

新 制
工
802
京大附図

潤滑気体潤滑条件下で作動する重圧
スライド軸受の研究

大久保俊文

薄層気体潤滑条件下で作動する動圧
スライダ軸受の研究

1990年

大久保俊文

目 次

記 号

第1章	序 論	1
第2章	高クヌッセン数条件下での浮動ヘッドスライダの静特性	8
2.1	緒 言	8
2.2	実験装置および実験方法	9
2.2.1	実験装置およびスライダの形状	9
2.2.2	浮上すきまの測定	11
2.3	実験結果と数値計算結果との比較	17
2.4	数値計算精度の評価	29
2.5	結 論	30
第3章	浮動ヘッドスライダの浮上すきまの精密測定	34
3.1	緒 言	34
3.2	可視レーザ干渉法による浮上すきまの測定	36
3.2.1	測定原理および測定装置の構成	36
3.2.2	校正および誤差評価	41
3.2.3	スライダの静特性の自動測定およびその結果	48
3.2.4	スライダの動特性の測定およびその結果	51
3.3	浮上すきまの簡易測定	63
3.4	結 論	69
第4章	浮動ヘッド機構の動的評価	72
4.1	緒 言	72
4.2	実験方法	73

4.3	動特性の評価結果	75
4.3.1	浮動ヘッドスライダ機構の静特性	75
4.3.2	ディスク面の並進振動に対する周波数応答	77
4.3.3	ヘッドアーム振動に対する周波数応答	84
4.3.4	ヘッドアーム振動に対する過渡応答	86
4.3.5	矩形状突起に対する過渡応答	90
4.4	結 論	95
第5章	浮動ヘッドスライダの浮上特性に及ぼす表面あらしの影響	97
5.1	緒 言	97
5.2	一次元あらしにおける平均すきまに基づく近似解と直接解の比較	99
5.3	平均すきまに基づく近似解析結果と実験結果との比較	109
5.3.1	実験方法	109
5.3.2	解析結果と実験結果の比較	
	－スライダ側にあらしのある場合－	112
5.3.3	解析結果と実験結果の比較	
	－媒体側にあらしのある場合－	124
5.4	結 論	127
第6章	ヘリウム－空気混合気体中の浮動ヘッドスライダの浮上特性	137
6.1	緒 言	137
6.2	混合気体の等価分子平均自由行程および等価粘度	140
6.2.1	等価分子平均自由行程	140
6.2.2	等価粘度	142
6.3	実験結果と計算結果との比較	143
6.3.1	実験方法	145
6.3.2	実験結果と計算結果の比較	149
6.3.3	一次スリップ流れモデルおよび二次スリップ流れモデル による計算結果との比較	157
6.4	結 論	161

第7章	ヘッド・媒体の接触に関する実験的検討	164
7.1	緒言	164
7.2	実験方法および装置	166
7.3	実験結果	171
7.3.1	ピエゾ接触センサによる結果	171
7.3.2	接触コンダクタンス法と音響弾性波検出法の比較結果	174
7.4	結論	181
第8章	総括	182
	[参考文献]	186

記 号

本論文で使用する主な記号は、次の通りである。

a : 壁面修正係数

a : 媒体面の加振振幅

a : 媒体面の許容振幅

$B = b / l$: スライダ長に対するスライダ幅比

b : スライダ幅

b_1 、 b_2 : 負圧スライダの形状パラメータ

d : 作動距離

d : 分子直径

f : 周波数

G : 増幅器のゲイン

G : ヘッド位置決め機構の駆動加速度

$H = h / h_0$: 無次元すきま

$H_1 = h_1 / h_0$: 無次元流入端仮想すきま

$H_1' = h_1' / h_0$: 無次元テーパ端すきま

\bar{H}^3 、 \bar{H}^2 、 \bar{H} : 平均すきま、もしくは混合平均すきま

\bar{H}^3_x 、 \bar{H}^2_x 、 \bar{H}_x : X方向（スライダ幅方向）の平均すきま、もしくは混合平均すきま

\bar{H}^3_y 、 \bar{H}^2_y 、 \bar{H}_y : Y方向（スライダ長さ方向）の平均すきま、もしくは混合平均すきま

\bar{H}^3 、 \bar{H}^2 、 \bar{H} : 算術平均すきま

\bar{H}^3_x 、 \bar{H}^2_x 、 \bar{H}_x : X方向（スライダ幅方向）の算術平均すきま

\bar{H}^3_y 、 \bar{H}^2_y 、 \bar{H}_y : Y方向（スライダ長さ方向）の算術平均すきま

\hat{H}^3 、 \hat{H}^2 、 \hat{H} : 調和平均すきま

\hat{H}^3_x 、 \hat{H}^2_x 、 \hat{H}_x : X方向（スライダ幅方向）の調和平均すきま

\hat{H}^3_y 、 \hat{H}^2_y 、 \hat{H}_y : Y方向（スライダ長さ方向）の調和平均すきま

h : すきま

h_0 : スライダ流出端すきま（最小すきま）

h_1 : スライダ流入端の仮想すきま

h_1' : テーパ端すきま
 h_t : テーパ高さ
 I : 光強度
 \bar{I} : 無次元光強度
 I_p : スライダの慣性モーメント (ピッチング)
 I_r : スライダの慣性モーメント (ローリング)
 \bar{I}_p : スライダの等価慣性モーメント (ピッチング)
 \bar{I}_r : スライダの等価慣性モーメント (ローリング)
 I_{max} : 干渉光強度の極大値
 I_{min} : 干渉光強度の極小値
 i : ヘッド位置決め機構の駆動電流
 k : 多重反射光の次数
 k_z : 支持機構の並進剛性
 k_p : 支持機構のピッチング剛性
 k_r : 支持機構のローリング剛性
 l : スライダ長さ
 l_t, l_1 : テーパ長さ
 l_1, l_2 : 負圧スライダの形状パラメータ
 $M = \lambda_a / h_0$: クヌッセン数
 $M^* = a \cdot M$: 等価クヌッセン数
 M_l : 局所クヌッセン数
 \bar{M} : 平均クヌッセン数
 M : スライダ長当りの有限要素節点数
 m : スライダ質量
 m, M : 分子量、原子量
 \bar{m} : 等価質量
 m_0 : スライダ等価質量
 N : 単位時間当りのすきまと媒体の接触頻度
 N_V : スライダ長さ当りの節点数
 N_x' : スライダ半幅当りの節点数

n : あらさの山数
 n : 干渉光の次数
 n_1 、 n_2 : 屈折率
 $P = p / p_a$: 無次元圧力
 \bar{P} : 平均圧力
 p : 圧力
 p_a : 周囲圧力
 $S = \Delta x \cdot \Delta y$: あらさの一単位の面積
 S_g : あらさ単位の溝面積
 $r_g = S_g / \Delta x \cdot \Delta y$: あらさ単位の溝占有率
 t : 時間
 U 、 u : ディスク走行速度
 $2W = 2w / (p_a b l)$: 無次元負荷容量
 $2w$: 負荷容量
 $\bar{X} = \bar{x} / l$: 無次元スライダ支持点位置
 \bar{x} : スライダ支持点位置
 z_0 : 支持機構の設定間隔
 z : 支持機構固定部（ヘッドアーム）の加振振幅
 α : ヘリウム－空気混合気体の空気モル比
 α 、 α_s 、 α_p : 平均すきまを生成するための算術平均すきまと調和平均すきまの混合比
 α : 定数
 β : 定数
 γ : 定数
 γ 、 γr^2 : 干渉縞のコントラスト
 δ : テーパーフラットスライダのテーパ高さ
 δ : あらさの振幅
 δ_g : 負圧スライダの負圧発生部のエッチング深さ
 $\Delta = \delta / h$: 無次元あらさ
 Δh : 浮上すきまの変動
 Δz : 支持機構固定部（ヘッドアーム）の外乱振幅

Δz : 支持機構固定部の許容振幅
 ε : スライダ浮上面のクラウン高さ
 ε_t 、 ε_l : センタレールのリセス
 $\Lambda = (6 \mu U l) / (p_a h_0^2)$: 圧縮性定数
 Λ_x 、 Λ_y : x軸、y軸方向の圧縮性定数
 λ : 気体の分子平均自由行程
 λ_a : 周囲圧条件での分子平均自由行程
 $\bar{\lambda}$: 混合気体の等価分子平均自由行程
 λ : 光の波長
 $\lambda_e (= \lambda / \cos \theta)$: 等価波長
 μ : 気体の粘度
 $\bar{\mu}$: 混合気体の等価粘度
 ρ : 気体の密度
 σ : 気体分子の運動量に関する適合（適応）係数
 ω : 角振動数
 ϕ : 光スポット径
 θ : ディスク周方向を示す添え字
 θ_1 、 θ : 入射角
 θ_2 、 θ' : 反射角
 θ_{YAW} : スライダの流入偏角（ヨー角）
 τ : あらさのピッチ
 τ : 気体の熱運動速度
 τ_x : スライダ幅方向のあらさピッチ
 τ_y : スライダ長さ方向のあらさピッチ
 τ_θ : ディスク周方向のあらさピッチ
 τ_r : ディスク半径方向のあらさピッチ

第1章 序 論

気体軸受は、非接触で高速・高精度な相対運動を実現可能であり、各種の測定機器、精密機器などに広く応用されている。このうち、静止面とすべり面の間にくさび状のすきまを形成し、相対運動によって発生する圧力（動圧）を利用して負荷容量を得る動圧形気体軸受は、外部に圧力供給源を必要としないシンプルで信頼性の高い機構構成が可能であるため、無保守・長寿命が要求される航空宇宙機器用のジャイロスピンドル、大型からラップトップ形に至るまでのコンピュータの代表的な外部記憶装置である磁気ディスク装置の浮動ヘッドスライダなどに実用されている。

磁気記録の分野では、磁気ヘッドと媒体を摩耗・損傷させることなく、しかもサブミクロンの微小なすきまを維持したまま、高速の相対運動を実現することが要求される。通常の気体軸受が負荷容量・空気膜（軸受）剛性の増大、超高速回転の達成などに主眼をおいているのに対し、磁気記録装置に用いられる浮動ヘッドスライダによる気体潤滑では、記録密度の向上と動作信頼性の確保を目的とする観点から、作動すきまの微小化、すきま変動の抑圧が最も重要な課題となっている。最初の静圧形ヘッドスライダを搭載した磁気ディスク装置の登場は、1956年（IBM RAMAC）に遡るが、以来、浮動ヘッド機構の形態は、ランディング・オン・オフによる高荷重の動圧形、さらによりシンプルな機構構成のコンタクト・スタート・ストップ方式（CSS方式）による軽荷重の動圧形へと発展を遂げてきた。この間、記録密度の基準ともなる浮上すきまは、20数 μm から0.2 μm へと2桁以上も微小化され、近年では0.1 μm ~0.05 μm の超微小浮上すきまと、200kbit/mm²の高面記録密度を有する装置の登場もアナウンスされるまでに至っている。対応する記録密度も、不断の浮上すきま微小化の努力と相まって、10年で10倍の勢いで向上しており、今後も当分の間、この趨勢は続くものと思われる。

このような浮動ヘッドスライダの薄層気体潤滑において特徴的な問題・課題には、以下のものがある。

- I. 作動すきまが、分子平均自由行程のオーダーに微小化されているため、気体の粒子性に起因する不連続流としての特性が現れる。このため、作動気体を連続流体として扱っている従来の理論では、その特性を十分に把握できなくなることが予想される。

- II. 同様に作動すきまが微小（ $0.1\ \mu\text{m}$ 前後で、光の波長の $1/4$ 程度のオーダー）であり、しかも、評価すべき指標が、数 $10\ \mu\text{m}$ 変動する媒体面と、これに追従して運動するスライダ浮上面との間の相対変位であるため、精密なすきまの測定が困難となる。このような微小すきまで作動するスライダ軸受においては、上述のような通常の気体軸受とは異なる諸現象が予測され、精密な浮上すきまの計測は、解析・設計と並んで、ますます重要な課題と言える。
- III. 実際の浮動ヘッドスライダの浮上面、走行面には面あらしが存在する。一般には、作動すきまに対して面あらしが十分小さく、その影響を無視できる場合が多いが、接触走行を伴って起動・停止を行う場合、また実用的な観点から、スライダ浮上面と媒体面との吸着防止、または接触走行時の耐摩耗性向上などの目的で、走行面を意図的に粗面化し、なおかつ微小浮上すきまで作動させようとする場合には、その影響は無視できなくなる。
- IV. サブミクロンからサブサブミクロンオーダーの微小すきまを一定に保つ機能を要求される浮動ヘッドスライダのような気体軸受では、特に分子平均自由行程、粘度などの作動気体の物性の影響を大きく受ける。特に、大径・高速回転の磁気ディスク装置の場合、消費電力の低減や温度上昇の抑圧などの目的で、意図的に異種の気体もしくは混合気体を装置内部に封入して用いようとする場合などは、気体物性の変化に起因するスライダの浮上特性への影響を、正確に把握する必要がある。
- V. 非接触を前提に設計された浮動ヘッドスライダにおいても、起動・停止時などの低速走行状態はもとより、表面に存在する微細なあらし、突起、うねりなどにより、スライダと媒体の確率的な接触は有り得る。接触に伴う衝撃は、表面に疲労を蓄積し、最終的には疲労破壊を招くなど、装置の信頼性に重大な影響を及ぼす。従って、スライダと媒体の精密な接触検出・衝撃力の定量化は装置の高信頼化を達成する上で重要な課題である。

このような問題点のうち、I項、すなわち作動すきまの微小化に伴う気体の粒子性の影響に関する気体膜特性の理論的扱いについては、以下の研究がなされている。気体の分子平均自由行程 λ の軸受すきま h に対する比として定義されるクヌッセン数 $M (= \lambda/h)$ が小さい場合には、近似的に固体表面で流れがスリップするとし、潤滑膜内流れを連続流として扱うことが可能で、Burgdorferはスリップ流れの境界条件を用いて修正レイノルズ

方程式を導出した[201]。以来、これをもとに、各種の解析法、近似解法が研究されている。浮動ヘッドスライダを対象とした λ の影響に関する最初の実験的研究は、Tsengによって行われた[202]。ここで用いられたのは、 λ の影響が比較的小さい高荷重スライダであり、サブミクロンの作動すきまではあるが、 λ の影響は実効的には比較的小さい範囲に限定されている。三矢は、修正レイノルズ方程式の有限要素法による解法を示すとともに[203]、軽荷重スライダを用いて λ の影響がより大きい領域で、クヌッセン数 $M < 0.8$ までの実験を行い、 λ に起因する浮上すきまの減少率が50%まで、ほぼ修正レイノルズ方程式が成立することを確認した[204]。Hsiaは、分子平均自由行程が空気の3倍程度大きいヘリウム中で、クヌッセン数 $M < 2.5$ までの実験を行い、この領域で修正レイノルズ方程式が有効であるとしているが、数値計算精度に問題があり、実験例も少ないため検証としては十分とは言えない[206]。

次に、Ⅱ項の浮上すきまの測定に関して述べる。浮上すきまの測定法としては、スライダに形成した微小電極と誘電性媒体の間の静電容量を検出して、すきまを測定する方法[301],[302]と、透明ディスクを用い、スライダ浮上面とディスク面の間の光の干渉を利用してすきま測定する二つの方法[303],[304],[305]が、主として用いられてきた。しかし前者は、スライダの小形化につれ、電極の形成それ自体が極めて困難となってきたこと、電極面積が十分とれないためS/N比を改善できないこと、絶対較正を光学的手法など他の手法に頼らざるを得ないことなどから、現在の浮動ヘッドスライダの浮上すきまの測定には適用が困難となりつつある。後者は、単色光もしくは白色光を光源として、浮上すきまに生じる干渉縞を直読・判別してすきまを求めるもので、簡便な方法ではあるが、特に $0.1 \sim 0.15 \mu\text{m}$ 以下の微小すきまでの測定が困難となること、動的なすきま測定が困難であること等の問題点があり、高精度なすきま測定の困難性が、サブミクロンからサブサブミクロンの超微小すきまにおけるスライダ浮上特性の実験的検証を阻んでいた。

次に、Ⅲ項の表面あらさのスライダ浮上特性に及ぼす影響に関して述べる。あらさをもつ面の潤滑特性の解析は、あらさがあってもレイノルズ方程式がそのまま成り立つとするレイノルズあらさに関するものが主体であり、これには平均すきまを用いるもの[501],[502],[503]と平均流量を用いるものがある。前者は、あらさを持つ面を潤滑特性上、これと等価な平滑な面で置き換えるもので、非圧縮性流体における次元あらさの場合に適用することの妥当性は、Elrodにより数学的に証明されている[504]。三矢は、二次元あらさの扱いを、流路コンダクタンスの考え方と単位あらさの概念に基づき、単位あらさでの圧

縮性の影響は十分小さく無視できるとして、直接すきまを、算術平均すきまと調和平均すきまを所定の割合で混合した混合平均すきまで置き換えた平均化レイノルズ方程式を導入した[505],[506]。これら面あらしの浮動ヘッドスライダの浮上特性に及ぼす影響についての検討は、解析が主体であり、平均化による近似解析手法の妥当性を検証する実験的研究は、ほとんど行われていない。

次に、IV項の混合気体を作動流体とする場合の浮動ヘッドスライダの浮上特性に及ぼす影響に関して述べる。混合気体の基礎的な扱いに関しては、気体分子運動論に基づき、等価分子平均自由行程、等価粘度に関する解析・実験的検証が、かなり以前から数多く行われている[606],[607],[608],[609],[610],[611]。しかし混合気体を作動流体として、浮動ヘッドスライダの浮上特性に関連付けた研究としては、Beekenらによるヘリウム、アルゴンなど各種気体と空気の混合比、周囲圧力を変えた場合の実験的な検討が唯一であるが、Beekenらも、混合気体の場合のスライダ浮上特性の理論的な扱いに関しては、触れていない[605]。

最後に、V項のスライダと媒体の接触検出に関して述べる。従来、スライダと媒体の接触検出には、圧電素子を用いて、固体どうしの接触時に発生する音響弾性波を検出する方法[701],[702],[704],[705]が主として用いられてきた。そして、接触の検出感度を向上することを目的として、圧電素子の分極方法の改良、ヘテロダイン検波・狭帯域フィルタなどを用いた信号処理によるS/N比の向上[704]、弾性体としてのスライダの振動解析による共振モードの同定[705]などがなされてきた。音響弾性波検出の手法は、スライダ浮上系に何らの変更を加えることなく接触検出が可能な利点を有しているが、本質的に機械振動を電気信号に変換して測定しているため、検出感度には限界があり、精密なスライダの接触特性ならびに従来法の検出精度を明らかにするためには、より検出感度の高い手法による評価を行うとともに、従来法と比較することでその適用限界を確認することが必要である。

このような現状に鑑み、本論文では超微小浮上すきまで作動する浮動ヘッドスライダの浮上特性に及ぼす気体の分子平均自由行程の影響、表面あらしの影響、物性の異なる混合気体を作動流体とした場合の影響などを解明するとともに、これらの影響を解明する際の実験的基礎と位置づけられる微小浮上すきまの精密な測定手法およびスライダと媒体の接触検出手法等の開発、また実用的な観点から、装置に搭載した時に浮動ヘッド機構が受け

る種々の外乱に対する精密な動特性の評価手法の確立などを目的として検討を行う。

スライダの浮上特性に及ぼす分子平均自由行程の影響に関しては、これを顕在化できるヘリウムを作動流体とする実験に基づき、修正レイノルズ方程式による解析結果との比較を行い、同方程式の適用限界を検討した。表面あらかの影響については、近似解析手法として提案された混合平均すきま理論による解析結果を基に、実験結果との比較を行い、上記近似理論の妥当性を検証した。混合気体を作動流体とする場合のスライダ浮上特性に及ぼす影響に関しては、混合気体を等価的な分子平均自由行程、等価的な粘度を有する単一気体とみなして、混合気体中のスライダ浮上特性を解析し、実験によってその妥当性を検証した。浮上すきまの測定法に関しては、可視レーザー干渉を利用した浮上すきまの測定手法を示し、静特性ならびに広帯域の動特性の測定における適用性を検討した。スライダ・媒体の接触検出法については、最も高い接触感度を得られる接触コンダクタンス法を用い、導電化処理を行った実媒体を用いて、精密なスライダの接触特性について検討した。浮動ヘッド機構に加わる種々の外乱に対する精密な動特性の評価に関しては、上記の高精度な浮上すきま測定手法を適用して定量化を行い、設計に反映できるようにした。

具体的な各章の概略を述べると以下のようなになる。

第2章では、気体の分子平均自由行程がスライダの静特性に及ぼす影響を明らかにするため、ヘリウムおよび減圧ヘリウム環境中でのスライダ浮上特性についての実験的検討を行った。分子平均自由行程の影響は、高荷重条件、あるいは高圧縮性定数条件下では減少するため、その影響の程度については、一概にクヌッセン数の大きさだけでは論じられない。そこで、本研究では、分子平均自由行程の影響を顕在化させるため、軽荷重でかつ圧縮性定数の影響の小さい小形スライダを用い、気体の分子平均自由行程に起因する浮上すきまの減少率が65%、クヌッセン数が約3までの領域での実験を進め、修正レイノルズ方程式に基づく計算結果との精密な比較を行った。一方、より妥当な分子平均自由行程の影響の指標として、局所クヌッセン数あるいは平均クヌッセン数を導入し、従来のクヌッセン数による評価との比較を行った。加えて、第3章で述べる可視レーザーを用いた高精度な浮上すきま測定系により、大気圧空気中において、最小浮上すきま0.03 μ m、クヌッセン数8までの範囲でスライダ浮上特性の精密な測定を行い、修正レイノルズ方程式による浮上特性の予測精度について検討した。

第3章では、第2章で示したスライダ浮上特性に及ぼす気体の分子平均自由行程の影響

の解明、電磁変換特性を含めた装置構成条件下での性能評価、ならびに動特性を主体とする浮動ヘッドスライダ機構の信頼性を評価するための基礎ツールとなるスライダの浮上すきまの精密測定手法について述べた。まず、可視レーザを微小なスポットに集光して浮上すきまに照射し、すきまに対応して変化する干渉光の強度を光電検出する光学系の構成を示した。次いで、測定誤差の原因となるレーザ光源の出力変動の抑圧、走行面・スライダ浮上面の反射特性が測定精度に及ぼす影響の詳細な評価を行った。さらに、機構振動が測定系に及ぼす影響をコンピュータ処理により補償するなど、高精度で、しかも短時間ですきまを自動測定する手法を示した。また、スライダ走行面に人工的に形成した矩形状の溝、矩形状の突起を通過する時のスライダの過渡応答を測定し、急峻なステップ部分を通過する時の干渉光の強度波形を基に、スライダの動特性の測定範囲を評価した。シーク動作時など実際の装置に搭載される条件下での浮上すきま測定、あるいは品質管理上、多数のスライダの浮上特性の評価を行うためには、小形で簡易な浮上すきま測定系が必要となる。これに対しては、フォトリフレクタを用いた簡易な浮上すきま測定系を構成し、レーザを用いた高精度なすきま測定系との比較から、この実用性能を評価した。

第4章では、実用装置において想定される各種外乱に対する浮動ヘッド機構の動特性の数値計算・実験による評価手法について述べた。従来、設計・評価に十分取り入れられていなかった支持機構の動特性については、これを含めて精密に評価し、これを磁気ディスク装置の各機構の許容振幅、許容加速度の規定に反映した。シーク動作時の浮上量変動など、実用装置の作動条件下では、測定・評価が困難な動特性については、機構ごとに個別に測定した振動スペクトラムを処理することによる間接的な評価法について検討した。さらに、実用条件よりも一層厳しい条件となる $0.1\mu\text{m}$ 定常浮上すきまにおいて、約倍の高さの矩形状突起を通過させることにより、空気膜の非線形・大変位応答の評価を進めた。これら一連の $0.1\mu\text{m}$ 前後の超微小浮上すきまにおける浮動ヘッドスライダの動特性の実験結果と修正レイノルズ方程式に基づく計算結果とを比較し、サブサブミクロンの微小浮上すきまにおけるスライダの動特性の予測に対する、同方程式の有効性を検討した。

第5章では、スライダの浮上特性に及ぼす表面あらさの影響を明らかにする目的で、平均すきま理論の妥当性の検証を試みた。まず一次元面あらさを有する無限幅スライダに関して、圧縮性流体の場合の平均すきま近似解と直接解との比較を行った。有限幅スライダに関しては、一次元あらさ、二次元あらさにかかわらず、主流（スライダ走行方向の流れ）に加えて側流（幅方向の流れ）が生ずるため、実際のスライダの表面あらさ分布を取り入

れてスライダ特性の直接解析を行うためには、スライダ幅方向に多くの分割を必要とすることから、実効上、直接計算との比較は困難となる。このため、規則的に分布する平行あらし、直交あらし、二次元あらしを有するスライダを用いた実験を行い、平均すきま理論に基づく計算結果とを比較することにより、平均すきま理論の妥当性を検討した。

第6章では、混合気体中で作動するスライダの浮上特性を明らかにする目的で、ヘリウム-空気混合気体中でのスライダの静特性の実験的検討を行った。評価手法としてここでは、マクロな観点から、混合気体を等価な分子平均自由行程、等価な粘度を有する単一気体とみなし、気体分子運動論に基づいて等価分子平均自由行程、等価粘度と成分気体のモル比との関係を算定した。これを用いて、一次、二次のスリップ流れを考慮した修正レイノルズ方程式、ボルツマン方程式に基づく一般化潤滑方程式による解析結果と実験結果とを比較した。実験には分子平均自由行程、粘度など気体物性の影響を鋭敏に反映し、しかもサブサブミクロンの浮上すきまでの安定した動作が実現できるスライダ長さ1~2mm程度の小形・軽量のスライダを用い、精密な比較・評価を試みた。

第7章では、精密なスライダと媒体の接触の検出・評価法として、接触コンダクタンス法を導入し、表面に導電化処理を施した実媒体と高速応答・高インピーダンス性能を有する接触信号検出系を用いて、接触特性の評価を行った。また、これを基に、従来から用いられてきた音響弾性波検出法との比較を行い、従来法によるスライダと媒体の接触検出の精度についても検討した。

第2章 高クヌッセン数条件下での浮動 ヘッドスライダの静特性

2.1 緒言

気体軸受の起動・停止時あるいは浮動ヘッドスライダのようにサブミクロンの微小すきまで気体潤滑される場合には、気体潤滑膜特性には、気体の分子平均自由行程に起因する不連続流れの影響が現れる。気体の分子平均自由行程 λ の軸受すきま h に対する比として定義されるクヌッセン数 $M = \lambda/h$ が小さい場合には、潤滑膜内の気体流れの理論的扱いについては、固体壁面でスリップが生ずるものとし、全体としては連続流体として扱う方法を適用することが可能であり、このような扱い方に基づいて、Burgdorferはスリップ流れの境界条件を用いて修正レイノルズ方程式を導出した[201]。しかしこの基礎式は、スリップ流れの領域で成立する近似式であり、適用可能な M の範囲は制限される。

気体の分子平均自由行程が気体潤滑特性に与える影響に関しては、これまで主として磁気ディスク装置で用いられている浮動ヘッドスライダを対象として研究が進められてきた。Tsengは高荷重スライダを用いて、 λ の影響が比較的小さい領域で実験を行った[202]。三矢は、修正レイノルズ方程式の有限要素法による解法を示すとともに、軽荷重スライダを用いて λ の影響がより大きい領域で、 $M < 0.8$ までの範囲での実験を行い、 λ に起因する浮上すきまの減少率が50%程度までは、ほぼ修正レイノルズ方程式が成立することを確認した[203],[204]。Serenyは修正レイノルズ方程式による解は、実験結果と大幅に差異があると報告しているが、修正レイノルズ方程式の数値計算に問題があるように思われる[205]。HsiaはSerenyと同じ実験装置を用い、 λ が空気の3倍程度大きいヘリウム中で、 $M < 2.5$ までの範囲で実験を行い、この領域で修正レイノルズ方程式が有効であるとしているが、計算精度についての確認がなく、また実験点も少ないため、検証としては十分とは言えない[206]。

一方、磁気ディスク装置用浮動ヘッドスライダは、高記録密度化を達成するために浮上すきまの微小化が進められ、最近では浮上すきまは $0.1 \mu\text{m}$ に近づきつつある。この場合には、記録再生の誤動作を防ぐために要求される浮上すきまの精度は $0.01 \mu\text{m}$ 程度

となり、浮動ヘッドスライダの設計に当たって、浮上特性を高精度に予測することも、最も重要な課題の一つとなっている。

そこで、本章では、作動気体として空気（大気圧状態での分子平均自由行程： $\lambda_a=0.064\mu\text{m}$ ）、ヘリウム（同： $\lambda_a=0.186\mu\text{m}$ ）、減圧ヘリウム（最大減圧時： $\lambda_a=0.226\mu\text{m}$ ）を用いた場合について、浮動ヘッドスライダの浮上特性を高精度に測定し、得られた実験結果と修正レイノルズ方程式に基づく計算結果とを比較する。 λ の影響は高荷重条件下、あるいは高圧縮性定数条件下では減少するため、クヌッセン数の大きさのみでは、一概には論じられない。本章では λ の影響を大きくするため、軽荷重でかつ圧縮性定数の影響が小さい小形スライダを用い、 λ に起因する浮上すきまの減少率が約65%、クヌッセン数が約3までの領域で実験を行っている。さらに第3章で述べる可視レーザー干渉を利用した高精度な浮上すきま測定系を用い、大気圧ヘリウム環境中で、最小浮上すきま $h_0\approx 0.025\mu\text{m}$ 、クヌッセン数 $M\approx 8$ までの精密測定を実現し、この領域においても修正レイノルズ方程式により、スライダの高精度な浮上特性の予測が可能であることを確認している。

2.2 実験装置および実験方法

2.2.1 実験装置およびスライダの形状

図2-1に実験装置の概略を示す。実験装置は、基本的にはスライダ走行面となるガラスディスクを高精度に回転させる静圧空気軸受を用いたスピンドル、スライダ機構を精密に位置決めする微動ステージ、スライダ浮上面に生ずる干渉縞を撮影して浮上すきまを測定するための顕微鏡、気密容器、作動気体を清浄化する除塵フィルタ機構などから構成されている。無塵の減圧ヘリウム環境中でのスライダ浮上実験も行うため、ディスク、スピンドルおよびスライダ支持部は、密閉容器内部に収納し、熱や塵埃の発生源となる駆動系は容器下部に配置して、外部よりディスクを駆動する構成をとっている。スピンドルとジャーナル軸受の間には、磁性流体による多段形回転軸シールを用いており、約70kPa（約0.7気圧）まで減圧して浮上実験をすることが可能である。作動気体としては空気、ヘリウムを用いた。密閉容器内部のヘリウム濃度は、酸素センサにより残存空気中に含まれる酸素を検出することによって、約1%の精度で検出した。密閉容器内部の気体は、フ

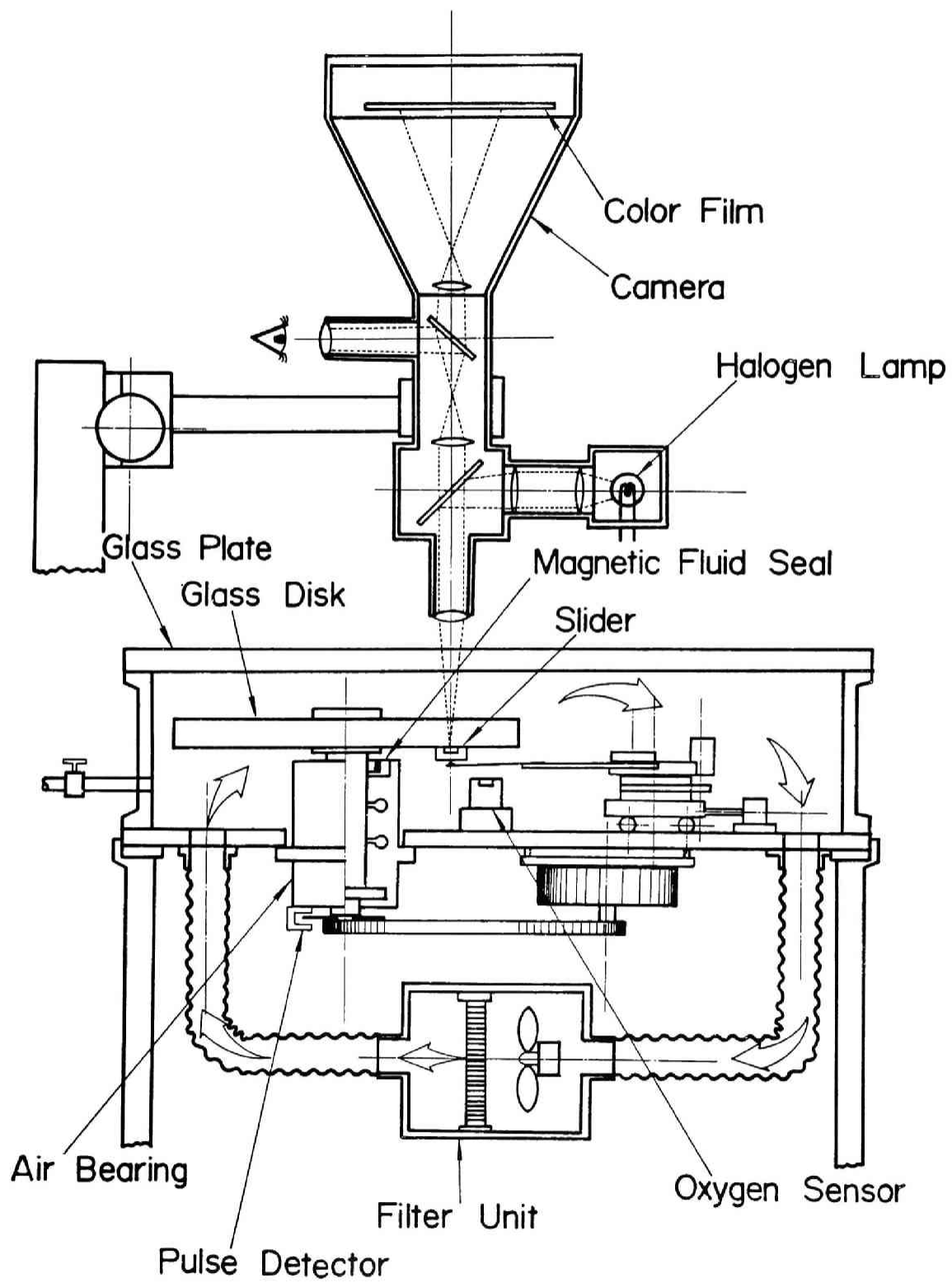


图 2 - 1 实验装置

フィルタ（アブソリュートフィルタ：0.3 μm の粒径塵埃の除塵率99.97%）を介して、ブロワにより常時循環させて、高純度（0.15 μm の粒径塵埃が1 l中の気体中に1~2個）に保持した。

スライダが走行する相手のディスク面には、光学研磨（中心線平均あらさ： $R_a < 0.003 \mu\text{m}$ ）した外径200mm、厚さ10mmの合成石英ガラスディスクを用い、ディスクを取り付けたスピンドルの振動を除くため、高精度な静圧空気軸受で支持した。ディスクの偏心は10 μm 以下、面振れは20 μm 以下である。

図2-2に浮動ヘッドスライダの形状とその支持機構の構成を示す。浮動ヘッドスライダは、 Mn-Zn -フェライト製で、スライダ長は約3.7mm、スライダ幅は0.34~0.39mmの3種類のものを用いた。図2-3にスライダ各部の寸法の記号を、表2-1に実験に用いたスライダ寸法とばね押圧荷重の値を示す。荷重は、スライダ左右の浮上面に負荷される各々の値を w （従って、スライダ全体では $2w$ ）としている。スライダ長さ l 、スライダ幅 b および浮動ヘッドスライダ負荷ばねの負荷力点位置 \bar{x} は、工具顕微鏡を用いて100倍に拡大して測定した。テーパ部長さ l_t 、テーパ高さ h_t および浮上面形状は、触針式表面あらさ計を用いて5千倍から10万倍に拡大して測定した。図2-4（スライダNo. 2）に2千倍および5万倍で測定したスライダ浮上面形状の一例を示す。スライダフラット部には、長さ方向に最大高さが0.05 μm 前後の円弧状のそり（クラウン：高さ ε ）があるが、0.1~0.2 μm の微小浮上すきまにおいては、このそりの影響は無視できない。このため、数値計算においては、この円弧状のそりをフラット部中央に最大高さをもつ放物面で近似することで考慮した。

2. 2. 2 浮上すきまの測定

サブミクロンのすきまで浮上しているスライダに、ガラスディスクを通して白色光を入射すると、スライダ浮上面からの反射光とディスク面からの反射光が相互に干渉し、すきまに対応した干渉色が観察される。図2-5はスライダ浮上面（スライダシュー）上に現れる干渉色を、図2-1に示す金属顕微鏡を用いてカラーフィルムに撮影し、スライダ走行速度順に配列したもので、色調が速度に応じて浮上面を移動する様子がわかる。

従来の浮上すきまの測定には、スライダ浮上面に生じる干渉色を、既知のすきまによっ

表2-1 供試スライダの諸元

Slider No.	1		2		3	
	L	R	L	R	L	R
l mm	3.68	3.69	3.71	3.71	3.69	3.70
b mm	0.34	0.34	0.39	0.39	0.38	0.38
l _t mm	0.58	0.57	0.62	0.62	0.57	0.58
h _t μm	5.2	5.2	5.4	5.4	5.2	5.2
ε μm	0.02	0.04	0.06	0.06	0.08	0.06
\bar{x}/l	0.521		0.547		0.542	
2W mN	45.5		44.5		53.7	

(L: Left Shoe, R: Right Shoe)

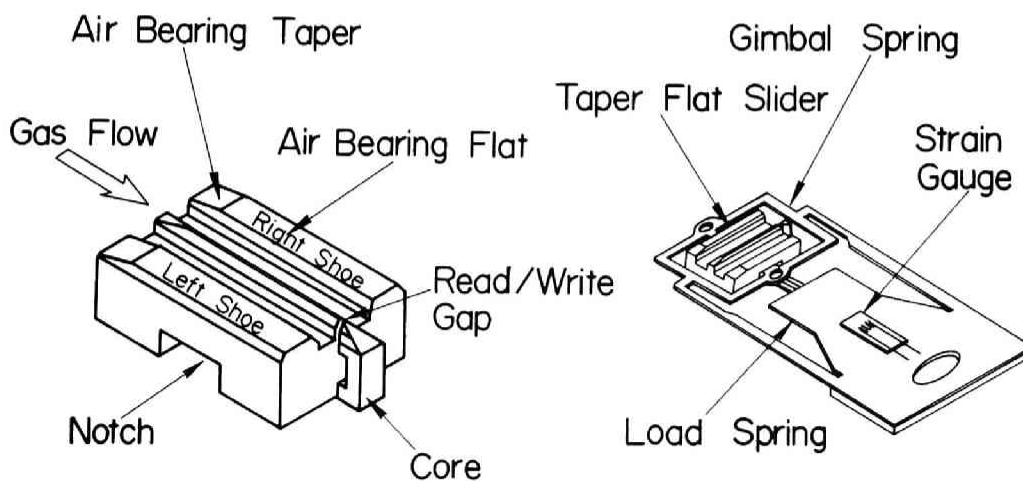


図2-2 浮動ヘッドスライダと支持機構

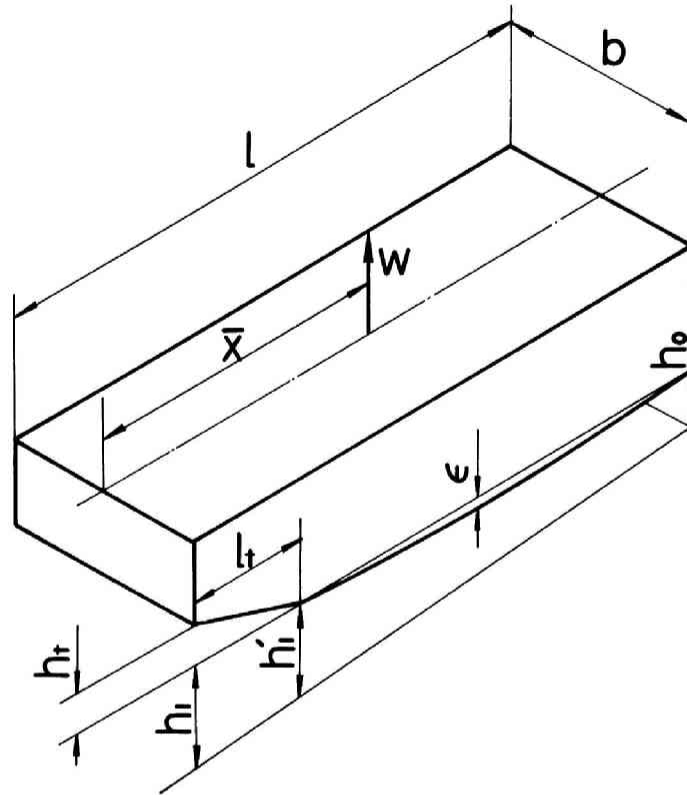
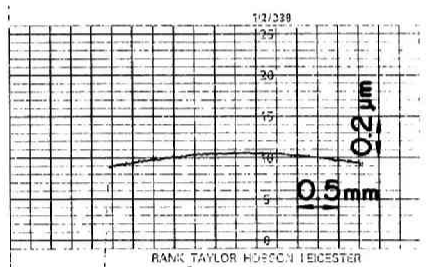
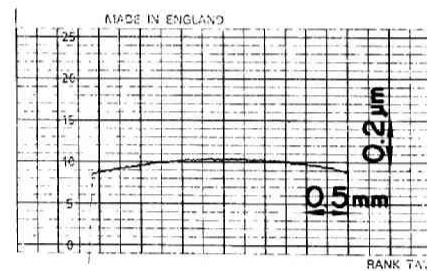


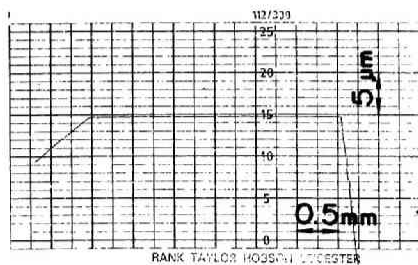
図 2-3 テーパーフラットスライダ



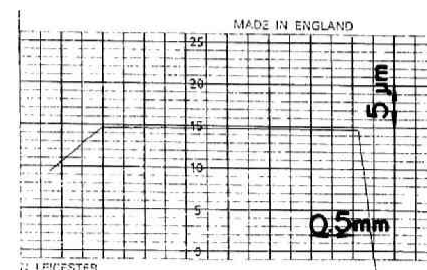
Right Shoe (x 50,000)



Left Shoe (x 50,000)



Right Shoe (x 2,000)



Left Shoe (x 2,000)

図 2-4 スライダ長さ方向の浮上面形状の一例

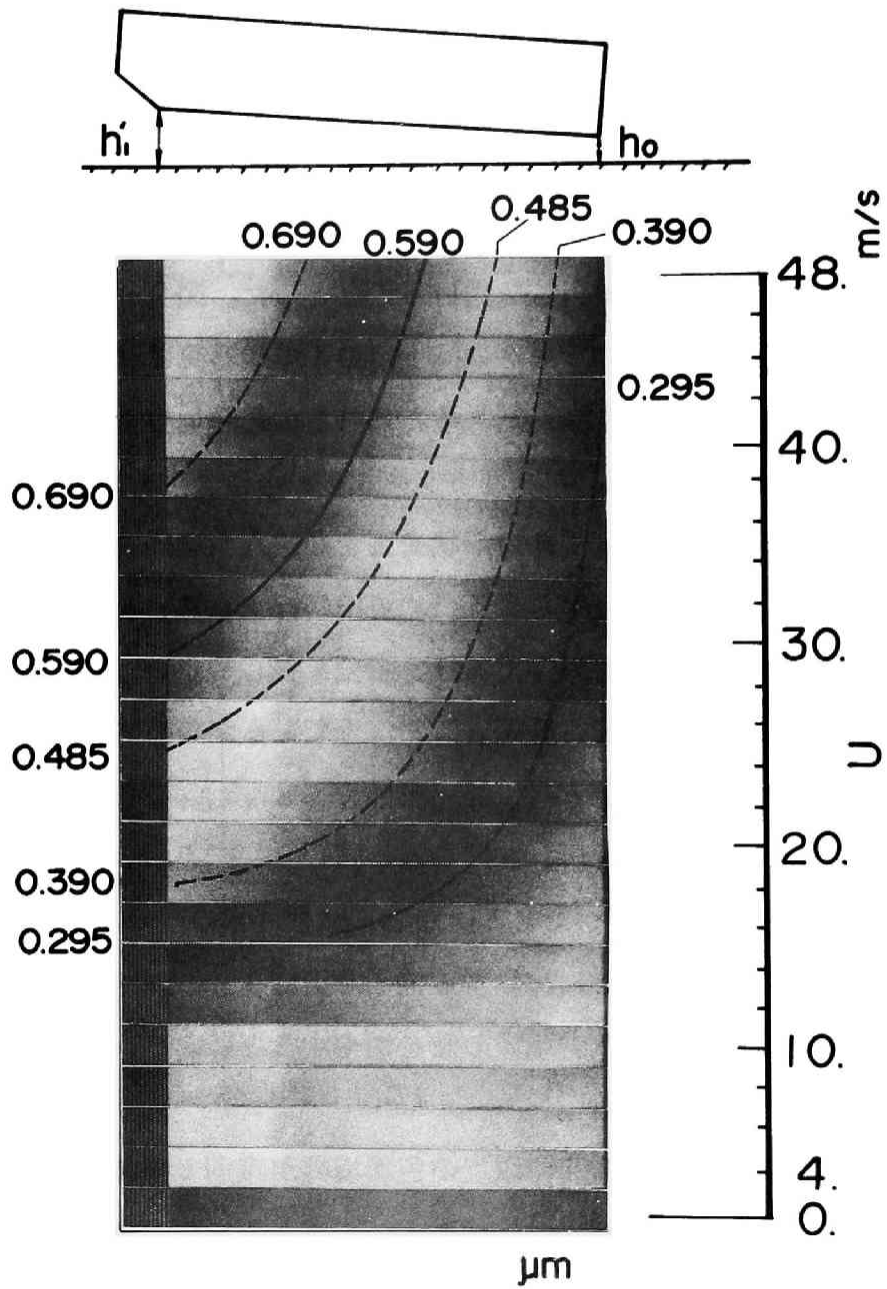


図 2-5 テーパーフラットスタイダの浮上時の干渉縞写真

て校正された基準色（単色）と直接比較する方法が用いられてきた[207]。しかし、この方法では色調がすきまの勾配に依存するため、色調変化が判然とせず、 $0.05\mu\text{m}$ 程度の精度しか得られなかった。このため、浮上時のスライダ姿勢とすきまの勾配のほぼ等しい基準カラースケールを用いて、測定分解能を $0.01\sim 0.015\mu\text{m}$ 程度に高めるなどの改良も進められてきたが[204]、精度を上げるためにはスライダごとに多くの基準カラースケールを必要とするなどの難点があった。

ところで、図2-5に示すように、連続的に変化する干渉色のうち、特定の色調境界、例えば茶と青、青と黄などは比較的識別しやすい。そこで本研究では、従来のように色そのもので比較するのではなく、これらの色の変化を利用することにより、浮上すきまを精度よくしかも簡易に測定できる方法を用いることとした。図2-6には、二つの色調境界を用いた測定例を示す。まずスライダの浮上時の干渉縮写真において、色調の境界位置 X_1 （茶と青）、 X_2 （青と黄）を識別する。これらの色調境界でのすきま $a_1=0.295\mu\text{m}$ 、 $a_2=0.390\mu\text{m}$ は、基準カラースケールによってあらかじめ求めておく。 a_1 、 a_2 を通るスライダフラット部の形状を表す曲線AAを描けば、この曲線による外挿により原理的にはテーパ端浮上すきま h_1' 、流出端浮上すきま h_0 を求めることができる。しかし、この方法は曲線による外挿であり、誤差を生じやすいため、直線による外挿を考える。このため、 a_1 、 a_2 を通る直線 n_1 、 n_2 上であらかじめクラウンを補正し、スライダフラット部の形状を表す曲線 n_1' 、 n_2' を描く。 a_1 、 a_2 を n_1' 、 n_2' 上に移動して、それぞれ a_1' 、 a_2' とする。 a_1' 、 a_2' を通る直線A'A'を引き、この直線を用いて外挿すれば h_1' 、 h_0 を求めることができる。なお、図2-5の写真中には、いくつかの色調境界が浮上すきまの変化とともに移動する様子を実線（ a_1 とその整数倍のすきま）および破線で示す。このように、色調境界の数を増やすことにより、精度を向上させることができる。

本方法は、スライダ浮上面に二つ以上の色調境界が識別できれば、流出端部が $0.2\mu\text{m}$ 以下の無彩色領域にあっても直線外挿によってすきまを測定することが可能であるため、微小浮上すきま測定法として有用性の高いものと言える。本方法によれば、有彩色領域においては、 $0.015\mu\text{m}$ 、また無彩色領域においても、 $0.02\mu\text{m}$ 程度の測定精度が得られる。

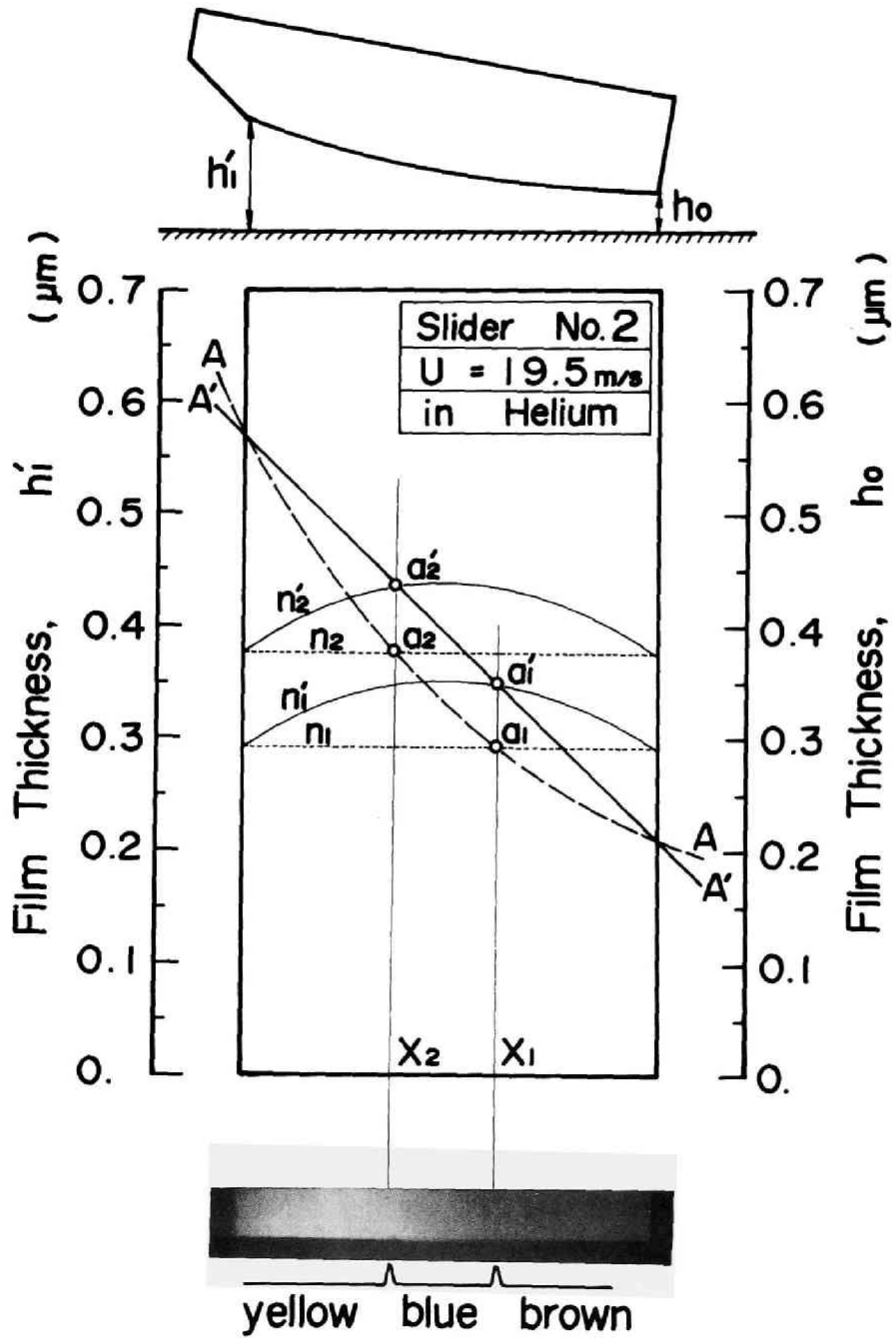


図2-6 白色縞干渉法による浮上すきまの測定法

2. 3 実験結果と数値計算結果との比較

Burgdorferの導入した気体の分子平均自由行程を考慮した修正レイノルズ方程式は、無次元表示した形で式(2-1)のように表される[201]。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X} \left[PH^3 \left(1 + \frac{6aM}{PH} \right) \frac{\partial P}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[PH^3 \left(1 + \frac{6aM}{PH} \right) \frac{\partial P}{\partial Y} \right] \\ = \Lambda \frac{\partial PH}{\partial Y} \end{aligned} \quad (2-1)$$

使用した記号は以下の通りである。

P (= p / p_a) : 無次元圧力

H (= h / h₀) : 無次元すきま

M (= λ_a / h₀) : クヌッセン数

Λ (= 6 μ U l / p_a h₀²) : 圧縮性定数

p : 圧力

p_a : 周囲圧力

h : すきま

h₀ : 流出端すきま

λ_a : 周囲圧力における気体の分子平均自由行程

a : 壁面修正係数

μ : 気体の粘度

U : スライダ走行速度

l : スライダ長さ

なお、aは気体分子の固体壁面衝突にける運動量に関する適合係数σの関数として、式(2-2)のように表現される。

$$a = C \cdot (2 - \sigma) / \sigma \quad (2-2)$$

CはC≐1の定数である。σは完全散乱反射の場合にはσ=1、また完全鏡面反射の場合にはσ=0となるため、理論的にはaは1から無限大の値を取り得る。通常の表面では、

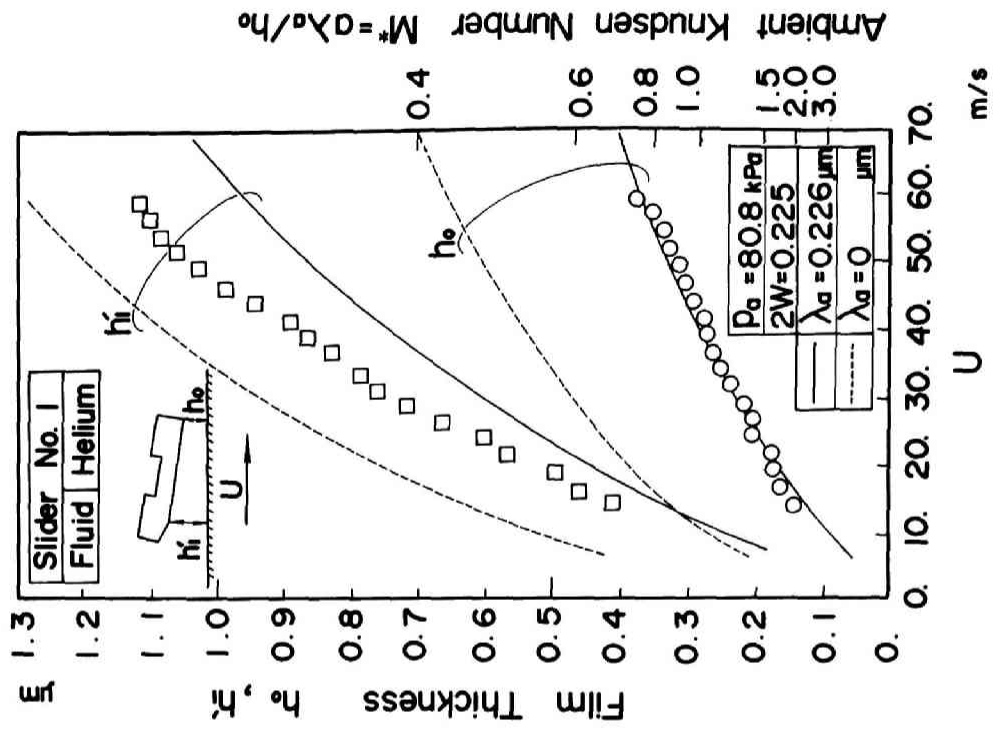
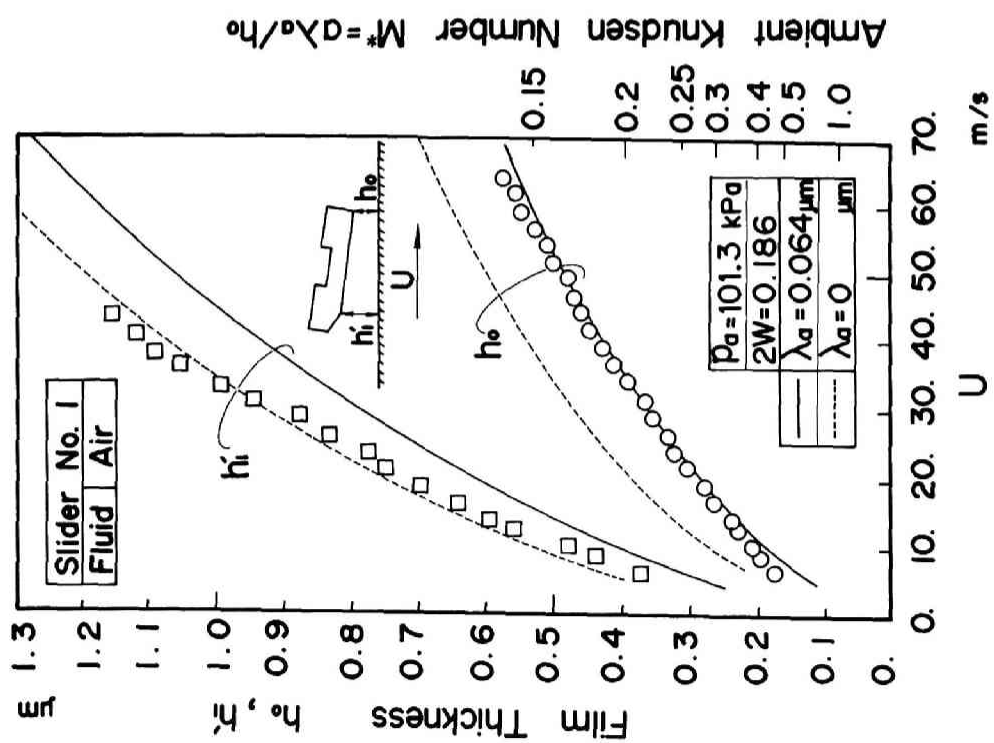
散乱反射的な特性が強く、 σ は0.8～1の間の値となり[208]、従って、 a は1～1.5程度の値をとることとなる。

式(2-1)に有限要素法を適用して離散値化し[203]、ニュートンラフソン逐次近似法により数値計算を行った。要素分割はスライダ幅の半分を15分割(16節点)、スライダ長さを60分割(61節点)し、圧力変化が急峻なテーパ端近傍、流出端近傍および側端を細分割(不等分割)して計算精度を上げた。計算における誤差は、ほぼ0.5%以下と推定される。

表2-1に示すスライダ寸法の中で、左右の走行面で値の異なるものもあるが、その差は小さく浮上特性におよぼす影響も小さいため、それらについては平均値を用いた。壁面修正係数は、式(2-1)で示されるように、クヌッセン数 M を等価的に a 倍する効果を持つ。 a は気体の種類、固体表面材質、固体表面仕上げなどの機械特性に依存するが、ここでは作動気体である空気とヘリウムでは、ガラス面、または研磨フェライト面における a の値はほぼ等しいと考え、空気とガラス面に対する値 $a = 1.24$ (運動量に関する適合係数 $\sigma = 0.89$)を採用することとした。なお、以下では a 倍されたクヌッセン数 aM を等価的なクヌッセン数 M^* として用いることとする。空気の粘度および大気圧条件下での分子平均自由行程の値としては、それぞれ $1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $0.064 \mu\text{m}$ を用い、ヘリウムのそれらは $1.94 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $0.186 \mu\text{m}$ とした。

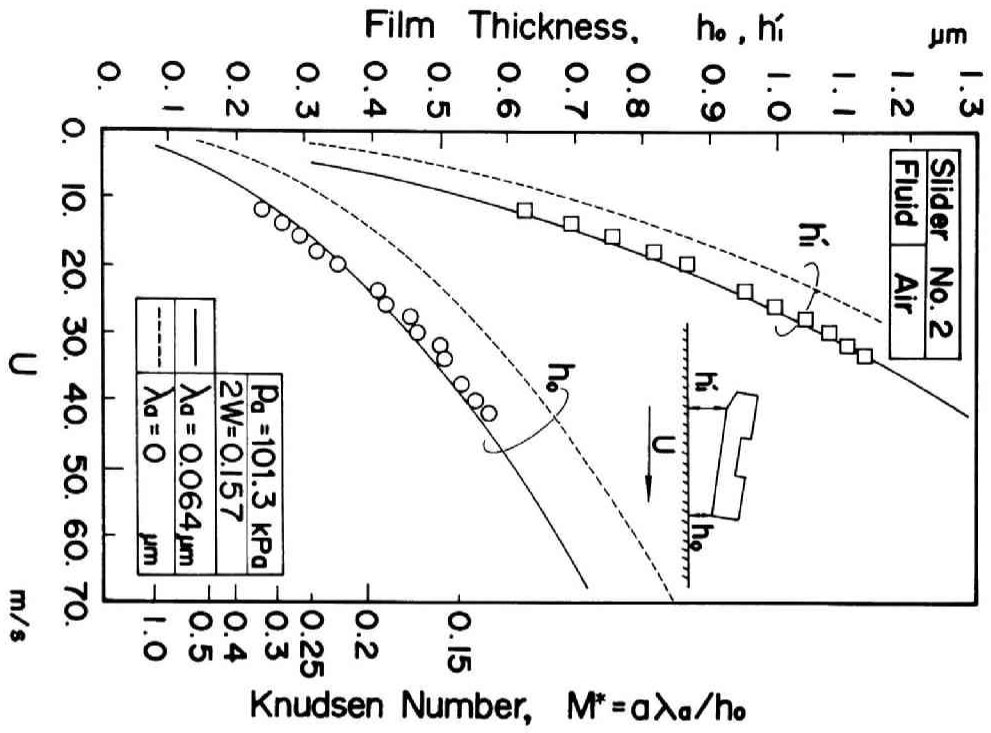
図2-7(a)～(f)にそれぞれ供試スライダNo.1～No.3についてのスライダ走行速度と浮上すきまの関係を示す。図2-7(a)、(c)、(e)は大気圧空気中の結果であり、(b)、(d)、(f)は減圧ヘリウム中での結果である。○印は流出端浮上すきま h_0 、□印はテーパ端浮上すきま h_1' の実験結果、実線は実験に対応する計算結果である。また参考のため、連続流体の場合($\lambda_0 = 0$)の計算結果を破線で示す。

h_0 については空気中および減圧ヘリウム中とも実験結果と計算結果はよく一致している。特に供試スライダNo.3(図2-7(f))では、走行速度 $U = 9.04 \text{ m/s}$ 、 $h_0 = 0.105 \mu\text{m}$ ($M^* = 3.15$ 、 $\Lambda = 5156$)まで実験結果と計算結果とはほとんど一致している。 h_1' については供試スライダNo.2の場合(図2.7(c)、(d))には空気中ヘリウム中とも実験結果と計算結果はよく一致しているが、供試スライダNo.1(図2-7(a)、(b))、No.3(図2-7(e)、(f))では、空気中、ヘリウム中とも実験結果の方が計算結果を上回っている。この傾向は空気中、減圧ヘリウム中

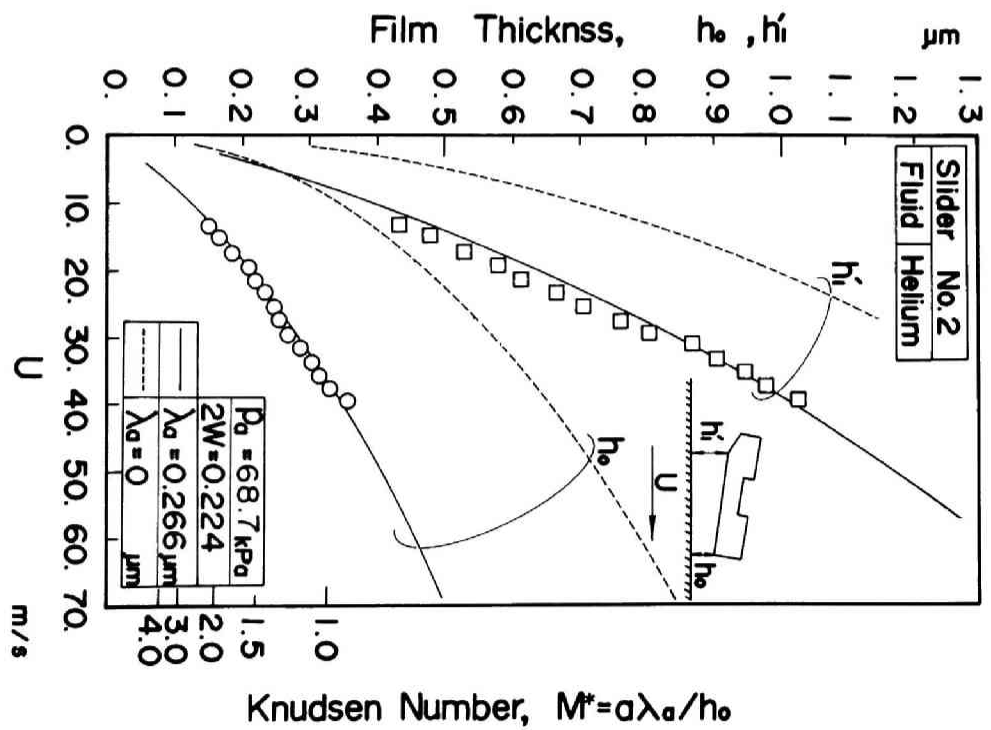


(a) 空気中での結果 (供試スライダNo. 1) (b) 減圧ヘリウム中での結果 (供試スライダNo. 1)

図2-7 走行速度の浮上すきまの関係

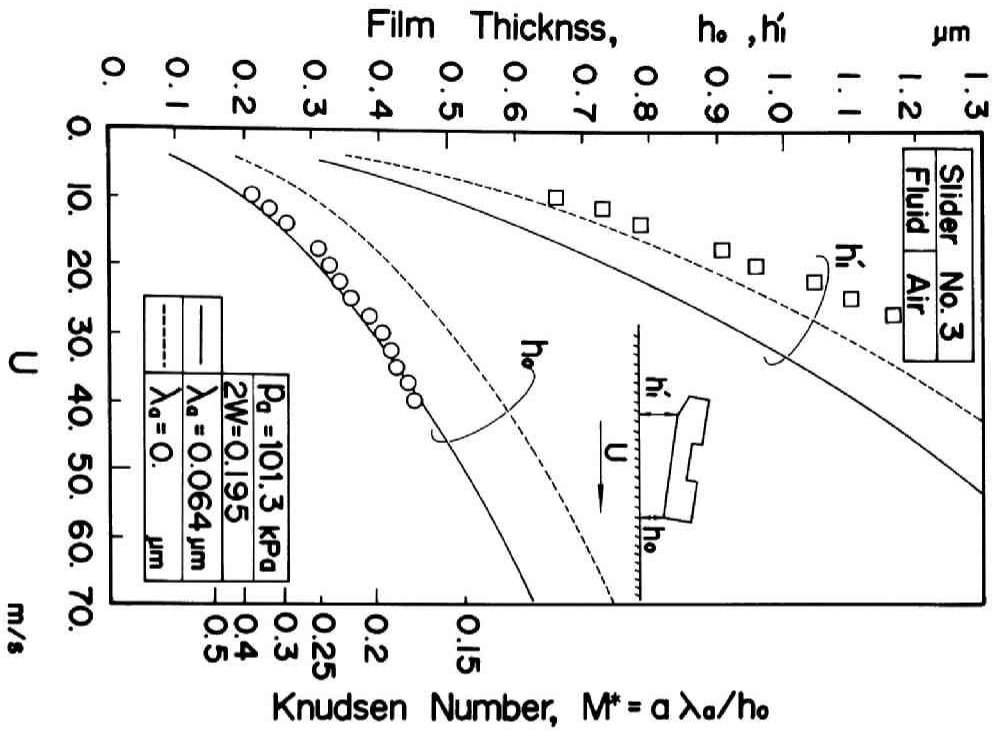


(c) 空気中での結果 (供試スライダ No. 2)

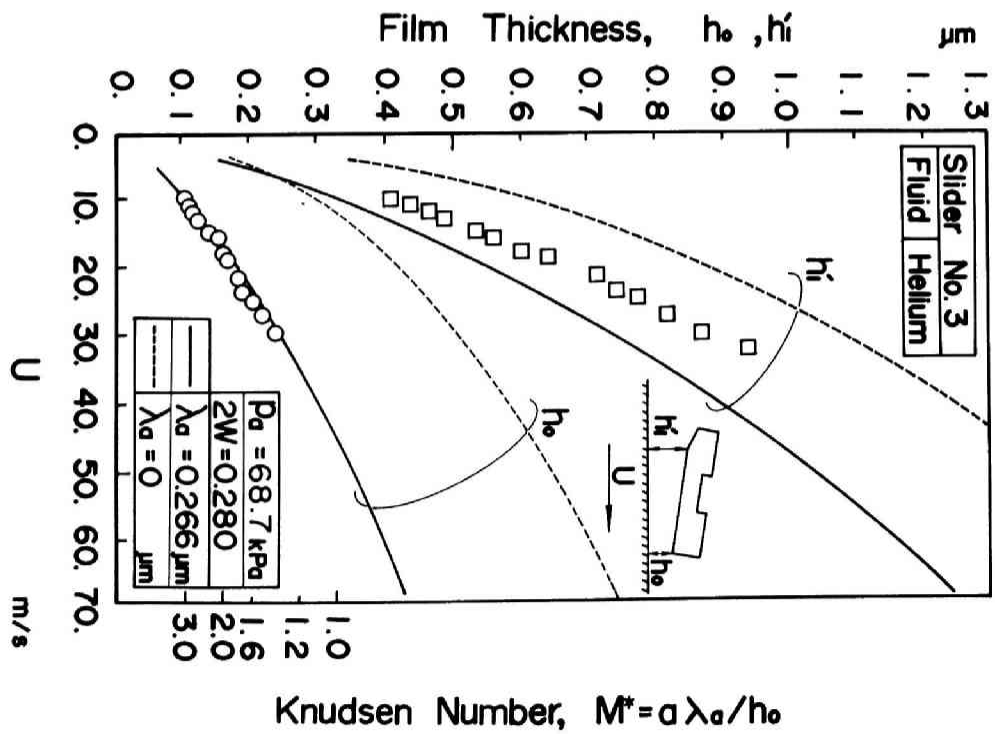


(d) 減圧ヘリウム中での結果 (供試スライダ No. 2)

図 2-7 走行速度の浮上すきまの関係



(e) 空气中での結果 (供試スライダNo. 3)



(f) 減圧ヘリウム中での結果 (供試スライダNo. 3)

図2-7 走行速度の浮上すきまの関係

ともほぼ同様であることから、スリップ流れの影響によるものではなく走行面に対するスライダの設定誤差などのため、等価的にスライダ支持点位置がずれたことが主な原因と考えられる。ちなみに、供試スライダNo.3における h_1' についての計算結果と実験結果との差は、本来の支持点位置が5%程度スライダの後方にずれたことに相当するが、これによる h_0 の減少量は $0.01\mu\text{m}$ 以下であるので、 h_0 についての実験精度への影響は無視できる程度に小さい。

図2-8は供試スライダNo.1~3について、それぞれ空気中、ヘリウム中、減圧ヘリウム中に行った10種類の実験条件下での流出端浮上量の測定結果 h_0 を、連続流の場合の流出端浮上すきま $h_0 \lambda_{a=0}$ からの減少率の形で表し、クヌッセン数 M^* に対してプロットしたものである。実線は各実験条件に対応する計算結果である。各々の実験条件は、無次元荷重、作動気体、周囲圧力などがすべて異なるが、スリップ流れの影響をこのように表示すると計算結果の差異はわずかとなり、実験結果を統一的に整理することができる。無次元荷重の範囲は、 $2W=0.16\sim 0.28$ であり、また周囲圧は大気圧から最大 8.7kPa (約 0.697 気圧)まで減圧した。実験結果は $M^*=3.15$ 、浮上すきまの減少率65%まで計算結果とよい一致を示しており、ほとんどの実験値は計算値の±3%以内にある。

