子ほどメジアン亀裂の発生におよぼすアルミニウム合金下地の塑性変形の影響が大きいことを間接的に示していることになる。

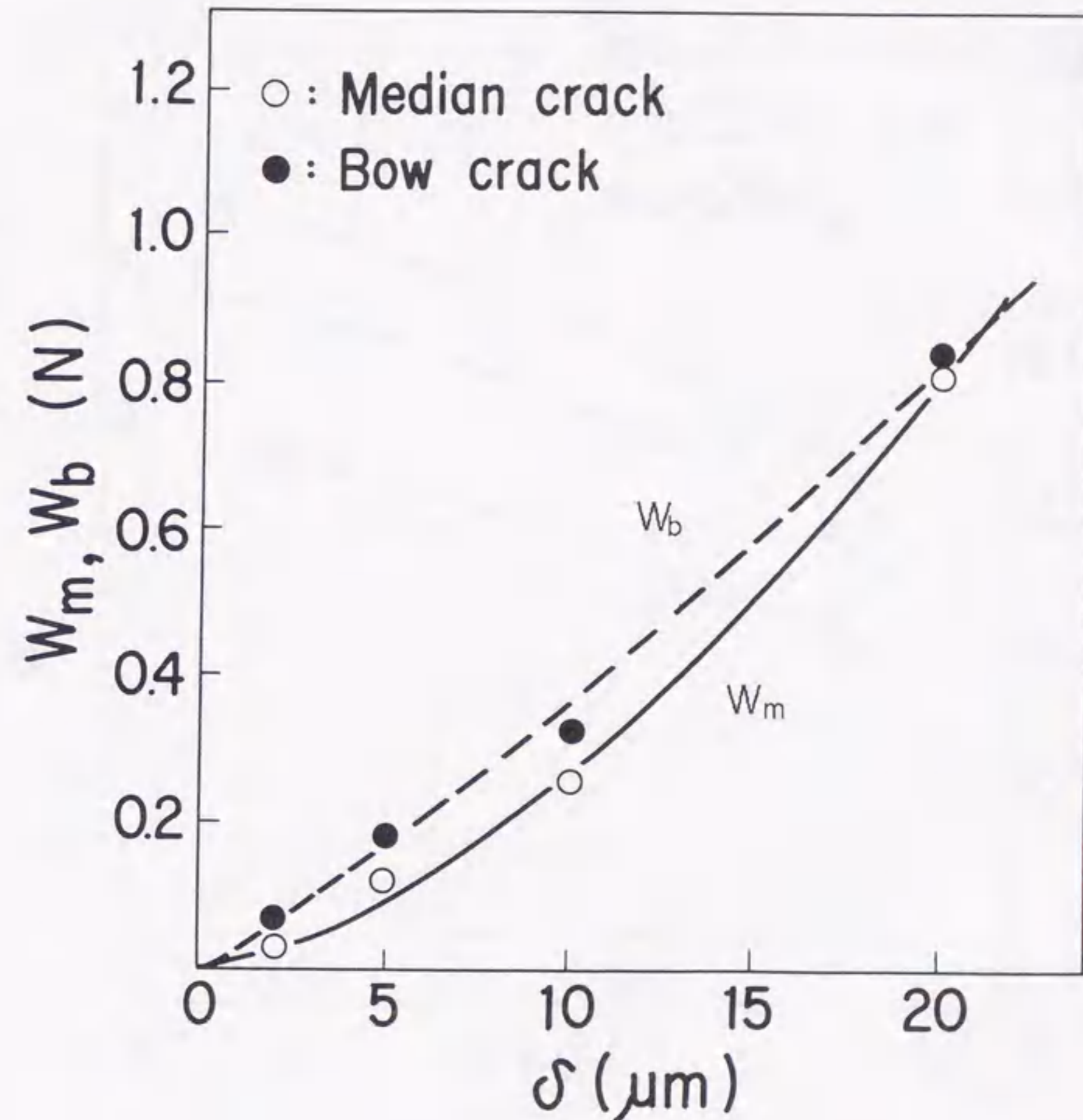


図7. 3 メジアン亀裂と円弧亀裂の発生臨界荷重

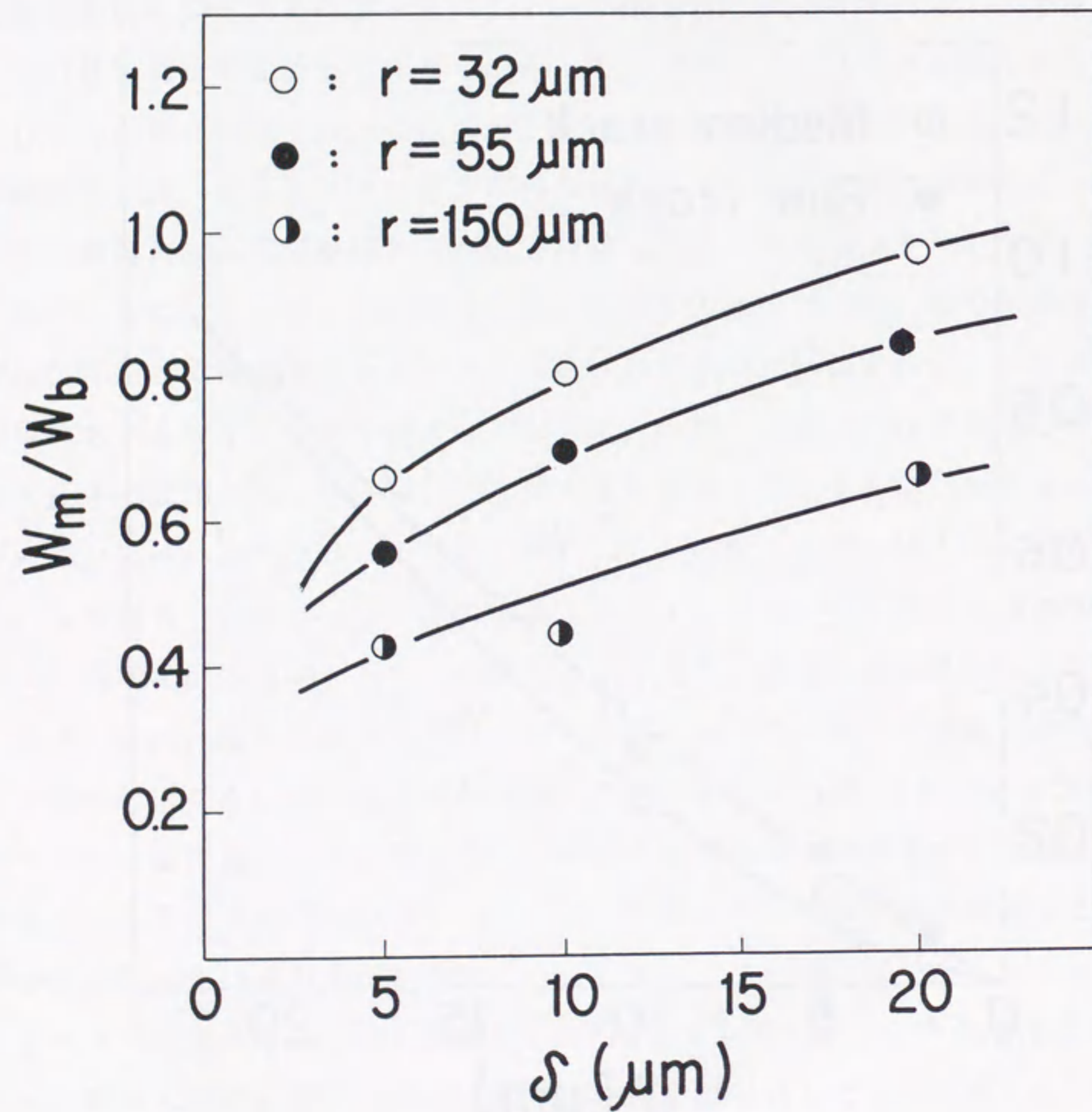


図7. 4 亀裂発生臨界荷重とアルマイト膜厚の関係

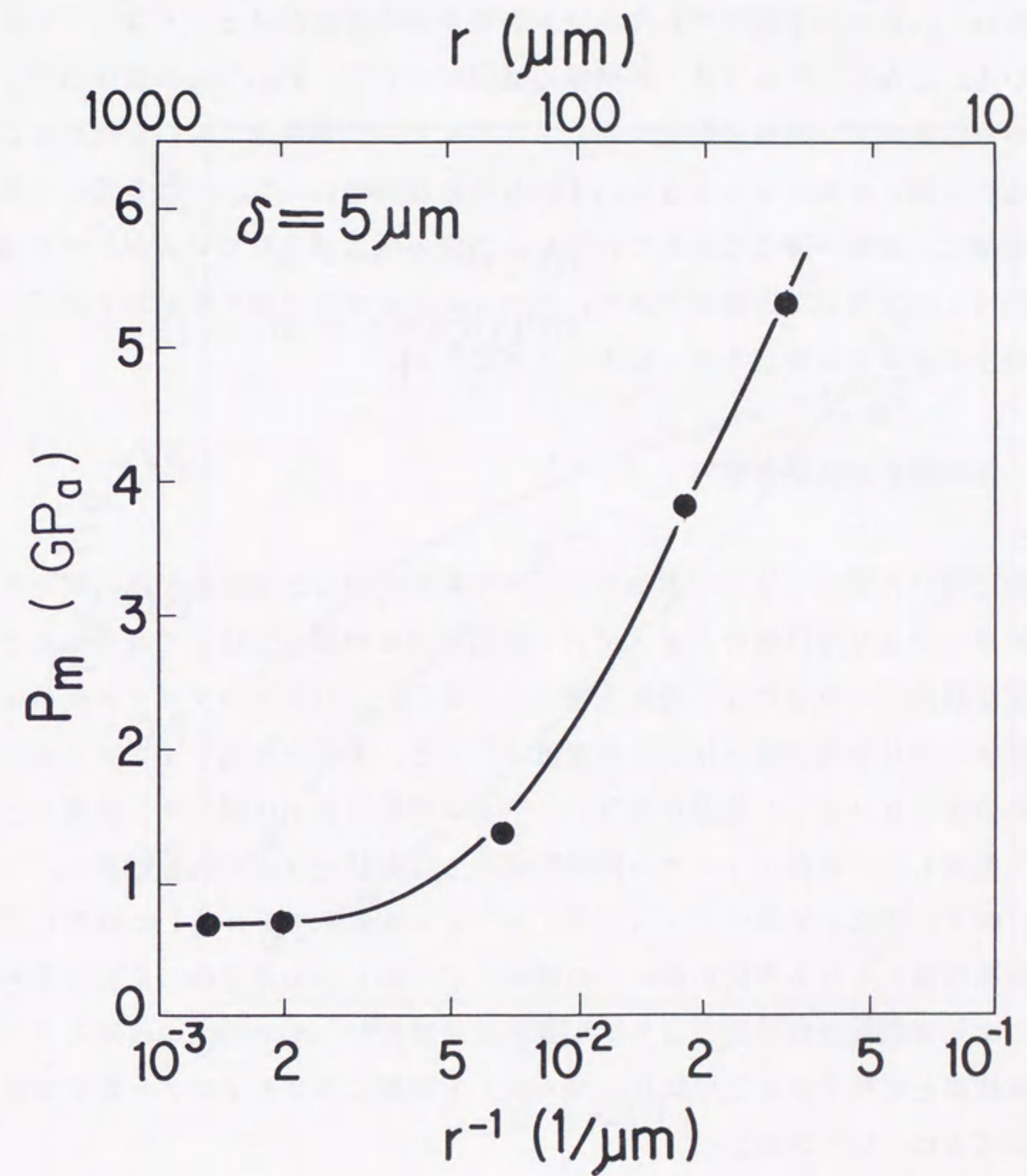


図7. 5 亀裂発生圧力と圧子曲率の関係

図7. 6は、アルマイト膜厚 δ が亀裂発生圧力 P_m におよぼす影響を圧子先端曲率 r をパラメータとして示したものである。ここでは横軸にアルマイトの膜厚 δ を、縦軸に各々の膜厚における P_m をそのアルマイトの引っかかり硬度 H_a で除した P_m/H_a をとっている。 $r=32\mu\text{m}$ の場合、 $\delta=20\mu\text{m}$ における P_m/H_a の値は1に近く、引っかかり時にアルミニウム合金下地の変形がほとんどないことを示している。しかし、アルマイトの膜厚の減少につれて、 P_m/H_a の値が小さくなっており、メジアン亀裂の発生に先立ってアルミニウム合金下地の変形が起きていることがわかる。 $r=55\mu\text{m}$ 、 $150\mu\text{m}$ の場合にも、 $r=32\mu\text{m}$ の場合と同様に、膜厚が薄くなるにつれて P_m/H_a の値は減少しているが、その減少の傾向は r が大きいほど顕著であり、アルミニウム合金下地の変形がメジアン亀裂の発生に及ぼす影響が大きくなることがわかる。

7. 4 応力解析および考察

本実験で用いた磁気ディスク用のアルマイト基板の引っかかり試験では、アルマイトの膜厚がかなり厚い場合でもメジアン亀裂が円弧亀裂に先立って発生するという均質な材料では見られない現象が現われており、これがアルマイト基板の引っかかり試験における亀裂発生状態を特徴付けている。実際の磁気ディスクにおいては、このようなメジアン亀裂が磁気ヘッドとの摺動あるいは間欠的な接触などによって発生し、これがディスクの摩耗損傷のきっかけとなる可能性は高い。ここでは、図7. 7に示す磁気ディスク用アルマイト基板をモデル化した軟質な下地と硬質脆性膜からなる部材に曲率 r の剛体圧子を押し込んだ場合の応力状態を、軸対称二次元弾塑性接触問題として有限要素法で解析し、その結果を前述の引っかかり試験結果と比較することにより、アルマイト基板におけるメジアン亀裂の発生メカニズムについて考察した。

図7. 8に解析に使用した要素分割を示す。解析要素は四節点軸対象要素を用い、 $10t \times 9.25t$ (t は単位長さを表す)の領域を504分割した。計算に使用したディスク基板の膜と下地の材料定数を表7. 2に示す。陽極酸化アルマイトの材料定数はあまり詳しく調べられておらず、また前述のように、膜厚によって材料特性が変化するため、ここでは便宜的にアルミナ材料定数を用い

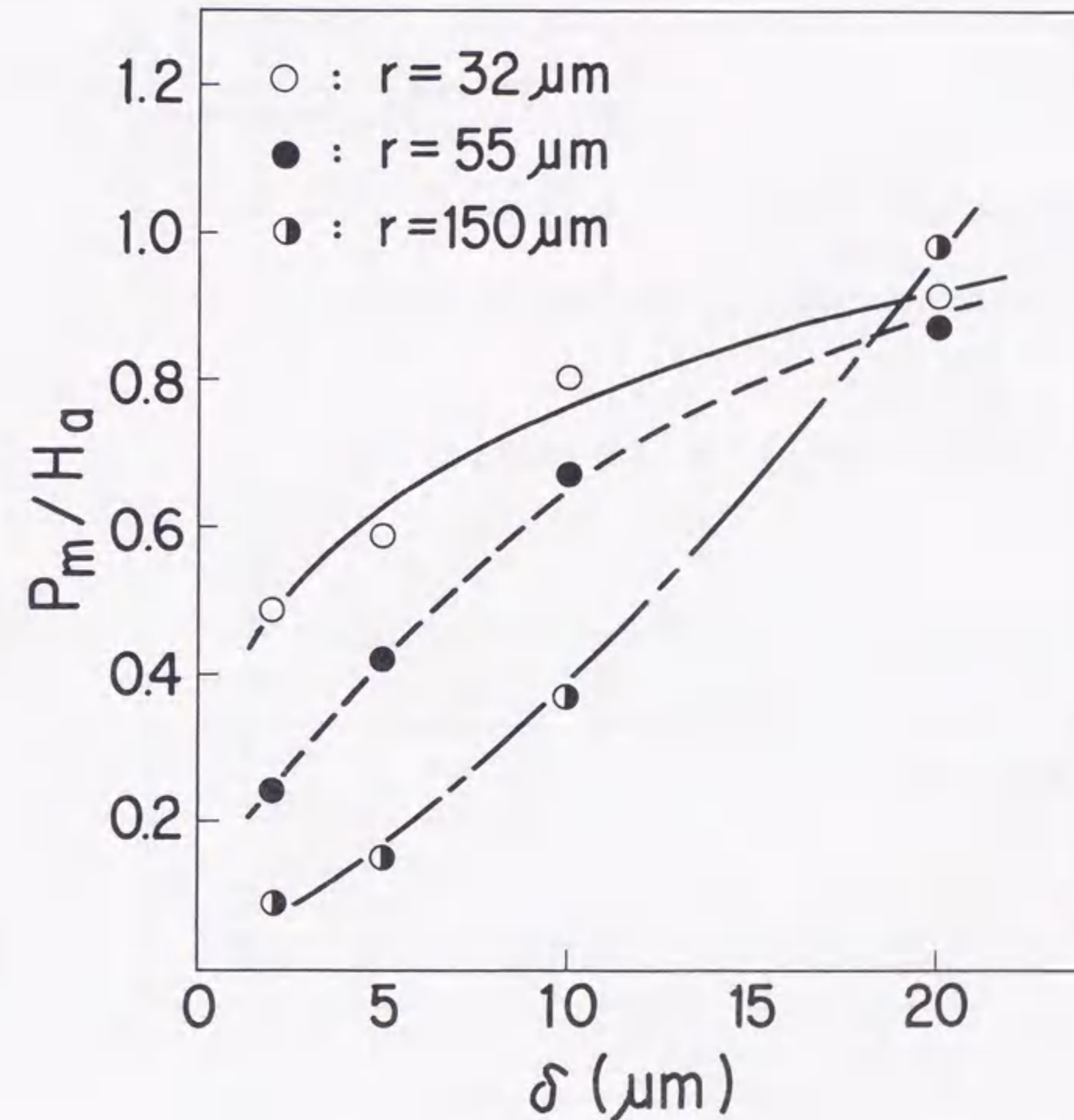


図7. 6 亀裂発生圧力とアルマイト膜厚の関係

表 7. 1 供試試料の引っかき硬度

| Alumite thickness, δ (μm) | Scratch hardness, H_a (GPa) |
|---|-------------------------------|
| 0 | 0.85 |
| 5 | 9.1 |
| 10 | 6.0 |
| 20 | 3.5 |

