
シリコン微小すべり案内機構の
接触・摩擦特性評価

研究課題番号：11650135

平成11年度～平成12年度科学研究費補助金
(基盤研究(C)(2))

研究成果報告書

平成13年3月

研究代表者 諸貫 信行
(東京都立大学大学院工学研究科・助教授)

研究題目 シリコン微小すべり案内機構の接触・摩擦特性評価

研究組織 研究代表者: 諸貫 信行(東京都立大学大学院工学研究科・助教授)
研究分担者: 古川 勇二(東京都立大学大学院工学研究科・教授)
角田 陽(東京都立大学大学院工学研究科・助手)
内山 賢治(東京都立大学大学院工学研究科・助手)

研究経費	平成 11 年度	3,500 千円
	平成 12 年度	300 千円
	合 計	3,800 千円

成果発表

(1) 学会誌等

1. N. Moronuki: Linear Motion Microsystem Fabricated on a Silicon Wafer, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., 33, 2, (1999)pp.83-86.
2. N. Moronuki, K. Uchiyama: Linear Motion Microsystem Fabricated on a Silicon Wafer, Proc. of American Society for Precision Eng. (1999)pp.291-294
3. N. Moronuki, D. Nishi, K. Uchiyama: Textured Surface Produced by Anisotropic Etching and Its Frictional Properties, Proc. of 10th ICPE, JSPE(2001)(予定)

(2) 口頭発表

1. 諸貫信行, 内山賢治, 古川勇二:微小しゅう動機構に作用する表面吸着力, 精密工学会秋季大会講演論文集 (1998)462
2. 諸貫信行, 西 大舗, 内山賢治:微小しゅう動機構に作用する表面吸着力(第 2 報), 精密工学会秋季大会講演論文集 (1999)383.
3. 諸貫信行, 内山賢治, 西 大舗:結晶の規則性を利用した表面テクスチャリングとその摩擦特性, 精密工学会春季大会講演論文集(2001)(発表予定)

目次

第1章	緒論	1
第2章	シリコンすべり面に作用する表面吸着力	2
2.1	緒言	2
2.2	表面吸着力について	2
2.3	表面吸着力の測定方法	2
2.4	表面の濡れ性とメニスカス力	7
2.5	濡れ性の異なるすべり面の準備	8
2.6	表面の濡れ性と表面吸着力の関係	9
2.7	表面吸着力と見かけの接触面積の関係	11
2.8	結言	13
第3章	シリコンすべり面へのテクスチャ付与	14
3.1	緒言	14
3.2	結晶の規則性を利用したテクスチャの設計	14
3.3	二次元テクスチャ形状の設計	14
3.4	三次元テクスチャ創成の可能	23
3.5	テクスチャによる摩擦制御の可能性	25
3.6	結言	26
第4章	テクスチャの試作	27
4.1	緒言	27
4.2	非対称V溝断面形状創成の原理	27
4.3	テクスチャの製作と評価	28
4.4	結言	42
第5章	微小摩擦実験装置の試作と評価	44
5.1	緒言	44
5.2	面接触しゅう動摩擦実験装置の装置構成と試作	44
5.3	高剛性型摩擦力検出機構の試作と特性評価	47
5.4	自律補正型摩擦力検出機構の試作と特性評価	50
5.5	結言	57
第6章	しゅう動摩擦の方向性制御	58
6.1	緒言	58
6.2	微小面圧下における平面-平面間のしゅう動摩擦特性	58
6.3	テクスチャの影響と組合せ方向の影響	64
6.4	テクスチャによるしゅう動摩擦の方向性付与	67
6.5	結言	76
第7章	結論	77
	参考文献	78

第1章 緒論

シリコンを KOH でエッチングすると、(111)結晶面のエッチング速度が他に比べて遅いため、これらの結晶面で構成される形状が残る。このような結晶の規則性を利用した加工は異方性エッチングと呼ばれる。母性原則ではなく結晶の規則性を利用した本加工法は、リソグラフィによるパターンニングを除けば精密な制御が不要であり、今後、mm オーダの機械部品の加工への適用が期待される。

また、シリコンは硬ぜい材料ではあるものの転位密度が十分に低ければ機械的特性にも優れることから、上記加工法を利用して、サブ mm オーダの振動子や加速度センサなどが製作されつつある。しかし、相対すべりを含む運動機構への適用は少ない、これは、接触のメカニズムが未解明であることに加え、シリコンはイオン注入などで表面の改質を行って各種機械的機能を向上させることが期待できるものの、このような観点からの研究が少ないためと考えられる。

異方性エッチングで仕上げた面は、条件がよい場合には Ra が 0.02mm 程度と良好な面が得られるが、マスク等の条件が悪い場合には 0.2mm 程度の規則的な縞模様が現れる。このような規則性を利用すると表面に規則的な断面構造、いわゆるテクスチャを作ることができる。これにより摩擦係数の低減を試みた例はあるものの、表面の接触部に作用するファンデルワールス力等を含めた種々の表面力の影響は解明されていない。

一方、運動学的な観点からは、微小機構では代表寸法の 3 乗に比例する体積力(質量など)に比べ、代表寸法の 2 乗に比例する表面力(静電力や粘性力など)が相対的に大きくなる。特に、しゅう動部に作用する表面吸着力によって摩擦係数が 1 より大きくなることが知られており、その摩擦メカニズムの解明が待たれているが、微小接触部に関する力学モデル構築は十分には行われていないのが現状である。

上述のように、シリコンを構造材料とする微小接触部の力学モデルを明確にするとともに、表面テクスチャの影響を明らかにすることで、シリコンをベースとする機構の普及が加速されると期待できる。

そこで本研究では、(1)シリコン微小すべり機構における表面吸着力を実験的に明らかにするとともに、(2)雰囲気を変えることでこれのメカニズムの解明を試みる。次いで、(3)異方性エッチングを用いたテクスチャによる摩擦係数の低減と、(4)摩擦係数の方向性制御、を試みることを目的とする。実験遂行のためには微小な力を広い周波数帯域で測定する必要があり、このための測定器の試作も研究に含まれる。

なお、国内外での微細加工・微小運動機構に関する研究動向としては、いわゆる MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)の応用が主であり、厚さ数 mm の機能構造体の試作が多く行われている。厚みのある構造の加工法は上述の異方性エッチングと LIGA プロセスがあるのみであるが、LIGA プロセスは主に 2.5 次元の複雑な構造を加工できるものの、シンクロtron放射光を必要とするため施設が大がかりになる。一方、エッチングは結晶の規則性を利用しているため簡便な装置構成で高精度な加工が可能であり、トータルコストおよびエネルギー消費を低く抑えることができるため、環境への負荷も小さい加工法でもある。

第 2 章 シリコンすべり面に作用する表面吸着力

2.1 緒言

マイクロマシンの実現が近づくにつれて様々な分野での応用が期待され始めている。例えば宇宙や原子炉、深海等のような人間の入り込めない極限環境下や、医療産業や半導体産業のような低塵環境下におけるマイクロマシンの活躍は将来的に大きく期待されている。しかし、現状では大気環境下とは異なった雰囲気下での微小しゅう動機構の特性はわかっていない為、マイクロマシンの位置決め制御やエネルギー消費に与える影響も解明されていない。特に真空環境下は低塵環境や宇宙環境というマイクロマシンの応用に欠かせない雰囲気下であり、真空環境下での微小しゅう動機構の表面吸着力特性を解明することは重要である。

そこで本章ではマイクロマシンの構造体としてよく用いられる単結晶 Si を用いて微小なチップを製作し、真空環境下におけるチップの表面吸着力の特性を調べることを目的とする。

寸法効果によって、微小領域ではマクロ領域で無視されてきた表面力が支配的になることは前章で既に述べた。固体接触部に作用する表面吸着力の主なものとして、静電気力、ファンデルワールス力、液架橋力が挙げられるが、作用する吸着力からこれらを完全に分離して解明することは現時点では非常に困難である。そこで本研究ではそれらの力を一括して表面吸着力としてとらえ、その特性を調べるものとする。

2.2 表面吸着力について

真空環境下と大気環境下を比べると、以下のような相違点がある。

- (1) 大気中の分子の量が減少している
- (2) 圧力が大きく低下している

主な表面吸着力として3種類の力を上述したが、上記した要素がそれらの力に与える影響を以下に述べる。

- ① 液架橋力は 2 物体の接触面のアスペリティに形成されたメニスカスによって生じる力である。そのため吸着水分子の量の減少によって、形成されるメニスカスの大きさや数量が減少することで吸着力が低下する可能性が考えられる。
- ② ファンデルワールス力は分子間の距離が近づくにつれて増加するため、真空環境下では圧力の減少が 2 物体の接触面に作られるアスペリティに囲まれた微小空間の圧力の低下を引き起こすこと、シールド効果を持つというメニスカスが減少することから、2 物体間の距離が縮まることで吸着力が増加する⁽¹⁾という報告があるため、真空環境下においてなんらかの影響を及ぼすと考えられる。
- ③ 静電気力についてはその影響が非常に大きいという報告がある⁽²⁾。本実験では最初に十分な除電操作を行って実験するものとする。

なお、本実験では真空度を 10^{-4}Pa に設定した。

2.3 表面吸着力の測定方法

2.3.1 実験装置および方法

実験装置の概略を図 2.1 に示す。また、本実験では真空環境を作り出すために図 2.2 に示す真空チャンバを用いた。この実験装置の駆動部は数度傾けた傾斜ステージ上にボイス

コイルモータを取り付け、その上にアルミの台座と Si ウェハ(以下基板)を取り付けたものである。その基板の上に実験試料として Si ウェハを一辺の寸法が 1.3mm×1.3mm に切断した Si チップ(以下チップ)を載せる。表 2.1 にチップの仕様を示す。そしてボイスコイルモータにファンクションジェネレータ、アンプを用いてボイスコイルモータにより任意の周波数、振幅の正弦波を発振し、チップを駆動させる仕組みである。これにより、チップに対して垂直方向に任意の加速度を加えることができ、垂直方向の慣性力がチップの表面吸着力を上回ったときにチップが滑り始める。そのときの周波数、振幅からチップの表面吸着力を求めることができる。チップの滑り出し判定は CCD マイクロスコープによるモニタリングによって目視でおこなった。また CCD マイクロスコープの外観、仕様を図 2.3 と表 2.2 に示す。

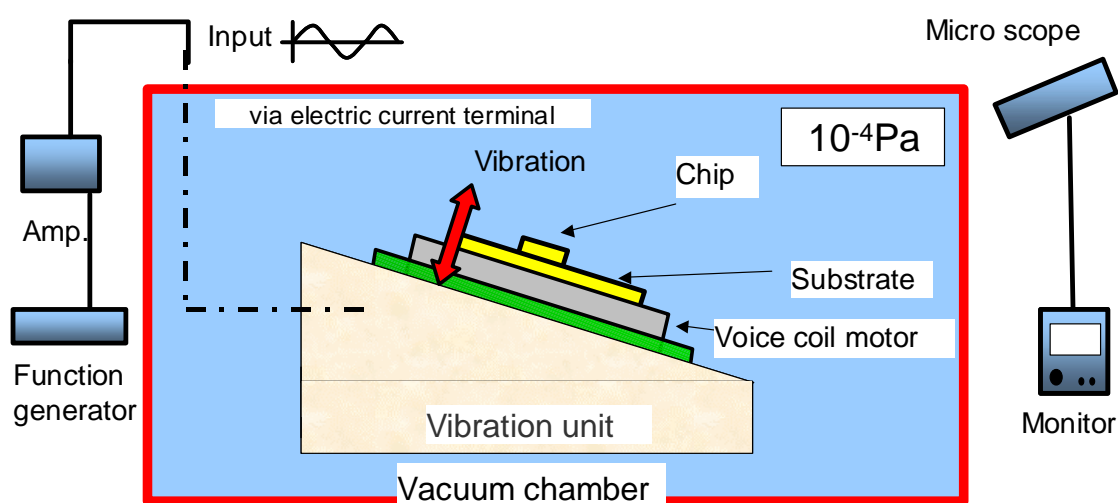
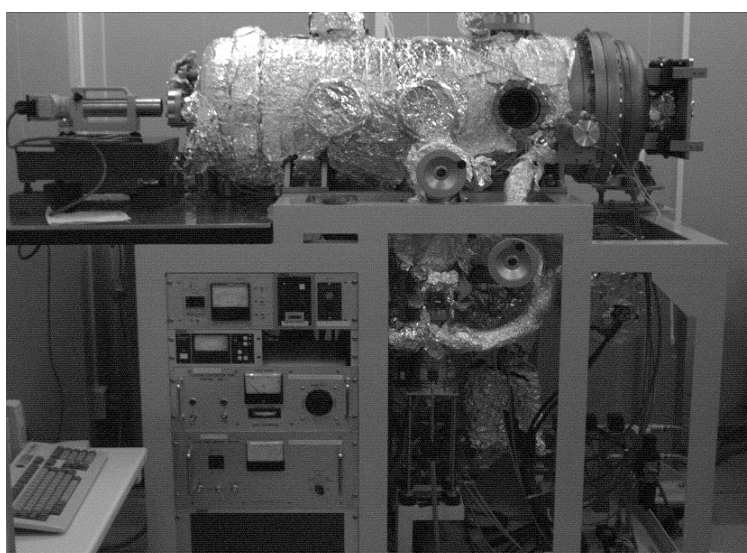


図 2.1 表面吸着力測定システム



(Dimension: $\phi 400\text{mm} \times 1000\text{mm}$)

図 2.2 真空チャンバ

表 2.1 シリコンチップの仕様

Width (mm)	Height (mm)	Length (mm)	Mass (mg)	Apparent contact area (mm ²)
1.3	0.3	1.3	2.68	1.69×10^{-6}



図 2.3 CCD マイクロ스코ープの外観

表 2.2 CCD マイクロ스코ープの仕様

Model	CVM7000
Scan rate	H1.5734Hz, V59.94Hz
Scan mode	2:1
S/N	46dB
Image output	VBS, 1Vp-p NTSC

この実験での力学モデルは図 2.4 のようになる. このようなモデルにおけるチップの滑り出し時における力のつりあいの式は以下のようなになる.