第3章では、可視レーザー干渉を利用した高精度な浮上すきま測定方法と、これを用いた測定結果について述べるが、ここではその手法を用いて行ったより微小な浮上すきま領域を含む作動条件下での測定結果の一例を示しておく。図2-9は、第3章で述べる浮上すきま測定手法により、表3-1に示す諸元の正圧形テーパフラットスライダを用いて、大気圧ヘリウム環境中での浮上特性を測定した結果である。太い一点鎖線は数値計算結果であり、細かい実線は内周側の、また細い一点鎖線は外周側の浮上面での測定結果である。やはりテーパ端の浮上すきま h_1' に関しては、計算結果と実験結果の間には、支持点位置のずれなどによる若干の差異が認められるが、流出端浮上すきま h_0 に関しては、走行速度 $U=10\text{m/s}$ 、浮上すきま約 $h_0=0.025\mu\text{m}$ (クヌッセン数 $M^*=8$)程度まで両者は一致している。これは大気圧空気中での作動状態に換算した時、約 $0.01\mu\text{m}$ の浮上すきまに相当し、このような領域までも、修正レイノルズ方程式によるスライダ浮上特性の予測が可能であることを示唆している。

ところでスリップ流れの大きさは、スライダ潤滑領域の各位置における浮上すきま h と

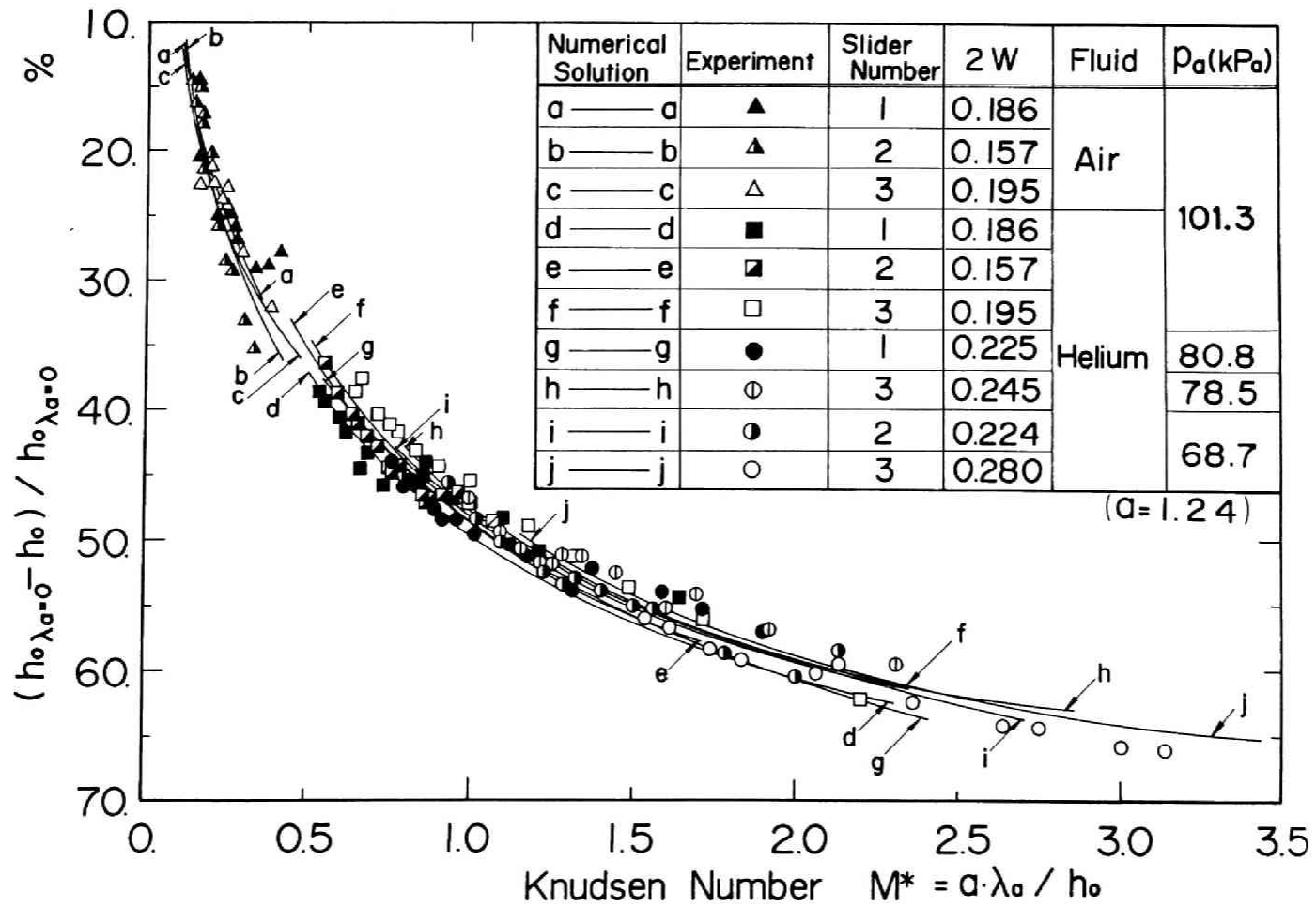


図2-8 クヌッセン数とスライダ浮上すきま減少率との関係

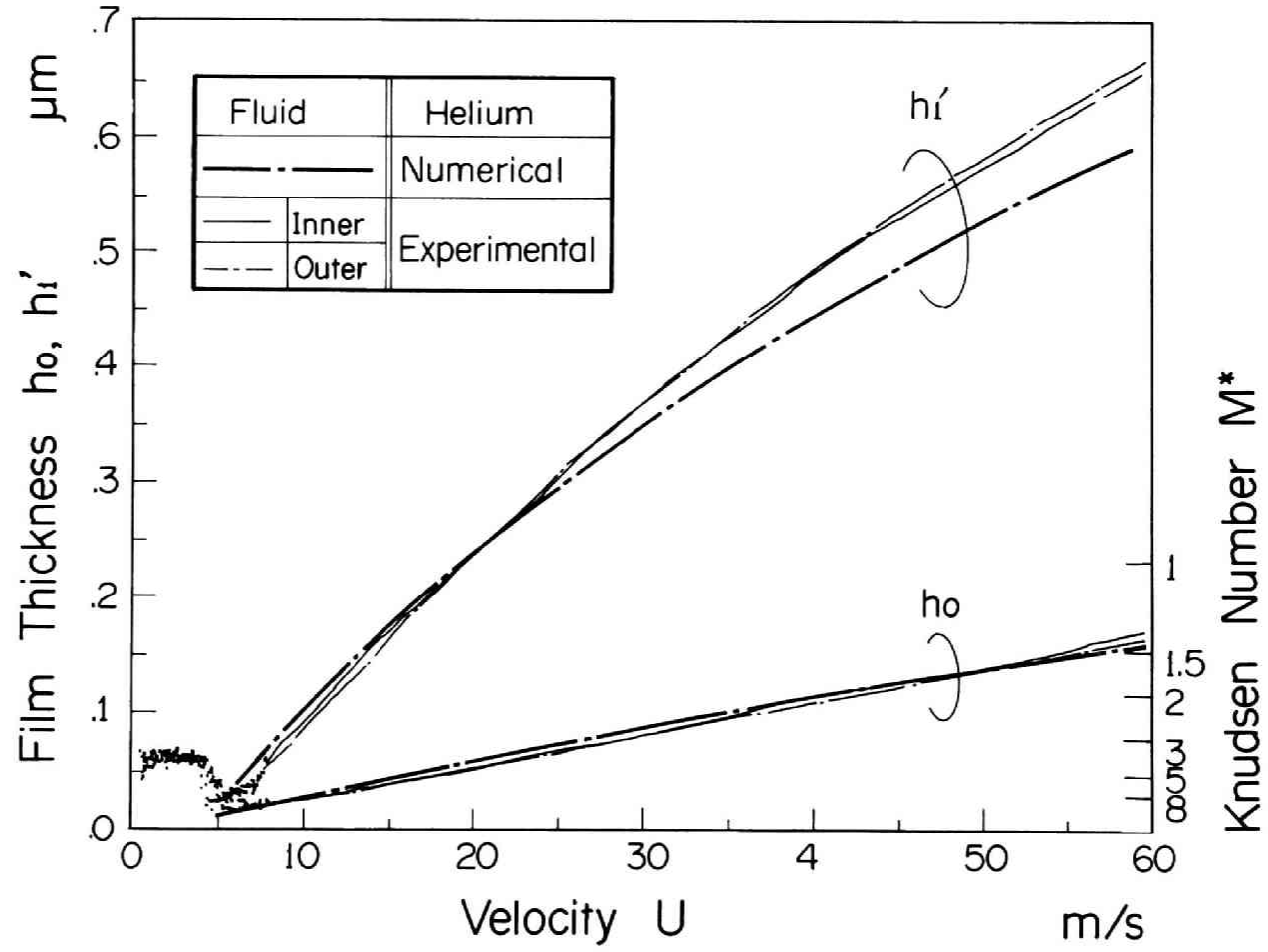


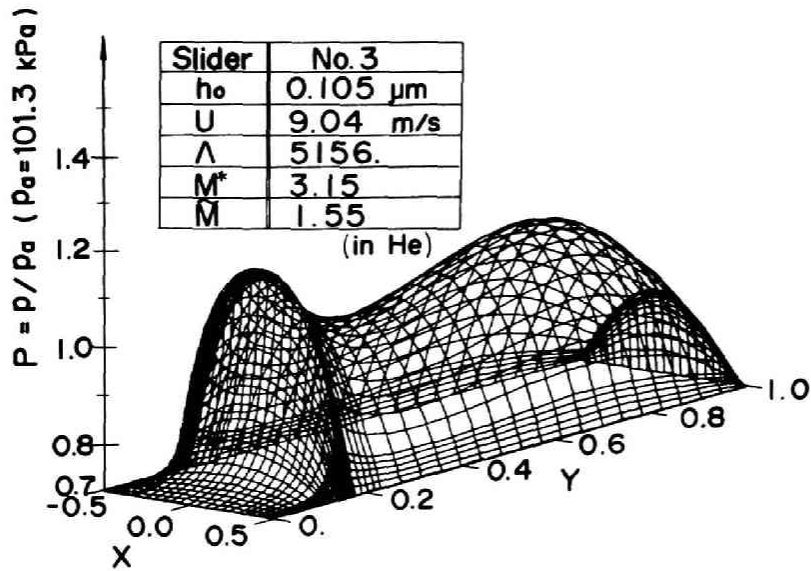
図2-9 レーザ干渉法により測定した走行速度と浮上すきまの関係

そこでの気体の分子平均自由行程 λ との比、すなわち局所クヌッセン数 M_1 ($= a \lambda / h = M^* / PH$) によって決まるため、クヌッセン数を h_0 と周囲圧力における気体の分子平均自由行程 λ_0 によって定義される M^* の値で代表するのでは不十分である。図2-10 (a)、(b)は各々供試スライダNo.3に関して、減圧ヘリウム中 ($U=9.04 \text{ m/s}$ 、 $h_0=0.105 \mu\text{m}$ 、 $M^*=3.15$) の圧力分布および上記のように定義される局所クヌッセン数の分布を示したものであり、図2-10 (c)、(d)は、大気圧空气中 ($U=31.0 \text{ m/s}$ 、 $h_0=0.390 \mu\text{m}$ 、 $M^*=0.20$) の圧力分布および局所クヌッセン数の分布を示したものである。 M_1 は、図2-10 (b)に示すように、スライダ潤滑領域の各位置におけるスリップ流れの大きさを表しており、すきまと発生圧力の積に反比例するため、すきまの大きな流入端で小さく、すきまの小さい流出端で大きくなり、またスライダ側端側から圧力の増加する内側に向かって減少し、傾斜凹面状の分布をなしている。空气中での M^* の分布は、図2-10 (d)に示すように、本来的に周囲圧条件での λ_0 が小さいこと、浮上すきまが大きいことから、潤滑面全体として小さな値を示す。減圧ヘリウム中の結果において、 M_1 が $M^*=3.15$ に近い値となるのは、流出端近傍とスライダ後部の側端近傍のみであり、平均的には、 $M^*=3.15$ よりかなり小さいことが分かる。従って、スリップ流れの影響を表すパラメータとしては、クヌッセン数に代えて、式(2-3)で定義される平均クヌッセン数 \tilde{M} を用いた方が適当と考えられる。

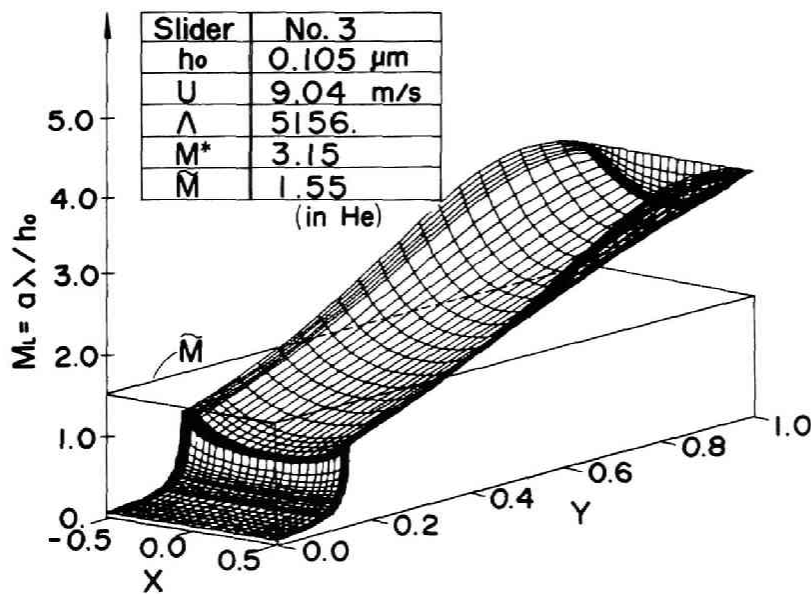
$$\tilde{M} = \frac{1}{A} \int_A M_1 dA = \frac{M^*}{A} \int_A (PH)^{-1} dA \quad (2-3)$$

ここで A は潤滑領域である。

図2-11はヘリウム中での各供試スライダの実験条件に対応する M^* に対して、 \tilde{M} の計算結果を示したものである。実線部分が実験を行った範囲の計算結果である。 M^* が大きくなるにつれてスライダ形状、無次元荷重などのパラメータの相違による \tilde{M} の差異が増大する傾向にあるものの、概して \tilde{M} は M^* の半分以下であることが分かる。 \tilde{M} が1を越えるのは供試スライダNo.3の実験e ($M^* > 1.9$)、f ($M^* > 2.1$)、g ($M^* > 2.2$)のうちの一部の範囲においてである。この範囲は、図2-8では、 $M^* > 2.2$ の範囲にプロットされる7点の実験点に対応しており、ほかの大部分の実験点の \tilde{M} は1以下で

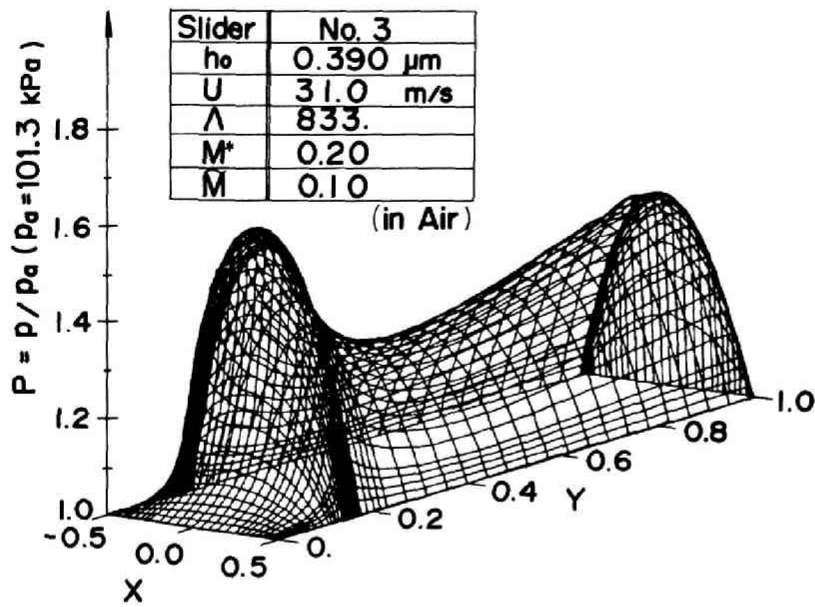


(a) 減圧ヘリウム中での圧力分布

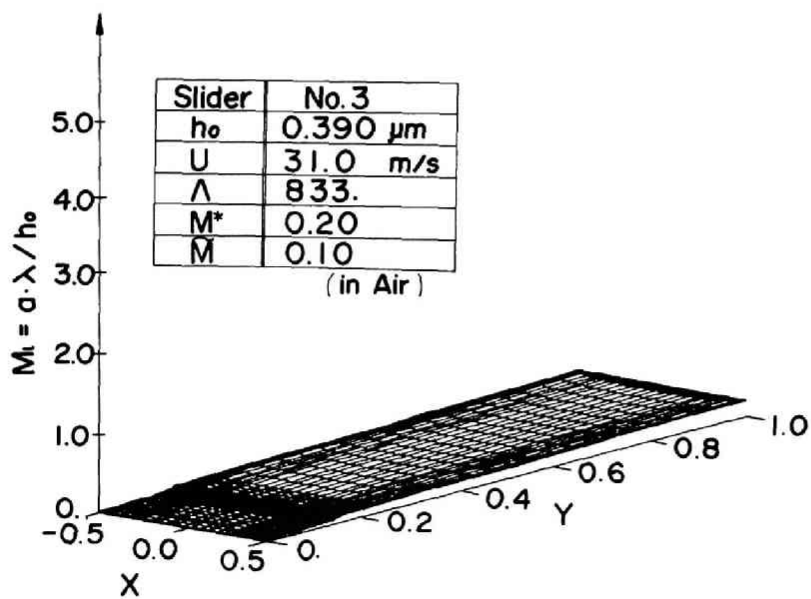


(b) 減圧ヘリウム中での局所クヌッセン数分布

図2-10 テーパーフラットスライダの圧力分布と局所クヌッセン数分布



(c) 大気圧空気中での圧力分布



(d) 大気圧空気中での局所ヌッセン数分布

図2-10 テーパーフラットスライダの圧力分布と局所ヌッセン数分布

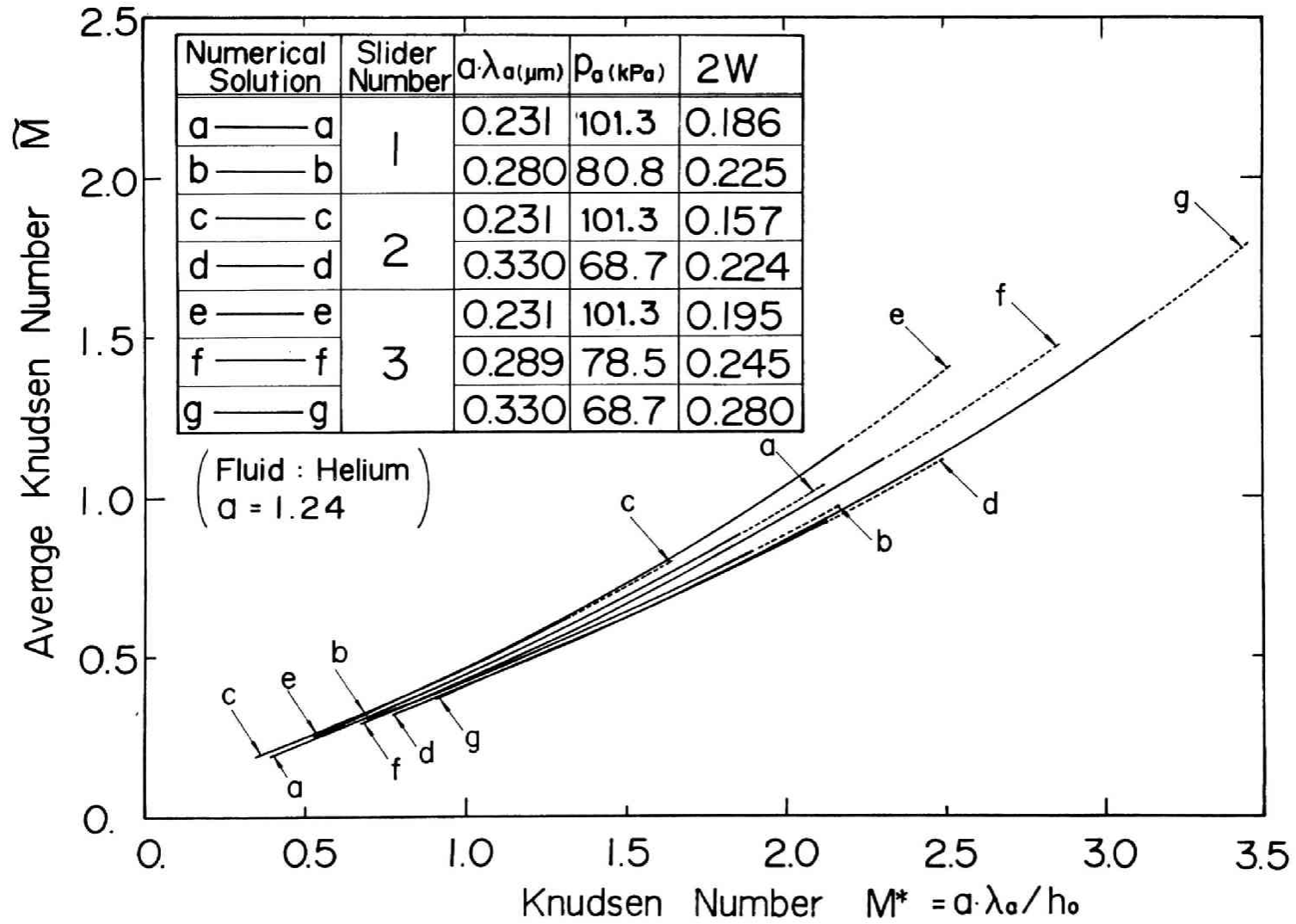


図2-11 クヌッセン数と平均クヌッセン数の関係

ある。

連続流れ、スリップ流れ、自由分子流などの流れの境界は判然としないが、管内流れについては、代表長さとして境界層の厚さを用いて定義したクヌッセン数 $M (= \lambda_0 / h)$ 、 h ：代表寸法) に関して、以下の値が大体の目安となるとされている[209]。

連続流れ	: $M < 0.01$
スリップ流れ	: $0.01 < M < 0.1$
遷移流れ	: $0.1 < M$ 、 $M / Re^{0.5} < 10$
自由分子流	: $10 < M / Re^{0.5}$

ここで、 Re はレイノルズ数である。本実験範囲では、すきまで表したレイノルズ数をとれば、 $Re^{0.5}$ は0.1のオーダーであり、クヌッセン数の代表値として平均クヌッセン数を用いたとしても上記の目安に従えば、本実験範囲は遷移流れから自由分子流までの領域に入る。この目安と比較すると、本実験結果は、管内流れに比してクヌッセン数のかなり大きい領域までスリップ流れの近似が適用できることを示している。この理由としては、潤滑膜内では、等方性の管内流れとは異なり、スライダ幅方向への分子の移動による運動量伝達があるため、分子運動から見た場合には等価的にすきまが広がったことなどが考えられるが、なお詳細な理論解析なども含めた検討が必要である。

実用的な見地からすると、白色光干渉法による測定では、流出端浮上すきま h_0 が0.105 μm (浮上すきまの減少率が65%)、クヌッセン数 M^* が約3まで、また後述のレーザ干渉法を用いた精密な浮上すきま測定系による結果では、 h_0 が0.025 μm 、クヌッセン数 M^* が約8まで、ヘリウムを潤滑流体とした場合の実験結果と数値計算結果とのよい一致を得たことにより、大気圧空気中での作動条件に換算して、0.01 μm 程度までの微小浮上すきまで作動する浮動ヘッドスライダの設計検討を進める上で、修正レイノルズ方程式を適用することの妥当性が実証されたと言える。

2.4 数値計算精度の評価

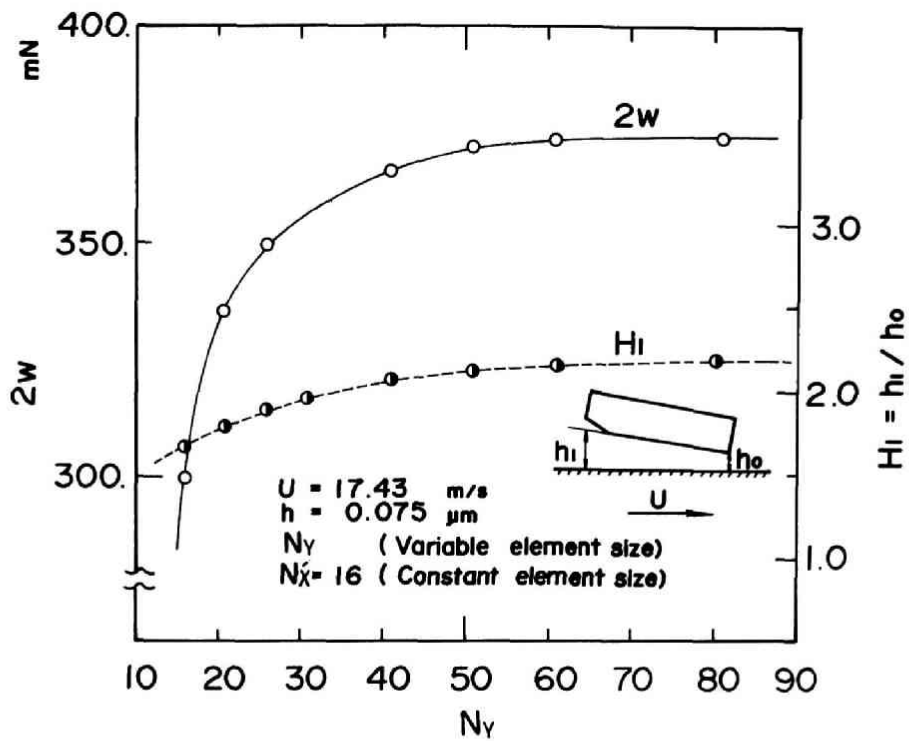
本研究で対象としているような微細な機構の特性の理論解析に対しては、その精度につ

いて十分検討しておくことが必要である。そこで、本章で用いた数値計算法の精度を確認するため、節点数を変えてスライダ浮上力 $2w$ およびスライダすきま比 $H_1 = h_1 / h_0$ を計算した。図2-12(a)は、図2-13の $h_0 = 0.075 \mu\text{m}$ に対応する作動条件下で、 $2w$ および H_1 を、幅方向の節点数を一定(スライダ幅半分あたりの節点数 $N_{x'} = 16$)とし、スライダ長さあたりの節点数 N_y を変えて計算した結果である。 $2w$ および H_1 とも、すきま長さ方向に61節点以上とるとほぼ一定となることがわかる。同様に、図2-12(b)は、 N_y を一定($N_y = 61$)とし、 $N_{x'}$ を変えて $2w$ および H_1 を計算した結果である。 $2w$ および H_1 ともにスライダ半幅当り11節点以上とるとほぼ一定となることがわかる。本章の計算では、最大節点数として $N_y = 81$ 、 $N_{x'} = 16$ までとっての計算を行ったが、図2-12(a)、(b)からは、この場合の計算結果は厳密解に近いと考えられる。本章中では、実験結果との比較のために $N_y = 61$ 、 $N_{x'} = 16$ の節点数を用いて計算しているが、このときの計算結果は、 $N_y = 81$ 、 $N_{x'} = 16$ の節点数の計算結果に比べてその差は、 $2w$ で0.05%、 H_1 で0.3%と小さく、これより本章での計算結果の精度は十分高いと言える。

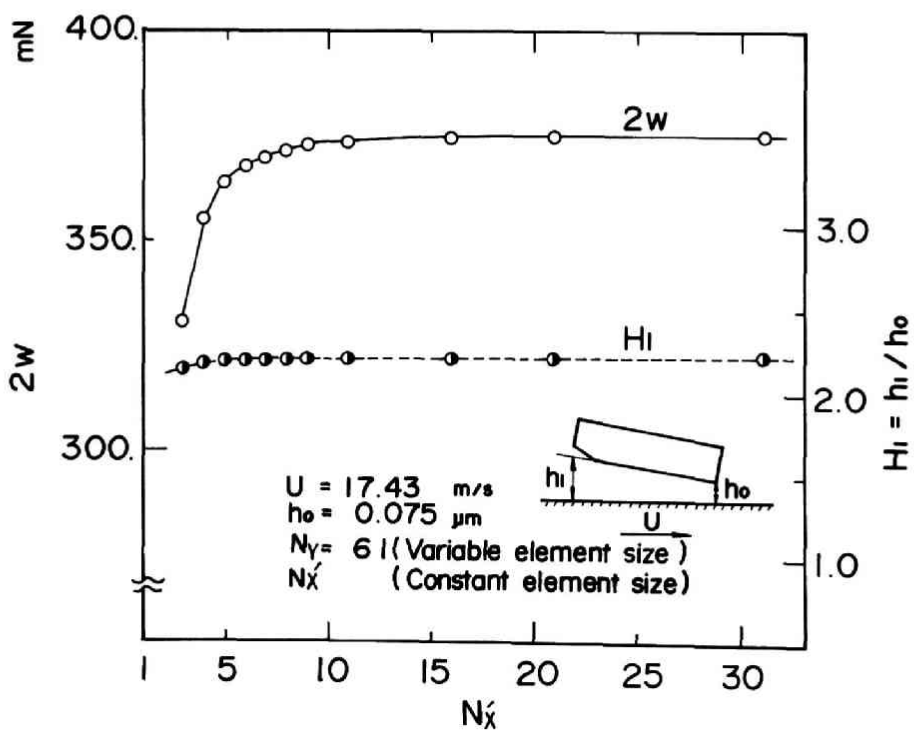
次に、前述の文献[206]におけるHsiaらの計算結果に関しては、スライダ浮上面の分割方法、計算精度など計算手法についての報告がないため、上記文献と同一スライダ諸元、同一作動条件でスライダ浮上特性の理論計算を行い、その結果をHsiaらの計算結果および実験結果と比較することとした。図2-13はヘリウム中(大気圧)において、走行面の速度を一定とし、流出端浮上すきま h_0 を変えたときの浮上力 $2w$ を示したものである。実線が本章の、破線がHsiaらの計算結果である。 $h_0 > 0.3 \mu\text{m}$ において両者の結果は、ほぼ一致しているが、 h_0 が小さくなるにつれて差が大きくなり、 $h_0 = 0.075 \mu\text{m}$ においてはHsiaらの計算値は本章の計算値に比べて34%も小さく、浮上力をかなり過小に評価していることがわかる。

2.5 結 論

本章では、微小すきまで気体潤滑されるスライダ軸受における気体の分子平均自由行程の影響を明らかにするため、空気中、ヘリウム中、減圧ヘリウム中で浮動ヘッドスライダの浮上実験を行って、浮上すきまを精密に測定し、スリップ流れを考慮した修正レイノ



(a) スライダ走行方向の節点数と浮上力、すきま比の関係



(b) スライダ幅方向の節点数と浮上力、すきま比の関係

図 2-12 数値計算誤差の評価

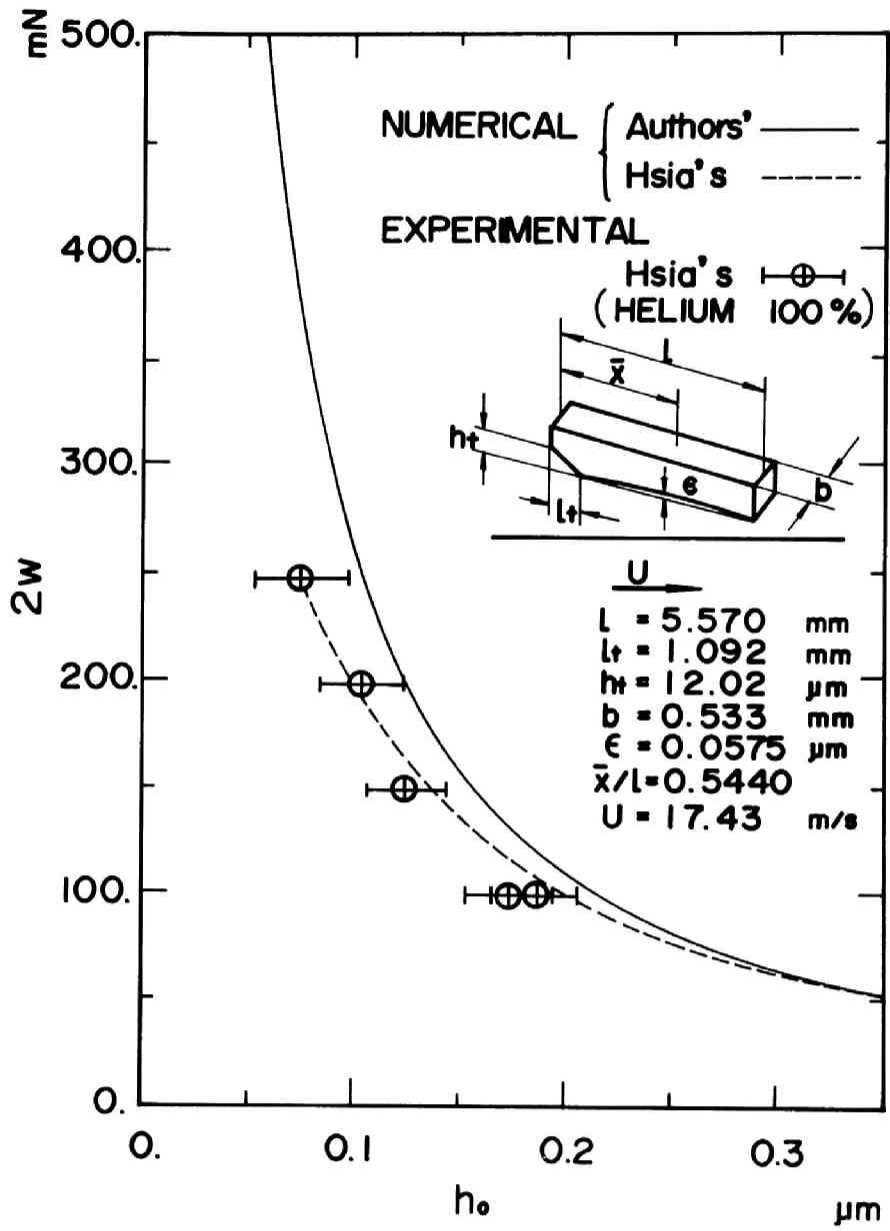


図2-13 浮上すきまと浮上力の関係

ルズ方程式に基づく数値計算結果と比較した。本章で得られた結果を要約すると、以下のようになる。

- (1) 45 – 55 mNの軽荷重スライダを用いて、速度10 – 40 m/sの範囲で、最大値の分子平均自由行程 $\lambda_a = 0.266 \mu\text{m}$ 、最小浮上すきま $0.1 \mu\text{m}$ までの実験を行い、この範囲でスライダ浮上すきまに関して、実験結果と修正レイノルズ方程式に基づく計算結果とは、よい一致を示すことを確認した。
- (2) 上記の範囲は、 λ に起因する浮上すきまの減少率が最大65%、クヌッセン数の最大値が3であり、この領域まで修正レイノルズ方程式を近似式もしくは実験式として適用することの妥当性を実証した。
- (3) さらに、レーザ干渉を利用した精密な浮上すきま測定系（第3章に詳述）によって、大気圧ヘリウム中でスライダの浮上実験を行い、この実験で到達した浮上すきま $0.025 \mu\text{m}$ 、クヌッセン数約8程度までは、スライダ浮上すきまは、修正レイノルズ方程式に基づく数値計算結果と一致することを確認した。
- (4) 浮動ヘッドスライダの設計検討にあたっては、少なくとも本章で示したスライダ形状、作動条件の範囲では、大気中での作動条件に換算した時の浮上すきまが、 $0.01 \mu\text{m}$ 程度まで修正レイノルズ方程式が適用可能であることを明らかにした。

第3章 浮動ヘッドスライダの浮上すきまの精密測定

3.1 緒言

電子計算機のファイル記憶装置として用いられている磁気ディスク装置には、サブミクロンの気体潤滑膜を介して磁気記録媒体上に電磁変換素子を、非接触で位置づける浮動ヘッドスライダが用いられている。高線記録密度、高トラック密度を実現するためには、電磁変換素子と磁気記録媒体との実効距離（実効分離長）を近接させる必要があり、高性能な装置を実現していく上では、浮上すきまの微小化と他の機構要素によって誘起される外乱に対する浮上すきまの安定化が重要な課題となる。このような磁気ディスク装置技術の現状と発展を考えたとき、スライダの浮上すきまの精密測定は、記録再生など電磁変換特性の評価基準となるばかりでなく、潤滑膜特性に及ぼす気体の粒子性の影響など、磁気ヘッドスライダにおける薄層気体潤滑に特有な現象の解明にも不可欠な要素であると言える。

従来、静的な浮上すきまの測定には、第2章で述べたようなニュートンリングの原理に基づく光干渉法が、また動的な浮上すきまの測定には、導電性のスライダと導電性のディスクを組合せ、スライダ浮上面と走行面間の静電容量を検出する方法[301],[302]が、主として用いられてきた。このうち、光干渉法は、光源として単色光あるいは白色光を用い、干渉縞（光強度の極小値）の位置、もしくは色相を判読してすきまを求めるもので[303],[304],[305]、簡便な方法ではあるが、干渉縞もしくは干渉色を生じない $0.2\mu\text{m}$ 程度以下の浮上すきまでは十分な精度が得られないこと、また動的な浮上すきまの測定が困難なことなどの問題点があった。一方、静電容量による方法は、すきまの絶対較正を他の測定手段によらなければならないこと、スライダの小形化に伴って電極加工が困難となること、電極が小形化することにより、浮遊容量の影響を受け易くなり、相対的に測定精度が低下することなどの問題点があった。

これに対して、Fleischerらは、赤外レーザを集光して浮上すきまに照射し、すきま変化に対応するレーザ干渉光の強度を電氣的に検出して、スライダの静的な浮上特性を測定するなど、光干渉を用いた浮上すきま測定に初めて電氣的測定法を導入した[306]。また、

Nigamは、可視(He-Ne)レーザを光源として、スライダ浮上面全体を照射し、スクリーンに投影した干渉縞の任意のポイントの光強度を光センサで検出し、約2kHzまでのスライダ支持機構の共振に起因するすきま変動の測定を行った[307]。この後、モノクロメータなどの可変単波長光源を用いて波長をスイープし、干渉光の強度変化が極値を示す波長を電氣的に検出する方法[308]、あるいは、固定単波長光源を用いて、干渉縞強度が極値となる浮上面位置を電氣的に検出し、これを基準にして最小すきまを外挿的に求める方法など[309]、光電検出に基づくいくつかの測定法も導入されている。しかしながら、これらの手法には、すきまの測定範囲を微小すきままで広げて行く上では、光源の短波長化の限界が、また最小すきまを外挿的に求める場合には、測定精度上の限界があり、いずれも0.1~0.15 μm 以下の微小すきまの測定は実現していなかった。

スライダの浮上特性を測定するための他の光学的手法には、物体の絶対速度の測定が可能なレーザドップラ振動計(LDV)を応用した測定法がある。Miu、Bogyらは媒体面上に形成したクレータ状の欠陥やスパッタリングによって形成した酸化アルミニウムの矩形状突起を通過する時のスライダの過渡応答を、スライダ背面からレーザビームを照射し、レーザドップラ振動計の原理を応用して、絶対空間におけるスライダの運動として測定している[311],[312]。そしてこれらの測定結果を時間領域での修正レイノルズ方程式の直接解析結果と比較している。LDVは実媒体を用いたスライダの動特性の測定には効果を発揮し、実際の装置におけるスライダの性能を評価するに有効である。しかし、突起などの媒体欠陥を通過する時のスライダの運動、すなわちスライダの動特性の測定という観点からは、スライダと媒体間の相対運動(すきま)を直接測定できないため、正確な評価は困難である。加えて、精密な過渡応答を測定するためには、主として媒体のランアウトに起因する低周波数の外乱成分を除去することが必要である。

本章では、まず、スライダ浮上すきま部に、微小なスポットに集光した可視(He-Ne)レーザを照射し、その時生じる干渉光強度を電氣的に検出し、多重干渉を考慮して、高精度に浮上すきまの測定が可能な光学系の構成について述べる。続いて、スライダ浮上面および走行面の光学特性、回路系のノイズなどが測定精度に及ぼす影響を評価するとともに、機構振動に起因する光学特性の変動をコンピュータ処理により補償し、浮上すきまの静特性を自動測定する手法を示す。さらに、矩形状の溝・突起を通過するスライダの過渡応答から、本測定系が広帯域の動特性を有することを実証している。また、本方法によるスライダ浮上特性の測定結果が、修正レイノルズ方程式に基づく数値計算結果とよい一致を示

すことを確認している。

3. 2 可視レーザ干渉法による浮上すきまの測定

3. 2. 1 測定原理および測定装置の構成

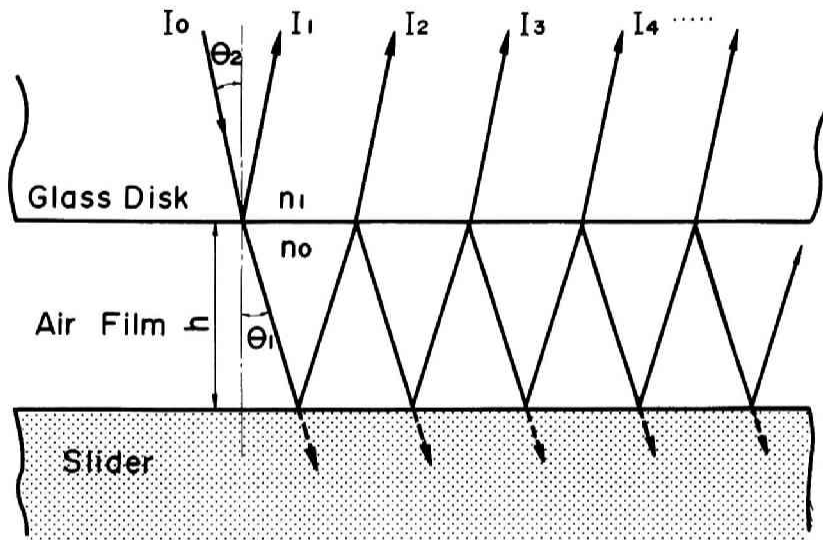
図3-1(a)、(b)に、可視レーザ干渉法に基づく浮動ヘッドスライダの浮上すきまの測定原理を示す。まず、図3-1(a)に示すようなガラスディスク上に、すきま h 離れてスライダが浮上している光学モデルを考える。いま、ガラスディスク側から、波長 λ で光強度 I_0 の単色光を、入射角 θ_2 で入射する。入射されたレーザ光は、ガラスディスクと浮上面とが形成するすきまにおいて、無限回の反射(多重反射)を繰り返す。このとき観測される干渉光強度 I は、ガラスディスクの振幅反射率の絶対値を r 、スライダ浮上面の振幅反射率の絶対値を s とすると、入射光強度で規格化した形で次式のように表される[310]。

$$I = \frac{r^2 + s^2 - 2rs \cdot \cos \delta}{1 + r^2 s^2 - 2rs \cdot \cos \delta} \quad (3-1)$$

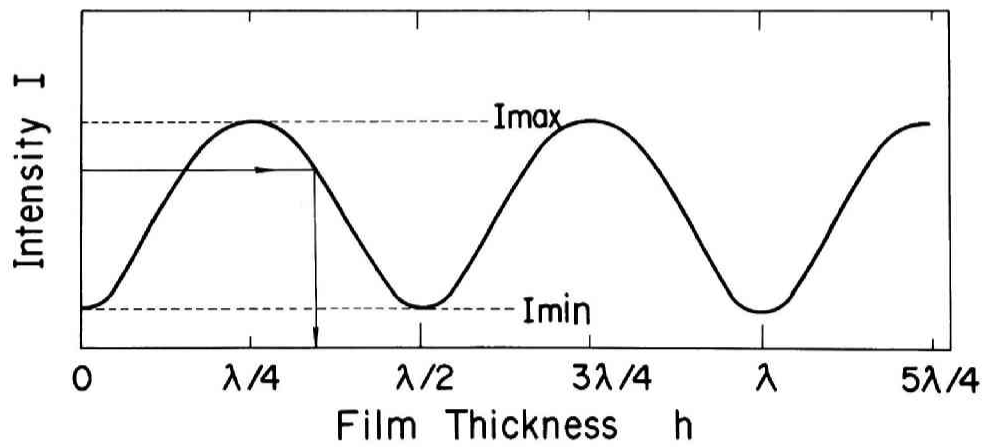
ここで、 $\delta (= 4\pi h / \lambda \cos \theta_1, \theta_1: \text{光の屈折角})$ は、 k 番目の多重反射光(光強度が I_k)と $(k+1)$ 番目の多重反射光(光強度が I_{k+1})($k=1, 2, 3, \dots$)との波面の位相差である。

式(3-1)より求めたすきま h と多重干渉光強度 I の関係を、図3-1(b)に示す。干渉光強度 I は、すきま h が、零から $\lambda/4$ 変化するごとに波形が反転する周期関数になり、 h は I に関して多価関数となる。干渉光強度 I からすきま h への変換には、すきまが零から h まで変化する間に通過する干渉光強度 I の極値(極大値、極小値)数 n を求めておけばよい。図3-1(b)に示すように、アナログ的に変化する干渉光強度を精密に測定できれば、すきま変化に対する干渉光強度変化が0となる干渉光強度特性の極小値、極大値の近傍に対応するすきま($h = n \cdot (\lambda/4) : n=0, 1, 2, \dots$)を除いて、任意のすきまを精密に測定することが可能である。

図3-2に浮上すきま測定系の概略を示す。スライダ走行面となるガラスディスクとこれを支持・回転させる空気軸受スピンドル、浮動ヘッドスライダ機構を精密に位置決めす



(a) 浮上すきまの光学モデル



(b) 浮上すきまと干渉光強度の関係

図3-1 浮上すきまの測定原理

る微動機構などは、第2章で示した実験系と共通である。すきま測定系は、光源となるヘリウム・ネオンレーザ、入射光と反射光を分離する偏光ビームスプリッタと波長板、レーザ光を集光して浮上すきまに照射するビームエキスパンダと集光レンズ、干渉光を検出するフォトディテクタ・アンプ系および得られた信号を処理する信号処理系などから構成される。スライダは、支持機構を介してガラスディスク下面に押圧・設定される。光源には、波長 $\lambda = 632.8\text{nm}$ 、出力 2mW の直線偏光のヘリウム・ネオンレーザを用いている。特にHe-Neレーザのような気体レーザは、コヒーレンシが高いため、測定対象である浮上すきま以外の光路部分においても干渉を起こすため、これが測定誤差の原因となる。そこで、レーザビームを、ビームエキスパンダを用いて一旦平行光束に拡大した後、レーザ集光レンズによって微小なスポットに絞って浮上すきま部に照射する構成とし、有害な干渉縞の影響をこのスポット内で実効的に平均化することで、除去した。

測定される干渉光強度は、集光されたスポット内のすきまのほぼ平均値に対応するものと考えられ、スポットの大きさは測定系の空間分解能を規定する重要な目安となる。集光スポット径を評価するため、図3-3に示すように焦点（スポット）位置の近傍を、光軸に垂直に設定したナイフエッジを移動させ、集光レンズに対して反対側に設置したフォトディテクタにより、ナイフエッジの移動量と受光される光強度との関係を調べた。レーザビームの横断面の光強度の分布は、ほぼガウス分布で近似できるので、ナイフエッジの移動に伴って測定される総光量の特性から、レーザスポット径を推定することができる。一般には、光軸における最大光強度に対して、 $1/e^2$ の強度レベルとなる位置をスポットの外縁と定義しているが、この定義を直接適用してスポット径を推定する場合には、図3-3に示すようにスポットをナイフエッジが横断する時の光量の変動が急峻であり誤差を生じやすい。そこで、最大光強度の半分の強度レベルとなる位置を仮のスポット径 ϕ' として、この値を実験結果から求め、 ϕ' を用いて本来のスポット径 ϕ を推定する。 ϕ' と ϕ とは、 $\phi = 1.69\phi'$ の関係にあり、実験結果から求めた ϕ' は、 $\phi' = 7\mu\text{m}$ であるので、 $\phi = 12\mu\text{m}$ となり、これが、ほぼ本系の空間分解能と考えられる。

垂直入射系においては、浮上すきまからの戻り光の一部がレーザ発振器に再入射し、これが、レーザ発振器の出力変動を誘起する。そこで光学系に対して、レーザ発振器の光軸を微小角度傾け、実効上、斜め入射／反射系とするとともに、レーザ発振器の直前に設けた絞りによって戻り光を完全に遮断することで、レーザ出力の安定化を図った。さらに、偏光ビームスプリッタによって、入射光の一部を検出し、その光強度を入射光の基準値と

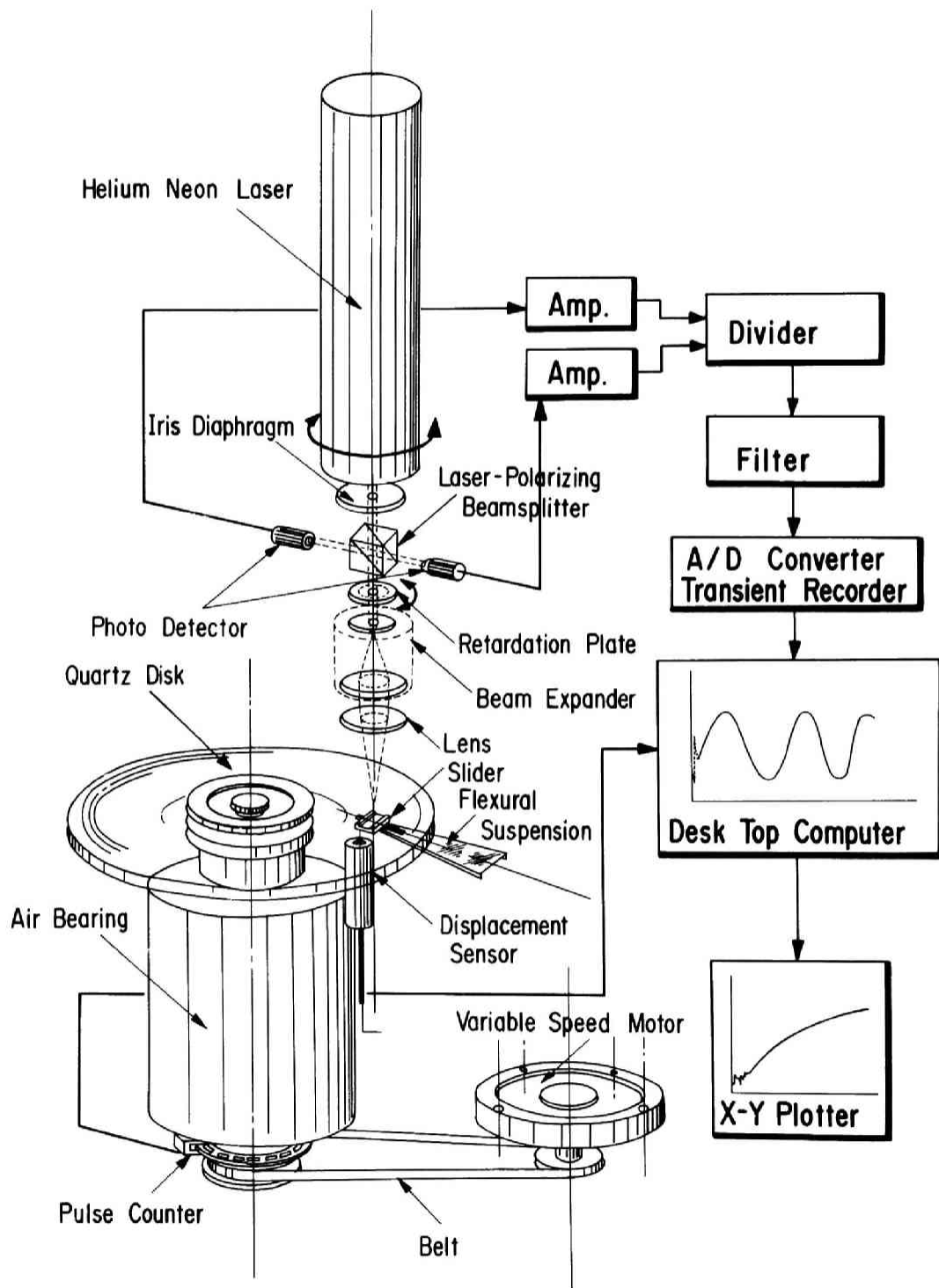


図3-2 浮上すきまの測定系

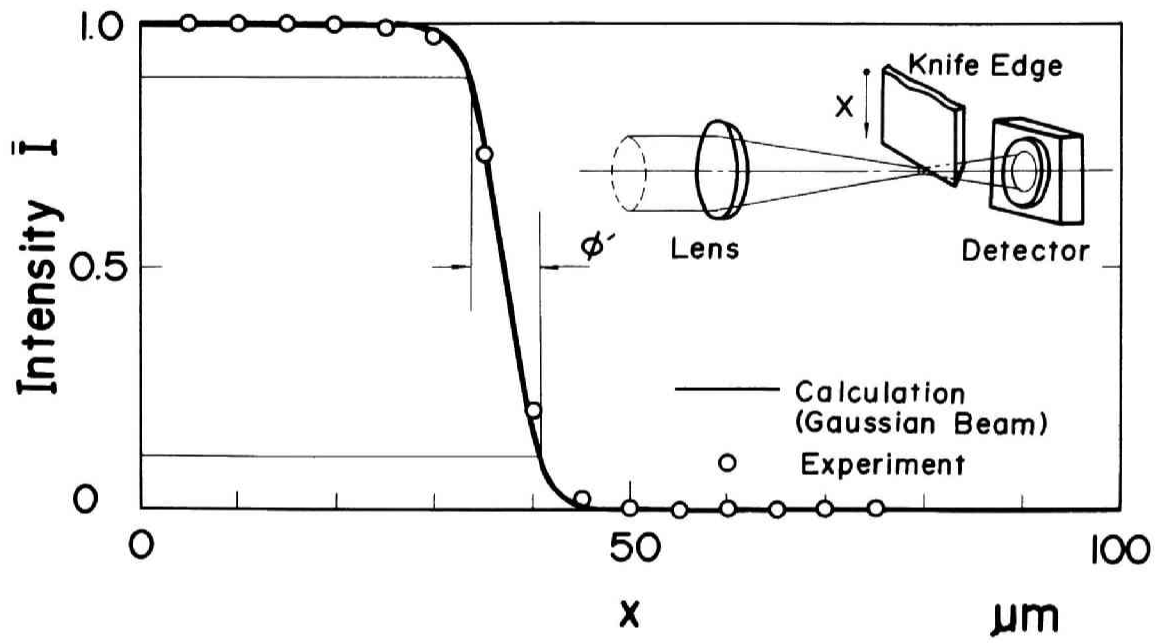


図3-3 レーザ集光スポット径の評価

し、得られた干渉光強度を電氣的に補償することによって、レーザ発振器の出力変動の影響を除去した。

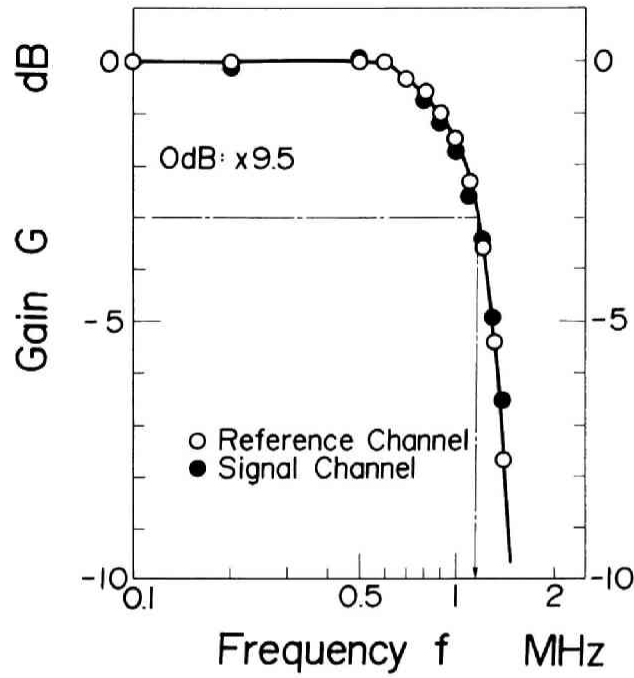
受光素子には、高速応答性を有するPINシリコンフォトダイオードを用いた。検出回路は、図3-4(b)に示すように戻り光(干渉光)および参照光(レーザ出力補償のための検出光)検出部とも2段アンプ構成とし、1段目は受光素子の電流変化を電圧変化に変換するボルテージフォォワとして用い、2段目で20dBの増幅を行っている。光検出素子自体の応答特性は、約30MHz程度、またアンプ系の周波数特性は、図3-3(a)に示すように1.5MHz(3dBダウン)の応答性を有しており、スライダの動特性(剛体運動)を測定するためには十分な性能を有している。

スライダ走行面には、外径200mm、厚さ10mmで均一な光学特性を有する低膨張合成石英ガラスを用いた。このガラスディスクは、平坦度が10μm以下、表面あらさは $R_{max}=0.004\mu m$ 以下に高精度な光学研磨が施されている。スライダ浮上量変動の原因となる振動の影響を低減するため、ガラスディスクを取り付けたスピンドルは静圧空気軸受によって支持した。また、スライダの安定浮上を維持するため、測定系全体をクラス100以下の高潔淨環境に保った。

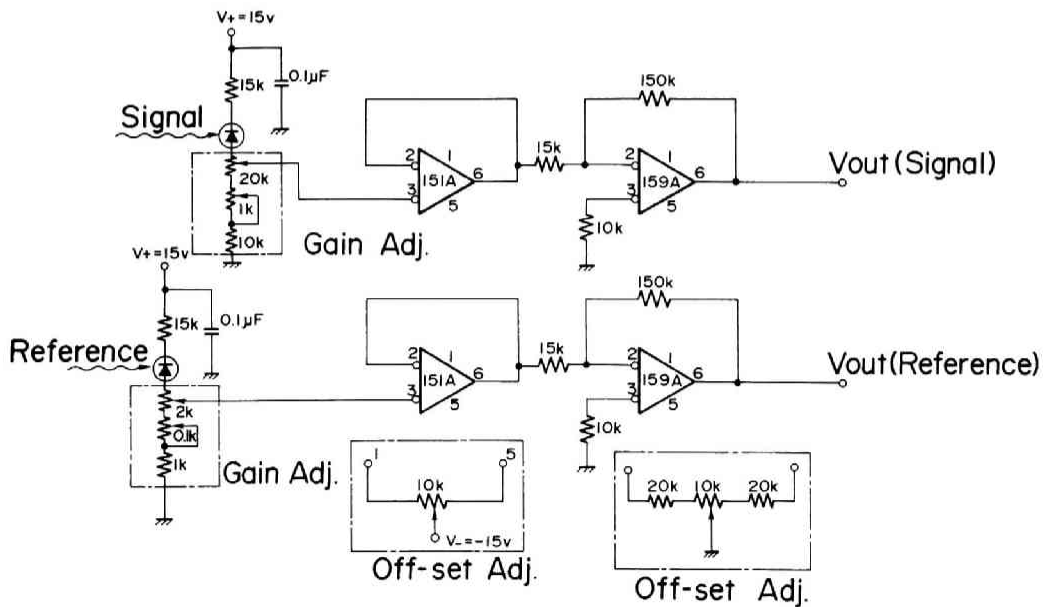
3.2.2 較正および誤差評価

スライダの浮上すきまの大きさは、検出した干渉光強度を式(3-1)を用いてすきまに変換することによって求められる。したがって式(3-1)を実際の測定系に適用することの妥当性を、あらかじめ確認しておく必要がある。

ところで、実際にフォトディテクタによって検出される光は、厳密にはガラスディスクのスライダ走行面と反対側の表面や、いくつかの光学部品からの反射光が重畳しており、その分、受光強度はオフセットを受けている。そのため、例えば測定される干渉光の極大値の強度 I_{max} や極小値の強度 I_{min} は、計算値とは、比例的な対応はしない。光強度の測定値(フォトディテクタの出力)と計算値を対応させるためには、フォトディテクタの出力と光強度との間の関係を確認しておく必要がある。そのためには、干渉光強度の極大値(フォトディテクタの出力が V_{max})と極小値(フォトディテクタの出力が V_{min})の他に、基準とする光強度レベルが必要であり、これにはスライダ走行面(図3-1(a)に示すが



(a) 干渉光強度検出回路の周波数特性



(b) 干渉光強度検出回路

図 3-4 干渉光強度検出系

ラスディスク下表面)のみからの反射光強度(フォトディテクタの出力が V_{r^2})を用いる。フォトディテクタの出力の光強度への換算係数を c 、上述のオフセット光強度に対応するフォトディテクタ出力を V_0 とすると、光強度とフォトディテクタの出力の関係は次式のようになる。

$$I_{\max} = c \cdot (V_{\max} - V_0) \quad (3-2)$$

$$I_{\min} = c \cdot (V_{\min} - V_0) \quad (3-3)$$

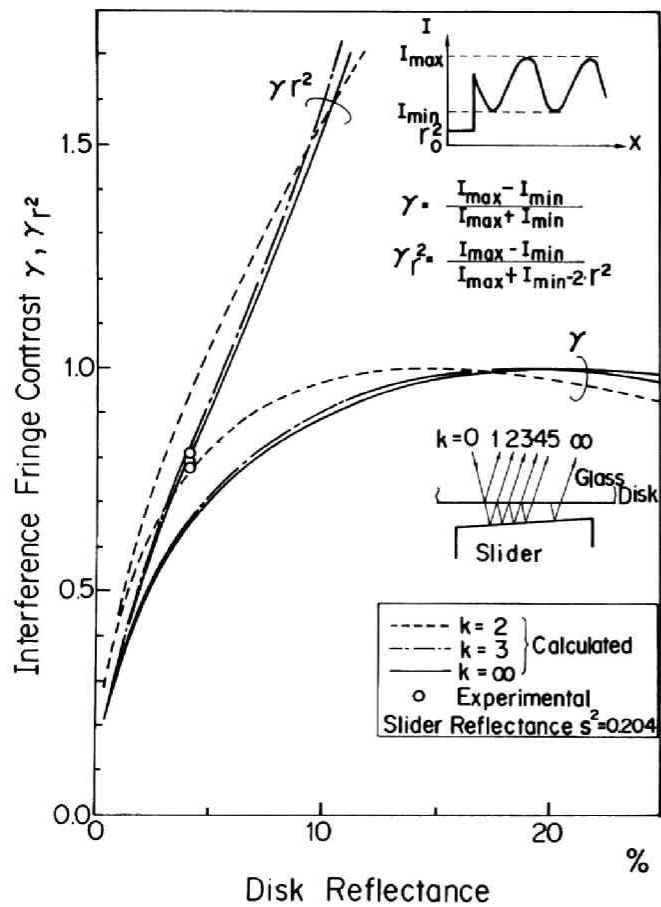
$$r^2 = c \cdot (V_{r^2} - V_0) \quad (3-4)$$

測定されるフォトディテクタの出力と光強度を対応させるために、ディスク面のみからの反射光強度 r^2 を基準とする干渉縞コントラスト γr^2 を用いると、 γr^2 は次式のようになり、測定値と計算値との対応付けが可能となる。

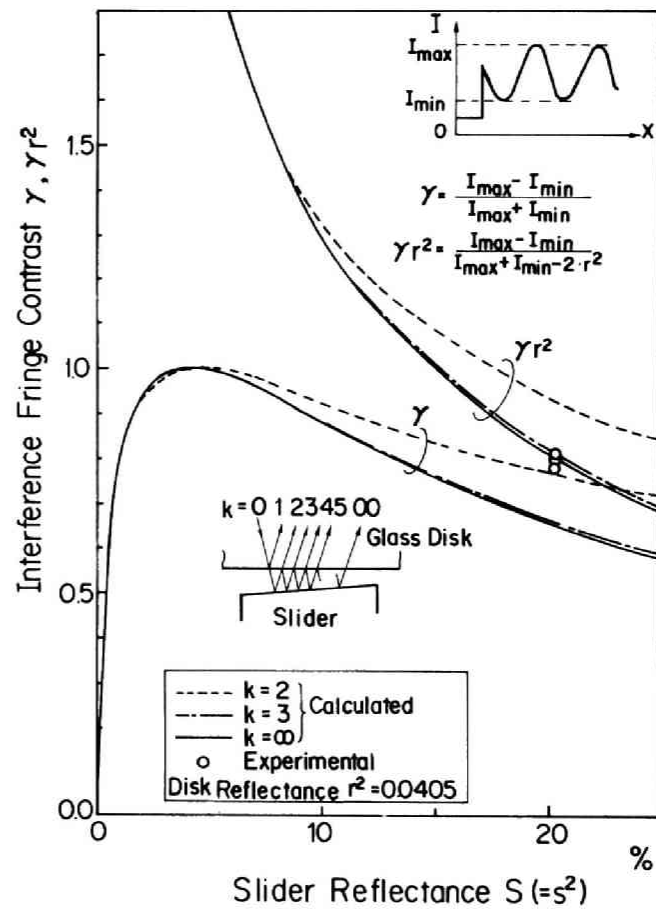
$$\gamma r^2 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min} - 2r^2} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min} - 2V_{r^2}} \quad (3-5)$$

図3-5(a)、(b)には、各々ガラスディスク面の反射率と干渉縞コントラストの関係およびスライダ浮上面の反射率と干渉縞コントラストの関係を示す。ここでは、最も多用する石英ガラスとMn-Zn-フェライトスライダの組合せによる実験結果を示したが、干渉縞コントラスト γr^2 は計算値とはよく一致しており、 V_{\max} 、 V_{\min} 、 V_{r^2} の相対関係が光強度に比例的に対応していることが確認できる。また図3-5には、一般的に定義されている干渉縞のコントラスト γ の計算結果も参考のため併記しており、スライダ面およびディスク面の反射率が等しい場合に最大のコントラストが得られることが分かる。

次に、図3-6に示すような、一端にシムとして薄いクロム膜を形成した実用スライダの浮上面を、スライダ走行面となるガラスディスクに接触させて構成した固定くさび膜について、式(3-1)に基づいて算出した干渉光強度と本測定系を用いた干渉光強度の測定値とを比較することによって、式(3-1)を適用することの妥当性を確認することと



(a) ディスク面反射率とコントラストの関係



(b) スライダ浮上面反射率とコントラストの関係

図3-5 表面反射率と干渉縞コントラストの関係

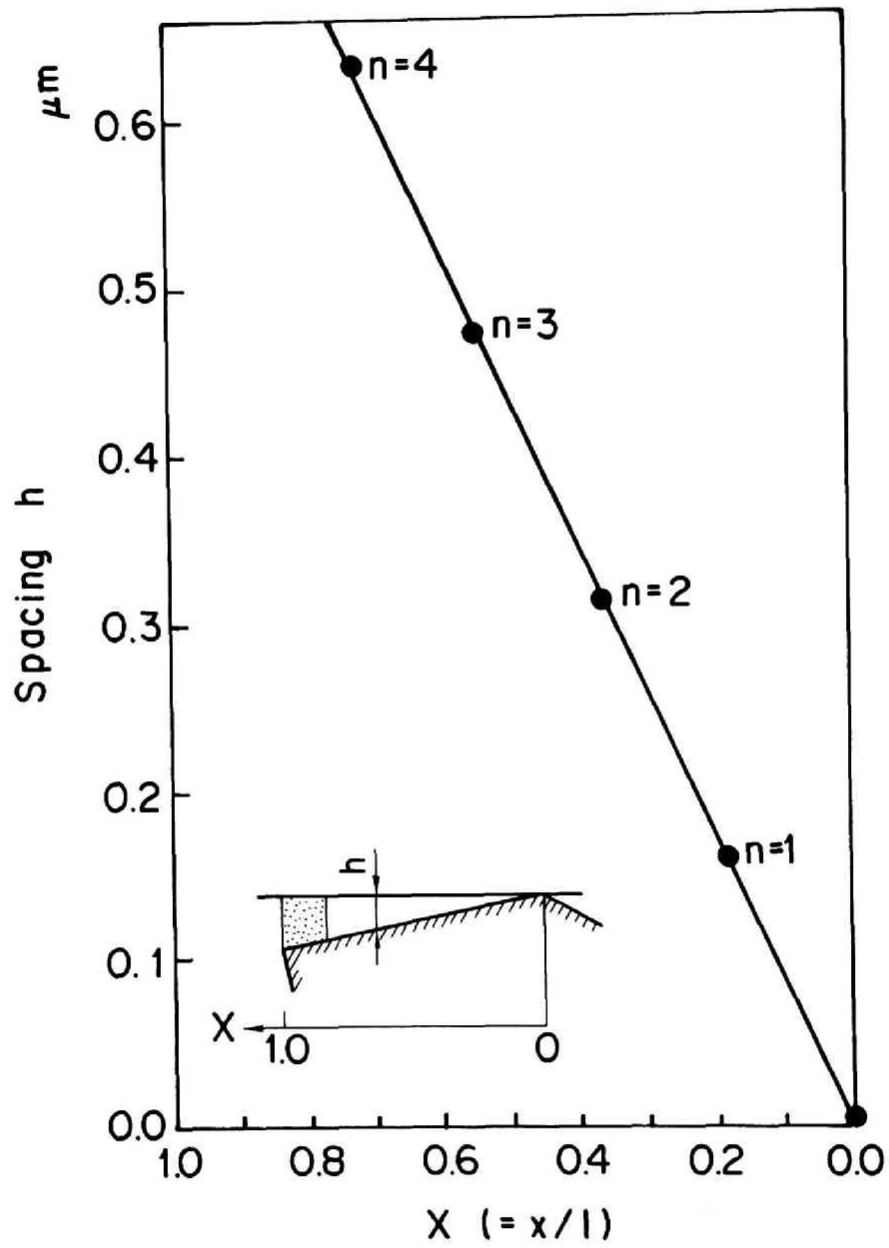


図3-6 固定くさび状空気膜の形状

する。固定くさび膜の形状は、本レーザ光学系をX軸方向に走査し、得られた極値に対応するすきま ($h = n \cdot (\lambda / 4)$: 図3-6には、 $n = 1 \sim 4$ までを表示した。) の4点の値と、別途測定したスライダの表面形状の値を用いて、これら4点の間のすきまを補間をして求めた。

図3-6のすきま形状に基づいた干渉光強度の特性の計算結果と、同すきまを走査して得られた干渉光強度の特性の測定結果を、図3-7に比較して示す。横軸は、接触点を基準にしたスライダ浮上面の長さ方向の位置であり、縦軸は、入射光(強度 I_0)によって規格化した干渉光強度である。太い実線が干渉光強度の測定結果であり、一点鎖線が多重干渉を考慮した場合 ($k = \infty$) の計算結果である。また、参考のため、図3-1(a)に示す1番目の反射光(光強度 I_1)と2番目の反射光(光強度 I_2)の2光束のみを考慮した場合 ($k = 2$) の干渉光強度の計算結果を二点鎖線で示す。なお、合成石英ガラスディスクの光強度反射率 $R (= r^2)$ および $Mn-Zn$ -フェライト製スライダの浮上面の光強度反射率 $S (= s^2)$ の値としては、各々0.035、0.204を用いた。測定結果は、多重干渉を考慮した計算結果とよい一致を示している。なお二光束干渉のみを考慮した場合の計算結果は、測定結果との差異が大きく、極大値が過大に、また極小値が過小に現れている。測定結果には微小な乱れが観測されるが、これはスライダ浮上面およびガラスディスク面の表面あらさおよび微妙な光学特性の不均一さの影響によるものと考えられる。

すきま測定誤差の正確な評価は困難であるが、ここでは、測定誤差を、スライダ定常浮上状態における正味の浮上すきま変動以外の要因による出力信号の変動分と考えることとし、以下に示すような要因分離とその評価を行った。なお、以下では干渉光強度として、その極大値 I_{max} と極小値 I_{min} との差を基準とし、 $\bar{I} = (I - I_{min}) / (I_{max} - I_{min})$ によって規格化した値を \bar{I} と記すことにし、これを用いることとする。