表 7. 2 膜と下地の材料定数

| | Film | Substrate |
|--|------|-----------|
| Young's modulus, E (GPa) | 350 | 70 |
| Poisson's ratio, ν | 0.3 | 0.3 |
| Yield stress, Y (MPa) | 240 | 18 |
| Strain hardening coefficient, ϵ | 0.0 | 0.0 |

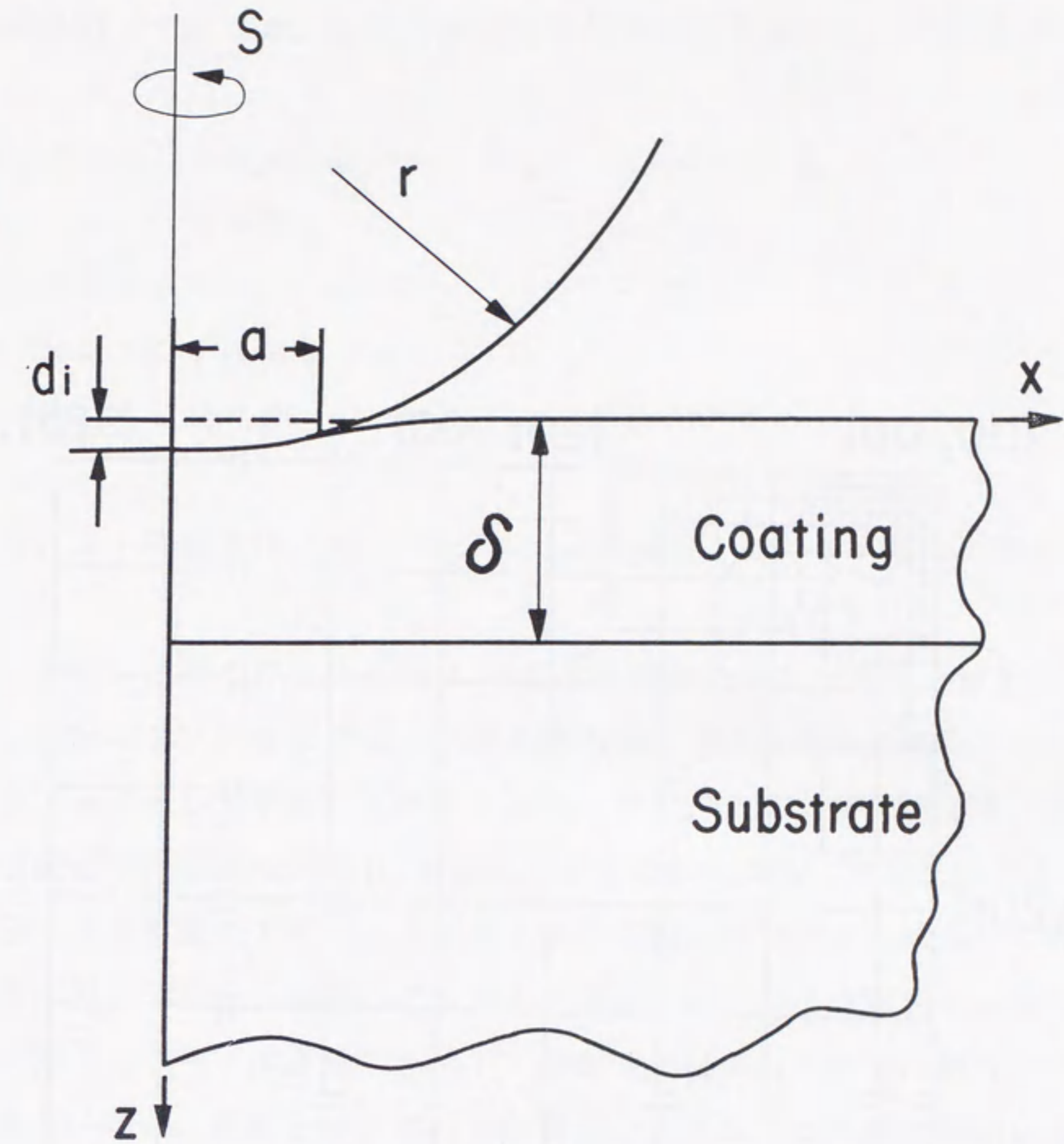


図 7. 7 解析モデル

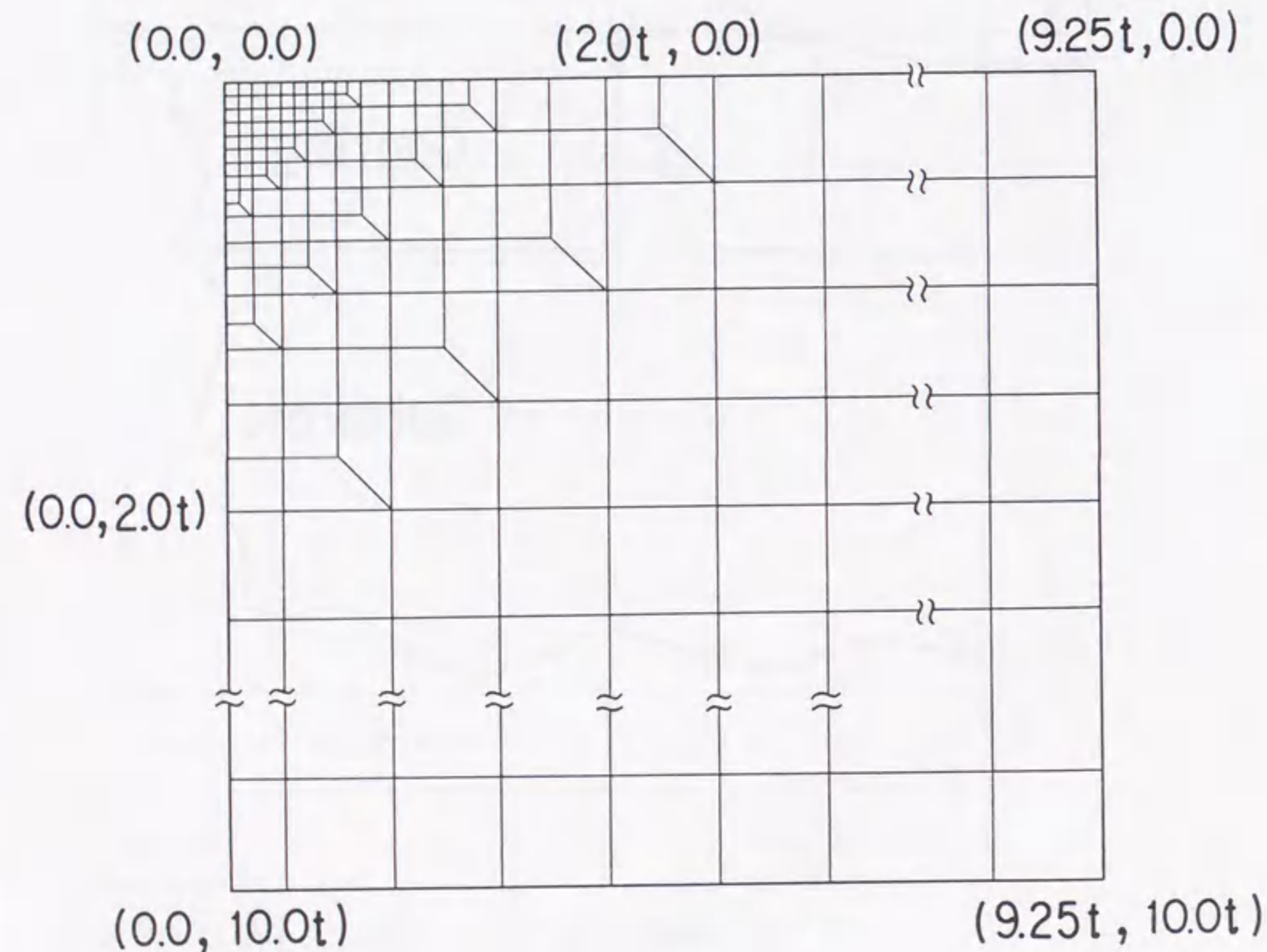


図7.8 要素分割

た。ここでは、ひずみ硬化係数 ε を膜、下地とも零と仮定して、弾完全塑性の条件で解析を行った。なお、解析には以下の境界条件を用いた。

$$x \rightarrow \infty, z \rightarrow \infty : u = w = 0$$

$$x = 0 : u = 0$$

$$z = 0, x > a : \sigma_z = \tau_{xz} = 0$$

$$z = 0, x \leq a : \tau_{xz} = 0$$

$$w = d_i - r + (r^2 - x^2)^{1/2}$$

ここで、 a : 接触半径, d_i : 圧子押し込み深さ, u, w : x および z 方向変位

図7.9に、圧子の押し込み量 d_i を徐々に増加させたときの z 軸上の応力成分 σ_{zz} (これがメジアン亀裂を発生させる応力成分である) を、膜厚 δ と圧子曲率 r をパラメータとして解析した結果を示す。なお、ここでは、膜厚 δ 、圧子曲率 r および圧子の押し込み深さ d_i を図7.8中の単位長さ t で無次元化して示した。図7.9-aは厚膜のアルマイト基板と鋭い先端を持つ圧子の組合せにおける計算結果を、図7.9-bは薄いアルマイト基板と鋭い圧子の組合せの場合の計算結果を、図7.9-cは厚膜アルマイト基板と先端が鈍な圧子の組合せでの計算結果である。なお、各図とも、 σ_{zz} の計算値が膜あるいは下地の降伏応力を越えた場合、図の右側部分にその領域をハッチングで示した。

厚いアルマイトと鋭い圧子の組合せの場合(図7.9-a)、圧子を押し込むと、まず圧子直下の膜が塑性変形し、その弾塑性境界に引っ張りの σ_{zz} が現われる。それは押し込みが進むにつれて大きくなっており、この応力によってメジアン亀裂が発生し、それが下向きに進展すると考えられる。均質な脆性材料に圧子を押し込んだ場合、図7.10のように圧子直下の弾塑性境界に現われる高い引っ張り応力によってメジアン亀裂の芽が発生し、さらに圧子を押し込んでいくと、そこを起点として亀裂が下方に進展して行くことがLawn^{(58), (59)}らによって明らかにされている。アルマイト基板のように軟質下地の上に硬脆性な膜が形成されている系においても、膜厚が厚く圧子曲率が鋭ければ、均質な材料と同様な亀裂の発生メカニズムとなることがわかる。

それに対し、膜厚が薄い場合（図7. 9-b）には圧子の押し込みによって、圧子直下の弾塑性境界に引っ張り方向の σ_{ss} が現われるものの、それが大きくなる以前に下地の方が塑性変形し、下地と膜の境界により大きな引っ張り応力が現われている。したがって、この場合は膜・下地界面から上向きにメジアン亀裂が発生するものと考えられる。また、膜厚が厚くても圧子が鈍な場合（図7. 9-c）には、圧子直下の弾塑性境界に現れる引っ張り応力が十分大きな値になる前に下地の塑性変形が起り、下地と膜の境界に高い引っ張り応力が生じている。この場合にも、図7. 9-bの時と同様に、下地と膜の界面から上向きにメジアン亀裂が発生・進展すると考えられる。なお、膜厚の厚い図7. 9-aの場合においても、圧子の押し込み量が増えるにしたがって下地が塑性変形し、下地と膜の界面に高い引っ張り応力が現われており、圧子直下からだけでなく、膜/下地界面からの亀裂発生が起りうるということがわかる。

図7. 11に、メジアン亀裂の発生臨界荷重 W_m で引っかき試験を行った後の試料断面を光学顕微鏡で観察した結果を示す。これらの写真は暗視野像で撮影したものであり、透明な陽極酸化アルマイトが塑性変形している部分は黒ずんで見える。膜厚が $20\mu\text{m}$ の基板を先端の鋭い $r = 32\mu\text{m}$ の圧子で引っ掻いた場合（図7. 11-a）には、圧子直下の弾塑性境界から下向きにメジアン亀裂が進展しており、これは図7. 9-aの解析結果からの予想と一致している。なお、この場合、下地の変形はほとんど見られておらず、図7. 6におけるこの時の P_m/H_a が約1.0であることに良く対応している。これに対し、膜厚が $10\mu\text{m}$ のアルマイト基板を同じ圧子で引っ掻いた場合（図7. 11-b）、下地の変形が明瞭に観察され、その界面からメジアン亀裂が上向きに進展していることがわかる。これは、図7. 9-bに示した解析結果に対応するものであり、図7. 6において、 P_m/H_a の値が0.7と、下地の変形を示唆していたこととも良く対応している。また、膜厚 $20\mu\text{m}$ の基板を $r = 150\mu\text{m}$ の圧子で引っ掻いた（図7. 11-c）の場合には、前述の $\delta = 10\mu\text{m}$ 、 $r = 32\mu\text{m}$ の結果と同様に、下地と膜の界面からのメジアン亀裂の発生が観察されており、これは、図7. 9-cに示した解析結果から予想される膜/下地界面からのメジアン亀裂の発生に相当するものであることがわかる。