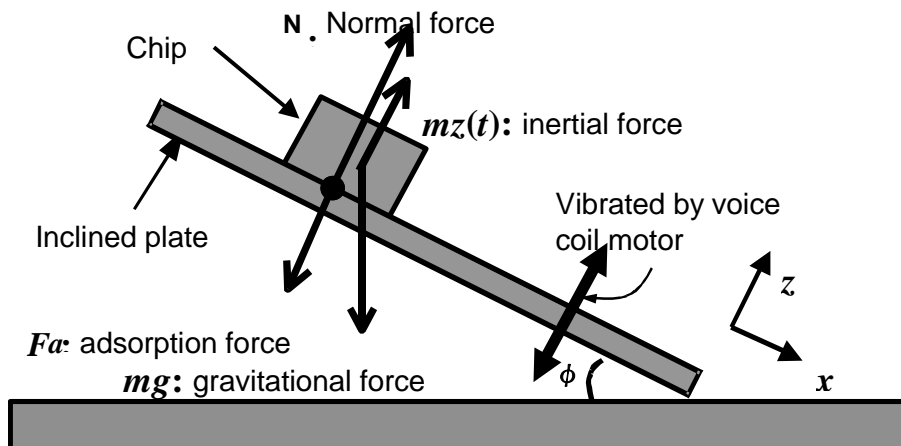


図 2.4 表面吸着力と力学モデル

$$N(t) = m\{g \cos \phi - \ddot{z}(t)\} + F_{ads} \quad (2.1)$$

チップがすべりだす時の条件は

$$N(t) = 0 \quad (2.2)$$

なのでこの 2 式を用いてチップの表面吸着力を算出する式を求めると、以下の式のようになる。

$$F_{ads} = -m\{g \cos \phi - z_0(2\pi f_0)^2\} \quad (2.3)$$

ただし $N(t)$: 垂直抗力, m : 質量, g : 重力加速度, ϕ : 傾斜角, $z(t)$: チップ変位, F_{ads} : 表面吸着力である。また, f_0 : 入力周波数であり, z_0 : チップが基板を滑り始める振幅 (以下限界振幅) である。実験は温度 20°C, 相対湿度 50% に保たれたクリーンルーム (クラス 1000) で行い, 基板, チップ共に実験前にエタノールでの超音波洗浄後ドライ窒素で乾燥させ, 十分な除電操作を行った。除電に用いたコロナ放電式除電器の仕様を表 2.3 に示す。

まず, 振動台は部位によらず一様な動作をすることを確認するために, 各部での振動振幅と入力電圧の関係を調べた結果を図 2.5 に示す。丸数字は基板上の振幅を計測した場所である。図からわかるように数ボルトまでの範囲では基板上の場所による振幅の違いはほとんどないことがわかる。なお, 振幅の測定にはレーザ変位計 (仕様は表 2.4) を用いた。

表 2.3 コロナ式除電器の仕様

Machine	KEYENCE SJ-B020
Ion generation system (electrostatic neutralization bar)	Corona discharge system
Working distance (electrostatic neutralization bar)	30~2000mm
Voltage input system/Input voltage	Pulse AC system/7000V
Ion balance control system	I.C.C. system
Ion balance (controller & high voltage power source part)	±30V

表 2.4 レーザ変位計の仕様

Model	KEYENCE LC-2430 & LC-2400
Measurement range	±500 μm
Working distance	30mm
Light source	Semiconductor-LASER (wavelength 670nm)
Minimum diameter of spot	20 × 30 μm
Linearity	±0.05% of F.S.
Resolution	0.02 μm
Response frequency	20kHz
Response time	100 μs

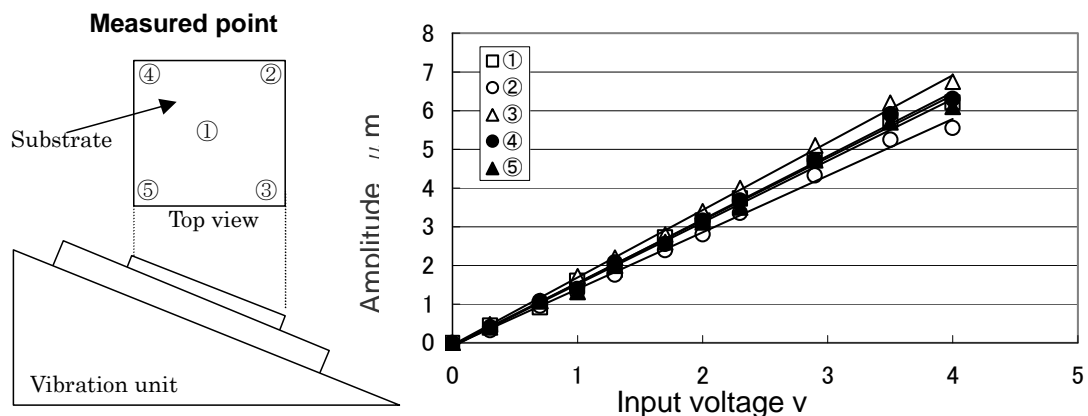


図 2.5 振動台上の場所と振幅の関係

2.3.2 真空環境下の場合

大気環境下、真空環境下でそれぞれ 30 回ずつ表面吸着力の測定を行った結果が図 2.6 である。結果をみると、表面吸着力の平均値は真空環境下では大気環境下に比べ約 48% も小さくなっている。また、表面吸着力実験データの分散値は大気環境下では 2184.2 だったのに対し、真空環境下では 65.3 と減少し、安定した測定が行えたことがわかる。

大気中では、チップと基板の接触面のアスペリティにメニスカス架橋が形成されると考えられる。真空環境下におけるファンデルワールス力増大の可能性を前節で述べたが、その影響はメニスカスの影響に比べると小さい。真空では周囲に存在する水分子が少ないためメニスカスが減少し、結果的に吸着力が小さくなったと考えられる。

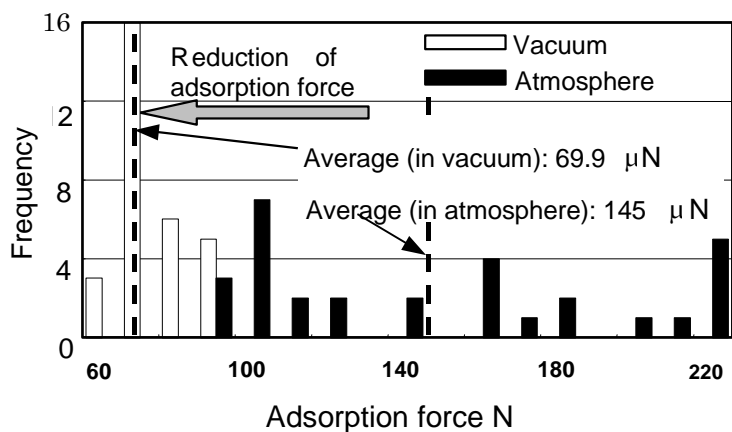


図 2.6 大気圧下および真空下での表面吸着力

2.3.3 アルゴン環境下の場合

真空環境下での表面吸着力減少の理由として、液架橋力やファンデルワールス力のような接触面に対する直接的な影響以外に減圧による影響が考えられる。2面の接触機構が圧力の影響を受け、摩擦現象に変化が起こったという可能性が考えられる。そこで、水分子の影響を極力なくす為一度真空チャンバ内を 10^{-4} Pa に減圧した後、不活性ガス(アルゴンガス, 湿度 0%)をチャンバに充填して大気圧にし、実験を試みた。チップは前回の実験と比

べるために同一サイズ(1.3mm×1.3mm)のものを用いて測定実験を行った。

縦軸に頻度、横軸に表面吸着力をとり真空環境下、アルゴンガス環境下でのデータをプロットした実験結果を図 2.7 に示す。この図から、表面吸着力の平均値は真空、アルゴンガス環境下においてほぼ等しい値をとっていることがわかる。また分散値も 130.4 と 65.3 と前述の真空、大気環境下での測定結果のような大きな差はみられない。

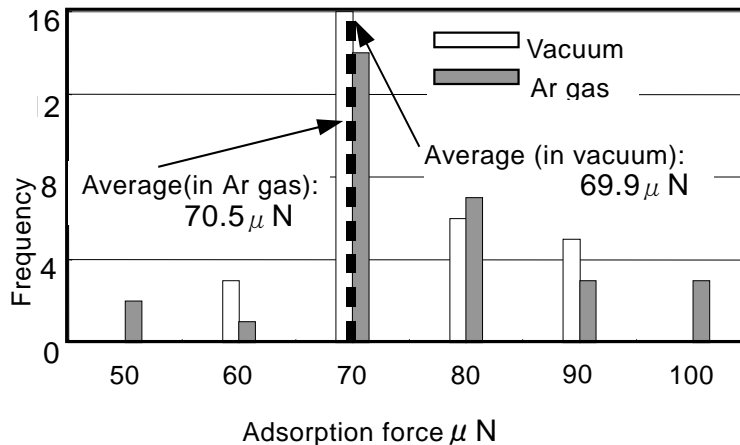


図 2.7 真空下およびアルゴンガス雰囲気での表面吸着力

図 2.7 の実験結果より、真空、アルゴンガス環境下の表面吸着力にほとんど変化が見られない。このことより真空環境下での表面吸着力の減少は圧力差によるものではないと判断できる。この実験ではチャンバ内を一度真空状態にした後にアルゴンガスを充填した。従って、同じ大気圧で表面吸着力が異なる理由は、基板に吸着した水分子の量が減少し、基板への水分子の吸着量が低下したことによってメニスカス架橋の大きさや数量が減少し、結果的に液架橋力が低下したことが原因と考えられる。

2.4 表面の濡れ性とメニスカス力

ここでは、表面の性質を変えながら表面吸着力を測定する実験を行い、その原因となるメカニズムの解明を行う。

前述の実験結果から、真空環境下での表面吸着力の減少の原因は水分子の量に関係していると考えられることができ、それによって引き起こされる液架橋力の減少が原因ではないかと考えた。そこで、意図的に基板への水分子の吸着量を変化させて表面吸着力の測定を行う事で液架橋力の影響を確かめる実験を行った。

液架橋力は 2 物体の接触面におけるアスペリティに形成されたメニスカス架橋によって生じる吸着力である。2 物体の接触面に形成されるメニスカス架橋のモデル図を図 2.8 に示す。

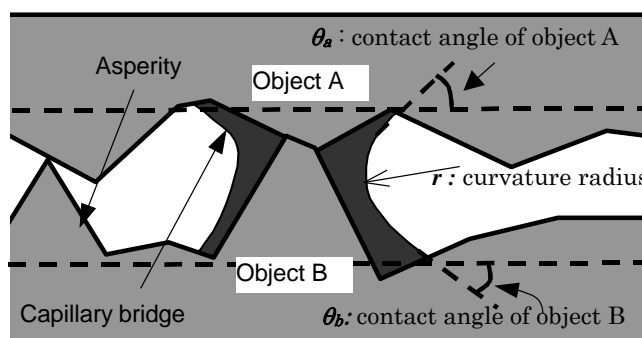


図 2.8 メニスカス(液架橋)のモデル

この図において r はメニスカス架橋の曲率半径, θ_a, θ_b はそれぞれ材質 A 側, B 側での接触角である. このような図におけるメニスカス架橋による吸着力の理論式は次式のようになる⁽³⁾. なお, γ はメニスカス架橋を形成する液体の表面張力である.

$$F_w = 2\pi r \gamma (\cos \theta_a + \cos \theta_b) \quad (2.4)$$

この式より, 液架橋力が表面吸着力において支配的な力であると仮定すれば, 濡れ性の異なる材質では表面吸着力の値も異なると考えられる.

2.5 濡れ性の異なるすべり面の準備

チップと基板を Si(酸化膜付き)よりも濡れ性の低い材質に変えた実験を行った. まず, 濡れ性の低い試料として Si_3N_4 を用いた. 図 2.9 は Si と Si_3N_4 の表面粗さの違いを示し, 図 2.10 は Si と Si_3N_4 の濡れ性(接触角)の違いを示す. これらより, 表面粗さにはほとんど違いがなく, 接触角だけが異なっていることがわかる. これらの試料の接触角を上式に代入し, 表面吸着力の比を求めると, それらの比は 0.61 となる. Si_3N_4 の表面吸着力はシリコンよりも 40% 減少すると予想できる.

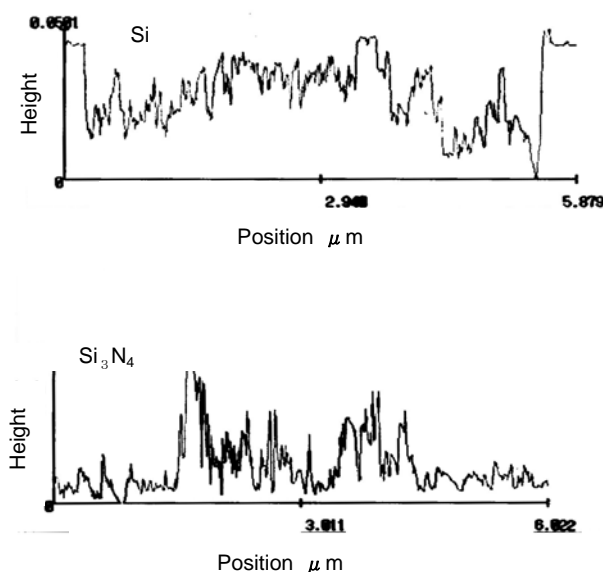


図 2.9 表面粗さ断面曲線 (上: シリコン, 下: Si_3N_4)

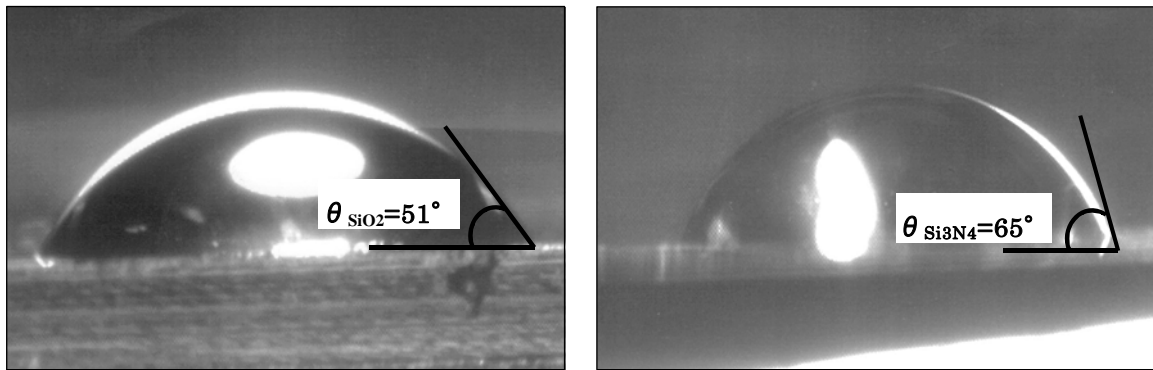


図 2.10 表面の濡れ性を示す接触角（左：酸化膜付きシリコン，右：Si₃N₄）

2.6 表面の濡れ性と表面吸着力の関係

図 2.11 に真空環境下，図 2.12 に大気環境下の実験結果をそれぞれ示す．チップはどちらも 1mm×1mm の寸法のものを用いた．結果を見ると，表面吸着力の平均値は大気環境下，真空環境下のどちらでも Si₃N₄ では Si の 15%ほど減少しており，定性的には前述の理論と一致している．また，真空環境下での Si の測定データの分散値が 731.0 から 14.0 と大きく減少したのに対し，Si₃N₄ では 5.4 と 7.4 とほぼ同様のばらつきを示した．

表面吸着力の減少は予想通りであったが，その値は予想より 40%以上も小さくなった．また，大気環境下と真空環境下との表面吸着力の変化も Si のように大きくは変化せず，大気環境下でも低く，安定した表面吸着力が測定された．このことより，メノスカス架橋だけでなく，基板に付着する水分子の量や材質の違いによる帯電量等にも表面吸着力に影響するのではないかと考えられる．

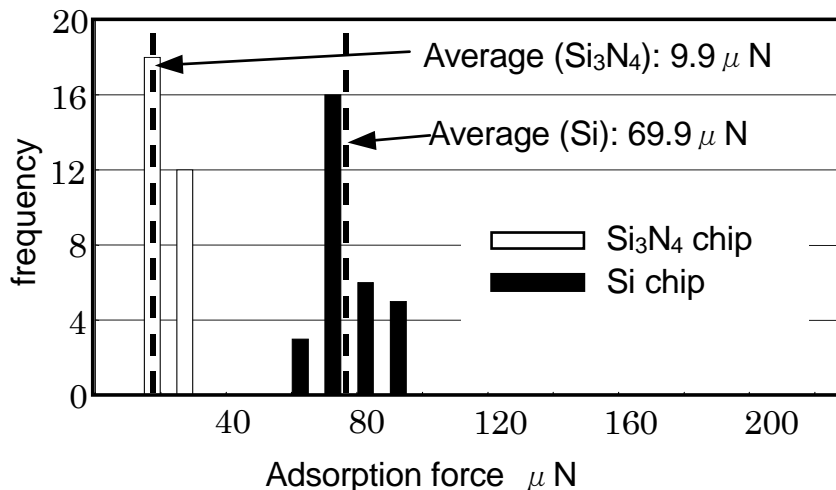


図 2.11 真空中での表面吸着力

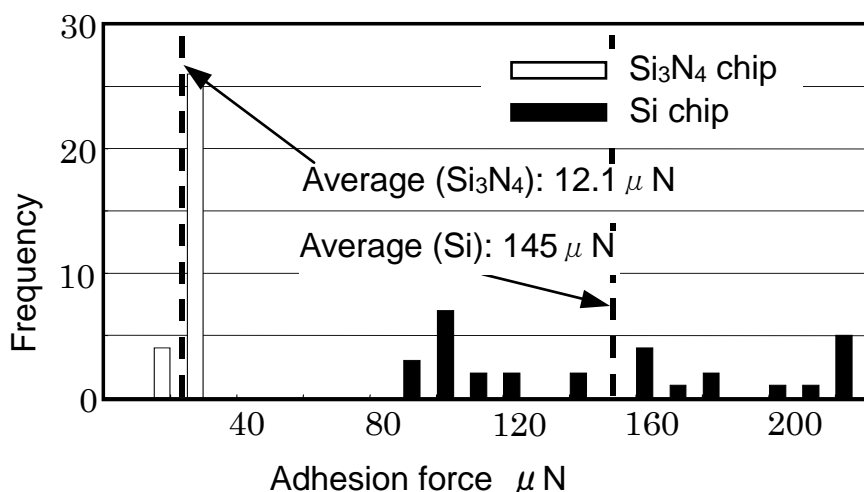


図 2.12 大気中での表面吸着力

Si_3N_4 を用いた実験により接触角の違いだけが表面吸着力の減少を引き起こしているわけではないということが分かった. そこで今までの実験に用いたものと同じ単結晶 Si にフッ酸処理を施し, 自然酸化膜を除去して接触角のみを変化させて実験を行った. それにより材質による差等を無くし, 水分子の吸着量を変化させて表面吸着力への影響を調べた. 図 2.13 にフッ酸処理後の表面粗さ, 図 2.14 に接触角を示す. フッ酸による処理前と処理後では表面粗さはほとんど変化していない事がわかるが, フッ酸処理後の Si の接触角を用いて未処理の Si との表面吸着力の比を求めると, フッ酸処理をした Si の表面吸着力は約 40% 弱になると予想できる.