測定誤差の主要因としては、

- ①干渉光強度検出・補償回路系のノイズ
- ②ガラスディスクの光学特性(表面反射率、透過率)の不均一さ
- ③回転系の振動に伴う微小な光軸のずれ

などが考えられる。①の影響は、前述の既知のくさびすきまを用い、特定のすきまにおけ

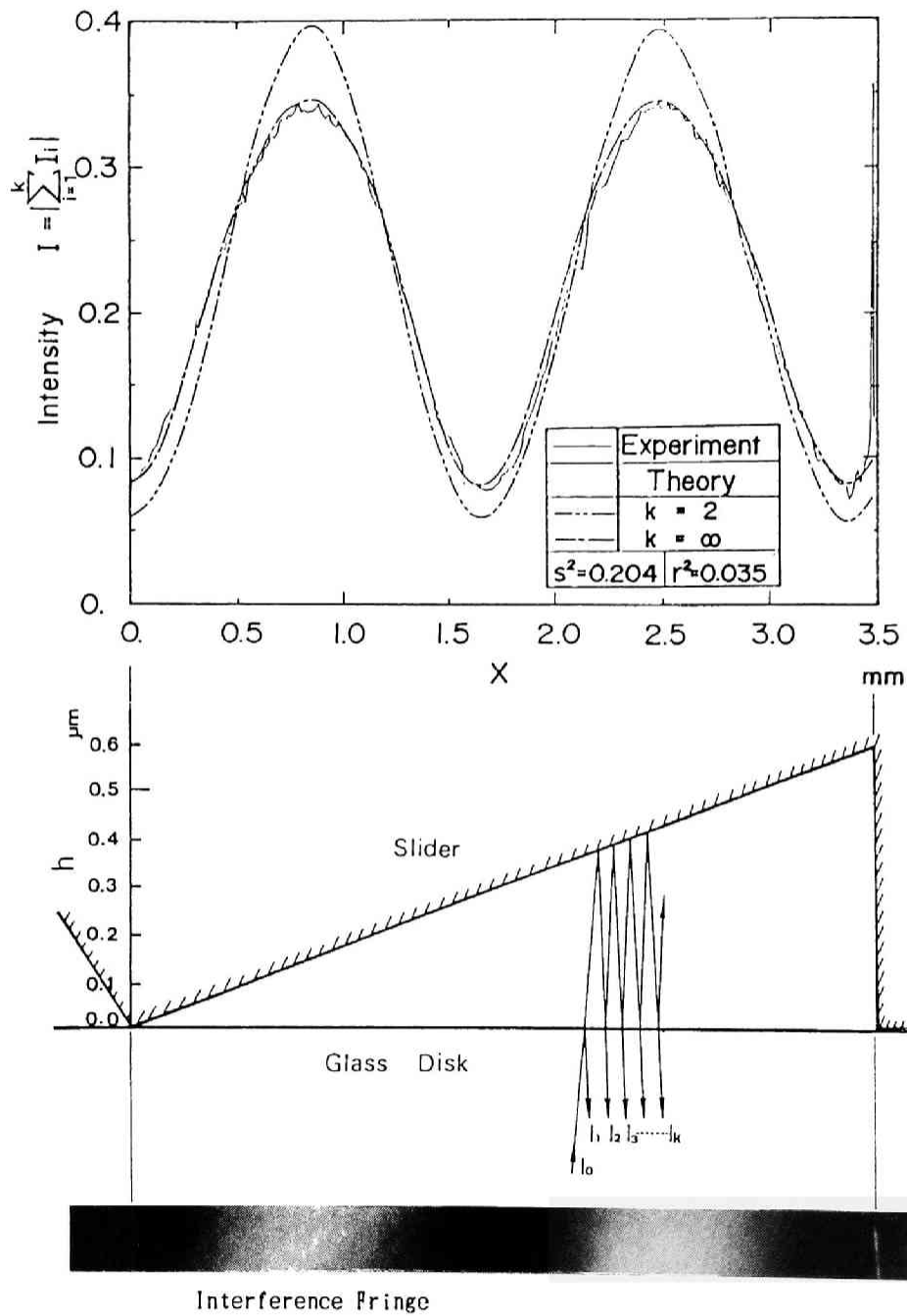


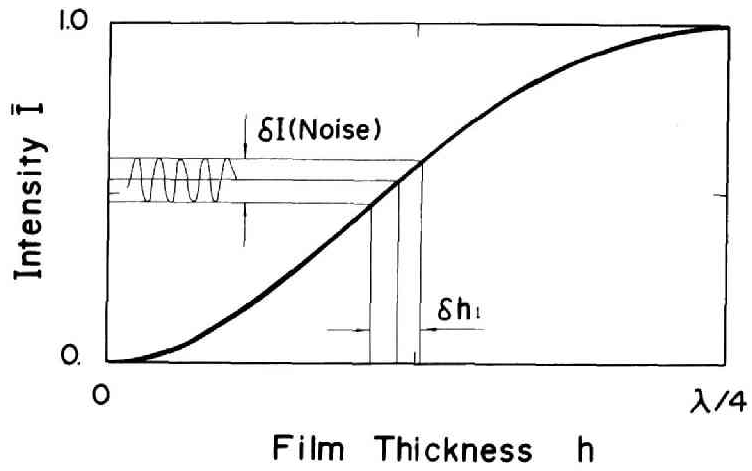
図3-7 干渉光強度の較正

る干渉光強度を測定することにより誤差要因②、③の影響と分離できる。すなわち、図3-8(a)に示すように、出力信号中のノイズ成分 $\delta \bar{I}$ から各干渉光強度レベルに対応するすきま測定誤差 δh_1 を求めることができる。②、③の影響は、ガラスディスク表面のみからの反射光強度をガラスディスク回転停止時および定常回転時において測定し、この両者の出力の差を得ることによって、誤差要因①の影響と分離できる。誤差要因②および③は、測定結果に及ぼす影響としては、ガラスディスクの表面反射率の不均一さと等価であり、包括してこれに含めて考慮することとし、その大きさを $\delta R (= \delta r^2)$ とする。これは、図3-8(b)に示すように、ガラスディスクの表面反射率がその中心値 R に対して、 $\pm \delta R / 2$ だけ変動した場合の干渉光強度特性より、要因②、③による測定誤差 δh_2 が求まる。

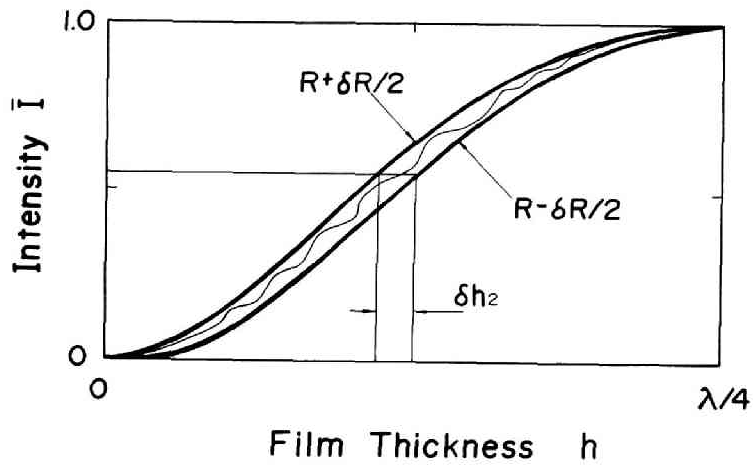
δh_1 、 δh_2 はともに微小量であるため、全体としてのすきま測定誤差 δh は、ほぼ δh_1 および δh_2 の線形和 $\delta h = \delta h_1 + \delta h_2$ と考えることができる。図3-8(c)に、 δh の実測値を、横軸に規格化干渉光強度 \bar{I} をとって示す。 δh は、 $\bar{I} = 1$ (極大値)あるいは $\bar{I} = 0$ (極小値)に近づくにしたがって増加し、 $\bar{I} = 0$ で、約 $0.01 \mu\text{mp-p}$ 、 $\bar{I} = 1$ で約 $0.015 \mu\text{mp-p}$ 程度となる。特に $\bar{I} = 1$ 近傍で測定誤差が増大するのは、主として干渉光強度に比例してノイズも増幅されるためである。すきま変化に対して、干渉光強度がほぼ線形に変化する $0.2 \leq \bar{I} \leq 0.7$ の中間領域での測定誤差は、 $0.0013 \mu\text{mp-p}$ 程度である。

3. 2. 3 スライダの静特性の自動測定およびその結果

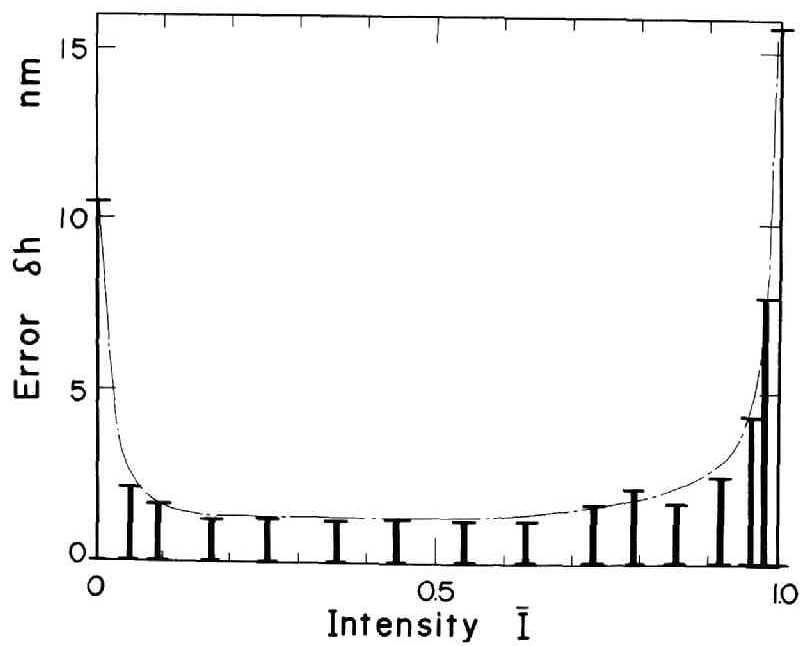
3. 2. 1項で述べた可視レーザー干渉による微小すきま測定の原理に基づいたスライダ浮上すきまの静特性を自動測定する手順を、図3-9のフローチャートに示す。まずスライダを設定し適切な回転数で浮上させた後、ディスクを所望の最高回転数(最大走行速度)まで加速する。この後、緩やかに減速しながら、定められた回転数の微小変化分ごとに回転数と干渉光強度をサンプリングして行く。この時、スピンドル系の高速回転に伴って励起される機構振動等の影響によって、フォトディテクタに到達する戻り光の光軸が微妙に振れることになり、その結果、スライダ浮上すきまの変化に応じて現れる複数の干渉光強度の極大値もしくは極小値のレベルに不揃いが生じる。これは、後述の光強度をスライダ



(a) 光強度検出系のノイズの影響



(b) 反射率変動の影響



(c) 規格化干渉光強度とすきま測定誤差の実測例

図3-8 測定誤差の評価

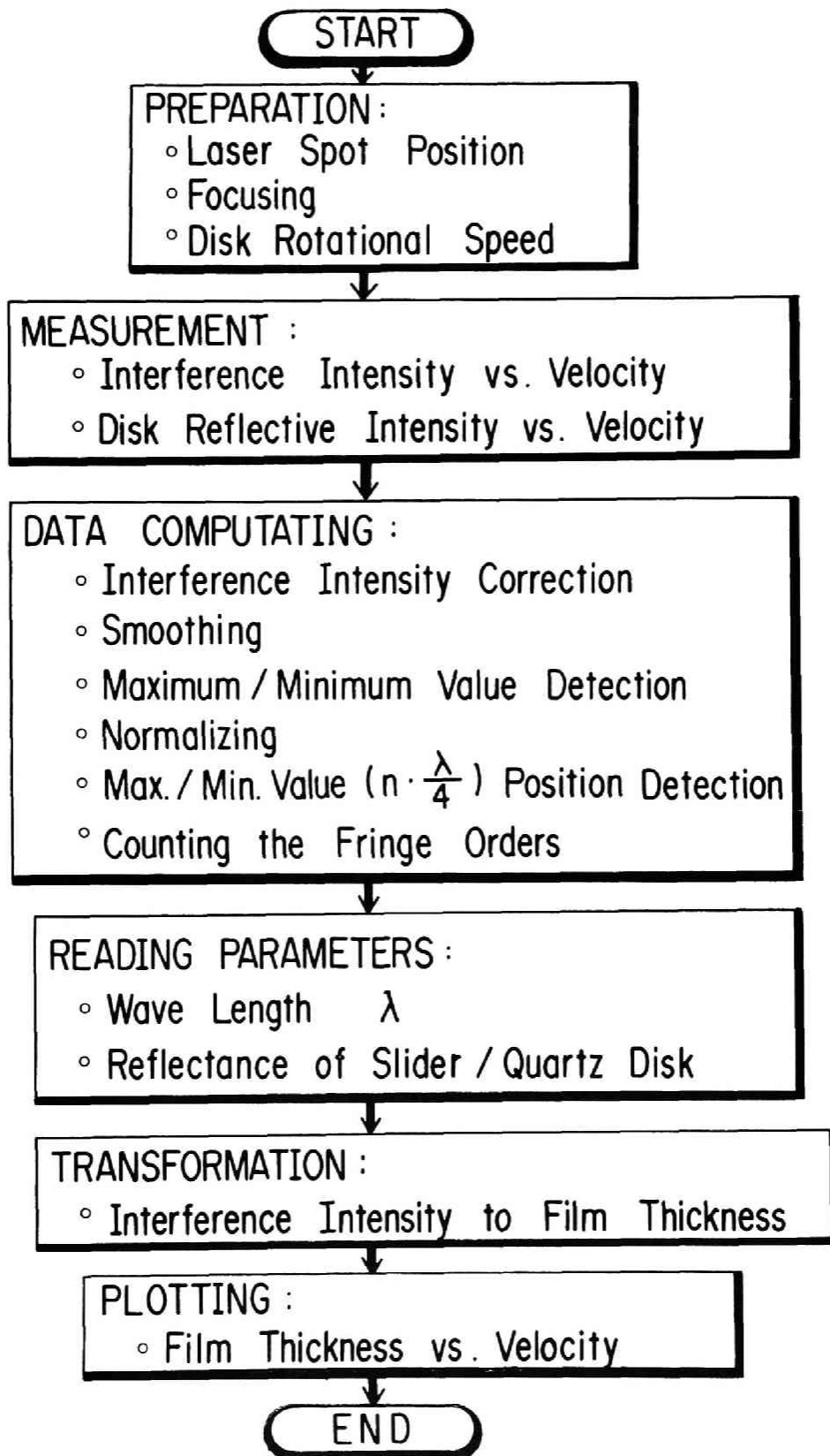
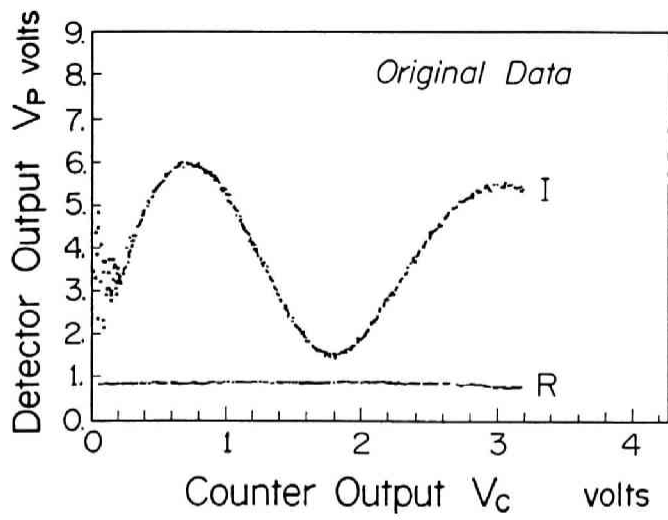


図3-9 浮上すきま自動測定のためのデータ処理のフローチャート

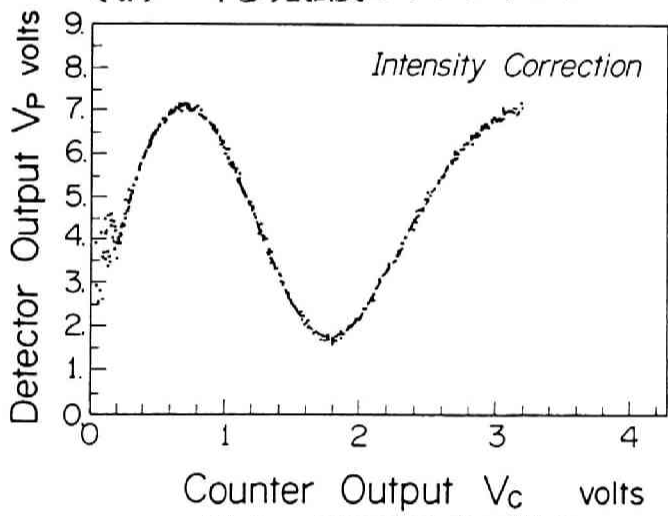
浮上すきまに変換する処理過程での誤差要因となる。これに対して本研究では、回転時のガラスディスク表面のみからの反射光強度を併せて測定し、これがガラスディスクの回転数変化に対して一定となるように干渉光強度を補償するという手法を用いている。次に、干渉光強度 I に重畳される微小なすきま変動成分をスムージング処理により除去し、極大値と極小値の差で規格化する。これら採取データの一連の処理過程を、図3-10に示す。図3-10(a)は、干渉光強度 (I)、ガラスディスク面のみからの反射光強度 (R) の未処理のままの測定データであり、(b)は、反射光強度を用いて干渉光強度を補正した結果である。このような補正により、極大値間相互のレベルが一致するようになる。(c)は、(b)において補正した干渉光強度に、スムージング処理を施して微小なすきま変動によるデータの散乱成分を除去した結果である。この干渉光強度の測定結果を規格化して表示すると、(d)を得る。さらに、(d)において、極値と続く次の極値との区間(すきまの変化が $\lambda/4$ の範囲)を1区間とする区間に分割し、すきまが零から h まで変化する間に現れる干渉光強度 \bar{I} の極値数 n を、各区間ごとに識別して絶対すきま(浮上量)を算出する。このようにして、図(e)に示すような走行速度に対して、連続したスライダの浮上特性を得ることができる。

本測定法を用いて、大気圧空気中でスライダ浮上実験を行い、スリップ流れを考慮した修正レイノルズ方程式[314]に基づく数値計算結果と比較した。図3-11に供試スライダ(テーパフラットスライダ)の形状に関する記号を、また表3-1にその諸元を示す。スライダの左右の浮上面形状については若干の差異があるが、その差はわずかでありスライダ浮上特性に及ぼす影響は小さいと考えられるため、数値計算に当たってはそれぞれの平均値を用いた。また、壁面修正係数としては、ガラス面に対する空気の値である $a = 1.24$ を用いた。

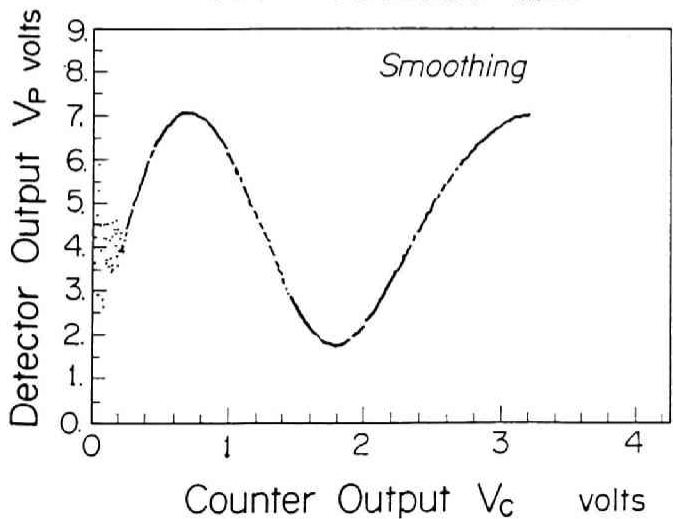
図3-12にスライダの走行速度と浮上すきまの関係を示す。太い一点鎖線は、数値計算結果であり、細い実線は内周側の、また細い一点鎖線は外周側の浮上面での浮上すきまの測定結果である。 h_0 はスライダ流出端の、また h_1' はスライダフラット部先端の浮上すきまを示す。スライダ流出端 h_0 の測定結果と数値計算結果の差は、 $\pm 0.008 \mu\text{m}$ 以内にあり、よく一致している。スライダフラット部先端の浮上すきま h_1' については、測定結果が実験結果をやや上回る傾向にある。また、流出端浮上すきま h_0 については、詳細にみると逆に測定結果が数値計算結果をわずかに下回る傾向にある。これは、支持機構とスライダの微妙な取り付け誤差のため、等価的に支持点位置がスライダ流出端側にず



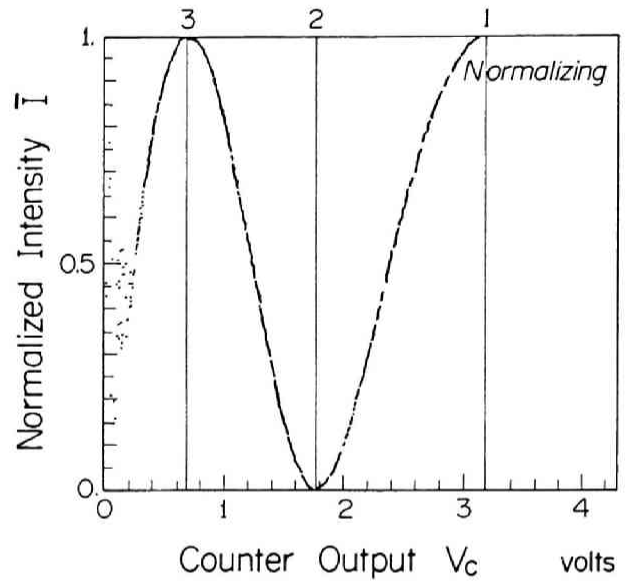
(a) 干渉光強度のサンプリング



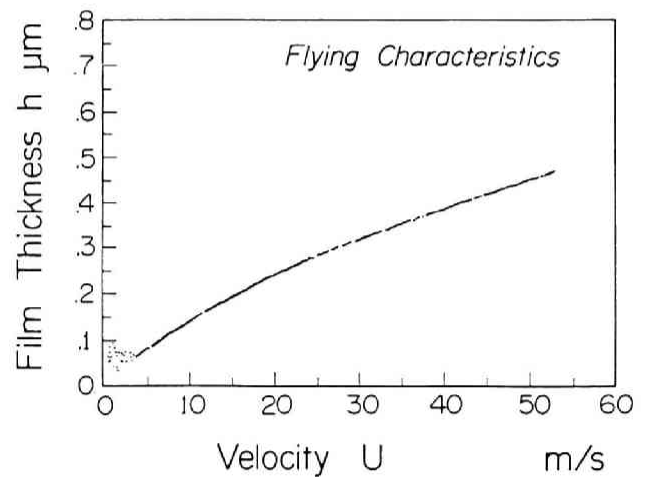
(b) 干渉光強度の補正



(c) スムージング処理



(d) 規格化および極値検出



(e) 浮上すきまへの変換

図3-10 静特性の自動測定におけるデータ処理の例

表3-1 供試テーパフラットスライダの諸元

	Inner Shoe	Outer Shoe
l (mm)	3.645	3.650
b (mm)	0.267	0.275
l_1 (mm)	0.62	0.61
δ (μm)	5.55	5.60
ϵ (μm)	0.01	0.03
$\bar{\chi}/l$	0.5684	
$2w$ (mN)	66.8	

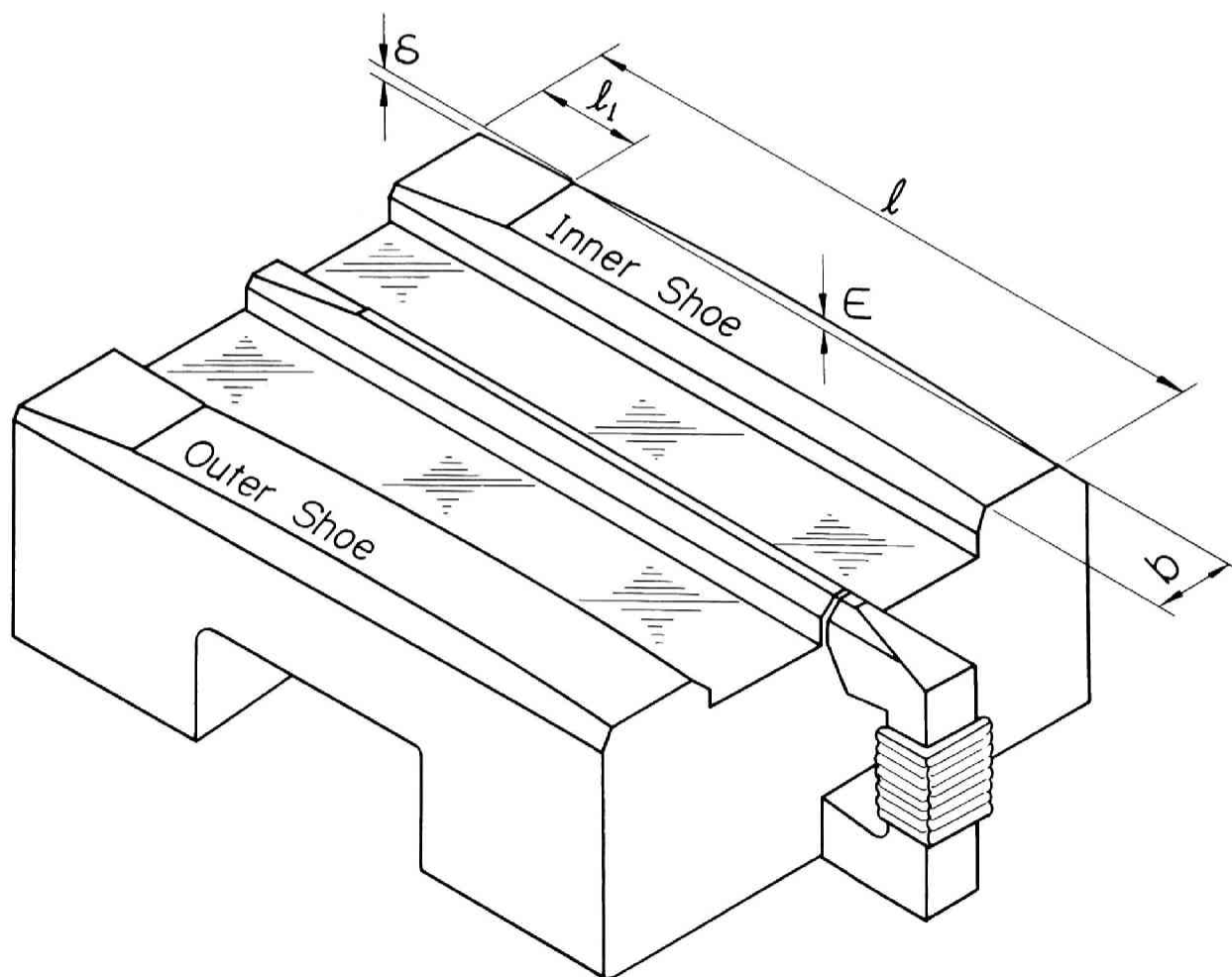


図3-11 テーパフラットスライダ

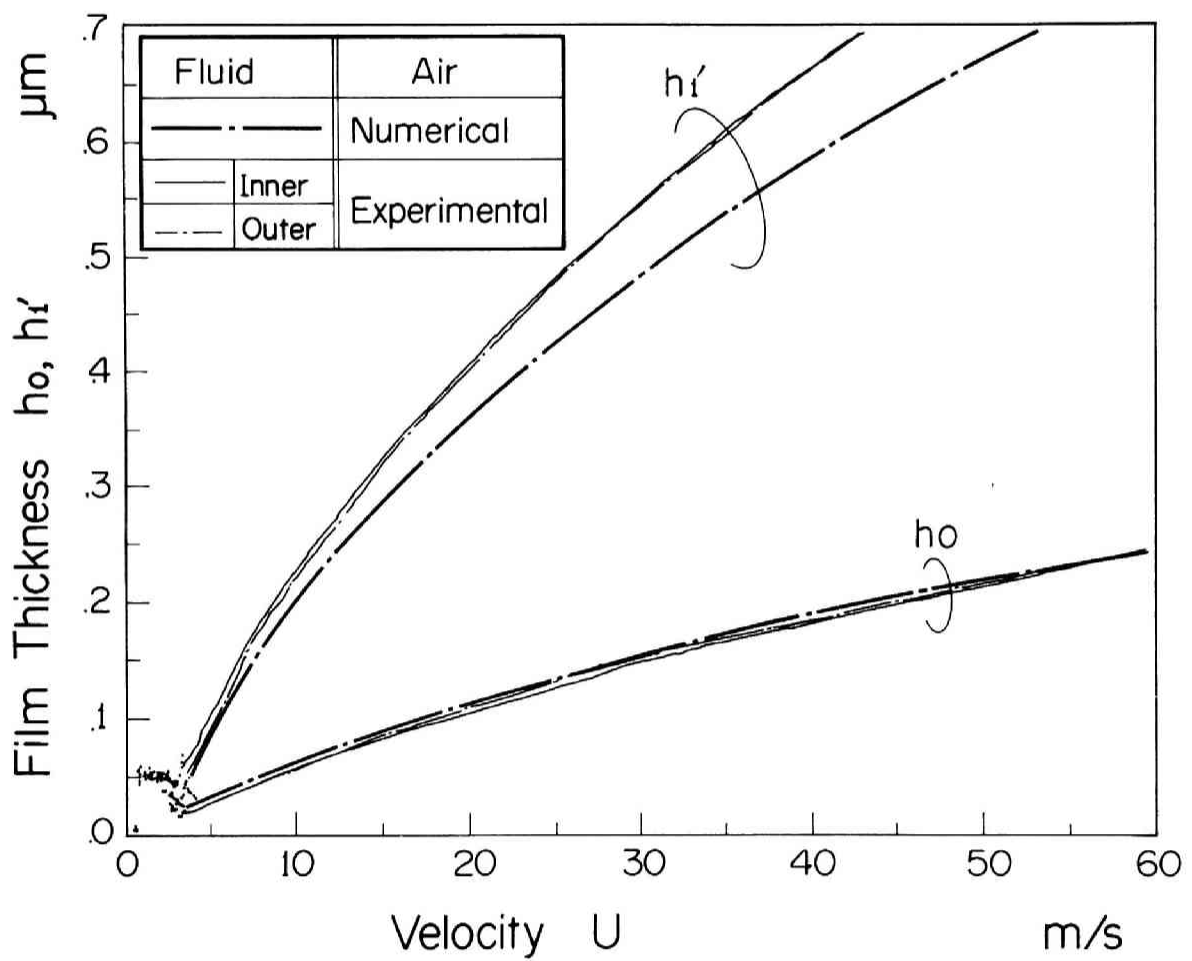


図3-12 スライド走行速度に対する浮上すきまの自動測定結果

れたことが主要因であると考えられる。

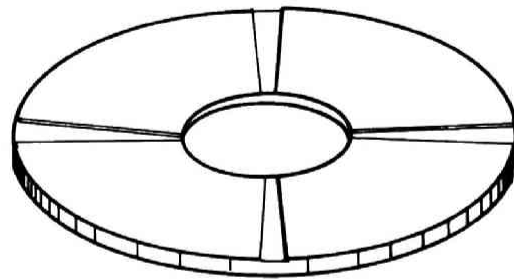
3. 2. 4 スライダの動特性の測定およびその結果

浮動ヘッドスライダの動的な浮上特性を確認するため、本研究では外乱として、ディスク面上の矩形状の溝、ディスク面のランナウト、ディスク面上の矩形状の突起を用い、これらの外乱に対するスライダの応答の測定結果から、スライダの動特性を評価することとする。

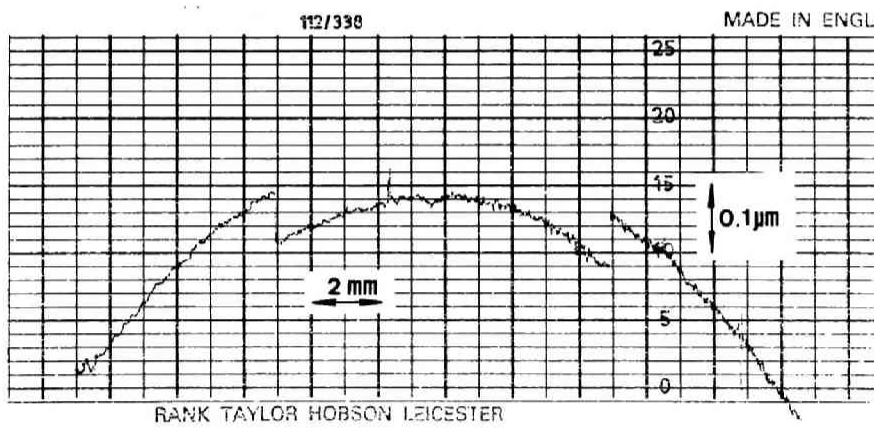
まず、スライダ走行面上に形成したステップ状の溝に対するスライダの応答を確認するため、図3-13に示すような全周の4カ所に溝を形成したガラスディスクをスライダ走行面とし、上述の光学測定系を用いてスライダの応答特性を測定した。同図には、触針式あらさ計を用いて走行方向に5倍、溝深さ方向に100,000倍に拡大して測定したステップ状溝の断面形状を示す。溝幅は約6~10mm、溝深さは0.08 μ mである。溝端のステップ部分のだれ幅は80 μ m程度である。図3-14は、供試スライダ（負圧利用形スライダ）の形状に関する記号を、また表3-2にその諸元を示す。

図3-15に、スライダが溝を横断するとき観測される干渉光強度のオシロスコープ波形の代表的な一例を示す。(a)は、スライダ長さ方向の無次元位置 $X (=x/l) = 0.345$ における干渉光強度の波形であり、(b)はスライダ流出端直前 $X \approx 1$ における干渉光強度の波形である。ステップ部を横断する時の干渉光強度の不連続波形、溝底部を浮上するときの減衰振動波形が観測される。 $X \approx 1$ における中心（平均）浮上量は、 $h_0 = 0.24 \mu\text{m}$ 、 $X = 0.345$ におけるそれは $h_0 = 0.39 \mu\text{m}$ であり、ともに浮上すきまの変化に対して、干渉光強度変化が最も大きく、測定感度の高い浮上すきままでの測定結果である。

図3-16に、これら浮上面の2点における干渉光強度を、式(3-1)に基づいて浮上すきまに変換した結果を示す。まず定常浮上状態（(a)）から、スライダが溝に進入し始めるとともに先端部が急激に沈み始め、これに対応してスライダはその支持点を軸に回転運動（ピッチング）し、流出端が一時浮き上がるが、やがてスライダ全体が沈み込む（(b)）。溝底部においては、溝進入時に励起されたピッチング運動を減衰させながら走行する（(c)）。溝より離脱する時には、スライダ先端部が急激に持ち上げられるた



Glass Disk



Disk Surface

図3-13 矩形状溝を形成したガラスディスク

表3-2 負圧利用形スライダの諸元

	Inner Side	Outer Side
l (mm)	3.685	
l_1 (mm)	0.620	0.620
l_2 (mm)	0.542	
b (mm)	2.795	
b_1 (mm)	0.597	0.599
b_2 (mm)	0.387	0.392
δ (μm)	6.1	6.0
ϵ (μm)	0.055	0.045
δ_e (μm)	6.6	
$\bar{\chi}/l$	0.513	
$2w$ (mN)	39.2	

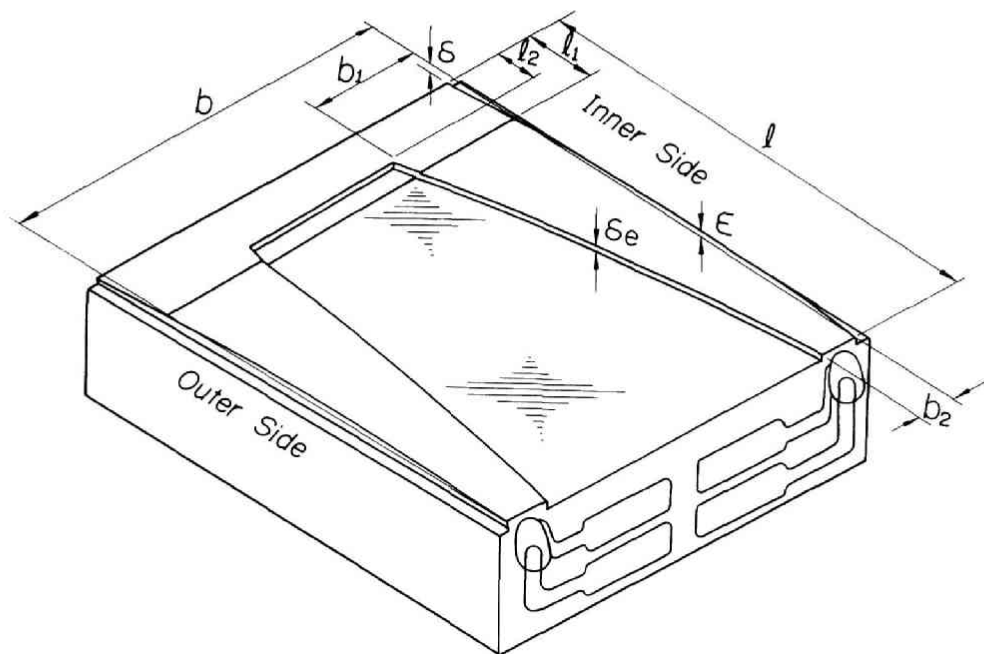
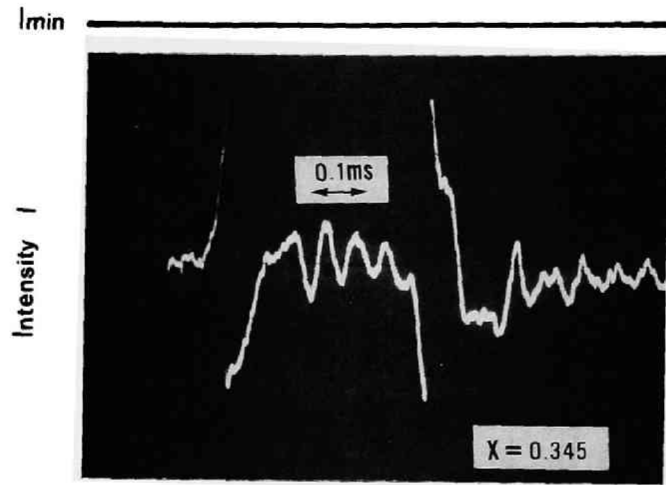
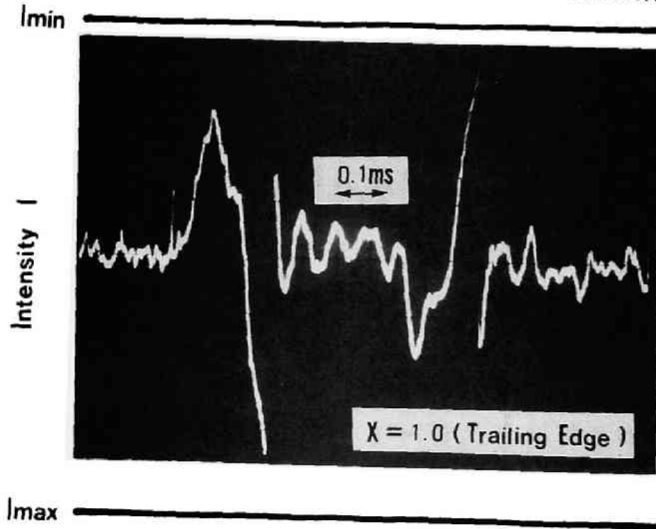


図3-14 負圧利用形スライダ



(a) 無次元位置 $X = 0.345$ での測定結果



(b) 無次元位置 $X = 1$ (流出端) での測定結果

図3-15 矩形溝横断時の干渉光強度のオシロスコープ波形

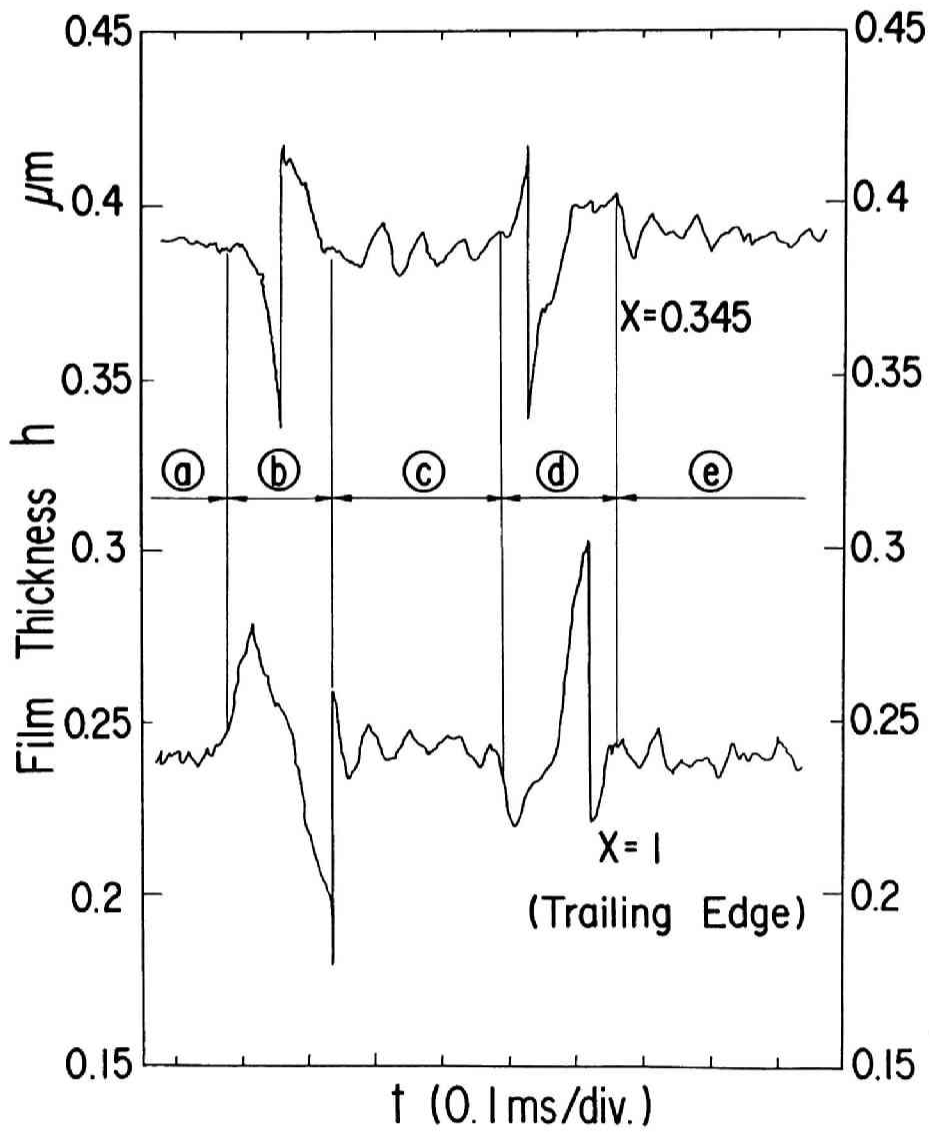


図3-16 矩形溝横断時の負圧利用形スライダの浮上すきま変化

め、スライダには溝進入時とは逆方向の回転運動（ピッチング）が生じ、流出端部分は一時的沈み込む（**④**）。やがて、全体が溝より離脱し、ピッチング運動を減衰させながら定常浮上状態に移行する（**⑤**）。なお、供試スライダおよびその支持機構を含めた慣性モーメントおよび空気膜のピッチングばね剛性から見積られるスライダのピッチング周波数は、17.5 kHzであり、これはスライダが溝底部を走行する時に観測されるピッチングの減衰振動周波数である16. kHzに近い値である。また、スライダが溝に進入する時または溝から離脱する時にステップ部において観測されるすきまの不連続波形部分（図3-16、**③** **④**）から算定されるステップ部分の段差は、0.079 μm であり、触針式あらさ計による測定結果とほぼ一致する。これは、100 kHz以上の周波数応答性に相当する。図3-17は、図3-16の結果をもとに、ディスクに対するスライダの相對運動の軌跡を、ガラスディスク面を基準にした絶対浮上量として図示したものである。これより、前述のスライダの過渡運動の状態がよく把握できる。

実際の装置において、スライダの許容浮上量変動を定めるに当たっては、媒体面のフラッタ、うねりの持つ加速度を規定することが必要になる。図3-18は、振幅 a のディスク面のうねりによって、励起される浮上すきま変動 Δh の a に対する比 $|\Delta h/a|$ を周波数領域で測定および計算した結果である。太い実線が数値計算結果、細い実線で結ばれた点が測定結果である。うねりの周波数を、広帯域にわたって変えることは実際上困難であり、ここでは帯域によって以下のように異なる実験を行った。すなわち約2~20 kHzまでの比較的高周波数の帯域（a）においては、前述のスライダ走行面に形成した溝に対するスライダの応答を利用し、触針式あらさ計による溝の断面形状およびスライダがここを通過する時の浮上すきま変動を、それぞれスペクトラムアナライザによって周波数分析して $|\Delta h/a|$ を求めた。また、0.1~0.8 kHzまでの比較的低周波数の領域（b）においては、うねりをもつガラスディスク上でスライダを浮上させ、うねりとこれに対応する浮上量変動を測定し、それぞれ周波数分析を行って $|\Delta h/a|$ を求めた。

測定結果と計算結果とは、全体的な傾向は一致しているが、詳細には以下のような差異も観測される。すなわち（a）の帯域における測定結果は計算結果を中心として上下に振れている。この計算結果と実験結果の不一致は空気膜の共振によるものではなく、計算結果を上回る測定値については、うねり振幅 a に関しての、また下回る測定値については、浮上すきま変動 Δh に関しての周波数分析の分解能の不足などによるものと考えられる。また（b）の帯域における測定結果は若干散乱しているものの、ほぼ計算結果に沿ってい

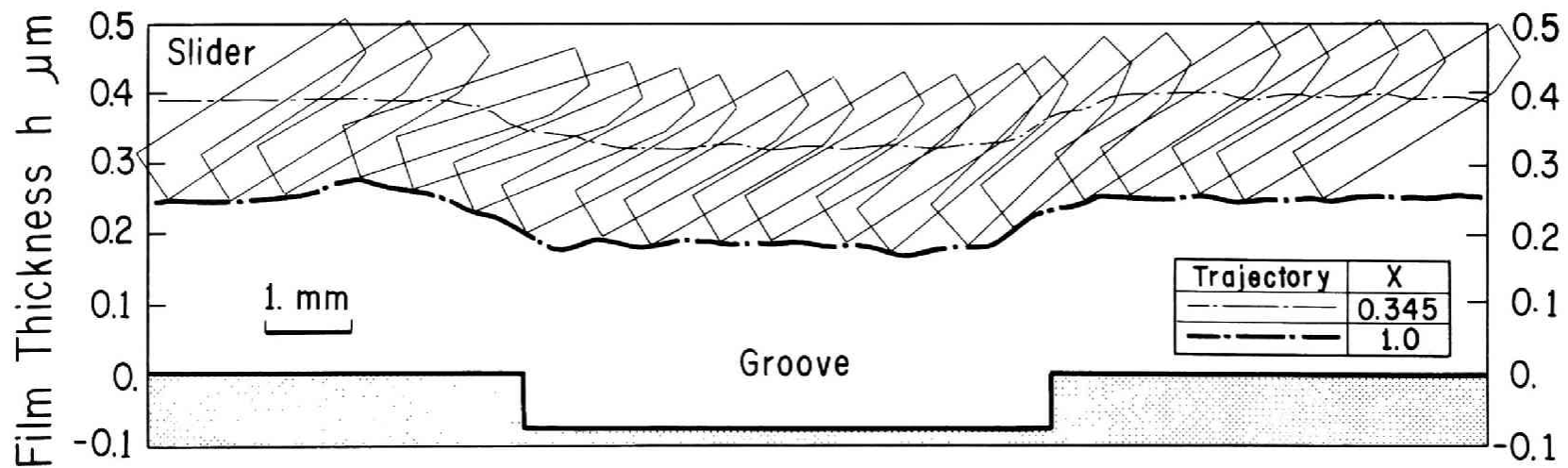


図3-17 矩形状溝に対する負圧利用形スライダの過渡応答

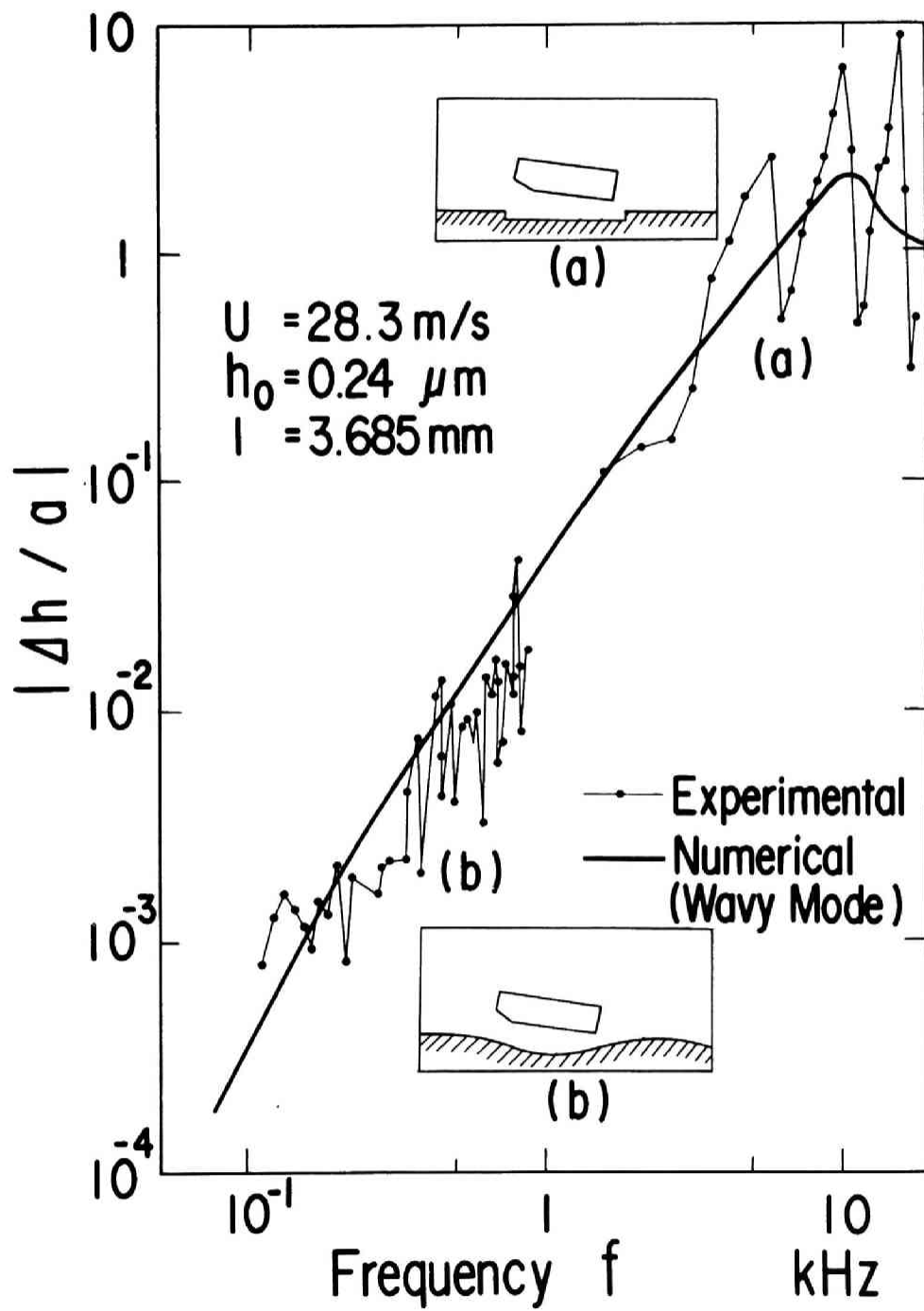


図3-18 負圧利用形スライダのうねりに対する追従特性

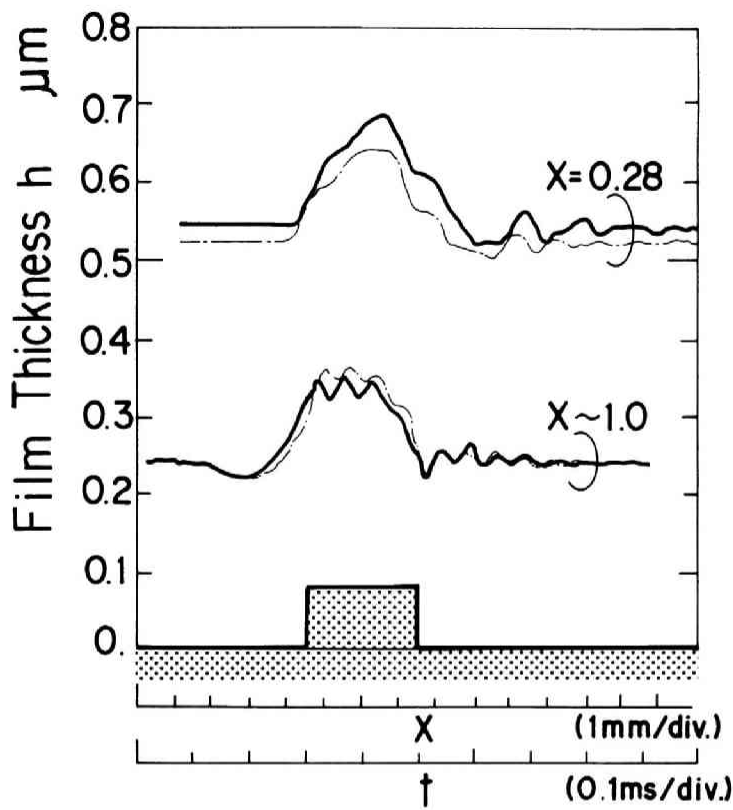
る。ただし、周波数が高くなるに伴い、実験結果が計算結果をやや下回る傾向にある。なお、所々に計算値を突出した測定点が見られるが、これはスライダ支持機構の共振の影響と考えられる。

次に、実際の媒体欠陥により近いスライダ走行面の欠陥形状として、突起状欠陥を考え、これに対するスライダの過渡応答を測定し、その特性について検討した。前述のように、Miu、Bogyらは、LDVを用いて、実際の媒体上に形成した矩形状の突起を通過する時のスライダの過渡応答を測定し、その結果を修正レイノルズ方程式の時間領域での直接解析結果と比較している[311],[312]。両結果は、ほぼ一致しているが、媒体面のランナウトに起因する低周波数成分によると思われる差異が観察される。加えて、突起のスライダ走行方向の長さがスライダ長と同程度であり、スライダの動特性に影響の大きい高周波数の外乱成分の少ない実験結果となっている。

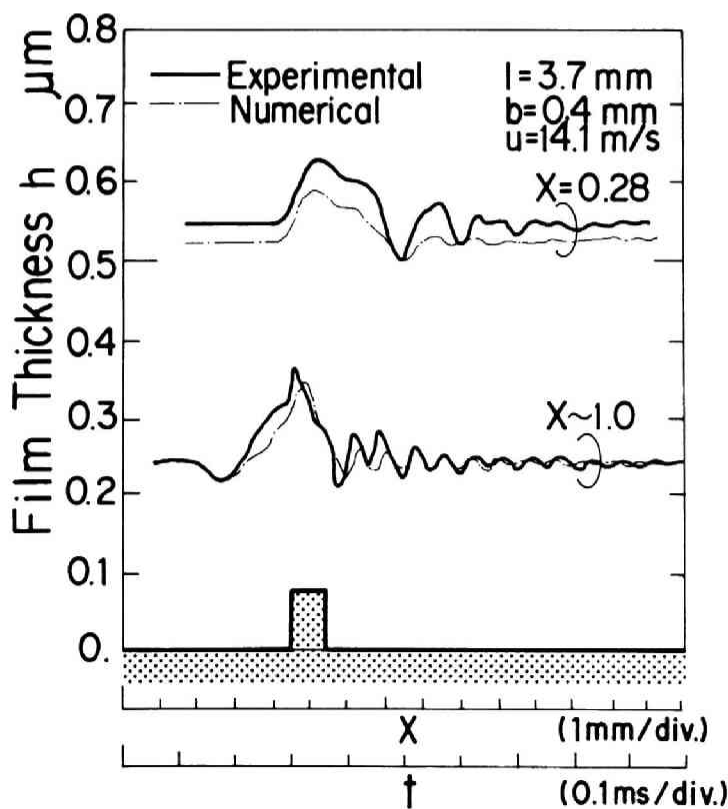
そこで、本研究では、突起高さがスライダの定常浮上すきまより小さい場合で、特に突起長さがスライダ長さより短い高周波数の成分を含む外乱に対するスライダの浮上特性の測定を行い[313]、計算結果との比較を行うこととした。図3-19は、石英ガラスディスク面上に形成した矩形状の突起を通過する時の、テーパフラットスライダの過渡応答の結果である。供試スライダの諸元は、スライダ幅を除いて表3-1に示すスライダのそれとほぼ同じである。矩形状突起高さは、 $0.08\mu\text{m}$ 、突起のスライダ走行方向の長さは、離散的に 0.05 から 3mm まで変えている。スライダの運動は、矩形状突起の断面形状についてフーリエ解析を行い、それぞれの周波数成分に対するスライダの線形応答を、修正レイノルズ方程式の摂動解析によって求め、位相を考慮して再合成して予測した。実験結果と解析結果とはよく一致している。スライダの傾きに関しては、若干の差異があるが、これは支持点位置のずれによるものと思われる。突起の長さが短くなるにつれ、高周波数の外乱成分が増加するため、スライダの応答が劣化していく様子がわかる。

3.3 浮上すきまの簡易測定

前節では、可視レーザを用いた精密な浮上すきま測定系の構成を示したが、大量に生産される浮動ヘッドスライダ機構に対しては、それらの浮上特性にかかわる品質管理の観点

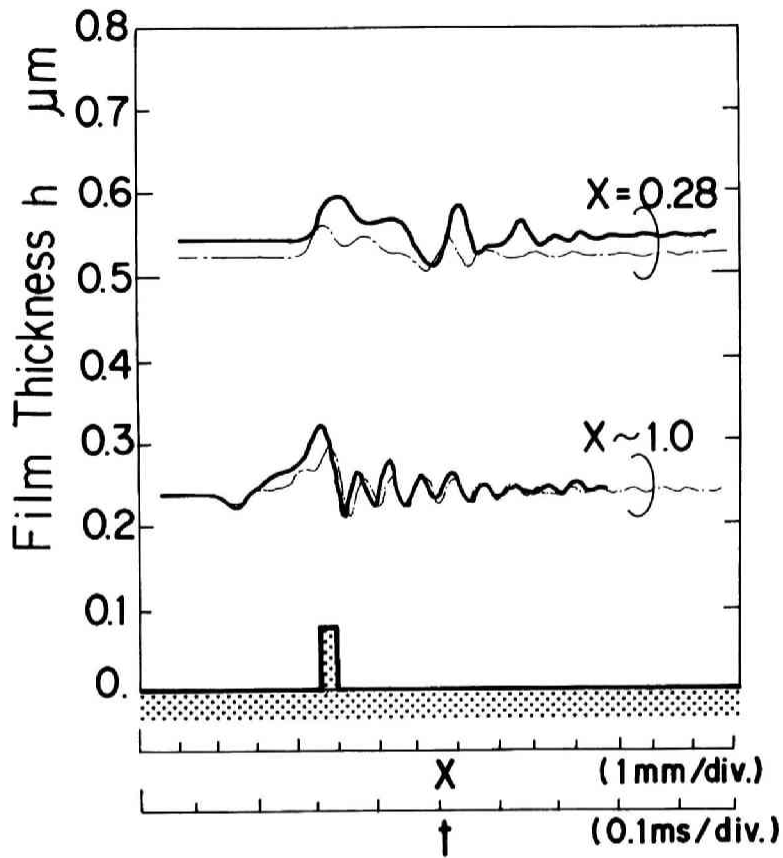


(a) 突起幅 3 mm の場合

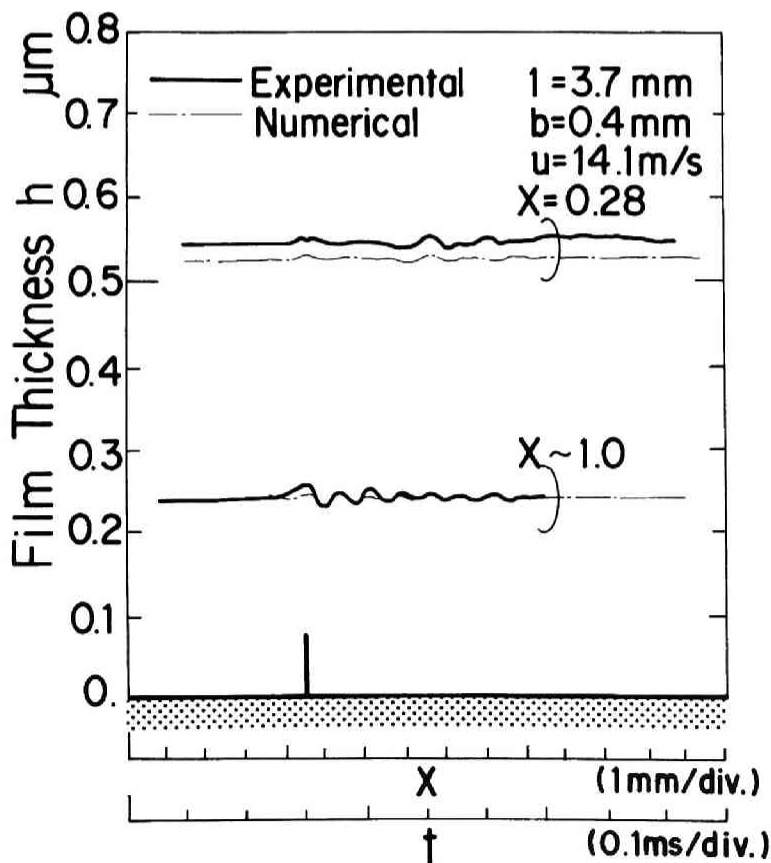


(b) 突起幅 1 mm の場合

図 3 - 19 テーパーフラットスライダの矩形状突起に対する過渡応答



(c) 突起幅 0.4 mm の場合



(d) 突起幅 0.05 mm の場合

図 3-19 テーパーフラットスライダの矩形状突起に対する過渡応答

から、できるだけ簡易な測定系で、しかも測定者の個人差に影響されることなく所望の測定精度が得られる手法を確立することが望まれる。また、スライダのシーク動作などの高加速度の条件下での浮上特性の測定では、機構系に影響を与えない小形・軽量の測定系（センサ）が必要となる。

フォトリフレクタは、本来反射形の回転検出センサとして開発された素子であり、一素子の中に単色発光部（発光ダイオード：LED）、集光用レンズ、受光・増幅部が一体としてコンパクトに組み込まれたもので、光の単色性、集光スポット径、動的応答性などの基本性能を別にすれば、浮上すきま測定系としての本質的な機能を有していると言える。そこで、ここではフォトリフレクタを用いた簡易浮上すきま測定系を構成し、前節のレーザを用いた精密な浮上すきま測定系による結果と比較し、その性能を評価することとする。

図3-20に測定原理を、また図3-21にフォトリフレクタの構造と仕様を示す。LEDより浮上すきまに入射した単色光は、スライダ走行面となるガラスディスク下面およびスライダ浮上面で反射し、これらの反射光は干渉して浮上すきまに対応した干渉光強度を示す。この干渉光強度をフォトディテクタ（PD）で検出することにより、浮上すきまを測定することができる。これは、原理的には、レーザを用いた測定系と同様であるが、発光部と受光部とが並列的に配置され、また作動距離が小さいため、斜め入・反射光学系となる。ガラスディスクから浮上すきまへの光の屈折角を θ 、発光部の単色波長を λ とすると、斜め入射系は等価波長 $\lambda_e = \lambda / \cos \theta$ による垂直入射系と等価になる。また、フォトリフレクタに用いられているLEDは、一般的には単色光ではなく、その光のスペクトラムに幅を持っているが、その中心波長 $\lambda = 700 \text{ nm}$ に対して、半値幅は $\Delta \lambda = 20 \text{ nm}$ 程度と小さいことから、測定精度への影響は比較的小さいと考え、ここでは光源波長をその中心波長で代表することとした。本章のような集光光学系においても、浮上すきまの変化は、集光スポット径内のすきまの平均的变化として検出される。フォトリフレクタのように発光部が点光源ではなく、また集光用レンズも非対称・非球面の場合には、集光スポットは複雑な形状となり、実効的な測定領域の同定は困難である。そこで、ここでは、図3-22に示すように、集光スポットの長径方向をスライダの流出端エッジと直交方向に走査させ、その際の光量変化を自分自身で検出することで評価した。中心部の最大光量に対して、便宜的に $1/e^2$ のレベルとなる位置がスポットの外縁であるとする、スポット直径は $230 \mu\text{m}$ 程度と見積られる。これは通常のスライダ浮上面幅を十分下回る大きさであり、測定器としての応用が可能であると考えられる。

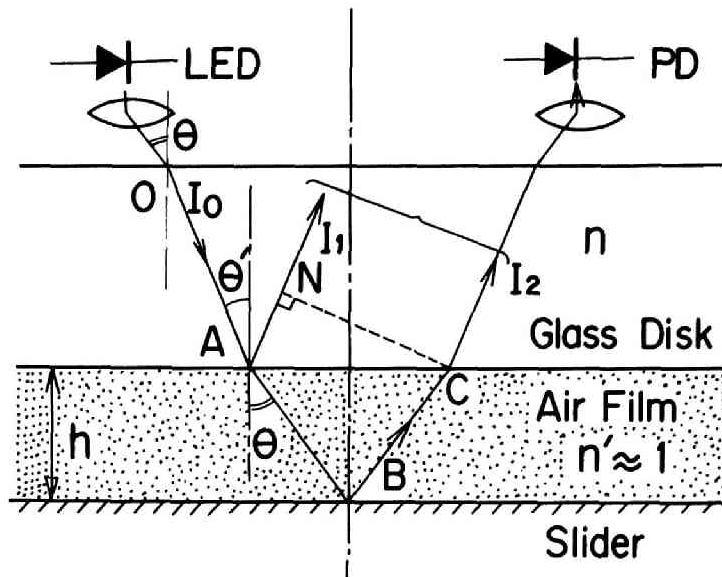
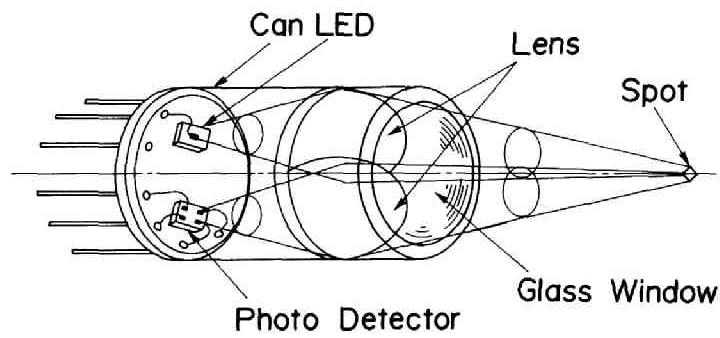


図3-20 フォトリフレクタによる浮上すきま測定原理



Structure of Photo-Reflector

Specification

Wave Length λ	700nm
Half - Value Width $\Delta\lambda$	20nm
Working Distance d	4.5mm
Nominal Spot Dia. ϕ	170 μ m
Incident Angle θ	16deg.
LED Average Current I_f	50mA
Operating Voltage V	-5~20 V

図3-21 フォトリフレクタの構造と諸元

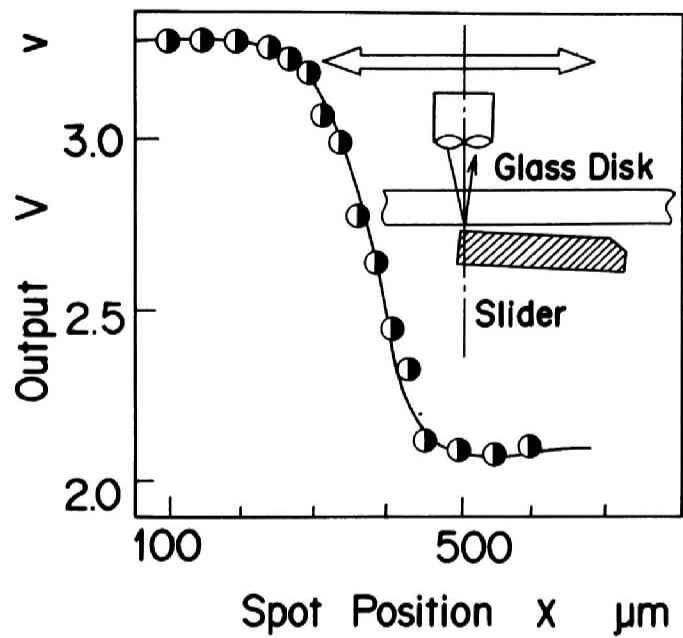


図3-22 集光スポット径の評価

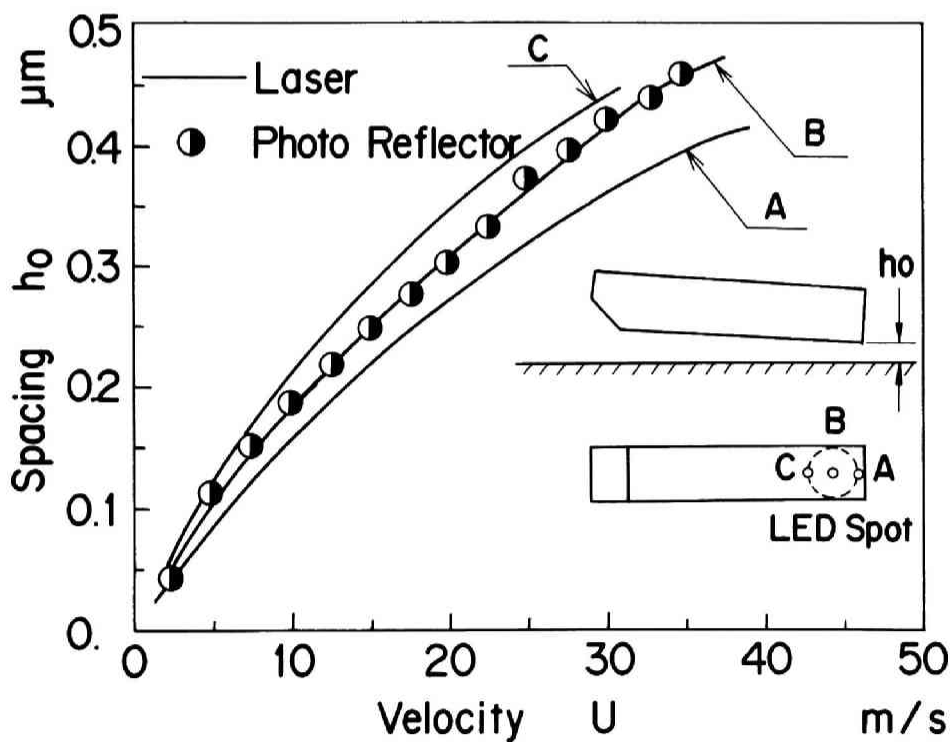


図3-23 スライダ走行速度と浮上すきまの関係

フォトリフレクタを用いて、テーパフラットスライダの静的な浮上特性を測定した結果を、図3-23に示す。集光スポットは、図に示すように、その外縁がスライダ流出端にかかる位置に設定した。測定される浮上すきまは、上述のようにスポット径内すきまの平均値と考えられるが、スライダ浮上面に極端なクラウンやそりなどが無い場合には、ほぼスポットの中心での浮上すきまを代表しているものと考えられる。そこでスポットの外縁（点A、点C）および中心（点B）の位置をレーザを用いた精密な浮上すきま測定系によって測定し、フォトリフレクタによる測定結果と比較した。その結果、若干のばらつきはあるものの、フォトリフレクタの測定結果は、レーザを用いた精密な測定結果のうち、スポット中心部での測定結果に一致していることが分かる。このように、本節の測定手法では、その集光スポットの大きさから、電磁変換上、最も重要なヘッドギャップ（通常スライダ流出端に配置される。）位置での浮上すきま測定は困難であるが、他の浮上面の位置でのすきまから外挿する、または集光レンズ系の改良によってスポット径を微小化するなどにより、所望のすきまを高精度に測定することができる。