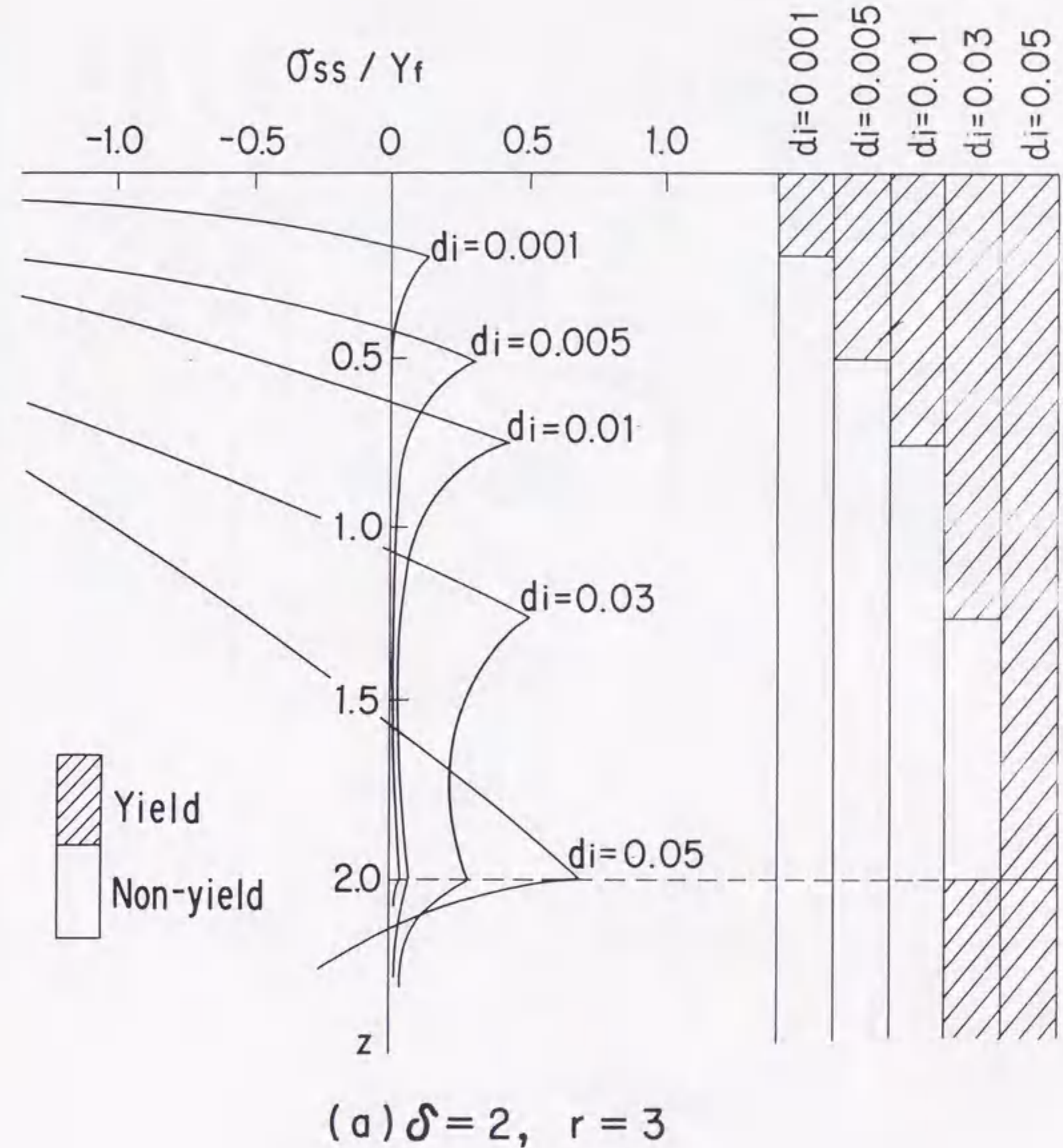


図7. 9 圧子直下の応力分布の計算結果

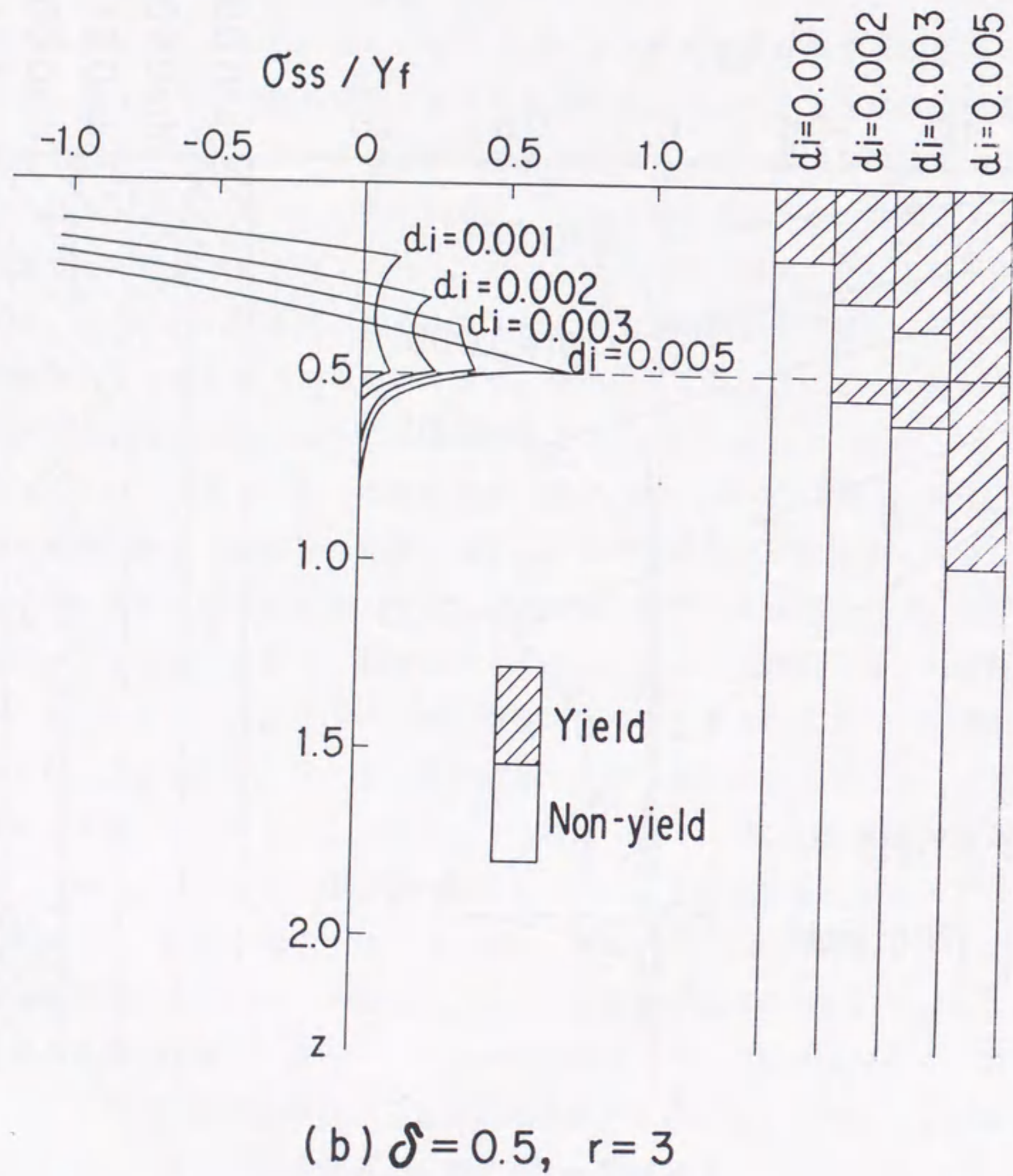


図7. 9 圧子直下の応力分布の計算結果

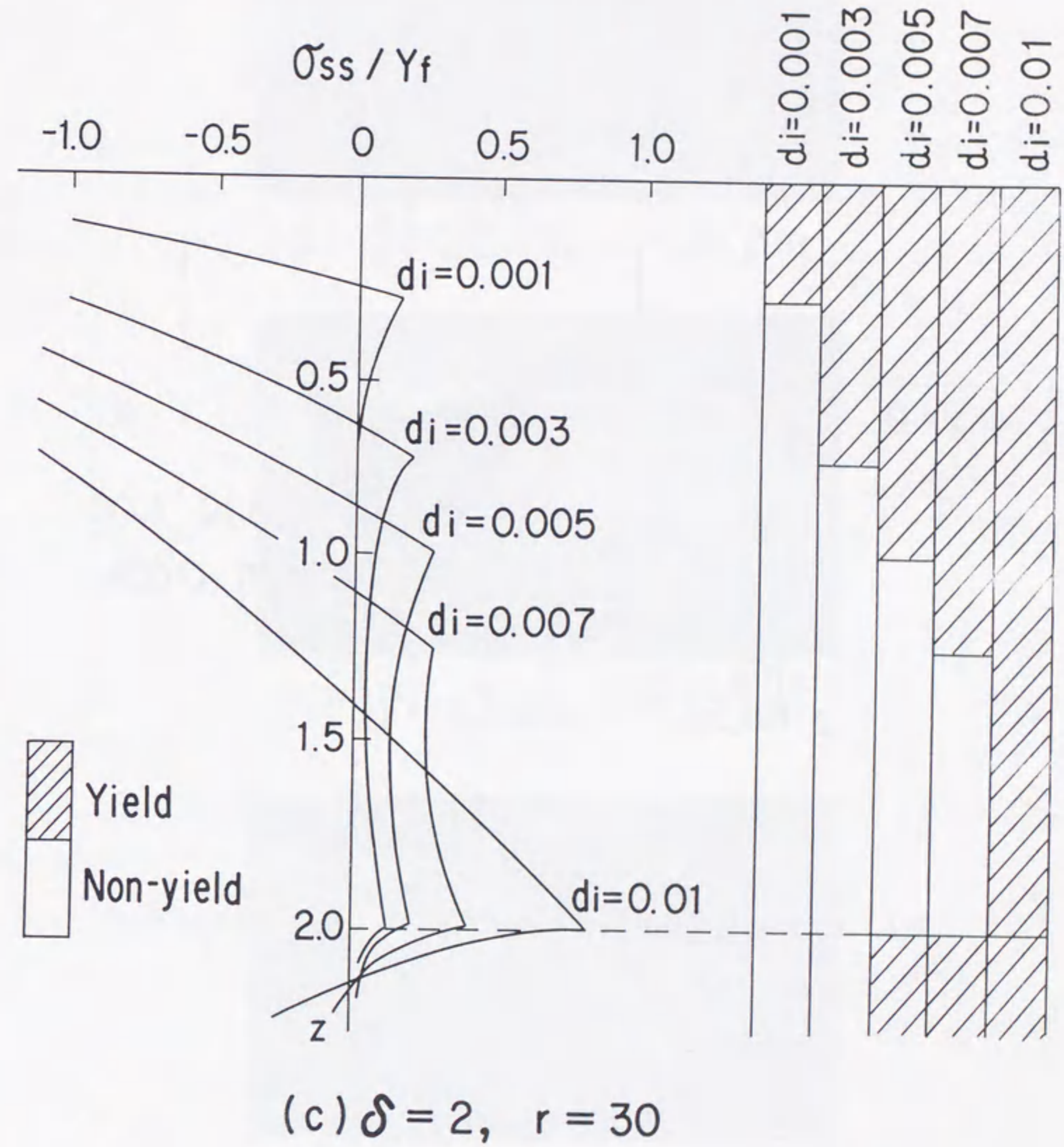


図7. 9 圧子直下の応力分布の計算結果

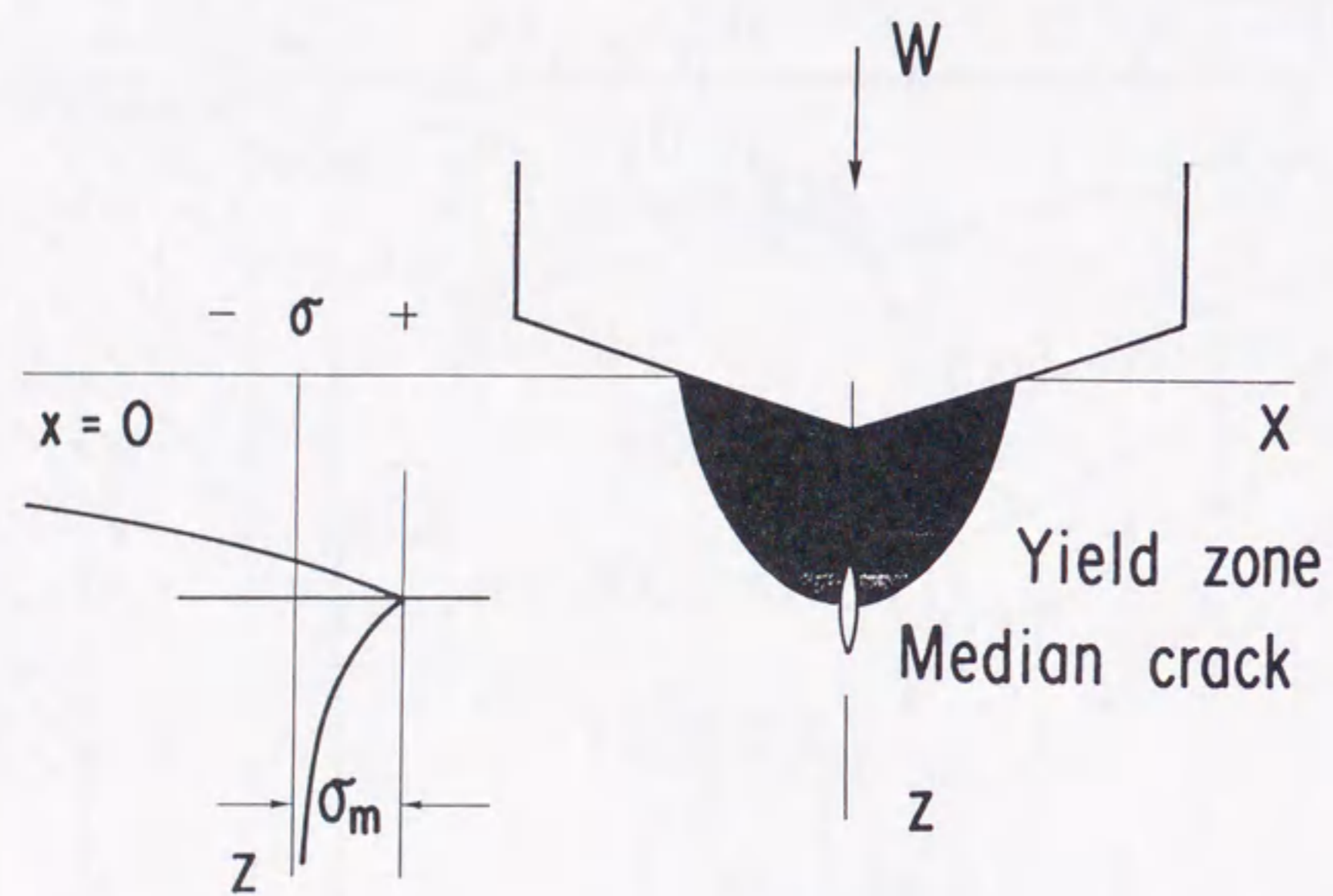
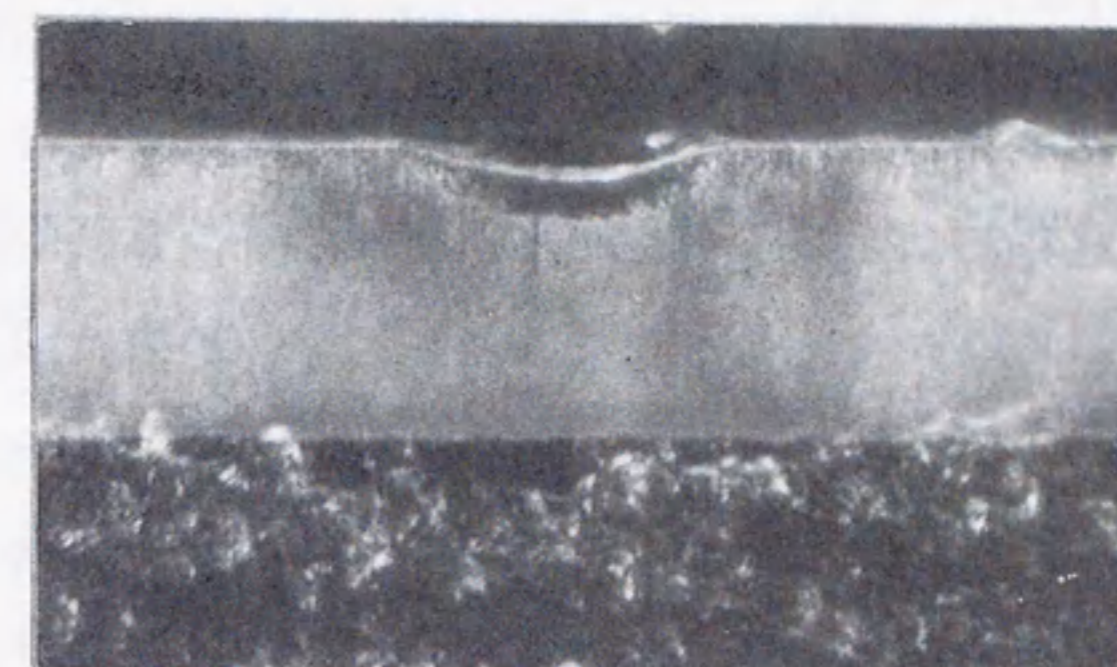