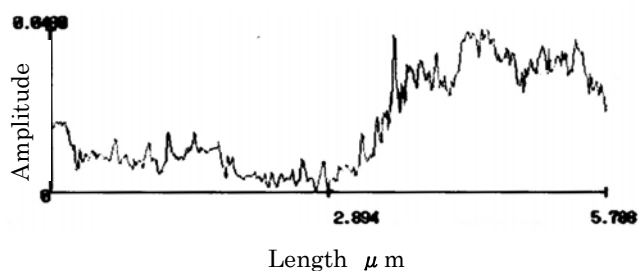


図 2.13 フッ酸処理後の表面粗さ

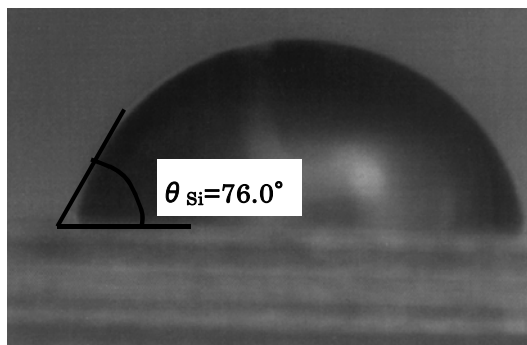


図 2.14 フッ酸処理後の表面濡れ性を示す接触角

フッ酸処理をしたSiチップを用いた真空環境下, 大気環境下それぞれの表面吸着力の測定結果を図 2.15 に示す. 表面吸着力の平均値は真空, 大気環境下共にフッ酸処理を行ったSiの方が未処理のSiの約30%程度に減少している. しかしSi₃N₄での実験結果と比べると分散値が951.5から6.8と未処理のSiと同じように減少している.

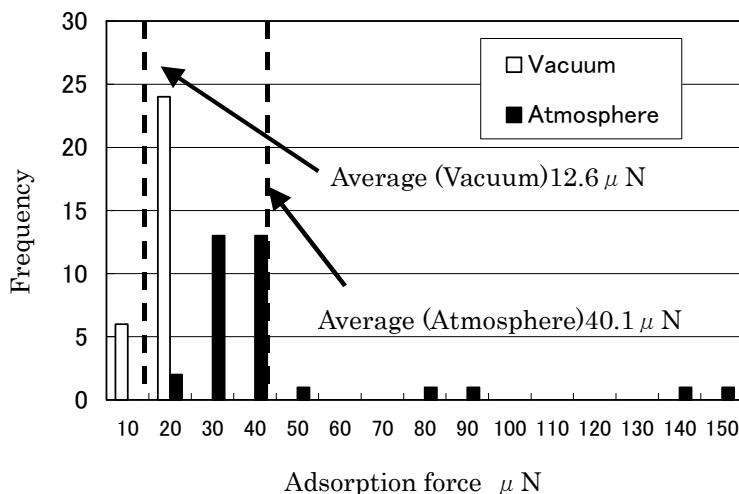


図 2.15 フッ酸処理後の表面吸着力

以上の結果より, 表面吸着力は確かに接触角と関係があるということがわかった. また, Si₃N₄では分散値の変化がなかったのに対し, フッ酸処理をしたSiでは真空環境下では平均値とともに分散値も減少した. 表面吸着力の平均値減少幅については, Si₃N₄では理論値より大幅に低下したのに対し, フッ酸処理を行ったSiではほぼ理論値に近くなった. この原因として, 材料の特性によって水分子の吸着量に差があり, 表面吸着に影響をあたえたのではないかと予想できる. また, チップを製作した時に生じた残留応力によってチップにうねりや歪みが生じていないかを調べたが, 大きな違いは認められなかった.

2.7 表面吸着力と見かけの接触面積の関係

大気環境下と真空環境下の表面吸着力の比較実験をチップのサイズを200μm×200μm~2mm×2mmにまで変化させて行った. その際に一辺が500μmより小さいチップについてはレーザー顕微鏡でそのサイズを計測した. 用いたレーザー顕微鏡の外観を図 2.16 に, その仕様を表 2.5 に示す.

縦軸に表面吸着力, 横軸に見かけ接触面積をとって真空環境下, 大気環境下それぞれのデータをプロットした実験結果が図 2.17 である. この結果より, 真空環境下, 大気環境下のデータ共に, 表面吸着力と見かけ接触面積が両対数軸にて直線, つまり指数関係にあることがわかる. また, 測定したデータ全てで真空環境下の表面吸着力は大気環境下に比べて減少している.

真空環境下でも大気環境下でも同じように表面吸着力はチップの見かけ接触面積と指数関係にあることがわかる。

また、見かけの接触面積が大きくなるにつれて真空環境化と大気環境下の表面吸着力の差が大きくなるが、これは大気中においては通常 2 物体の接触面のアスペリティに形成されたメニスカスに生じる液架橋力が真空環境化では水分子の量が大幅に減少するためほとんどメニスカスが形成されない。見かけ接触面積が大きいほどメニスカスの数量は増えるため、寸法が小さくなるにつれて真空環境による影響を受けづらくなったためと考えられる。

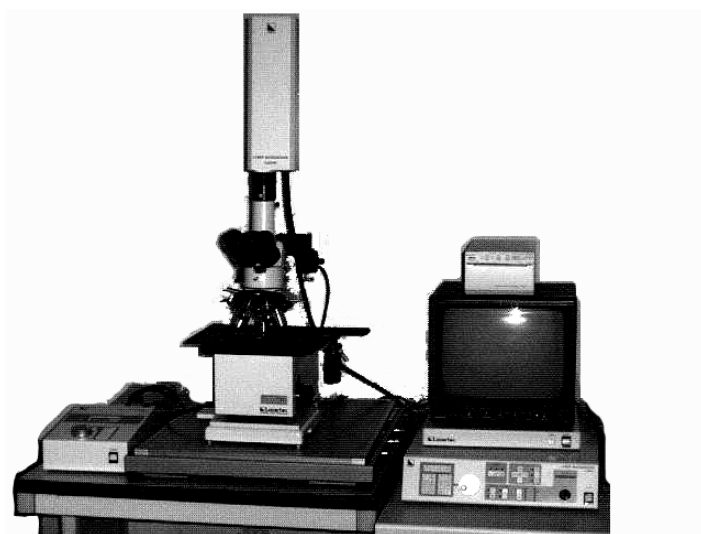


図 2.16 レーザ顕微鏡

表 2.5 レーザ顕微鏡の主な仕様

1LM21H	
Accuracy	0.25 μ m object lens 100 \times
Measurement function (X, Y-axis)	Measurement range >0.25 μ m
	Resolution 0.001 μ m
Surface shape measurement function (Z-axis)	Measurement precision (3 σ) 0.03 μ m
	Resolution 0.01 μ m
	Measurement precision (3 σ) 0.03 μ m

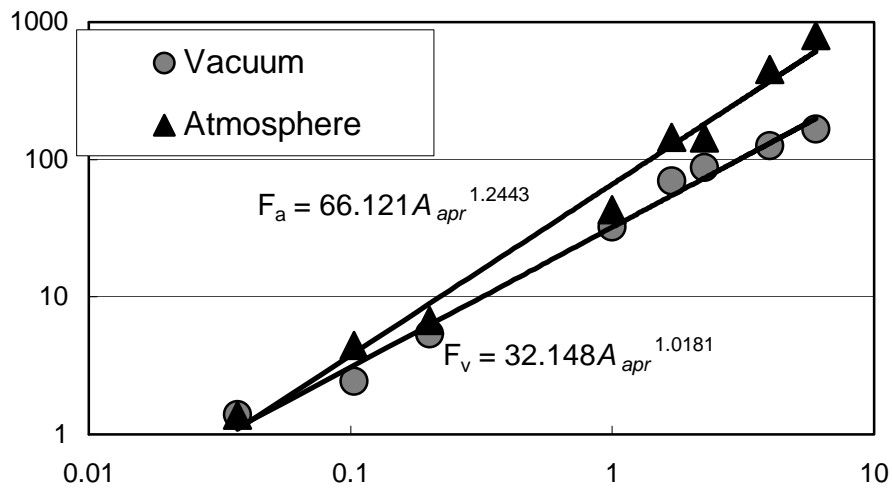


図 2.17 見かけの接触面積と表面吸着力

2.8 結言

本章で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) Si の接触機構では真空環境下では，表面吸着力のばらつきが減少する。
- (2) 真空環境下では，大気環境下よりも表面吸着力が小さくなる。
- (3) 濡れ性を減少させることで表面吸着力を減少させることができる。
- (4) 見かけ接触面積が数百平方マイクロメートルから数平方ミリメートルというサブミリオータの微小領域においては真空環境下で表面吸着力が減少し，真空中では見かけの接触面積と表面吸着力がほぼ比例する。

第3章 シリコンすべり面へのテクスチャ付与

3.1 緒言

シリコンの異方性エッチングを利用すると、結晶構造に従った規則形状が得られるため、テクスチャの製作が合理的に行える。単結晶材料であれば、シリコン以外にも、水晶、GaAsなどが異方性を示すことが知られている。しかし、表面幾何形状を決定するパラメータと創成される幾何学形状との関係における一般的な設計指針は得られていない。設計条件と創成される形状が明らかにされれば、加工原理に起因する形状創成の限界が示され、設計工程の簡略化や形状選択の最適化といった効果が期待される。

そこで本章では、結晶の規則性を利用することによって得られるテクスチャ形状を結晶面方位とマスク形状、および方位を設計パラメータとし、創成される形状を予測し、設計指針を示す。さらには、テクスチャ形状の応用可能性について、トライボロジーの観点から表面幾何学形状としゅう動摩擦との関係について述べ、微小面圧下におけるテクスチャ面の摩擦制御の可能性について考察する。

3.2 結晶の規則性を利用したテクスチャの設計

単結晶シリコンのような単結晶材料においては、特定の規則的な結晶構造を持つ。図 3.1 に示すように単結晶シリコンの結晶構造はダイヤモンド構造であり、この結晶の規則性を利用することによって異方性エッチング加工とよばれる除去加工で特定の結晶面で構成された形状を創成することが可能である。一般的に $\{111\}$ 面のエッチング速度が最も遅いことから $\{111\}$ 面がエッチストップの役割を果たし、図 3.2 に示すように (100) 面に $\langle 110 \rangle$ 方位に矩形マスクを施すと $\{111\}$ 面で構成された V 溝形状が得られる。しかし、諸条件を変化させることによりエッチング速度の最も大きな $\{100\}$ 面を表出させることも可能であることがわかっており、図 3.3 のようなさまざまな形状創成が確認されている。

このような最終形状を決定する因子として挙げられる、最も基本的な因子である結晶面方位、マスク方位およびマスク形状を設計パラメータとして形状の設計を行う。

3.3 二次元テクスチャ形状の設計

3.3.1 $\{111\}$ 面からなる二次元形状の予測

前述したように $\{111\}$ 面は他の結晶面に比べ最もエッチングレートが低く、 $\{111\}$ 面が表出するような条件下で異方性エッチングを行うと滑らかな $\{111\}$ 面が創成されることが知られている。基本結晶面方位として (100) 、 (110) 、 (111) 面が挙げられ、図 3.4 にこれら 3 つの基本方位で構成された 26 面体を示し、 $\{111\}$ 面の空間的な配置の模式図を示す。本説では、 $\{111\}$ 面で構成される二次元形状について設計を進める。

・ (100) 、 (110) 面における $\{111\}$ 面の配置と創成形状

まず、基本方位である (100) 、 (110) 面における $\{111\}$ 面の配置を示す。

(100) ウエハでは、図 3.4(b)に示すように $[110]$ 晶帯面はウエハ表面に対して点対称に配置しており、図 3.5(A)に示すようにすべての $\{111\}$ 面は (100) 面に対し、 35.3° 傾斜している面である。