次に、本測定系を用いて、スライダの動的な浮上特性の測定性能を評価した。より実用的な観点から、同一の浮動ヘッド機構を強制加振し、加振振幅 Δz に対する浮上すきま変動 Δh の比 $|\Delta h / \Delta z|$ を測定し、やはりレーザを用いた高精度な浮上すきま測定系の結果と比較することで、本測定系の動的な測定性能の確認を行った。測定系の概略を、図3-24に示す。スライダ支持機構の固定部は、ボイスコイル形の加振器に接続され、支持機構をディスク面の法線方向に微小振幅で加振する。加振振幅は、静電容量形のセンサで測定し、加振周波数を連続的に変え、加振振幅に対する浮上すきま変動の比（伝達特性）を測定した。

図3-25に、スライダ走行速度 $U = 2.6 \text{ m/s}$ 、浮上すきま $h_0 = 0.24 \mu\text{m}$ において、 200 Hz から 5 kHz まで支持機構をスイープ加振した時の結果を示す。太い実線が、フォトリフレクタの、また細い一点鎖線がレーザを用いた精密な測定系の結果である。両者はきわめてよく一致しており、本節のような簡易測定手法によっても、少なくとも 5 kHz 程度までの帯域において、スライダの動的な浮上特性の精密な評価が可能であると結論できる。

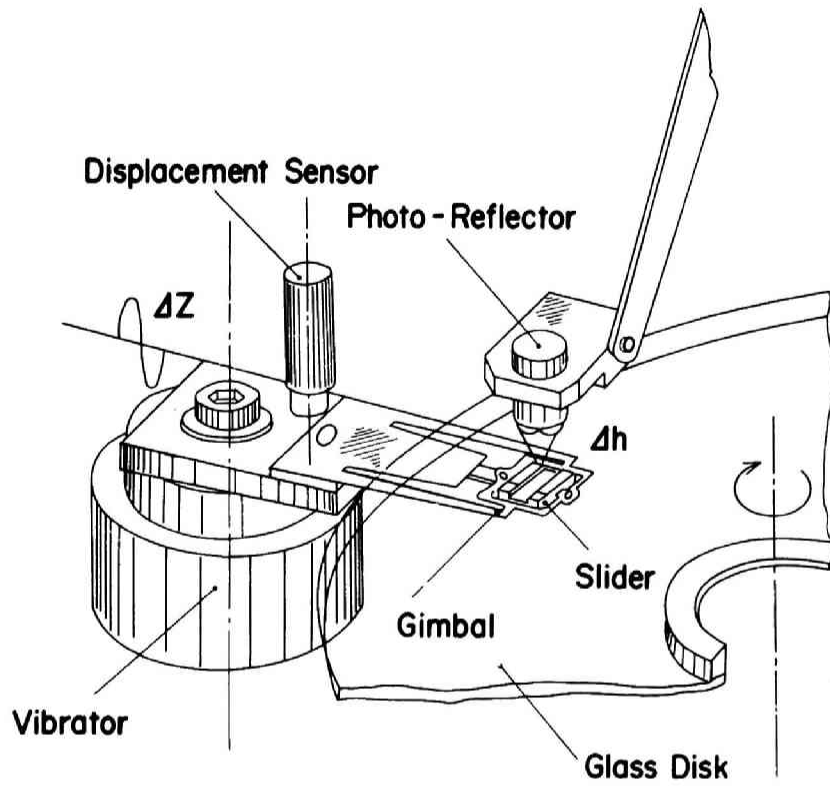


図3-24 浮動ヘッドスライダ機構の動特性の測定系

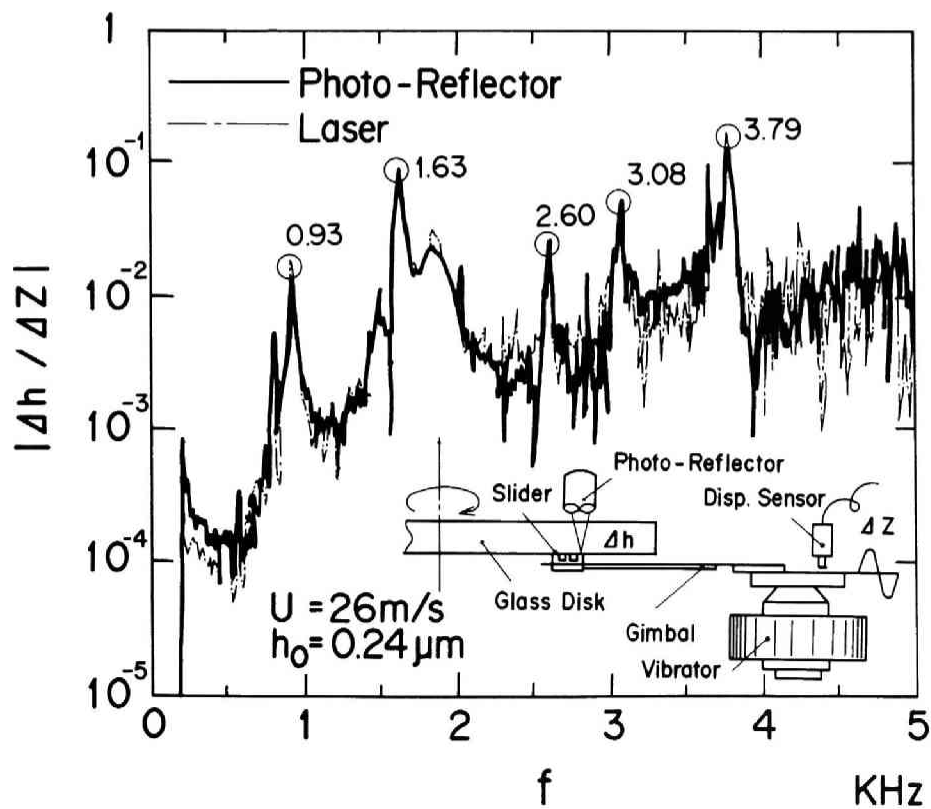


図3-25 レーザ干渉法とのスライダ動特性測定結果の比較

3. 4 結 論

サブミクロンの微小浮上すきまで気体潤滑される浮動ヘッドスライダの浮上特性を、可視レーザを照射した時に浮上すきまに生じる干涉縞の光強度を、電氣的に検出することにより、高精度に測定することのできる光学系を構成するとともに、これを用いてスライダの静的な浮上特性および動的な浮上特性を測定し、数値計算結果との比較を行った。また、浮上すきまの簡易測定手法を示した。本章で得られた主な結果を要約すると、次のようになる。

- (1) 可視レーザを、直径約 $12\ \mu\text{m}$ のスポットに集光して浮上すきまに照射する光学系を用い、電氣的に検出したレーザの干涉光強度を多重干涉を考慮してすきまに変換することにより、測定分解能が最大 $0.0013\ \mu\text{m-p-p}$ での測定を実現した。
- (2) 本測定法を用い、空気中において小形スライダによる最小浮上すきま約 $0.03\ \mu\text{m}$ 程度のスライダの浮上実験を行い、浮上すきまを精密に測定した。測定結果は、気体分子の運動量に関する適合係数 $\sigma = 0.89$ を採用した修正レイノルズ方程式による解析結果とよく一致した。
- (3) 走行面に形成した微細な矩形状の溝、矩形状の突起をスライダが横断する時およびうねりのある走行面上をスライダが浮上する時のすきま変動を測定し、周波数領域および時間領域において、修正レイノルズ方程式の摂動解析の結果とよい一致を示すことを確認した。また、上記のような不連続な走行面形状を有する部分を通過する時の浮上すきま変動の測定結果から、本測定系が $100\ \text{kHz}$ 以上の高周波数帯域までの動的な応答特性を有することを実証した。
- (4) フォトリフレクタを用いた小形・軽量で簡易な浮上すきま測定系を提案し、上記レーザを用いた精密測定系による浮上すきまの測定結果との比較から、この測定系が、静的な浮上特性ならびに $5\ \text{kHz}$ 程度の周波数帯域において、スライダ浮上特性の評価に必要な測定性能を有することを確認した。

第4章 浮動ヘッド機構の動的評価

4.1 緒言

情報処理システムの分野では、近年、扱う情報量が飛躍的に増大し、さらにそれに伴って即時処理のためのデータ検索の高速化の要請が急激に高まっている。このため、ファイル記憶装置の中心的な役割を果たしている磁気ディスク装置には、記憶情報の大容量化、高速アクセス化ならびに高速転送化が強く要求されている。これらの要求に応えるため、すでに1981年には装置容量3.2ギガバイト、平均シーク時間18ミリ秒、データ転送速度1.34メガバイト/秒の集合形小形高密度磁気ディスク装置が登場し[401]、さらに1987年には、装置容量8.8ギガバイト、平均シーク時間12ミリ秒、転送速度4.4メガバイト/秒の性能を有する大容量・高速磁気ディスク装置も実用化されている[402]。

磁気ディスク装置の機構の中でも、その性能を左右するキーパーツである浮動ヘッド機構においては、より高い線記録密度を実現するための浮上量の微小化と、ヘッドクラッシュなどに対する装置の信頼性を確保するための浮上量変動の抑圧が、ますます重要な課題となっている。これを実現するために、高追従・高信頼の浮動ヘッドスライダ機構の研究・開発が進められてきた。媒体の表面の凹凸に対するすすライダ追従性に関しては、その幾何的形狀（うねり）とスライダ長さから決まる追従限界が存在し、この限界を打破して行くためには、本質的にスライダ長さの短小化が不可欠である[403]。またスライダの走行面となる媒体も、従来の塗布形媒体から、高密度記録のポテンシャルを秘めた連続薄膜媒体へ移行しつつあり、浮動ヘッド機構には、装置の起動・停止の際の接触摺動（コンタクトスタート・ストップ）に対する耐久性、およびスライダと媒体との不測の接触に対する信頼性を高めるために、小形・軽量・軽荷重化が必要とされてきている。一方、従来から、浮動ヘッド機構を設計する際に、必ずしも十分考慮されていなかった支持機構の動特性に関しては、その共振周波数がスライダの気体潤滑膜のそれに比べかなり低く、浮動ヘッド機構に加わる種々の外乱の許容加速度、許容振幅の限界値が、主として支持機構の共振特性によって制限されると考えられ、支持機構に関しても、軽量かつ剛性を高める設計

が要求される。さらに、支持機構を含めた浮動ヘッド機構の設計、その特性の精密なシミュレーションはもとより、実用に供する上では、浮動ヘッド機構の特性を、高精度な測定によって検証することが、きわめて重要な位置を占める。

本章では、主として、第3章で示した可視レーザー干渉を利用した浮動ヘッドスライダの浮上すきまの精密な測定手法を基に、実用装置の構成条件の下で、想定される種々の外乱に対するスライダ機構全般の動的な浮上特性の評価およびその検証結果を、大容量・高速磁気ディスク装置に搭載されている浮動ヘッドスライダを例に、解析結果と対比して述べる。

4. 2 実験方法

本章で用いた実験装置の概略を図4-1に示す。実験装置は基本的には、ディスクを支持・回転させるスピンドル軸受系、浮動ヘッド機構を位置決めする微動機構系および浮上すきま測定系の三つの基本要素から構成されているが、スピンドル軸受系およびヘッド位置決め微動機構系には、浮動ヘッド機構に外乱となる振動を与えるための加振装置が搭載されている。浮上すきまの測定には、第3章で詳述した可視レーザー干渉を利用した浮上すきま測定系を用いている。スライダに与えるべき外乱成分のみを正確に分離し、かつ浮上量変動を精密に測定するため、スライダ浮上面には高精度研磨した低膨張合成石英ガラス製のディスクを用い、静圧空気軸受で支持している。ディスクは外径130mm、厚さ2mm、 R_{max} は0.004 μ m程度以下、うねりは10 μ mp-p程度であり、ディスクが本来的に有するうねり・突起などがスライダ動特性の評価に及ぼす影響を、可能な限り低減できるよう配慮している。また、浮上すきま変動を精密に測定するため、光学特性に関しても、均一な特性を有するものを選択して用いている。供試浮動ヘッドスライダ機構は、実用装置に搭載されているものと同等の機械特性を有するもので、長さ3.2mm、幅2.6mmのテーパフラットスライダを、小形・高剛性化したワトラス形支持機構に搭載したものである。

本研究では、装置構成の上から、スライダの浮上すきま変動に最も影響の大きい要因として、基本的に3種類の外乱を想定している。すなわち、スライダ走行面の並進振動（フラッタ）、スライダ支持機構が装着されるヘッドアームの面外振動（媒体面の法線方向の

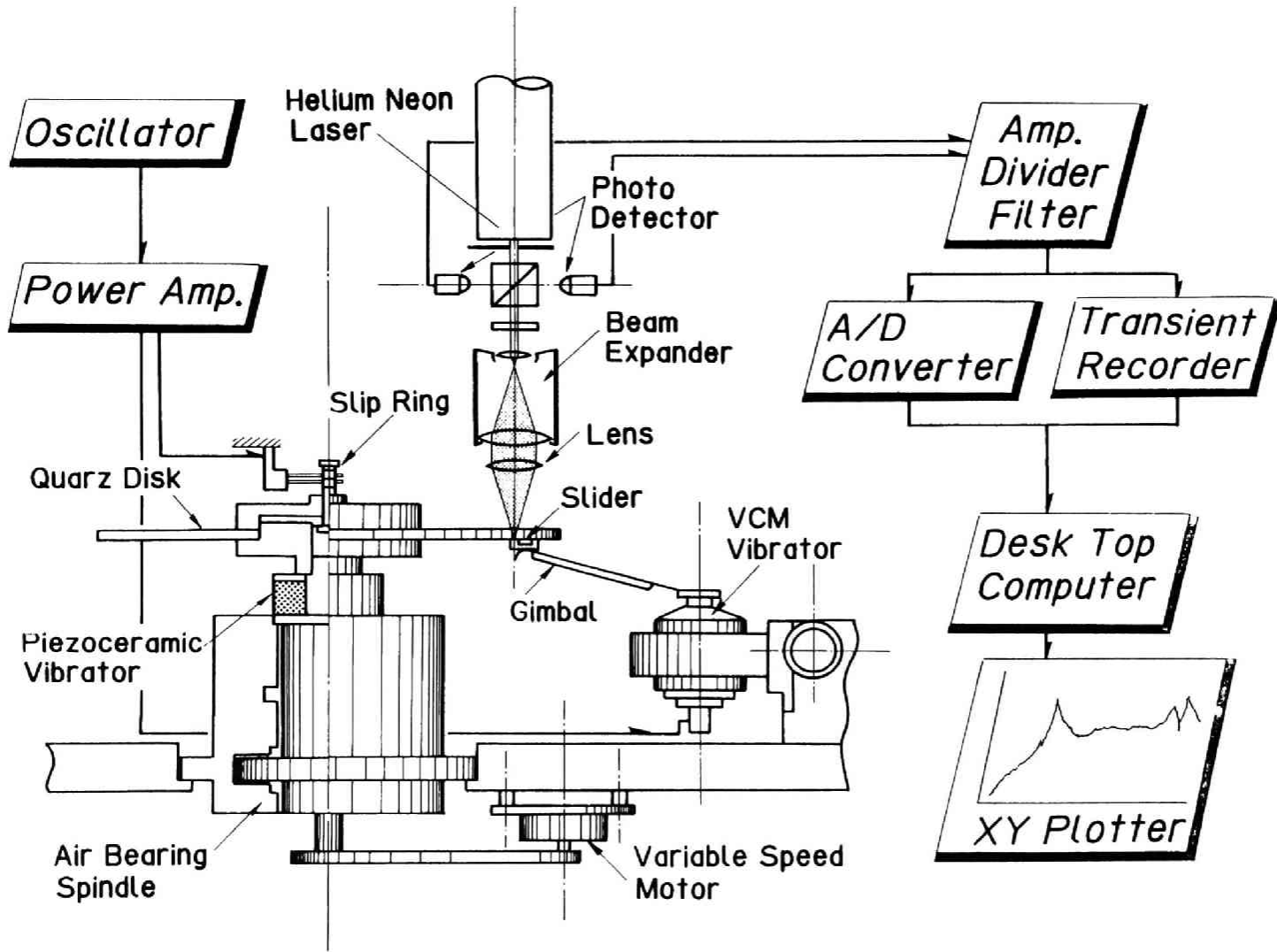


图 4-1 实验装置

振動) および媒体上の微小突起(微小うねり)である。図4-1に示す測定系は、これらの外乱に対する浮動ヘッドスライダの動的な浮上特性がすべて測定可能となるように設計されている。

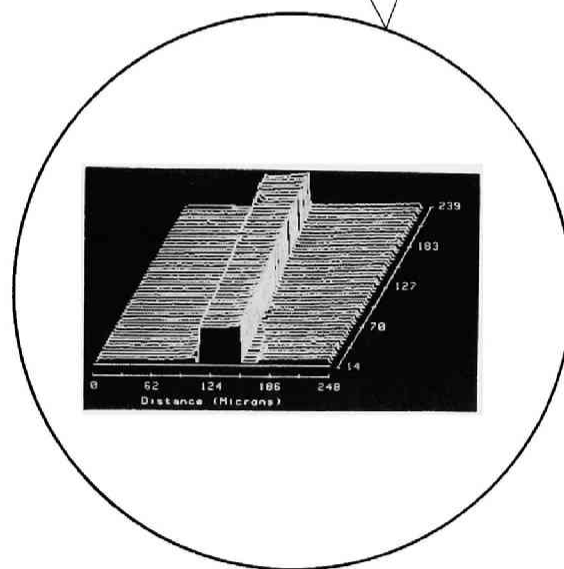
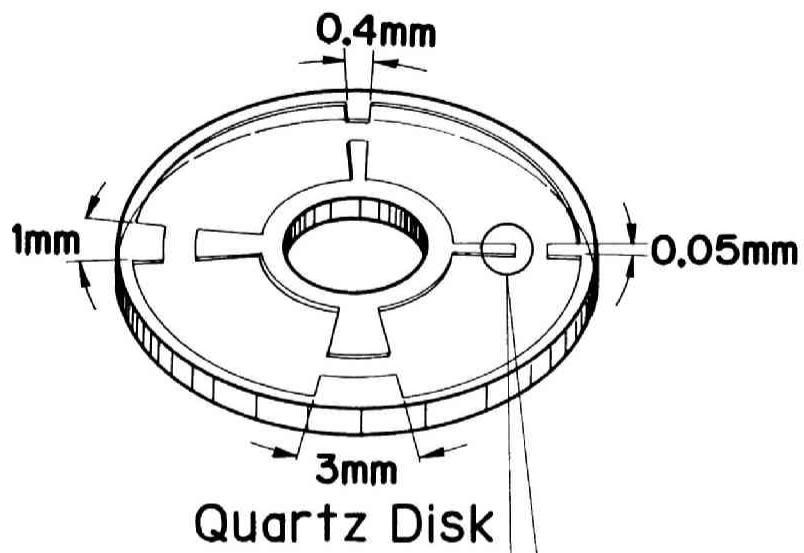
まず、ディスクの並進振動に対する浮動ヘッドスライダの動的な浮上特性を測定するため、軸対称に形成した積層形圧電素子を用いた加振器を頭部に設置し、加振器の振動板にクランプを設けて、これにディスクを装着可能なスピンドル構成を採用した。圧電振動子を駆動する電力は、ディスククランプ頂部に設置したスリップリングにより給電する構成としている。ディスク面の振動は、スライダ浮上位置の近傍に設置した静電容量式変位計により、ガラスディスク面の振動を直接測定している。

次に、スライダ支持機構の動特性を測定するために、支持機構のヘッドアーム装着部をボイスコイル形バイブレータ先端に固定し、ディスク面外(ディスク面の法線)方向および面内(半径)方向に加振可能とし、この時のスライダの浮上すきま変動を測定することによって、これを行っている。

媒体面の微小凹凸に対するスライダの動的な浮上特性の測定をするために、図4-2に示すように、表面の4カ所に矩形状の突起を形成した石英ガラスディスクをスライダ走行面として用い、矩形状の突起を通過する時のスライダの過渡応答を測定することでこれを評価する。この方法を適用するためには、突起部分も含めて、ガラスディスク全面に亘って均一な光学特性を実現することが不可欠であるが、本研究では、突起形成に際して、スパッタリングなどにより材料を盛り上げるのではなく、突起となる部分をマスキングし、他の部分の表面をイオンビームエッチング法を用いて、微小厚さだけ削除することによって実現している。この結果、突起部分での光学特性の変化に起因する干渉光強度への影響はほとんどなく、精密なスライダの過渡応答の測定が可能である。図4-2下部にはこのようにして形成した高さ $0.135\mu\text{m}$ 、幅 0.05mm の矩形状の突起部分を、非接触の光学式表面形状測定器を用い、40倍に拡大して測定した結果を示す。ステップ部分のだれなどはほとんど無く、正確な矩形断面形状が実現している。

4.3 動特性の評価結果

4.3.1 浮動ヘッドスライダ機構の静特性



Rectangular Bump

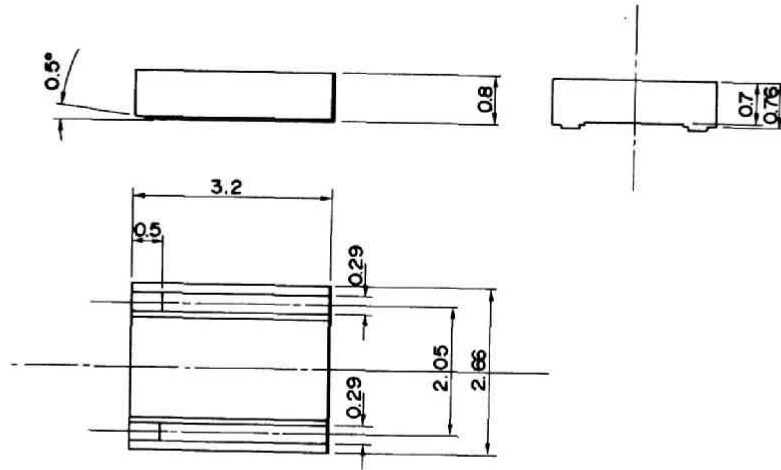
図4-2 矩形状突起を形成したガラスディスク

浮動ヘッドスライダ機構の動特性の評価に先立ち、その基礎となる静特性の評価を行った。供試スライダおよび支持機構の形状を図4-3に、また諸元を表4-1に示す。従来形浮動ヘッドスライダ機構に比べて特長的な点は、スライダに関しては、媒体面のうねりに対する追従性を向上させるため、長さを短小化するとともに、質量を約半分に低減したこと、微小浮上すきまでの動作を前提として、浮上面のクラウン・あらさなど形状加工誤差を低減したこと、また支持機構は、シンプルな形状で構造体としての剛性を高めたことなどである。本浮動ヘッドスライダ機構の走行速度に対する流出端浮上すきま h_0 、テーパ端浮上すきま h_1 'の特性を図4-4に示す。実験結果と数値計算結果とは、よく一致している。

図4-5は、スライダ走行速度 $U=28\text{ m/s}$ 、浮上すきま $h_0=0.18\text{ }\mu\text{m}$ の作動条件において、ディスク面およびスライダ支持機構が装着されるヘッドアームとの間の寸法誤差と、流出端浮上すきま $h_{0,i}$ （内周側） $h_{0,o}$ （外周側）の浮上特性の関係を示す。図中の計算は、支持機構の並進と回転（ピッチング、ローリング）に関するジンバル剛性を線形解析によって求め、また空気膜剛性を静的条件下でレイノルズ方程式より求めて行った。計算結果に対して実験結果の方が設定誤差に対するすきま変化率が大きく現れているが、これは支持機構の線形解析において、ジンバル剛性をやや過小に評価したためと考えられる。なお、実用的には、装置の浮動ヘッド機構の装着部（ヘッドアーム先端部）とスタッキングされた磁気記録媒体面との間隔の寸法精度は、 $\Delta z=\pm 100\text{ }\mu\text{m}$ 以下で組立てられているため、本支持機構においては、浮上すきまが比較的大きく変化する外周側浮上面でも、上記の組立て誤差による浮上量変化は高々 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ （浮上量の5%以下）に抑制されており、寸法誤差（設定誤差）を十分吸収できる特性を有している。

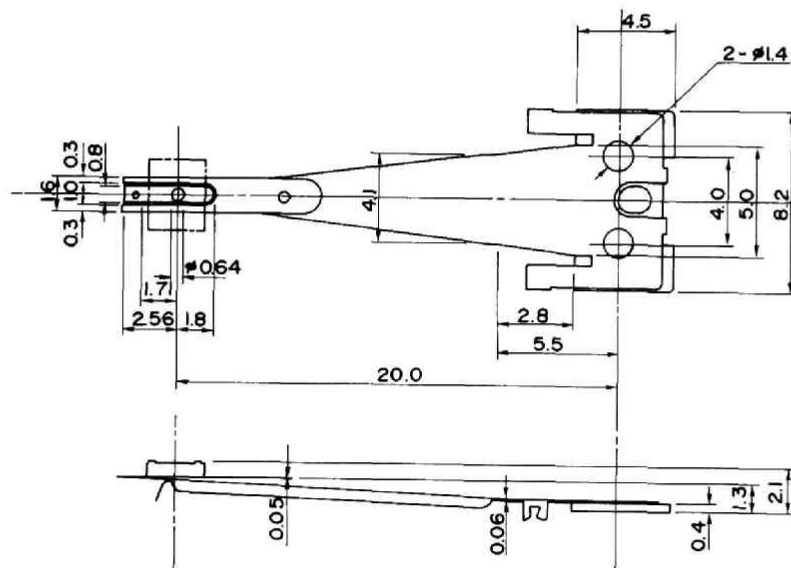
4.3.2 ディスク面の並進振動に対する周波数応答

浮動ヘッド機構に対する外乱として、本項では、まずディスク面の並進振動（フラッタ）を取り上げ、これに対するスライダの動的な浮上特性を検討する。図4-6（a）、（b）は、スピンドルに搭載した積層形圧電加振器を用いて、ガラスディスクを加振周波数 $f=200\text{ Hz}\sim 20\text{ kHz}$ まで単一正弦波でスイープ加振し、この時の加振振幅 a とスライ



Flying Head Slider

(a) 浮動ヘッドスライダ



Gimbal Suspension

(b) スライダ支持機構

図4-3 供試浮動ヘッドスライダ機構

表 4-1 供試浮動ヘッド機構の諸元

Item		Unit	
Air Bearing Width b		mm	0.29
Load $2w$		grf.	7.0
Pivoting Point's Position \bar{X}			0.55
Slider Weight m		mg	27.0
Equivalent Slider Weight m_e			42.4
Moment of Inertia	Pitching I_p	mg·mm ²	31.8
	Rolling I_r		24.7
Equivalent Moment of Inertia	Pitching \bar{I}_p		32.6
	Rolling \bar{I}_r		29.5
Suspension Stiffness	Parallel k_z	grf/mm	1.86
	Pitching k_p	grf·mm/rad	46.9
	Rolling k_r		28.2

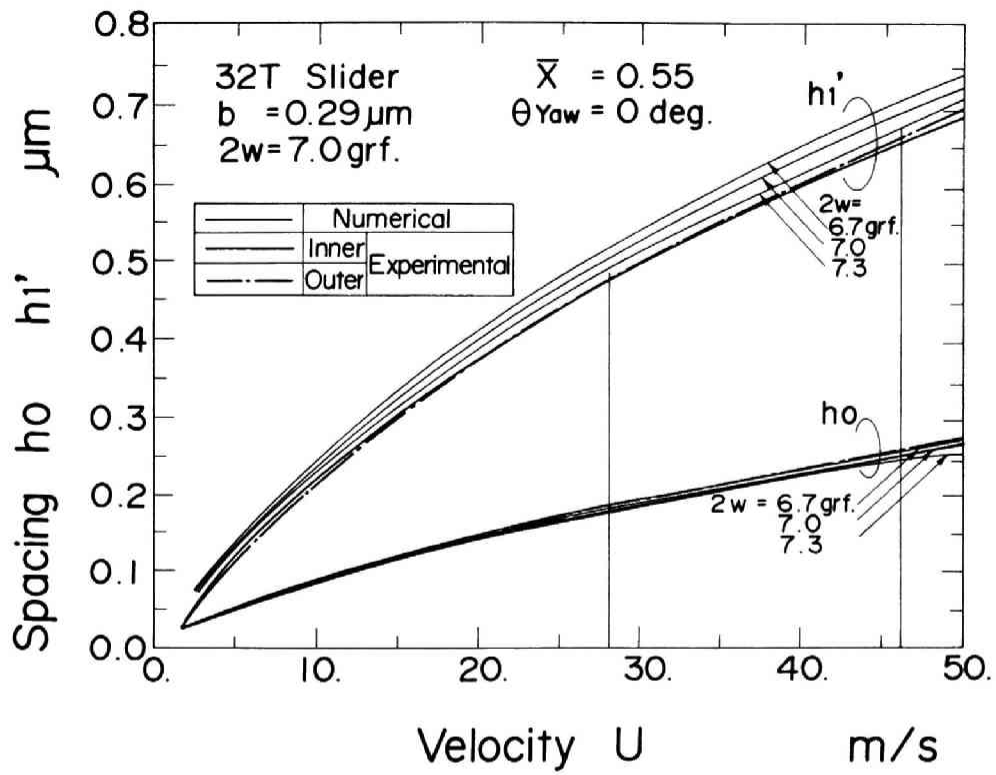


図4-4 浮動ヘッドスライダの静特性

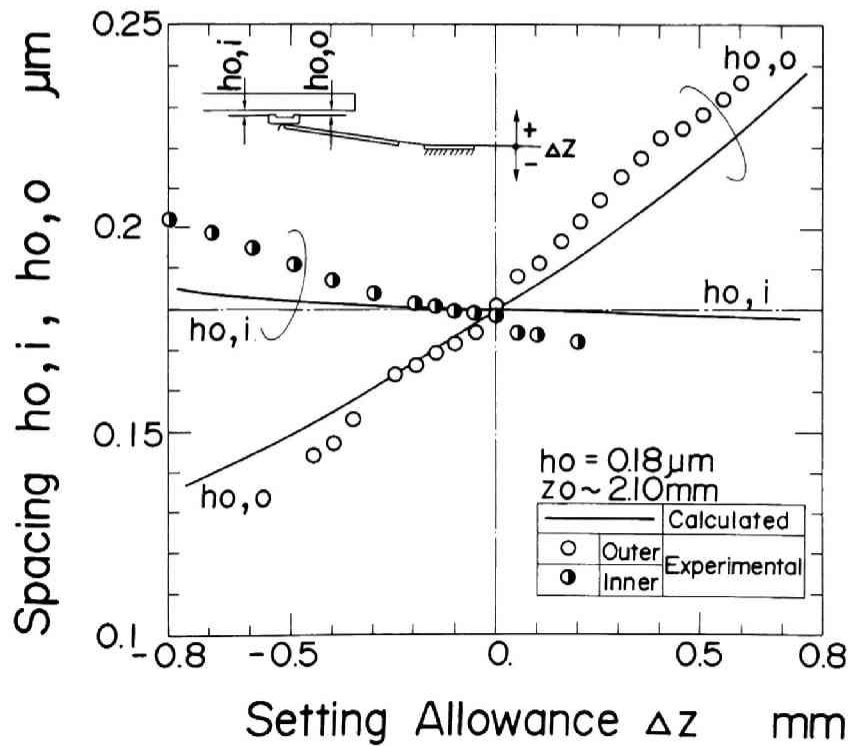
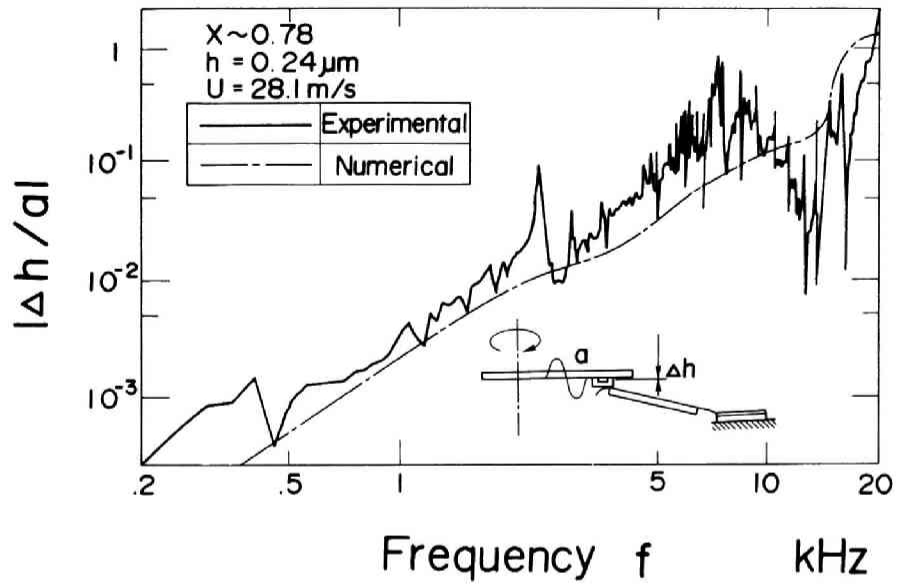


図4-5 スライダ支持機構の静特性

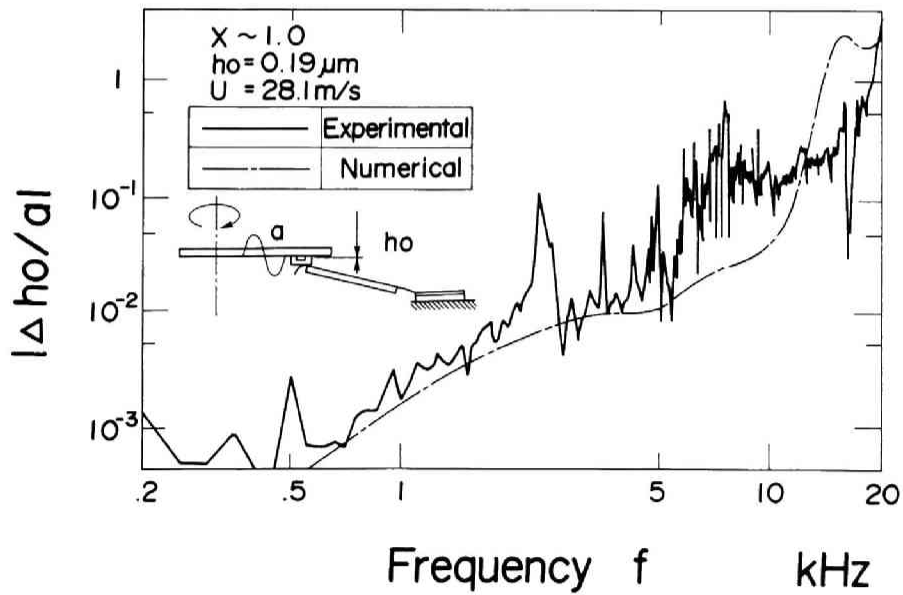
ダの浮上すきま変動 Δh との比を、周波数 f に対して示したものである。実験は、加振しない状態での（平均）浮上すきまが $h_0 = 0.19 \mu\text{m}$ 、走行速度 $U = 28 \text{ m/s}$ の作動条件で行ったもので、（a）は、スライダ長さで規格化したスライダ浮上面の無次元位置 $X = 0.78$ （ $h = 0.24 \mu\text{m}$ ）、（b）は同 $X \approx 1.0$ （流出端近傍）（ $h_0 = 0.24 \mu\text{m}$ ）での結果を示す。一点鎖線は、空気膜（ばね）・スライダ支持機構のばねとスライダの等価質量（支持機構の質量を考慮）からなる振動モデルについて、摂動法に基づく数値解析を適用した計算結果であり、実線は実験結果である。数値計算では支持機構の振動特性を考慮していないため、例えば 2.4 kHz 近傍の支持機構の負荷梁の曲げ共振点付近では、実験結果の数値計算結果に対する差異が大きく現れているが、このような点を除けば、 5 kHz 程度までは、ほぼ実験結果と計算結果は対応している。 5 kHz 以上の高周波数領域では、実験結果と計算結果との差異が再び大きくなっているが、これは、この範囲に支持機構の高次の共振モードが混在して発現していること、また圧電形加振器の加振力がこの範囲で十分でなく、スライダの浮上すきま変動を誘起できなかったことが主な理由と考えられる。

図4-7は、平均的な浮上すきま $h_0 = 0.19 \mu\text{m}$ の条件の下で、浮上すきまの $\pm 10\%$ に相当するすきま変動 $\Delta h_{\text{app}} = 0.038 \mu\text{m}$ を許容した時のディスク面の並進振動の振幅 a を、周波数 f に対して示したものである。太い一点鎖線が計算値、実線が実験値である。周波数 f と振幅 a を対数表示しているため、ディスク面の並進振動による加速度が一定となるレベルは、細い一点鎖線で示すように直線となる。なお、複数の実用装置において、積層して組立てられた各媒体面の加速度の測定値のうち、最大（最悪）値を太い直線で示す。

ディスク面の許容加速度を規定する時には、支持機構の振動特性、特に最低次の負荷梁の曲げ共振が大きく影響することがわかる。支持機構の振動特性を考慮しない解析結果（一点鎖線）に比して、支持機構の振動特性の影響が含まれる実用装置に対しては、浮動ヘッド機構の動特性を所要の値に規定するためにはディスク面の許容加速度は、 40 m/s^2 （約 4 g ）となり、支持機構の動特性を考慮しない解析予測に比べて、許容加速度を半分以下に抑制することが必要となる。なお、同図に示すよう、本装置におけるディスク面の加速度は、高々 5 m/s^2 （約 0.5 g ）程度であり、装置構成の観点からは、本浮動ヘッド機構は、ディスク面の並進振動に起因する浮上すきま変動に対して、十分な余裕を有している。



(a) 無次元位置 $X = 0.78$ での結果



(b) 無次元位置 $X = 1$ (流出端) での結果

図4-6 ディスク面の並進振動に対するすきま変動の伝達特性

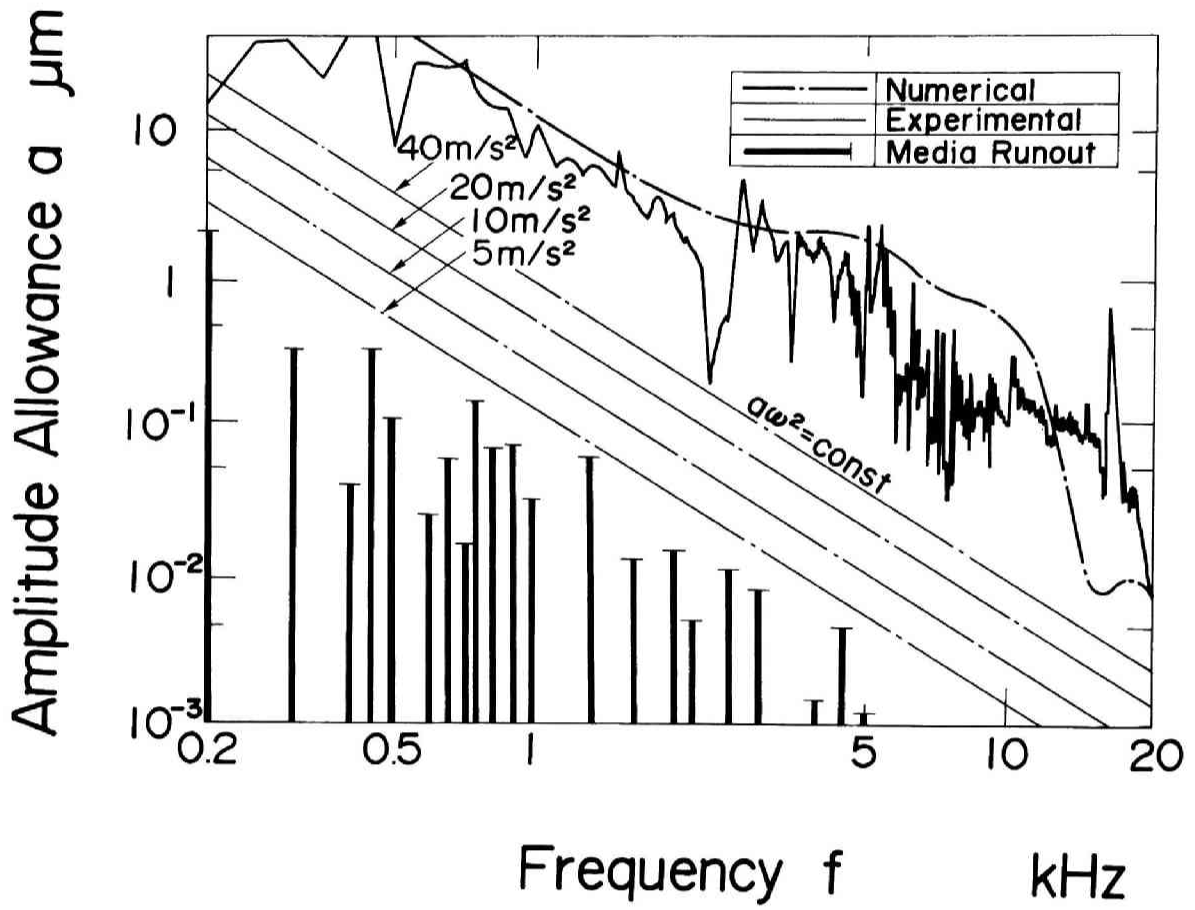


図4-7 ディスクフラッタの周波数と許容振幅の関係

4. 3. 3 ヘッドアーム振動に対する周波数応答

次に、浮動ヘッド機構が装着されるヘッドアーム振動に対するスライダ機構の動的な浮上特性について検討する。ヘッドアームの振動としては、前述のようにスライダの浮上すきま変動に影響の大きいアームの面外（ディスク面の法線方向）方向の振動を取り上げる。図4-8は、ボイスコイル形加振器を用いて、スライダ支持機構のヘッドアーム装着部分を、加振周波数 $f = 200 \text{ Hz} \sim 10 \text{ kHz}$ までの周波数の範囲で、ディスク面外（法線）方向に正弦波でスイープ加振した時の、加振振幅 z に対するスライダの浮上すきま変動 Δh の比を示したものである。スライダの作動条件は、平均的な浮上すきま $h_0 = 0.19 \mu\text{m}$ 、走行速度 $U = 28 \text{ m/s}$ である。太い実線が、供試浮動ヘッドスライダの実験結果、一点鎖線が数値計算結果である。また、同図には、参考までに、従来用いられてきたウィンチェスタ形支持機構とこれにスライダ長さ 3.7 mm のモノリシック形スライダを搭載した場合の実験結果を、破線で示す。数値計算には、大規模有限要素解析を適用して、スライダを含めた浮動ヘッド機構全体の振動特性を一括して解析した。スライダを媒体上に支持する空気膜の特性に関しては、レイノルズ方程式の摂動解析により、空気膜剛性、減衰係数を求め、スライダの4隅が、ばね・減衰によって支持される機構モデルで近似した。

実験結果と数値計算結果は、ほぼ一致しているが、周波数が高くなるにつれ、やや計算値が実験値を上回る傾向を示す。これは支持機構の構造解析において、スライダの空気膜剛性、減衰係数を一定として扱い、それらの周波数依存性を考慮していないことが主な原因と考えられる。また、 $4 \sim 5 \text{ kHz}$ の領域には実験値と計算値の不一致が見られるが、これも、構造解析において、支持機構の部材間の接合部分のモデル化が十分適切でなかったこと、加振器に面内加振の成分が連成して発生し、これが支持機構に印加されて浮上すきま変動を助長したことなどによると推定される。なお、従来形の浮動ヘッド機構（37 Tと表示）と本機構の動特性とを比較すると、本浮動ヘッド機構においては、負荷梁・スライダコアなどが軽量・高剛性化されたことにより、共振モード数が低減し、また浮上量変動に最も影響の大きい負荷梁の一次の曲げ共振点が、高周波数側に移動している。このことは、実用機において、外乱の振幅の大きい $2 \sim 3 \text{ kHz}$ 以下の周波数領域における外乱抑圧性能が向上していることを示す。

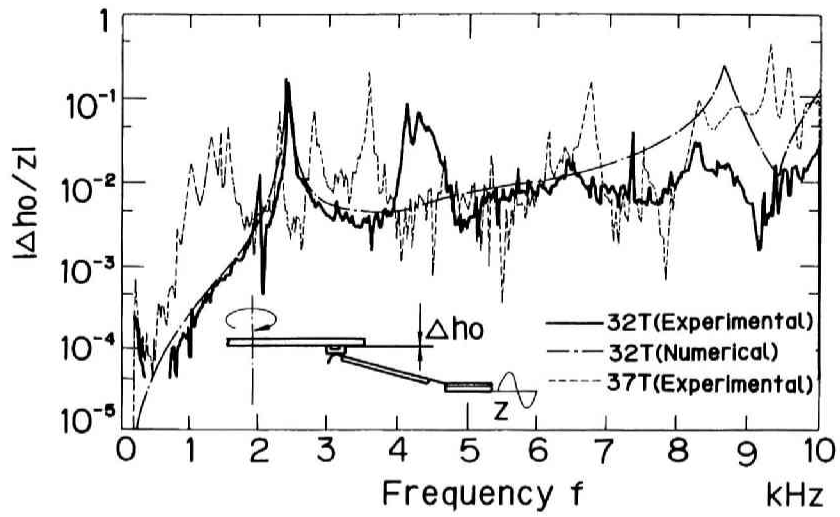


図4-8 支持機構固定部の並進振動に対する浮上すきま変動の伝達特性

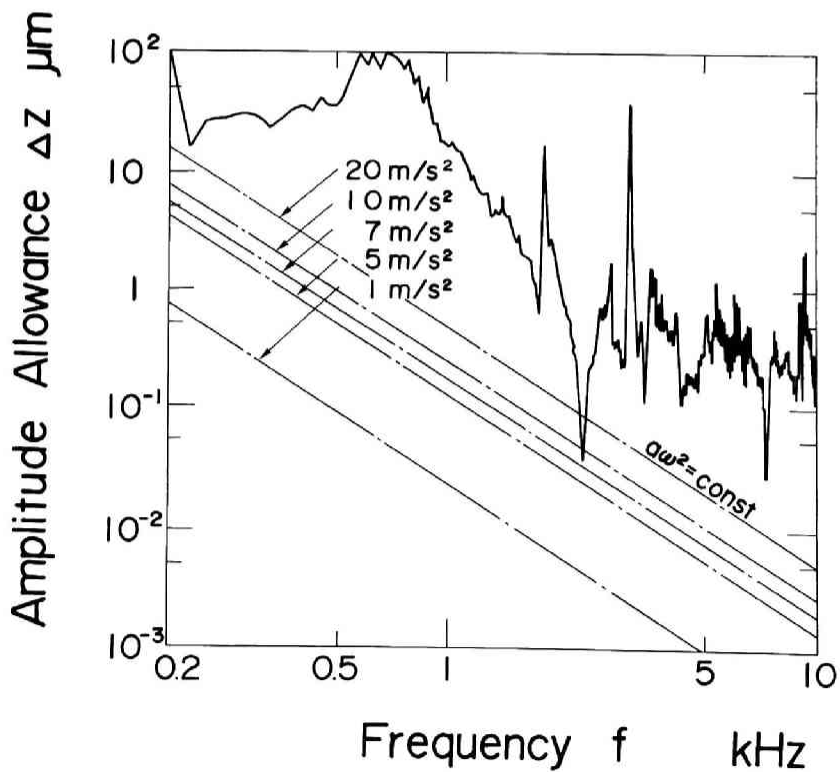


図4-9 支持機構固定部の並進振動周波数と許容振幅の関係

図4-9は、図4-8に示すスライダ作動条件の下で、平均的な浮上量 $h_0=0.19\mu\text{m}$ に対して、浮上すきま変動をその $\pm 10\%$ まで許容した時のヘッドアームの振幅 Δz を周波数 f に対して示す。ヘッドアームに許容される最大加速度は、媒体面が振動する場合と同様に、スライダ支持機構の負荷梁の一次曲げ共振によって制限されることとなり、本実験範囲の 200Hz から 10kHz までの帯域においては、ヘッドアームの加速度を 7m/s^2 (約 0.7g) 以下に抑制することが必要となる。

4.3.4 ヘッドアーム振動に対する過渡応答

実用装置において、シーク動作を経た後に正確なヘッドのトラック位置決めを行うことが可能かどうかを確認するためには、スライダ機構にシーク加速度を印加した時のスライダ浮上すきまの変動を評価することが必要となる。このような実際の外乱では、単一周波数の成分のみが印加される場合はまれであり、あるスペクトラムの幅を持った外乱が加わる場合が一般的である。したがって、個々の周波数成分に対するスライダの浮上すきまの応答としては許容値を下回る外乱であっても、各成分の位相まで考慮して時間領域で重畳した場合には、最悪の場合、許容値を越えるすきま変動を引き起こすような外乱が存在する可能性も想定される。一方、実用機では、長ストロークのシーク動作を行う際のスライダの浮上量変動を直接測定して動特性を評価することは、浮動ヘッド機構、位置決め機構など装置内部の機構上の制約からも困難である。

そこで、本研究では、実用装置を対象として、シーク動作時にヘッド位置決め機構に印加される駆動電流、駆動電流が印加された時のヘッド位置決め機構のヘッドアームの面外方向の加速度、前節で述べた支持機構を含めた浮動ヘッド機構の伝達特性の三者を、それぞれ個別に求めておき、それらを組合せて、最終的にシーク動作時のスライダ浮上量変動を時間領域で見積る手法を提案する。

図4-10にデータ処理のフローチャートを示す。また、4-11(a)~(e)に、本手法に基づきシーク動作をする時の浮動ヘッドスライダの動特性を検討した各操作ステップにおける結果を示す。以下に処理の手順を説明する。まず実用装置において、350トラック分の距離をシーク動作させた時のヘッド位置決め機構(アクチュエータ)の駆動電流波形(図4-11(a))を採取する。次に、これと同じ駆動電流を用いて、別途設

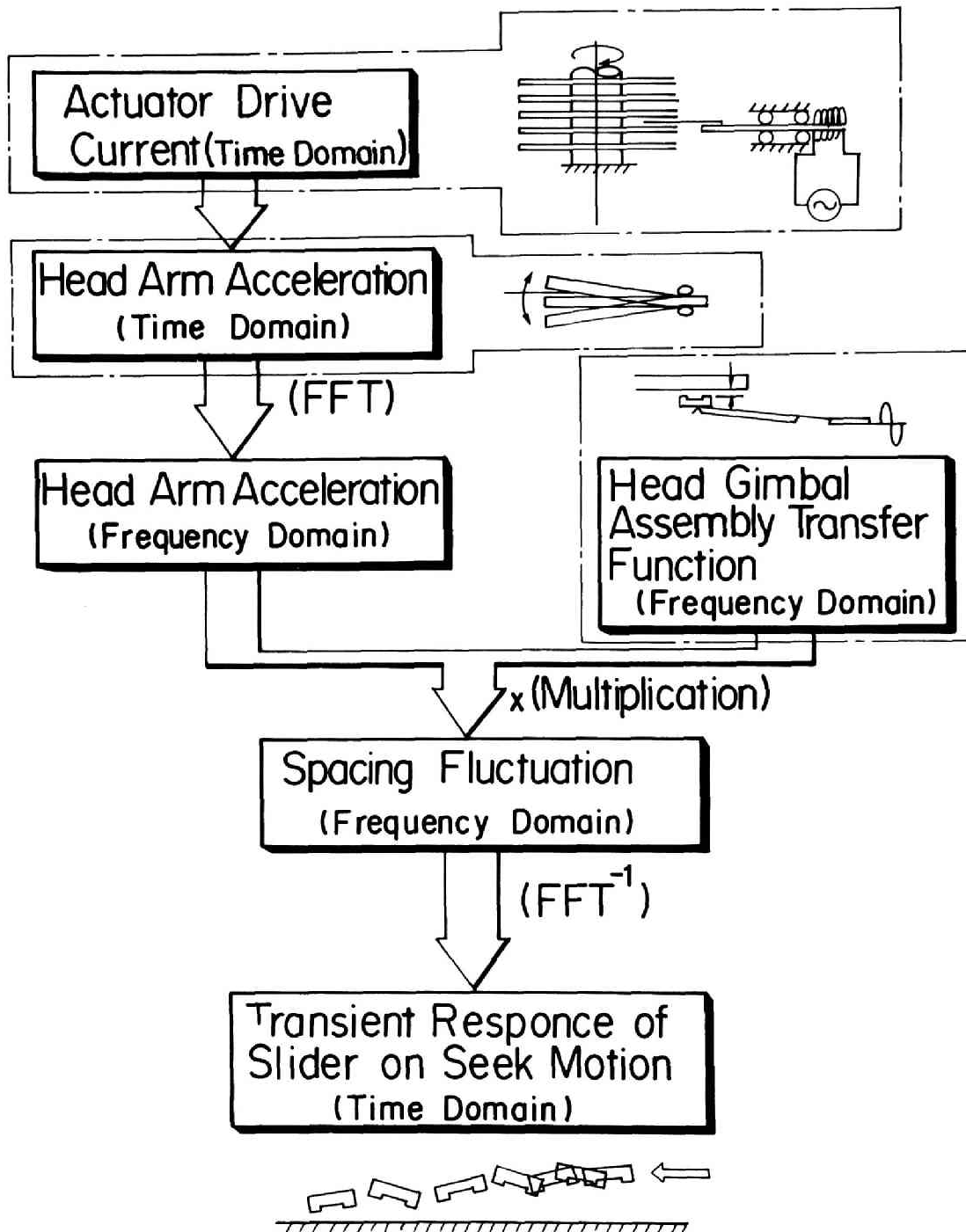
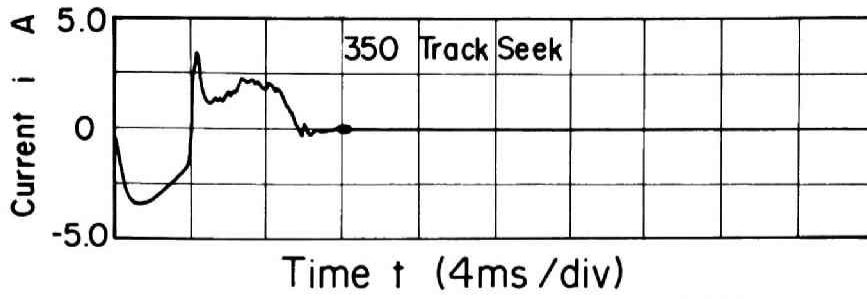
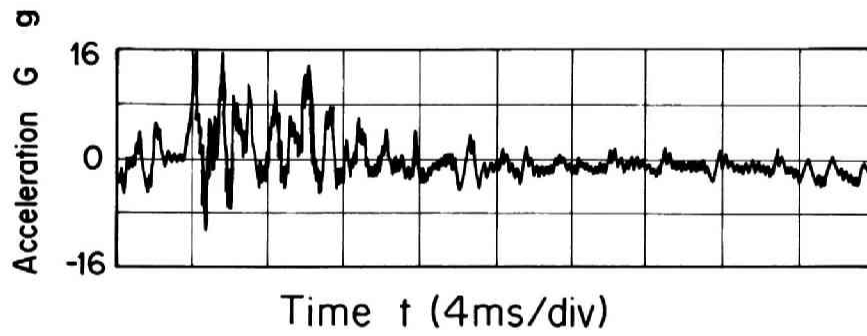


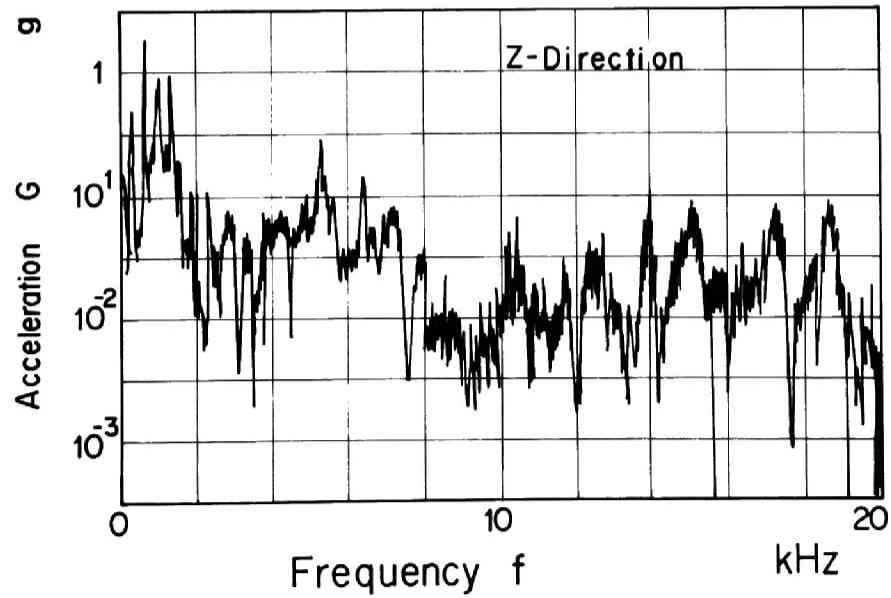
図 4-10 シーク動作時のヘッドアーム振動に起因する浮上すきま変動の評価手順



(a) ヘッド位置決め機構の駆動電流

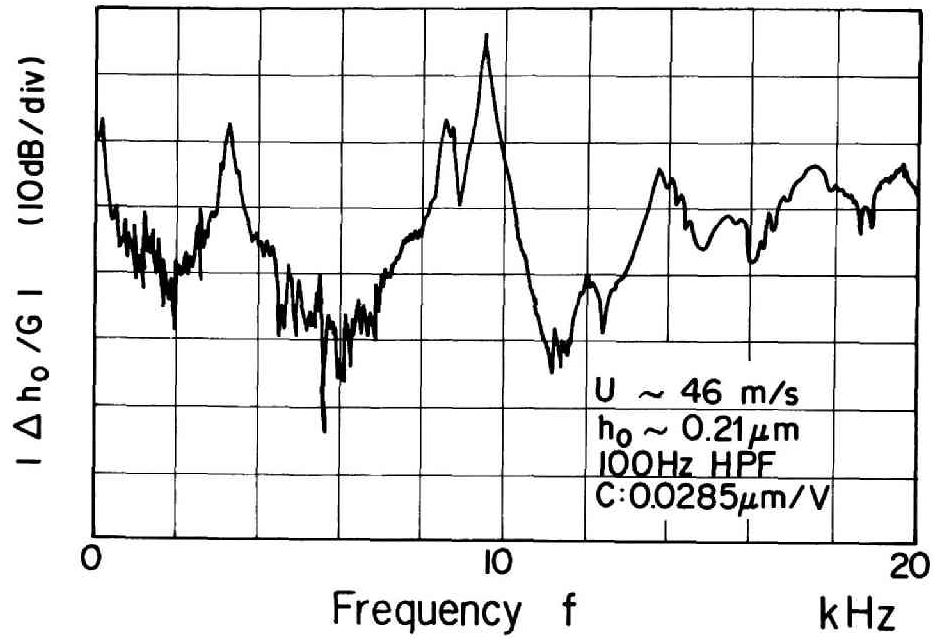


(b) ヘッドアームの曲げ方向の加速度

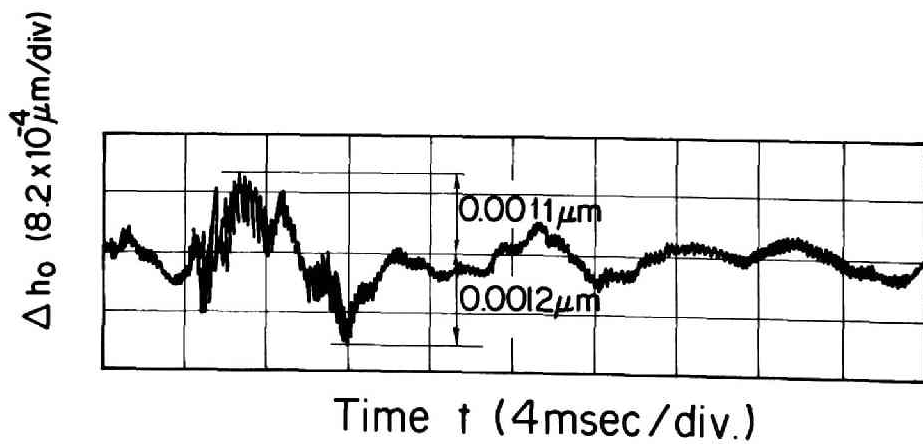


(c) ヘッドアームの曲げ加速度のスペクトラム

図 4-11 シーク動作時のヘッドアーム振動に起因する浮上すきま変動の評価結果



(d) スライダ支持機構の伝達特性



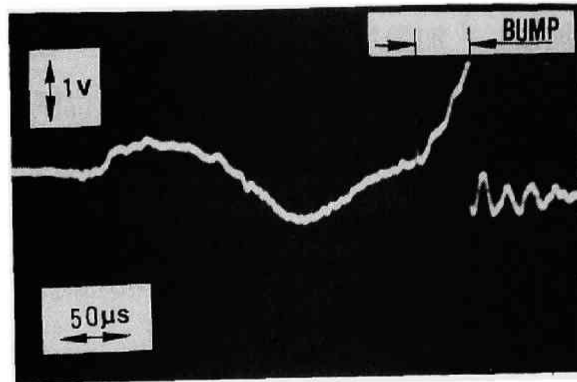
(e) スライダの浮上すきま変動

図4-11 シーク動作時のヘッドアーム振動に起因する浮上すきま変動の評価結果

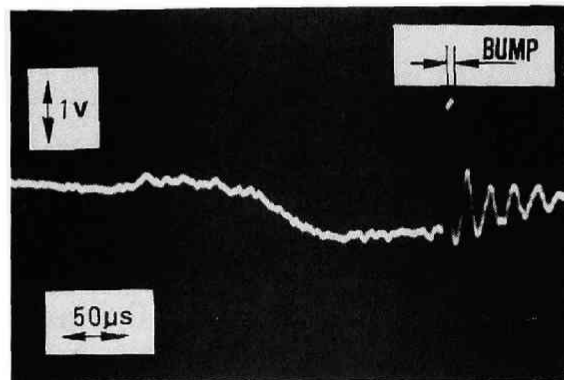
置した装置搭載品と同型の位置決め機構に印加し、浮動ヘッド機構が装着されるヘッドアームに設置した加速度センサを用いて、面外方向の振動波形（過渡応答）を採取し（図4-11（b））、FFTアナライザによって加速度のスペクトラムを得る（図4-11（c））。ちなみに、この時ヘッド位置決め機構のヘッドアーム先端に生ずる面外方向の瞬間最大加速度は、約16g程度である。一方、浮動ヘッド機構に関しても、別途ヘッドアーム装着部を面外方向に加振し、加振加速度に対する浮上すきま変動の伝達特性を採取する（図4-11（d））。FFTアナライザ上で、ヘッド位置決め機構の媒体の面外方向の加速度のスペクトラムとスライダ支持機構の伝達特性を掛け合わせ、スライダのシーク動作時の浮上量変動のスペクトラムを生成した後、逆フーリエ変換を行い、時間領域の過渡応答波形に変換する（図4-11（e））。この処理の際、ディスクのうねりに伴う低周波数の成分の影響が顕在化するため、カット・オフ周波数100Hzのローパスフィルタを介して、低周波数成分を除去している。このような一連の処理を行い、最終的に得られた4-11（e）に示す過渡応答の結果から、本装置に対しては、350トラックシーク動作時のヘッド位置決め機構（ヘッドアーム先端）の面外振動によって誘起されるスライダ浮上すきま変動は、 $0.001\mu\text{m}$ 程度であり、これは、動的な浮上すきま余裕である定常浮上すきまの10%の内の、さらに20%以下に相当する微小な浮上量変動であることが分かる。

4.3.5 矩形状突起に対する過渡応答

最後にスライダがディスク表面上の突起を通過する時の過渡応答の特性について示す。図4-12は、幅（スライダ走行方向に関して）0.05mmの矩形状の突起（図4-12（a））および幅0.4mmの矩形状の突起（図4-12（b））をスライダが通過した時の、流出端における浮上量変動に対応する干渉光強度のオシロスコープ波形を示したものである。突起のステップ部分をスライダが通過する時のすきまの不連続、突起通過後の減衰振動波形が明瞭に観察される。第3章で詳述したように、この干渉光強度の波形のデータを一旦トランジェントレコーダに格納した後、すきまに変換し、突起通過範囲に相当するすきま変動の特性に、突起高さ分のすきまを加算することで、ディスク面を基準としたスライダの運動の軌跡を得ることができる。



(a) 突起幅 0.4 mmの場合

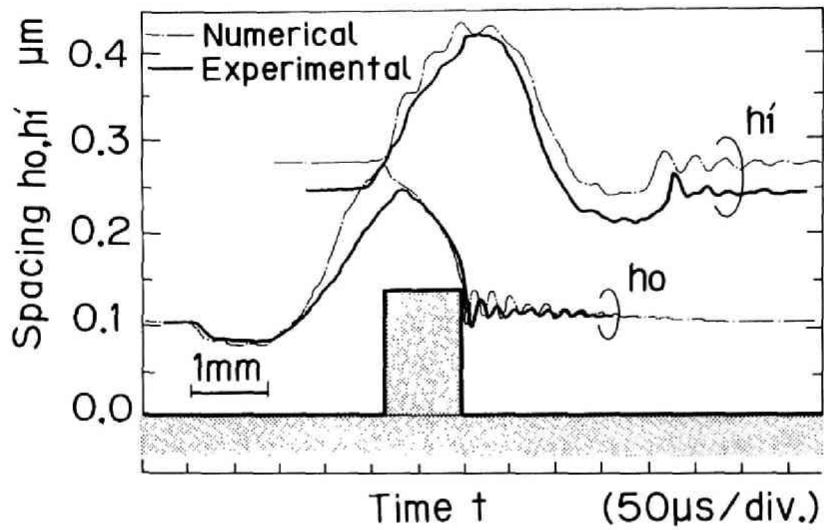


(b) 突起幅 0.05 mmの場合

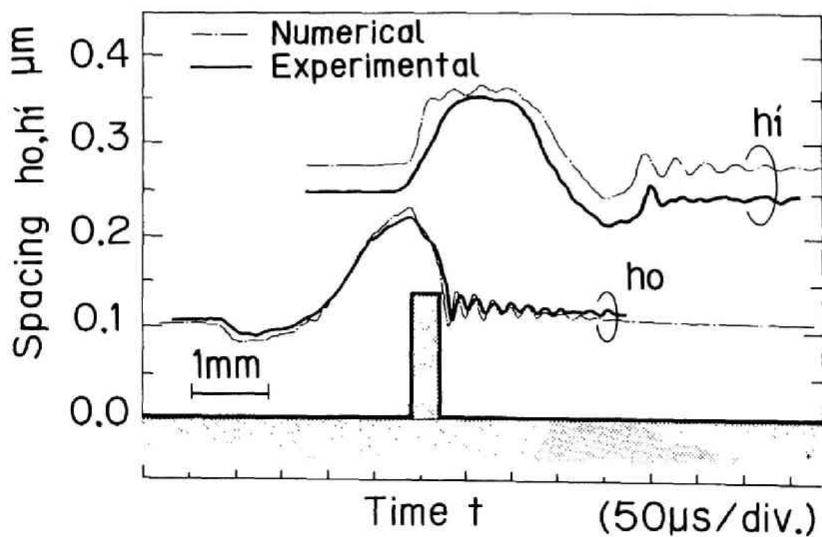
図 4-12 矩形状突起通過時の干渉光強度変化のオシロスコープ波形

図4-13(a)～図4-13(d)は、スライダがディスク面上の矩形状の突起を通過する時の過渡応答特性であり、上述のようにディスク面(ランド部分)を基準として測定した流出端浮上すきま h_0 およびテーパ端浮上すきま h_1' の結果を太い実線で、これらと対応する計算結果を細い一点鎖線で示す。過渡応答の数値計算においては、時間項を考慮した修正レイノルズ方程式をFactored Implicit法[404]によって離散値化して解いて各瞬間のスライダ潤滑膜の圧力分布を求め、これを基に、運動方程式をRunge-Kutta法により逐次積分を行うことで、スライダの運動軌跡を得る。潤滑領域の分割は、急峻な突起のステップ部分がスライダの潤滑領域全体を通過することから、スライダの走行方向に200の等分割、また幅方向には(幅の半分について)20の不等分割として、計算精度を確保している。

図4-13(a)、(b)、(c)に示すように、スライダの平均的(定常)な浮上量を $0.1\mu\text{m}$ に設定し、突起高さを $0.135\mu\text{m}$ 、突起幅を各々 1.0mm 、 0.4mm 、 0.05mm と変えて、スライダの過渡応答を評価した。実験結果と計算結果は、テーパ端浮上すきま h_1' (もしくはスライダのピッチ角)に関しては、両者の間に若干の差異が認められるが、全体としては、ほぼよく一致している。スライダが突起通過後に生じる減衰振動の周波数は、テーパ端部で約 26kHz 、流出端部で約 48kHz 程度であり、各々スライダの並進モードおよびピッチングモードの共振周波数に対応するものである。図4-13(a)～(c)に示すように、幅の狭い突起ほど、高周波の外乱成分を多く含むためスライダの追従性が劣化し、これに応じて突起の頂部を通過する時のスライダの変位量(ランド部を基準としたジャンプ量)が減少していくことが分かる。図4-13(d)は、幅が 0.05mm 、高さがスライダの平均浮上量の約2倍の $0.19\mu\text{m}$ の突起を通過する時の過渡応答の結果である。スライダが、幅が狭く高さの高い突起を通過する時には、微妙な固体接触に伴うスライダの運動の乱れ、あるいは気体膜圧力が突起頂部の狭い潤滑領域で急激に変動することにより、スライダの弾性変形が生じる可能性なども考えられる。本研究では、スライダを剛体として扱い、潤滑膜特性ならびにスライダの運動を解析しているが、実験結果は、修正レイノルズ方程式によって予測される解析結果とほぼ一致しており、本実験の範囲では、上記の仮定がほぼ妥当であると考えられる。ただし、スライダと突起の接触を検出する目的で、接触時に発生する音響弾性波をAE(アコースティック・エミッション)センサを用いて測定した実験では、スライダが突起を通過する時

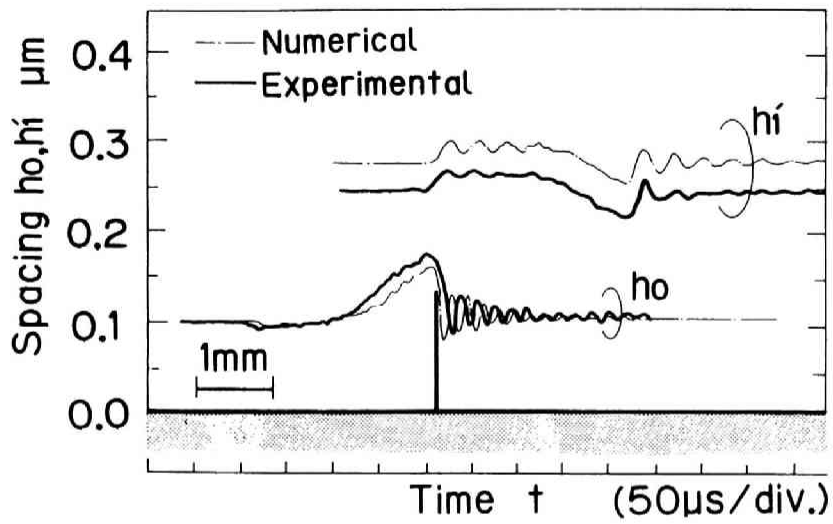


(a) 突起幅 1 mm、突起高さ 0.135 μm の場合

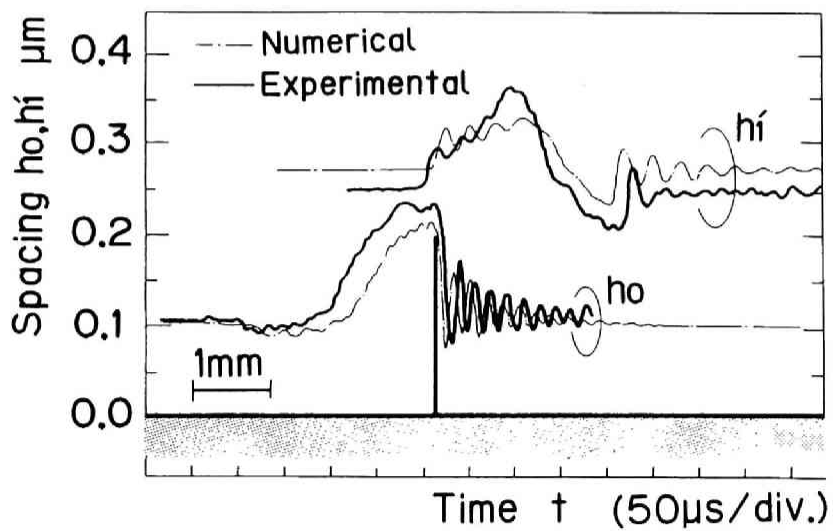


(b) 突起幅 0.4 mm、突起高さ 0.135 μm の場合

図 4-13 矩形状突起に対するテーパフラットスライダの過渡応答



(c) 突起幅0.05mm、突起高さ0.135 μ mの場合



(d) 突起幅0.05mm、突起高さ0.19 μ mの場合

図4-13 矩形状突起に対するテーパフラットスライダの過渡応答

に、AE波の出力を観測した例もある。これは、突起のステップ部分が、完全に理想的な形状でなく、ごく微細な突起のエッジ部分の凹凸で接触が引き起こされたことなどが原因として考えられ、本実験のように、突起高さがスライダの定常浮上すきまに比べて極端に高く、スライダが突起にかなり接近して運動する場合には、スライダの剛体運動を乱さない程度のわずかな接触は有り得るものと推定される。