図7. 10 均質な脆性材料におけるメジアン亀裂の発生モデル

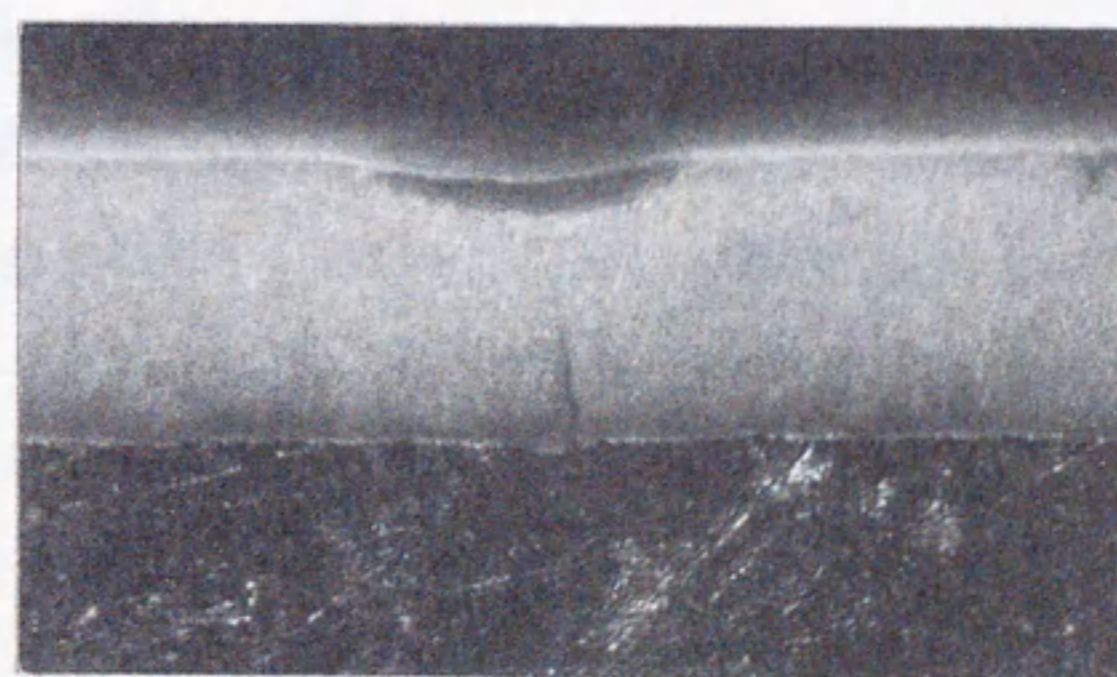
┌ 10 μ m



(a) $\delta = 20\mu\text{m}$, $r = 32\mu\text{m}$



(b) $\delta = 10\mu\text{m}$, $r = 32\mu\text{m}$



(c) $\delta = 20\mu\text{m}$, $r = 150\mu\text{m}$

図7. 11 引っかき痕の断面観察結果

7.5 結論

薄膜ディスク用アルマイト基板の引っかき試験を行い、引っかきによる亀裂の発生・進展状態が均質な脆性材料のそれとはかなり異なることを示した。さらに、硬質脆性膜に特有な亀裂について、その発生メカニズムを有限要素法による弾塑性応力解析と実験から明らかにした。ここで得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 膜厚の薄い試料を先端の鈍な圧子で引っ掻いた場合には、均質材とは逆に、メジアン亀裂の方が円弧亀裂よりも低荷重で発生する。
- (2) 膜厚が厚くなり、かつ圧子の先端が鋭くなるにつれてこのような亀裂の発生パターンは逆転し、均質な脆性材料と同様に円弧亀裂の方が低荷重で発生するような傾向を示す。
- (3) 引っかきによって硬質脆性膜に生ずるメジアン亀裂には二つの発生形態がある。一つは膜厚が厚く、圧子が鋭い時に顕著に現れる形態であり、亀裂は圧子直下の弾塑性境界に現れる引っ張り応力によって発生し、垂直下向きに進展する。これは均質な脆性材料の引っかき試験でみられるものと類似したメカニズムによると考えられる。
- (4) もう一つのメジアン亀裂は、膜と下地の界面に発生し、垂直上向きに進展するものであり、これがアルマイトのような硬質脆性膜に特有な亀裂発生形態である。これは、圧子直下の弾塑性境界の引っ張り応力が大きくなる前に軟質な下地が塑性変形し、下地と膜の界面に現れる大きな引っ張り応力によって発生するものである。この場合、メジアン亀裂の発生に先立って、下地の塑性変形が起こっている。

第8章 3. 2ギガバイト集合形磁気ディスク装置用浮動ヘッドと薄膜ディスクの開発^{(60), (61)}

8.1 緒言

ファイル記憶の中心的な役割を果たしている磁気ディスク装置は、情報処理システム設備の中で占める価格、占有面積の割合が大きいいため、その経済化、小形化、高信頼化が強く望まれている。NTTでは、磁気ディスク装置の小形化、高信頼化を目標に研究を行い、昭和56年に210mm径のディスクを用いた400メガバイト/スピンドル容量の小形高密度磁気ディスク装置を8台搭載した3.2ギガバイト集合形磁気ディスク装置(JS4380)を実用化した。⁽⁶²⁾

3.2ギガバイト集合形磁気ディスク装置は、面記録密度 $2.4 \times 10^6 \text{ bit/cm}^2$ (線記録密度 550 bit/mm 、トラック密度 43 track/mm)の高記録密度と5年以上の無保守運転を実現している。記録密度を高めるためには、磁気ヘッドの電磁変換特性および磁気ディスクの磁気特性の向上とともに浮動ヘッドの浮上量を微小化することが重要であり、本装置ではスパッタ形ディスクおよびめっき形ディスクの2種類の薄膜ディスクを用い、浮動ヘッドの浮上量をそれぞれのディスクに対して $0.27 \mu\text{m}$ 、 $0.22 \mu\text{m}$ にまで微小化することによって前記記録密度を実現した。浮動ヘッドの浮上量を微小化するためには、微少なすきまで安定に浮上する浮動ヘッド機構を設計するとともに、ディスク面の表面精度を向上させる必要があり、本装置用の薄膜ディスクでは、その突起除去に適したヘッドバニッシュ法を採用している。

3.2ギガバイト集合形磁気ディスク装置では、コンタクトスタートストップ(CSS)方式を採用しており、ディスクの起動停止時におけるヘッド・ディスクの摩耗を軽減するための表面潤滑技術が不可欠である。薄膜ディスクの特徴の一つは、その表面平滑性の高さであるが、鏡面仕上げされた浮上面を持つ浮動ヘッドが平滑なディスク上に長期間接触放置されると、両者が強い力で吸着する現象が起こる。この吸着力が浮動ヘッドの支持機構の座屈荷重を越えるとCSS動作時に支持機構を破壊し、ヘッドクラッシュと呼ばれる壊滅的な障害を引き起こ

す危険性がある。そこで、本装置の開発にあたっては、浮上特性の面だけでなく、耐吸着性向上の観点からの浮動ヘッド機構設計を行った。また、吸着力は周囲の温湿度と表面潤滑剤の塗布量に依存するため、本装置ではディスクエンクロージャ (DE) 内の湿度を50%以下に保つ吸湿機構⁽⁶³⁾を採用するとともに、湿度50%以下の条件で吸着現象が生じることなく、かつ十分な耐CSS特性を保証するディスクの表面潤滑を実現している。

本章では、3.2ギガバイト集合形磁気ディスク装置の高記録密度化、高信頼化のキーテクノロジーである耐吸着性に優れた微小浮上すきまの浮動ヘッド機構設計と、高信頼性を実現するための薄膜ディスクの表面平滑技術と表面潤滑技術について述べる。

8.2 浮動ヘッド

空気の粘性に基づく動圧効果を利用して記録再生用のヘッドコアを磁気ディスク上の微小なすきまで安定に浮上させる浮動ヘッド機構には、以下の性能が要求される。

- (1) 加工・組立が容易で、組立後の浮上すきまのばらつきが小さいこと。
- (2) ディスク面の振動やうねりに対するコア部の浮上量変動が少ないこと。
- (3) 装置のCSS動作に対して、ヘッド・ディスクの摩耗や損傷が小さいこと。

本装置では、小径(直径210mm)の薄膜ディスクを採用し、かつ従来の365mm径の大径ディスク装置と同様に面当たり二つのヘッドを配置する構成となっており、設計にあたっては以下の点に留意した。

- (1) 支持機構の小形化、浮上量の微小化にともない、浮上量のばらつきに対する要求条件はより厳しくなる。そのため、ばらつきを最小とするヘッド形状・寸法の最適化とともに、各ヘッド諸元に対する適正な公差配分を行う。
- (2) 小径ディスクを用いる場合には、ディスク面うねりに対する追従性が支配的となる。このため、うねりに対する追従特性を明らかにし、浮上安定性の高いヘッド形状・寸法を定める。