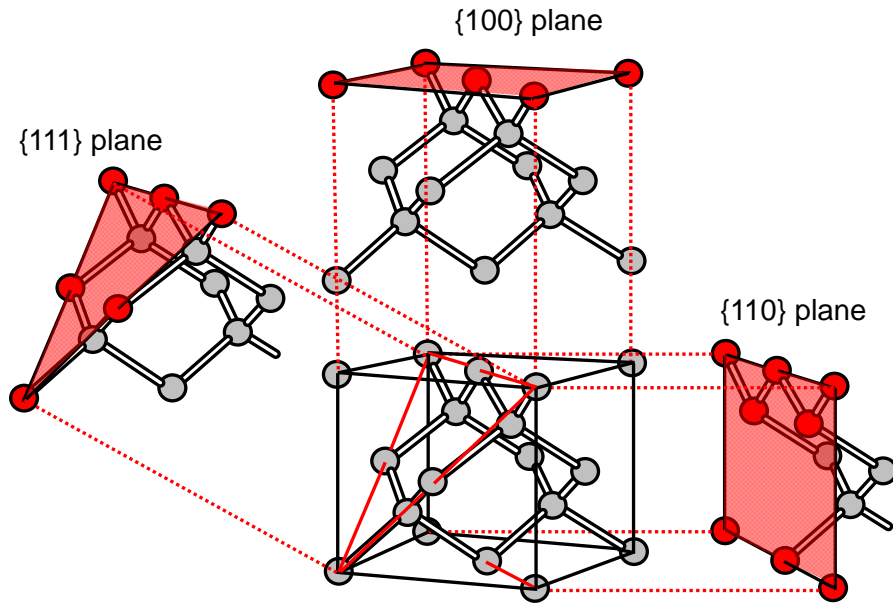


図 3.1 シリコンの結晶構造

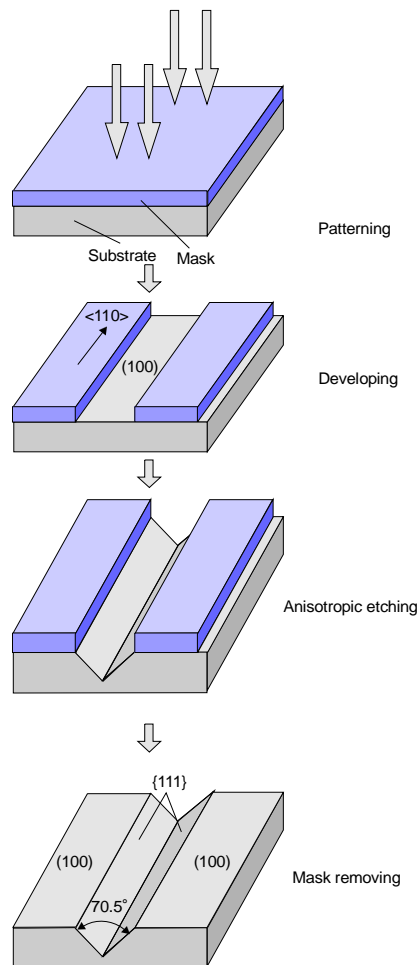


図 3.2 異方性エッチングによる V 溝の形成

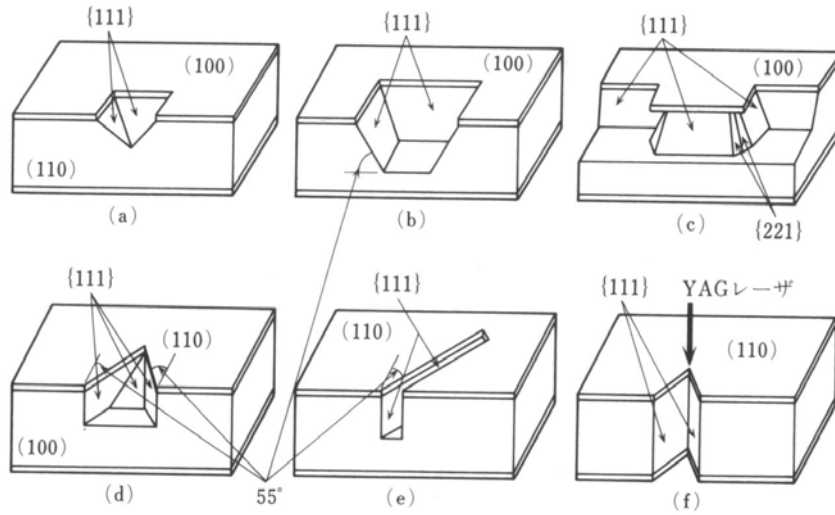


図 3.3 異方性エッチングで得られる形状の例

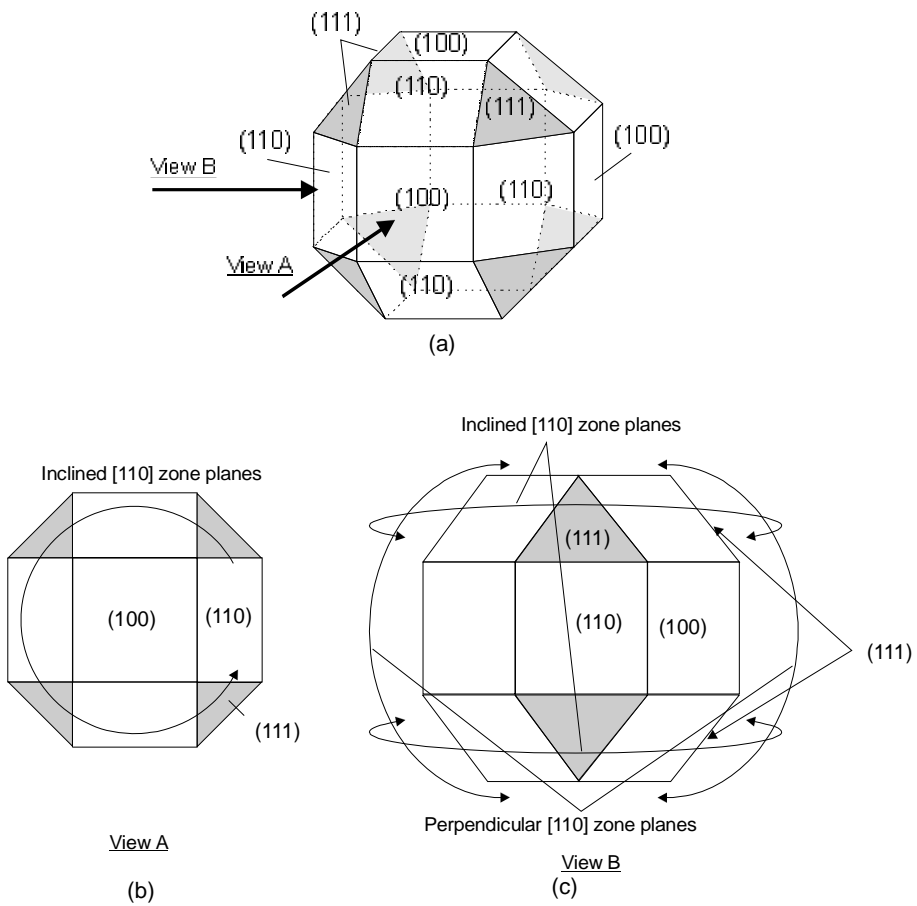


図 3.4 $[110]$ 晶帯と $\{111\}$ 面の位置関係

(110)ウエハでは、図 3.4(c)に示すように[110]晶帯面はウエハ平面に対して垂直な 3 つの{111}面に境に 2 つの垂直な面群と 2 つの傾斜した面群とで囲むように配置しており、図 3.5(B)に示すように{111}面は(110)面に垂直な面と、(110)面に対し、 54.7° 傾斜している面である。

(100)面において{111}面を表出させるためには $\langle 110 \rangle$ 方位にマスクをする必要があり、この方位に矩形マスクを施し、異方性エッチング加工を行うと、図 3.2 および図 3.6(A)で示すような開き角が 70.5° の V 溝が創成される。

(110)面において{111}面を表出させるためには $\langle 110 \rangle$ もしくは $\langle 111 \rangle$ 方位にマスクをする必要がある。 $\langle 110 \rangle$ 方位に矩形マスクをした場合、図 3.6(B)のような開き角が 109.5° の{111}面で構成された V 溝が創成される。 $\langle 111 \rangle$ 方位に矩形マスクをした場合、図 3.6(C)のような{111}面で構成された垂直壁が創成される。

これ以降、図 3.6(A), (B), (C)の形状をそれぞれ基本形状 A, B, C とする。

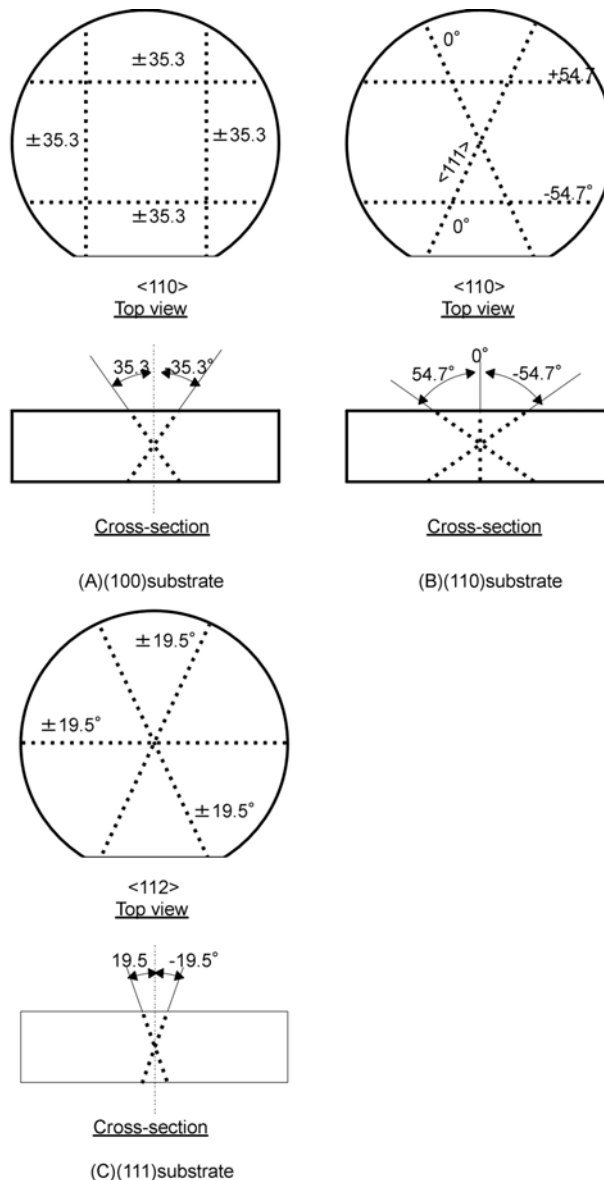


図 3.5 基本結晶面における{111}面の位置

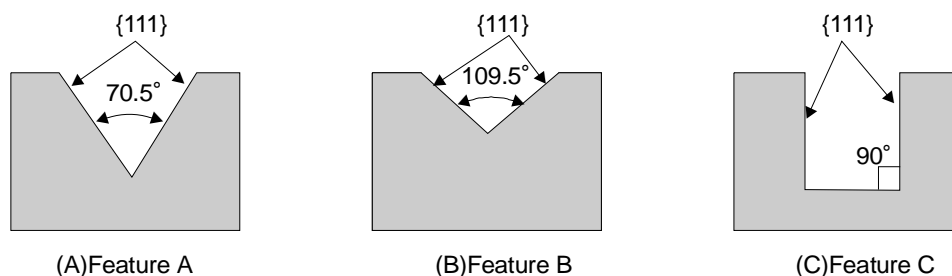


図 3.6 異方性エッチングで得られる標準的フィーチャ

・ 結晶面方位の変化による非対称断面形状の予測

上記の基本形状は{111}面の位置関係で決定されるものなので V 溝の開き角を変化させることはできないが、結晶面方位を変化させることで創成されるテクスチャ形状を変化させることが可能である。図 3.7 に(110)面とその結晶面を回転させたときにできる結晶面から創成されるテクスチャ V 溝形状の違いを模式図で示す。

マスク方位が<110>であるパターンに関して、[110]を晶帯軸として結晶面を変化させると、図 3.8 に示すような開き角が 70.5° である基本形状 A と開き角が 109.5° である基本形状 B を非対称に配置したテクスチャ(それぞれを非対称 A タイプ、非対称 B タイプとする)が創成される。

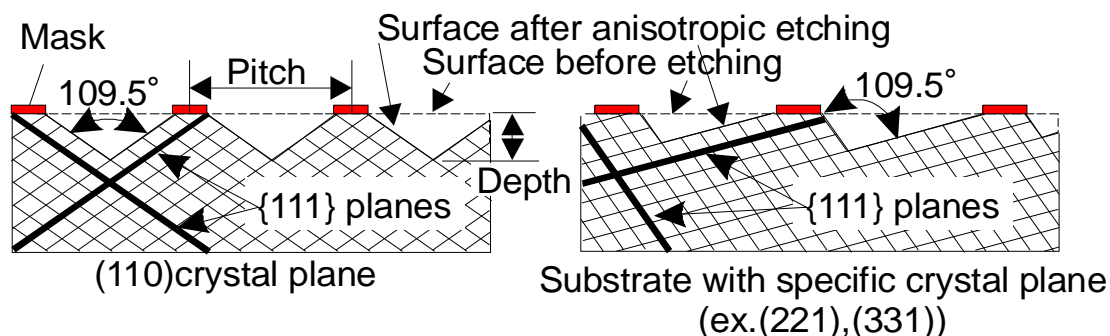


図 3.7 基板面方位と非対称 V 溝の生成

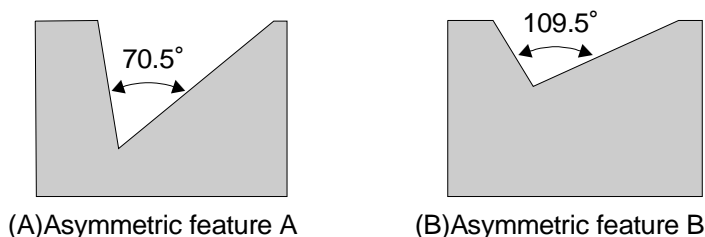


図 3.8 異なる開き角をもつ非対称 V 溝

このどちらの形状タイプが創成されるかは、結晶面方位のミラー指数に順ずる。図 3.9 に示すように、 α - β 平面状にある κ 軸を定義する。 κ - γ 平面における{111}面群の配置は図 3.9 のようになり、(11 γ)である結晶面を考えた場合、 γ 値を変化させると同図破線のような変化を示す。以下のような γ の条件で非対称 A タイプもしくは非対称 B タイプが決定される。

$\gamma > 1$ のとき, 非対称 A タイプ
 $\gamma < 1$ のとき, 非対称 B タイプ

(111)面が境界条件となり, マスク方位を $\langle 110 \rangle$, 結晶面方位を(112), (113), (114)などとするとき基本形状 A を基本とした非対称 A タイプが創成される.

同様に, マスク方位を(221), (331), (441)などとするとき基本形状 B を基本とした非対称 B タイプが創成される.

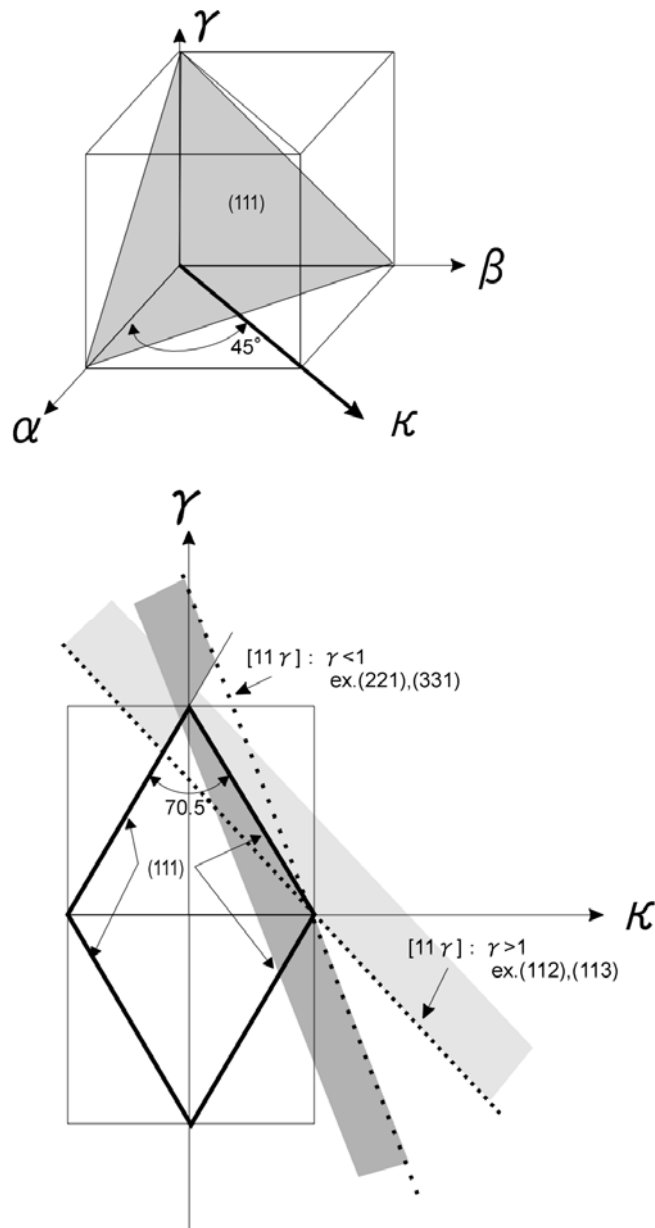
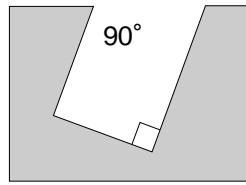


図 3.9 非対称フィーチャ A,B に対する開き角の違い



Asymmetric feature C

図 3.10 非対称フィーチャ C

マスク方位が $\langle 111 \rangle$ であるパターンに関して、 $[111]$ を晶帯軸として結晶面を変化させると、図 3.10 に示すような平行な溝がオーバーハングしたような形状で、基本形状 C を非対称に配置したテクスチャ(非対称 C タイプ)が創成される。

3.3.2 $\{100\}$ 面からなる二次元形状の予測

前節では、テクスチャを構成する面を $\{111\}$ 面に限定して設計を行った。図 3.11 に示すようにエッチング加工の応用としてマスク方位を変えることによって、エッチストップをとまなう $\{111\}$ 面の創成を回避し、エッチング速度の最も大きい $\{100\}$ 面で構成される形状が実験的に得られている⁽⁴⁾。 $\{111\}$ 面以外でテクスチャ面を構成することで $\{111\}$ 面の構成のみでは創成不可能であった形状の可能性が生まれ、テクスチャへの応用範囲が広まる。