これら一連の浮動ヘッドスライダ機構の動特性に関する結果は、 $0.1\mu\text{m}$ 前後の浮上すきまにおけるものであるが、実験結果は、いずれも修正レイノルズ方程式に基づく気体潤滑膜特性を用いた数値解析結果とよく一致しており、サブミクロンからサブサブミクロンの超微小浮上すきまで動作するスライダの動特性の設計においても、修正レイノルズ方程式を適用することの妥当性が実証できたと考える。

4.4 結 論

本章では、大容量・高速磁気ディスク装置に用いられている浮動ヘッドスライダ機構を対象として、媒体面の並進振動（フラッタ）、ヘッド位置決め機構の浮動ヘッド機構装着アームの面外振動、媒体面に存在する突起・うねりなど、磁気ディスク装置を構成する上で想定される外乱に対して、精密な浮動ヘッドスライダの動特性を評価する手法を示した。本章で得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 媒体面の並進振動（フラッタ）、ヘッド位置決め機構のヘッドアームの面外振動に起因する浮動ヘッド機構の動特性に関しては、本章で示した評価手法によって、浮上すきま余裕の正確な見積りが可能となった。また、浮上すきま変動を、許容値以下に抑制するのに必要とされる媒体面の振動もしくはヘッドアームの振動の振幅（もしくは加速度）の限界値に関しては、これを支配する最大の要因が、支持機構の負荷梁部の曲げ共振である。
- (2) 実用装置において、直接測定することが困難である位置決め機構のシーク動作時のスライダの過渡応答に関しては、ヘッド位置決め機構の駆動電流、ヘッドアームを含む位置決め機構の動特性、浮動ヘッド機構の動特性を各々単独に求め、これらを用いて、FFTもしくは逆FFTなどの処理をすることにより、間接的に

評価する手法を示した。

- (3) うねりを含む媒体面上の種々の欠陥に対するスライダの過渡応答の特性の評価に関しては、実媒体の欠陥よりもさらに苛酷な矩形状の突起を想定し、これを通過する時のスライダの精密な動特性を測定することで、これを可能とした。なお、本研究で対象とした小形・軽量のスライダは、高周波数の外乱成分を含む狭小な突起もほぼ、非接触で浮上するなど、高い動的応答性を有することが分かった。
- (4) 一連の $0.1\ \mu\text{m}$ 前後の微小浮上すきまにおけるスライダの動特性の精密な測定結果は、修正レイノルズ方程式に基づく数値計算結果とよく一致し、修正レイノルズ方程式が、サブミクロンからサブサブミクロンの微小浮上すきまにおけるスライダの動特性の設計・評価においても、有効であることを実証した。

第5章 浮動ヘッドスライダの浮上特性に 及ぼす面あらしの影響

5.1 緒言

磁気ディスク装置に用いられている浮動ヘッドスライダは、空気の粘性による動圧効果を利用して、走行する磁気媒体上に、電磁変換素子を微小なすきまで位置付けるものである。現在用いられている大部分の装置では、浮動ヘッドを含む周辺の機構を簡素化できる利点があることから、装置の起動・停止時にはスライダを接触走行させながら浮上、もしくは停止させるコンタクト・スタート・ストップ(CSS)方式が採用されている。この方式により、起動・停止時には相対的に媒体・スライダの面あらしの影響が増大するため、接触走行状態からの浮き上がり特性、浮き上がり直後のスライダの追従特性は、浮上面、走行面のあらしに大きく影響される。ヘッドスライダ・媒体の耐摩耗性、浮き上がり直後の浮上特性は装置の信頼性を左右する重要な要因であり、起動・停止時の浮上特性を解明するためには、面あらしが浮上特性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。また、近年は表面の平坦・平滑性が高く、スライダを微小浮上させることによって高密度記録が可能な連続薄膜媒体が用いられているが、面精度が高いことが、逆に装置の起動・停止の際にスライダが吸着する、あるいはスティクションを生じるなどの問題を起こしており、人工的に表面をあらすことにより、これらの問題を解決しようとする粗面化処理が行われている。粗面化処理に起因する浮動ヘッドスライダの絶対浮上すきまの変化は、記録再生特性に影響するため、電磁変換の基準を定める上からも、表面あらしの影響を定量化することは重要な課題である。

浮動ヘッドスライダの浮上特性は、修正レイノルズ方程式によって数値解析されているが、実際の表面に存在するあらしは、ランダムな二次元分布をしており、これを直接考慮して、その影響をレイノルズ方程式によって解析することは不可能である。このような表面あらしの理論的扱いに関しては、以下のような研究がなされている。

スライダ側に面あらしのある場合に関しては、浮上すきまを平均化して、あらしのある面と等価な流量特性を有する仮想の平滑面を用いて、スライダ浮上特性を解析する平均す

きま理論が提案されており、主として無限幅スライダで、作動流体が非圧縮性の場合について、走行方向に沿った溝状のあらさ（平行あらさ）、走行方向に直交した溝状のあらさ（直交あらさ）を対象として研究が進められてきた[501],[502],[503]。これら一次元あらさを有するスライダの浮上特性の解析において、平均すきまを適用することの妥当性は、すでに数学的に証明されている[504]。また、二次元あらさを有するスライダの浮上特性の解析に関しては、三矢は圧力場と電場の類似性から2次元あらさを電気抵抗網と見なし、平均化の手法として、算術平均すきまと調和平均すきまを一定の割合で混合して平均すきまとして用いる方法を提案した[505]。

浮動ヘッドスライダのように作動流体が圧縮性の場合には、レイノルズ方程式は非線形となり、さらに気体の分子平均自由行程に起因するスリップ流れの項が非線形項として付加される。このために圧縮性流体の場合には、非圧縮性流体の場合と異なり、厳密にはすきまのみを独立して平均化する手法は適用できない。このような場合のすきまの平均化の手法は確立されていないが、三矢は、潤滑膜全体では圧縮性の影響が大きい場合でも、微細なあらさの一単位ごとに誘起される副次的な流れに関しては、圧縮性の影響は小さいとして、修正レイノルズ方程式の圧力流れ項、せん断流れ項、スリップ流れによる付加項の中に現れるすきまの3乗 (H^3)、すきま (H)、すきまの2乗 (H^2) のそれぞれに、独立に平均化を行い、規則的に分布したモデルあらさを有するスライダの解析に適用して、この近似解と厳密解が比較的良好に一致することを示した[506]。

一方、媒体側にあらさのある場合のスライダ浮上特性の解析については、Whiteらが無限幅平面スライダが正弦波状のあらさを有する走行面上を浮上する場合について、時間領域で直接解析を行い、スライダがあらさの1周期分の長さを走行する間の時間平均を行った負荷容量が、圧縮性定数とともに単調増加し、その値は、最終的にはスライダ側にあらさがある場合に一致することを示した[508]。三矢は、有限幅スライダが正弦波状のあらさを有する走行面上を浮上する場合について、平均すきまに基づく平均化レイノルズ方程式を定式化し、スライダ側にあらさのある場合に比して、走行面にあらさのある場合の方がスライダの負荷容量が減少すること、あらさ振幅の増大とともにその差異が顕著となること、さらに、同一スライダでは走行速度が大きい方がその差異が顕著となることを示したが[509]、この定性的傾向は、Whiteらのあらさを有する走行面が移動する場合のスライダの浮上特性の直接解析と一致する結果となっている。

本章では、作動流体が圧縮性の場合について、一次元および二次元あらさを有するスラ

イダの浮上特性の解析手法として、混合平均すきま理論を適用することの妥当性を実験的に検証することを目的として、以下の検討を行う。まず矩形断面の一次元あらさを有する無限幅平面スライダ、有限幅平面スライダにおいて、あらさ振幅、あらさピッチ（スライダ長さ当りの山数）をパラメータに、平均すきまに基づく近似解析結果と直接解析結果とを比較し、平均すきま理論によりスライダの浮上特性を解析する時の近似精度を評価する。次に、規則性を有するあらさパターンとして、一次元および格子状の二次元あらさを対象とし、これらをイオンビームエッチング法により形成したスライダを用いて浮上実験を行う。実験結果は、平均すきまに基づく近似解析結果と比較し、平均すきま理論の有効性を検討する。

一方、媒体側にあらさのある場合のスライダの浮上特性の解析に関しては、あらさ振幅が極端に大きい場合を除いて、あらさが走行することによるスライダの浮上特性に及ぼす影響は小さいため、スライダ浮上面側にあらさがある場合に適用した平均すきまの手法をそのまま適用し、解析結果と実験結果との比較を行う。

5. 2 一次元あらさにおける平均すきまに基づく近似解と直接解の比較

平均すきまの手法は、面あらさのあるすきまに対して、そこを流れる流量と等しい流量を実現する等価な平滑面を想定して、スライダの潤滑特性を解析するものである。非圧縮性流体の場合には、作動流体の流量は、すきまによって一義的に規定されるため、レイノルズ方程式中の (H^3) 、 (H) の項を独立に平均すきま (\tilde{H}^3) 、 (\tilde{H}) で置き換えて、平均すきまとすることが可能である。

圧縮性流体の場合には、流量はすきま (H) もしくはすきまの3乗 (H^3) と流体の密度 ρ との積で表されるため、 (H^3) 、 (H) を独立に平均値 (\tilde{H}^3) 、 (\tilde{H}) で置き換えて平均すきまとすることは、厳密には正しくない。しかし、潤滑領域全体では圧縮性の影響が大きい場合でも、個々のあらさの単位である凹凸によって誘起される副次的な流れについては、あらさの単位がスライダ長さに比して十分微細であれば、あらさの単位ごとの圧縮性の影響は小さいと考えられる。すなわち、スライダ長さで表した圧縮性定数が大きくても、あらさの波長で表した局所的な圧縮性定数が小さければ、あらさの単位内において潤滑特性に及ぼす圧縮性の影響は無視できる。さらに分子平均自由行程に起因するスリ

ップ流れの項として付加される (H^2) の項の平均化に関しても、厳密には圧力流れの項に含めて同時に平均化する必要がある。ただし、クヌッセン M^* 数が比較的小さい領域では、スリップ流れの付加項も、 (\tilde{H}^3) 、 (\tilde{H}) と同様に独立に平均化する扱いが可能である[507]。

平均すきま (\tilde{H}^3_x) 、 (\tilde{H}^2_x) 、 (\tilde{H}_x) 、 (\tilde{H}^3_y) 、 (\tilde{H}^2_y) 、 (\tilde{H}_y) を用いた平均化修正レイノルズ方程式は無次元化した形で式 (5-1) のように表現される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X} \left[(\bar{P}\tilde{H}^3_x + 6M^*\tilde{H}^2_x) \frac{\partial \bar{P}}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[(\bar{P}\tilde{H}^3_y + 6M^*\tilde{H}^2_y) \frac{\partial \bar{P}}{\partial Y} \right] \\ & = \Lambda_Y \frac{\partial (\bar{P}\tilde{H}_y)}{\partial Y} \quad \dots (5-1) \end{aligned}$$

ここに \bar{P} は平均圧力、 M^* ($= aM$ 、 a : 壁面修正係数、 M : クヌッセン数) は等価クヌッセン数、 Λ は圧縮性定数である。

スライダが有限幅の場合には、形状的には一次元あらしである平行あらし、直交あらしについても、スライダ幅方向の流れ (主流に直交した流れ) が生ずるため、これらは実効的には異方性の強い二次元あらしと見ることが出来る。従って、平均すきまを適用する場合には、平行あらしについては、スライダ走行方向 (あらしの山もしくは谷に沿った方向) に算術平均すきまを、スライダ幅方向 (あらしの山もしくは谷を横切る方向) に調和平均すきまを用い、直交あらしについては、スライダ走行方向に調和平均すきまを、またスライダ幅方向に算術平均すきまを用いればよい。二次元あらしの場合には、スライダ走行方向、スライダ幅方向とも、すきま内の流路コンダクタンス特性としては、算術平均すきまと調和平均すきまを用いた場合の中間的特性を持つものと考えられる。従って、式 (5-1) の平均すきま (\tilde{H}^3_x) 、 (\tilde{H}^2_x) 、 (\tilde{H}_x) 、 (\tilde{H}^3_y) 、 (\tilde{H}^2_y) 、 (\tilde{H}_y) には、一次元あらしの場合を包括する一般的な平均すきまとして、調和平均すきまと算術平均すきまを混合比 α_x もしくは α_y で混合する混合平均すきまを用いればよい。

$$\tilde{H}^3_x = (1 - \alpha_x) \cdot \bar{H}^3_x + \alpha_x \cdot \hat{H}^3_x \quad (5-2)$$

$$\hat{H}_x^2 = (1 - \alpha_x) \cdot \overline{H}_x^2 + \alpha_x \cdot \hat{H}_x^2 \quad (5-3)$$

$$\hat{H}_x = (1 - \alpha_x) \cdot \overline{H}_x + \alpha_x \cdot \hat{H}_x \quad (5-4)$$

$$\hat{H}_y^3 = (1 - \alpha_y) \cdot \overline{H}_y^3 + \alpha_y \cdot \hat{H}_y^3 \quad (5-5)$$

$$\hat{H}_y^2 = (1 - \alpha_y) \cdot \overline{H}_y^2 + \alpha_y \cdot \hat{H}_y^2 \quad (5-6)$$

$$\hat{H}_y = (1 - \alpha_y) \cdot \overline{H}_y + \alpha_y \cdot \hat{H}_y \quad (5-7)$$

なお、具体的には、算術平均すきま (\overline{H}^3)、(\overline{H}^2)、(\overline{H})、調和平均すきま (\widehat{H}^3)、(\widehat{H}^2)、(\widehat{H})、は、図5-1に示すように、あらさの一単位 (面積 $\Delta S = \Delta X \cdot \Delta Y$) の中で以下の積分平均を行って求められる。

$$\overline{H}^3 = \frac{1}{\Delta X \Delta Y} \int_0^{\Delta X} \int_0^{\Delta Y} H^3 dX dY \quad (5-8)$$

$$\overline{H}^2 = \frac{1}{\Delta X \Delta Y} \int_0^{\Delta X} \int_0^{\Delta Y} H^2 dX dY \quad (5-9)$$

$$\overline{H} = \frac{1}{\Delta X \Delta Y} \int_0^{\Delta X} \int_0^{\Delta Y} H dX dY \quad (5-10)$$

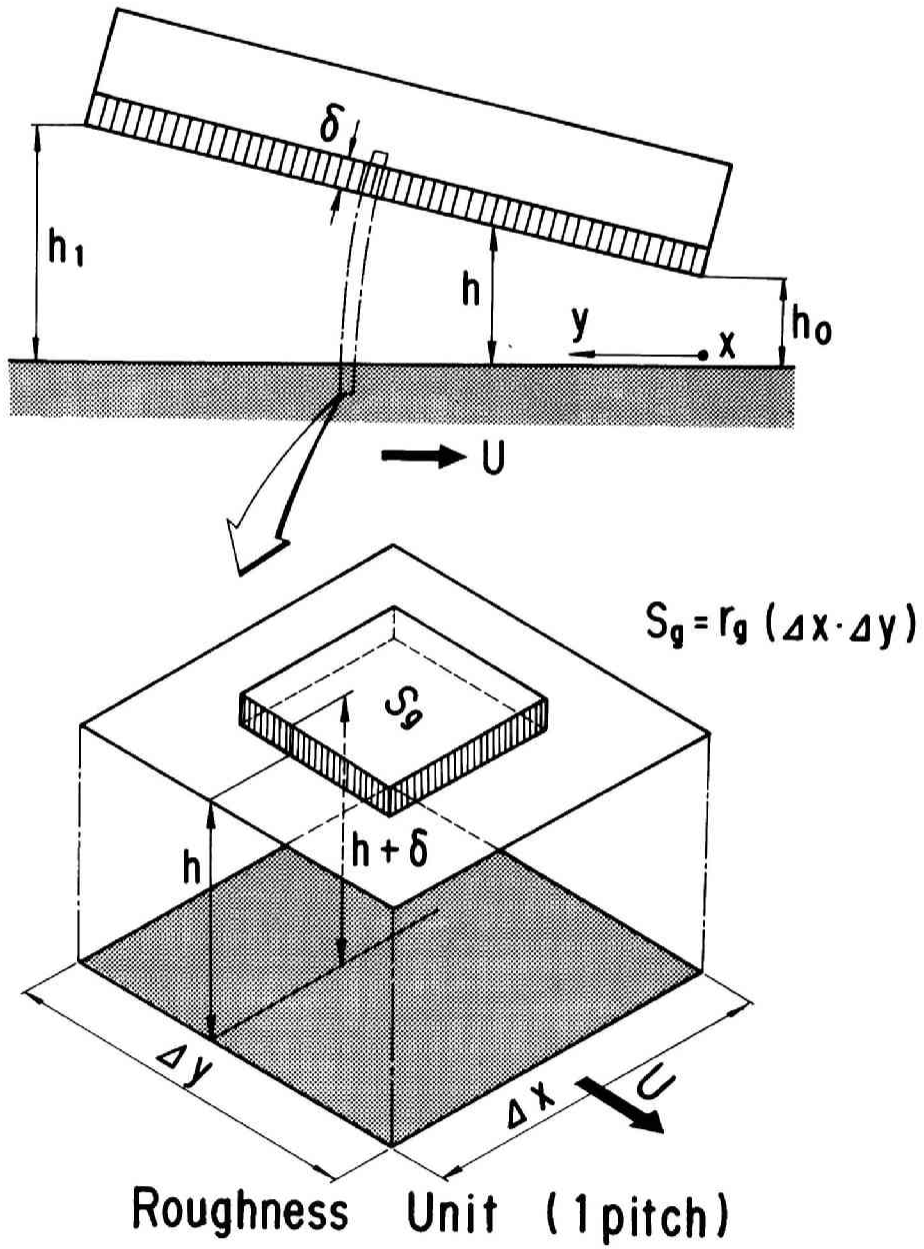


図5-1 平均すきまのモデル

$$\hat{H}^3 = \Delta X \Delta Y \int_0^{\Delta X} \int_0^{\Delta Y} \frac{1}{H^3} dX dY \quad (5-11)$$

$$\hat{H}^2 = \Delta X \Delta Y \int_0^{\Delta X} \int_0^{\Delta Y} \frac{1}{H^2} dX dY \quad (5-12)$$

$$\hat{H} = \int_0^{\Delta X} \int_0^{\Delta Y} \frac{1}{H^2} dX dY / \int_0^{\Delta X} \int_0^{\Delta Y} \frac{1}{H^3} dX dY \quad (5-13)$$

あらさの波長が十分に小さければ、図5-1に示すように、あらさの一単位内でのスライダの傾斜の影響は無視でき、あらさの無次元振幅（無次元溝深さ）を Δ 、あらさの一単位に占める溝占有率を r_g （ $= S_g / \Delta x \cdot \Delta y$ 、 S_g ：溝面積）とすれば、式（5-8）～式（5-13）に示す積分平均すきまは、以下の式で表現できる。

$$\overline{H^3} = (1-r_g) \cdot H^3 + r_g (H+\Delta)^3 \quad (5-14)$$

$$\overline{H^2} = (1-r_g) \cdot H^2 + r_g (H+\Delta)^2 \quad (5-15)$$

$$\overline{H} = (1-r_g) \cdot H + r_g (H+\Delta) \quad (5-16)$$

$$\hat{H}^3 = \left[(1-r_g) \cdot \frac{1}{H^3} + r_g \cdot \frac{1}{(H+\Delta)^3} \right]^{-1} \quad (5-17)$$

$$\hat{H}^2 = \left[(1-r_g) \cdot \frac{1}{H^2} + r_g \cdot \frac{1}{(H+\Delta)^2} \right]^{-1} \quad (5-18)$$

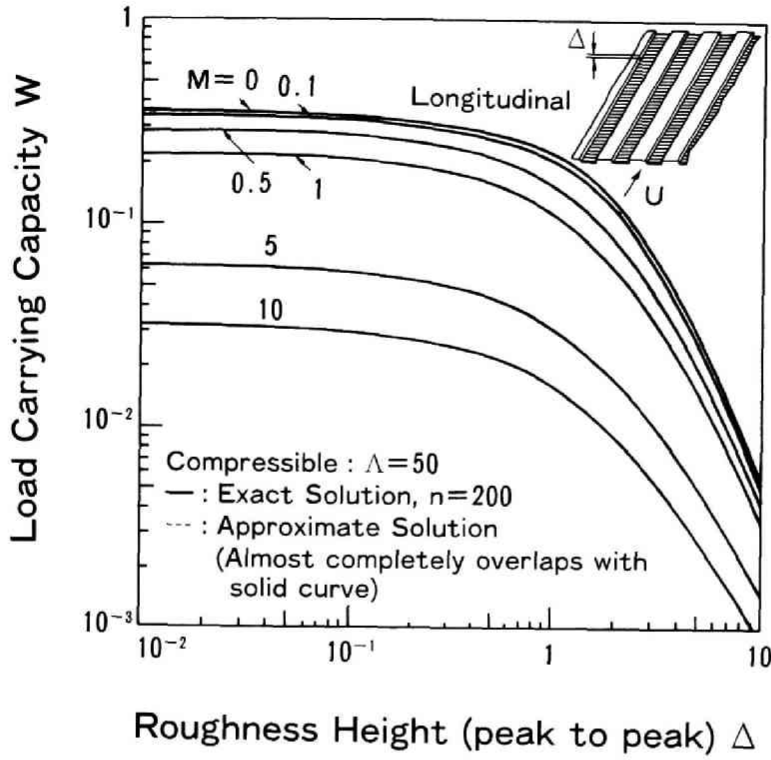
$$\hat{H} = \hat{H}^3 / \hat{H}^2$$

(5-19)

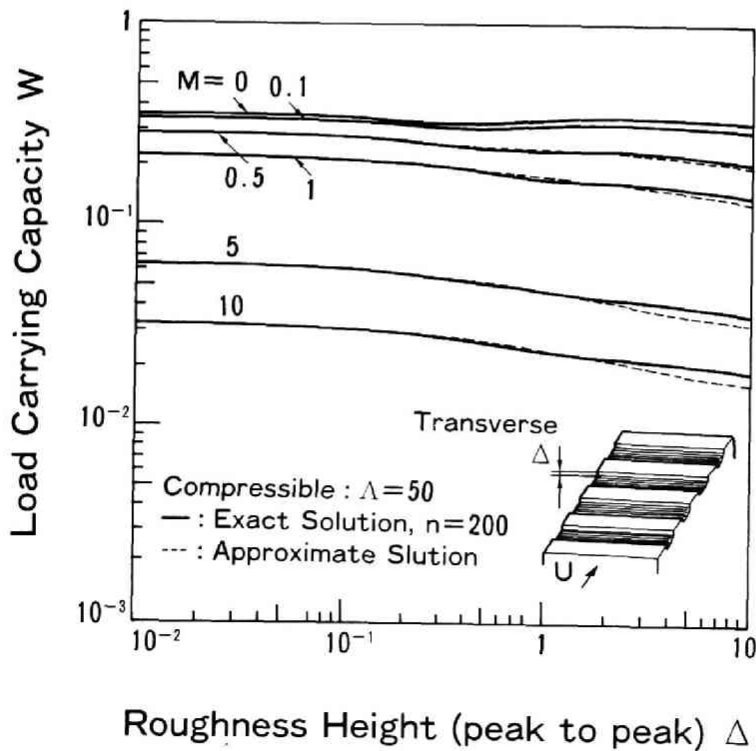
平均すきまに基づく近似解の精度を評価するため、平行あらし、直交あらしを有する無限幅平面スライダについて、近似解と直接解との負荷容量の比較を行った。平行あらしの場合の結果を図5-2(a)に、直交あらしの場合の結果を図5-2(b)に、クヌッセン数 $M (= \lambda_0 / h_0)$ をパラメータとして示す。平行あらしの場合には、無次元あらし振幅 Δ が約1以上で、急激に負荷容量が減少する。ただし、近似解と厳密解との差異は、 Δ が10程度の範囲までは、ほとんど顕在化しない。なお、近似解では、気体の分子平均自由行程の影響を表す(H^2)の付加項の平均化に関しては、クヌッセン数 M が十分小さいと仮定して、(H^3)の項とは独立に行っている。直交あらしに関しては、比較的あらし振幅の影響は少ない。ただし、 Δ が約1以上の範囲で、厳密解との差異が現れる。またこの差異は M が大きいほど顕著である。

有限幅スライダの場合の厳密計算においては、主流(スライダ長方向)に直交する幅方向の流れが生じるため、無限幅スライダの場合とは異なり、スライダ幅方向にも多くの分割を必要とする。幅方向の分割数の増加は計算機の記憶容量、計算時間を指数関数的に増加させるため、平行あらし、直交あらしのような一次元あらしを有するスライダの浮上特性の厳密計算する場合においても、かなりの困難を生ずる。そこで、本章では、図5-3に示すように、スライダ幅方向の分割数が比較的少ない場合でも、ある程度は計算が可能な直交あらしについて、山数 $n = 60$ 程度までの範囲で直接計算を行い、平均すきまによる近似解との比較を試みた。

図5-4は、無次元あらし振幅 Δ を変えた時のスライダ負荷容量を、山数 $n = 1$ から $n = 60$ まで変えた場合について計算した結果を示す。なお、直接計算においては、各あらし単位ごとの誤差を累積しないように、スライダ幅方向には30分割(幅方向は、圧力分布が対称であるため、スライダの半幅に対して15分割して計算した。)し、またスライダ長さ方向に関しては、あらし1山当たり少なくとも22分割以上の分割を行って計算した。山数が少ない場合には、負荷容量はスライダ流入端におけるあらしの境界条件(流入端が山で始まるか、谷で始まるか)の影響を強く受ける。流入端が谷で始まる場合の方が、山で始まる場合よりも、ステップ軸受の効果により、一般的に負荷容量が大きくなる。そし

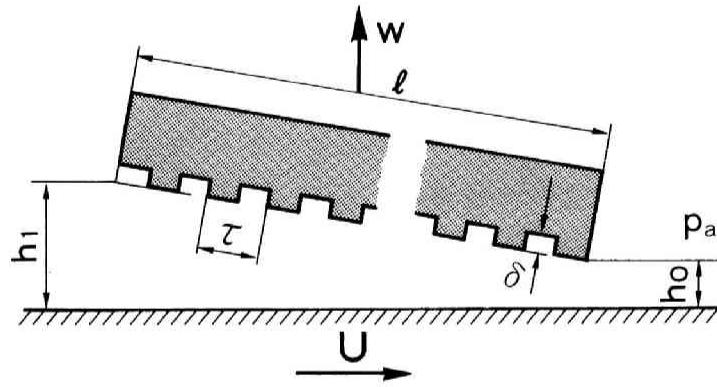


(a) 平行あらし



(b) 直交あらし

図5-2 一次元あらしをもつ無限幅フラットスライダにおける厳密解と平均すきま近似解との比較

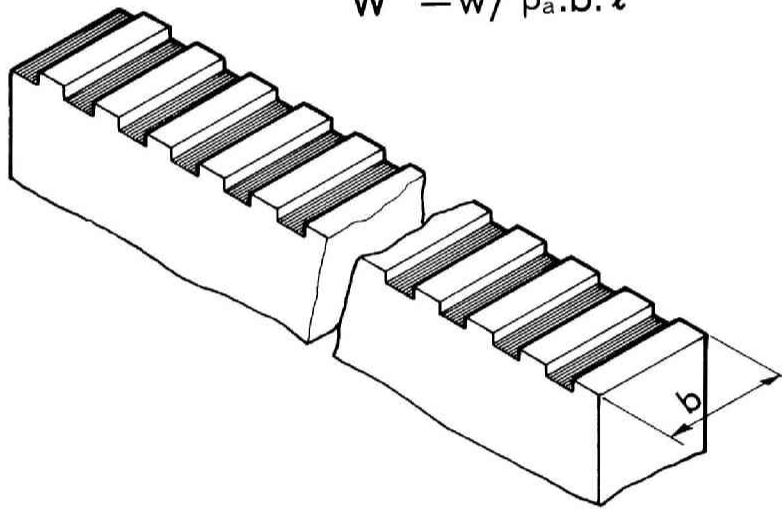


$$B = b / \ell$$

$$H1 = h_1 / h_0$$

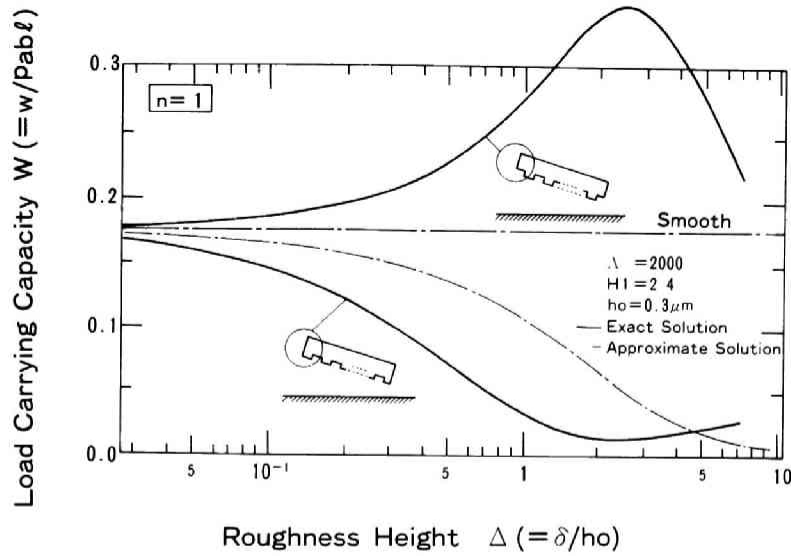
$$\Delta = \delta / h_0$$

$$W = w / p_a \cdot b \cdot \ell$$

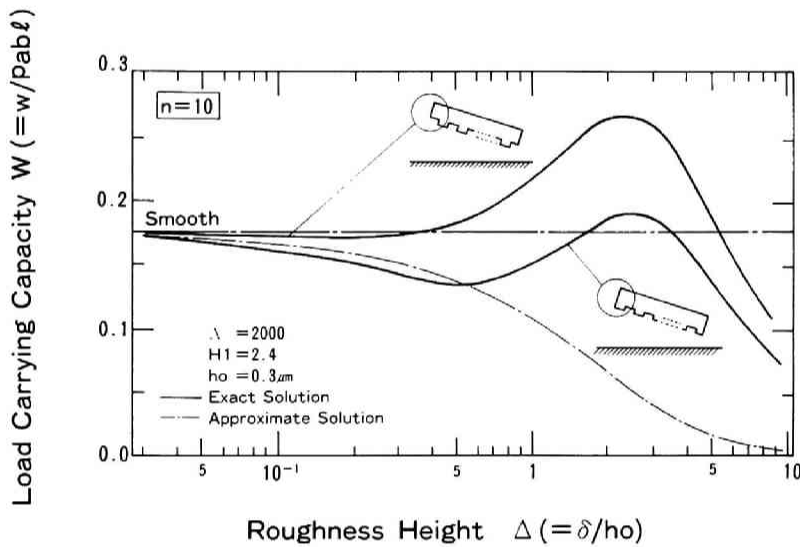


Configuration of a Slider Having Transverse Roughness (Finite Width)

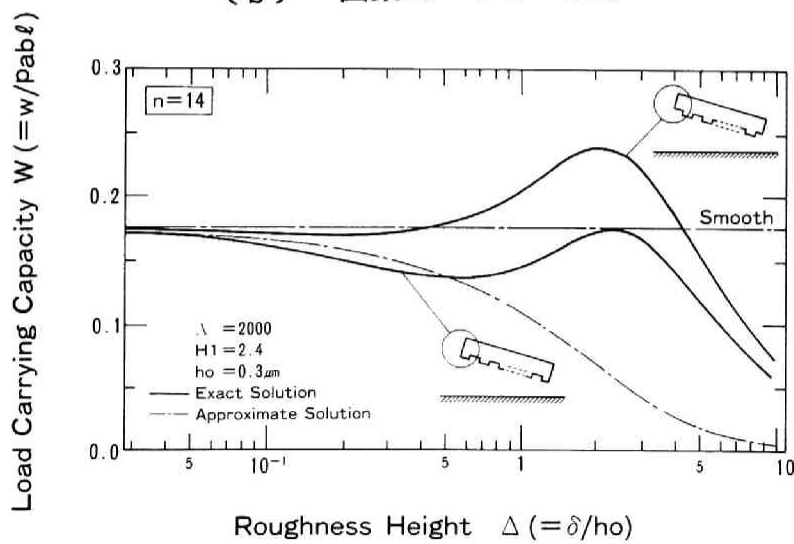
図5-3 直交あらしをもつ有限幅フラットスライダ



(a) 山数 $n=1$ の場合



(b) 山数 $n=10$ の場合



(c) 山数 $n=14$ の場合

図5-4 直交あらしをもつ有限幅フラットスライダにおけるあらし振幅と負荷容量の関係

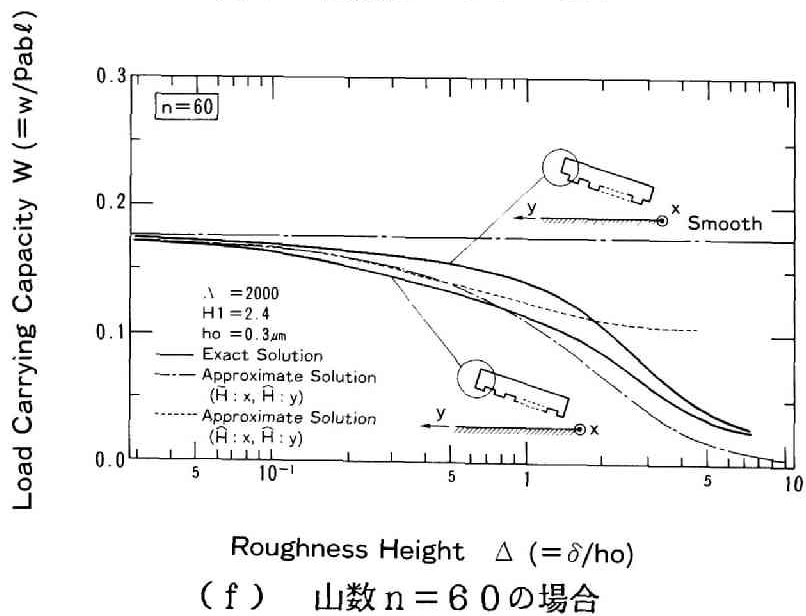
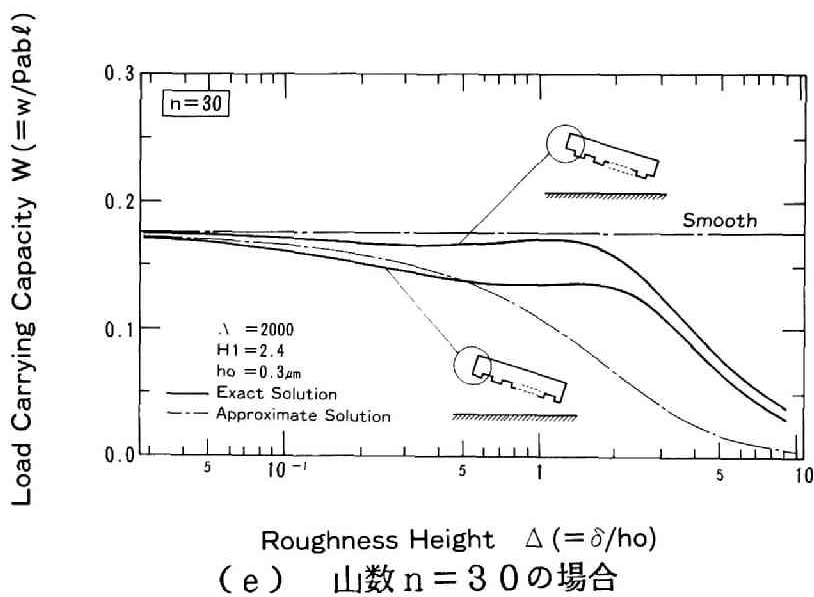
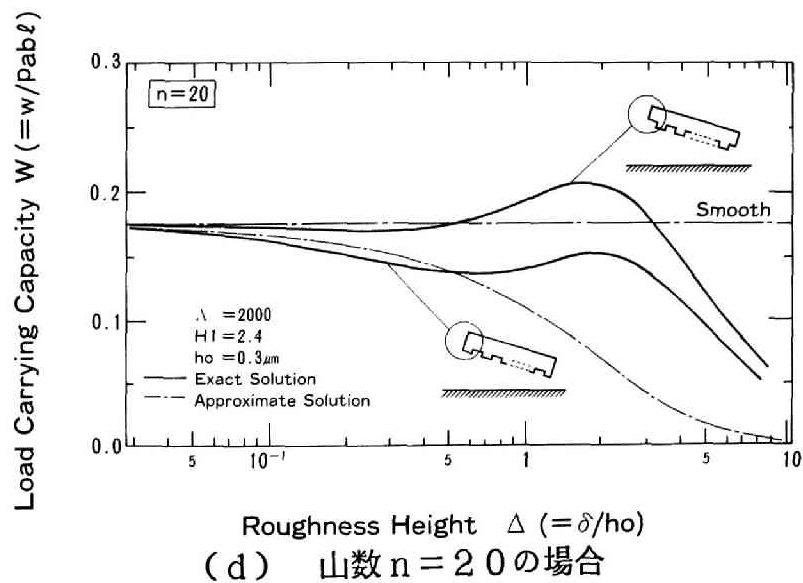


図5-4 直交あらしをもつ有限幅フラットスライダにおけるあらし振幅と負荷容量の関係

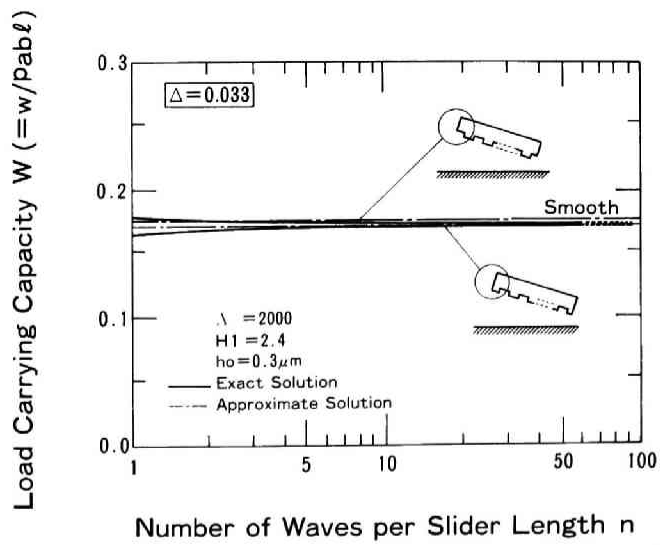
て、山数が増加するにつれて、流入端のあらさの境界条件の影響は小さくなる。平均すきま理論による近似解（スライダ長さ方向に調和平均すきまを、スライダ幅方向に算術平均すきまを用いる。）は、上記厳密解の中間的（平均的）な特性を示している。図5-4（f）に示す $n=60$ の場合で見ると、近似解はあらさ振幅 Δ が約1以上で厳密解を下回り、スライダの負荷容量を過小に評価する傾向を示すが、この傾向は図5-2（b）に示す無限幅スライダの場合の傾向と一致する。図5-4（f）には、参考のためスライダ長さ方向およびスライダ幅方向とも、調和平均すきまを用いた場合のスライダの負荷容量の特性を示した（点線で表示）が、スライダ長さ方向に調和平均すきまを、スライダ幅方向に算術平均すきまを用いた場合の結果に比べ、 $\Delta \approx 0.5$ の範囲までは、両者の差異は、ほとんど認められないが、 $\Delta \geq 0.5$ の範囲では、前者の結果が後者の結果および厳密解の結果を上回る傾向を示す。

図5-5は、山数 n を変えた時のスライダの負荷容量を、5種類のあらさ振幅 Δ の場合について計算したものである。実験条件に対応するあらさ振幅は、最大 $\Delta \approx 1$ 程度であり、この Δ の値の範囲で、十分な平均化の効果を得るためには、山数は少なくとも100程度以上必要となる。

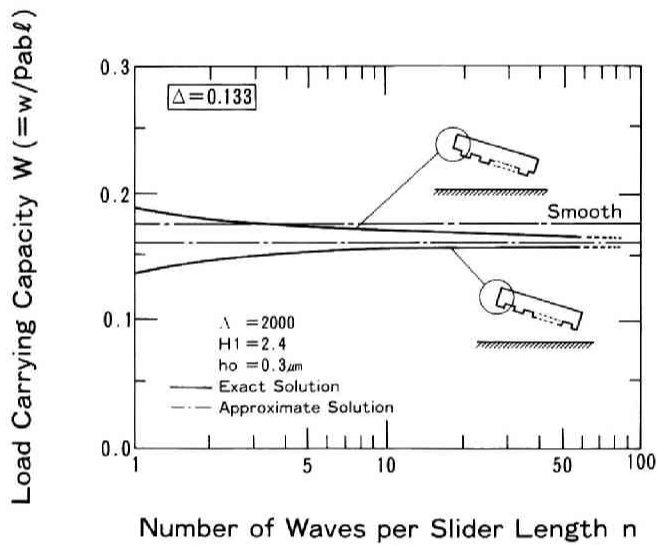
5.3 平均すきまに基づく近似解析結果と実験結果との比較

5.3.1 実験方法

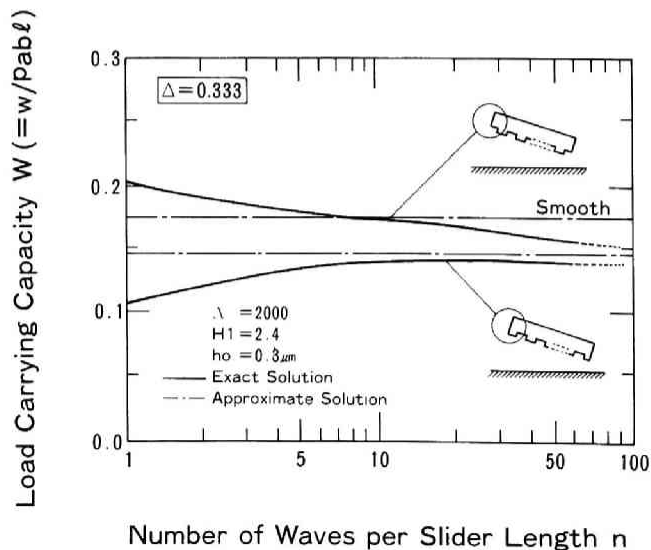
サブサブミクロンの浮上すきまで動作する浮動ヘッドスライダの浮上面など、高精度に研磨された面のあらさは、振幅が不規則に分布した場合が一般的である。しかしこのような不規則な面あらさは、本章のように、解析の妥当性を検証することを目的とした場合には、多くの実験による統計的処理を必要とすること、また意図したあらさパラメータを実現する試料の作成が困難なことなどの難点を伴い、理論の検証には、規則的に分布したあらさを用いる方が有利である。ここでは、図5-6に示すように、規則的に分布した矩形断面状の面あらさパターンを浮上面に形成した浮動ヘッドスライダを用い、実験により、理論を検証することを試みた。スライダの浮上特性に及ぼすあらさの単位数（山数）の影響が十分小さく、すきまの平均化を行うことの有効性が十分に発揮されるためには、前述



(a) 無次元あらし振幅 $\Delta = 0.033$ の場合

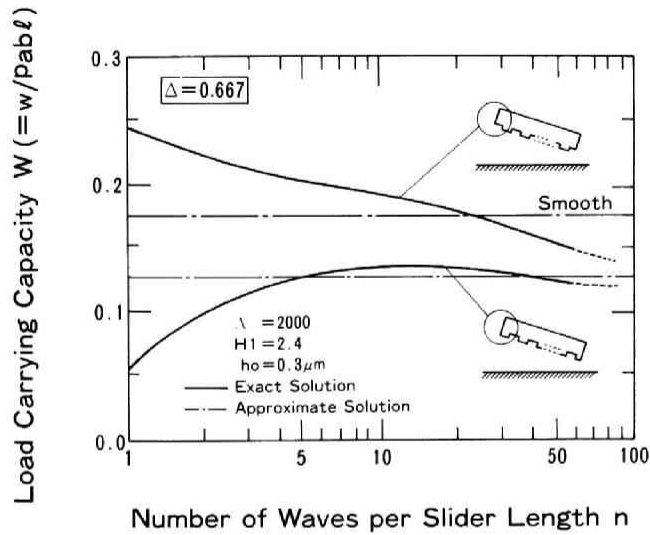


(b) 無次元あらし振幅 $\Delta = 0.133$ の場合

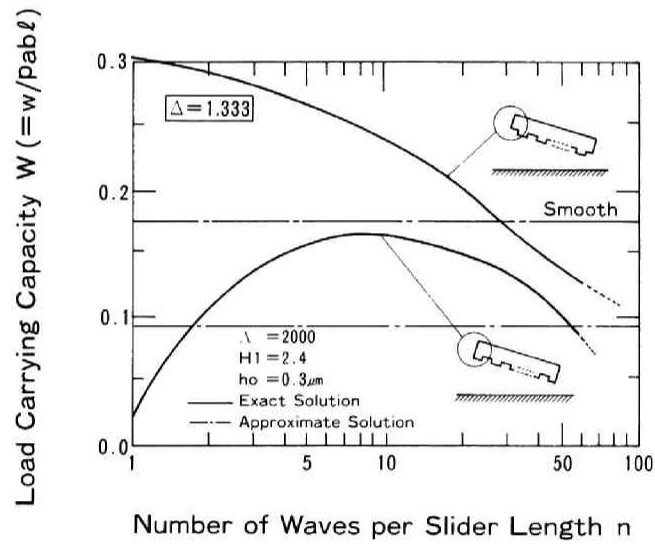


(c) 無次元あらし振幅 $\Delta = 0.333$ の場合

図5-5 直交あらしをもつ有限幅フラットスライダにおける山数と負荷容量の関係



(d) 無次元あらし振幅 $\Delta = 0.667$ の場合



(e) 無次元あらし振幅 $\Delta = 1.333$ の場合

図5-5 直交あらしをもつ有限幅フラットスライダにおける山数と負荷容量の関係

のように、スライド長さ当り、少なくとも100程度以上のあらさの単位数（山数）が必要である。ここではスライド長さ5.6mmのスライドを用いたが、図5-6に示すようなパターンを形成するとすれば、そのピッチは、50 μ m程度以下であることが必要となる。このように微細で二次元的なパターンを形成するには、機械加工では不可能であり、これにはフォトリソグラフィ技術に基づくイオンビームエッチング法が有効である。本研究ではこの手法を用いて供試スライドを作製した。

図5-7(a)、(b)、(c)に各々平行あらさ、直交あらさ、二次元格子状あらさを形成した代表的な試料（スライド）の浮上面写真および三次元表面形状測定器によって測定した表面の立体形状を示す。エッチングされた谷の部分の表面がややあれているものの、ほぼ所要のあらさパターンが形成されている。なお、あらさのピッチは各パターンとも50 μ mのものを用いた。

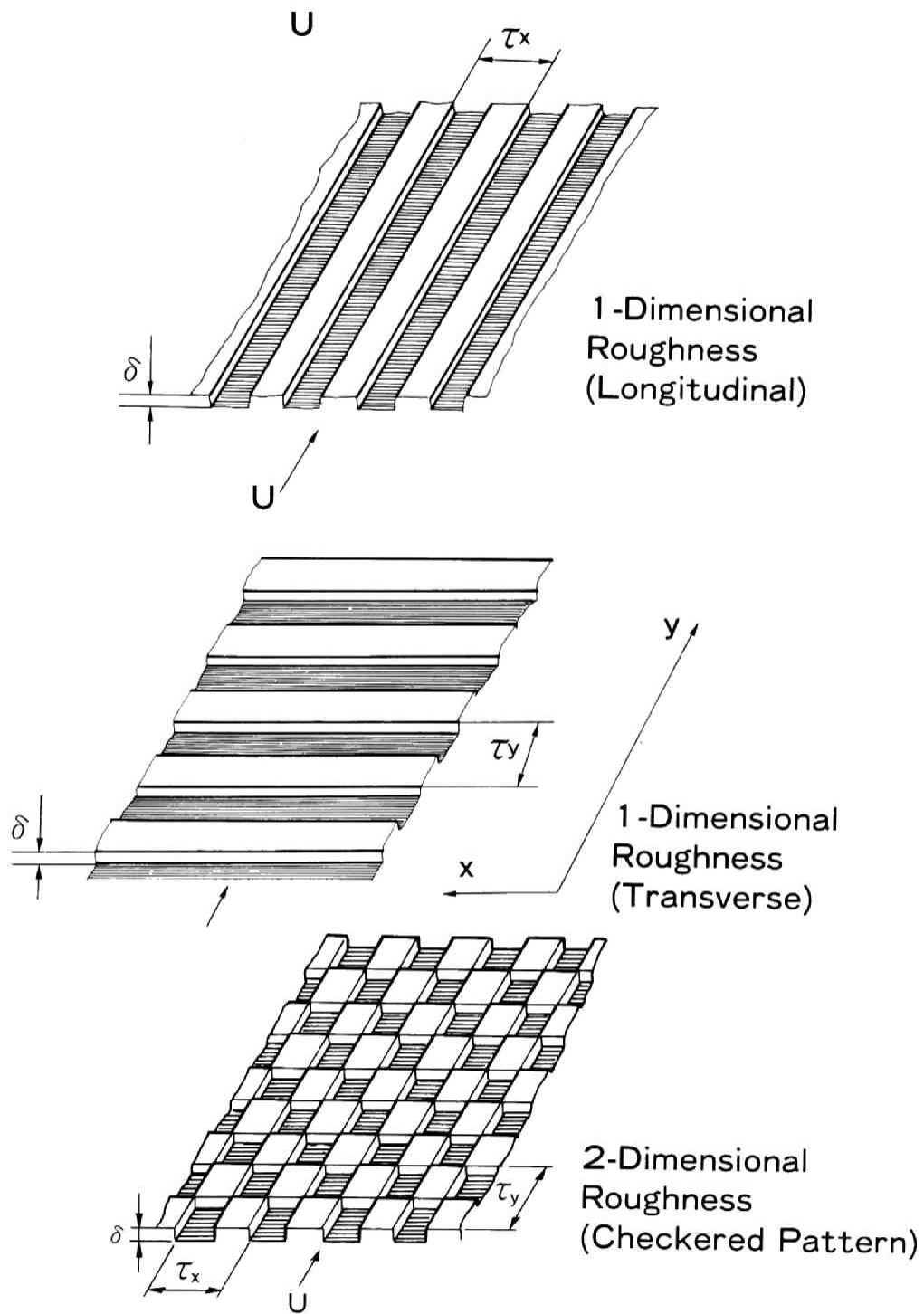
図5-8に実験系の概要を示す。浮上すきま測定には、第3章で示したレーザ干渉を利用したすきま測定系を用いることとしたが、あらさピッチが微細でありエッチング部分での光学特性が異なること、特に媒体側にあらさがある場合には、あらさピッチとスライド走行速度から決まる周波数（数100kHz）で、レーザ波長の1/4波長以上のすきまの変動を生じることとなり、上記の測定法により、直接スライド浮上面のすきまを測定することは困難である。これを解決するために、スライドのセンターレールを基準面として、ここで浮上すきまを測定し、センターレールとスライド浮上面の相対寸法を、別途精密に測定しておくことで、左右の浮上面の平均的な浮上特性を評価することとした。

図5-9、表5-1に供試スライドの諸元を示す。スライドは、基本的にはスライド長さ5.6mm、浮上面幅0.6mmのMn-Zn-フェライト製のモノリシックスライドを用い、平行あらさ、直交あらさ、二次元格子状あらさの3種類のパターンについて、2種類の水準のあらさ振幅で浮上実験を行った。

5.3.2 解析結果と実験結果の比較

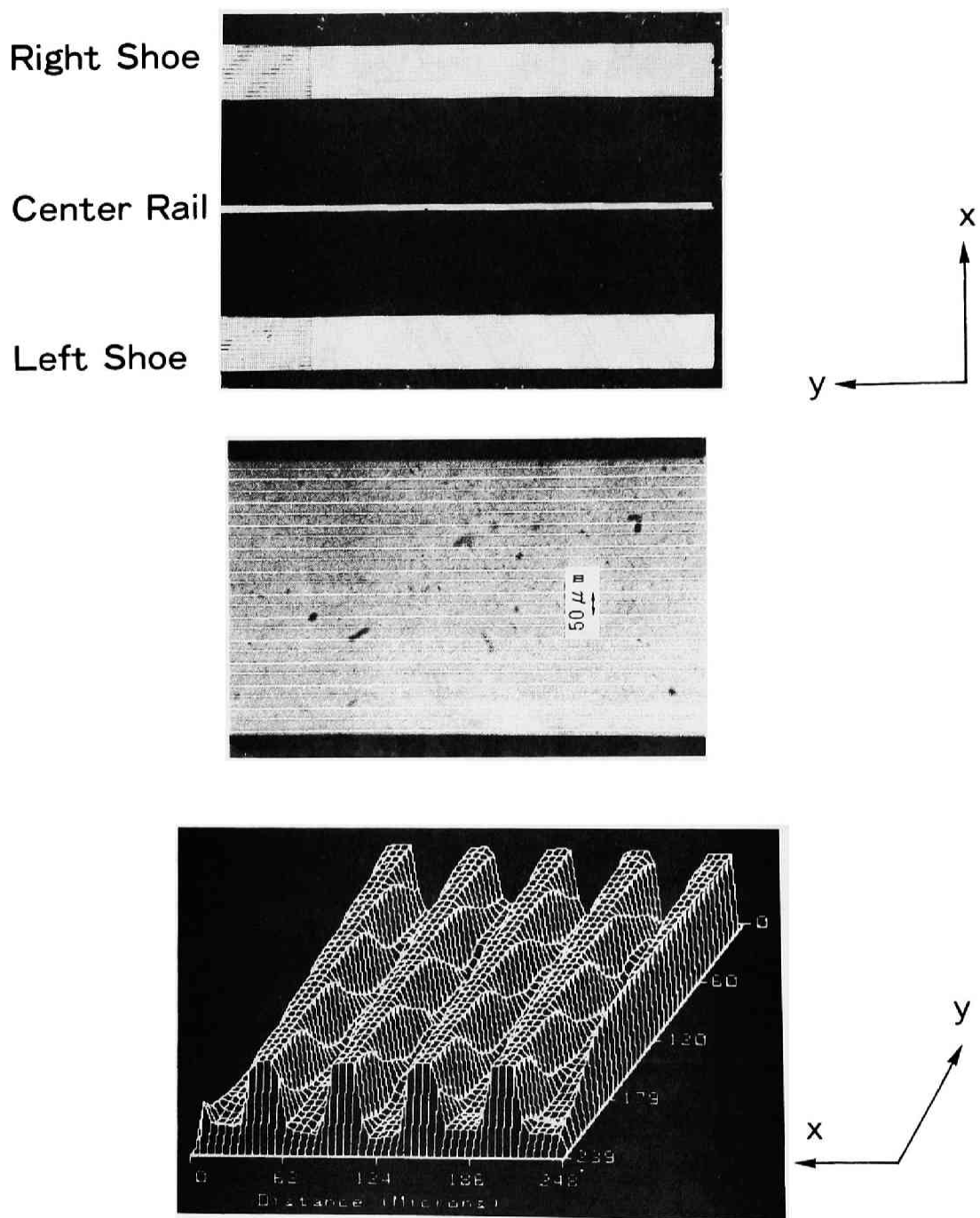
－スライド側にあらさのある場合－

二次元格子状あらさの平均すきまに基づく数値計算に当たっては、混合平均すきまを規定する算術平均すきまと調和平均すきまの混合比 α_x 、 α_y の見積りが必要になる。ここで



Roughness Model on Slider Shoes

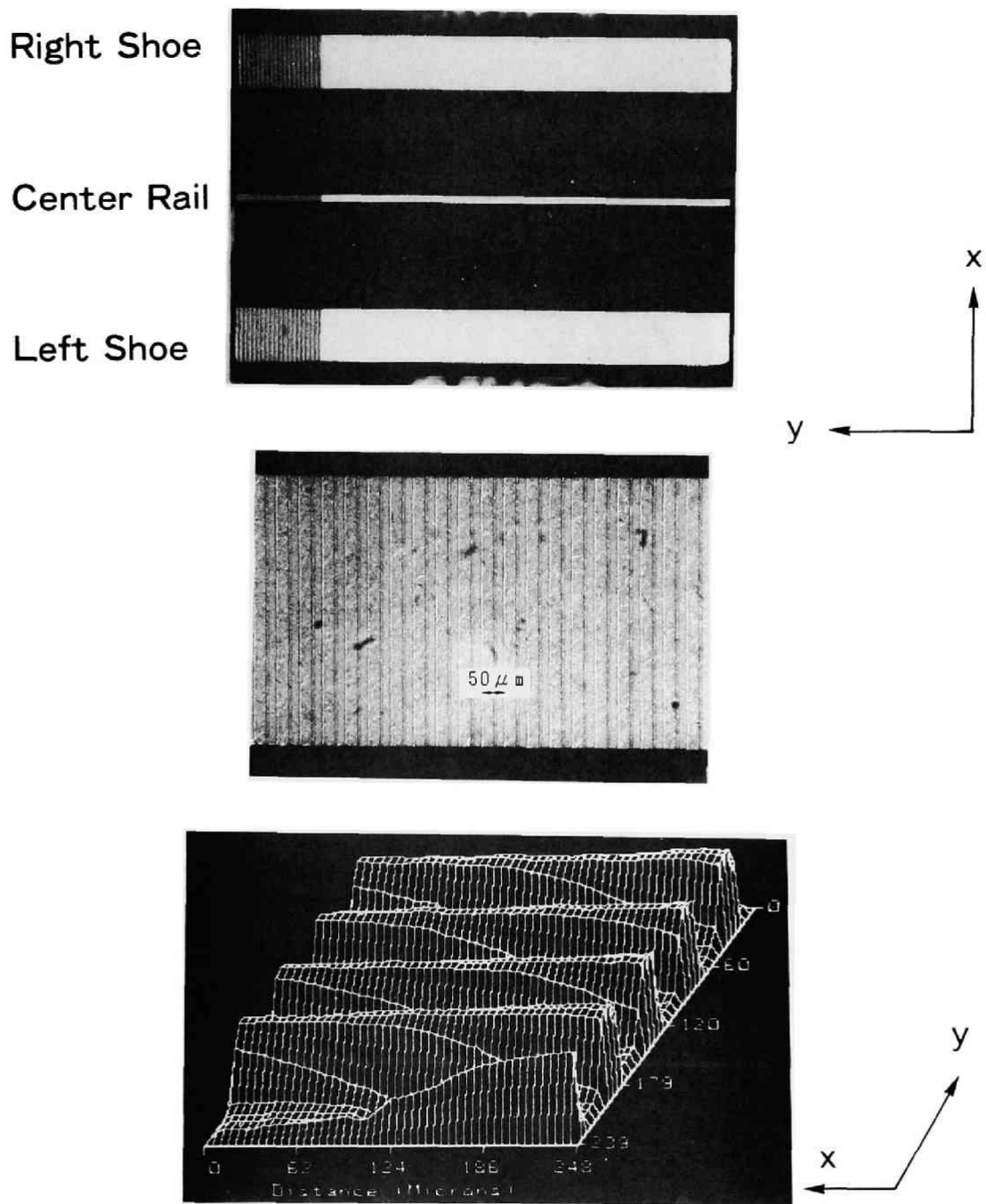
図5-6 スライダ浮上面に形成した一次元および二次元あらしモデル



Surface Configuration of Experimental Slider
(1-Dimensional Roughness : Longitudinal Pattern)

(a) 平行あらし

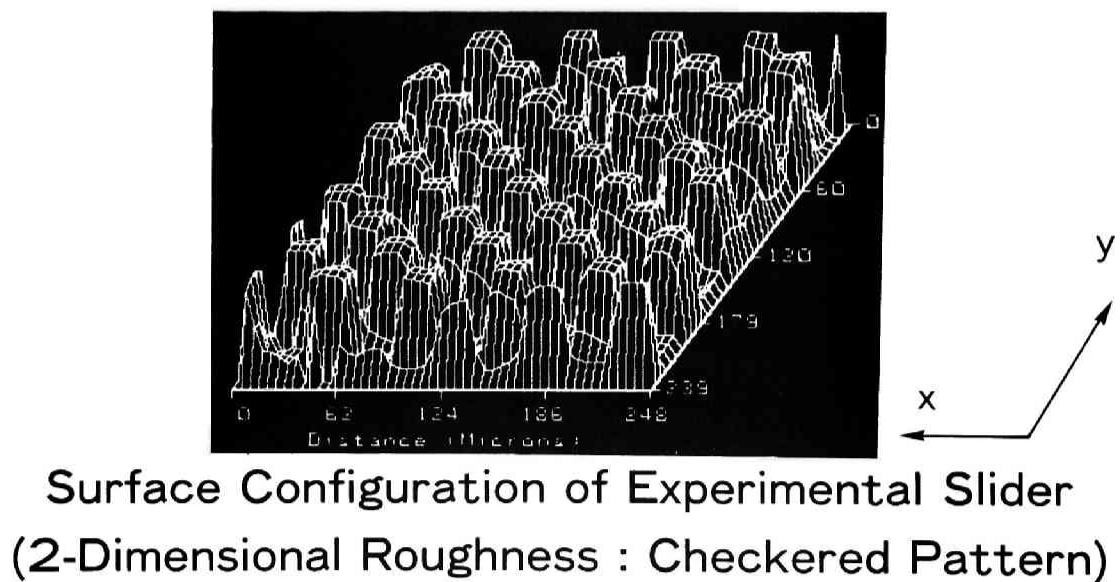
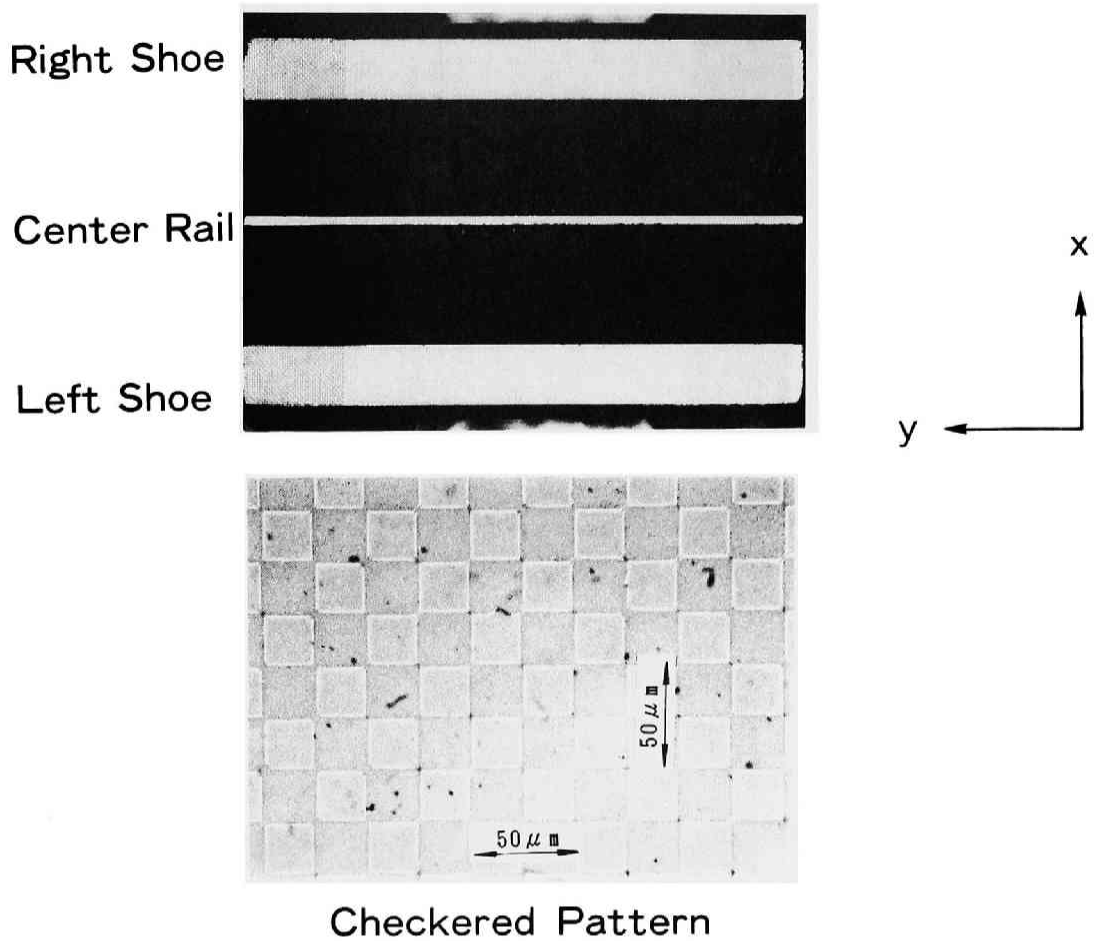
図5-7 モデルあらしを形成した浮動ヘッドスライダの浮上面形状



Surface Configuration of Experimental Slider
(1-Dimensional Roughness : Transverse Pattern)

(b) 直交あらし

図5-7 モデルあらしを形成した浮動ヘッドスライダの浮上面形状



(c) 二次元格子状あらさ

図5-7 モデルあらさを形成した浮動ヘッドスライダの浮上面形状

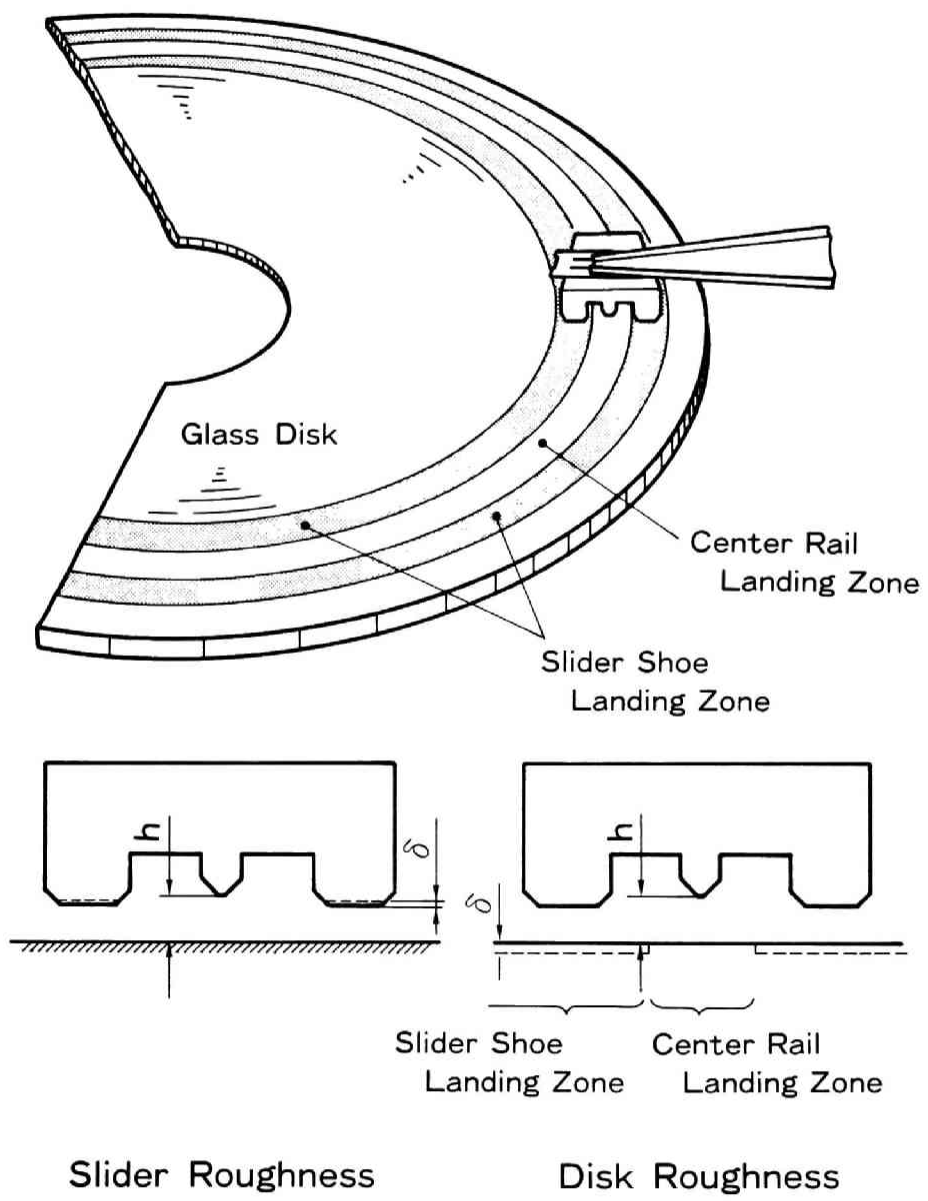


図5-8 モデルあらしを形成したスライダおよびディスクを用いた実験系の概要

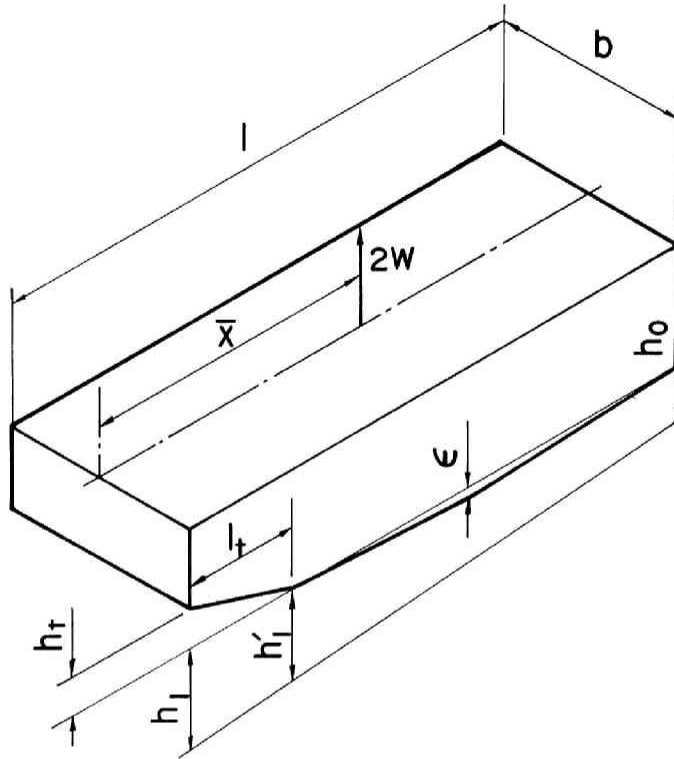


図5-9 テーパーフラットスライダ

表5-1 供試スライダの諸元

Slider No.	Roughness	Slider Dimensions								Operating Conditions	
		Slider *		Taper *		Crown	Groove		**	Pressure Center	Load
		Length	Width	Length	Height	Height	Depth	Pitch	Center Rail Recess		
		l mm	b mm	l_t mm	h_t μ m	ε μ m	δ μ m	τ_x τ_y μ m	ε_l ε_t μ m	\bar{x}	$2w$ mN
1	Longitudinal	5.593	0.608	1.06	11.0	-0.02	0.10	50	-0.020	0.545	93.0
		5.590	0.597	1.06	10.5	-0.02		—	-0.024		
2		5.567	0.599	0.96	14.5	0.018	0.20	50	-0.036		
		5.573	0.602	0.94	13.5	0.02		—	-0.010		
3	Transverse	5.595	0.600	1.00	10.3	0.01	0.097	—	-0.018	0.546	92.7
		5.594	0.599	1.04	10.4	-0.02		50	-0.026		
4		5.582	0.602	0.98	13.8	0.02	0.19	—	-0.030		
		5.583	0.599	0.98	13.8	0.018		50	-0.016		
5	2-Dimensional (Checked Pattern)	5.587	0.605	1.06	11.0	0.00	0.11	50	-0.020	0.545	89.0
		5.594	0.601	1.09	10.8	-0.02		50	-0.016		
6		5.592	0.601	0.98	14.5	0.00	0.16	50	-0.024		
		5.594	0.599	0.99	14.8	0.01		50	-0.020		
7	Smooth	5.594	0.602	0.970	9.00	-0.018	—	—	-0.010	0.547	94.6
		5.591	0.601	0.960	9.00	-0.01	—	—	-0.015		