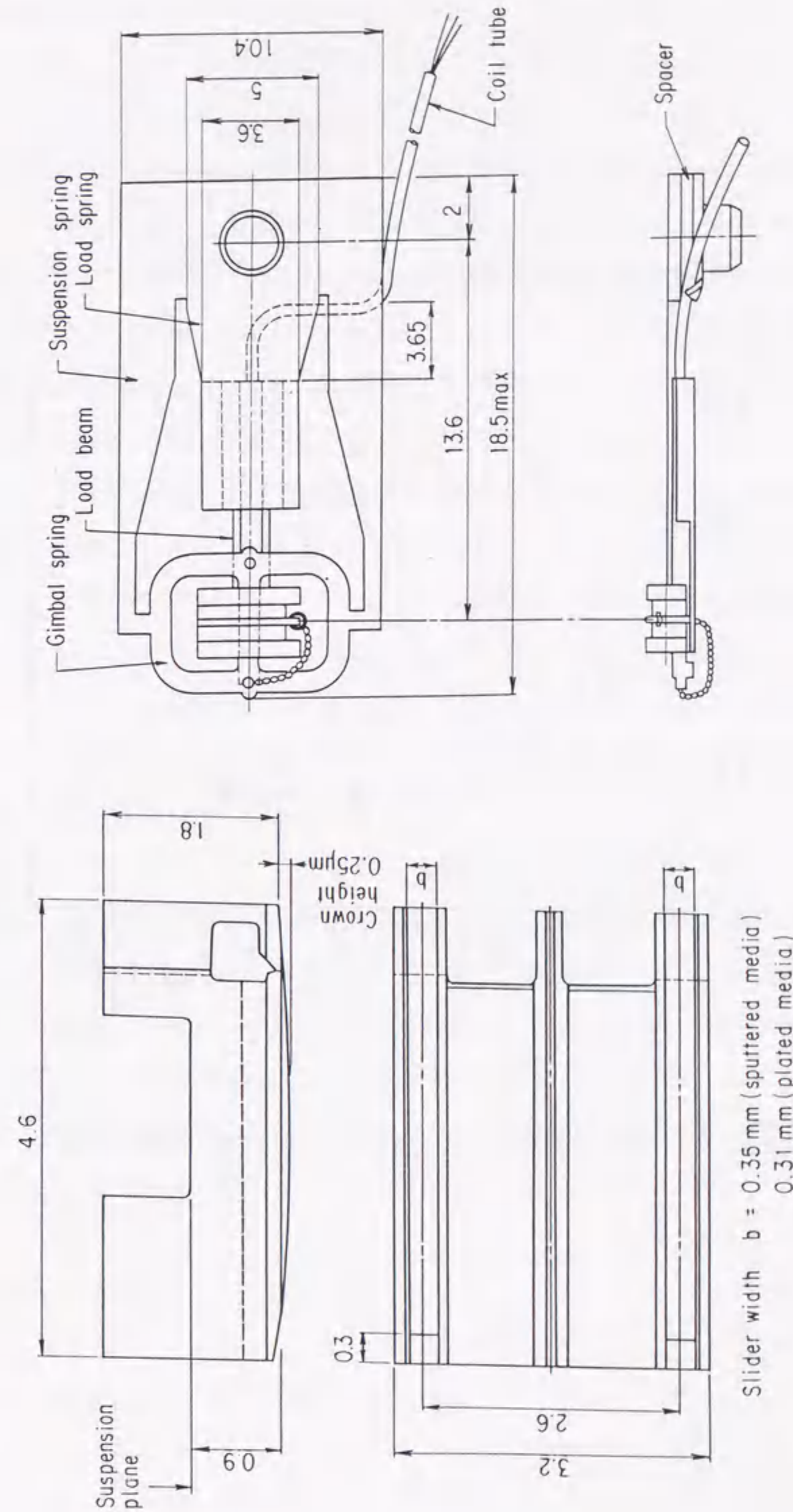


図8.1 浮動ヘッドの構造

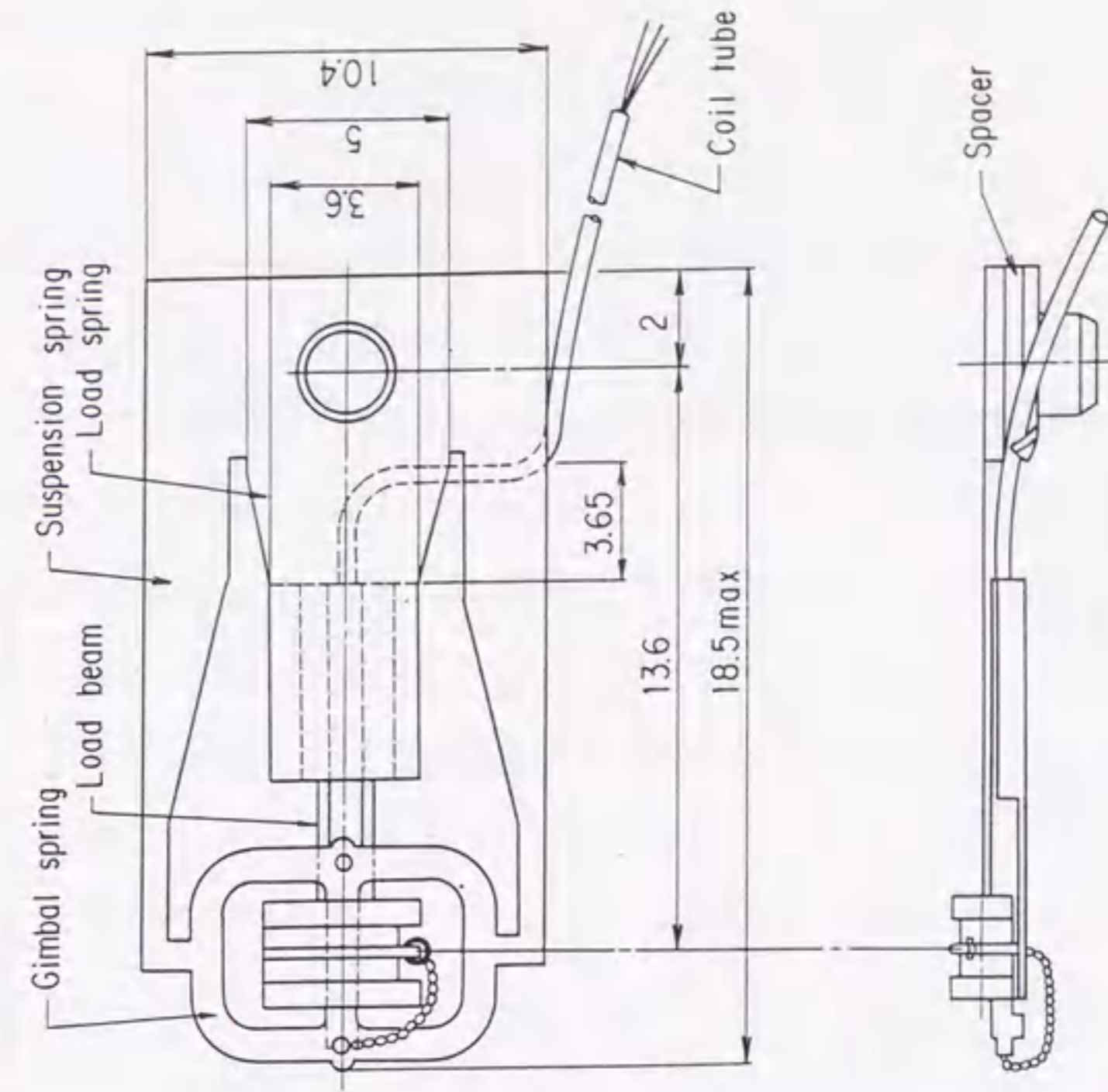


図8.2 ジンバル負荷ばね部構成図

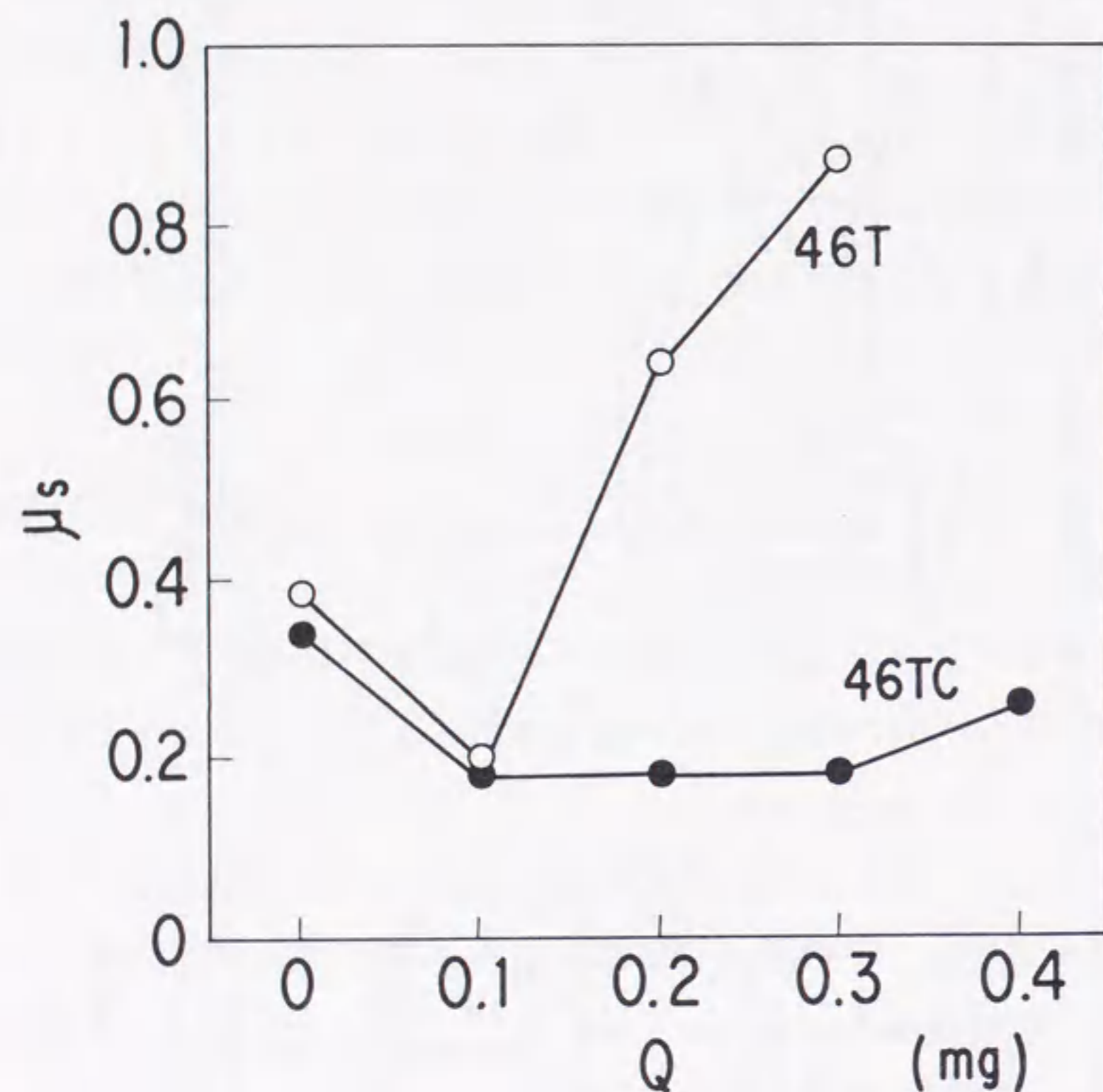


図8.3 潤滑剤塗布量とヘッド・ディスク間の静摩擦係数

さらに、本装置では平滑な薄膜ディスクを用いるため、従来の塗布ディスク以上にヘッド・ディスクの吸着が問題となる。そこで、以下についても留意した。

(3) ヘッドの浮上面に円筒面加工を施すことにより、ディスクとの吸着力を減らすとともに、支持機構の走行方向の座屈荷重を高める。

図8.1に、本浮動ヘッド機構のヘッド形状と主要寸法を示す。本浮動ヘッドは、長さ4.6mmの浮上面を持つ双胴形で、ディスク面との接触面積を減らすことによって吸着力を軽減することを目的に、浮上面を円筒面状(クラウン量0.25μm)に加工している。記録再生をつかさどるコアギャップ部は、最小すきまと一致するように、ヘッドの流出端から0.7mm前方に設けている。また、シーク、暴走衝突時の浮上量変動を抑圧するため、ヘッドの背面溝高さをヘッドの高さ方向重心と一致させ、ローリングモーメントの発生を抑えた。

本浮動ヘッド機構のジンバル・負荷ばね部の構造を図8.2に示す。基本構造は800メガバイト磁気ディスク装置⁽³⁴⁾のそれと同一であるが、小径ディスクに対して2ヘッド/面の構成とするため、全体を小形化している。また、ヘッド・ディスクの吸着に対する配慮から、ジンバル支持部の幅を広くし、走行方向の強度を高め、座屈荷重を約300mNとした。

図8.3に、本浮動ヘッド(46TCと略す)を本装置用のめっき形薄膜ディスク上に放置した時の静摩擦係数 μ_s と面当たりの潤滑剤の塗布量の関係を、800メガバイト装置用の長さ4.6mmの平坦な浮上面を持つ浮動ヘッド(46Tと略す)と比較して示す。46Tヘッドの場合には、面当たりの塗布量が0.1mgを越えると急激に摩擦係数が上昇するのに対し、46TCヘッドでは、0.4mg程度の塗布量でも静摩擦係数が0.3程度であり、円筒面加工を施した効果が高いことがわかる。

8.3 薄膜ディスク

8.3.1 設計方針および仕様

本装置用薄膜ディスクは、装置の高信頼度化のため、以下の条件を満たすことが必要である。

- (1) ポジショナのシーク・暴走時にもヘッドとディスクの非接触を保証すること。
- (2) CSSによるヘッド・ディスクの摩耗損傷が軽微であり、電磁変換特性の劣化がないこと。
- (3) 装置を長時間停止したときにも、ヘッド・ディスクに激しい吸着が生じないこと。

これらを実現するためには、ディスクの表面精度および表面潤滑性能などの機械特性の向上が要求される。表8.1に薄膜ディスクの機械特性の仕様を示す。

本装置では、ヘッド浮上量が800メガバイト磁気ディスク装置用ヘッドの3/5~3/4まで微小化されていることを考慮し、表面あらさ、ランアウト、加速度の仕様値を厳しくしている。特に、ヘッドの動的浮上量変動の主原因となる加速度に関しては、ヘッドの動特性を考慮して、内周・外周で別個に規定した。また、高速シーク・暴走等の過酷な条件下でも非接触浮上を保証するため、浮上量の70%を突起高さの上限とした。

表面潤滑性能に関しては、長期にわたる信頼性を保証するため、摩擦・吸着の仕様をそれぞれ $\mu_s < 0.3$ 、 $F_s < 60 \text{ mN}$ とするとともに、20000回のCSS後も摩耗損傷や電磁変換上の劣化が無いことという仕様を課した。特に、激しい吸着はヘッドを支える支持ばねを座屈させ、CSS時にヘッド・ディスクに損傷を与える危険性が高いことを考慮し、吸着に関しては、いかなる条件下でも支持ばねの座屈荷重300mNの1/5以下を保証させる仕様とした。

以下に、これらの仕様を満足する薄膜ディスクを安定に実現するための表面平滑化技術と表面潤滑技術について述べる。

8.3.2 表面平滑化技術

磁気ディスク装置の信頼性を保証するためには、コンタクト・スタート・ストップ時以外は、ヘッドとディスクの非接触状態を保つことが必要である。

ヘッド・ディスクの接触の直接の原因は、ディスクに存在する突起であり、本装置用薄膜ディスクでは突起高さの仕様をヘッド浮上量の70%以下と規定した。この値は、ヘッド側で許容する静的および動的浮上量変動各10%に、さらに、

表8.1 機械特性仕様

| Item | Spec. | Sputtered disk ($h_0 = 0.27 \mu\text{m}$) | Plated disk ($h_0 = 0.22 \mu\text{m}$) | Note |
|--|-------|--|--|--------------------------------------|
| Run-out | | $\leq 4.0 \mu\text{m}$ | | Outer-most-track |
| Acceleration | | $\leq 2.5 \text{ m/s}^2$ $\leq 4.0 \text{ m/s}^2$ | $\leq 2.0 \text{ m/s}^2$ $\leq 4.0 \text{ m/s}^2$ | Inner-most-track Outer-most-track |
| Roughness | | $\leq 0.01 \mu\text{m } R_a$ | | Data zone |
| Projection height | | $\leq 0.18 \mu\text{m}$ | $\leq 0.15 \mu\text{m}$ | |
| Static frictional coefficient, μ_s | | ≤ 0.3 ≤ 0.3 | | |
| Sticking force, F_s | | $\leq 6.0 \text{ mN}$ | | |
| CSS | | $\geq 20000 \text{ cycles}$ | | No deterioration in R/W signals |

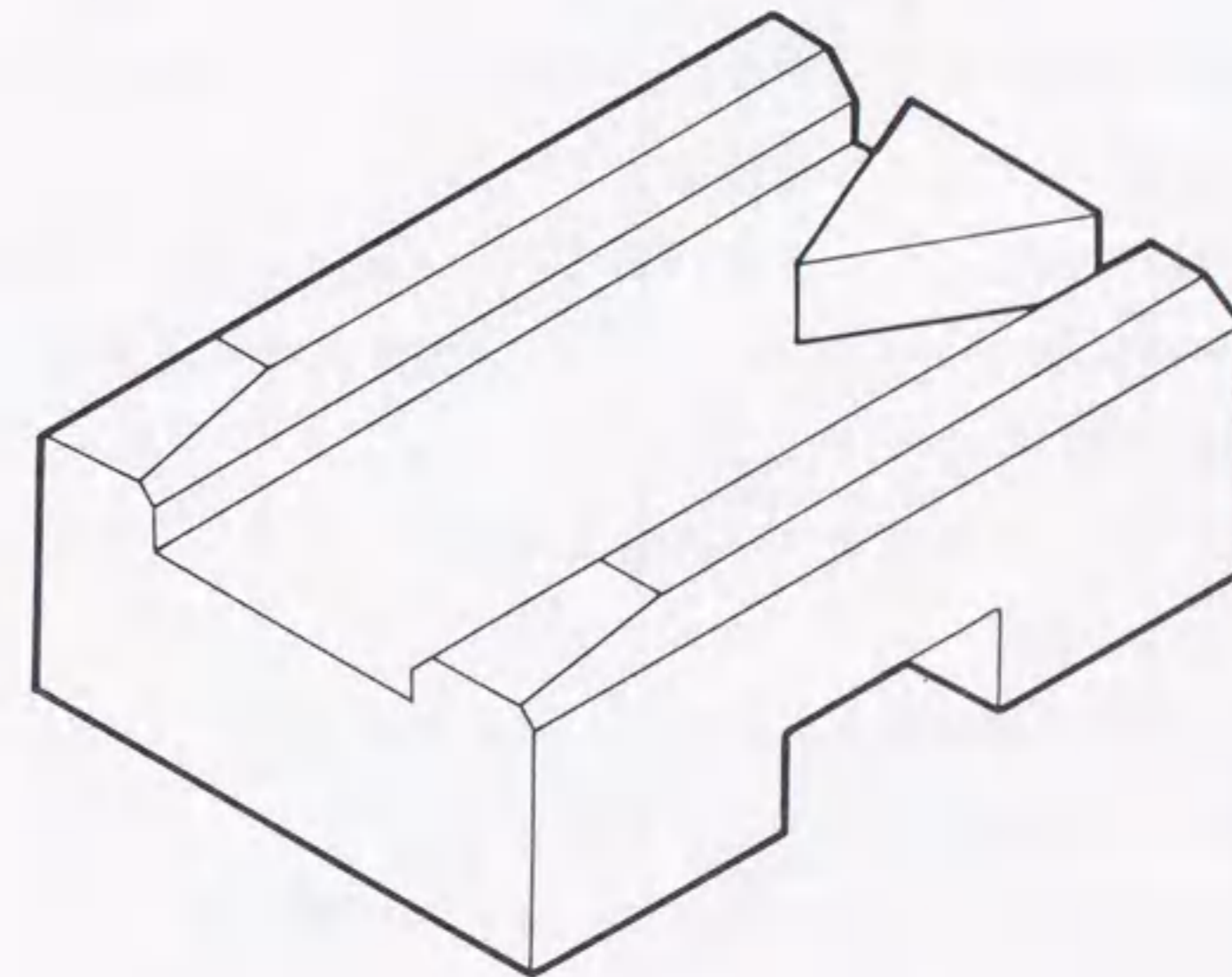


図8.4 バニッシュヘッド

10%のマージンを加味したものである。

この仕様値を実現するため、 $R_a = 0.01 \mu\text{m}$ 以下の表面を得るポリシング加工に適したディスク基板素材の選定および表面処理を行うとともに、塵埃管理に改良を加えた⁽⁶⁴⁾。さらに、ポリシング加工では取りきれない微小な突起を除去するため、ヘッドバニッシュと呼ばれる仕上げ加工を採用した。ヘッドバニッシュとは、サファイア等の硬質な材料で作られた高荷重・低浮上すきまの浮動ヘッドを用いてディスクの浮上保証領域を全面走査することによって高い突起を削り取ろうとする仕上げ加工の一種である。NTTで昭和53年に実用化した800メガバイト磁気ディスク装置でも、円筒面形状のヘッドの軸受面に微小な凹凸を形成したばね荷重3000mNのバニッシュヘッドを開発し⁽³⁾、 $0.35 \mu\text{m}$ という、塗布形の磁気ディスクを搭載した装置としてはその当時でも画期的な微小浮上すきまを実現した。しかし、3.2ギガバイト磁気ディスク装置に採用された薄膜ディスクでは、その磁性膜あるいは保護膜が塗布形ディスクに比べきわめて薄いため、ばね荷重が3000mN程度の塗布形ディスク用高荷重バニッシュヘッドではディスクを傷つける危険性が高い。そこで、本装置の実用化にあたっては、薄膜ディスクの突起除去を目的として、図8.4に示す押し付け力200mNの新しい形式のバニッシュヘッドを開発した。このヘッドはサファイア製のテーパフラット形の浮動ヘッドの中央に三角形のブロックを設けたものであり、その綾部で突起を削り取ることを特徴としている。

一方、突起の検出に関しても、800メガバイト磁気ディスク装置の実用化過程で開発したアコースティックエミッション(AE)計測法を応用したヘッド・ディスクの接触検出法⁽³⁰⁾に、

(1) 第2章で述べた大形の高感度AEセンサの使用が可能なAEスライダアセンブリの採用

(2) 測定周波数帯域、しきい値電圧レベルの最適化などの改良を加え、高精度の突起検出法を確立した。

図8.5に初期の突起分布の異なる3枚のめっき形薄膜ディスクについて、本ヘッドのバニッシュ効果をAE計測法によって調べた結果を示す。ここでは最内周での浮上量を $0.1 \mu\text{m}$ に設定したヘッドで、15往復のバニッシュを行った。1往復に要する時間は45秒である。本バニッシュヘッドの採用により、初期に