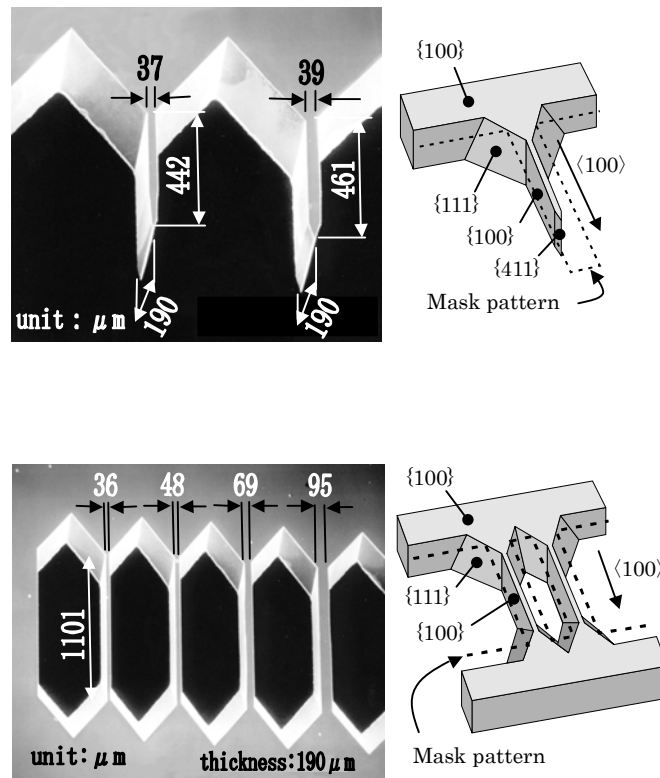


図 3.11 $\{100\}$ 面で構成されたはり

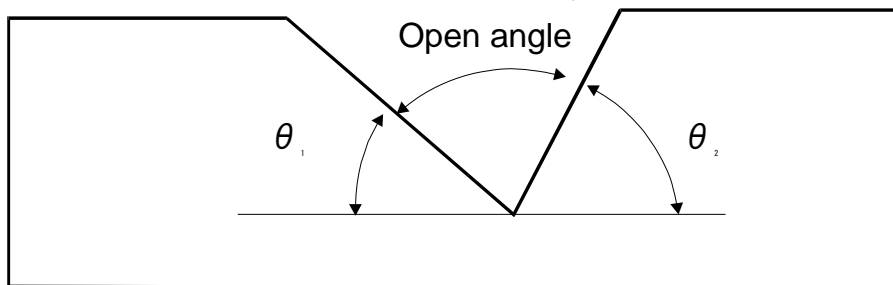
この節では、基本方位 (100) 、 (110) をもとに $\{100\}$ 面で構成される形状について設計を行うこととする。

{100}面で構成されるテクスチャ形状

(100)面において，{111}面の創成を回避するために<110>方位と 45° ずれた<100>方位にマスクを配置し，異方性エッチング加工を行うことによって結晶面に垂直な{100}面で構成された基本形状 C が創成されることが実験的に明らかにされている．{100}面は最もエッチング速度が大きい結晶面である．つまり，[100]を晶帯軸として結晶面方位を変化((120)，(130)，(210)など)させると，非対称 C タイプの創成が考えられる．

(110)面において，{111}面の創成を回避するために<100>方位と 45° ずれた<110>方位にマスクをし，異方性エッチング加工を行うことによって{100}面で構成された傾斜 45° の斜面が創成されることが実験的に明らかにされている⁽⁵⁾．つまり，{111}面の構成では製作不可能であった開き角が 90° である V 溝の創成が考えられる．この形状を D タイプとする．[110]を晶帯軸として結晶面方位を変化((120)，(130)，(210)など)させると，図 3.8 に示されるような非対称形状で開き角が 90° である V 溝(非対称 D タイプ)の創成が考えられる．これまで設計した形状の特定の結晶面における形状スペックおよび非対称 V 溝断面テクスチャの非対称 A，非対称 B タイプの設計仕様をまとめた結果を表 3-1 に示す．

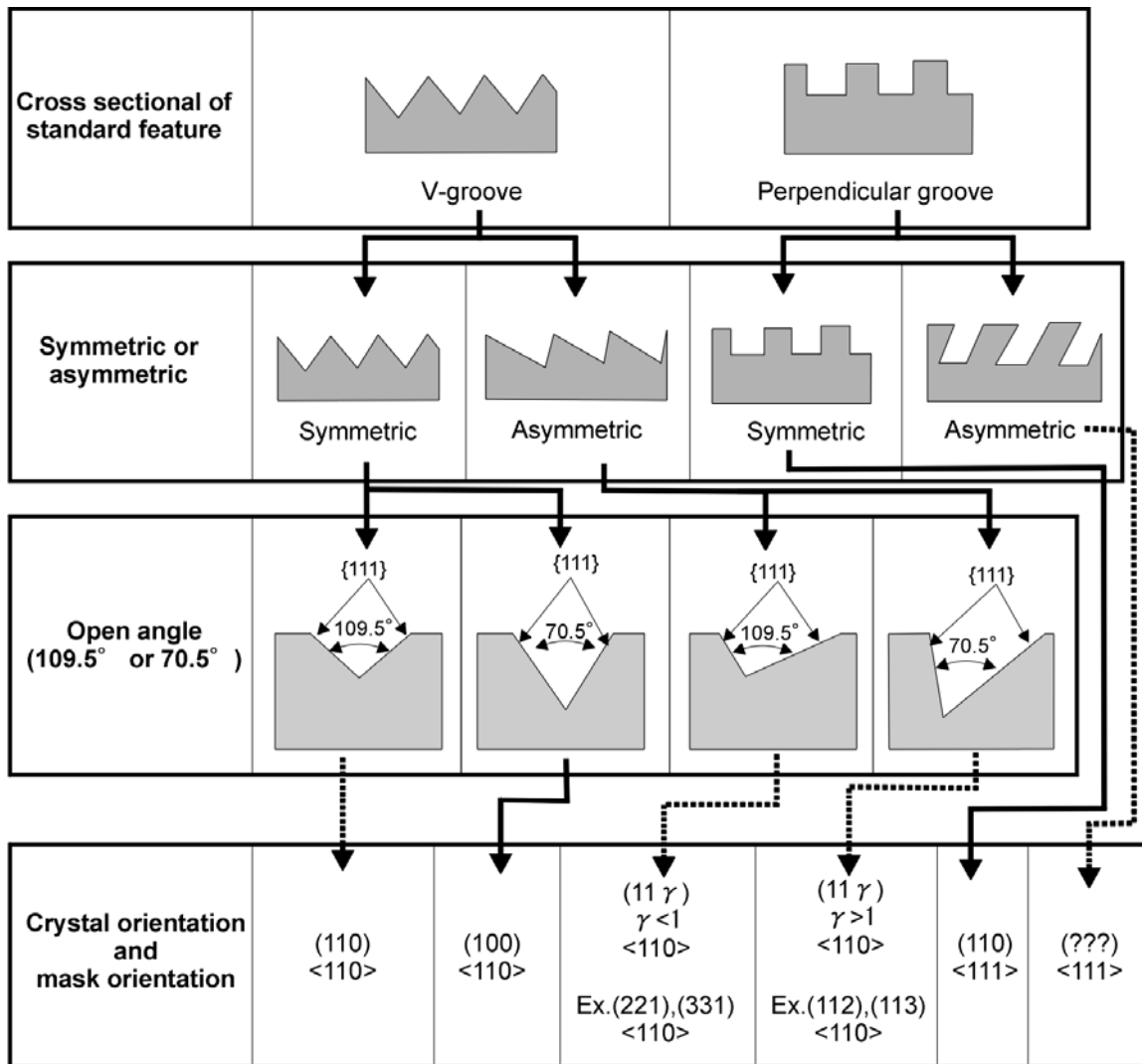
表 3.1 設計結果の仕様



	Crystal orientation	Mask orientation	Feature	Surface	Open angle(deg)	θ_1 (deg)	θ_2 (deg)
	(100)	<110>	Symmetric V groove	{111}	70.5	54.7	54.7
		<100>	Perpendicular wall	{100}	-	90.0	90.0
	(110)	<110>	Symmetric V groove	{111}	109.5	35.3	35.3
		<111>	Perpendicular wall	{111}	-	90.0	90.0
		<100>	Symmetric V groove	{100}	90.0	45.0	45.0
$\gamma > 1$	(112)	<110>	Asymmetric V groove	{111}	70.5	19.5	90.0
	(113)	<110>	Asymmetric V groove	{111}	70.5	29.5	80.0
	(114)	<110>	Asymmetric V groove	{111}	70.5	35.3	74.2
$\gamma < 1$	(221)	<110>	Asymmetric V groove	{111}	109.5	45.8	54.7
	(331)	<110>	Asymmetric V groove	{111}	109.5	22.0	48.5
	(441)	<110>	Asymmetric V groove	{111}	109.5	25.2	45.3

エッチング速度の高い高次数の結晶面で構成された V 溝形状の創成も考えられ，実験的にも創成が確認されているが，表出する面は一般的に粗く，複数の結晶面で構成される場合が多い．ここでは，良好な面が創成されるテクスチャ形状の設計および予測にとどめることとする．

図 3.12 には、前述してきた創成形状の中で、 $\{111\}$ 面で創成可能と考えられる形状の設計フローを示す。この図では、まず基本となる断面形状（V溝もしくは垂直側壁溝）を決定し、それ以降所望のタイプ(対称もしくは非対称)を選択していき、最終的に形状創成に必要な結晶面方位とマスク方位にいたる。なお、垂直側壁を持ち、非対称な形状に必要な結晶面に関しては定量的には示すまでには至っていない。今後定量的に示すことが望まれる。





 Have been verified
 Have not been verified

図 3.12 二次元テクスチャの設計手順

3.3.3 二次元形状の応用形状例

前節までに設計した形状に対して、エッチング時間(主に深さ方向に起因)、マスクピッチ(主に横方向に起因)を変化させることで創成される応用形状が考えられる。図 3.13 にそれらの形状をまとめる。なお、開き角が 70.5° (A タイプ)、 109.5° (B タイプ)、 90° (D タイプ)の異なる対称 V 溝形状および非対称 V 溝形状において分類は行っていない。

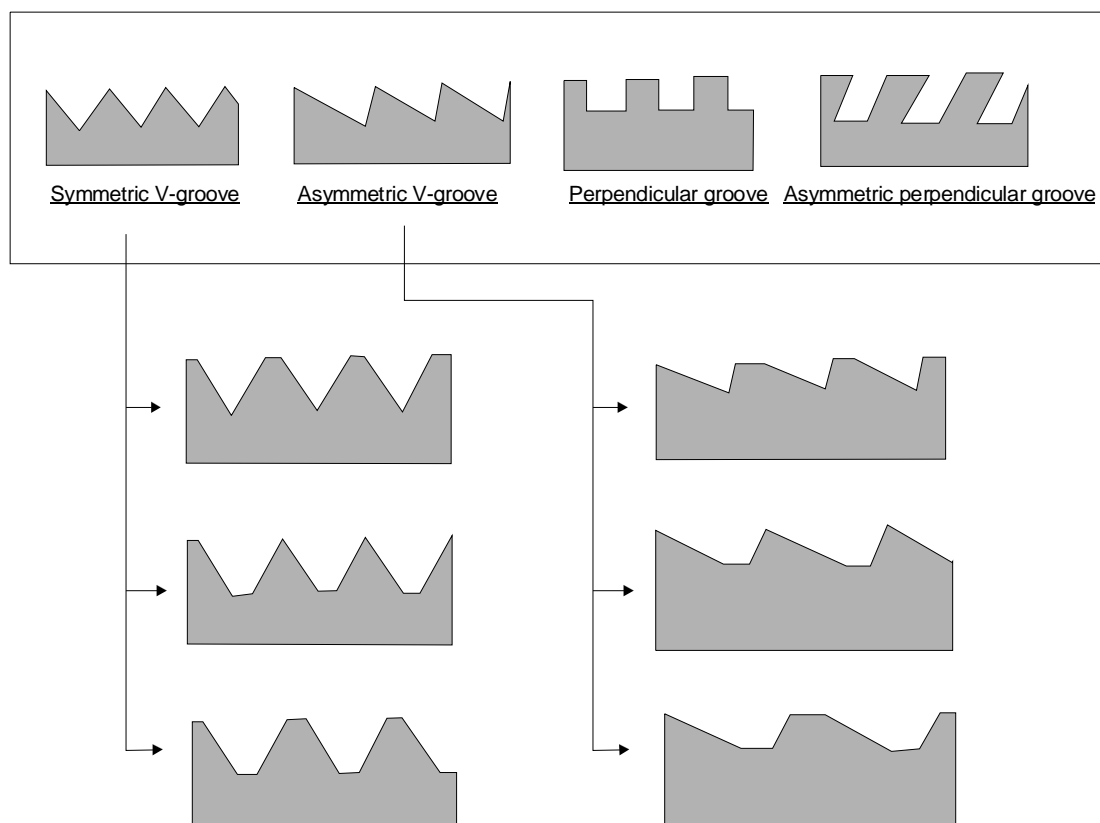


図 3.13 マスクピッチやエッチング時間を変えたときのバリエーション

3.4 三次元テクスチャ創成の可能性

前述の設計形状を三次元に拡張することによってさまざまな応用形状の創成が考えられる。同一結晶面方位においても、マスク方位を変えることで得られる形状が異なり、複雑な創成形状も考えられる。本節では、上述の二次元形状設計からの単純な応用から考えられる三次元パターンについて、例を挙げ、それぞれについてマスク設計条件を示す。図 3.14、図 3.15 にそれらのマスク方位と創成が予想される形状と条件を示す。なお、創成される立体形状の凸部には高次の面が出やすいことは実験で明らかにされているが、本考察ではその点は無視し、二次元形状の単純な組み合わせである。そのため、実際に創成される形状は異なる可能性があると考えられる。しかし、幾何形状を面方位やマスク方位などで制御する基本設計指針として用いることは可能であると考えられ、今後実験的な検証を進め、設計指針を確立する必要がある。

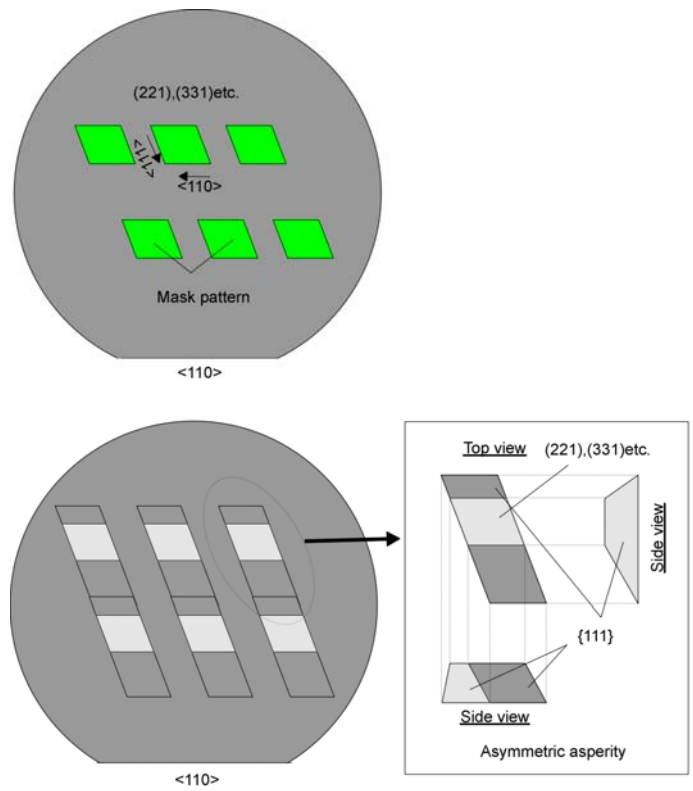


図 3.14 三次元フィーチャの例 (1)

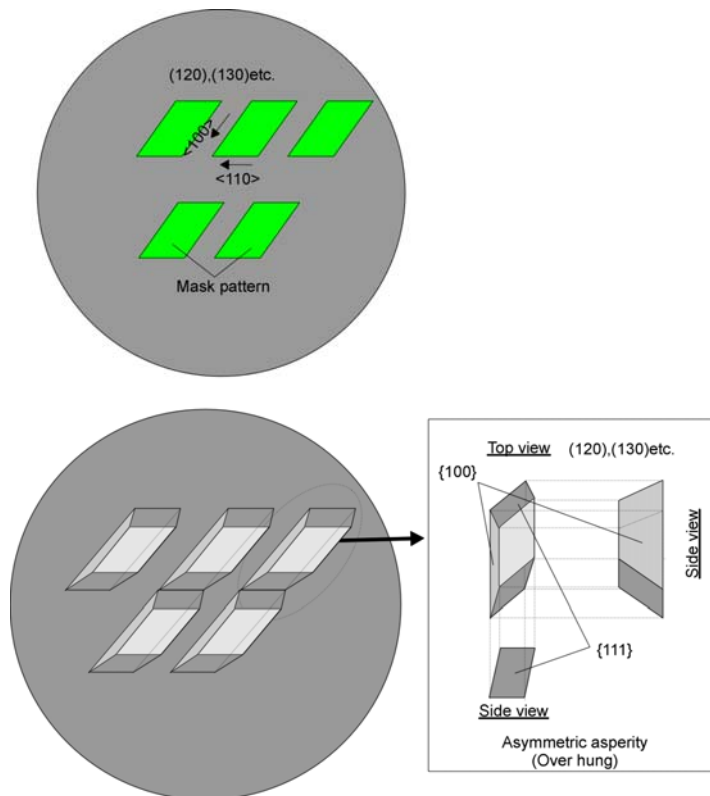


図 3.15 三次元フィーチャの例 (2)