* Upper/Lower Figure : Left Shoe/Right Shoe
 ** Upper/Lower Figure : Leading/Trailing

は、あらかの1単位内での圧縮性の影響は十分小さいと考え、図5-10に示すように、非圧縮性流体の場合の等方性格子状あらかに関して求めた混合比を用いた。同図には後述の走行面に形成した等方性矩形状突起あらか、等方性矩形溝あらかに関する混合比も併記した。二次元等方性格子状あらかに関しては、圧力流れに対する混合比 α_p 、せん断流れに対する混合比 α_s は等しく、 (\widetilde{H}^3) 、 (\widetilde{H}) の項には同じ混合比 α_x 、 α_y ($=\alpha_p=\alpha_s$)を用いることができる。なお、厳密にはスライダの浮上面の位置ごとに無次元あらか振幅 Δ が異なるため、それぞれに対応するすきま混合比を用いて計算する必要がある。しかし、二次元等方性格子状あらかの場合には、本実験条件に相当する無次元あらか振幅 $\Delta \leq 1$ 程度の範囲では、 α の値は、 $\alpha = 0.5 \sim 0.58$ の間を変化する程度で、ほぼ一定とみなせるため、本章では、スライダ浮上面のフラット部の中央位置における無次元あらか振幅に対応する混合比の値を用いて、全浮上面の混合比を代表させて計算を行った。なお、一次元あらかに関して、平行あらかの場合には、スライダ長さ方向の混合比に $\alpha_y = 0$ (算術平均あらか)、スライダ幅方向の混合比に $\alpha_x = 1$ (調和平均)を、直交あらかの場合には、スライダ長さ方向の混合比に $\alpha_y = 1$ 、スライダ幅方向の混合比に $\alpha_x = 0$ を用いて、混合平均すきまとして計算した。

スライダ走行速度に対する浮上すきまの関係を、図5-11 (平行あらか)、図5-12 (直交あらか)、図5-13 (二次元格子状あらか)に示す。概して、一次元あらか、二次元あらかとも、実験結果は混合平均すきまに基づく近似解析結果によく一致しており、本章で用いた平均すきまの手法が有効であることを示している。図5-11 (b)、図5-13 (b)など、近似解析結果と実験結果との間にやや差異があるものもあるが、これらの差異が必ずしも浮上すきま (もしくは無次元あらか振幅) の変化に対応して変化していないことから、これらは近似精度の不足によるものではなく、荷重、支持点位置などの別の要因による誤差のためと考えられる。

図5-11~図5-13の一部には、参考までに、 $\alpha_y = \alpha_x = 1$ (調和平均すきま: 一点鎖線)、 $\alpha_y = \alpha_x = 0$ (算術平均すきま: 二点鎖線)を用いた結果を併記した。一次元あらか、二次元あらかを有するスライダによる実験結果は、ほぼ調和平均すきま、算術平均すきまを用いて解析した結果の中間的な浮上特性となっていることが分かる。なお一次元あらかについてみると、平行あらかでは、混合平均すきまによる計算結果および実験結果とも、調和平均すきまの計算結果に近く、一方、直交あらかでは算術平均すきまの計算結果に近い。このことは、スライダ幅方向に適用する平均すきまが、面あらかを有するス

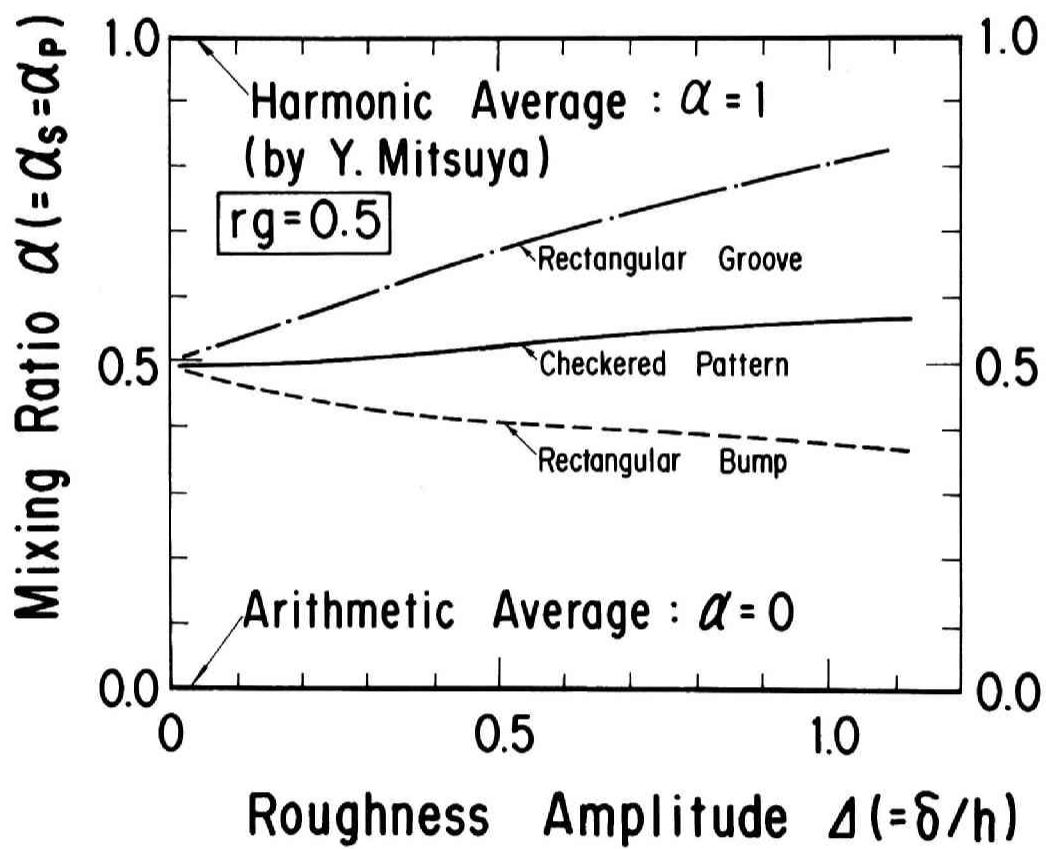
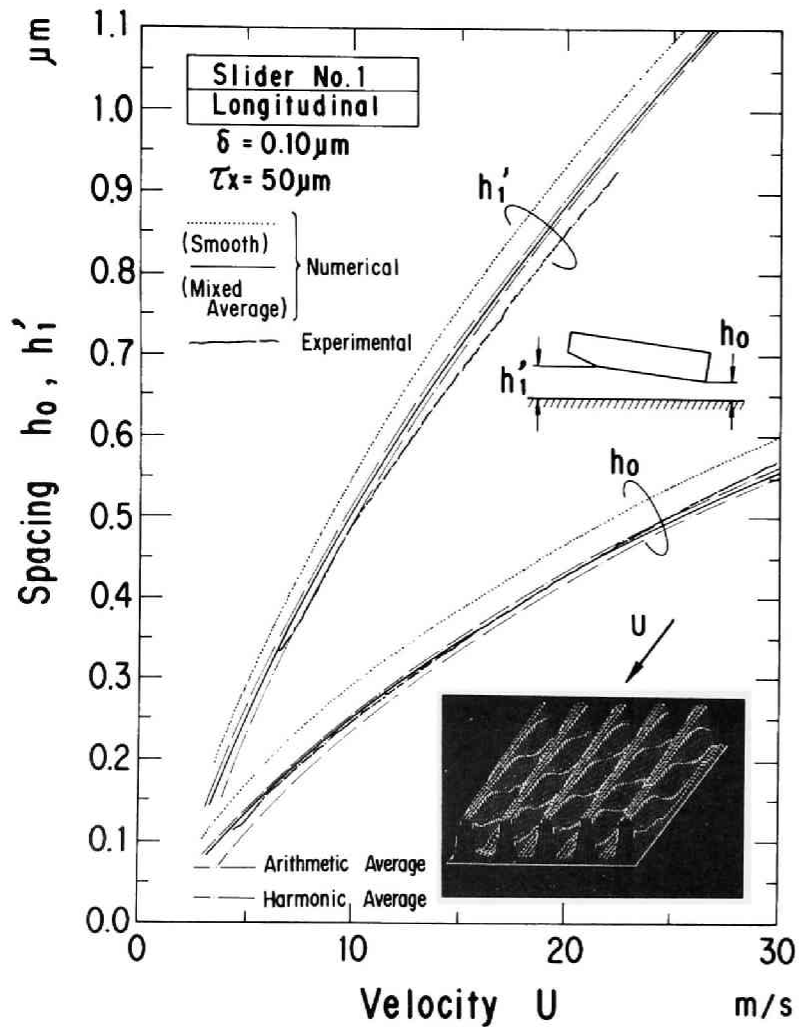
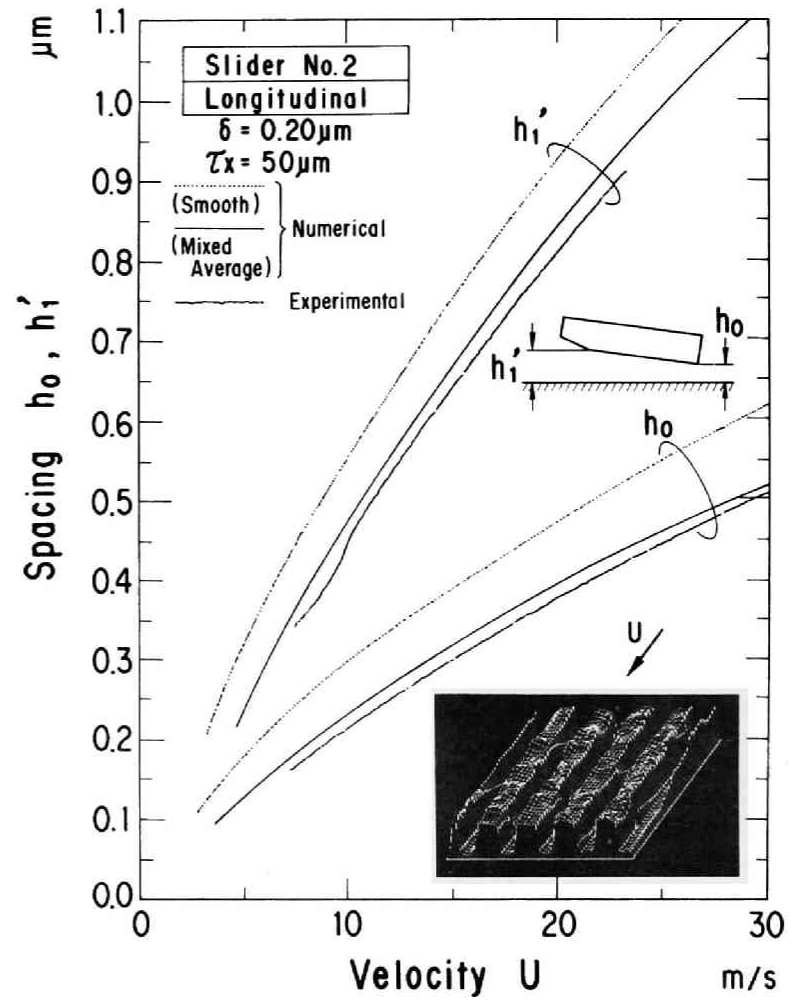


図5-10 二次元あらしにおける算術平均と調和平均の混合比と無次元あらし振幅との関係

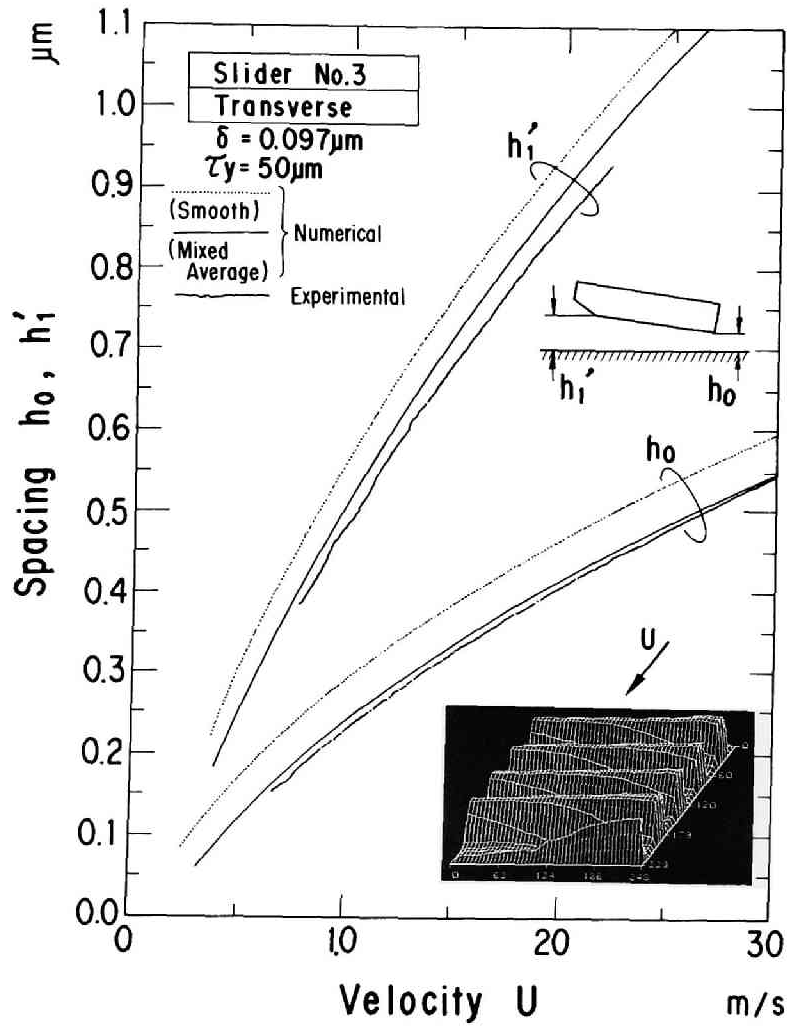


(a) スライダNo. 1

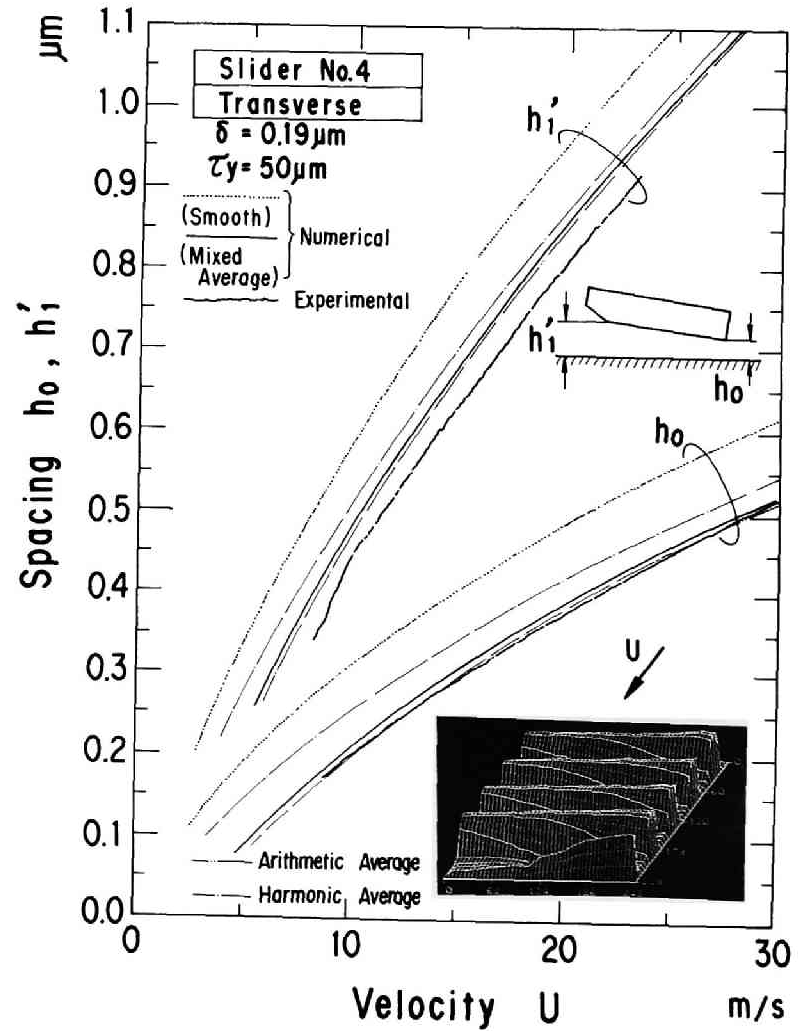


(b) スライダNo. 2

図5-11 平行あらしをもつスライダでの結果

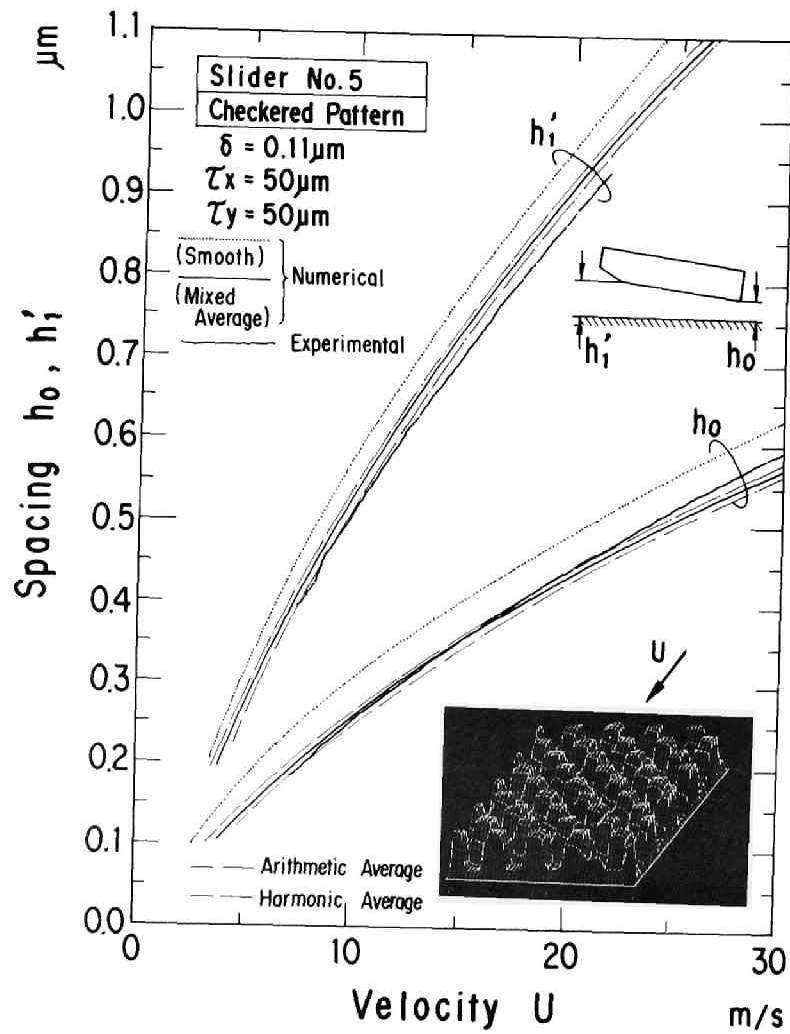


(a) スライダNo. 3

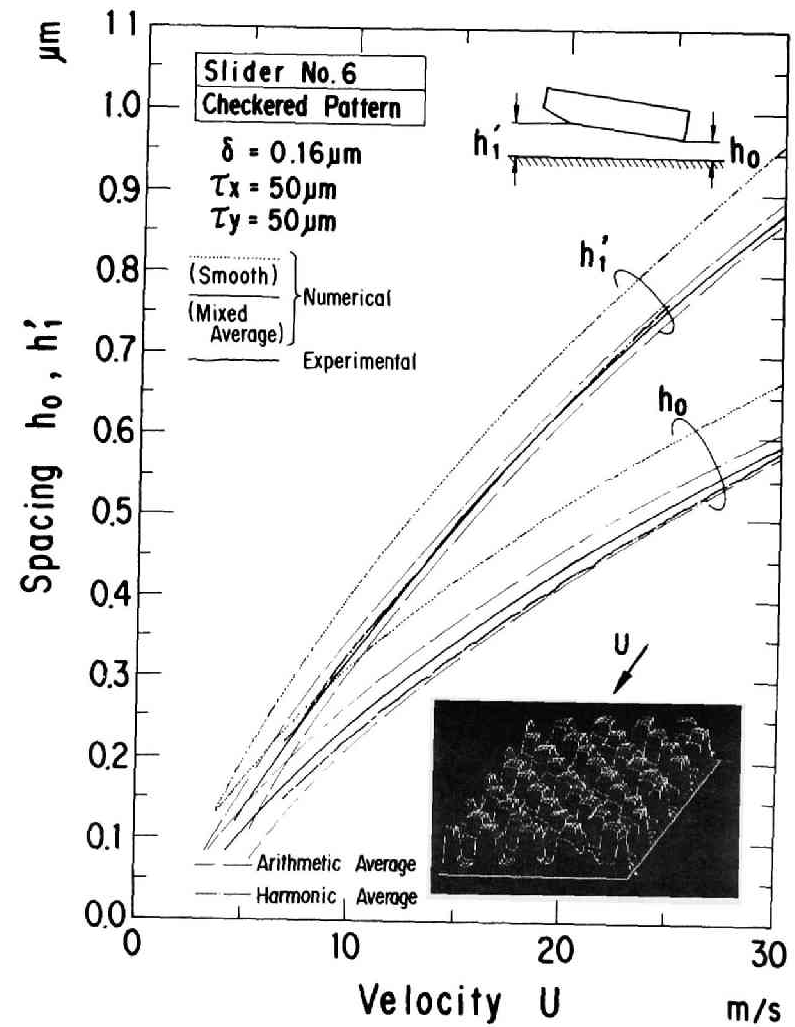


(b) スライダNo. 4

図5-12 直交あらしをもつスライダでの結果



(a) スライダNo. 5



(b) スライダNo. 6

図5-13 二次元格子状あらさをもつスライダでの結果

ライダの浮上特性に支配的に影響していることを示している。

図5-14は浮上すきまの測定法として、直接スライダ浮上面の干渉色を判読する方法（白色光干渉法）を用いた場合の浮上すきまの測定結果と近似解析結果とを比較したものである。供試スライダの諸元等を、表5-2に示す。特に、図5-14(b)、(c)は、あらさ振幅が比較的大きい場合の結果である。本測定法は、レーザ干渉法に比べ、測定分解能が低く、実験点のばらつきも大きいですが、一次元あらさ（直交あらさ）、二次元あらさの場合とも、混合平均すきまによる近似解析結果とよく一致している。特に二次元等方性格子状あらさの場合には、一次元平行あらさの特性と直交あらさの特性のほぼ中間的な特性を示していることが、十分確認できる。

5. 3. 3 解析結果と実験結果の比較

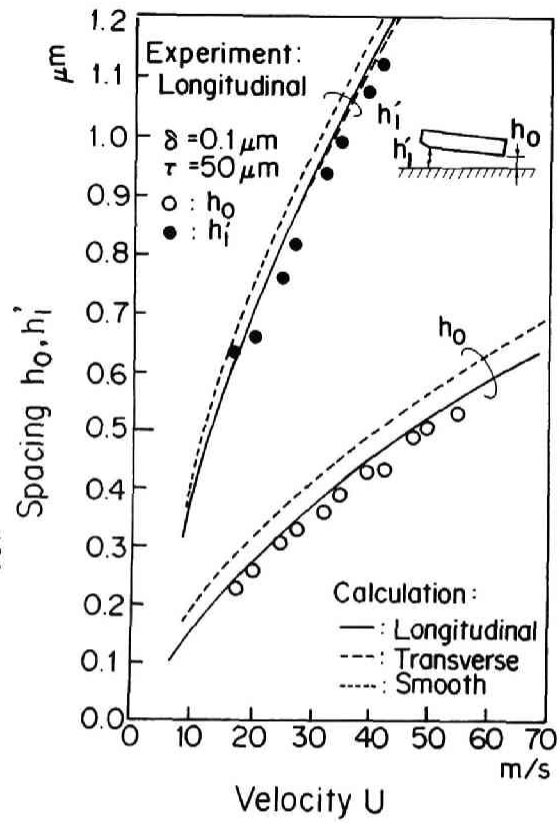
—媒体側にあらさのある場合—

媒体側にあらさがある場合のスライダ浮上特性を解析するためには、厳密にはすきまが時間とともに変化する非定常問題となるため、時間項を考慮した修正レイノルズ方程式を直接解析する必要があるが、規則的なあらさの場合には、あらさが1ピッチ移動する間の平均量を考えた準定常的な扱いが可能である。三矢は走行面にあらさがある場合についての平均化レイノルズ方程式を定式化し、スライダ走行面に一次元の正弦波状のあらさがある場合と、スライダ浮上面側に同じあらさがある場合とで、負荷容量の比較を行った[509]。一般的には、走行面にあらさがある場合の方が、スライダ浮上面にあらさがある場合に比べ、負荷容量は小さくなる。その差異は、あらさ振幅が大きいほど、また走行速度が大きいほど顕著となるが、例えば、本供試スライダの諸元に近いスライダ長さ4mm、荷重約10grfの一般的なテーパフラットスライダを対象にした場合、走行速度 $U = 8 \sim 30 \text{ m/s}$ 、無次元あらさ振幅 $\Delta = 0.3 \sim 1$ 程度の範囲では、あらさが走行することのみによる差異は、負荷容量でたかだか数%であり、浮上すきまの差異に換算すれば、測定分解能に近いオーダと見積られる。そこで、本章では、走行面にあらさがある場合の実験結果と、前節で用いたスライダ浮上面側にあらさがある場合の混合平均すきまの近似解とを、そのまま比較をすることで、走行面のあらさがスライダの浮上特性に及ぼす影響を検証することとした。

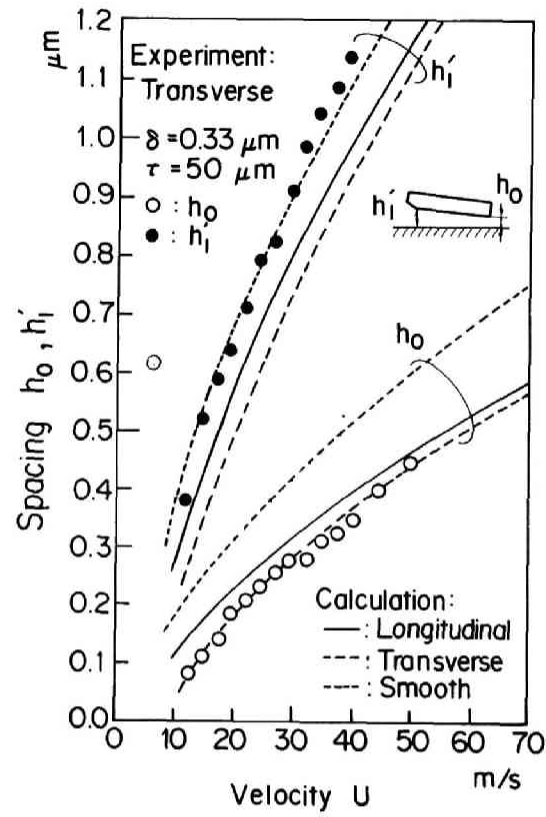
表5-2 供試スライダ諸元(Ⅱ)

Roughness	Slider Dimensions							Operating Conditions	
	Slider		Taper		Crown	Groove		Pressure	Load
	Length	Width	Length	Height	Height	Depth	Pitch	center	
	l mm	b mm	l_f mm	h_f μm	ϵ μm	σ μm	τ μm	x	2w mN
Longitudinal	5.52	0.493	0.950	8.5	-0.04	0.1	50	0.557	89
	5.52	0.488	0.975	8.0	-0.05				
Transverse	5.52	0.476	1.020	10.5	-0.05	0.33	50	0.552	78
	5.52	0.473	1.020	10.5	-0.06				
Checked Pattern	5.54	0.513	1.010	10.0	-0.16	0.38	100	0.552	89
	5.54	0.514	0.940	10.0	-0.16				

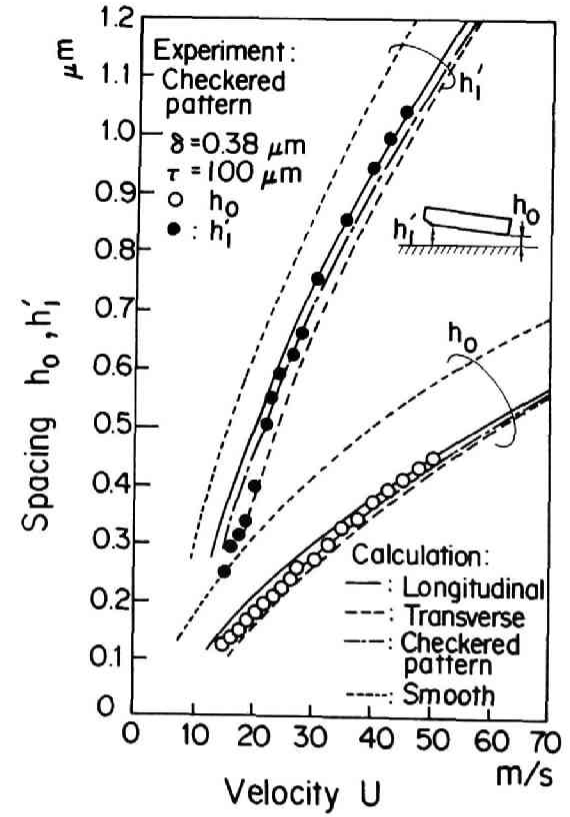
(Upper figure: Right shoe : Lower figure: Left shoe)



(a) 平行あらし



(b) 直交あらし



(c) 二次元格子状あらし

図5-14 一次元および二次元あらしをもつスライダでの結果
(白色法干渉法を用いた測定結果)

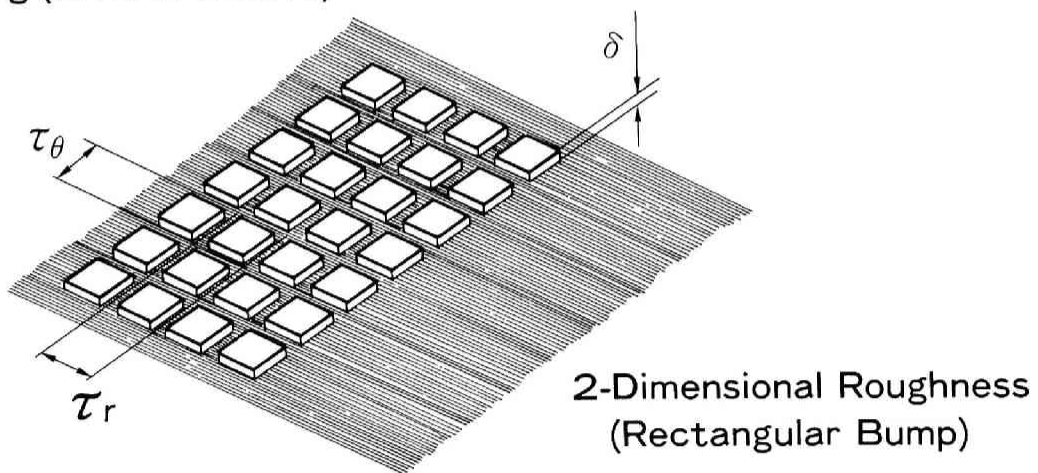
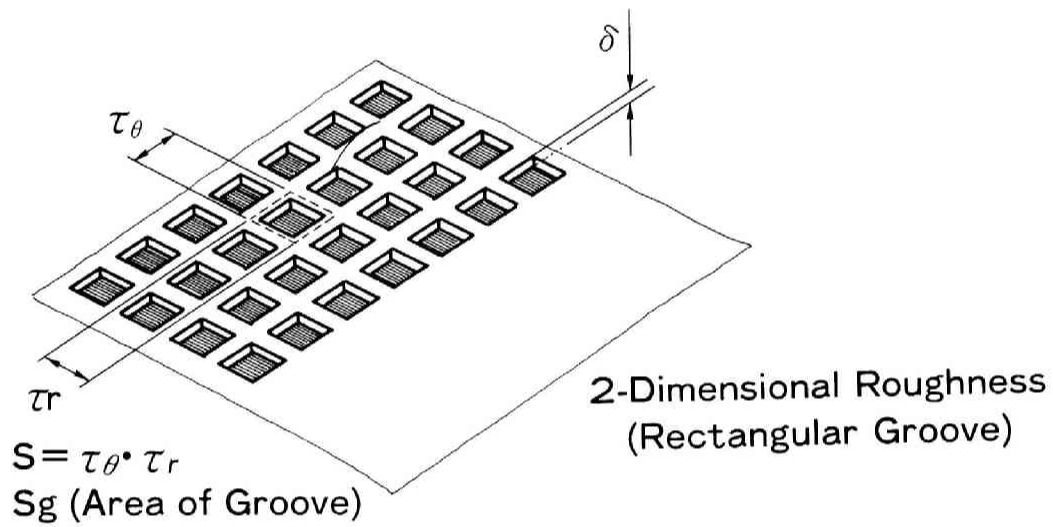
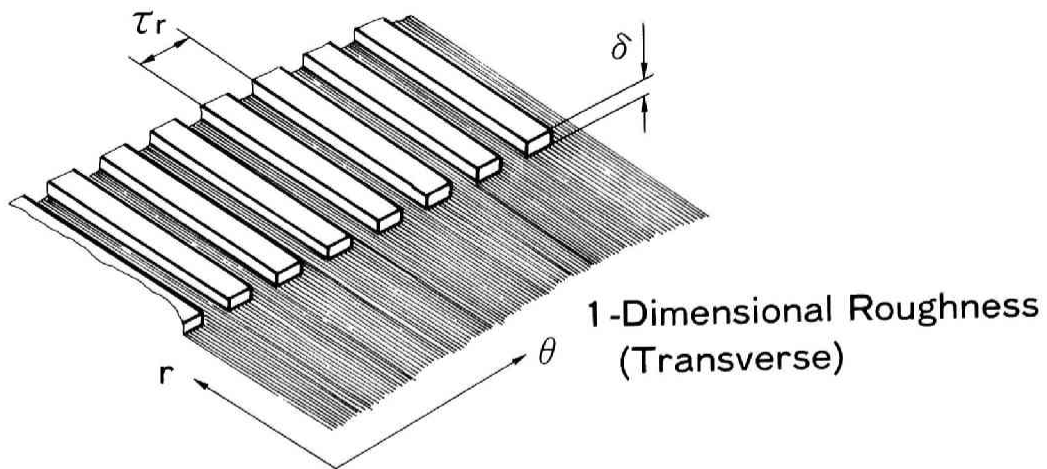
図5-15は走行面に形成した規則的な面あらしのパターンを示す。ここでは、一次元直交あらし（スライダ浮上面に形成したものと同一）、二次元矩形状溝あらし、二次元矩形状突起あらしの3種のパターンを用いた。図5-16に走行面の形状写真および三次元形状測定器によって測定した微細な表面形状を示す。表5-3には供試ディスクのあらしの諸元を示す。パターンは厳密には扇状となっており、ディスク内周側と外周側ではピッチが若干異なるが、ここではセンタール・ランディングゾーン近傍の値を代表値として示した。

図5-17に浮上すきまの実験結果と、比較のため、スライダ浮上面側にあらしのある場合の混合平均すきまによる近似計算結果とを対比して示す。なお、混合平均すきまを用いる時の算術平均すきまと調和平均すきまの混合比 α_x 、 α_y に関しては、やはり図5-10に示す混合比を用いてスライダの浮上特性を計算した。二次元の矩形状突起あらし、矩形状溝あらしの場合には、二次元格子状あらしの場合に比べて、無次元あらし振幅 Δ の変化に対する混合比の変化量は相対的に大きくなる。しかし、本章の実験範囲での無次元あらし振幅に対応する混合比の変化分程度では、スライダの浮上特性に及ぼす影響は小さいとみて、やはりスライダフラット部中央での無次元あらしに対応する混合比で、スライダ浮上面全体の混合比を代表させて計算した。

実験結果と近似計算結果はよく一致しており、本実験範囲でのスライダ走行速度、面あらし振幅程度では、あらしが走行することによる影響はほとんど認められない。特に、走行面側にあらしがある場合には、同一スライダによって、あらしのある場合とない場合との浮上特性を直接比較できるので、スライダ形状誤差、荷重誤差、支持点位置誤差などの影響を相殺でき、あらしのみの影響を比較的正確に評価することができる。3種類のあらしの結果とも走行速度が増加するにつれて、近似解を若干上回る傾向を示しており、特に5-17(a)に示す一次元あらしの場合には、それがやや顕著であるが、これは、あらしのない場合の実験結果と計算結果にも同様の傾向が現れており、あらしのない場合の差異をそのまま反映したためと考えられる。

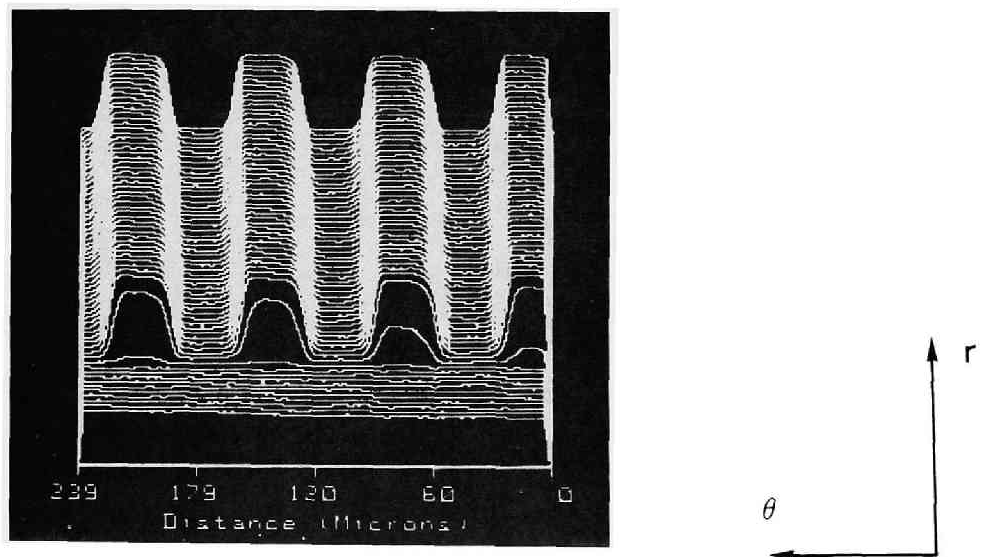
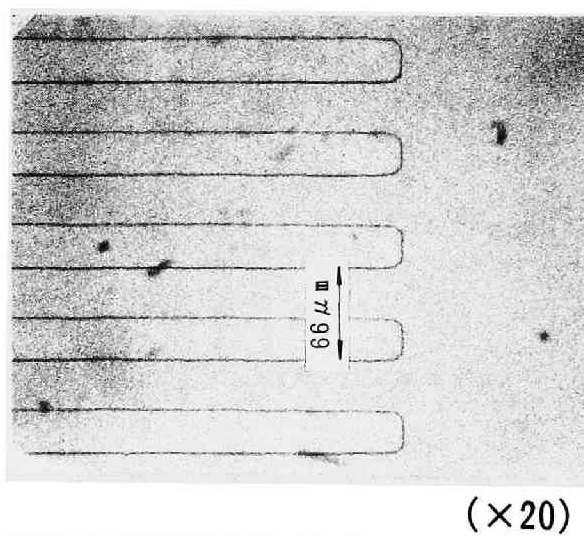
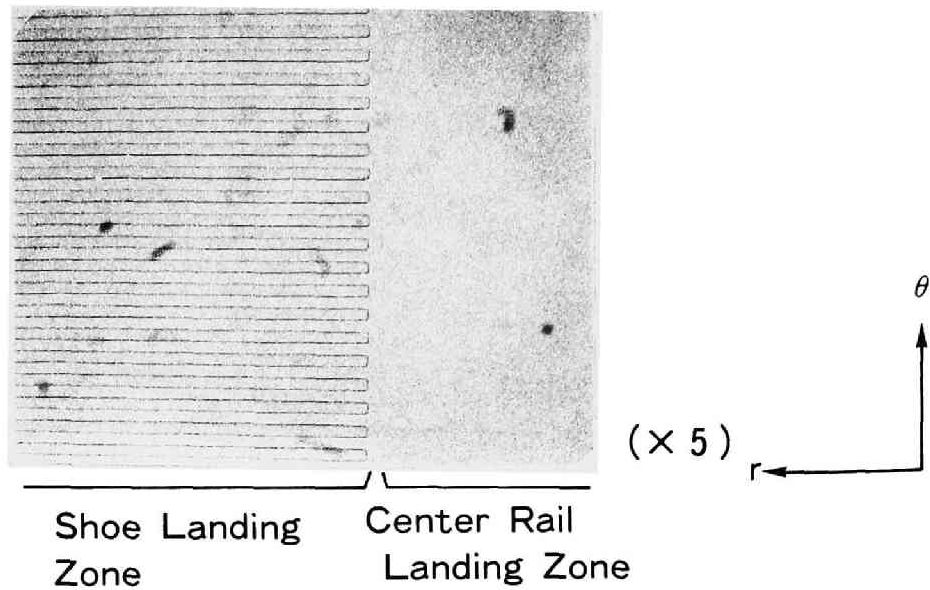
5.4 結 論

本章では、まず矩形状断面の一次元あらしを有する無限幅平面スライダ、有限幅平面ス



Roughness Model on Glass Disk Surfaces

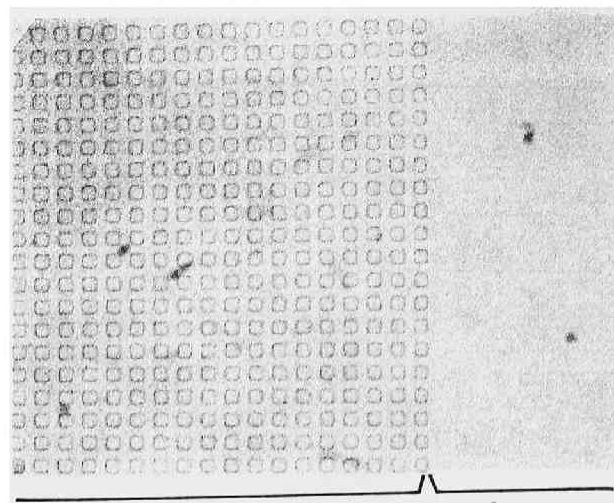
図5-15 ディスク面に形成した一次元および二次元あらしモデル



Surface Configuration of Experimental Disk (1-Dimensional Roughness : Transverse Pattern)

(a) 直交あらし

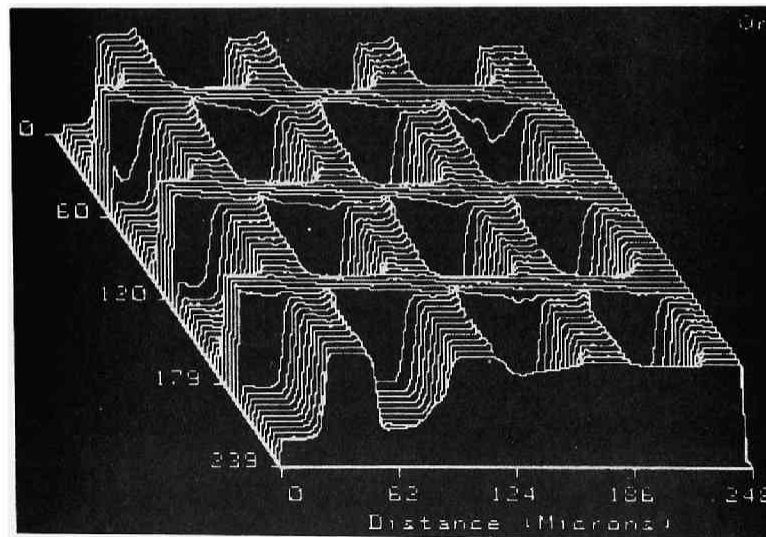
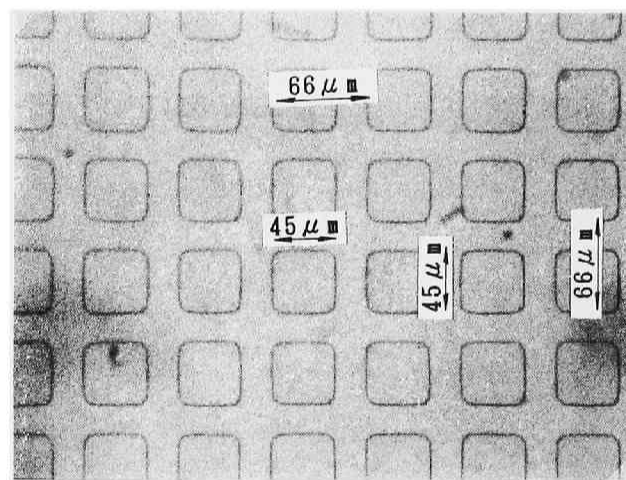
図5-16 モデルあらしを形成したガラスディスク面形状



Shoe Landing Zone

Center Rail Landing Zone

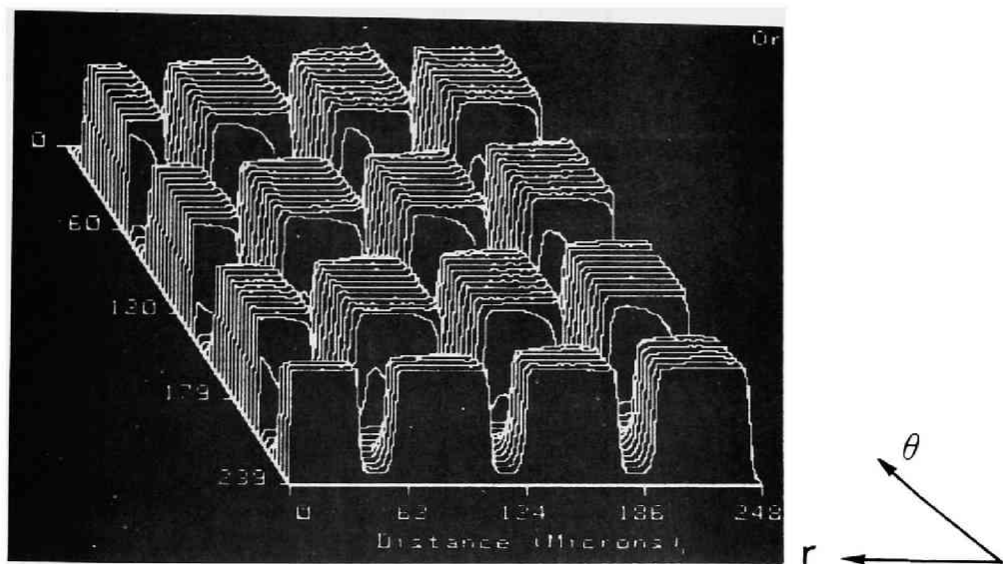
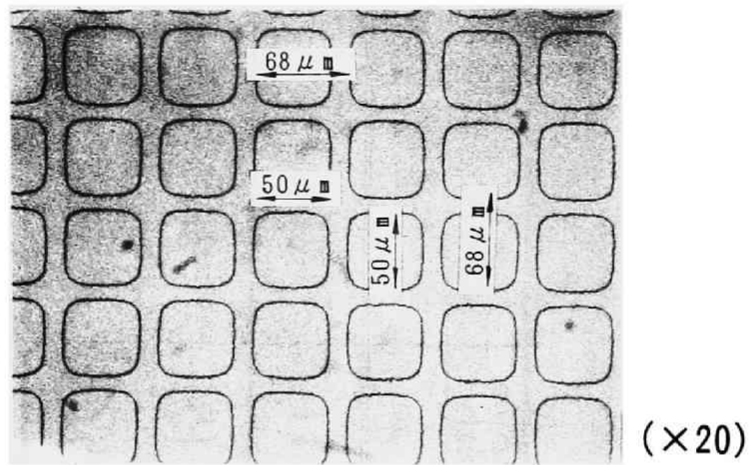
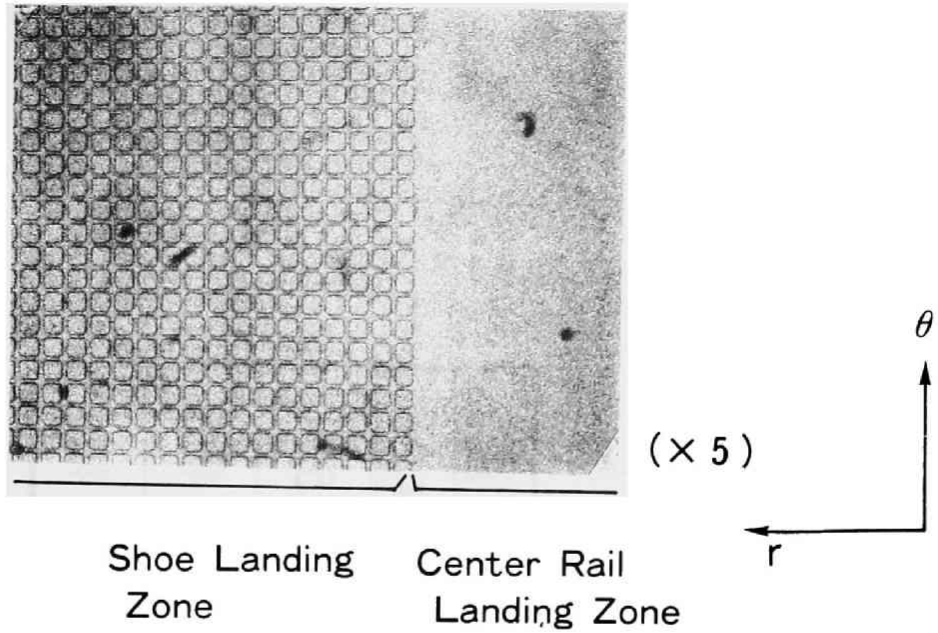
(x5)



Surface Configuration of Experimental Disk (2-Dimensional Roughness : Rectangular Groove Pattern)

(b) 二次元矩形状溝あらし

図5-16 モデルあらしを形成したガラスディスク面形状



**Surface Configuration of Experimental Disk
(2-Dimensional Roughness : Rectangular Bump Pattern)**

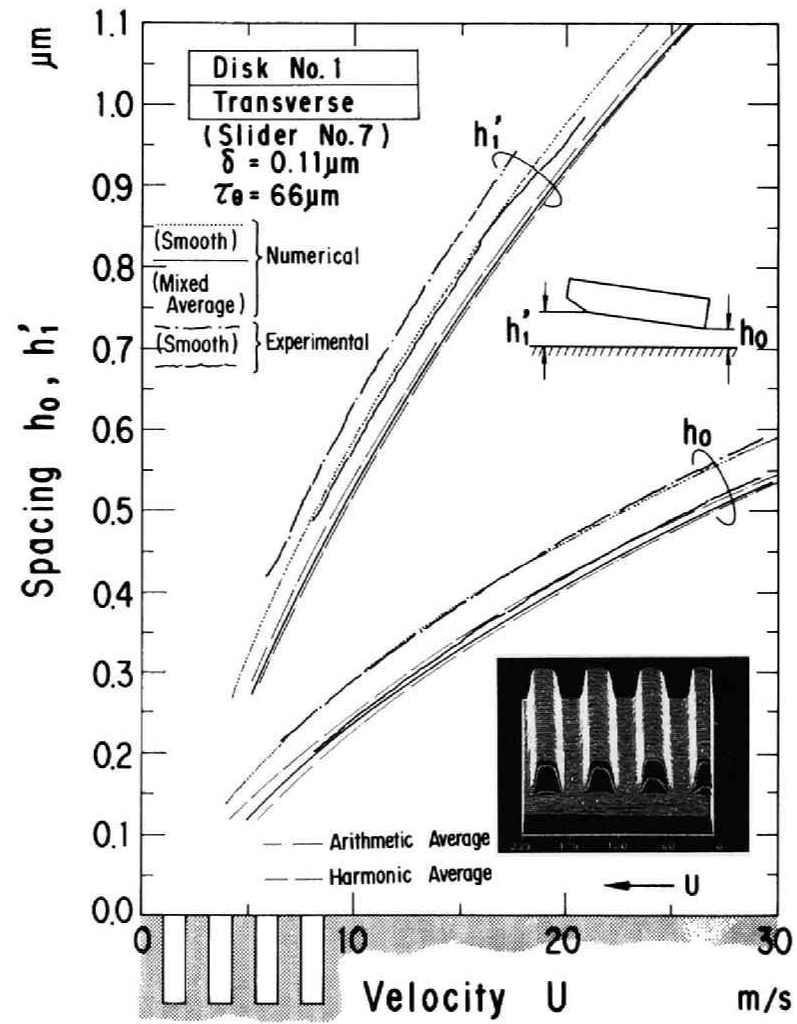
(c) 二次元矩形状突起あらし

図5-16 モデルあらしを形成したガラスディスク面形状

表5-3 供試ディスクの諸元

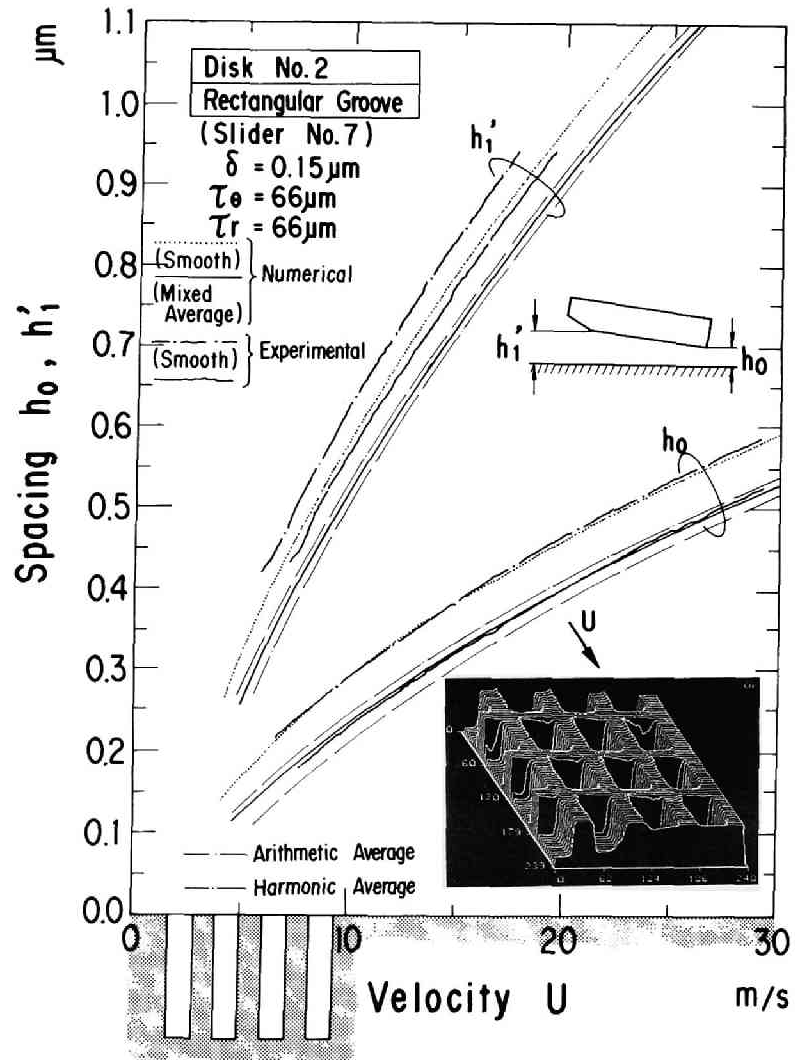
Disk No.	Roughness	Groove Depth	Groove Pitch		Groove Area Ratio
		δ μm	τ_{θ} * μm	τ_r * μm	Sg/S
1	Transverse	0.11	66	—	0.5
2	2-Dimensional (Rectangular Groove)	0.15	66	66	0.465
3	2-Dimensional (Rectangular Bump)	0.15	68	68	0.459

(* θ : Circumferential, r : Radial)

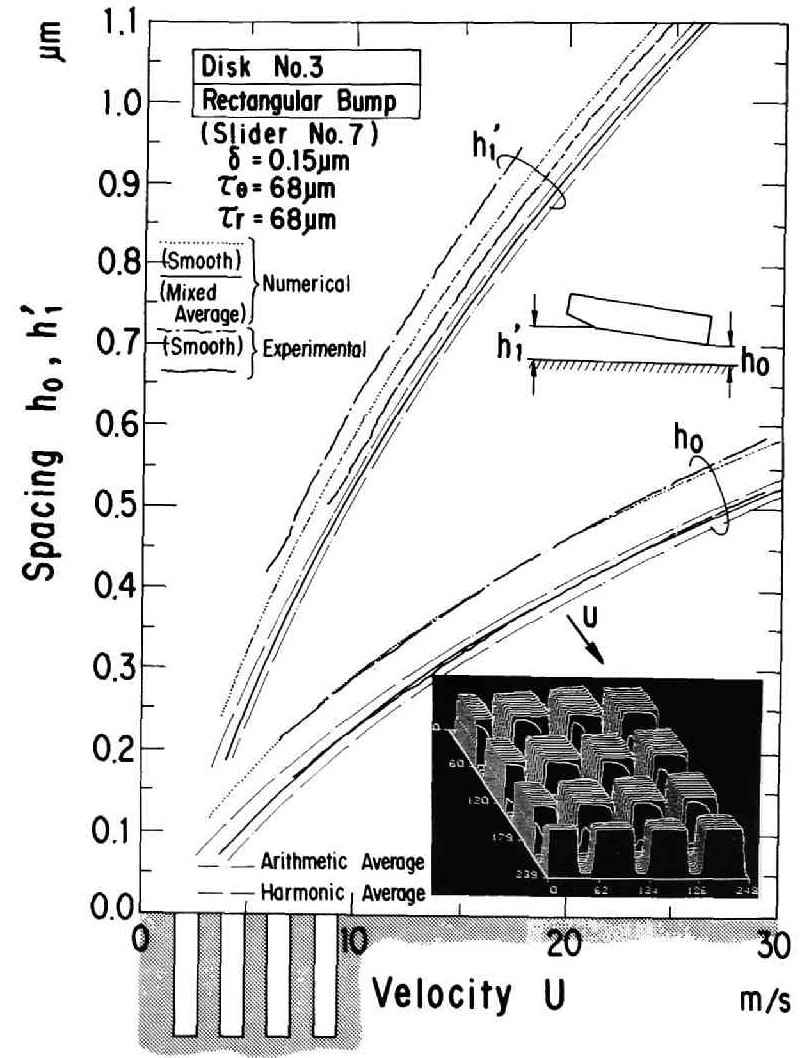


(a) 直交あらし (ディスク No. 1)

図5-17 あらしをもつディスクでの結果



(b) 二次元矩形状溝あらし (ディスク No. 2)



(c) 二次元矩形状突起あらし (ディスク No. 3)

図5-17 あらしをもつディスクでの結果

ライダを対象に、あらさ振幅、あらさピッチ（スライダ長さ当りの山数）をパラメータとして、平均すきまに基づく近似解析結果と直接解析結果とを比較し、スライダ負荷容量に関する定性的傾向を調べた。次に、従来、実験的に未確認であった規則的な一次元および二次元あらさを有するスライダを用いた浮上実験を行い、算術平均すきま、調和平均すきまを基に、これらをあらさの特性に応じて混合して用いる混合平均すきまによる近似解析結果と比較した。また、媒体側にあらさのある場合に関しても、矩形形状の一次元、二次元あらさを形成して、スライダ浮上実験を行い、平均すきまによる解析結果との比較を行った。

本章で得られた結論を要約すると、以下のようになる。

- (1) 矩形断面の一次元あらさを有する無限幅平面スライダでは、平行あらさ、直交あらさとも、少なくとも、あらさ振幅が浮上すきまの10倍程度まで、負荷容量で評価した厳密解析による結果と平均すきまに基づく近似解析による結果は、よく一致する。また、直交あらさの場合には、あらさ振幅が増大するにつれて、近似解析による結果が、負荷容量を過小に評価する傾向を示す。
- (2) 矩形断面形状の一次元あらさ（直交あらさ）を有する有限幅平面スライダの場合の浮上特性の解析には、あらさのピッチが小さく、平均化の効果が十分得られる場合には、スライダ走行方向に調和平均すきまを、またスライダ幅方向に算術平均すきまを用いた近似解析による結果が、厳密解析による結果とよく一致し、浮上特性の解析に有効である。あらさ振幅の増加に伴って、近似解析では、スライダの負荷容量を、無限幅スライダの場合と同様に、過小評価する傾向を示す。
- (3) 矩形断面の一次元あらさを有する有限幅テーパフラットスライダを用いた実験結果は、平行あらさに関しては、スライダ長さ方向に算術平均すきまを、スライダ幅方向に調和平均すきまを用いた近似解析の結果とよく一致する。直交あらさに関しては、スライダ長さ方向に調和平均すきまを、スライダ幅方向に算術平均すきまを用いた近似解析の結果とよく一致する。
- (4) 矩形断面の一次元あらさを有する有限幅テーパフラットスライダの浮上特性は、スライダ幅方向に用いる平均すきまによって、支配的に影響される。
- (5) 矩形断面の等方性二次元あらさを有する有限幅テーパフラットスライダの浮上特性は、調和平均すきま、算術平均すきまを用いた浮上特性の中間的な特性を示す。

す。また、単位あらしの流量特性から得られた算術平均すきまと調和平均すきまを混合した混合平均すきまに基づく近似解析結果は、実験結果とよく一致する。

- (6) 走行面にあらしがある場合には、矩形断面状の一次元あらし、二次元あらしの場合とも、少なくとも無次元あらし振幅が1程度の範囲では、実験結果は、あらしが走行することによるスライダ浮上特性に及ぼす影響を無視して、スライダ側にあらしのある場合の混合平均すきまに基づく近似解析を適用して解析した結果と非常によく一致する。

第6章 ヘリウム－空気混合気体中の 浮動ヘッドスライダ浮上特性

6.1 緒言

動圧気体軸受の一応用例である磁気ディスク装置用の浮動ヘッドスライダは、物性値の異なる作動流体を用いた時、その浮上特性を含め作動特性全般に大きな影響を受ける。例えば、ヘリウムは、密度が空気の約 $1/5$ と小さい（表6-1参照）ので、空気とヘリウムの混合気体を作動流体としたとき、作動流体中のヘリウムの混合比を増すと、図6-1に示すように媒体の高速回転に伴う風損が減少する。また、ヘリウムは、熱伝導率が空気の約6倍と高いため、発生熱に対する冷却能力が空気より高い。このようなことから、風損とこれによる温度上昇、フラッタ等が特に問題となる大径の大型磁気ディスク装置では、電力消費の低減、熱オフトラックの低減を図る上で、作動流体にヘリウムを用いることは極めて有効であり、ヘリウム中で作動する大型大容量の磁気ディスク装置の開発も検討されている[601]。ただし、ヘリウムは極めて漏洩しやすく、密封が困難な気体の一つであり、ヘリウムで作動する装置を想定した場合には、長期的なヘリウムの漏洩と外気の混入による作動流体の成分の変化、それに伴う物性の変化に起因するスライダ浮上すきまの変化を正確に予測することは、極めて重要な課題と言える。また、ヘリウムは分子平均自由行程が空気の3倍と大きいと、超微小浮上の浮動ヘッドスライダの開発に不可欠なサブサブミクロンという物理的に微小なすきまでの作動特性を、作動状態としては等価で、しかも寸法的にはすきまを大きくとって浮上特性のシミュレーション実験を行うのに有効である。このような目的で行われたヘリウム環境中でのスライダの浮上実験に関しても、以前から報告されている[602],[603]。著者も、大気圧ヘリウム環境および減圧ヘリウム環境中でのスライダ浮上実験を行い、その特性を実験的に明らかにしたが[604]、これらは大気圧空気中とは異なる成分、圧力条件ではあるものの、単一成分の気体中での実験的検討である。近年、Beekenらはヘリウム、アルゴンなどの気体を用い、空気との成分比、周囲圧力などを変えた場合のスライダ浮上特性の実験的な検討結果を報告している[605]。

混合気体は、単独の成分気体の場合に比べて、かなり異なる物性値を示すことが知られ

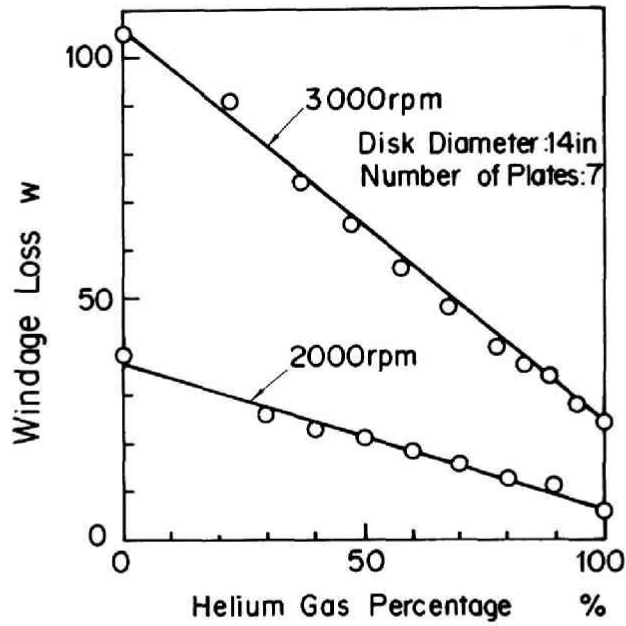


図6-1 ヘリウム濃度とディスク回転系の風損の関係

表6-1 各種気体の物性

Physical Properties of Gases

	He	Air	Ar	H ₂	O ₂	N ₂
Molecular Weight m	4.002	28.96	39.94	2.016	32.00	28.02
Molecular Mean Free Path λ ($\times 10^{-6}$ m)	0.1862	0.064	0.067	0.118	0.068	0.063
Density ρ ($\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$) at 15°C	0.0173	0.125	0.173	0.00869	0.140	0.121
Thermal Velocity τ at 15°C (m/s)	1235	459	391	1740	437	467
Viscosity μ at 15°C ($\times 10^{-4}$ P)	1.938	1.755	2.161	0.873	1.992	1.720
Molecular Diameter d at 15°C ($\times 10^{-10}$ m)	2.18	3.72	3.64	2.74	3.61	3.75

ており、解析的、実験的な研究はかなり以前から行われている[606],[607],[608],[609],[610],[611]。これらにおいては、実用上有用な等価的な混合気体の物性値の実験式、算定式などが数多く提案されている。

ところで、混合気体を作動流体とする場合の浮動ヘッドスライダの浮上特性を、気体分子運動論の立場から明らかにする方法としては、次の二つの手法が考えられる。まず第一の方法は、混合気体を構成する各成分気体の分子について、相互の衝突をも考慮したボルツマン方程式から、すきま内の流量特性を求め[613]、その流量保存則を考えることで、混合気体を作動流体とした場合の潤滑特性を評価するものである。第二の方法は、混合気体をマクロ的に単一気体と見なし、これと等価的な分子平均自由行程、等価的な粘度など、マクロな物性値を用いて潤滑特性を評価する方法である。このうち、前者は解析的な厳密さはあるが、膨大な計算量を必要とする欠点がある。これに対して後者は、等価分子平均自由行程、等価粘度を予め正確に推定できれば、基本的には従来と同様の計算手法を適用することができ、簡便に潤滑特性を評価できる。

本章では、ヘリウム-空気混合気体中で作動する浮動ヘッドスライダの静特性に関する実験的な検討の結果について述べる。本研究では上述の二つの手法のうち、後者の手法に基づき、ヘリウム-空気混合気体の等価分子平均自由行程、等価粘度を算定し、これらの算定値を基に、一次スリップ近似解析（修正レイノルズ方程式）[612]、ボルツマン方程式に基づく厳密解析[613],[614],[615]を用いてスライダの浮上特性を数値解析し、混合気体中での小形・軽荷重スライダによる実験結果との比較を行う。

その結果、従来の一次スリップモデルに基づく解析は、混合気体における空気のモル比 α が、 $\alpha = 0.6 \sim 1.0$ 程度の範囲では、スライダの静特性に関してほぼよい近似を与えること、また、 α の減少に伴って、スライダ流出端浮上すきま h_0 、スライダピッチ角 θ に関しては、実際よりも高めの予測を与えること、 α に対する浮上すきま変化率（ $\Delta h_0 / \Delta \alpha$ ）に関しては、低めの予測を与えること、さらに、 α が 0.4 を下回るとともに、実験結果は、明らかに計算結果から遷移する傾向を示すこと、一方、ボルツマン方程式に基づく厳密解析の結果は、 α の全領域において、定量的にはスライダ流出端浮上すきま h_0 の実験値よりも若干低めの値を示すが、定性的には、 α のより広範な領域まで混合気体中のスライダ浮上特性とよい一致を示すこと等を明らかにしている。

6. 2 混合気体の等価分子平均自由行程および等価粘度

6. 2. 1 等価分子平均自由行程

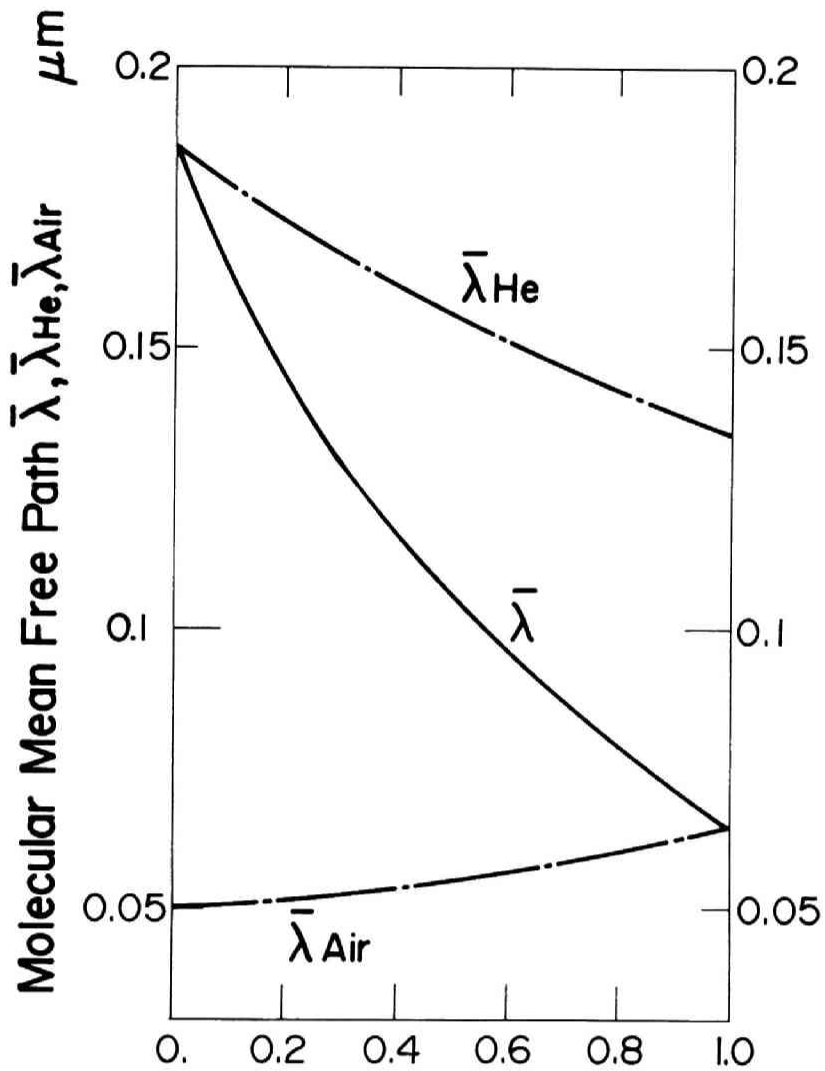
単一成分の気体の場合の分子平均自由行程は、単位時間当りの分子衝突回数に対する分子の平均速度の比として定義される。二種類以上の成分を含む混合気体の場合にも、この定義を拡張して適用することができる。すなわち、分子の平均速度には、すべての種類の分子に関する平均的な速度を適用し、また、分子衝突回数には、すべての分子に関して起こり得る衝突回数の総和を適用すればよいことになる。混合気体の等価分子平均自由行程 $\bar{\lambda}$ は、 i 番目の成分気体の分子平均速度を \bar{v}_i 、分子直径を d_i 、分子数密度を n_i 、原子量を M_i とすると、以下のように表される[611]。