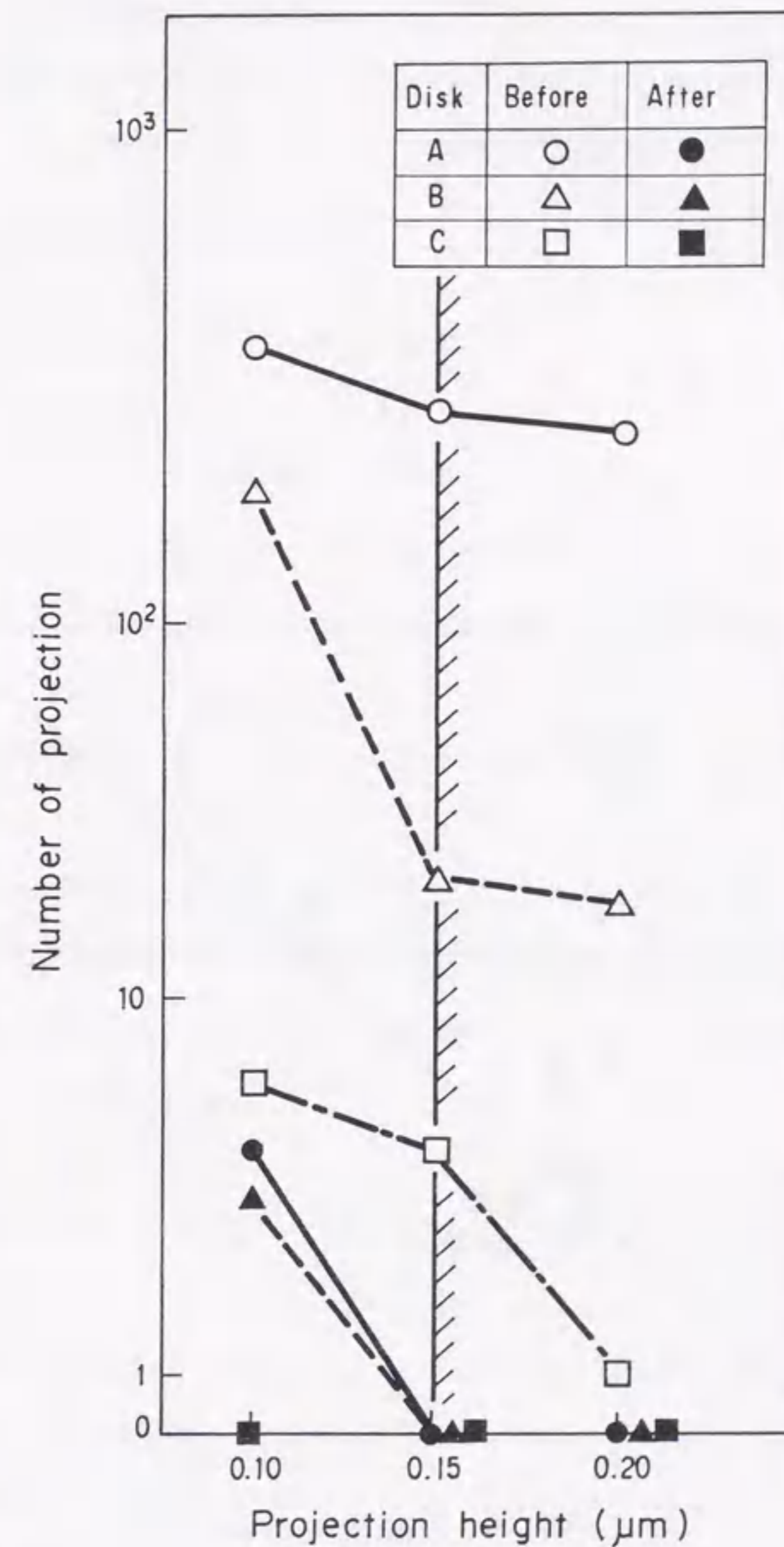


図8.5 バニッシュヘッドによる突起の除去

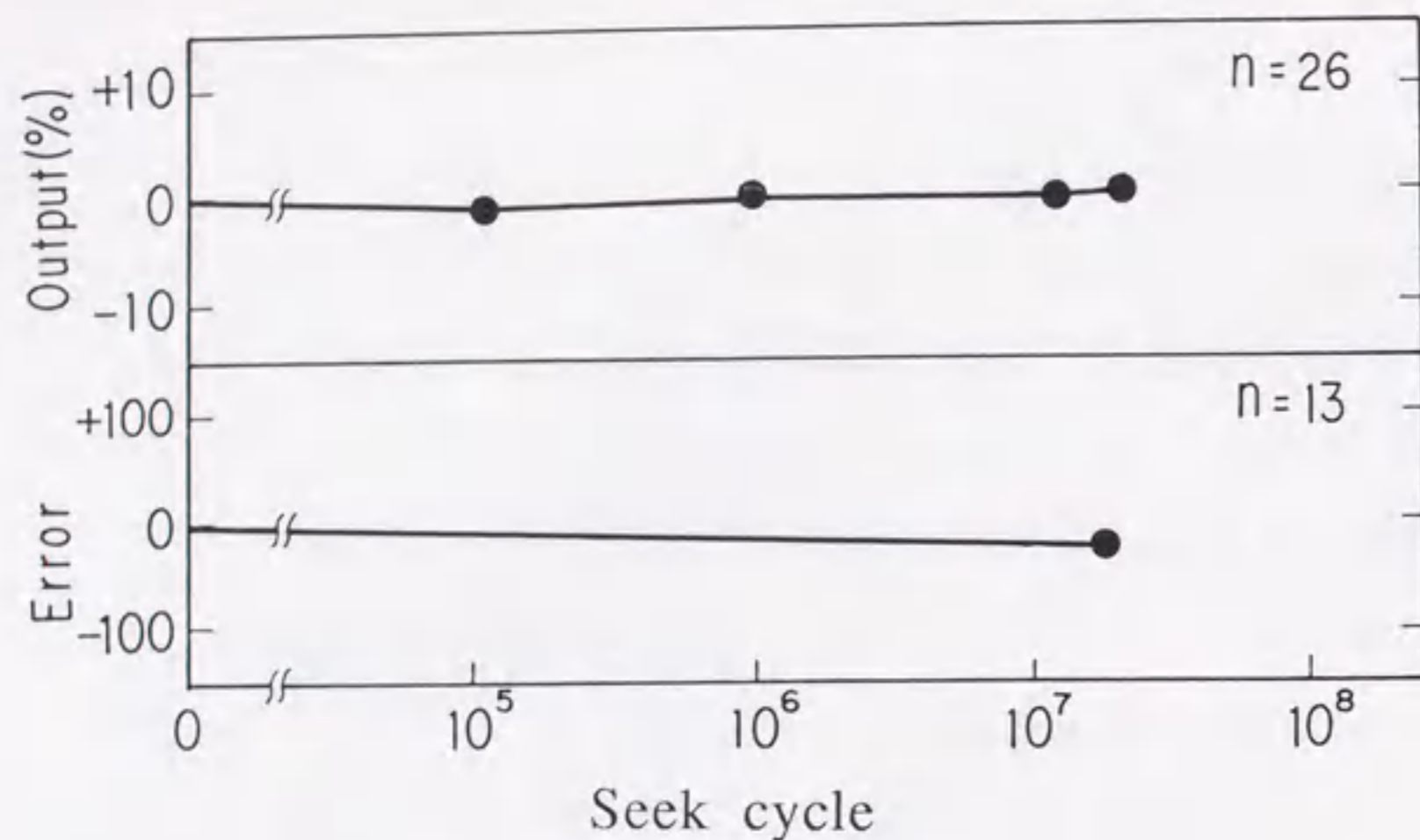


図8.6 連続シーク試験結果

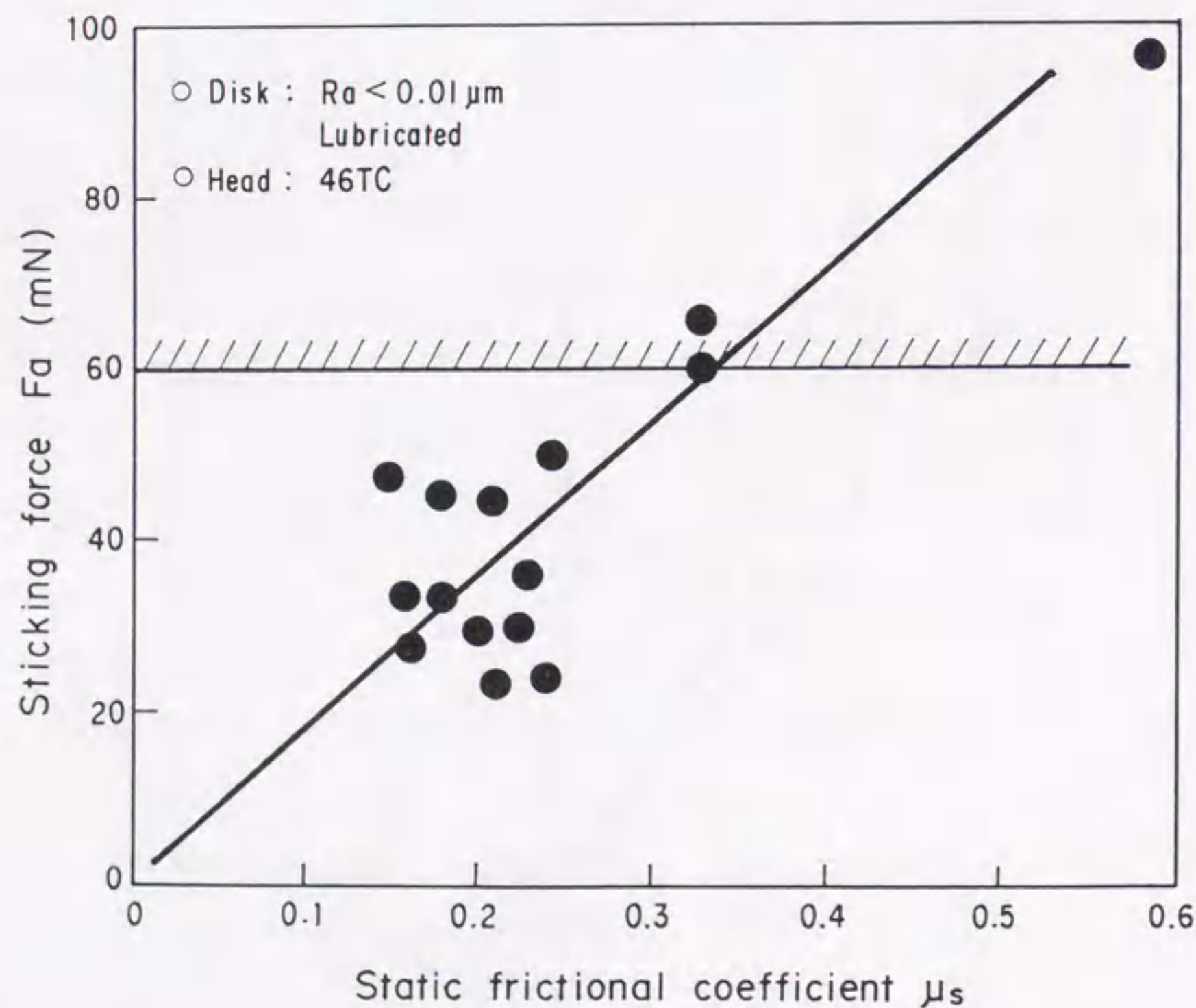


図8.7 静摩擦係数と吸着力の関係

突起の多いディスクでも短時間で突起高さ $0.15\mu\text{m}$ 以下の仕様値を満足させることが可能となった。また、スパッタ形ディスクについても、本方法で突起高さの仕様 $0.18\mu\text{m}$ 以下を実現した。

図8.6に上記の突起仕様を満足するディスクを用いて実機による連続シーク試験を行った結果を示す。突起高さの仕様を満足するディスクでは、 3×10^7 以上のシーク後もヘッド、ディスクともに全く損傷は無く、電磁変換特性の劣化やディスクエラーの顕著な増加は認められず、シークに対する信頼性を十分に保証しうることが確認できた。

8.3.3 表面潤滑技術

CSS方式を初めて採用したIBM3340、3350形磁気ディスク装置以来、ディスク表面にはヘッドとディスクの摩擦・摩耗を低減する目的で潤滑剤を塗布することが一般的になっている。

塗布ディスクの摩擦摩耗特性に及ぼす潤滑剤の影響については、第5章で述べたように、

- ①潤滑剤の塗布量には良好な表面潤滑状態が得られる適正領域が存在し、塗布量が少ない場合には摩耗が、多い場合には摩擦の急増がみられる。
- ②潤滑剤塗布量が多い場合には、ヘッドとディスクを長期間接触放置したときに激しい吸着現象が起こる。

ことが、明らかにされている。

ところで、本薄膜ディスクのように表面が平滑なディスクでは、表面あらかの大きいディスクに比べ、同一の塗布量でもヘッド・ディスク間の摩擦力が大きくなり、吸着に対する危険性が高いことが指摘されており、同じ潤滑剤を用いる場合、表面あらかの良い薄膜ディスクで塗布形ディスクと同一の耐吸着性を実現するためには、潤滑剤の塗布量をかなり減らすことが必要となる。しかしながら、潤滑剤塗布量を減らすことは、摩耗増加の危険性を高めるだけでなく、均一な潤滑膜の形成を困難にする。

本装置の実用化にあたっては、各種の表面潤滑剤の摩擦摩耗特性を評価し、以下の仕様を満足する良好な表面潤滑状態を安定に実現できる表面潤滑剤の種類お

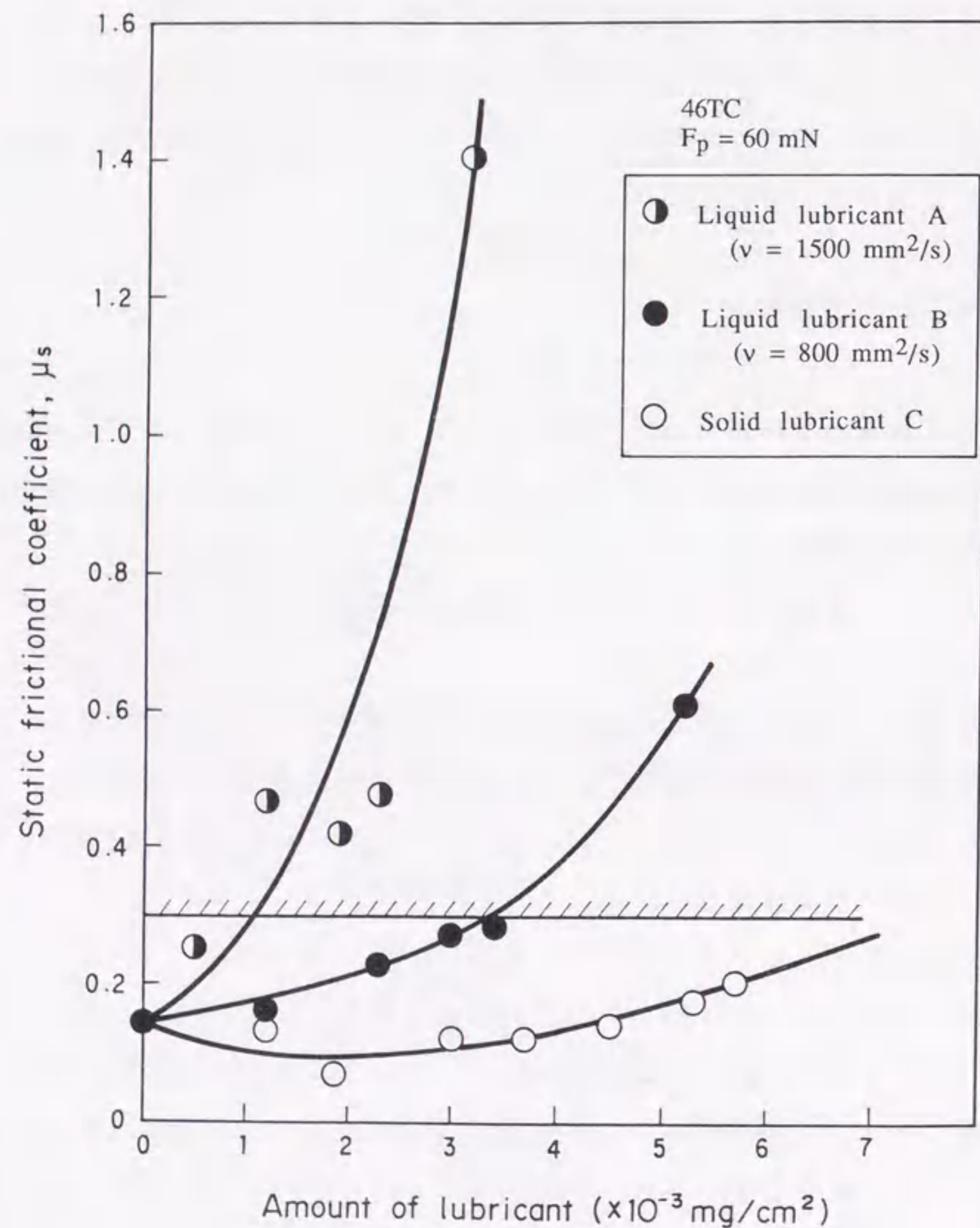


図8.8 静摩擦係数に及ぼす潤滑剤塗布量の影響

よびその塗布量を明らかにした。

- (1) 装置の耐用年数に想定されるCSS回数4000回の5倍、すなわち20000回のCSS後も、ヘッド・ディスクに明瞭な摩耗損傷がなく、電磁変換特性の劣化が認められないこと。
- (2) 長時間のヘッド・ディスクの接触放置による吸着力の飽和値F₀が支持ばねの座屈荷重300 mNの1/5以下、すなわちF₀ < 60 mNであること。