3.5 テクスチャによる摩擦制御の可能性

3.5.1 マイクロスケールにおける表面粗さとしゅう動摩擦力

テクスチャテクスチャは光学的要素に代表されるようにさまざまな応用が試みられている。その応用の一つとして、しゅう動面への適用可能性が考えられる。第一章でも述べたように、微小機構では慣性力などの体積力に比べ、粘性や摩擦などの表面力が支配的となることが知られ、マクロスケールの機構では問題にならなかった静電気力や表面の水分による凝着力などの表面間の吸着力が微小機構のしゅう動を阻害することがある。逆に、表面状態や表面特性を変化させることにより表面観相互作用を調節することが、マイクロスケールでの摩擦制御に効果的となることが期待される。マイクロな表面形状制御も表面状態を変化させる有効な方法であると考えられる。微小な表面粗さが凝着力を大きく減少させることは以前から知られており⁽⁶⁾、磁気記録の分野でも表面の凹凸をつけるテクスチャリングによってスティクションを防止している。したがって、表面に微小な凹凸をつけることによって、凝着力を減少させ、同時に摩擦力を低下させることが可能であると考えられる。

3.5.2 表面幾何学の制御によるしゅう動摩擦力制御への応用

近年テクスチャによって、摩擦力を低減、もしくは制御する試みがなされている。上述のようにマイクロスケールにおける表面幾何学としゅう動摩擦力には何らかの関係があり、数百 nm オーダのピッチおよび数十 nm の深さを持つ周期的な突起を配置したテクスチャを作製し、その摩擦特性を評価した研究がある⁽⁷⁾。図 3.16 にその AFM 像を示す。この研究報告によれば、パターンのない平面上での摩擦力の 1/10 以下なり、突起深さと関係があることを示した。また、摩擦力と突起先端の曲率半径との関係を定量的に評価を行い、テクスチャになどの表面処理による摩擦力の可能性を示したが、設計指針の確立には至っていない。

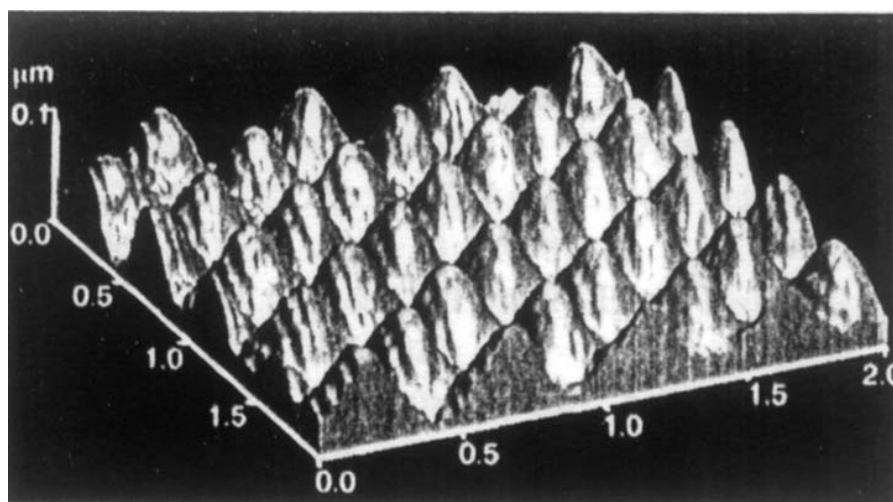


図 3.16 周期表面構造の AFM 観察例

これまで報告されてきたテクスチャによる摩擦低減、もしくは制御の実験的検証のほとんどは、ピンオンディスクのような点接触の領域である。実際の微小機構の接触は数 nm～数 mm までの寸法におよび、これらの微小機構に対応するような微小面圧

下の面接触における摩擦制御は重要である。

摩擦力に起因する真実接触面積や曲率半径を制御する，すなわちテクスチャを制御することによって，摩擦力制御は可能であると考えられるが，どの程度変化させられるのか実験的に検証をすることが重要である。

3.6 結言

結晶面方位，マスク方位および形状の設計パラメータと，実現可能な創成されるテクスチャ形状の関係をあきらかにした．結晶の規則性を利用するため幾何学形状は制限されるものの，設計パラメータを変えることで非対称な断面形状やオーバーハングした形状など種々の形状が創成可能であることを示した．また，テクスチャの応用として，しゅう動摩擦力制御を挙げ，その可能性を示した．

第4章 テクスチャの試作

4.1 緒言

シリコンはぜい性材料ではあるものの、機械的強度が比較的高く、電子回路を周囲の構造に組込むことができるなどの理由から微小構造材料として多用されており、これらの表面に種々の機能を付与することでさらに応用が広まることが期待される材料である。

この章ではまず結晶性を利用した加工が容易な単結晶シリコンを対象に、ダイサまたはフォトリソグラフィによるパターンニング、異方性エッチング加工による除去加工を用いた2種の加工方法についてテクスチャ面を試作し、実験的な検証を行うこととする。ここでは、二章で示した設計パラメータに対し、マスク方位を $\langle 110 \rangle$ で一定とし、 $[110]$ 晶帯軸回りに面方位を変化させたときに得られる開き角 109.47° の非対称V溝断面形状をもつテクスチャ面の試作を行い、その結果を評価する。

4.2 非対称V溝断面形状創成の原理

図4.1には、本章で試作する非対称V溝断面の創成原理図を示す。前章でも述べたように (110) 結晶面に $\langle 110 \rangle$ に方位付けしたマスクを設け、結晶の規則性を利用した除去加工である異方性エッチング加工を行うと、マスクの稜線からエッチングが始まり、対称なV溝が創成されると考えられる。これは、異方性エッチング加工を行うと $\{111\}$ 面からなる形状が創成されることが分かっており、図中に示してあるように単結晶シリコンの結晶格子中にある $\{111\}$ 面は創成される斜面に位置しているためである。 (110) 結晶面を $[110]$ 晶体軸回りに回転させる((221) 面、 (331) 面など)と $\{111\}$ 面の配置は変わらないため、同じ開き角を持った非対称なV溝が創成されると考えられる。

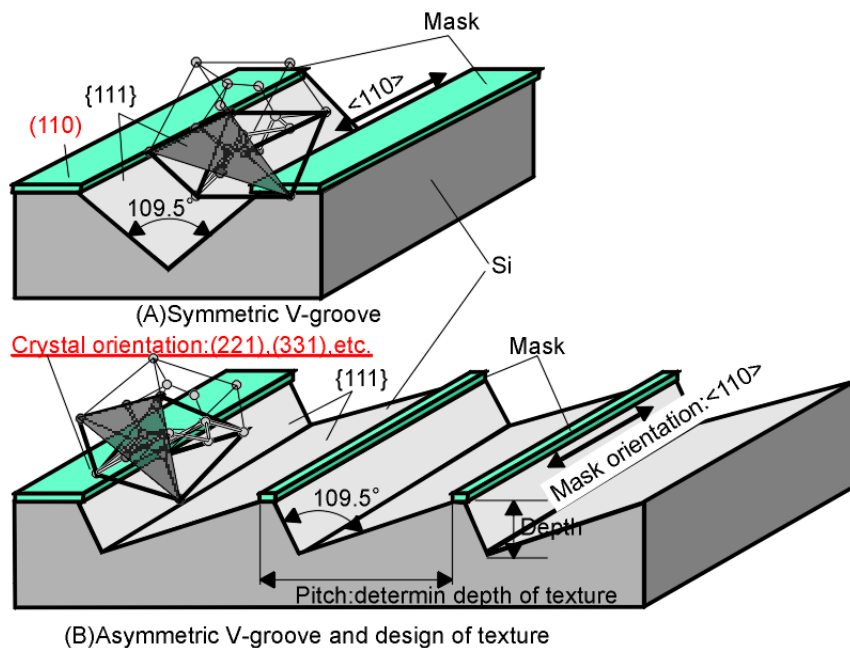


図 4.1 結晶の規則性を利用した V 溝の製作

4.3 テクスチャの製作と評価

テクスチャ面の製作において、一般的なアプローチとして①パターニング②除去加工の二つが挙げられる。

本章では、①、②の工程を以下に示す(I)，(II)の2種類の方法で行った。

(I)①ダイシング+②KOH 異方性エッチング

(II)①フォトリソグラフィ+②KOH 異方性エッチング

4.3.1 ダイサによるパターニングを用いたテクスチャ試作と形状評価

前述したように、テクスチャを付与するアプローチであるパターニング方法や除去加工方法は唯一ではない。本節では、パターニングにダイシング、除去加工に異方性エッチング加工を利用した方法を提案し、その試作結果について示す。図 4.2 にこの製作手法の手順を示す。図に示すように、酸化膜付きのシリコンウエハに、ダイシングによってラインアンドスペースのパターニングを行い、 SiO_2 をマスクとして Si に異方性エッチング加工によりテクスチャ面を形成し、HF によってマスクである SiO_2 を取り除く。図 4.3 にこの工程で用いたダイサ写真を示し、表 4.1 にこの装置の仕様を示す。表 4.2 に異方性エッチング加工に用いたエッチャントの条件を示す。表 4.3 に実験に用いたダイサブレードの仕様を示す。なお、この実験以降の異方性エッチングも同条件で行った。

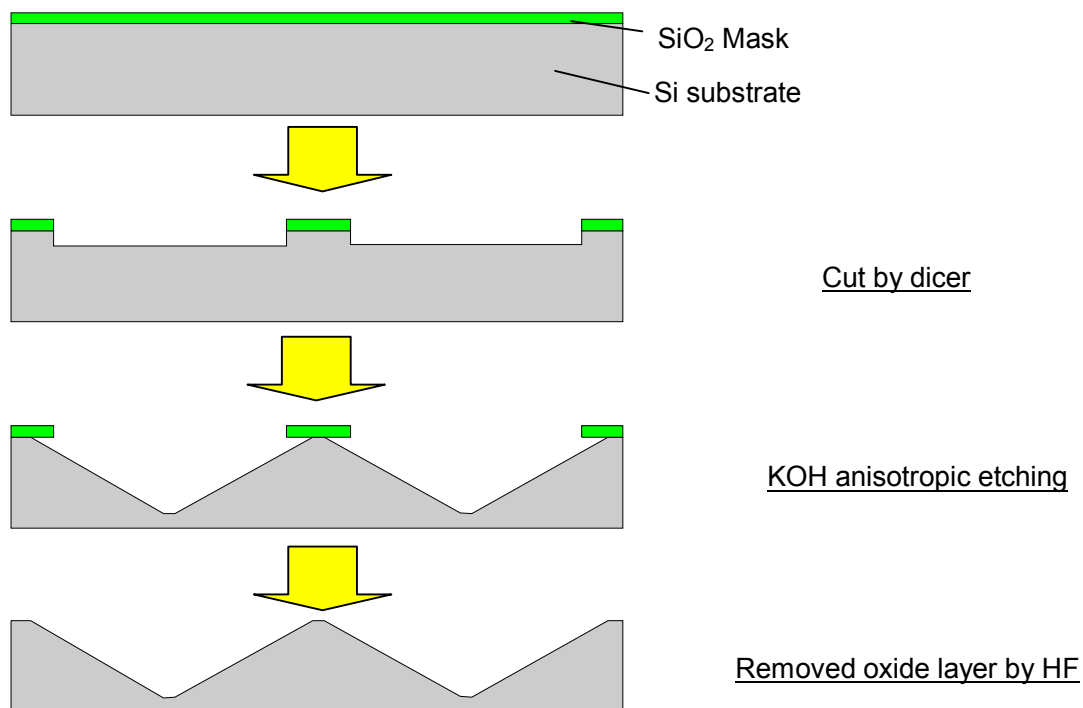


図 4.2 テクスチャ製作工程 (ダイサを利用した場合)



図 4.3 実験に用いたダイサ

表 4.1 ダイサの仕様

Model	DISCO DAD321		
Cutting stage	X axis	Stroke	248mm
	Y axis	Stroke	162mm
		Index	0.0002~160mm
	Z axis	Stroke	32mm
θ axis	Stroke	380°	
	Resolution	1.0s	
Spindle rotation			3000~40000rpm
Power of microscope			Synthesis 195x

表 4.2 エッチング条件

Composition	KOH
Concentration	35wt%
Temperature	60°C
Other component	IPA (Saturated)

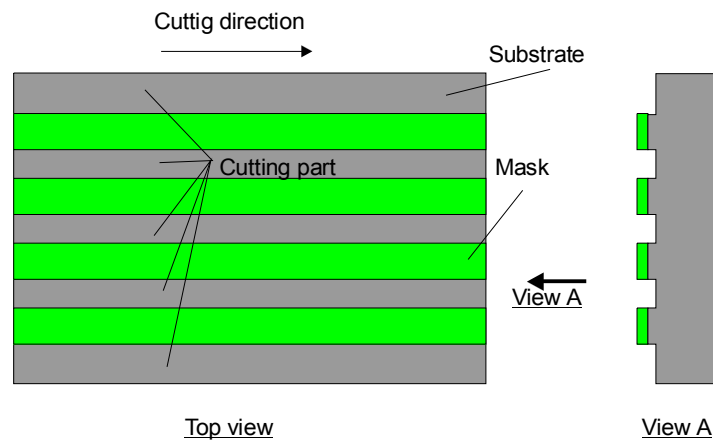
表 4.3 パターニングに用いたブレードの仕様

Model	NBC-ZH 27HEDD
Type	Hub
Grain	# 2000
Blade exposure	0.76~0.89mm
Blade thickness	0.0030~0.0035

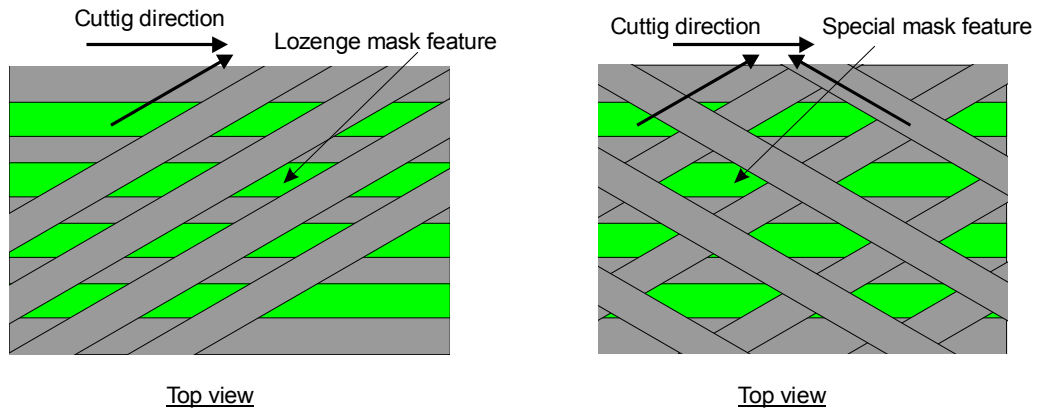
ダイサ加工の利点

提案した加工工程には、いくつかの利点が考えられる。利点を以下に示す。

- 数十 mm オーダ寸法の大規模な範囲で、テクスチャ面を試作することが可能
- ダイサブレードカーフ幅を変えることで、簡易に幅の異なるパターンニングを行うことが可能（空間波長 $21\ \mu\text{m}$ ~ $320\ \mu\text{m}$ 程度まで可変）
- パターンニングピッチを変えることで、簡易にピッチの異なるパターンニングを行うことが可能
- 図 4.4 に示すように試料を回転させることによって、矩形のみならず多角形のマスク形状のパターンニングを簡易に行うことが可能→三次元テクスチャへの応用



(Usual patterning)



(Application of patterning)