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_i \bar{v}_i \cdot P_i}{\sum_{ij} \pi \left(\frac{d_i + d_j}{2} \right)^2 \cdot n_j \cdot \bar{v}_i \sqrt{1 + \frac{M_i}{M_j}} \cdot P_i} \quad (6-1)$$

なお、ここに、 P_i は、 i 番目の分子存在確率であり、想定する系の全分子数を N 、 i 番目の分子数を N_i とすると、 $P_i = N_i / N$ で表される。特に、本章で扱うような成分気体が2種類の場合 ($i = 1, 2$) には、式 (6-1) は下記のようになる。

$$\bar{\lambda} = \frac{P_1 + \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} P_2}{N \cdot \left\{ \sqrt{2} \pi d_1^2 P_1^2 + 2\pi \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right)^2 \sqrt{1 + \frac{M_1}{M_2}} P_1 P_2 + \sqrt{2} \pi d_2^2 \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} P_2^2 \right\}} \quad \dots (6-2)$$

図6-2に、 α に対するヘリウム-空気混合気体の等価分子平均自由行程 $\bar{\lambda}$ の特性を示す。等価分子平均自由行程 $\bar{\lambda}$ は、 α の変化に対して下に凸の特性を示し、ヘリウム、空気各々単独の分子平均自由行程 λ_{air} 、 λ_{He} に基づいた線形内挿値を常に下回る。また、図6-2には、参考までに、混合気体の各成分、すなわちヘリウムもしくは空気のみに着目



(He 100%) Mole Ratio of Air α (Air 100%)

図6-2 ヘリウム-空気混合気体におけるヘリウムモル比と等価分子平均自由行程の関係

した時の分子平均自由行程 $\overline{\lambda_{air}}$ 、 $\overline{\lambda_{He}}$ を示す。ともに、異種の気体成分と混合することにより、単独成分の場合よりも分子平均自由行程が低下する。これは、ヘリウムの場合には、混合することで等価的な分子直径が増大することにより、また空気の場合には、相対的な分子速度が増加することにより、ともに分子衝突頻度が大きくなるためである。

6. 2. 2 等価粘度

混合気体の等価的な粘度を評価するための理論的な基礎は、Chapman、Cowlingらにより、文献[608]に示されている。2種類の気体成分からなる混合気体の等価粘度の第一次近似 $[\mu]_1$ は、以下のように表される。

$$[\mu]_1 = \frac{n_{12} \left(\frac{2}{3} + \frac{m_1}{m_2} A \right) + n_{21} \left(\frac{2}{3} + \frac{m_2}{m_1} A \right) + \frac{E}{2\mu_1} + \frac{E}{2\mu_2} + \frac{4}{3} - 2A}{\frac{n_{12}}{\mu_1} \left(\frac{2}{3} + \frac{m_1}{m_2} A \right) + \frac{n_{21}}{\mu_2} \left(\frac{2}{3} + \frac{m_2}{m_1} A \right) + \frac{E}{2\mu_1\mu_2} + \frac{4A(m_1+m_2)^2}{3Em_1m_2}} \dots (6-3)$$

ここに、 m_1 、 m_2 は、各々第一、第二の成分気体分子の質量、 μ_1 、 μ_2 は各々の成分気体の粘度、 n_{12} 、 n_{21} は第一、第二の成分気体の分子の数密度の比であり、各々の分子の数密度を n_1 、 n_2 とすると、 $n_{12} = n_1/n_2$ 、 $n_{21} = n_2/n_1$ である。A、Eは、各成分気体の相互作用に起因する定数であり、Eは拡散係数から、またAは分子斥力から決まる値である。Eは理論的に正確に予測することが困難であり、精密な等価粘度を評価するためには、実験的に求める必要があるなどの不都合がある。

さらに進んだ実用的な等価粘度の推定法は、文献[609],[610]に示されている。分子の相互作用を考慮した混合気体の等価粘度は、最終的には式(6-4)のように表現される。なお、この式は3種類以上の成分を含む混合気体の場合にも拡張できる。

$$\frac{1}{\bar{\mu}} = \frac{X+Y}{1+Z} \quad (6-4)$$

式(6-4)中のX、Y、Zは、次のように表される。

$$X = \frac{n_1^2}{\mu_1} + \frac{2n_1n_2}{\mu_{12}} + \frac{n_2^2}{\mu_2} \quad (6-5)$$

$$Y = \frac{3}{5} A_{12}^* \left\{ \frac{n_1^2 m_1}{\mu_1 m_2} + \frac{n_1 n_2}{\mu_{12}} \frac{(m_1 + m_2)^2}{2m_1 m_2} \frac{\mu_{12}^2}{\mu_1 \mu_2} + \frac{n_2^2 m_2}{\mu_2 m_1} \right\} \quad \dots (6-6)$$

$$Z = \frac{3}{5} A_{12}^* \left[n_1^2 \frac{m_1}{m_2} + 2n_1 n_2 \left\{ \frac{(m_1 + m_2)^2}{4m_1 m_2} \left(\frac{\mu_{12}}{\mu_1} + \frac{\mu_{12}}{\mu_2} \right) - 1 \right\} + n_2^2 \frac{m_2}{m_1} \right] \quad \dots (6-7)$$

$$\mu_{12} = C \cdot \frac{\sqrt{\bar{m} \cdot T}}{d_{12}^2 \Omega_{12}} \quad (6-8)$$

A_{12}^* および Ω_{12} は、無次元温度の関数である。 d_{12} は、衝突時の分子間距離、 C は定数、 \bar{m} は等価質量である。

本章では、ヘリウム-空気混合気体を酸素、窒素、ヘリウムの3種成分の混合気体と考え、 α が変化した場合でも、酸素-窒素のモル比は標準大気のそれと同じまま一定に保たれるものと仮定して、 α に対する等価粘度を計算した。その結果を図6-3に示す。また、空気-アルゴンの混合気体に関する等価粘度の計算結果、実験結果(ともに、文献[608])を参考までに示す。 $\bar{\mu}$ は、分子平均自由行程の場合とは異なり、 α の変化に対して上に凸の特性を示し、 α の全領域で各成分の粘度 μ_{air} 、 μ_{He} に基にした線形内挿値を常に上回る。

6.3 実験結果と計算結果の比較

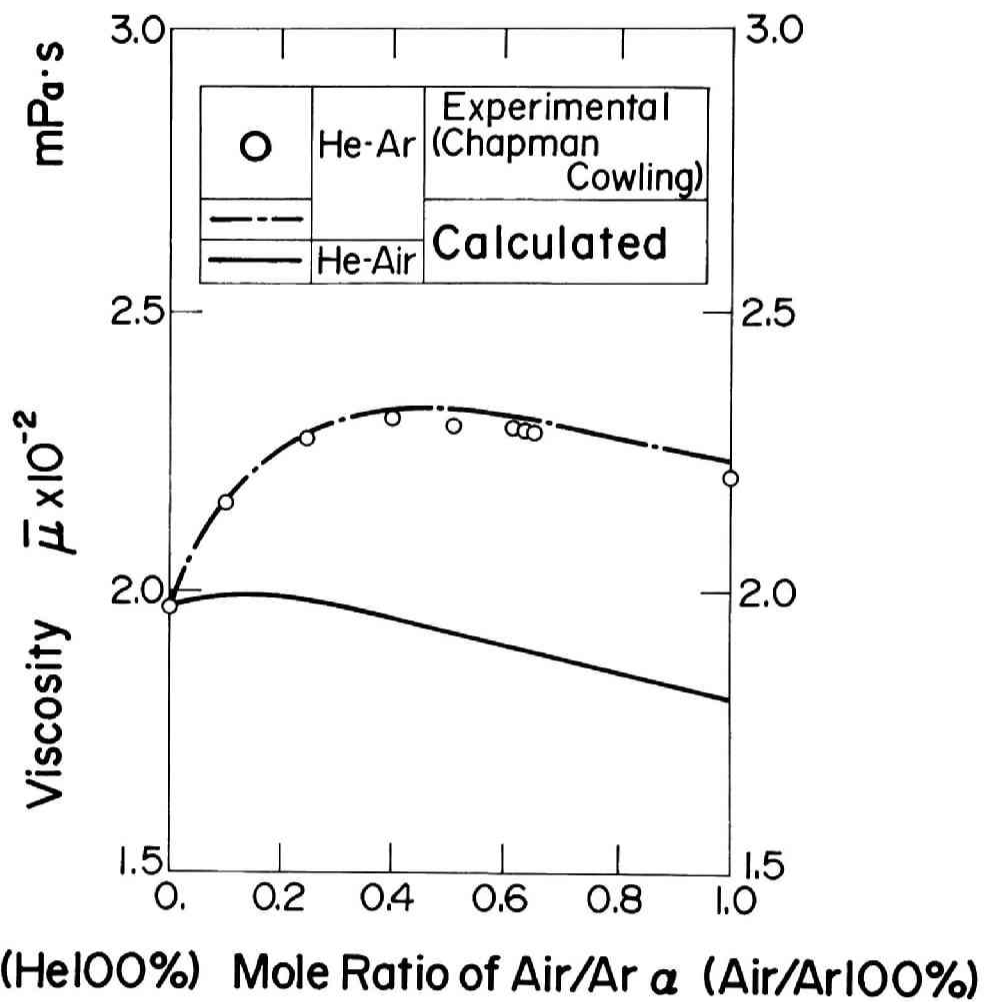


図6-3 ヘリウム-空気混合気体におけるヘリウムモル比と等価粘度の関係

6. 3. 1 実験方法

図6-4に実験系の概要を示す。実験装置は、ディスクを回転させるスピンドルおよび浮動ヘッドスライダを精密に位置決めする微動機構を気密容器内部に収納し、気密容器上部に設置した窓から、浮動ヘッドスライダの浮上すきまを目視観察および精密にすきま測定できる構成としている。スピンドルには5軸制御形の磁気軸受を用いており、静圧形空気軸受や玉軸受を用いたスピンドルの場合のようなスピンドルと気密容器間の摺動部分が無いため、完全な容器のシールが可能で、ヘリウムの漏洩、外気の混入の影響が少なく、正確なヘリウム-空気の混合比を維持して実験を行うことができる。同時に、発塵による容器内の汚染の問題がなく、軸受損失が低いため低出力、低発熱のスピンドルモータが適用でき、実験期間にわたり、気密容器内をほぼ周囲温度条件（約20℃）に維持することが可能である。

供試スライダの諸元を、図6-5、表6-2に示す。本研究では、0.1~0.05μmの微小浮上すきまでの実験を想定しており、この領域でスライダの安定浮上を実現するため、供試スライダには、追従性の高い2種類の小形スライダ、すなわちスライダ長さ $l=1$ mmおよびスライダ長さ $l=2$ mmのテーパフラットスライダを用いた。スライダおよびスライダ支持機構の先端部分の概形を図6-6に示す。なお、スライダは、すべてアルミナ・チタン・カーバイト製である。

スライダ長さ、スライダ浮上面幅は、工具顕微鏡を用い、1μmの精度で測定した。浮上面のそり、うねり、テーパ形状は非接触の光学式表面形状測定器、触針式表面あらさ計を併用し、数nm程度の精度で測定した。実際には、左右のスライダ浮上面には若干の形状の差異が認められるが、浮上特性に及ぼす影響は小さいため、計算上は、各々の平均値を代表寸法として用いた。

スライダ走行面には、直径130mm、厚さ2mmの高精度な光学研磨を施した合成石英ガラスディスクを用いた。上述のように0.1~0.05μmの浮上すきまで安定に作動させるため、スライダ走行面も、うねり振幅が0.03μm（4mm角の範囲）以下、中心線平均あらさが0.004μm以下（同範囲）の平坦・平滑研磨を行っている。またスライダ走行面の汚染は、スライダの安定浮上を阻害するとともに、気体分子の反射特性、すなわち運動量に関する適合係数を変える恐れがある。このため、浮上実験ごとに、走行面を高純度のアセトンで洗浄した。

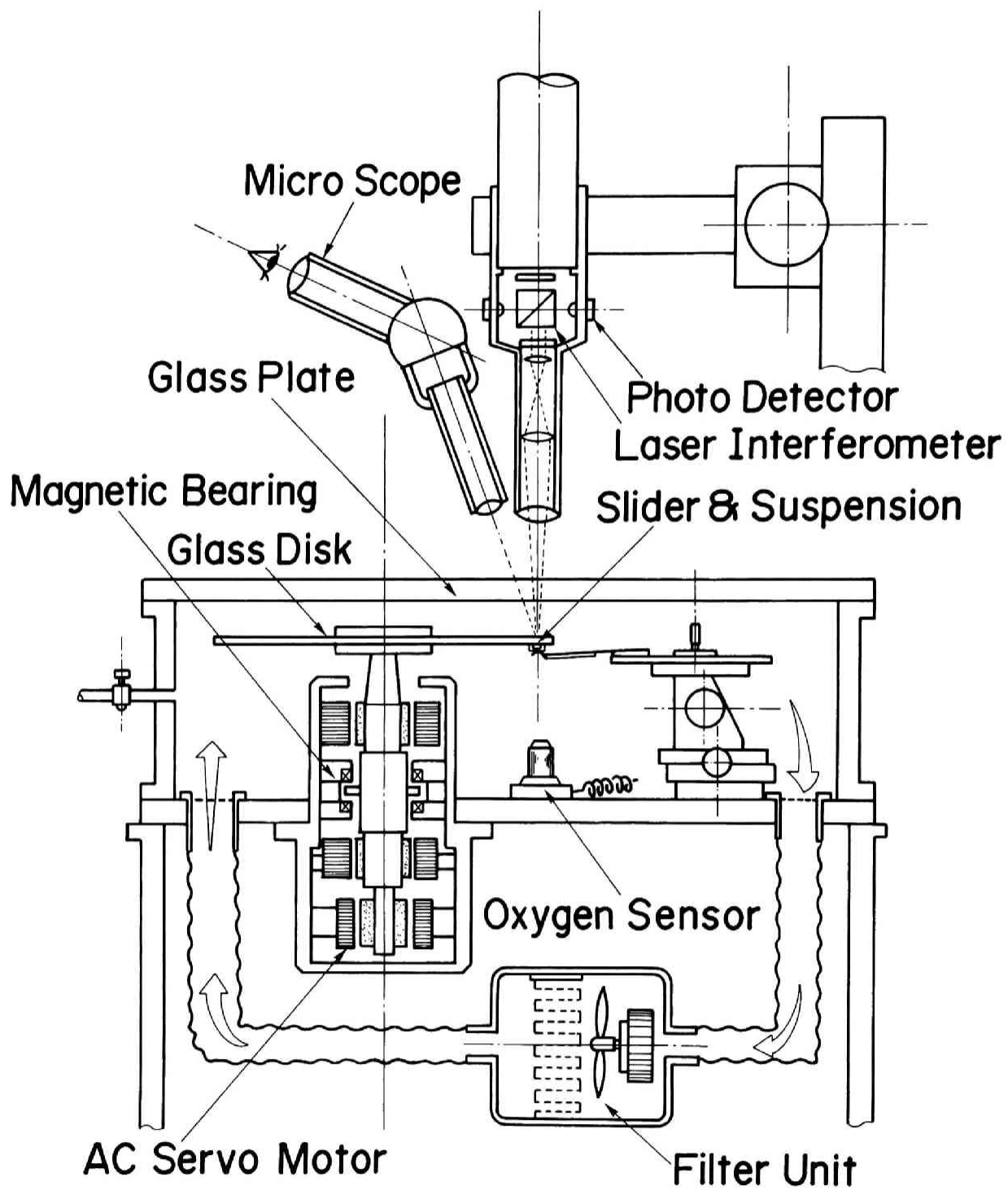


图 6-4 实验装置

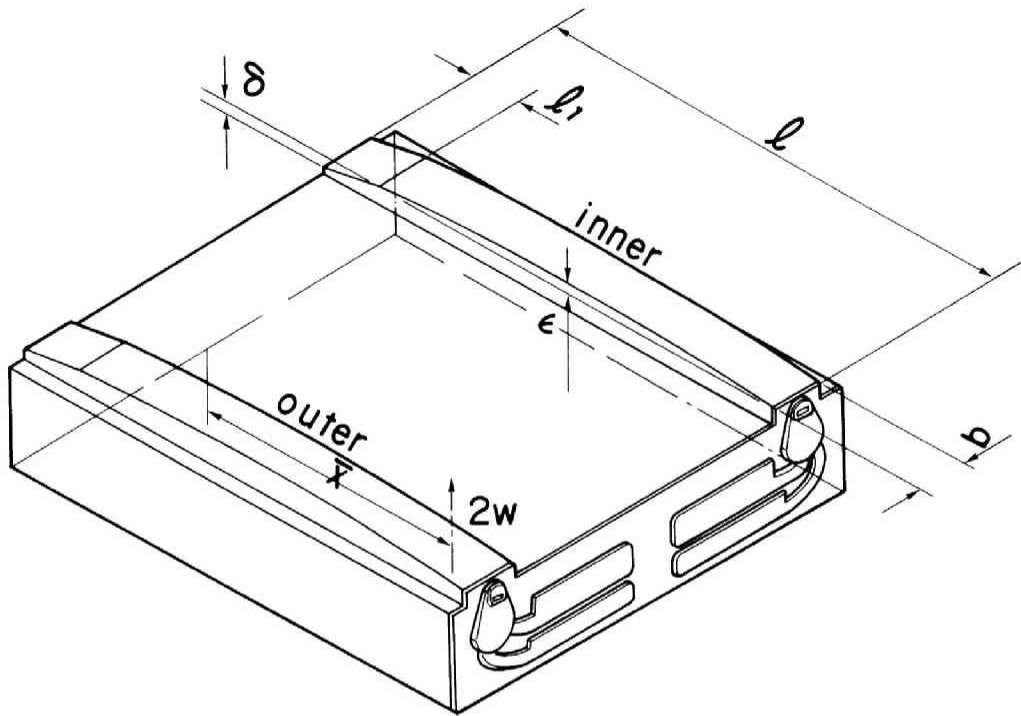


図6-5 テーパーフラットスライダ

表6-2 供試スライダの諸元

Slider No.		1	2	3	4
l (mm)	inner	0.995	2.005	2.005	2.004
	outer	0.993	2.006	2.003	2.006
b (mm)	inner	0.112	0.189	0.193	0.189
	outer	0.110	0.189	0.192	0.189
l ₁ (mm)	inner	0.194	0.303	0.327	0.312
	outer	0.189	0.303	0.322	0.303
δ (μm)	inner	1.706	2.743	4.454	2.858
	outer	1.674	2.749	4.302	2.808
ε (μm)	inner	0.002	0.008	0.006	-0.003
	outer	0.003	0.005	0.007	-0.004
$\bar{X} (= \bar{x} / l)$		0.5631	0.5548	0.5575	0.5501
2w (mN)		9.81	31.4	33.7	26.7

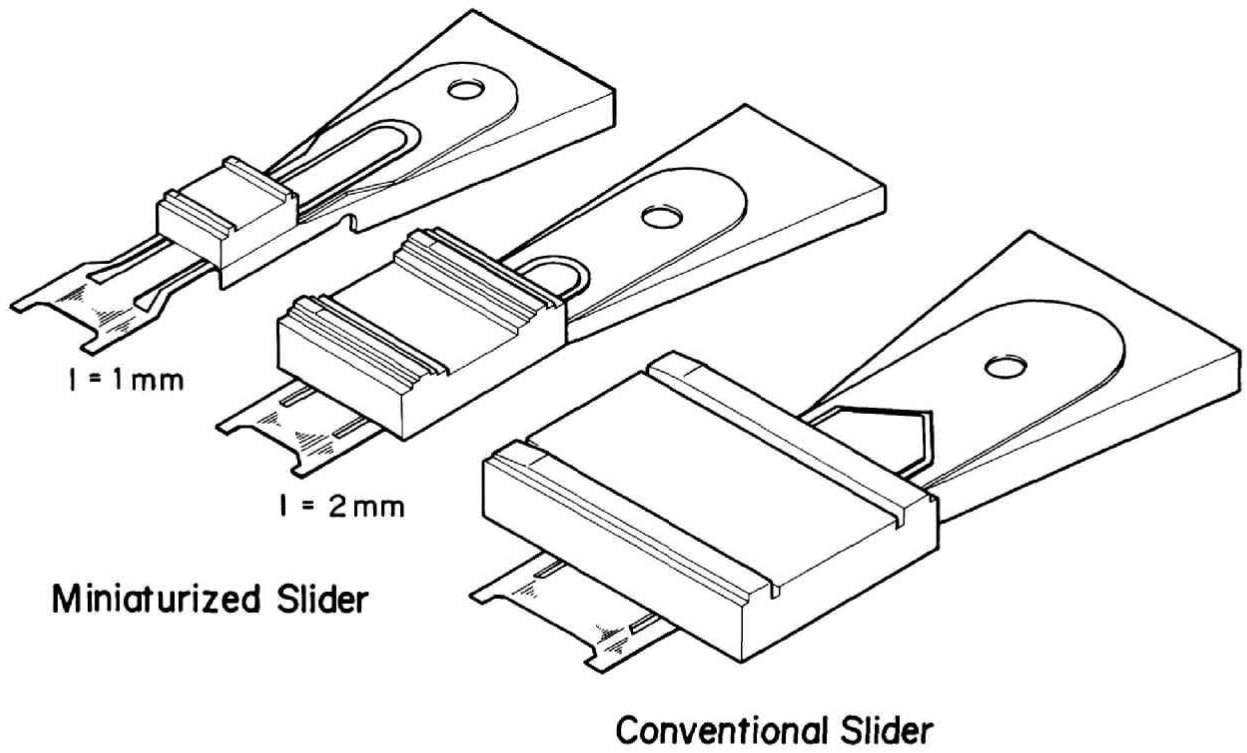


図6-6 供試スライダおよび支持機構の形状

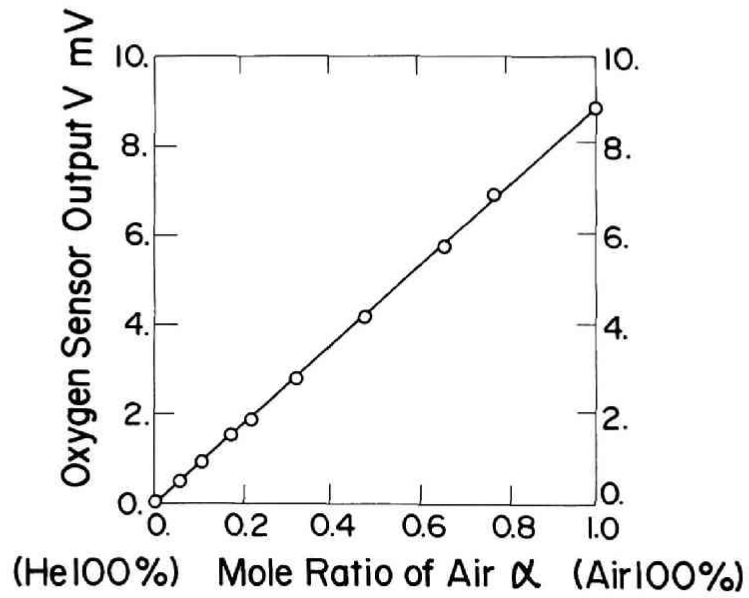


図6-7 ヘリウム-空気混合気体におけるヘリウムモル比と酸素センサ出力との関係

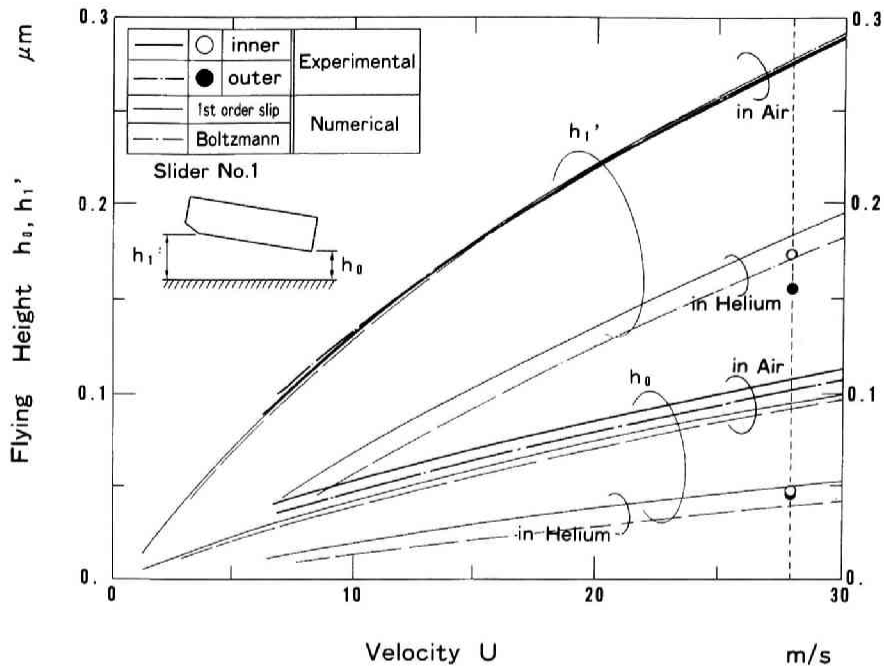
支持機構には、有効長さ12mmの小形ジンバルを用いた。スライダにジンバル性を付与するフレクチャ部分の加工を容易にするため、スライダの回転中心となるピボットを、負荷梁側に形成したものをを用いた。スライダへの負荷力点位置（支持点位置）は、スライダをジンバル接合状態のまま、背面から工具顕微鏡を用いて測定した。荷重はスライダ走行面（ガラスディスク）とほぼ同形状のディスクを作製し、表面下に埋め込んだロードセルによって、正規のスライダ設定状態で測定した。測定精度は、0.01~0.02grfである。

ヘリウム-空気混合気体のモル比の測定は、ヘリウム濃度を直接測定することが困難であるため、空気中の酸素濃度を、ガルバニ式酸素センサにより検出することで、間接的に測定した。 α に対する酸素センサの検定は、空気とヘリウムとを精密な分圧比で混合した気体を気密容器に導入することで行った。 α に対する酸素センサの出力特性を図6-7に示す。 α に対して、酸素センサの出力特性はほぼ線形となっている。なお、 α の測定精度は、1~2%である。

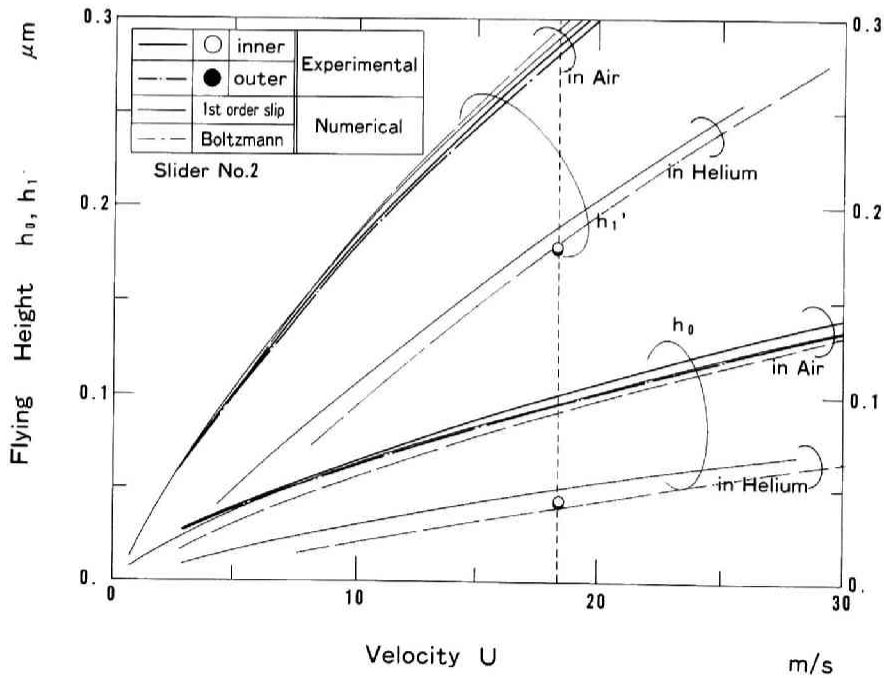
実験は、スピンドル回転数を一定とし、気密容器内の圧力を大気圧に保ちながら、これに徐々にヘリウムを注入することで、ヘリウムと空気の混合比を変化させて行い、それぞれの作動条件下でのスライダの浮上すきまを測定した。浮上すきまは、第3章で詳述した可視レーザ干渉を利用した浮上すきま測定装置[604]により、左右のスライダ浮上面ごとに、流出端近傍、テーパ端近傍の4カ所の浮上量を測定した。測定分解能は、0.002~0.004 μ mである。

6.3.2 実験結果と計算結果の比較

まず、ヘリウム-空気混合気体中の実験を行う前に、空気中において、スライダ走行速度 U に対する浮上特性を測定した。測定結果を、図6-8(a)~図6-8(d)に示す。同図には、空気およびヘリウム雰囲気条件下で、運動量に関する適応係数 $\sigma=0.89$ の場合の一次スリップモデルに基づく計算結果および $\sigma=1.0$ の場合のボルツマン方程式による潤滑方程式[613],[614],[615]に基づく計算結果も示す。また、ヘリウム-空気混合気体中で行った実験において、ヘリウムがほぼ100%に近い条件での浮上すきまを、○および●で併記した。計算に用いた空気およびヘリウムの分子平均自由行程 λ_{air} 、

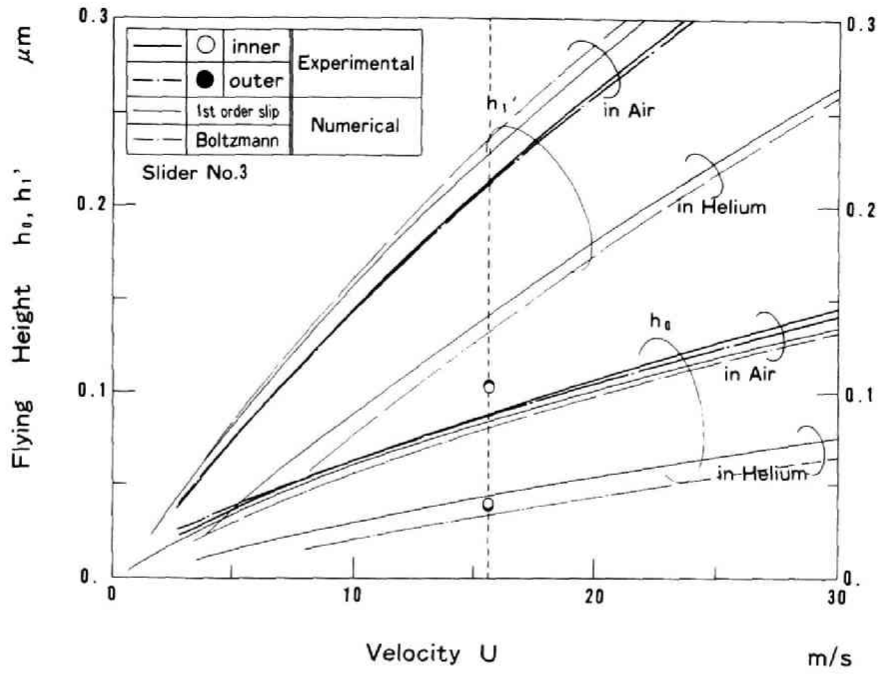


(a) スライダNo. 1

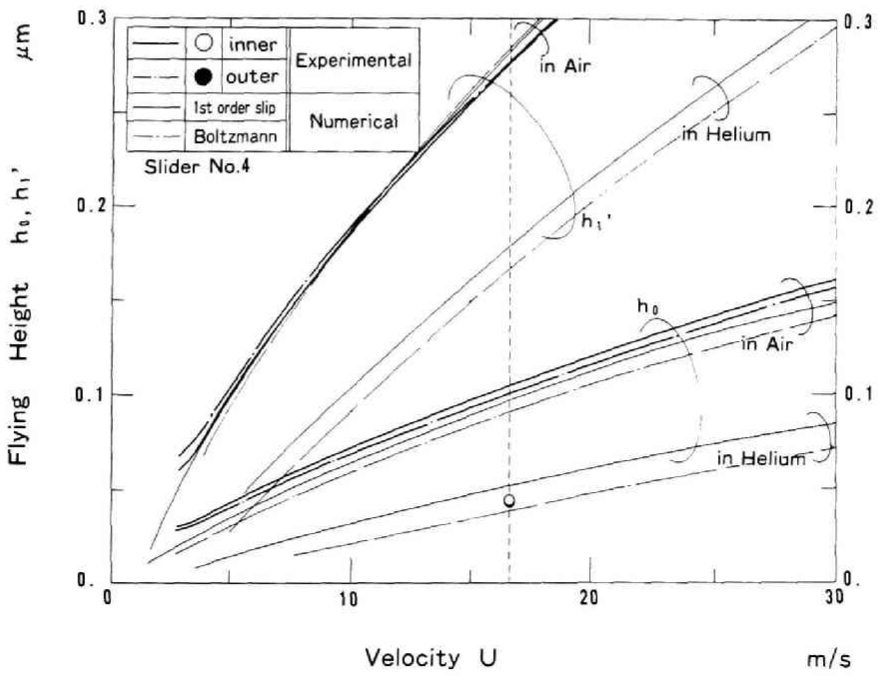


(b) スライダNo. 2

図6-8 供試スライダの走行速度と浮上すきまの関係



(c) スライダNo. 3



(d) スライダNo. 4

図6-8 供試スライダの走行速度と浮上すきまの関係

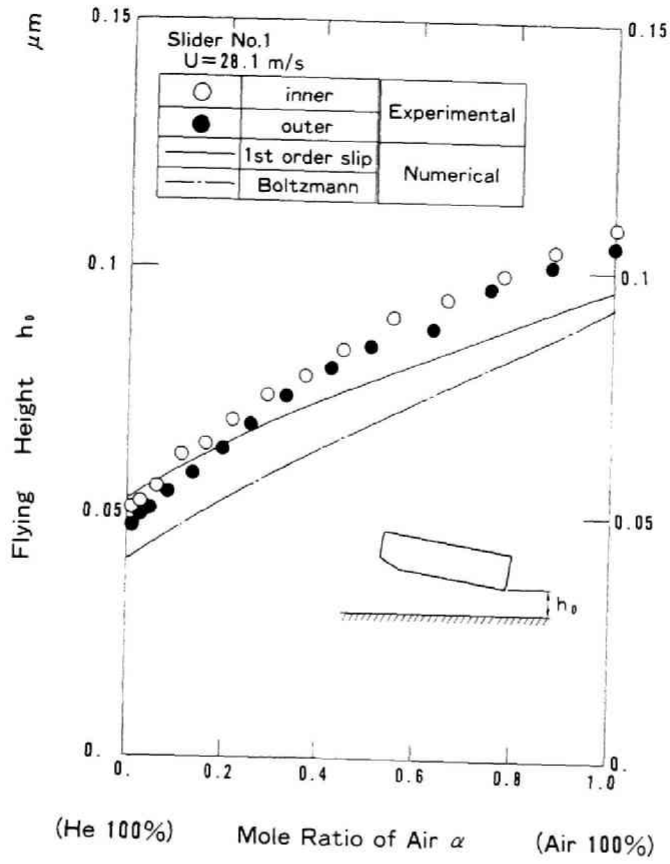
λ_{H_2O} 、粘度 μ_{air} 、 μ_{H_2O} は、それぞれ $\lambda_{air} = 0.064 \mu m$ 、 $\lambda_{H_2O} = 0.1862 \mu m$ 、 $\mu_{air} = 0.01809 cP$ 、 $\mu_{H_2O} = 0.01960 cP$ である。その他、関連する気体の物性値を、表 6-1 にまとめて示す。

空気中での実験結果は、計算結果（一次スリップ流れモデル）とほぼ対応しているが、定性的な傾向としては、流出端浮上すきま h_0 については、実験結果が若干計算結果を上回り、またテーパ端浮上すきま h_1' については、実験結果が計算結果を下回る傾向にある。ボルツマン方程式による一般化潤滑方程式に基づく計算結果の方が、この傾向は顕著である。このことから、上述の差異の主要因は、気体分子平均自由行程の見積り精度の影響ではなく、むしろ小形スライダを用いたことにより、支持点位置の等価的なずれが、スライダ浮上特性に微妙に反映されたためと考えられる。

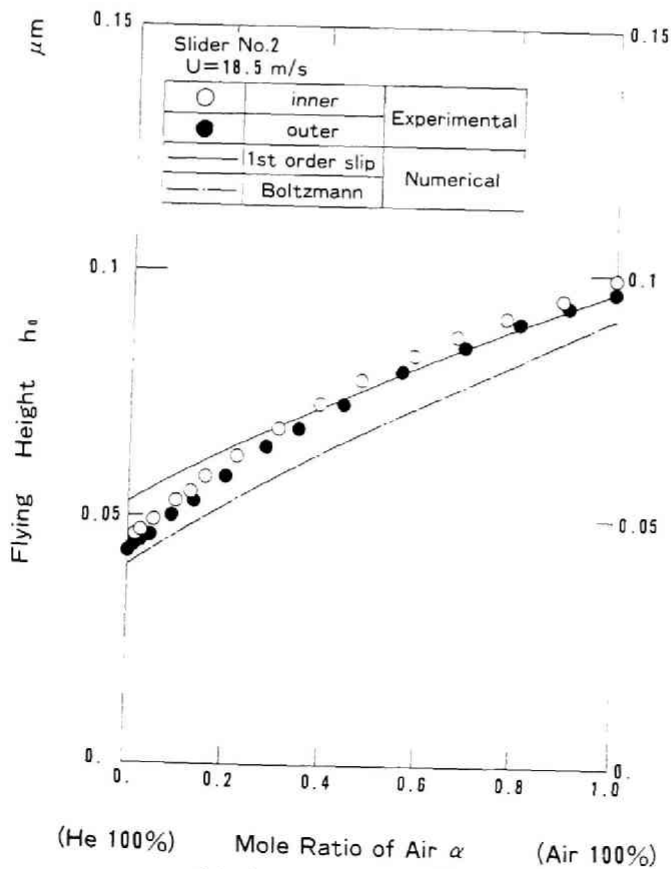
図 6-9 (a) ~ 図 6-9 (d) は、 α を変えた時のスライダ流出端近傍の浮上特性の実験結果および計算結果である。また、図 6-10 (a) ~ 6-10 (d) は、同様に、スライダテーパ端近傍の浮上特性である。詳細に見ると、修正レイノルズ方程式の計算結果もボルツマン方程式による一般化潤滑方程式の計算結果も、実験値との間に一定の差異が見られる。本来、浮上すきまが大きく、クヌッセン数が小さい空気中 ($\alpha = 1.0$) での作動の場合の方が、両理論解析結果および実験結果の差異は小さいはずである。にもかかわらず、図 6-9 (a) (スライダ No. 1)、図 6-9 (c) (スライダ No. 3) では、特に実験結果と計算結果との差異が大きい。これの主たる原因は、上述のように、支持機構のアセンブル時に生ずる支持点位置の等価的なずれによるものと考えられる。定性的には、修正レイノルズ方程式に基づく計算結果は、 α が 0.6 ~ 1.0 の間では、実験結果と比較的よく一致している。 α が 0.6 を下回るに従って、明らかに実験結果が計算結果を下回り、ボルツマン方程式による一般化潤滑方程式の結果に漸近する傾向を示す。

テーパ端の浮上特性に関しても、流入端浮上特性とほぼ類似の傾向を示す。すなわち $\alpha = 1.0$ 近傍では、一次スリップモデルによる計算結果は、実験結果とほぼ一致するが、 α が減少するに従って実験値が計算値を下回る傾向を示し、その差異は増大する。実験値と計算値の差異は α が小さい程顕著であるため、スライダのピッチ角も α が小さいほど予測値を下回ることとなる。ボルツマン方程式に基づく潤滑方程式の計算結果は、 α の全領域で、実験結果とほぼよい一致を示す。

前述のように、実用装置では混合気体中の絶対浮上すきまに加えて、装置内部の気体成分の漏洩、外気の混入に伴う気体の組成の変化に起因する浮上すきまの変化率を評価する

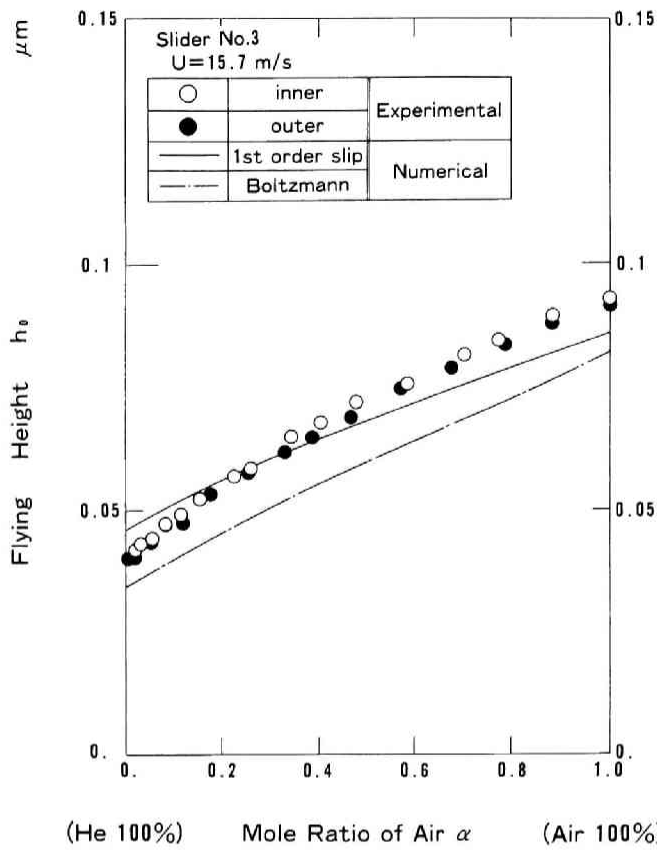


(a) スライダNo. 1

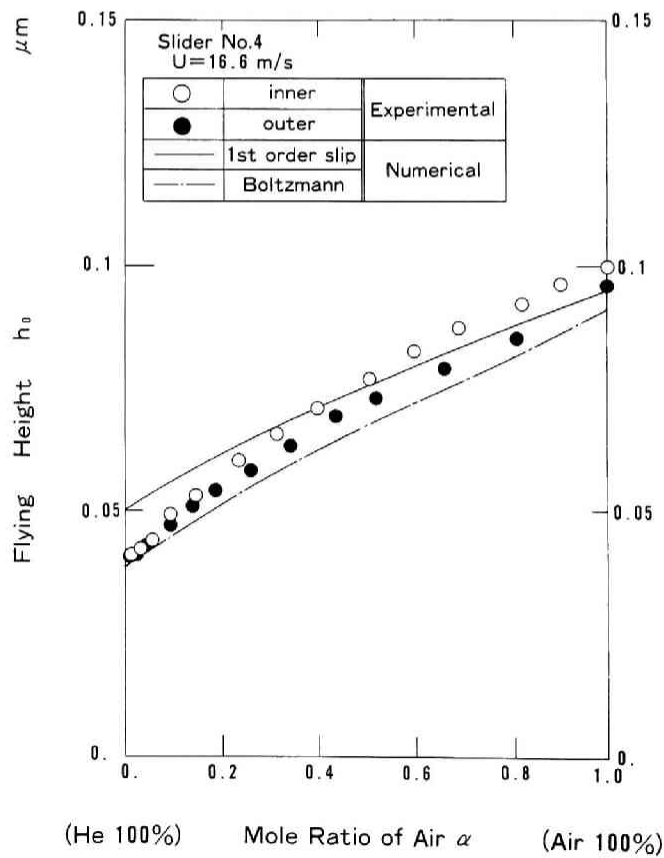


(b) スライダNo. 2

図6-9 ヘリウムモル比と流出端浮上すきまの関係

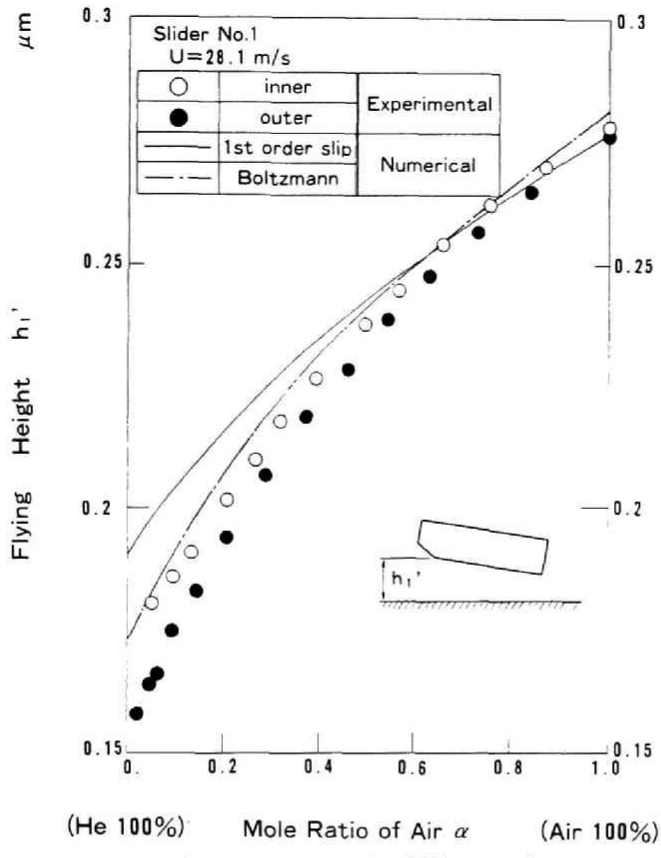


(c) スライダNo. 3

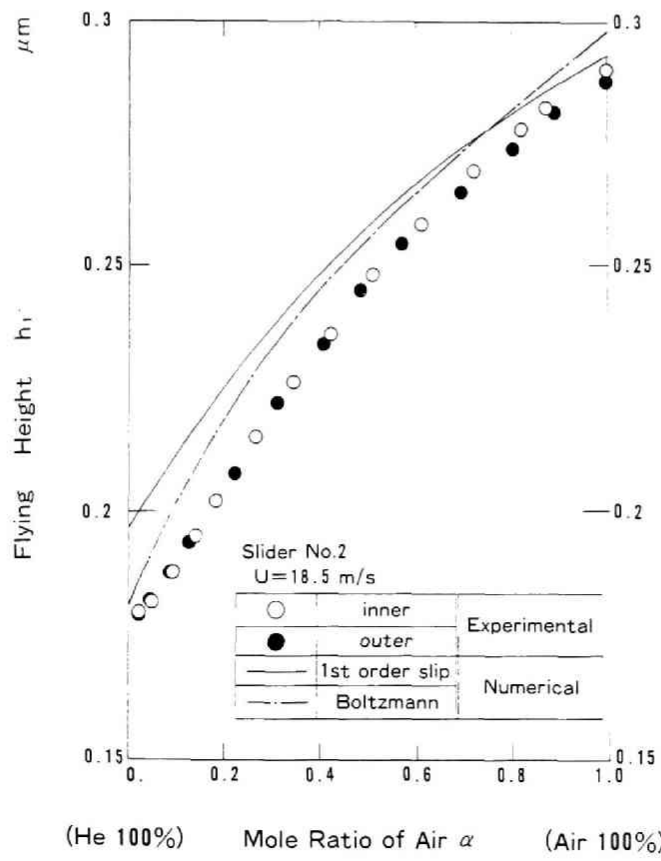


(d) スライダNo. 4

図6-9 ヘリウムモル比と流出端浮上すきまの関係

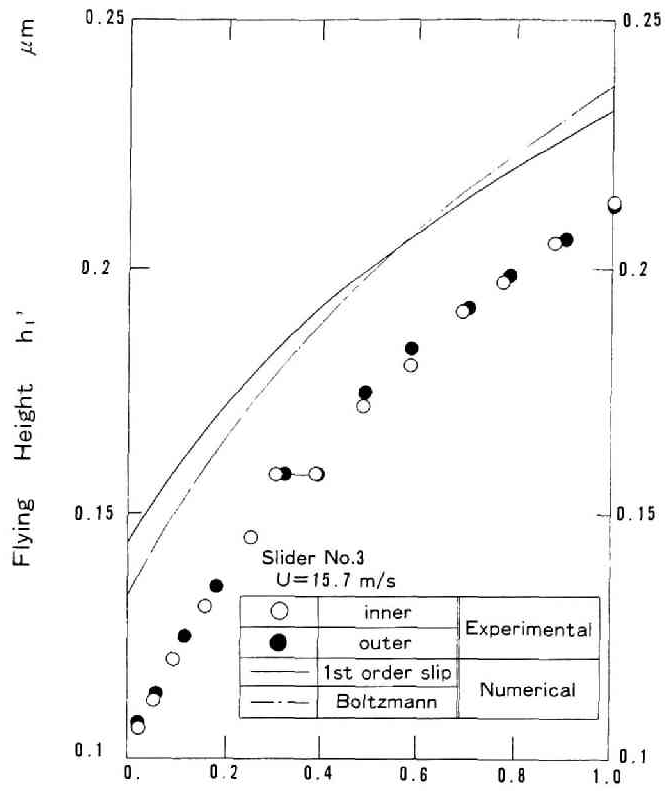


(a) スライダNo. 1



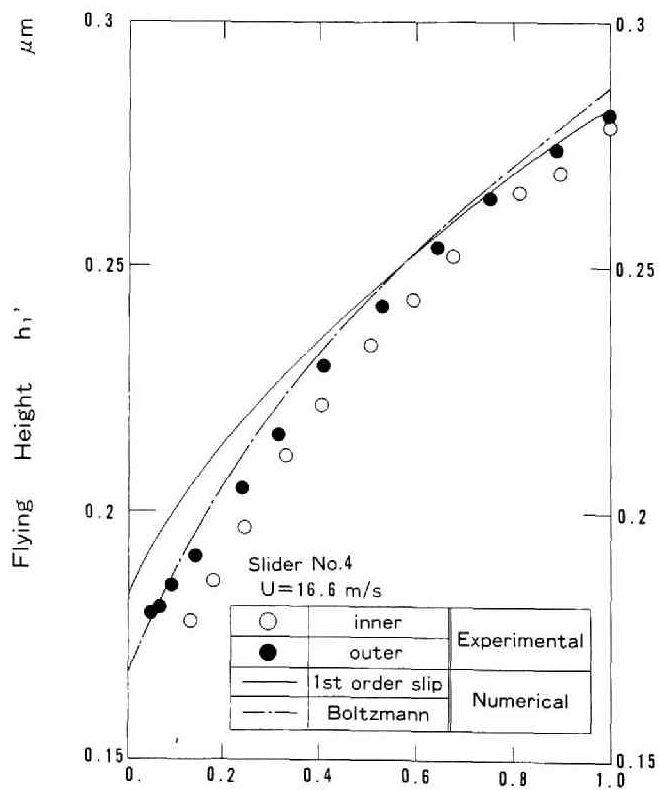
(b) スライダNo. 2

図6-10 ヘリウムモル比とテーパ端浮上すきまの関係



(He 100%) Mole Ratio of Air α (Air 100%)

(c) スライダNo. 3



(He 100%) Mole Ratio of Air α (Air 100%)

(d) スライダNo. 4

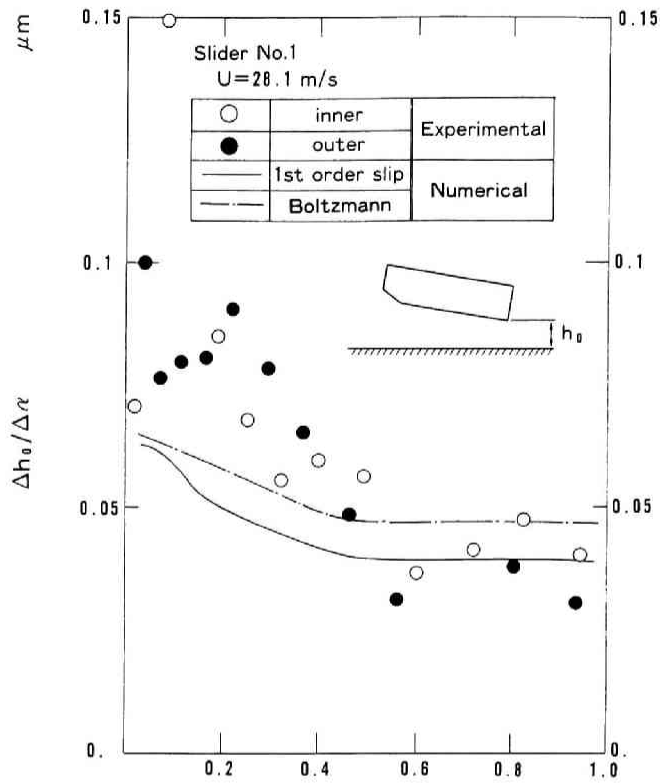
図6-10 ヘリウムモル比とテーパ端浮上すきまの関係

ことが重要な問題となる。そこで、図6-11(a)~図6-11(d)、図6-12に、 α に対する浮上すきまの変化率 $\Delta h_0/\Delta\alpha$ もしくは $\Delta h_1'/\Delta\alpha$ をプロットした。このように表示することで、スライダ形状、支持点位置の等価的なずれなどに起因する実験結果と計算結果との間の絶対浮上すきまの差異の影響も除去できる。実験値に関しては、 α に対する連続的な浮上すきま変化の採取が困難であるため、隣接する実験値の差分から浮上量の変化率を求めた。 α に対する浮上すきま変化率は、かなり拡大して表示されているので、実験値のばらつきは大きいですが、 $\alpha=0.6\sim 1.0$ の間では、両者は比較的良好一致している。 α の減少とともに、明かに実験値が計算値を上回る傾向を示し、 $\alpha=0$ 近傍では一次スリップ流れモデルの予測値に対して、最大1.5~2倍程度の浮上量変化率となる。ボルツマン方程式に基づく潤滑方程式の計算結果は、一次スリップ流れモデルよりも実験値に近い予測を与える。

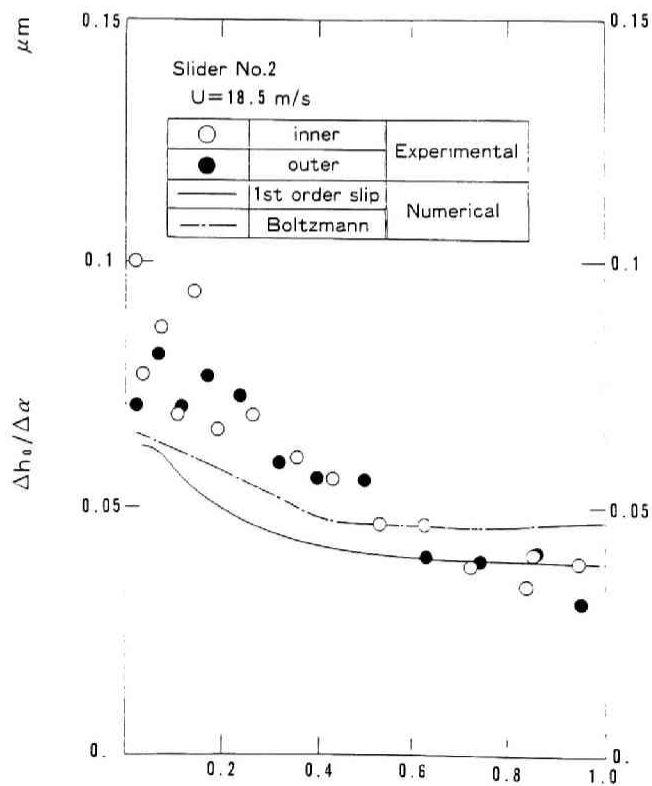
6.3.3 一次スリップ流れモデルおよび二次スリップ流れモデルによる計算結果との比較

本章では、実験結果と比較する理論計算としては、気体分子平均自由行程の影響を精密に考慮したボルツマン方程式に基づく一般化潤滑方程式による解と、一次スリップ流れモデルに基づく修正レイノルズ方程式による解を用いている。気体分子の運動量に関する適応係数 $\sigma=0.89$ を用いた一次スリップ流れモデル(修正レイノルズ方程式)は、本来の適用範囲を越えて、比較的正確に実験結果と対応することから、一種の実験式とも考えられる。

他の近似基礎式として、二次のスリップ流れを考慮した修正レイノルズ方程式が提案されており、これはHsia, Whiteらによって初めて導入された[602]。尾高らは、スライダの静的浮上特性を減圧空気中で測定し、実験結果と二次スリップ流れモデルによる計算結果とのよい一致が得られていると報告している[616]。なお、彼らは、気体の運動量に関する適合係数として、 $\sigma=1.0$ を用いている。Ruitzらは上記の2つのスリップ流れモデルとボルツマン方程式に基づく一般化潤滑方程式の計算結果を比較し、浮動ヘッドスライダの実用的な作動条件下では、二次スリップ流れモデルによる結果が、ボルツマン方程式に基づく潤滑方程式の結果に比較的近い予測を与えると報告している[617]。

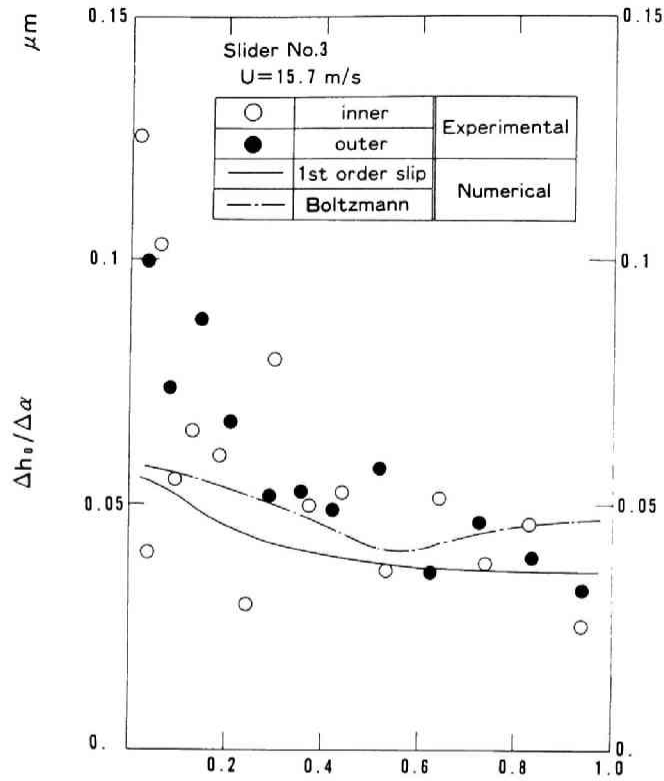


(He 100%) Mole Ratio of Air α (Air 100%)
(a) スライダNo. 1



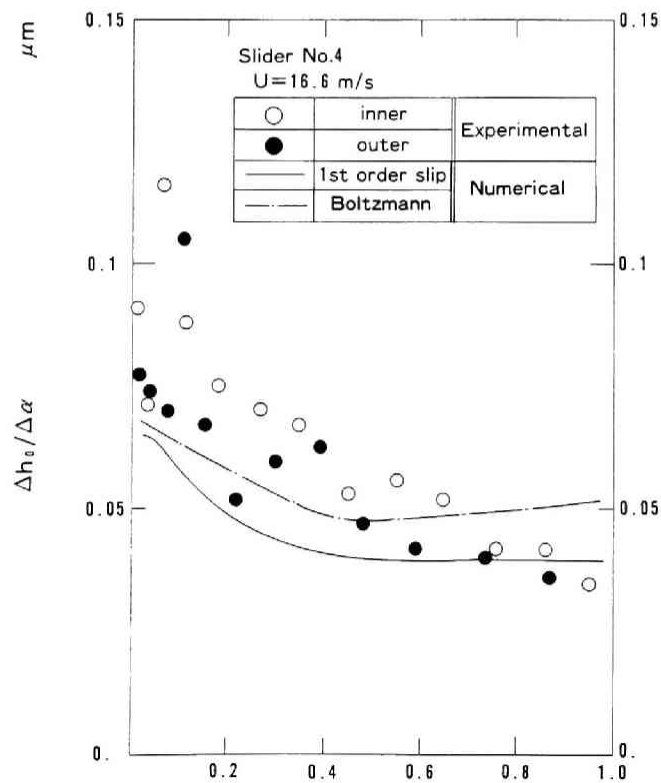
(He 100%) Mole Ratio of Air α (Air 100%)
(b) スライダNo. 2

図6-11 ヘリウムモル比と流出端浮上すきまの変化率の関係



(He 100%) Mole Ratio of Air α (Air 100%)

(c) スライダNo. 3



(He 100%) Mole Ratio of Air α (Air 100%)

(d) スライダNo. 4

図6-11 ヘリウムモル比と流出端浮上すきまの変化率の関係

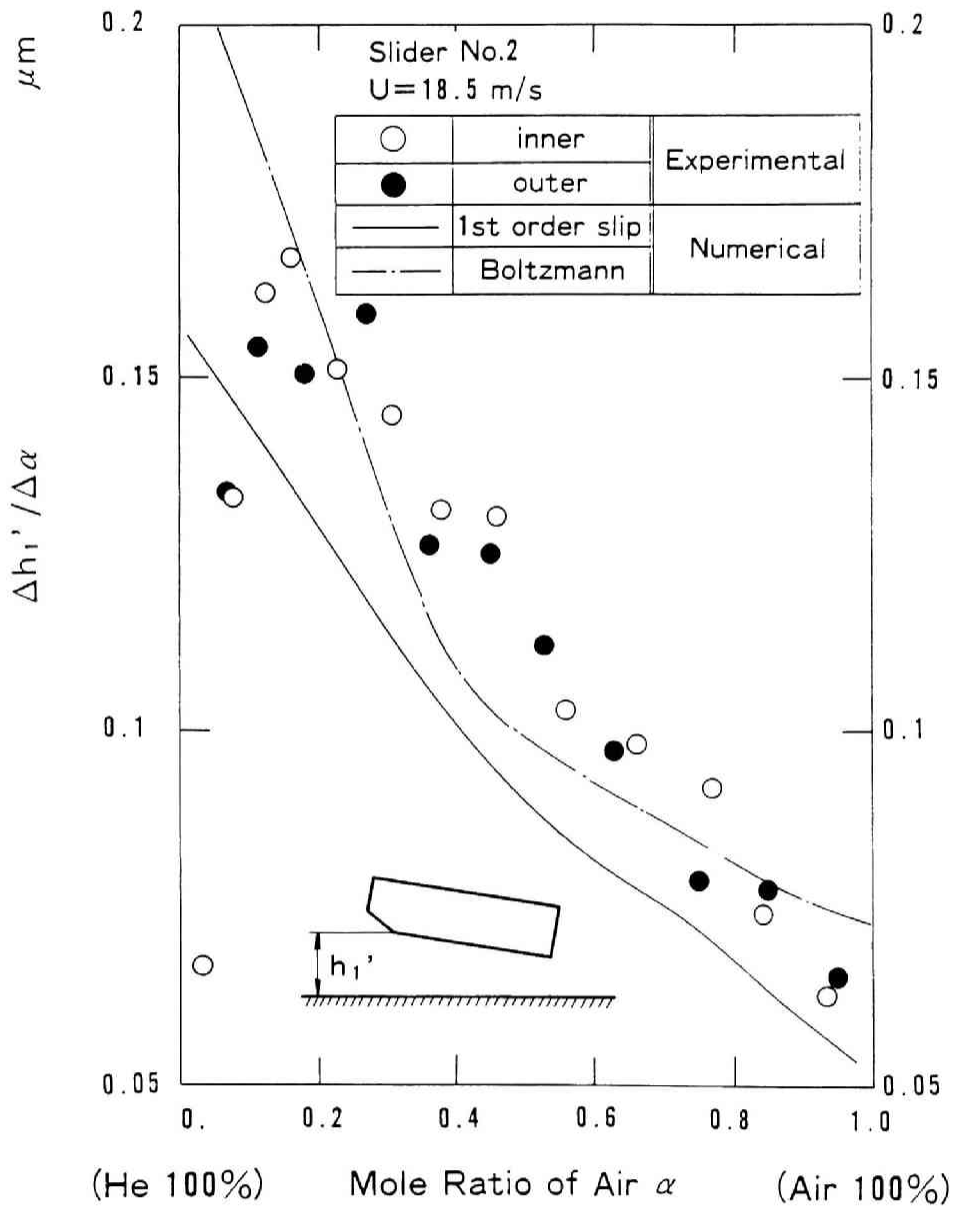


図6-12 ヘリウムモル比とテーパ端浮上すきまの変化率の関係 (スライダNo. 2)

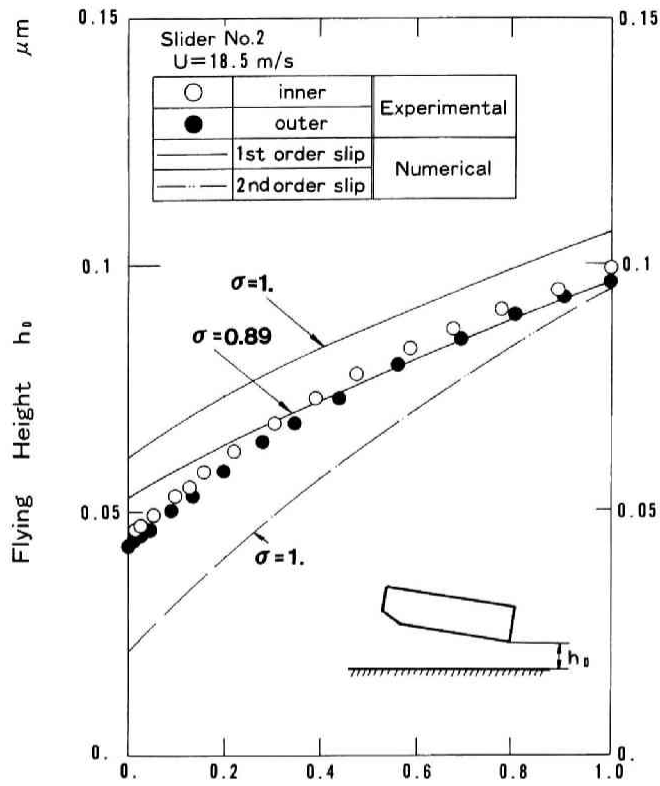
本項では、上記の一次および二次のスリップ流れモデルによる結果と実験結果を比較し、これらの理論モデルの浮上特性の予測精度を比較・評価する。ここでは、比較例として、スライダNo. 2の結果を用いた。図6-13(a)は、スライダ流出端での浮上特性の結果であり、図6-13(b)はテーパ端での浮上特性の結果である。なお一次スリップ流れモデルに関しては、 $\sigma = 1.0$ および 0.89 を、二次スリップ流れモデルに関しては、 $\sigma = 1.0$ を用いた。スライダ流出端の浮上特性については、少なくとも本スライダの作動条件(クヌッセン数 $M = 0.7 \sim 4.2$ 、圧縮性定数 $\Lambda = 4,400 \sim 21,000$)においては、一次スリップ流れモデル($\sigma = 0.89$)による結果は、実験結果と非常によい一致を示す。一方、二次スリップ流れモデルは、 α が $\alpha = 1$ から減少するに従って、実験結果との差異が増大し、 α の変化に対して定性的にも明らかに異なった傾向を示すことがわかる。これは、二次スリップ流れモデルが、流路コンダクタンスを過大に評価しているためである。テーパ端の浮上特性に関しては、二次スリップ流れモデルの方が、 $\alpha = 0$ 近傍では、実験結果とよく一致しているものの、本来近似度が高いはずの $\alpha = 1.0$ 近傍で、むしろ実験値との差異が増大するなど、近似精度は不十分であると言える。

6.4 結 論

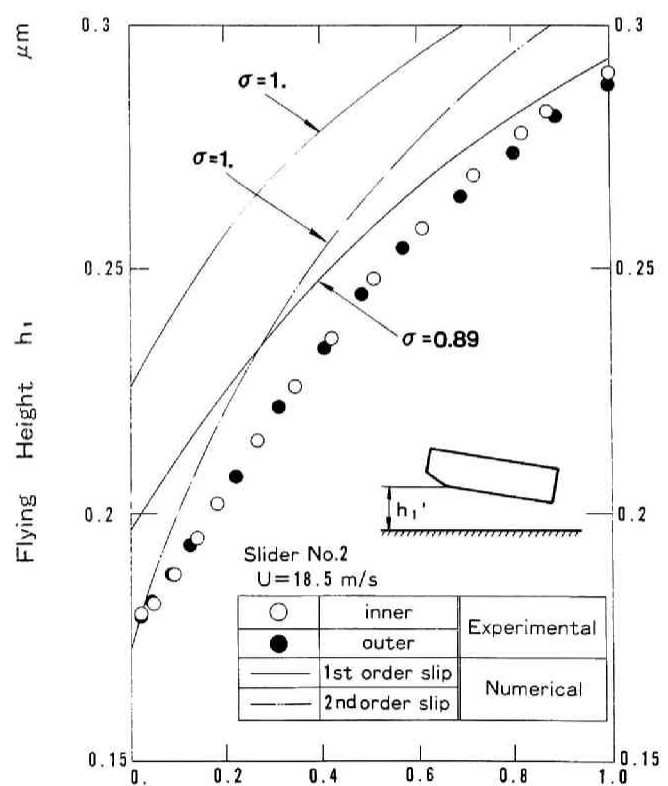
本章では、混合気体中の浮動ヘッドスライダの潤滑特性を明らかにする目的で、ヘリウム-空気混合気体中でのスライダの静的な浮上特性の実験的検討を行った。本研究では、スライダ長さ 1 mm および 2 mm の小形スライダを用い、混合気体中において、 $0.1\ \mu\text{m} \sim 0.04\ \mu\text{m}$ の浮上すきまでの浮上実験を行った。そして、実験結果と、混合気体を等価的な粘度と等価的な分子平均自由行程を有する単一気体と見なし、一次スリップ流れモデル(修正レイノルズ方程式)およびボルツマン方程式による一般化潤滑方程式を適用して求めた解析結果との比較を行った。

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) ヘリウム-空気混合気体中のスライダの静的な浮上特性は、一次スリップ流れを考慮した修正レイノルズ方程式により、混合気体中の空気のモル比 α が、 $0.6 \sim 1$ の間で、かなり精度よく予測することが可能である。



(a) ヘリウムモル比と流出端浮上すきまの関係



(b) ヘリウムモル比とテーパ端浮上すきまの関係

図6-13 一次スリップおよび二次スリップを考慮した修正レイノルズ方程式による解析結果と実験結果との比較

- (2) α が0.6以下では、流出端での浮上すきまおよびピッチ角は、一次スリップ流れモデルによる計算結果を下回る傾向を示す。 α に対する浮上すきまの変化率は、一次スリップ流れモデルによる予測を上回る傾向を示す。
- (3) 気体の分子平均自由行程の影響をより精密に考慮したボルツマン方程式による一般化潤滑方程式による結果は、一次スリップ流れモデルに比して、 α の全領域で実験結果と定性的によい一致を示す。
- (4) α に対するスライダ浮上特性に関して、二次スリップモデルによる計算結果は、一次スリップモデルによる計算結果および実験結果とは、明らかに異なる傾向を示し、近似式としての精度は不十分である。

第7章 ヘッド・媒体の接触に関する 実験的検討

7.1 緒言

磁気ディスク装置用の浮動ヘッドスライダは、磁気媒体と非接触で作動することを前提に設計され、実用に供されている。現用のほとんどの装置は、浮動ヘッド周辺の機構を簡易な構成とすることが可能なことから、装置の起動または停止時には、スライダと媒体が接触摺動しながら浮上もしくは停止するコンタクト・スタート・ストップ（CSS）方式を採用しており、CSS動作を行う時の接触耐久性は、装置の信頼性を評価する上で、重要な指標となっている。一方、磁気媒体は、従来の塗布媒体から、表面の平坦・平滑性が良好で、スライダの微小浮上による高密度記録が可能なスパッタあるいはメッキなどの連続薄膜媒体が主流となってきた。しかし表面の平坦・平滑性が良好であることが、逆に装置の停止時にスライダが媒体に吸着する、もしくは起動時にスティクションを生じるなどの問題を露呈しており、これを回避する目的で、媒体表面に人工的に数100オングストロームの表面あらさを形成する粗面化（テクスチャリング）などの処理が施されている場合が一般的である。従って、例えば、浮上すきまの精密計測に用いられる高精度研磨を施したガラスディスクなどの場合に比べ、実効的により高い浮上すきままで確率的な接触を生じる可能性がある。