ヘッド・ディスクの接触直後の静摩擦係数 μ_s とF₀の間には図8.7に示すような関係がある。この関係から、吸着の仕様F₀ < 60 mNを保証するためには、 μ_s を0.3以下にしなければならないことがわかる。そこで吸着の面からの潤滑剤の最適化においては、 μ_s < 0.3を安定に実現することを目標にした。

図8.8に、スパッタ形ディスクと本装置用の46TC浮動ヘッドの組合せにおける静摩擦係数 μ_s と潤滑塗布量の関係を示す。ここでは、潤滑剤として20°Cにおける動粘性係数 ν が1500 mm²/s、800 mm²/sのPFPE (Perfluoro-poly-ether)系の液体潤滑剤A、Bと平均粒径200 nmのPTFE (Poly-tetra-fluoro-ethylene)系の固体潤滑剤Cを用いた。なお、潤滑塗布量は単位面積当りの重量で示した。

3種類の潤滑剤の摩擦特性を比較すると、液体潤滑剤では粘度の低いBの方が塗布量が増加しても良好な摩擦特性を示す。しかし、固体潤滑剤はさらに良い特性を示しており、 μ_s < 0.3を保証する塗布量の上限は液体潤滑剤Bに比べても2倍になっている。

一方、CSSに関してはいずれの液体潤滑剤も μ_s < 0.3を実現できる塗布量では、20000回以上のCSSを安定に保証することが困難であった。それに対し、固体潤滑剤の場合には 1.8×10^{-3} mg/cm²という少ない塗布量でも20000回以上のCSSに耐える潤滑膜が得られた。

図8.9、図8.10に固体潤滑剤を塗布したスパッタ形ディスクでのCSS試験結果と吸着試験結果を示す。20000回のCSS後も出力および分解能の電磁変換特性の劣化はほとんどなく、かつヘッド・ディスクにも顕著な摩耗損傷は認められなかった。また、長期間のヘッド・ディスクの接触放置に対しても、吸着力は3日~4日で飽和し、その後はばらつきも含めF₀ < 60 mNの仕様を満

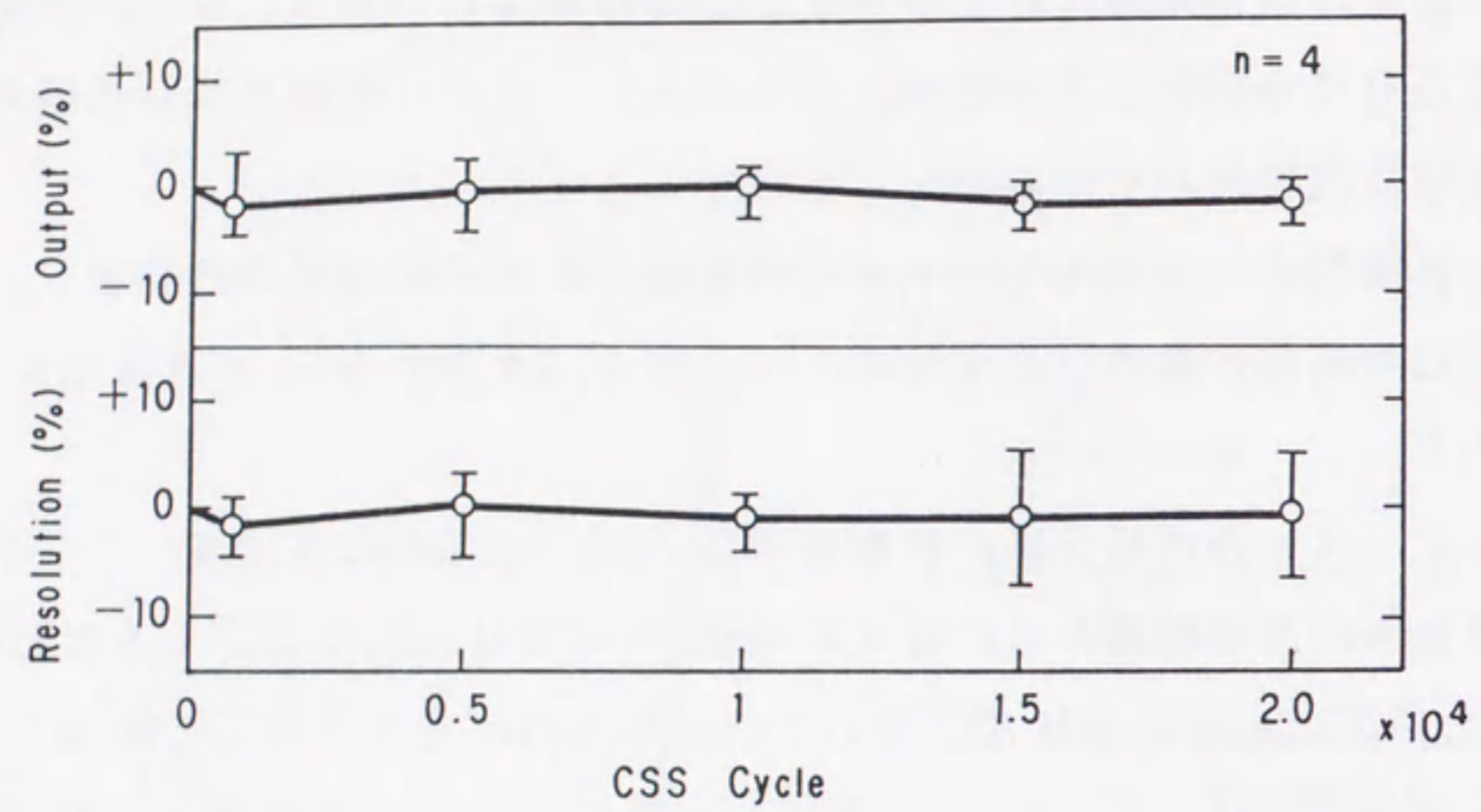


図 8. 9 C S S 試験結果

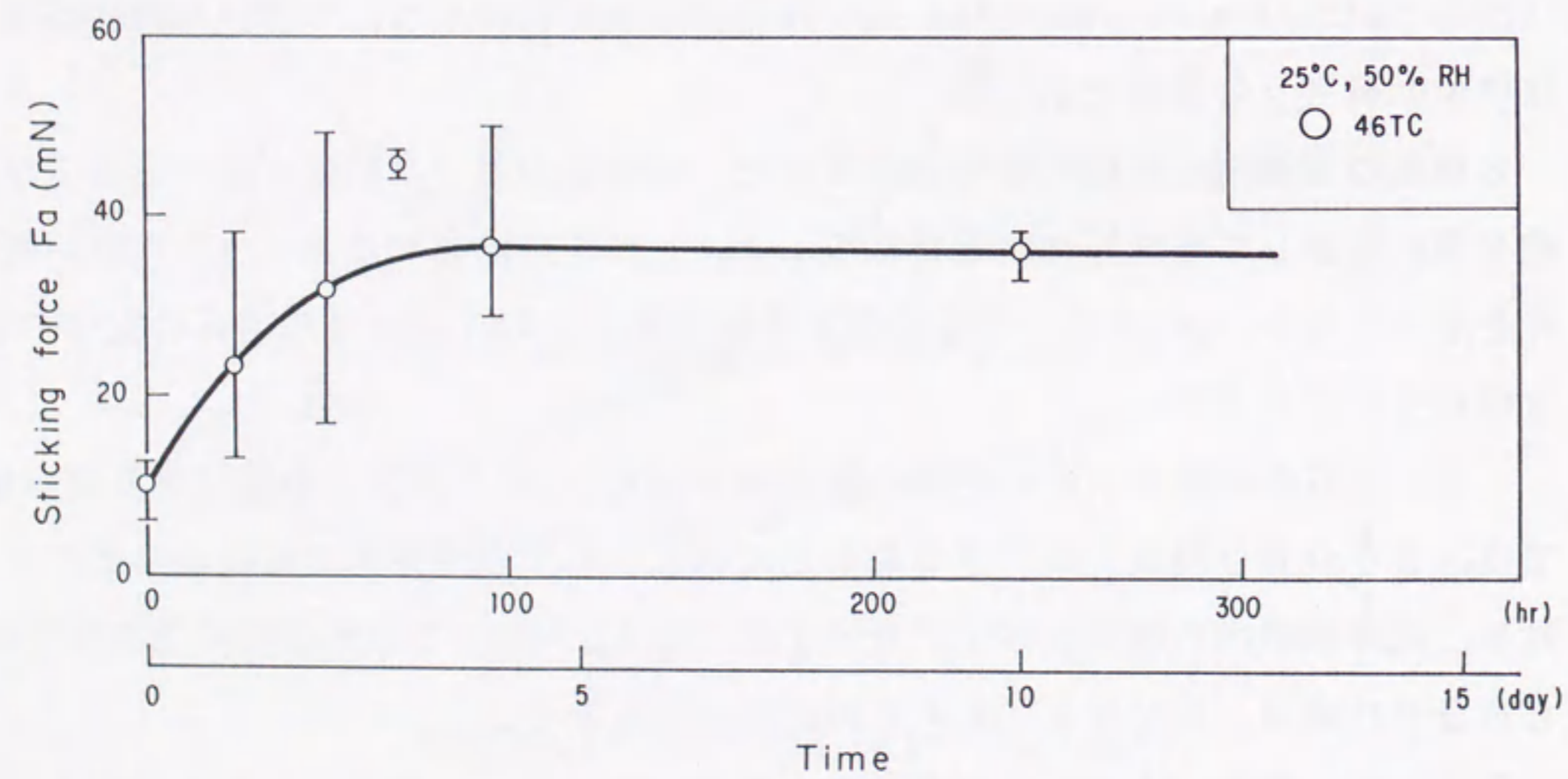


図 8. 1 0 吸着試験結果

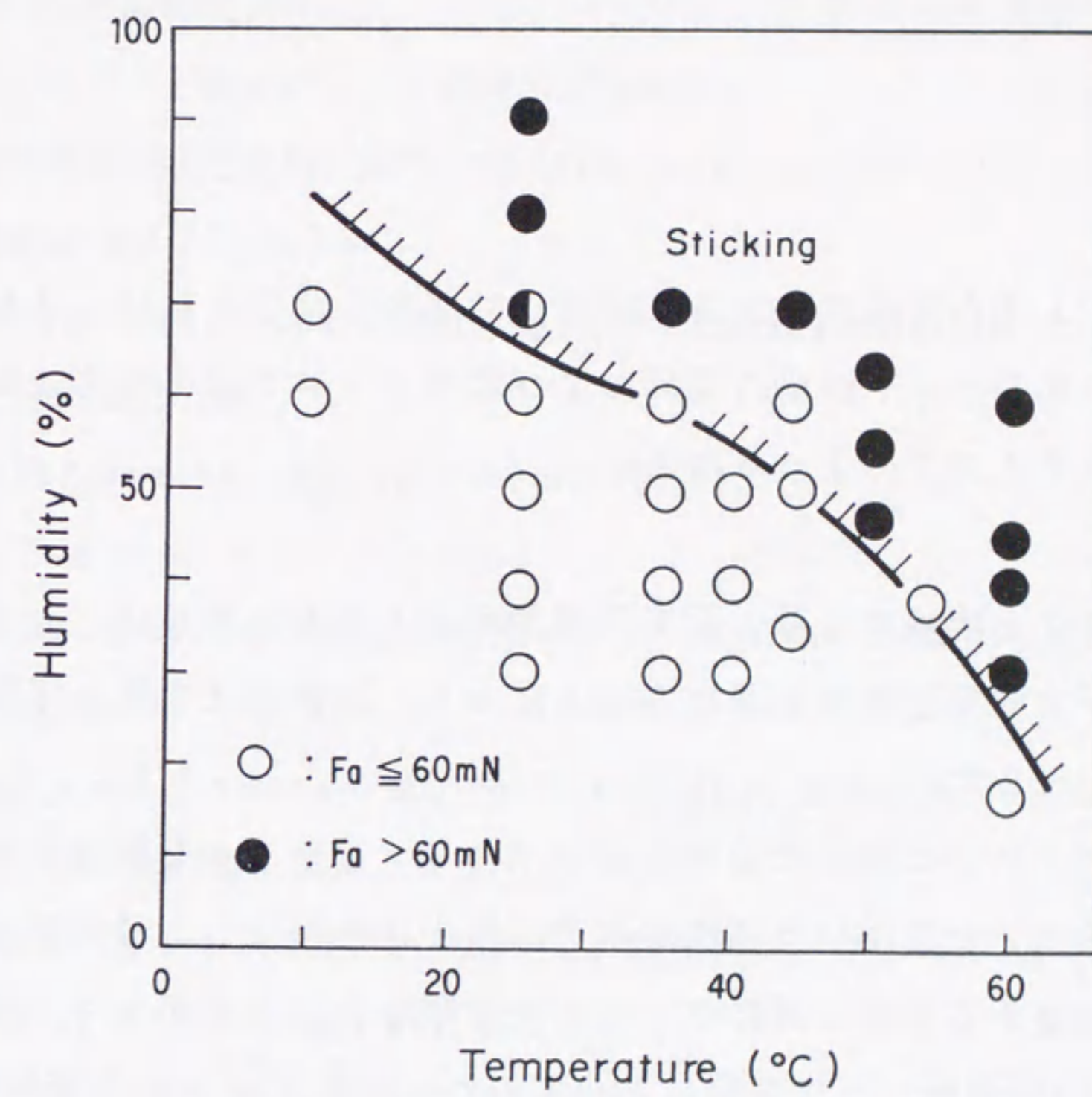


図 8. 1 1 吸着力に及ぼす温湿度の影響

足している。なお、めっき形ディスクでも同様の結果が得られた。

図8. 11は温湿度をパラメータとしたときの吸着力を測定した結果である。本装置が設置される環境の温度条件については、装置休止状態で温度5~45℃と規定されている。一方、湿度については、周囲環境の相対湿度85%に上がった場合でもDE内は50%以下という条件を課している。図8. 8の結果は、このようなDE内の最悪の温湿度条件下でも、 $F_a < 60 \text{ mN}$ を保証し、吸着に対する十分な信頼性を有することを示している。

8. 4 結論

3. 2ギガバイト集合形磁気ディスク装置用に開発した浮上量0.3 μm 以下を実現するための浮動ヘッド機構の設計および薄膜ディスクの平滑化技術、表面潤滑技術をまとめると以下のようなになる。。

- (1) ディスクと接触する浮上面を円筒面形状とするとともに、ジンバルばねの走行方向座屈荷重を高めることにより、耐吸着性の高い浮動ヘッド機構を実現した。
- (2) 薄膜ディスクに対して効率の高いバニッシュヘッドを開発するとともに、AEセンサを用いた高感度の突起検出法を確立し、最大突起高さの仕様を満足する平滑な薄膜ディスクを実現した。このディスクでは、 3×10^7 回の連続シーク試験においてもヘッドとディスクの接触による性能劣化は認められないことを確認した。
- (3) 平滑な薄膜ディスクに対しても、摩擦係数0.3以下を実現する表面潤滑技術を確立することにより、装置休止時におけるDE内の最悪の温湿度条件下においても吸着力60mN以下を安定に実現した。さらに、この潤滑条件で、20000回のCSS動作後も電磁変換特性の劣化が無いことを確認した。

参 考 文 献

- (1) Y. Mitsuya and S. Takanami,
Technologies for High Recording Density in Large-capacity Fast-access
Magnetic Disk Storage,
IEEE Trans. on Mag., MAG23-5(1987-9), pp.2674-2679.
- (2) 田子章男, 佐藤勇武, 西村力,
800メガバイト磁気ディスク装置用記録媒体,
電気通信研究所研究実用化報告, 28-10(1979-10), pp.2205-2228.
- (3) R.C. Tseng and F.E. Talke,
Transition from Boundary Lubrication to Hydrodynamic Lubrication
of Slider Bearings,
IBM J. Res. Develop., 18-6(1974-11), pp.534-540.
- (4) J.A.L. Potgiesser and J. Koorneef,
Mechanical Wear and Degeneration of the Magnetic Properties of Magnetic
Heads Caused by the Tape,
The Radio and Electronic Engineer, 44(1974), pp.313-318.
- (5) 田中久一郎, 三好和壽, 常川正春, 村山智一,
Mn-Znフェライトの摩擦と変形(第一報),
精密機械, 41-2(1975-2), pp.148-153.
- (6) 田中久一郎, 三好和壽, 広瀬智之, 村山智一,
Mn-Znフェライトのアプレシブ摩耗(第一報),
精密機械, 41-9(1975-9), pp.896-901.
- (7) K. Miyoshi, D.H. Buckley and K. Tanaka,
Effect of Wear on Structure-sensitive Magnetic Properties of Ceramic Ferrite
in Contact with Magnetic Tape,
ASLE Special Publication, SP-19(1985), pp.112-118.
- (8) F.W. Hahn,
Wear of Recording Heads by Magnetic Tape,
ASLE Special Publication, SP-16(1984), pp.41-48.