図 4.4 通常のパターンニング（上）と傾斜を持たせた多重パターンニング（下）

上記のような利点を持つ製作手法は、製作コストの削減にもつながる方法であると考えられる。この加工工程によって、特殊面方位の単結晶 Si ウエハに非対称断面 V 溝形状の試作を行った。テクスチャ面試作の実験には(331)単結晶 Si ウエハを用いた。

なお本実験においては、切削速度 5mm/s が最もチップングが小さく、これを切削速度とした。また、異方性エッチングによるエッチング時間は 55 分行った。ピッチは 70 μm で設計した。

図 4.5 にダイサによるパターニング後の SEM 写真とその試料に対して異方性エッチングを行った後の試料の断面 SEM 写真を示す。表 4.4 に写真撮影に用いた装置の仕様を示す。この図 4.5 から分かるように、エッチング後の V 溝斜面には多数の{111}面ステップが形成された。このような創成形状があらわれたの原因は二つ考えられる。

まず一つは、マスク方位のずれである。<110>方向にパターニングされたマスクに角度誤差が生じていた場合、複数の{111}面が縞模様状に現れ⁽⁸⁾、パターニングした稜線に階段状に現れることが報告されている。これは角度ずれがあった場合に顕著に現れる形状である。

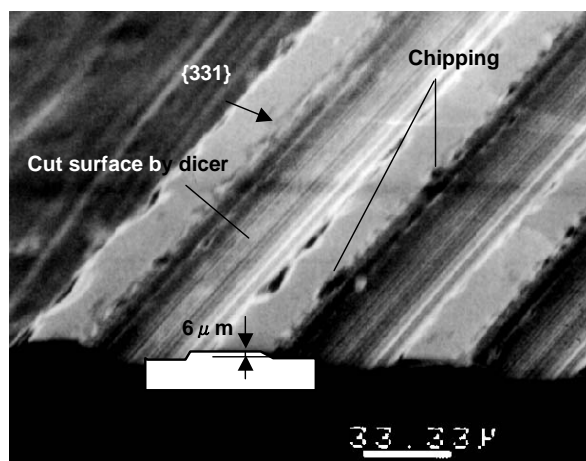
二つ目の理由として、カッティング時のチップングの影響である。同図のダイシング後の SEM 写真をみるとあきらかに数 μm オーダのチップングが生じていることが分かる。図 4.6 には、チップングの評価パラメータの定義を示し、図 4.7 にはダイシング後の稜線を示す。図 4.8 には異方性エッチング加工後の稜線を示す。

表 4.5 にエッチング前、及びエッチング後のダイサによるパターニング後の稜線の偏差およびチップング幅を示す。稜線の検出には三次元表面粗さ測定機を用いた。図 4.9、表 4.6 に用いた装置の外観図および仕様を示す。

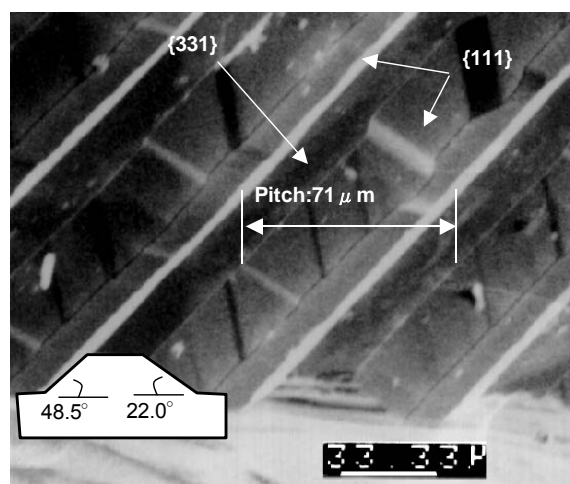
表 4.5 で示されるように、異方性エッチング後においては稜線の偏差が 3.7 μm 程度減少しており、形状精度が改善されていることが分かる。このような結果になる理由を図 4.10 に沿って示す。図のようにダイシングによって生じた、隣り合う二つのチップング(α , β)を想定する。この形状に異方性エッチングを施すと、まず同図(A)中においてチップングのマスク側先端(ラインで示してある)において{111}面の創成が始まる。{111}面は他結晶面方位に比べエッチングレートが低く、図(B)中の Y 軸方向の進行は遅い。これによって、同図(C)に示すように稜線の形状の偏差は小さくなり、チップングの影響は緩和される。これによって、偏差が小さくなったと考えられる。また、エッチング後の稜線には相対的に短い波長の変動がみられ、この結果も、上記の理由で説明が可能である。

第一の理由である多少の角度誤差も同様の理由で異方性エッチングによって緩和されるものの、結果として一定の方向に階段形状が生じる。図 4.8 に示すように本実験によって試作した形状の稜線は、ある一定方向の階段状になっているわけではなく、ランダムに段形状が創生されていることから、カット時のチップングの影響が強く残ったものであるといえる。

得られた形状の精度は、ダイサの加工条件(切削速度、切削水圧力など)やダイサブレード条件(粒度など)によって更なる改善が可能かもしれない。しかし、いずれにせよ機械加工でパターニングする限り、特にシリコンのような脆性材料においては、このようなチップングの影響は避けられない。本実験において、ダイシングを用いたテクスチャリング加工は、ミクロンオーダの誤差でパターニングを行うことができたが、高精度なテクスチャ面の製作には加工工程、条件の更なる改良が必要である。



a)after dicer cutting



b)after anisotropic etching

図 4.5 ダイサとエッチングによるテクスチャ作成結果

表 4.4 SEM の仕様

Model		ELIONIX ERA-8000S
Secondary electron detector		4ch
Acceleration voltage		1~35kV
Magnification		10~300,000x
Resolution	X, Y direction	4nm
	Z direction	1nm
Test piece stage	X, Y movement	40x80mm
	Z movement	8~40mm
	Rotation	360°
	Slope	±7.5°

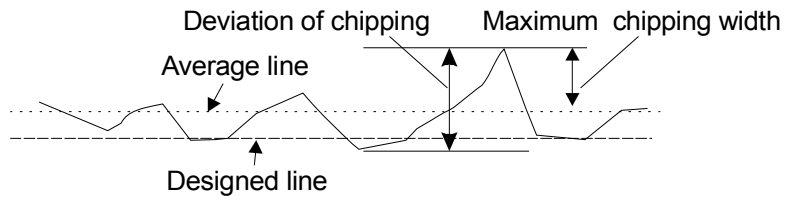


図 4.6 チッピングの定量的評価

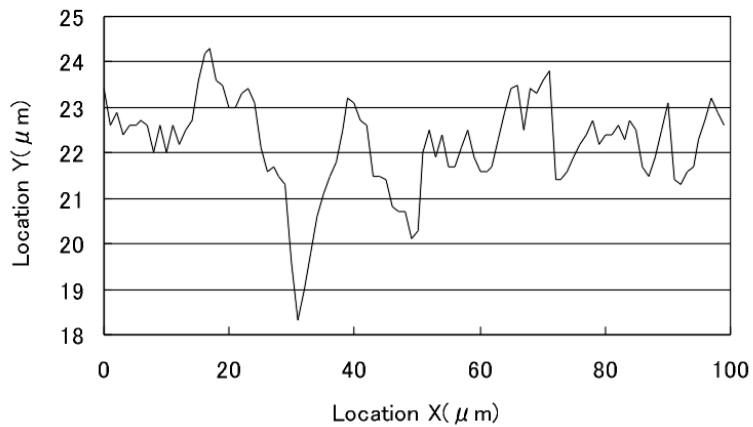
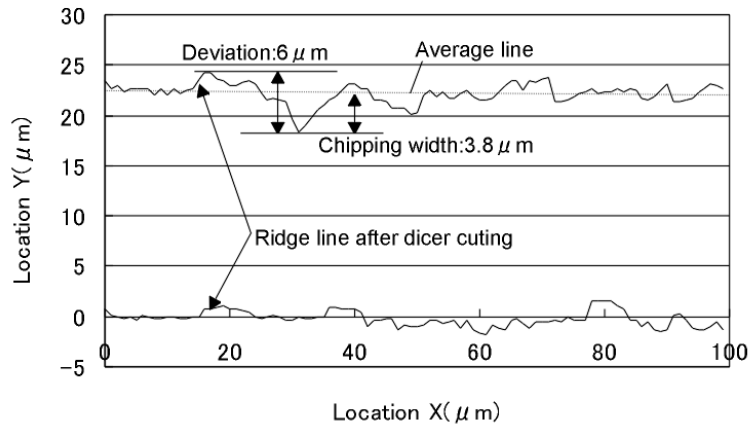


図 4.7 ダイシング後の稜線の断面曲線（下の図は上の図とスケールを変えたもの）

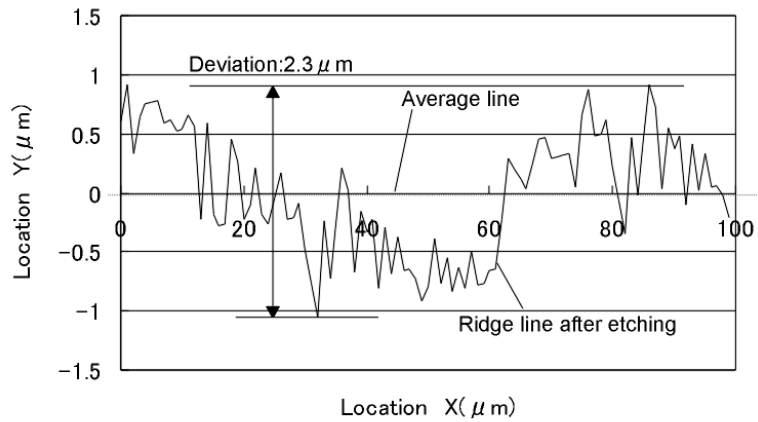


図 4.8 エッチング後の稜線の断面曲線



図 4.9 表面粗さ測定器

表 4.5 形状精度評価のまとめ

	Deviation	Maximum chipping width
After dicer cutting	6.0 μm	3.9 μm
After anisotropic etching	2.3 μm	—

表 4.6 表面粗さ測定機の仕様

Model		Mitutoyo SV-9700
Measurement range	X axis	100mm
	Y axis	100mm
	Z axis	8, 80, 600 μm
X axis measurement speed		0.1, 0.2, 1, 2mm/s
Y axis measurement pitch		0.001~10mm
XZ differential linearity		0.2 μm / 100mm

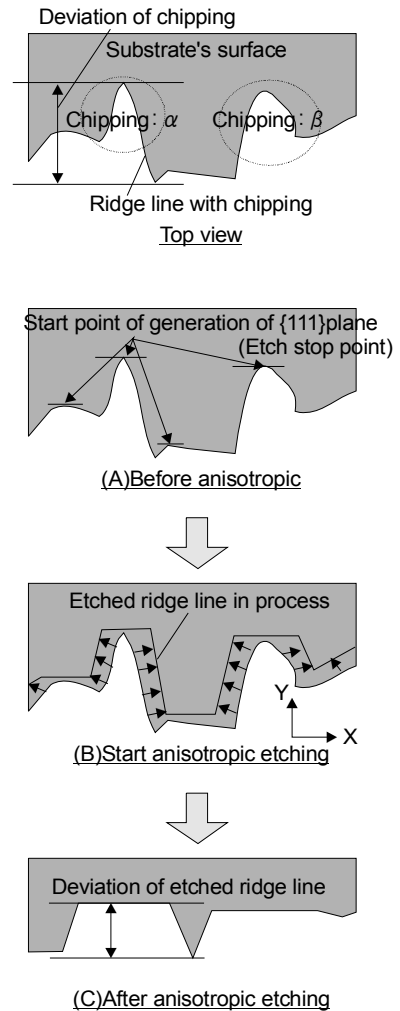


図 4.10 エッチングによる表面粗さ改善のメカニズム

4.3.2 フォトリソグラフィによるパターンニングを用いたテクスチャ試作と形状評価

ここでは、パターンニングには一般的に用いられているフォトリソグラフィ、除去加工には異方性エッチング加工を利用した方法によるテクスチャ面の試作結果について示す。図 4.11 にこの製作手法の手順を示す。図に示すように、酸化膜付きのシリコンウエハに、感光レジストを塗布、バイクし、フォトリソグラフィ装置を用いてラインアンドスペースのパターンが施されたガラスマスクパターンによってパターンニングを行い、パターンを現像する。現像後、HF で SiO_2 膜へパターンを転写する。これ以降の異方性エッチング加工手順は前節同様である。図 4.12、表 4.7 にはそれぞれフォトリソグラフィ装置の外観図、仕様を示す。

この加工方法は、ガラスマスクのパターンにパターン形状が拘束されてしまうが、サブミクロンオーダーの高精度なパターンを有しており、数 μm ピッチのパターンニングも可能である。

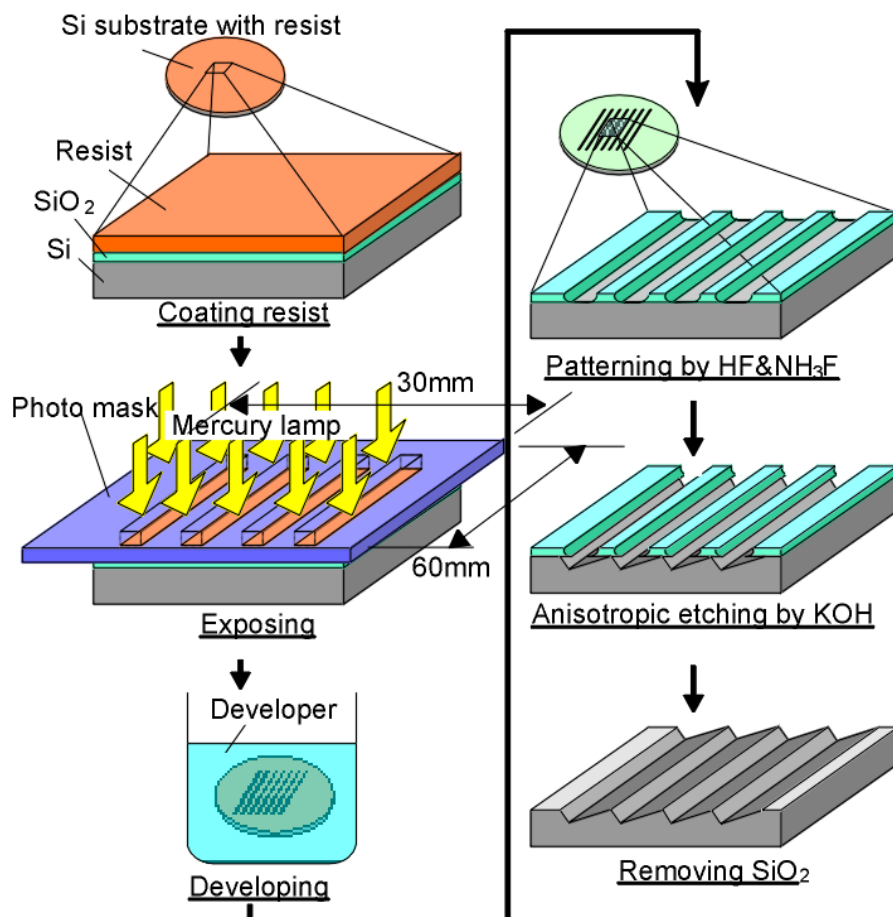


図 4.11 フォトリソグラフィによるパターンニングと異方性エッチング



図 4.12 マスクアライナの外観

表 4.7 マスクアライナの仕様

Photo mask size	4inch square
Wafer size	2, or4inch
Mask movement	X=±3mm, Y=±3mm
Aliment precision	Below5μm
Weight	500kg
Size	W750×D850×H1700mm

ガラスマスクの設計および評価

本実験ではピッチの異なる(12μm, 6μm)2種類のガラスマスクパターンを設計した(エリオニクスに外注). 図に示されているようにピッチが12μmのものはライン幅が8μm, ピッチが6μmのものはライン幅が3μmで設計してある. 図 4.13 に概略を示し, 表 4.8 に形状評価を行った結果を示す.