上述のように、CSS動作時の摺動耐久性は、装置構成の上で信頼性の重要な評価基準であるが、定常のディスク回転数における作動状態での接触は、たとえ接触頻度が小さくとも、相対速度が大きく、衝撃エネルギーも大きいため、ヘッドスライダおよび媒体構成部材に対する疲労蓄積を促進し、最終的には疲労破壊をもたらすものと考えられる。従って、高感度なヘッドスライダと媒体との接触検出と、その時に両者の受ける衝撃力の定量化は、装置の信頼性を確保する観点から、非常に重要である。

従来用いられてきたヘッドスライダと媒体の接触検出方法は、大きく分けて以下の二通りがある。第一は、ヘッドスライダと媒体の接触によって生じる音響弾性波を検出する方

法[701],[702],[704]であり、これには、弾性波によって誘起される歪を電圧に変換する圧電（ピエゾ）式接触センサが用いられる。第二の方法は、導電性のヘッドスライダと媒体を用い、両者の接触による導電度（コンダクタンス）を測定する方法[703]である。接触時の音響弾性波を検出する方法は、実際のヘッド・媒体インタフェースを変えることなく、そのまま適用することができ、現在では、実用的な手法として、広く用いられるようになっている。北らは、浮動ヘッドスライダの支持機構を音響弾性波の導波路として用い、これをヘッドアームに延長し、ここに設置した音響弾性波センサ（AEセンサ）によって、ヘッドスライダと媒体の接触を検出する手法を示した[701]。また彼らは、実媒体におけるCSS動作時のスライダの運動状態に関して解析的、実験的検討を行うとともに、人工的に形成した突起を有する媒体を用いて、媒体面に存在する突起高さの分布を定量化することが可能であることを示した。一方、近年では、小形のピエゾ素子を用いた接触センサを、直接スライダ背面や支持機構の負荷梁に搭載し、接触検出感度を高める手法[702],[704],[705]も研究されている。加えて、このような小形のピエゾ素子の分極方法の改良、ヘテロダイナミック検波を応用した信号処理によるS/N比の改善[704]、スライダを含めた素子の振動解析[705]などにより、検出感度の向上が図られている。接触コンダクタンス法は、Tseng、Talkeらによって、ヘッド・媒体インタフェースの特性を評価する手法として導入された[703]。彼らは、特殊な金属製ディスク、金属製のトライパッドスライダを組み合わせて接触頻度を計測し、スライダの浮上特性と関係づけて比較・検討した。

上述のように、音響弾性波を検出する手法は、ヘッド・媒体インタフェース変えることなく測定、評価を行うことが可能な利点を有する半面（ただし、スライダ、支持機構に接触検出素子を直接搭載する方法では、機械特性に若干の影響がある。）、機械振動を電気信号に変換して接触を検出するため、検出感度を向上するには限界がある。一方、接触コンダクタンス法は、高速、高インピーダンスの検出回路系を用いれば、原理的には、かなり高い感度で接触を検出することが可能であるが、媒体の導電化処理を必要とするなど、実際のヘッド・媒体インタフェースに近い状態で評価を行うためには、細心の注意を要する。

本章では、ヘッドスライダと媒体の間の確率的な接触を高精度に測定するとともに、現在、広く用いられているピエゾ接触センサの感度特性を評価することを目的として、接触コンダクタンス、音響弾性波検出の両方法を用いて同一系で測定し、その結果を精密に比較する。また、接触頻度とスライダの浮上すきまとの関連についても、検討を加える。

7. 2 実験方法および装置

図7-1に実験系の概略を示す。基本構成は、媒体を支持・回転させる精密ボールベアリングスピンドル、スライダを精密に位置決めする微動機構および接触検出用アンプ・信号処理系などから成る。精密な接触コンダクタンスを測定するため、スピンドルの端部にはアースパッドを設置し、スピンドルハウジング自体も接地している。ヘッドスライダと媒体との間の接触コンダクタンス変化（接触パルス）およびピエゾ接触センサによる音響弾性波の信号は、各々専用のアンプで増幅し、接触コンダクタンスに関しては、規定のしきい値を上回る変化分を1回の接触とみなして、単位時間当りの接触回数をカウンタで計数する。ピエゾ接触センサの信号は2つに分岐し、一方はFFTアナライザによって共振ピークを常に追従することによって、正確なピーク値を測定できるようにしている。他方は、実効値電圧計により、全周波数帯域の信号成分の実効値を測定するようにしている。これらのデータは、コンピュータ処理され、スライダの走行速度に対する接触回数もしくは信号出力として、自動表示される。

供試浮動ヘッドスライダ機構の詳細を、図7-2に示す。スライダ部材であるアルミナ・チタン・カーバイトは導電性であるため、導電性を与えるための特別な処理は不用であり、そのまま接触プローブとして用いることができる。スライダと支持機構は絶縁接着を行い、支持機構自体も接地している。媒体とスライダ間の印加電圧は、10mV程度に設定したが、これは0.01 μ m以下の空気膜の絶縁破壊電圧に相当し、接触コンダクタンス法により、必要な接触検出精度を確保することが可能である。接触コンダクタンスの信号（パルス）増幅用のアンプの周波数特性を図7-3（a）に、その回路構成を、図7-3（b）に示す。接触コンダクタンス増幅用アンプは、スライダと媒体の相対速度が20～30m/s程度で少なくとも突起径程度の接触距離を移動する時間に相当するパルス信号に対して応答する周波数応答性（数10MHzのオーダー）が必要とされるが、本アンプは、図7-3（a）の周波数特性に示す通り、140MHz（3dBダウン）の追従帯域を有しており、この条件を十分満たすものである。

図7-4は、スパッタコーティングによるタングステンの金属薄膜をその表面に形成した連続薄膜媒体の表面形状を、非接触の三次元表面形状測定器によって測定した結果であ

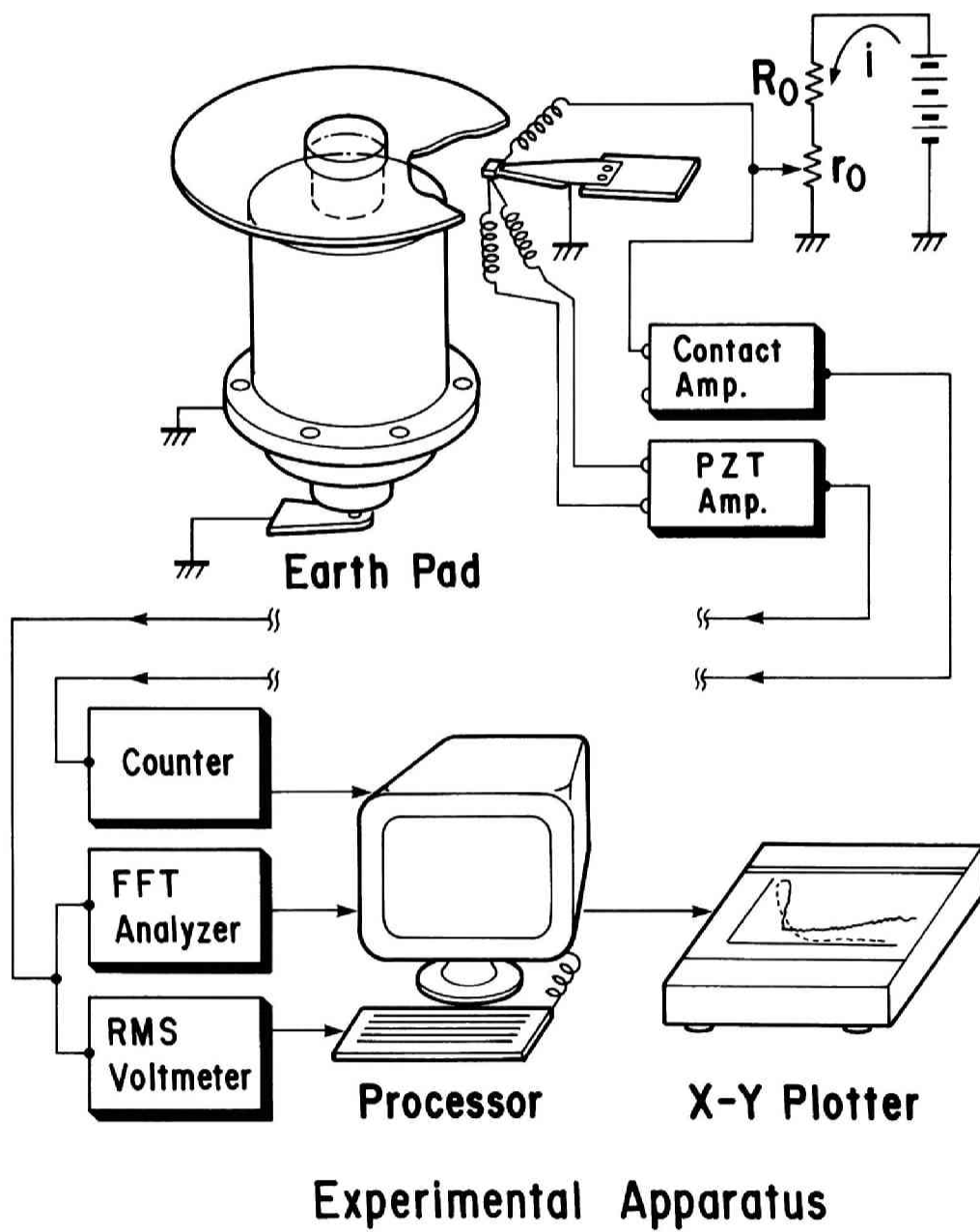


图 7-1 实验装置

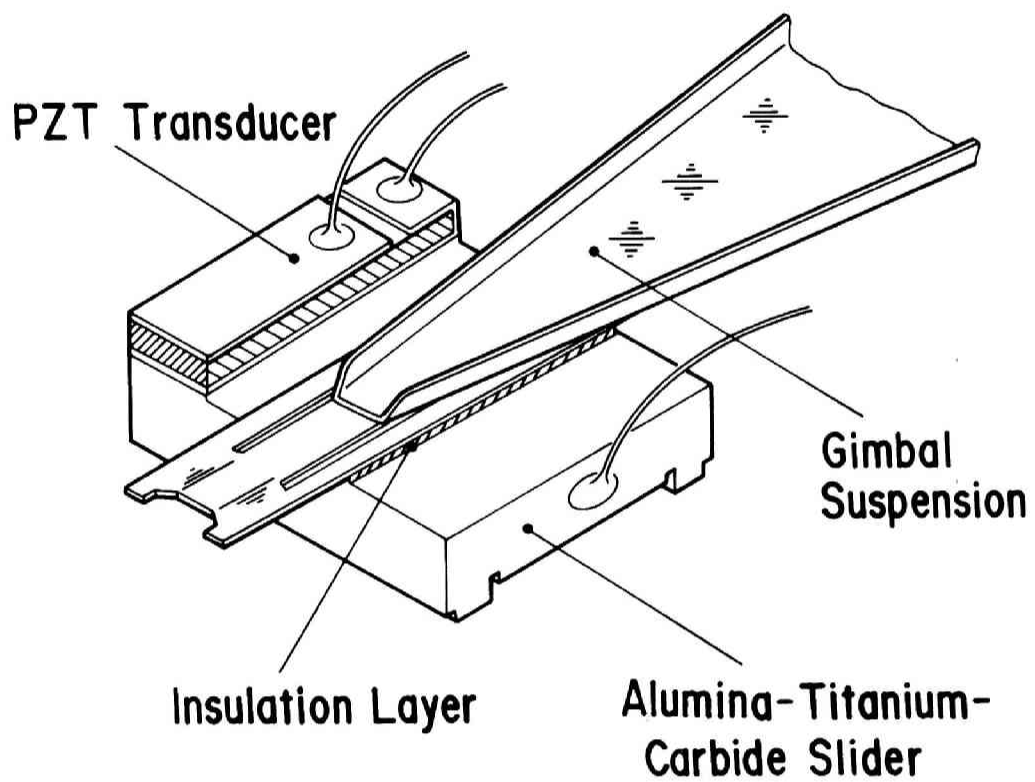
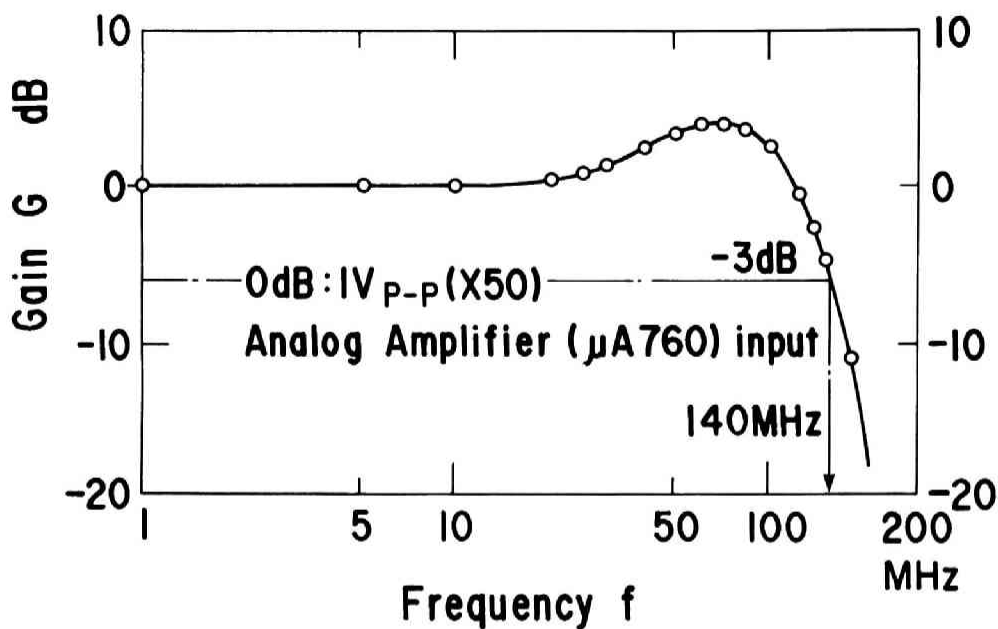
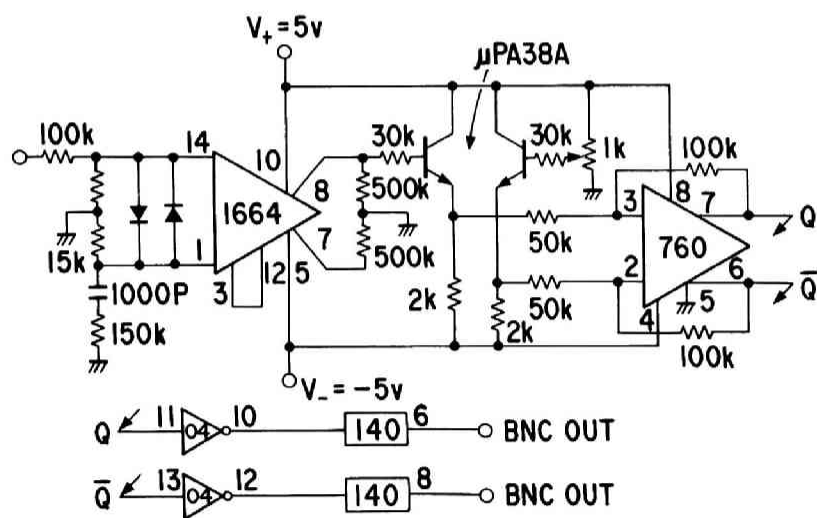


図7-2 供試浮動ヘッド機構

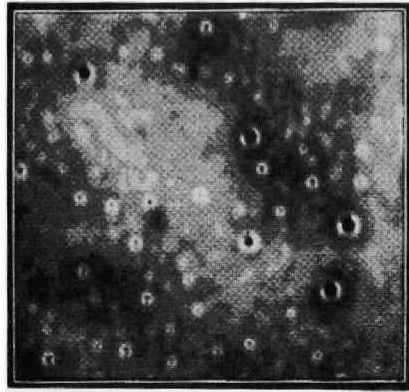


(a) 接触検出回路の周波数特性

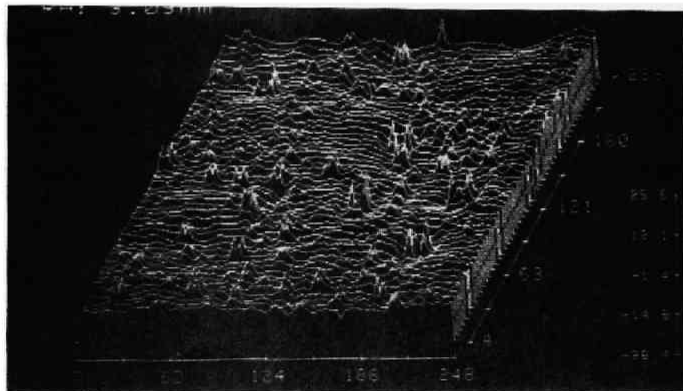


(b) 接触検出回路

図7-3 接触コンダクタンス法による接触検出系



Contour Map



**Three-Dimensional Topography
(Tungsten Coating)**

**Surface Configuration of Spattered
Thin-Film Medium**

図7-4 金属膜を被覆したスパッタ薄膜磁気媒体の表面形状

る。ヘッドスライダと媒体の吸着を防止するため、媒体表面の SiO_2 保護膜には特殊な加工を施すことで、数 μm の裾野を有するクレータ状の突起を形成している。ヘッド・媒体インターフェイスに関しては、できる限り実際の系に近い状態を実現するとともに、繰り返しの測定・評価を行ってデータの信頼性を高める目的から、媒体表面には数オングストロームの厚さの液体潤滑剤による潤滑層を形成した。潤滑層が極めて薄いことから、接触コンダクタンス法による接触検出には、ほとんど影響しないことを、別途確認している。

7.3 実験結果

7.3.1 ピエゾ接触センサによる結果

接触コンダクタンス法と音響弾性波検出法の比較に先立ち、音響弾性波検出法自体の精度の評価を行った。最も接触検出の感度を高くできる共振点の周波数を同定するため、図7-5に示すようにスライダを接触走行させた状態で、FFTアナライザにより、ピエゾ接触センサの出力スペクトラムを測定した。180、340、550、780kHzに共振点が観測されるが、本章では、比較的输出の高い550kHz以下の共振点を選択し、それらの出力と走行速度との関係を調べた。

まず、図7-6(a)に、ピエゾ接触センサの出力の全帯域に亘る出力の実効値とスライダ走行速度との関係を示す。供試媒体上でスライダを浮上させた時の正確な浮上すきまの同定は困難であるが、これの補助データとして、別途、ガラスディスクを用い、同一スライダの浮上すきまを測定した結果も併せて示す。スライダ走行速度が減少するのに伴って出力の実効値も漸減し、走行速度 $U=12.5\text{m/s}$ で最小となった後、急激に増加する。ここでのスライダ走行速度を、接触開始速度と定義し、便宜的にスライダ浮上特性に対応させてみると、接触検出を開始する浮上すきまは、 $0.083\mu\text{m}$ となる。一方、図7-6(b)には、52、180、340、550kHzの各共振点(但し、52kHzは、図7-5に示すスペクトラムには明確に観察されてない。)における出力を、バンド幅100Hzの狭帯域フィルタを經由して測定した時のスライダ走行速度と共振点の出力の関係を示す。なお、これらピエゾ接触センサの共振周波数は、スライダの浮上状態によって、若干変動するため、共振周波数を中心に、 $\pm 10\text{kHz}$ の幅で共振点を追従させ、

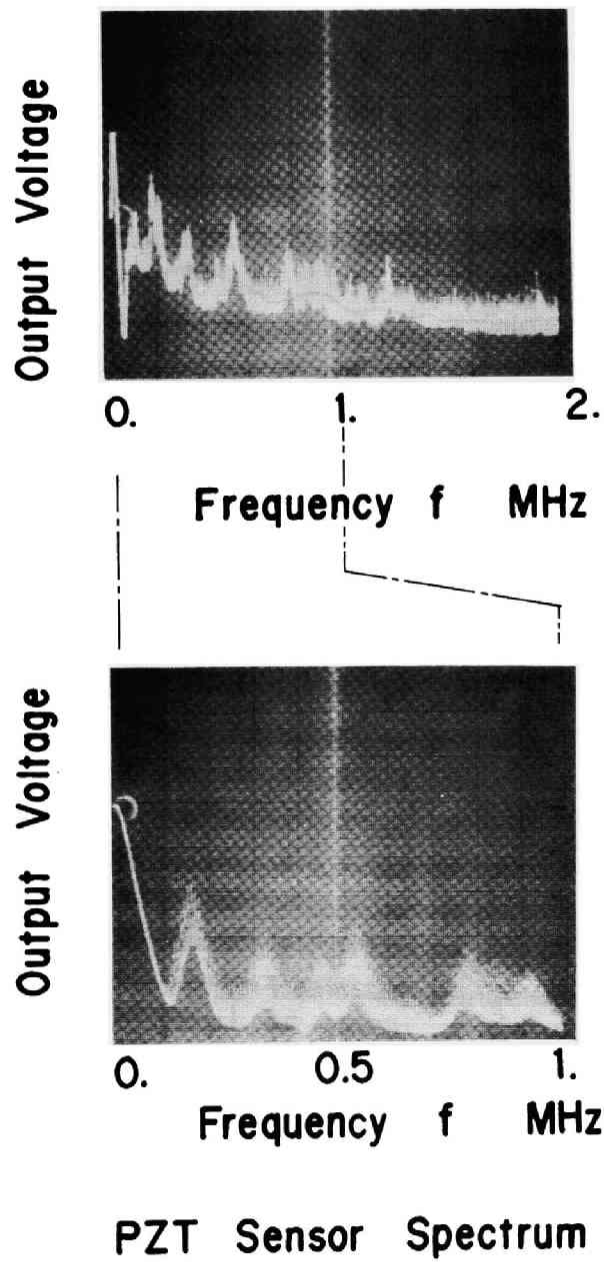
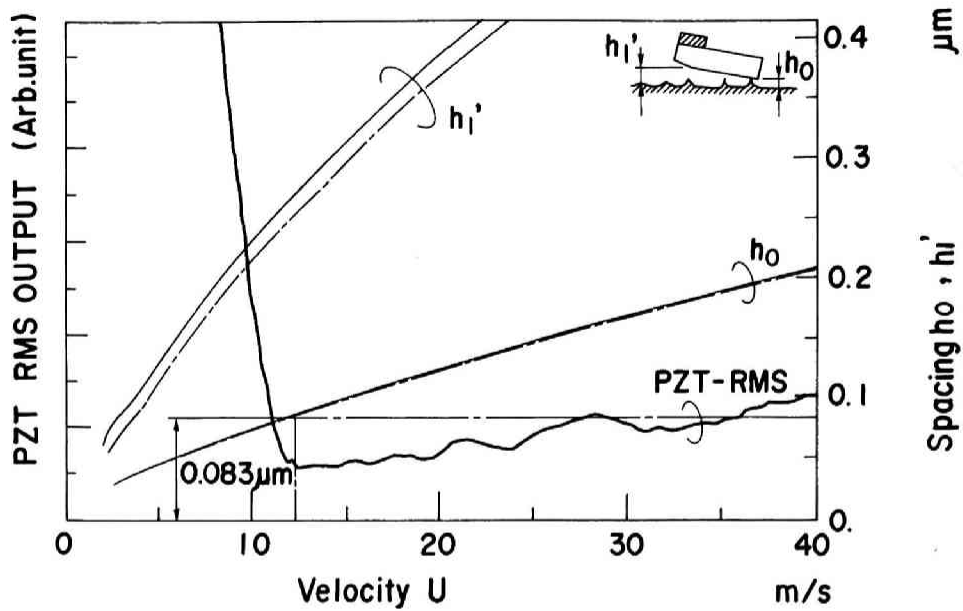
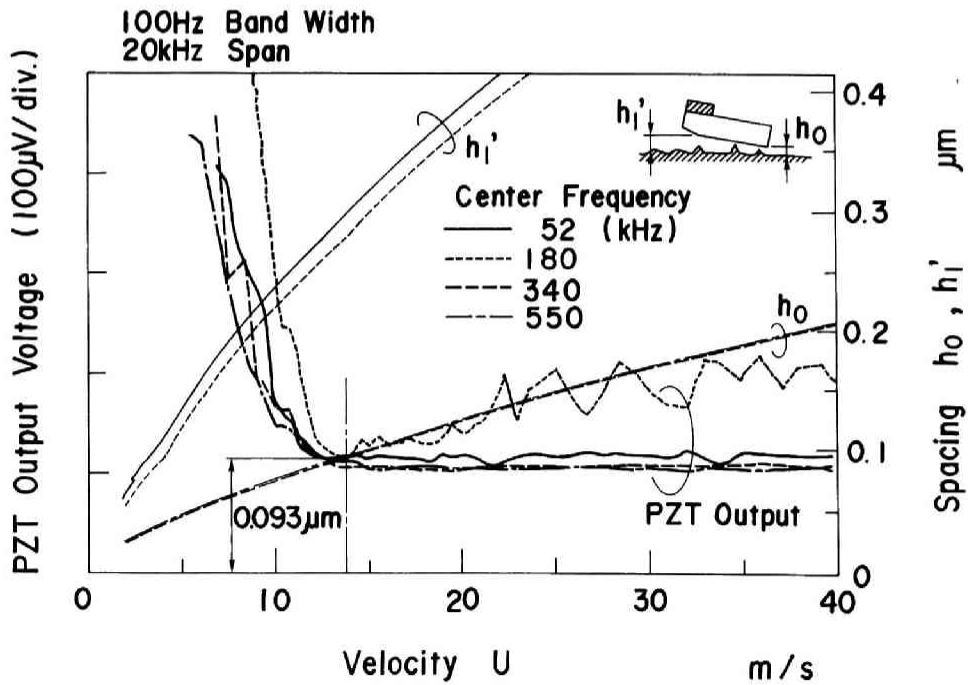


図7-5 ピエゾ接触センサの出力信号のスペクトラム



(a) ピエゾ接触センサ出力の実効値



(b) ピエゾ接触センサ出力の共振ピーク値

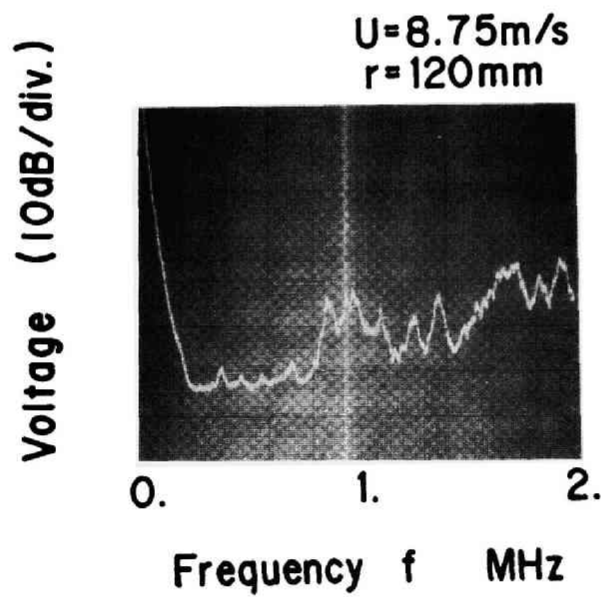
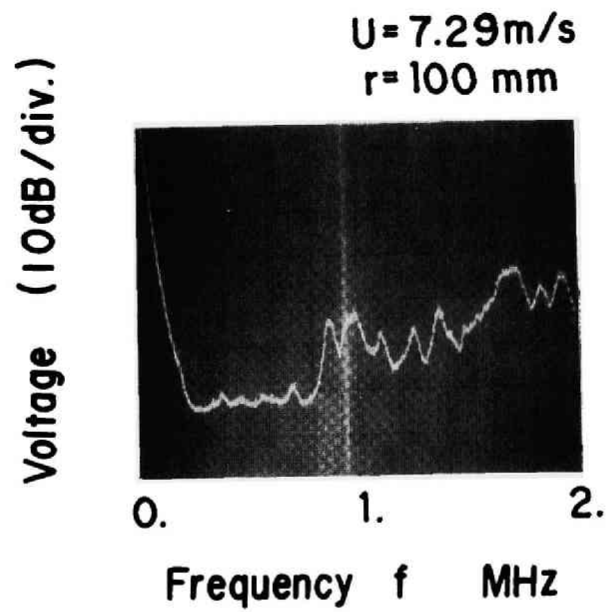
図7-6 ピエゾ接触センサの出力信号の実効値、共振ピーク値とスライダ走行速度との関係

常に正確な共振点のピーク出力を検出できるようにしている。各共振点の出力は、やはり走行速度が減少するのに伴って漸減し、一旦極小値をとった後、急増する。これら、ピエゾ接触センサの共振点の出力特性のうち、 180 kHz の特性が走行速度 $U = 13.5\text{ m/s}$ と最も速い走行速度で極小値を示した後、急増しており、この特性を接触検出に用いた時、最も感度を高くできることが分かる。これに関して、同様にスライダ浮上特性と対応させれば、接触検出を開始する浮上すきまは $0.093\text{ }\mu\text{m}$ となり、実効値を用いた場合と比較すると、約 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 高い浮上すきまから接触検出が可能となることになる。以上のように、最も感度の高い接触時の出力特性を有する共振点を選択し、その共振周波数を追従してデータを採取する手法により、接触検出の精度を向上させることができる。

7.3.2 接触コンダクタンス法と音響弾性波検出法の比較結果

次に、接触コンダクタンス法を用いて、スライダの走行速度とスライダと媒体との接触頻度を評価するとともに、音響弾性波検出法と同時に同一条件において接触検出特性を比較し、音響弾性波検出法の接触検出感度を評価することとした。本測定には前節の実験とは異なる供試スライダ機構を用いたが、前節と同様の手法に基づき、最も感度の高い共振点を選択し、その特性を用いて接触検出を行った。図7-7に走行速度を変えてスライダを接触摺動させた時のピエゾ接触センサのスペクトラムを示す。 1 MHz 以下の共振ピークは比較的小さく、 $1\sim 2\text{ MHz}$ の間に顕著なピークが観察される。そこで、これら複数の共振点のうち、最も接触検出の感度が高い 0.9 MHz および 1.8 MHz の2つを選択し、接触コンダクタンス法による結果と比較した。

図7-8は、ピエゾ接触センサの 0.9 MHz の共振点の出力特性と接触コンダクタンス法による 500 ms 当りの接触頻度の特性を、スライダ走行速度に対して示したものである。別途、ガラスディスクを用いて測定したスライダの浮上特性の結果も併記した。ピエゾ接触センサの出力は、走行速度 $U = 15\text{ m/s}$ あたりから急増する特性を示している。(浮上すきまで、 $h_0 = 0.088\text{ }\mu\text{m}$ に相当する。)一方、接触コンダクタンス法による接触頻度は、スライダ走行速度の減少に対して緩やかに増加するが、 $U = 10\text{ m/s}$ を下回ったあたりから、急激に増加する傾向を示す。ピエゾ接触センサの接触検出の開始速度($U = 15\text{ m/s}$)と接触コンダクタンス法による接触頻度とを対応させてみると、ピ



PZT Output Spectrum
(2MHz Span, 30kHz Band Width)

図7-7 接触コンダクタンス法と併用したピエゾ接触センサの出力スペクトラム

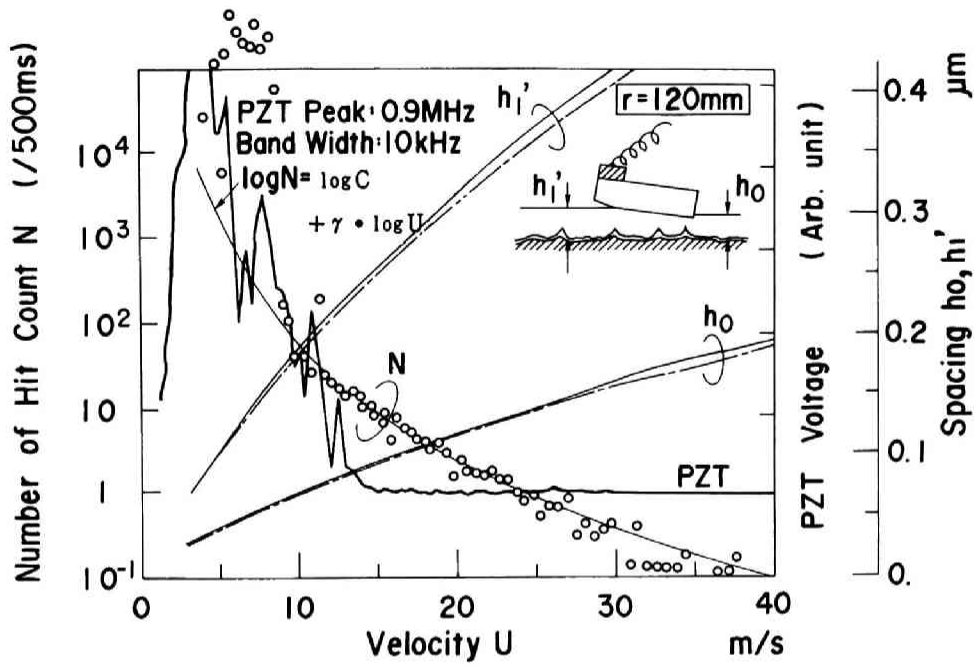


図7-8 スライダ走行速度とピエゾ接触センサ出力、接触コンダクタンス法による単位時間当りの接触回数、浮上すきまとの関係

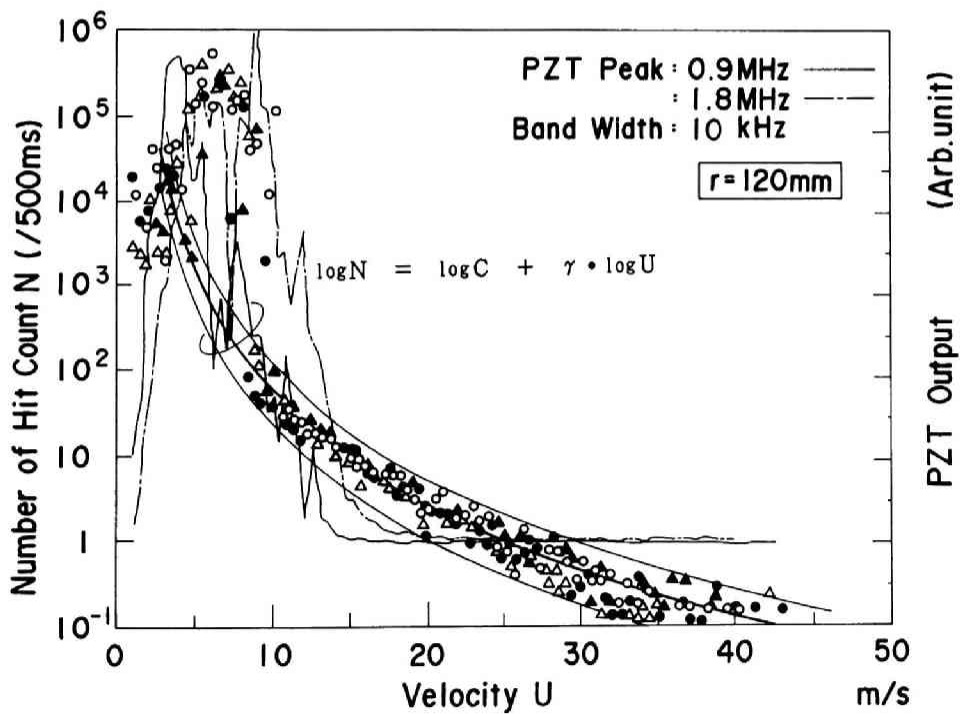


図7-9 接触コンダクタンス法による単位時間当り接触回数のばらつき

エゾセンサが接触を検出し始める時の接触頻度は、10回/500ms(20回/s)程度となり、 piezo接触センサでは、これ以上の衝撃力がスライダに加えられて、初めて接触を検出できることになる。また接触コンダクタンス法の結果によれば、例えばスライダ走行 $U \geq 30 \text{ m/s}$ 、浮上すきま $h_0 \geq 0.15 \mu\text{m}$ の条件においても、スライダと媒体との接触は完全にゼロではなく、数秒間に1回程度の確率的な接触(もしくは面と面との極めて至近距離への接近)の機会が存在することを示している。

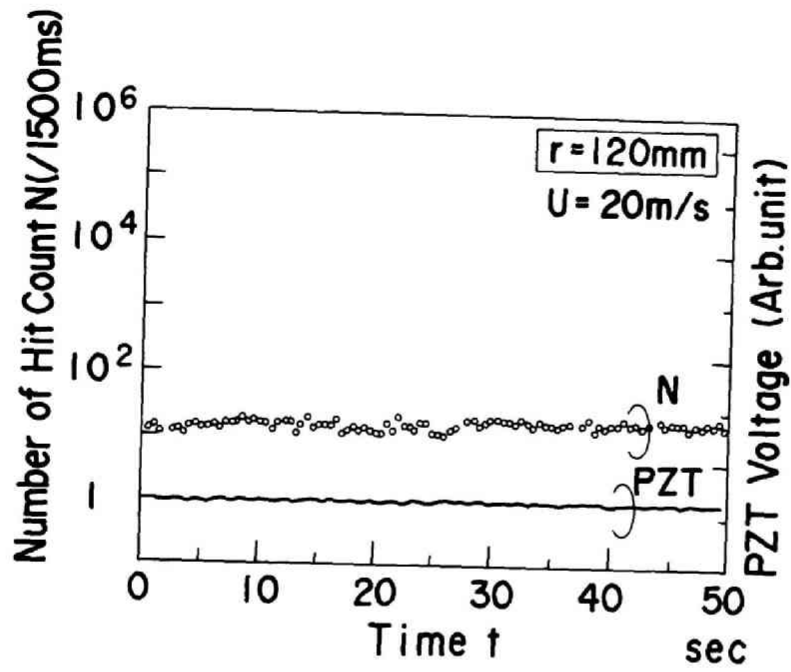
接触頻度 N の特性を、定量的に把握するため、接触頻度の測定点を、スライダ走行速度 U と接触頻度 N について両対数表示した時に直線となる次式でカーブフィットする。

$$\log N = \log C + \gamma \cdot \log U \quad (7-1)$$

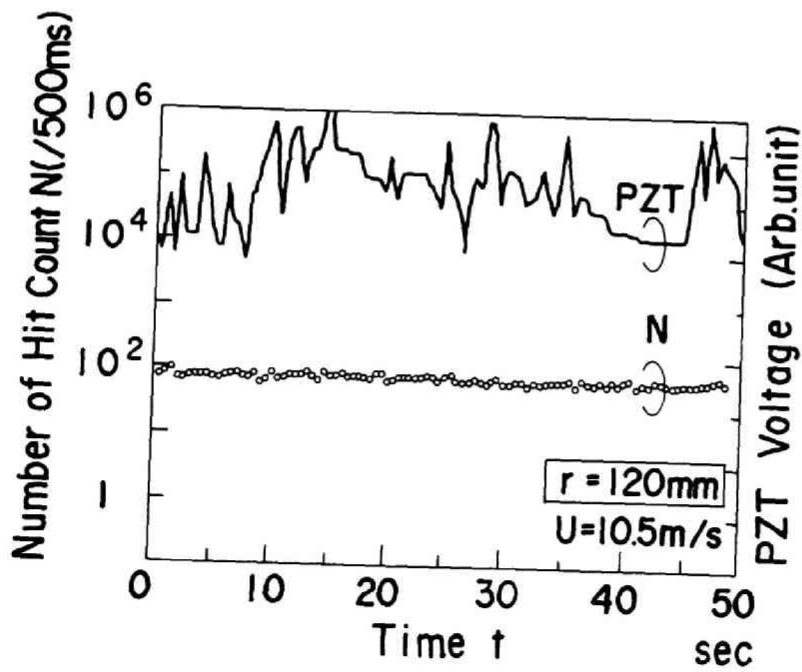
ただし、 C 、 γ ($= -4.55$)は定数である。 $U \geq 10 \text{ m/s}$ にプロットされる接触頻度の測定結果は、このカーブ(図7-8に実線で表示)にかなりよく乗っており、接触頻度は、それが比較的少ない範囲では、走行速度に対して式(7-1)に示すきわめてシンプルな関係(べき乗関数)で表現できることが分かる。

図7-9は、接触頻度の特性の再現性を確認するため、同一トラックにおいて、数回のデータ採取を行い、その結果を重ねて表示したものである。参考までに、piezo接触センサの 0.9 MHz 、 1.8 MHz の共振点の出力特性も併記した。(piezoセンサに関しては、 1.8 MHz の点の方が、接触検出感度がやや高い。)試行ごとに接触カウント数は若干のばらつきがあるが、スライダ走行速度 $U \geq 10 \text{ m/s}$ の範囲では、概ね式(7-1)に示す曲線に集中して分布していることが分かる。

図7-10は、スライダ走行速度を $U = 20 \text{ m/s}$ 、 $U = 10.5 \text{ m/s}$ の二種類を選択して固定し、接触頻度の経時変化を測定した結果である。 $U = 20 \text{ m/s}$ の場合には、平均6回/秒、 10.5 m/s の場合には、平均200回/秒程度のカウント数を示し、しかも50秒程度の測定時間内では、ほぼ一定値を保っていることが分かる。一方、piezo接触センサの共振点での出力特性も併記したが、走行速度 10.5 m/s では、その出力は、時間とともにかなり激しい変動を示す。



(a) スライダ走行速度20m/sの場合



(b) スライダ走行速度10.5m/sの場合

図7-10 定常浮上状態における単位時間当たりの接触回数の時間変化

接触頻度はスライダ、媒体に加わる衝撃に起因する表面の疲労蓄積の指標と見ることが出来る。一方、浮上すきまは、装置の記憶容量に関連する線記録密度を左右する重要なパラメータである。従って、浮上すきまと接触頻度との関係は、装置の信頼性含めた性能を評価する上で最も関心の高い情報であると言える。そこで、本章では以下の仮定のもとに、浮上すきまに対する接触頻度の近似評価を行う。

まず、接触頻度 N を規定する要因としては、実際には多くの要因が複雑に関わっているものと考えられるが、ここではスライダ走行速度 U と浮上すきま h_0 のみに着目し、 U に関しては N に比例、また h_0 に関しては h_0 の α 乗に比例するとの仮定を置く。

$$N \propto h_0^\alpha \cdot U \quad (7-2)$$

一方、スライダは通常は、定荷重動作をするため、浮上すきま h_0 と走行速度 U は一定の関係にある。浮上すきま h_0 は、走行速度 U により、式(7-3)に示すべき乗関数で近似できるものとして、図7-11に示すように、実験値に対してカーブフィットを行い、近似式を求めた。

$$h_0 \propto U^\beta \quad (7-3)$$

実験結果から求めた U のべき乗指数は、 $\beta = 0.751$ となった。これらより、接触頻度 N は、近似的に U のみの関数として、式(7-4)のように表される。

$$N = C \cdot U^{\alpha\beta+1} \quad (7-4)$$

なお、 C は定数である。式(7-4)の両辺の対数を取り、式(7-1)と比較すると、接触頻度の浮上すきまに対する依存性を規定するべき乗指数 α が求まる。

$$\log N = \log C + (\alpha\beta+1) \log U \quad (7-5)$$

$$\alpha\beta+1 = \gamma \quad (7-6)$$

本章の実験結果から求めた α の値は、 $\alpha = -7.39$ である。このことは近似的に、浮上

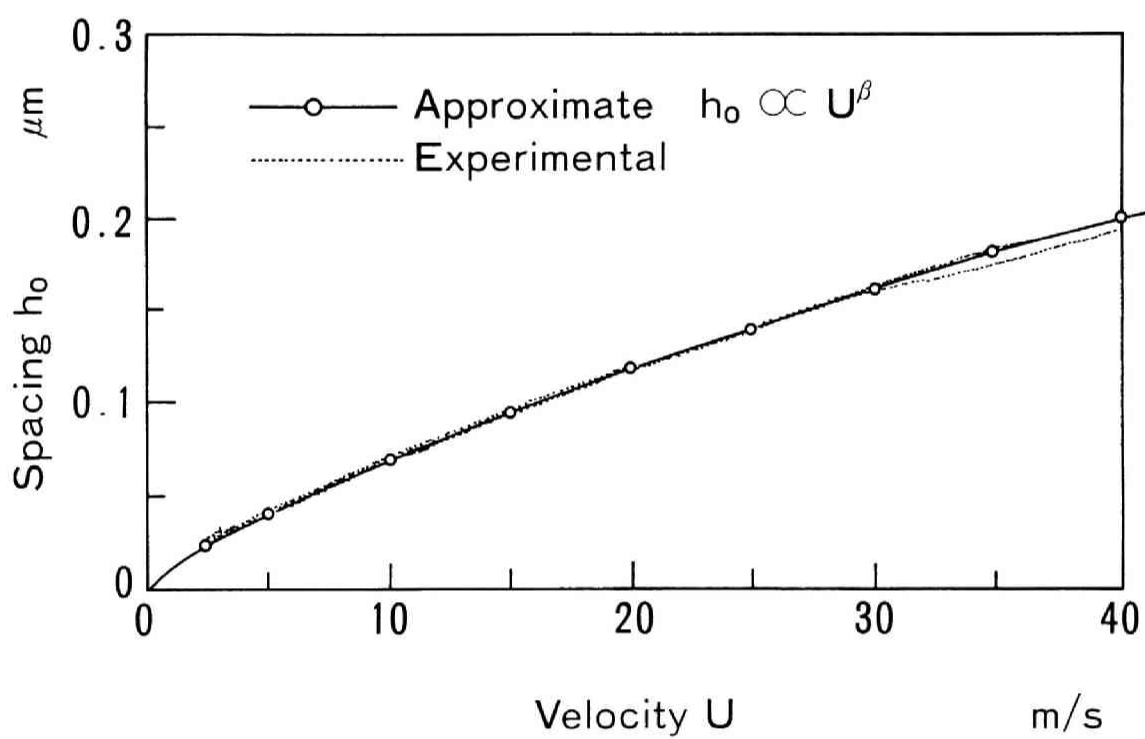


図7-11 スライダ浮上特性のべき乗近似

すきまの減少に伴って接触頻度が急激に増加することを意味しており、高密度記録を行うために、単純に浮上すきまを低減させることは、接触頻度を急増させ、装置としての信頼性を損なう危険を伴うと考えられる。

7. 4 結 論

本章では、浮動ヘッドスライダと媒体との接触を、高精度な接触検出が可能な接触コンダクタンス法を用いて測定し、浮上すきまと接触頻度との関係を検討した。また実用的に最も広く用いられている piezo 接触センサを用いた音響弾性波検出法による結果と、上記手法による結果とを同一条件で比較し、音響弾性波検出法の接触検出精度を評価した。本章で得られた結論を要約すると以下のようなになる。

- (1) 実際の媒体上で作動する浮動ヘッドスライダにおいては、完全な流体潤滑状態が実現されていると推定される場合にも、スライダと媒体の確率的な接触、もしくは両表面が、ごく至近距離に接近する機会が存在する。
- (2) 接触頻度の極めて高いスライダの摺動状態を除けば、接触頻度は、近似的にスライダ走行速度のべき乗関数で表現できる。
- (3) 接触頻度は、浮上すきまの変化に、きわめて敏感に依存する。本章で用いた吸着防止のために粗面化処理を施した連続薄膜スパッタ媒体の場合には、接触頻度はスライダの浮上すきまの約 -7.4 乗に比例して増大する。
- (4) 接触コンダクタンス法による接触頻度の特性と、piezo 接触センサを用いた音響弾性波検出法による出力特性とを比較し、音響弾性波検出法では、接触を検出するためには、単位時間当りの接触頻度が、あるしきい値以上必要であることを明らかにした。
- (5) また、piezo 接触センサの接触検出感度は、出力の全帯域の実効値を測定するより、共振点の出力を狭帯域のフィルタを通して検出する方が、感度を高くすることができる。

第8章 総括

磁気ディスク装置における性能の向上 – 特に記録密度の向上と信頼性の確保 – のためには、浮動ヘッドスライダの微小浮上量化と動作の安定化を実現することが最も重要な課題である。本研究は、このような観点から、浮動ヘッドスライダの浮上すきまの微小化に伴って発現する気体の分子平均自由行程、表面あらさ、作動流体の物性変化などが、その浮上特性に及ぼす影響を解明することを目的とするとともに、サブサブミクロンのすきまで作動するスライダの特性を評価するツールとして、浮上すきまの精密測定法を開発し、これを用いて、上記の要因がスライダ浮上特性に及ぼす影響の精密な実験的検討を可能としたものである。また、この浮上すきまの測定手法に基づき、種々の外乱に対する精密なスライダ動特性の評価、スライダと媒体の高精度な接触検出法、さらにこれを用いた接触頻度の特性に関する研究を進めた。

以下に、本研究で得られた結論を、各章ごとにまとめて示す。

第1章は序論であり、ここでは研究の背景、研究の目的、各章における具体的な研究の内容を述べた。

第2章では、気体の分子平均自由行程がスライダの静特性に及ぼす影響を明らかにする目的で、ヘリウムおよび減圧ヘリウム環境中での浮上特性に関する実験的検討を行った。気体の分子平均自由行程の影響を顕在化させるため、軽荷重でかつ圧縮性の影響の小さい小形スライダを用い、気体の分子平均自由行程に起因するスライダの浮上すきま減少率が65%、クヌッセン数が3までの範囲で実験を進め、修正レイノルズ方程式に基づく解析結果との精密な比較を行った。一方、より妥当な分子平均自由行程の影響を評価する指標として、局所クヌッセン数あるいは平均クヌッセン数を導入し、これらを用いた評価によって、従来から用いられてきたクヌッセン数が、分子平均自由行程の影響を過大に見積っていることを明らかにした。さらに、可視レーザー干渉を利用した高精度な浮上すきま測定系を用い、大気圧^{ヘリウム}空気中において、最小浮上すきま0.03 μ m、クヌッセン数8までの範囲で、スライダ浮上特性の精密な測定を行い、この範囲まで修正レイノルズ方程式により、実用設計上、十分な精度で浮上特性の予測が可能であることを実証した。

第3章では、気体分子平均自由行程、面あらさ、作動流体の物性などがスライダ浮上特

性に及ぼす影響の解明、さらに機構信頼性のみならず電磁変換における評価基準を与えるスライダ浮上すきまの精密測定法について述べた。可視レーザを微小なスポットに集光して浮上すきまに照射し、すきま変化に対応して変化する干渉光強度を光電検出することで、浮上すきまの精密測定を可能とする光学系の構成を示した。次に、測定誤差の原因となるレーザ光源の出力変動の抑圧、走行面・スライダ浮上面の反射特性が測定精度に及ぼす影響を詳細に評価した。さらに、機構振動が測定系に及ぼす影響を、コンピュータ処理によって補償するなど、高精度に、しかも短時間ですきまを自動測定する手法を示した。スライダ走行面に人工的に形成した矩形状の溝または突起を通過する時のスライダの過渡応答を測定し、その干渉光強度の検出結果から、100 kHz以上の広帯域に亘るスライダの動特性が測定可能であることを実証した。一方、装置搭載条件での浮上すきまの測定、もしくは品質管理上、多数のスライダの浮上特性を評価するためには、小形で簡易な測定系が必要となる。これに適用できる手法として、フォトリフレクタを用いた浮上すきま測定系を構成し、レーザを用いた高精度なすきま測定系との比較を行い、十分実用に耐える性能を有することを示した。

第4章では、実用装置に搭載される浮動ヘッドスライダ機構に関し、想定される各種の外乱に対する浮動ヘッド機構の精密な動特性の評価手法を示し、その結果を、数値計算シミュレーションと対比して述べた。従来、設計・評価に十分取り入れられていなかった支持機構の動特性も併せて精密に評価し、装置の各機構部の許容振幅・許容加速度の規定に反映した。シーク動作時のヘッドアームの振動に起因する浮上すきま変動など、実用装置の動作条件で測定・評価が困難な動特性については、機構部ごとに個別に測定した振動スペクトラムもしくは伝達特性を処理することにより、間接的ではあるが精密な評価が可能であることを示した。0.1 μm 程度の微小な平均浮上すきまにおいて、平均すきまを上回る高さの突起を通過する時の潤滑膜の非線形・大変位過渡応答についても、フォトリソグラフィによる微細な矩形状突起を形成した疑似媒体と精密なすきま測定系とを用い、これを測定可能とした。一連の0.1 μm 前後の超微小すきまにおける動特性の実験結果は、修正レイノルズ方程式に基づく数値解析結果とよく一致しており、スライダ動特性の設計・予測にも同方程式の適用が可能であることを実証した。

第5章では、浮動ヘッドスライダの浮上特性に及ぼす表面あらさの影響を明らかにする目的で、あらさを規則的な凹凸を有するパターンにモデル化し、これを形成したスライダを用いて浮上実験を行い、平均すきま理論に基づく近似解析と比較することにより、近似

理論の妥当性を検証することとした。このため、まず、矩形断面を有する一次元あらさに
関して、あらさ振幅、あらさピッチをパラメータに、平均すきまに基づく近似解析結果と
直接解析結果とを比較することで、定性的傾向ならびに近似精度を調べ、一次元あらさを
有する無限幅スライダの場合には、あらさ振幅の広い範囲で、近似解析結果が直接解析結
果と一致することを確認した。次に、従来、実験的に未確認であった規則性のある一次元
および二次元あらさを有するスライダを用いて浮上実験を行い、算術平均すきま、調和平均
すきまをあらさの特性に応じて混合して用いる混合すきま理論に基づく近似解析結果と
比較した。さらに、走行面側にあらさのある場合のスライダ浮上特性に関しても、一次元
および二次元のあらさを走行面に形成して実験を行い、平均すきまに基づく近似解析結果
と比較した。平均すきまによる近似解析結果と実験結果とはよく一致し、スライダ浮上面
および走行面にあらさのある場合の近似解析手法として、平均すきま理論を適用すること
の妥当性を確認した。

第6章では、混合気体中のスライダの浮上特性を明らかにする目的で、ヘリウム・空気
混合気体中でのスライダの静的な浮上特性の実験的検討を行った。混合気体を作動流体と
する潤滑特性の評価手法として、ここではマクロな観点から、混合気体を等価な分子平均
自由行程、等価な粘度を有する単一気体と見なし、気体分子運動論に基づいて等価分子平
均自由行程、等価粘度と成分気体のモル比との関係を算定した。これらを用いて、一次、
二次のスリップ流れを考慮した修正レイノルズ方程式、ボルツマン方程式に基づく一般化
潤滑方程式による解析結果と実験結果とを比較した。実験には、分子平均自由行程・粘度
などの気体物性の影響を鋭敏に反映する1～2mmの極めて小形・軽量のスライダを用い
た。混合気体中のヘリウム成分比の増加に伴い、実験結果が一次スリップ流れモデルに基
づく修正レイノルズ方程式の計算結果から微妙にずれる傾向を観測した。ボルツマン方
程式に基づく一般化潤滑方程式は、実験結果と定性的にはよく一致していること、二次スリ
ップ流れモデルに基づく修正レイノルズ方程式の計算結果は、実験値とは異なる傾向を示
し、近似式としての精度が不十分であることを明らかにした。

第7章では、表面を導電化処理した薄膜媒体と高インピーダンスで高速応答性を有する
パルス増幅回路を用いて、固体の接触コンダクタンスを高感度で検出する手法に基づき、
スライダの接触特性を高精度に測定した。また、現在、広範に用いられている圧電素子を
用いた音響弾性波検出法と上記方法の同時測定を行い、音響弾性波検出法の測定精度を評
価した。また、接触頻度と浮上すきまとの関係についても検討を加えた。実媒体上での浮

上条件下では、完全な流体潤滑状態が実現されていると推定される場合にも、スライダと媒体との確率的な接触、もしくは両表面がきわめて至近距離に接近する機会が存在すること、接触頻度の高い摺動状態を除けば、単位時間当りの接触頻度は近似的にスライダの走行速度のべき乗関数で表現でき、浮上すきまの変化を非常に敏感に反映すること、さらに、音響弾性波検出法では、接触頻度が一定のしきい値を越えて初めて接触を検知することが可能となることをなどを明らかにした。

参考文献

第2章の参考文献

- [201]Burgdorfer, A. "The Influences of the Molecular Mean Free Path on the Performance of Hydrodynamic Gas Lubricated Bearing", Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, Vol.81, No.1, 1959, pp.94-100.
- [202]Tseng, R. C., "Rarefaction Effects of Gas-Lubricated Bearings in a Magnetic Recording Disk File", Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, Vol.97, No.1, 1975, pp.624-629.
- [203]Mitsuya, Y. , "Molecular Mean Free Path Effects in Gas Lubricated Slider Bearings. (An Application of the Finite Element Method.)", Bull. of the JSME, Vol.22, No.168, 1979, pp.863-870.
- [204]Mitsuya, Y. and Kaneko, R., "Molecular Mean Free Path Effects in Gas Lubricated Slider Bearings (2nd Report; Experimental Studies)", Bull. of the JSME, Vol.24, No.187, pp.301-308.
- [205]Sereny, A. and Castelli, V., "Experimental Investigation of Slider Gas Bearings with Ultra Thin Films", Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, Vol.101, No.4, 1979, pp.510-515.
- [206]Hsia, Y. T. and Domoto, G. A., "An Experimental Investigation of Molecular Rarefaction Effects in Gas Lubricated Bearings at Ultra-Low Clearances", Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, Vol.105, No.1, 1983, pp.120-130.

[207]Lin, C. and Sullivan, R. F., "An Application of White Light Interferometry in Thin Film Measurements", IBM Journal of Res. and Develop., Vol.16, No.3, 1972, pp.269-276.

[208]Kennard, E. H., "Kinetic Theory of Gases", McGraw-Hill, 1938, p.299.

[209]丹生慶四郎、"流体物理学"、共立全書、(昭53)、pp.184-186.

第3章の参考文献

[301]Lieskovsky, V. M., "Optical Interference Techniques for Spacing Measurements in 50 to 300 Microinch Range", Proc. MESUCORA 63 Congrès International Paris, France, 1963

[302]Ono, K., Kogure, K. and Mitsuya, Y., "Dynamic Characteristics for Air-lubricated Slider Bearings under Submicron Spacing Condition", Bull. of JSME, Vol.22, No.173, 1979, pp.1672-1677.

[303]Lin, C. and Sullivan, R. F., "An Application of White Light Interferometry in Thin Film Measurements", IBM Journal Res. and Develop., Vol.16, No.3 1972, pp.269-276.

[304]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、日本機械学会論文集、C編、46巻、105号、(昭55)、pp.542-549

[305]Mitsuya, Y. and Ohkubo, T., "High Knudsen Number Rarefaction Effects in Gas-Lubricated Slider Bearings for Computer Flying Heads", Trans. ASME Journal of Tribology, Vol.109, No.2, 1987, pp.276-282.

[306]Fleischer, J. M. and Lin, C., "Infrared Laser Interferometer for Measuring

Air-Bearing Separation", IBM Journal Res. and Develop., Vol.18, No.6, 1974, pp.529-533.

[307]Nigam, A., "A Visible Laser Interferometer for Air Bearing Separation Measurement to Submicron Accuracy", Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology", Vol.104, No.1, 1982, pp.60-65.

[308]川久保洋一、平野義行、但馬武、桂城正彦、"磁気ヘッド浮動スペーシング自動測定装置"、電子通信学会講演論文集、1巻(昭58)、p.218

[309]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.8 30-14、(昭58) pp.138-140.

[310]石黒浩三、他12名、"応用光学概論"、金原出版(昭32)、p.218

[311]Miu, D. K. and Bogy, D. B., "Dynamics of Gas-Lubricated Slider Bearings in Magnetic Recording Disk Files - Part I: Experimental Observation", Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol.108, No.4, 1986, pp.584-588.

[312]Miu, D. K. and Bogy, D. B., "Dynamics of Gas-Lubricated Slider Bearings in Magnetic Recording Disk Files - Part II: Numerical Simulation", Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol.108, No.4, 1986, pp.589-593.

[313]Ohkubo, T., Hayashi, T. and Mitsuya, Y., "Accurate Measurement and Evaluation of Dynamic Characteristics of Flying Head Slider for Large-Capacity High-Access Magnetic Disk Storage", IEEE Trans. on Mag., Vol. MAG-23, No.5, 1987, pp.3456-3458.

[314]Burgdorfer, A. "The Influences of the Molecular Mean Free Path on the

Performance of Hydrodynamic Gas Lubricated Bearing”, Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, Vol.81, No.1, 1959, pp.94-100.

第4章の参考文献

[401]The Electrical Communications Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation, "Compact and High Recording Density Magnetic Disk Storage", E.C.L. Technical Publication No.264, 1982, pp.1-13.

[402]Mitsuya, Y. and Takanami, S., "Technologies for High Recording Density in Large-Capacity Fast-Access Magnetic Disk Storage", IEEE Trans. on Mag. Vol. Mag-23, No.5, 1987, pp.2674-2679.

[403]福井茂寿、木暮賢司、三矢保永、"走行面のうねりに対する浮動ヘッドスライダの追従特性"、日本機械学会論文集、C編、51巻、469号、(昭60)、pp.2291-2299.

[404]White, J. W. and Nigam, A., "A Factored Implicit Scheme for the Numerical Solution of the Reynolds Equation at Very Low Spacing", Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, Vol.102, No.1, 1980, pp.80-85.

第5章の参考文献

[501]Michell, A. G. M., "Lubrication - An Approximate Treatment of the Effects of the Rugosities of the Surface of Sliding Bearings," Blakie and Son, London and Glasgow, 1950, pp.281-291.

[502]Hirs, G. G., "The Load Capacity and Stability Characteristics of Hydrodynamic Grooved Journal Bearings", Trans. ASLE, Vol.8, No.3, 1965, pp.296-305.

- [503]Christensen, H. and Tonder, K., "The Hydrodynamic Lubrication of Rough Bearing Surfaces of Finite Width", Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, Vol.93, No.3, 1971, pp.324-330.
- [504]Elrod, H. G., "Thin-Film Lubrication Theory for Newtonian Fluids with Surfaces Possessing Striated Roughness or Grooving", Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, Vol.95, No.4, 1973, pp.484-489.
- [505]三矢保永、小口重光、星谷邦夫、"面あらしのあるすべり面の潤滑問題の電気抵抗モデルによる近似解法"、日本機械学会講演論文集、No.750-19, (昭50)、pp.205-208.
- [506]三矢保永、"二次元に分布したあらしをもつ面の流体潤滑特性"、日本機械学会論文、C編、50巻、449号(昭59)、pp.168-178.
- [507]Mitsuya, Y., Ohkubo, T. and Ota, H., "Averaged Reynolds Equation Extended to Gas Lubrication Possesing Surface Roughness in the Slip Flow Regime: Approximate Method and Confirmation Experiments", Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol.111, No. 3, 1989, pp.495-503.
- [508]White, J. W., "Effect of Rough Translating Surface on Gas Film Lubrication : A Numerical and Analytical Study", Trans. ASME, Vol. 109, No.2, 1987, pp.271-275.
- [509]三矢保永、太田博、林克美、"媒体面の面粗さを考慮した浮動ヘッドの動特性解析"、日本機械学会講演論文集、No.890-40, 1989, pp.7-9.

第6章の参考文献

- [601]Kaneko, R., "Advanced Technology for High Recording Density Disk Storage",

Digest of Papers: Sixth IEEE Symposium on MASS STORAGE SYSTEMS, 1984,
pp.80-85.

[602]Hsia, Y. T. and Domoto, G. A., "An Experimental Investigation of Slider Gas Bearings with Ultra-Thin Gas Films", Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, Vol.101, No.4, 1979, pp.510-515.

[603]Mitsuya, Y. and Ohkubo, T., "High Knudsen Number Rarefaction Effects in Gas-Lubricated Slider Bearings for Computer Flying Heads", Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol.109, No.2, 1987, pp.276-282.

[604]Ohkubo, T. and Kishigami, J., "Accurate Measurement of Gas-lubricated Slider Bearing Separation Using Visible Laser Interferometry", Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol.110, No.1, 1988, pp.148-155.

[605]Beeken, P. B., "Effects of Pressure and Gas Composition on the Static Characteristics of Sliders", STLE Special Publication SP-25, Vol.V, 1988, pp.62-68.

[606]Kennard, E. H., "Kinetic Theory of Gases", McGraw-Hill, 1938, pp.160-162.

[607]Jeans, J. H., "An Introduction to the Kinetic Theory of Gases", University Press, Cambridge, 1952, pp.181-184.

[608]Chapman, S. and Cowling, T. G., "The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases", University Press, Cambridge, 1952, pp.230-234.

[609]Hirschfelder, J. O., Curtis, C. F. and Bird, R. B., "Molecular Theory of Gases and Liquids", John Willy & Sons Inc., New York, 1954, pp.528-533.

- [610]Kestin, J., "Transport Phenomena -1973(Brown University Seminar)", AIP Conference Proceedings, No.11, 1973, pp.137-192.
- [611]Kogan, M. N., "Rarefied Gas Dynamics", Prentice Hall, New York, 1969, p.19, p.200.
- [612]Burgdorfer, A., "The Influence of the Molecular Mean Free Path on the Performance of Hydrodynamic Gas-Lubricated Bearing", Trans. ASME Journal of Basic Engineering, Vol.81, No.1, pp.94-100.
- [613]Fukui, S. and Kaneko, R., "Analysis of Ultra-Thin Gas Film Lubrication Based on Linearized Boltzmann Equation: First Report-Derivation of a Generalized Lubrication Equation Including Thermal Creep Flow", Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol.110, No.2, 1988, pp.253-261.
- [614]Fukui, S. and Kaneko, R., "Analysis of Flying Characteristics of Magnetic Heads with Ultra-Thin Spacing Based on the Boltzmann Equation", IEEE Trans. on Mag., Nov. 1988, pp.2751-2753.
- [615]Fukui, S. and Kaneko, R., "A Database for Interpolation Poiseuille Flow Rates for High Knudsen Number Lubrication Problems", 1989 ASME/STLE Tribology Conference. (投稿中)
- [616]尾高聡子、田中勝之、竹内芳徳、斉藤翼生、"浮動ヘッドスライダの極微小浮上解析、(有限要素法による解法)", 日本機械学会論文集、C編、52巻、475号、(昭61)、pp.1047-1056.
- [617]Ruitz, O. J. and Bogy, D. B., "A Comparison of Slider Bearing Simulations Using Different Models", IEEE Trans. on Mag., Nov. 1988, pp.2754-2756.

第7章の参考文献

- [701]Kita, T., Kogure, K., Mitsuya, Y. and Nakanishi, T., "New Method of Detecting Contact between Floating-Head and Disk", IEEE Trans. on Mag., Vol. Mag-16, Sept. 1980, pp.873-875.
- [702]Yeack-Scranton, C. E., "Novel Piezoelectric Transducer to Monitor Head-Disk Interactions", IEEE Trans. on Mag., Vol. Mag-22, No.5, 1986, pp.1011-1016.
- [703]Tseng, R. C. and Talke, F. E., "Transition from Boundary Lubrication to Hydrodynamic Lubrication of Slider Bearings", IBM Journal of Res. and Develop., Vol.18, No.6, 1974, pp.534-540.
- [704]Mochizuki, K., Sato, I. and Hayashi, Y., "Impulse Force Detection of Head-Disk Media Contact Using a Small Piezoelectric Transducer", Trans. IEICE, Vol. E.71, No.4, 1988, pp.360-362.
- [705]Hayashi, T. Ohkubo, T., Mochizuki, K. and Sato, I., "A Study of Slider/Medium Interface Using a Small Piezoelectric Transducer", Proc. of the International Conference on Advanced Mechatronics, Tokyo, 1989, pp.263-268.

本研究に関する発表論文等

本研究に関する論文等の発表は、下記の通りである。

- [1] 大久保俊文、三矢保永、”高クヌッセン数条件下で気体潤滑されたスライダ軸受の実験的検討”、日本機械学会論文集、C編、51巻、462号（昭60）、pp.304-313.
- [2] 大久保俊文、福井茂寿、木暮賢司、三矢保永、”ヘリウム・空気混合気体中のスライダ浮上特性”、日本機械学会講演論文集、No.850-2, 1985, pp.7-9.
- [3] 大久保俊文、岸上順一、安田享祐、”フォトリフレクタを用いた浮動ヘッドスライダ浮上すきまの簡易測定”、昭和60年度電子通信学会半導体・材料部門全国大会講演論文集、（昭60）、p.1-57
- [4] Mituya, Y. and Ohkubo, T., ”High Knudsen Number Rarefaction Effects in Gas-Lubricated Slider Bearings for Computer Flying Heads”, Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol.109, No.2, 1987, pp.276-282.
- [5] Ohkubo, T., Hayashi, T. and Mitsuya, Y., ”Accurate Measurement and Evaluation of Dynamic Characteristics of Flying Head Slider for Large-Capacity Fast-Access Magnetic Disk Storage”, IEEE Trans. on Mag. Vol.MAG-23, No.5, 1987, pp.3456-3458.
- [6] 三矢保永、小口重光、柿崎隆夫、大久保俊文、”大容量高速磁気ディスク装置の機構”、日本電信電話株式会社研究実用化報告、36巻、4号、1987、pp.471-477.

- [7] Koshimoto, Y., Mikazuki, T. and Ohkubo, T., "Magnetic Head Design for Large-Capacity Fast-Access Magnetic Disk Storage", Review of the Electrical Communications Laboratories, Vol.36, No.1, 1988, pp.97-102.
- [8] 大久保俊文、岸上順一、福井茂寿、安田享祐、"可視レーザ干渉を利用した浮動ヘッドスライダ浮上特性の精密測定"、日本機械学会論文集、C編、第53巻、487号、(昭62)、pp.839-847.
- [9] Ohkubo, T. and Kishigami, J., "Accurate Measurement of Gas-Lubricated Slider Bearing Separation Using Visible Laser Interferometry", Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol.110, No.1, 1988, pp.148-155.
- [10] Mitsuya, Y., Ohkubo, T. and Ota, H., "Averaged Reynolds Equation Extended to Gas Lubrication Possessing Surface Roughness in the Slip Flow Regime: Approximate Method and Confirmation Experiments", Trans. ASME, Journal of Tribology, Vol.111, No.3, 1989, pp.495-503.
- [11] Ohkubo, T., Fukui, S. and Kogure, K., "Static Characteristics of Gas-Lubricated Slider Bearings Operating in a Helium-Air Mixture," Trans. ASME, Journal of Tribology, (投稿中)

謝 辞

本論文を結ぶにあたり、終始懇意なる御指導と御配慮を賜りました京都大学工学部、機械工学科、森 美郎教授に、深甚なる感謝の意を表します。また、本論文をまとめるにあたり、有益なる御教示、御助言を賜りました京都大学工学部、機械工学科 矢部 寛教授に深甚なる感謝の意を表します。

本研究を遂行する機会を与えていただきました日本電信電話株式会社、N T T電子応用研究所 高田久夫所長、同研究所、記憶装置研究部 板生 清部長に深く感謝の意を表します。

本研究全般の遂行に際し、多くの御配慮と御指導ならびにお励ましを賜りました日本電信電話株式会社、N T T電子応用研究所、金子特別研究室 金子礼三室長に深く感謝の意を表します。本研究を遂行するに際し、数値解析・実験など多岐にわたり御指導・御配慮ならびにお励ましを賜りました名古屋大学工学部、機械工学科 三矢保永助教授に深く感謝の意を表します。さらに、解析、実験などに有益なる討論と御指導をいただき、また常にお励ましいただきました日本電信電話株式会社、N T Tヒューマンインタフェイス研究所、知能ロボット研究部 木暮賢司主幹研究員、N T T電子応用研究所、記憶装置研究部 福井茂寿主任研究員に深く感謝の意を表します。

本研究を遂行するに際し、データ解析・処理など実験を中心に、適切な助言と多大なる御協力・御指導を賜りました日本電信電話株式会社、N T T電子応用研究所、記憶装置研究部 岸上順一主任研究員に深く感謝の意を表します。

本研究を遂行するに際し、数値解析、実験などに御協力ならびに有意義な討論をいただきました日本電信電話株式会社、N T Tヒューマンインタフェイス研究所、知能ロボット研究部 林 武文研究主任に深く感謝の意を表します。また、構造解析、データ処理を含め実験に御協力ならびに有意義な討論をいただきました同研究部 下倉健一朗研究主任に深く感謝の意を表します。