- (9)W.D.Kehr,C.B.Meldrum and R.F.M.Thornley,
The Influence of Grain Size on the Wear of Nickel-zinc Ferrite by Flexible Media,
Wear,31(1975),pp.109-117.
- (10)D.H.Mayer,
On the Abrasivity of γ -Fe₂O₃ and CrO₂ Magnetic Tapes,
IEEE Trans. on Mag.,MAG10-5(1974-9),pp.657-679.
- (11)F.W.Hahn,
Material Selection for Digital Recording Heads,
Proc.Intl.Conf. on Wear of Materials(1977),pp.199-203.
- (12)K.Ozawa,H.Wakasugi and K.Tanaka,
Friction and Wear of Magnetic Heads and Amorphous Metal Sliding against Magnetic Tapes,
IEEE Trans. on Mag.,MAG20-2(1984-3),pp.425-431.
- (13)花房広明,平塚広明,中村孔三郎,
磁気テープ 耐摩耗性の材料面からの検討,
電子通信学会論文誌(c),J65-C-5(1982-5),pp.315-321.
- (14)花房広明,平塚広明,岡田武司,
蒸着磁気テープ用プラズマ重合保護膜
電子通信学会論文誌(c),J66-C-9(1983-9),pp.690-691.
- (15)A.B.Van Groenou,
The Sphere-on-Tape: A Quick Test on Wear of Materials Used in Magnetic Recording,
Proc. 4th Intl.Conf. on Wear of Materials(1983),pp.212-217.
- (16)A.Levy,
Wear Testing,
Magnetic tape recording for the Eighties, NASA Ref. Publ.,(1982),pp.23-34.
- (17)B.Bhushan,
Assesment of Accelerated Head-wear Test Methods and Wear Mechanisms,
ASLE Special Publication,SP-19(1985),pp.101-111.

- (18)F.E.Talke and J.L.Su,
The Mechanism of Wear in Megnetic Recording Disk Files,
TRIBOLOGY international,8-1(1975-2),pp.15-20.
- (19)R.D.Weiss,
Abrasive Wear in Magentic Disc Recoding,
J.Appl.Phys.,50-3(1979-3),pp.2399-2401.
- (20)小口重光,田子章雄,武田有司,
磁気ディスク用ヘッド及び媒体の耐摩耗性,
電気通信研究所研究実用化報告,26-2(1977-2),pp.499-520.
- (21)T.Kita,K.Kogure,M.Mitsuya and T.Nakanishi,
New Method for Detecting Contact between Floating-head and Disk,
IEEE Trans. on Mag.,MAG16-5(1980-9),pp.873-875.
- (22)田中勝之,竹内芳徳,寺島精一郎,尾高聡子,斉藤翼生,
画像走査方式磁気ディスクスライダサブミクロン浮上測定装置の開発,
日本機械学会講演論文集,No.803-14(1983-10),pp.138-140.
- (23)A.Nigam,
A Visible Interferometer for Air Bearing Separation Measurement to Submicron Accuracy,
Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, 104-1(1982-1),pp.60-65.
- (24)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用い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,53-487(1987-3),pp.839-847.
- (25)D.K.Miu and D.B.Bogy,
Dynamics of Gas-lubricated Slider Bearings in Magnetic Recording Disk Files - Part 1 : Experimental Observation,
Trans. ASME,Journal of Tribology,108-4(1986-10),pp.584-588.
- (26)R.F.Hoyt,S.E.Millman and D.E.Horne,
Motion Pictures of Air Bearing Dynamics under Stressed Conditions,
IEEE Trans. on Mag.,MAG23-5(1987-9),pp.3459-3461.
- (27)尾上守男,

アコースティックエミッションの基礎と応用,

コロナ社(1976)

(28)C.E.Yeac-Scranton,

Novel Piezoelectric Transducer to Monitor Head-disk Interactions,

IEEE Trans. on Mag.,MAG22-5(1986-9),pp.1011-1016.

(29)岸輝雄,加藤明,栗林一彦,堀内良,

塑性変形におけるA Eの振幅分布,

金属学誌,41-9(1977),pp.898-904.

(30)A.Tago,S.Satoh,K.Kogure and T.Kita,

Methods of Estimating Mechanical Characteristics for Magnetic Recording Disks,

Review of the Electrical Communicatin Labs.,28-5,6(1980-5,6),pp.405-414.

(31)北寿郎,木暮賢司,三矢保永,

磁気ディスク用浮動ヘッドスライダの摩耗,

潤滑,29-3(1984-3),pp.195-200.

(32)T.Kita,K.Kogure and Y.Mitsuya,

Wear of the Flying Head of a Magnetic Disk File in Mixed Lubrication,

ASLE Special Publication,SP-16(1984-10),pp.35-40.

(33)R.Kaneko,Y.Mitsuya,K.Kogure and T.Kita,

Flying Heads with Sub-micron Spacing for Magnetic Recording Disks,

Tribology international,14-5(1981-10),pp.293-300.

(34)中西卓二,木暮賢司,越本泰弘,大原秀一,北 寿郎,

800メガバイト磁気ディスク装置用磁気ヘッド,

電気通信研究所研究実用化報告、28-10(1979-10),pp.2229-2261.

(35)三矢保永

スライダ気体軸受における分子平均自由行程の影響(有限要素法による解法),

日本機学会論文集,44,386(1978-10)pp.3593-3602.

(36)三矢保永・金子礼三

スライダ気体軸受における分子平均自由行程の影響(第2報 実験的検討),

日本機学会論文集,C編,46,405(1980-5),pp.542-549.

(37)C.Lin & R.F.Sullivan

An Application of White Light Interferometry in Thin Film Measurement,

IBM J.Res.Develop.,16,5(1972-5),pp.269-276.

(38)T.Tang,

Dynamics of Air-Lubricated Slider Bearing for Noncontact Magnetic Recording,

Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology,92-2(1971-4),pp.272-278.

(39)J.W.White and A.Nigam,

A Factored Implicit Scheme for the Numerical Solution of Reynolds Equation at Very Low Spacing,

Trans. ASME, Journal of Lubrication technology,102-1,(1980-1),pp.80-85.

(40)K.Ono,

Dynamic Characteristics of Air-Lubricated Slider Bearings Noncontact Magnetic Recording,

Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology,97-2(1975-4),pp.250-260.

(41)小野京右,木暮賢司,三矢保永,

サブミクロン領域における浮動ヘッドスライダの追従特性,

日本機学会論文集,C編,45-391(1979-3),pp.355-362.

(42)T.Kita,

The Influence of Aluminum Oxide Particles in Magnetic Coating on Head/Disk Wear,

STLE Tribology Trans.,掲載予定

(43)T.Kita,

The Influence of Disk Surface Lubrication on Head and Disk Wear,

STLE Tribology Trans.,投稿中

(44)P.A.Engel,F.E.Talke,R.G.Bayer,S.Chai,J.T.Martin,C.E.Adams and F.F.M.Lee,

Review of Wear Problems in the Computer Industry,

Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology,100-2(1975-4),pp.189-195.

(45)D.Tabor,

Mohs's Hardness Scale -- A Physical Interpretation,

- Proc. Phys. Soc., I, XVII, 3-B(1954), pp.249-257.
- (46) T. Kita, I. Satoh and T. Miyamoto,
The Physical Durability of γ -Fe₂O₃ Sputtered Magnetic Disks:
The Influence of the Thickness of the Alumite Substrate,
Proc. JSLE Int. Tribology Conf., (1987-7), pp.975-980.
- (47) 佐藤勇武,
ハードディスク用薄膜媒体,
日本応用磁気学会誌, 10-1(1986-1), pp.6-11.
- (48) 北寿郎,
情報機器の摩耗と対策,
トライボロジスト, 34-5(1989-5), pp.381-382.
- (49) A. Terada, O. Ishii and S. Ohta,
Wear Resistance and Signal-to-Noise Ratio in γ -Fe₂O₃ Thin Film Disks,
IEEE Trans. on Mag., MAG21-5(1985-10), pp.1521-1523.
- (50) J. Ahn, K.L. Mittal and R.H. MacQueen,
Hardness and Adhesion of Filmed Structures as Determined by the Scratch
Technique,
Adhesion Measurement of Thin Films, Thick Films and Bulk Coatings, ASTM STP
640, K.L. Mittal, Ed., ASTM(1978), pp.134-157.
- (51) 吉原秀雄,
Al合金の陽極酸化皮膜のカタサに及ぼす金属塩の影響,
電気通信研究所研究実用化報告, 25-11(1976), pp.1801-1811.
- (52) 北寿郎,
薄膜形磁気ディスク用アルマイト基板における亀裂の発生,
日本機械学会論文集, C編, 掲載予定
- (53) H.E. Hintermann,
Adhesion Friction and Wear of Thin Hard Coatings,
Wear, 100(1984), pp.381-398.
- (54) J. Halling and R.D. Arnell,
Ceramic Coatings in War on Wear,
Wear, 100(1984), pp.367-380.
- (55) J. Halling,
The Tribology of Surface Coatings, Particular Ceramics,
Proc. Inst. Mech. Engrs., 200-C1(1986), pp.31-40.
- (56) B.R. Lawn and R.J. Wilshaw,
Review; Indentation Fracture: Principles and Applications,
J. Mater. Sci., 10(1975), pp.1049-1081.
- (57) M.V. Swain,
Microfracture about Scratches in Brittle Solids,
Proc. Roy. Soc. Lond., A366(1979), pp.575-597.
- (58) B.R. Lawn and E.R. Fuller,
Equilibrium Penny-like Cracks in Indentation Fracture,
J. Mater. Sci., 10(1975), pp.2016-2024.
- (59) B.R. Lawn and A.G. Evans,
A Model for Crack Initiation in Elastic/Plastic Indentation Fields,
J. Mater. Sci., 12(1977), pp.2195-2199.
- (60) 木暮賢司, 北寿郎, 福井茂寿, 三矢保永,
3. 2ギガバイト集合形磁気ディスク装置用浮動ヘッドおよび媒体の機械特性,
電気通信研究所研究実用化報告, 31-1(1982-1), pp.291-303.
- (61) K. Kogure, K. Kita and S. Fukui,
Mechanical Characteristics of Flying Head and Recording Media
for 3.2 GByte Multi-device Disk Storage,
Review of the Electrical Communication Labs., 30-1(1982-1), pp.36-45.
- (62) 金子礼三, 吉井静,
3. 2ギガバイト集合形磁気ディスク装置の実用化,
電気通信研究所研究実用化報告, 31-1(1982-1), pp.241-248.
- (63) 三矢保永, 木暮賢司, 小口重光, 大谷幸司,
3. 2ギガバイト集合形磁気ディスク装置の機構部,
電気通信研究所研究実用化報告, 31-1(1982-1), pp.305-316.

(64)服部誠示,田子章男,石井芳一,寺田章,石井修,太田聡,

3. 2ギガバイト集合形磁気ディスク装置用連続薄膜媒体,
電気通信研究所研究実用化報告,31-1(1982-1),pp.305-316.

謝

語

本論文を結ぶにあたり、終始ご懇切なるご指導とご配慮を賜った名古屋大学工学部 機械学科 太田博教授に対し、謹んで感謝の意を表します。

また、本論文をまとめるに際し、有益なご教示、ご助言を賜りました名古屋大学工学部 電子機械工学科 山口勝美教授ならびに三矢保永教授に深く感謝の意を表します。

本研究を遂行するにあたり、多くのご配慮とご指導ならびにご援助をいただきました日本電信電話株式会社 NTT電子応用研究所 金子特別研究室 金子礼三室長、NTTヒューマンインタフェース研究所 知能ロボット研究部 木暮賢司主幹研究員に厚く感謝の意を表します。

本研究を遂行するに際し、日本電信電話株式会社 NTT電子応用研究所 オプトメカトロニクス研究部 佐藤勇武主幹研究員、福井茂寿主幹研究員、田子章男主任研究員、電子デバイス研究部 越本泰弘主幹研究員、金子特別研究室 宮本孝典主任研究員、安藤康子社員、NTT光エレクトロニクス研究所 中西卓二主幹研究員、NTTヒューマンインタフェース研究所 知能ロボット研究部 大原秀一主任研究員をはじめとする諸兄には有益なご討論、種々のご協力をいただいた。心からお礼を申し上げます。

発表論文ならびに業績リスト

I. 本論文に関係するもの

| 番号 | 論文等題名 | 公表の方法および時期 | 共著者 |
|----|---|--|--|
| 1 | New Method of Detecting Contact between Floating-head and Disk | IEEE Trans. on Mag., Vol. MAG16, No. 5, Sep., 1980, pp. 873-875. | Kenji Kogure Yasunaga Mitsuya Takuji Nakanishi |
| 2 | Flying Head with Sub-micron Spacing for Magnetic Recording Disks | TRIBOLOGY intl., Oct., 1981, pp. 293-300. | Reizo Kaneko Yasunaga Mitsuya Kenji Kogure |
| 3 | 3.2 GigaByte 集合形磁気ディスク装置用浮動ヘッドおよび媒体の機械特性 | 電気通信研究所研究実用化報告, 31巻1号, 昭和57年1月, pp. 291-303. | 木暮賢司 福井茂寿 三矢保永 |
| 4 | Mechanical Characteristics of Flying Head and Recording Media for 3.2 G Byte Multi-device Disk Storage | Review of ECL, Vol. 30, No. 1, Jan., 1982, pp. 36-45. | Kenji Kogure Shigehisa Fukui |
| 5 | 磁気ディスク用浮動ヘッドスライダの摩耗 | 潤滑, 29巻3号, 昭和59年3月, pp. 195-200. | 木暮賢司 三矢保永 |
| 6 | Wear of the Flying Head of Magnetic Disk File in Mixed Lubrication | ASLE SP-16, Oct., 1984, pp. 35-40. | Kenji Kogure Yasunaga Mitsuya |
| 7 | The Physical Durability of γ -Fe ₂ O ₃ Sputtered Magnetic Disks: The Influence of the Thickness of Aluminate Substrate | Proc. of JSLE Int. Tribology Conf., Jul., 1985, pp. 975-980. | Isamu Satoh Takanori Miyamoto |
| 8 | The Influence of Aluminum Oxide Particles in Magnetic Coating on Head/Disk Wear | STLE Tribology Trans 掲載予定 | |
| 9 | The Influence of Disk Surface Lubrication on Head and Disk Wear | STLE Tribology Trans 投稿中 | |
| 10 | 薄膜形磁気ディスク用アルマイト基板における亀裂の発生 | 機論, C編, 掲載予定 | |

II. その他のもの

| 番号 | 論文等題名 | 公表の方法および時期 | 共著者 |
|----|--|---|--|
| 1 | 800メガバイト磁気ディスク装置用磁気ヘッド | 電気通信研究所研究実用化報告, 28巻10号, 昭和54年10月, pp. 2229-2261. | 中西卓二 木暮賢司 越本泰弘 大原秀一 |
| 2 | Method of Estimating Mechanical Characteristics for Magnetic Recording Disks | Review of ECL, Vol. 28, No. 5, May, 1980, pp. 405-414. | Akio Tago Isamu Satoh Kenji Kogure |
| 3 | Hardness Evaluation of Ferrites for Magnetic Recording Heads | Proc. of 3rd Int. Conf. Ferrite, Sep., 1980, pp. 690-694. | Shuichi Ohara Yasuhiro Koshimoto |
| 4 | 磁気ヘッド用フェライトの強度評価 | 電気通信研究所研究実用化報告, 32巻6号, 昭和58年6月, pp. 1327-1338. | 大原秀一 越本泰弘 |
| 5 | 情報機器の摩耗と対策 | トライボロジスト, 34巻5号, 平成元年5月, pp. 381-382. | |
| 6 | アコースティックエミッションによるヘッド・ディスクの接触検出 | トライボロジスト, 掲載予定 | 望月研二 |