まず, 図 4.11 で示すように酸化膜付きの基板に感光レジストを塗布し, ガラスマスクでパターンニングを施す. 本研究室で用いる単結晶 Si には1μmの酸化膜がついており, レジスト現像後に HF(フッ酸)による酸化膜へのパターンニングを行った際, HFは等方性エッチャントであるために, 酸化膜厚さの2倍分, つまり2μmだけ横方向にエッチングが進む. つまり, 所望のパターンニングを行う際には, HFによるサ

イドエッチングを考慮に入れたマスクパターン設計をしなければならない。
 仮に、最終パターンニング幅を W_f とした場合、設計するマスクのライン幅 W_d は、

$$W_d = W_f - 2 \quad (4.1)$$

となる。本実験においては、ピッチ $12\mu\text{m}$ に関しては、最終パターンニング幅を $10\mu\text{m}$ 、ピッチ $6\mu\text{m}$ に関しては $5\mu\text{m}$ とした。このため、それぞれのマスクパターンのライン幅は $8\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ となる。

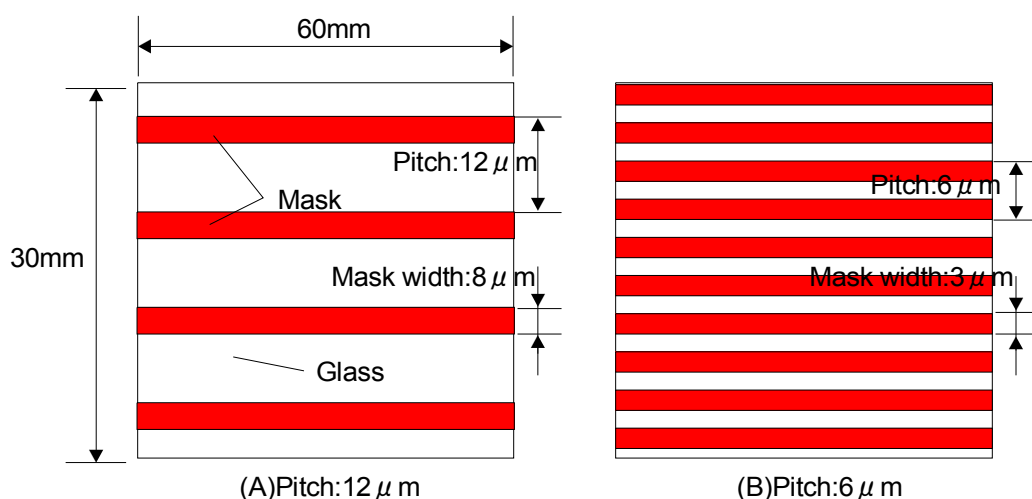


図 4.13 ガラスマスクパターン

表 4.8 マスク精度の評価結果

Pitch(μm)	12	6
Linearity($\mu\text{m}/10\text{mm}$)	± 0.5	± 0.4
Error of pitch(μm)	± 0.3	± 0.2

表 4.8 から分かるように、10mm 内では、真直度、ピッチ誤差ともにサブミクロンオーダの精度を持っている。このガラスマスクを用いて、3 種類の単結晶 Si(面方位が $(111)4^\circ$ オフ、 (221) および (551)) を用意し、テクスチャ面を試作した。

形状評価および考察

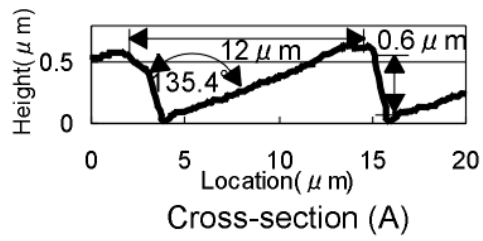
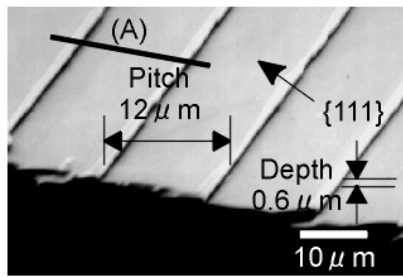
面方位が $(111)4^\circ$ オフ、 (221) および (551) 面のウエハにおいて、図 4.14(a),(b),(c) それぞれに、ピッチ $12\mu\text{m}$ のガラスマスクで試作したテクスチャ面の断面 SEM 写真を示す。三次元測定機を用いて、断面曲線が得られた $(111)4^\circ$ オフに関しては断面曲線も示してある。

面方位が $(111)4^\circ$ オフのウエハにおいて、図 4.15(a),(b),(c) それぞれに、ピッチ $6\mu\text{m}$ のガラスマスクで試作したテクスチャ面の断面 SEM 写真を示す。三次元測定機を用いて、断面曲線が得られた $(111)4^\circ$ オフに関しては断面曲線も示してある。表 4.9 に形状を評価した結果を示す。表に示す θ_1 および θ_2 は、角度が浅いほうを θ_1 、角度が大きいほうを θ_2 とした。

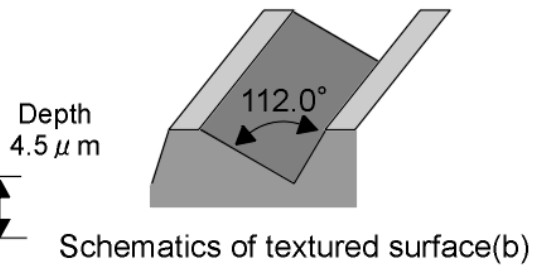
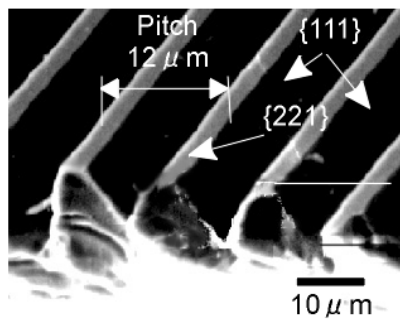
(111)4° オフのウエハで試作したテクスチャ面に関して、12 μm 、6 μm ピッチの両者ともに、傾斜角度が大きい θ_2 に関して、理論的な値 66.5° とは大きく異なっていた。この原因を検証するために同じ試料を用いて、エッチング時間を変化させて計測を行った。横軸には時間、縦軸には θ_2 傾斜角度をとった結果を図 4.16 に示す。この結果からエッチング時間に依存して傾斜角度は所望の傾斜角度に近づいていくことがわかり、所望の形状を得るためにはさらにエッチング時間を長くする必要がある。しかし、深さ方向のエッチング速度が 0.03 $\mu\text{m}/\text{min}$ であったのに対し、サイドエッチング量は 0.09 $\mu\text{m}/\text{min}$ と大きかったため、実験で用いたマスクスペースでは設計した深さまで到達するには不十分である。図 4.17 に示すようにエッチングを行いつぎると稜線があれ、非常にランダムな稜線になってしまうことが実験的に明らかになった。ラインアンドスペースのパターンを工夫する必要がある。

12 μm ピッチの(221), (551)単結晶 Si に関してはそれぞれ角度が理論的な角度と比べ $\pm 2^\circ$ 程度であり、測定誤差で説明できる範囲であると考えられる。SEM 写真がみづらいが、ほぼ設計通りの形状が試作できたといえる。真直度、ピッチ誤差もガラスマスクの精度よりも多少、誤差が大きかった。これはパターンニング時の誤差であると考えられる。最も考えられる原因は、レジスト剤である。レジスト剤の厚みが不均一であり、現像時に位置によって幅が異なると考えられる。なお、(221), (551)面の深さ方向のエッチング速度はそれぞれ 0.37 $\mu\text{m}/\text{min}$ 、0.34 $\mu\text{m}/\text{min}$ 程度であった。6 μm ピッチの(221), (551)単結晶 Si に関してはそれぞれ角度が理論的な角度と比べて大きく食い違っていた。レーザによる測定のため、測定方法が不適であった可能性が高く、今後の形状測定を検討する必要がある。

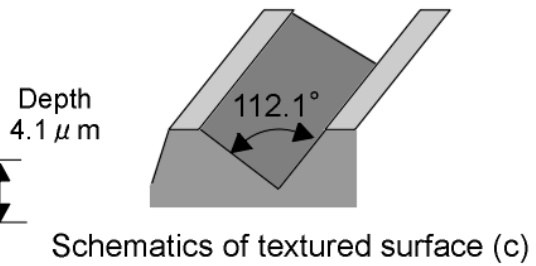
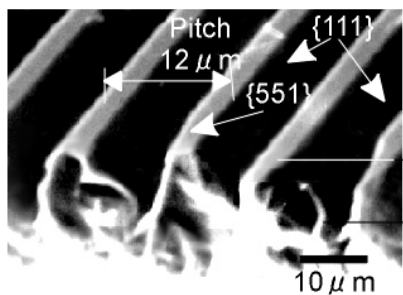
図 4.18 および表 4.10 には、角度計測に用いたレーザ顕微鏡の外観図および仕様を示す。なお、接触型の測定装置によってはスタイラス形状の影響が出てしまい、測定ができなかった。



(a)(1.16 1.16 1)substrate

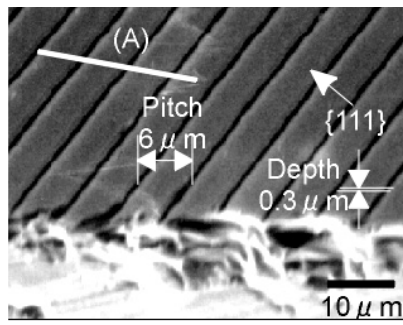


(b)(221)substrate

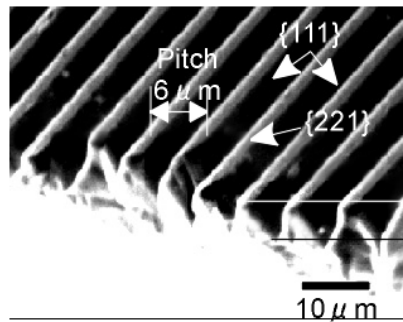
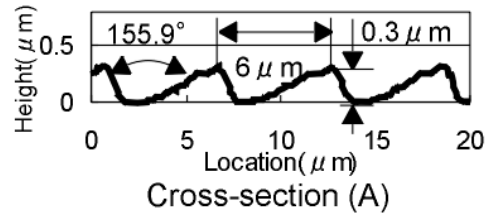


(c)(551)substrate

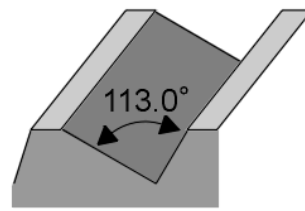
図 4.14 ピッチ 12mm のテクスチャ面の SEM 写真



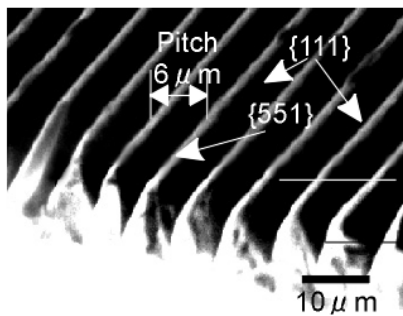
(a)(1.16 1.16 1)substrate



(b)(221)substrate

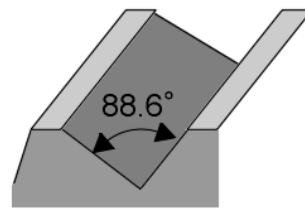


Schematics of textured surface(b)



(c)(551)substrate

Depth
2.2 μm



Schematics of textured surface (c)

図 4.15 ピッチ 6mm のテクスチャ面の SEM 写真

表 4.9 テクスチャ精度の評価結果

Orientation	(111) 4° off		(221)		(551)	
Pitch(μ m)	12	6	12	6	12	6
Linearity(μ m/10mm)	± 0.8	± 0.3	± 0.7	± 0.8	± 1.2	± 0.8
Pitch error(μ m)	± 0.65	± 0.3	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1
θ_1 (deg)	3.3	3.3	15.6	28.4	25.9	32.1
θ_2 (deg)	19.7	20.8	52.4	38.6	42.0	59.3
Depth(μ m)	0.6	0.3	4.5	1.6	4.1	2.2
Etching time(min)	18	10	13.8	10	12	10

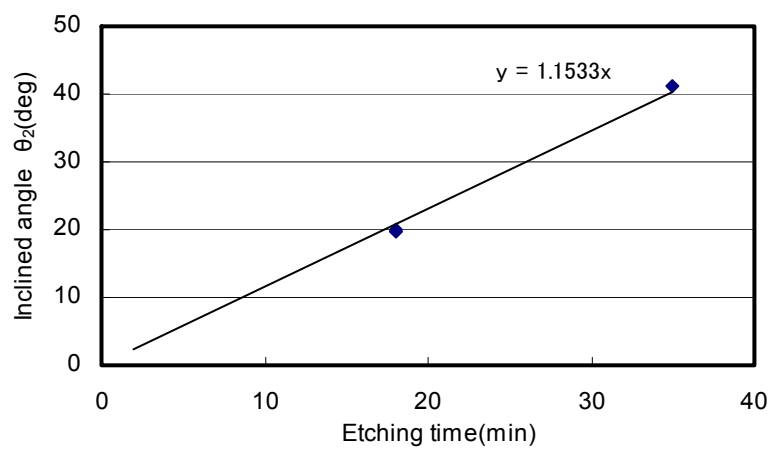


図 4.16 エッチング時間と傾き角

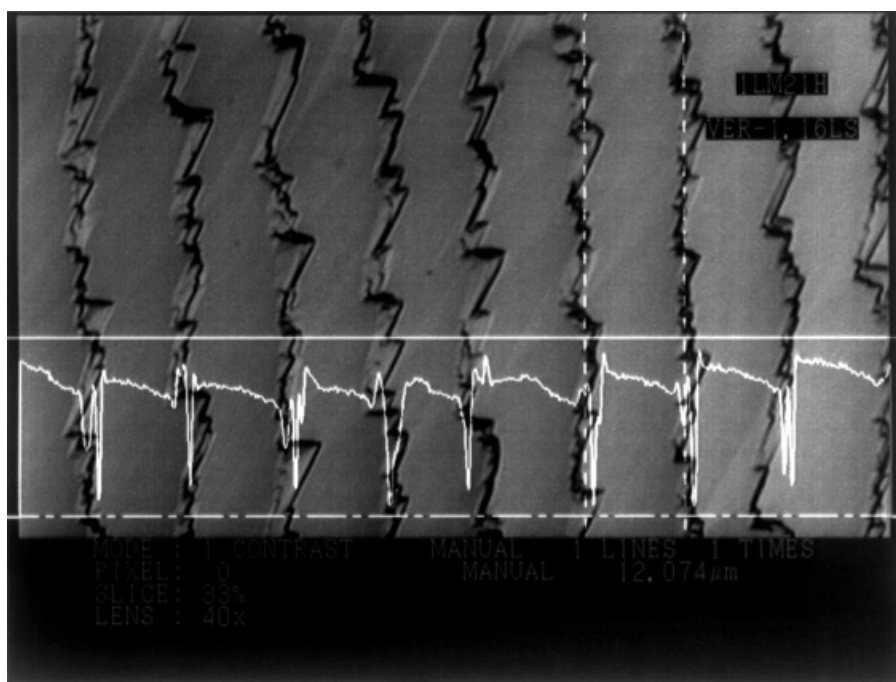


図 4.17 長時間エッチングによる稜線部の荒れ



図 4.19 レーザ顕微鏡

表 4.10 レーザ顕微鏡の仕様

Model		1LM21H
Object lens		100x
Accuracy		0.25 μ m
Measurement function (X, Y axis)	Measurement range	>0.25 μ m
	Resolution	0.001 μ m
	Measurement precision	(3 σ) 0.03 μ m
Surface shape measurement function (Z axis)	Resolution	0.01 μ m
	Measurement precision	(3 σ) 0.03 μ m

4.4 結言

特定の結晶面方位に<110>方位のマスクを設け、異方性エッチング加工を行うことにより、所望の非対称 V 溝断面形状を製作することが実験的に検証できた。

しかし、(111) 4° オフ単結晶 Si においては、傾斜角が大きい 67.5° の傾斜角を得ることができなかった。これは、エッチング時間に起因し、より長い時間異方性エッチング加工を行うことによって所望の形状が得られるものと考えられる。

また、試作方法においてダイサを用いた方法ではチップングの影響が最終形状に強く影響され、斜面は複数の {111} 面で構成されていた。精度が要求される場合、ダイサによる方法は不向きであり、加工条件を改善する必要があるといえる。図 4.19 には、本章で用いたダイサによるパターンニング方法とフォトリソグラフィを用いたパ

ターニング方法の利点, 適用例などをまとめたものを示す.

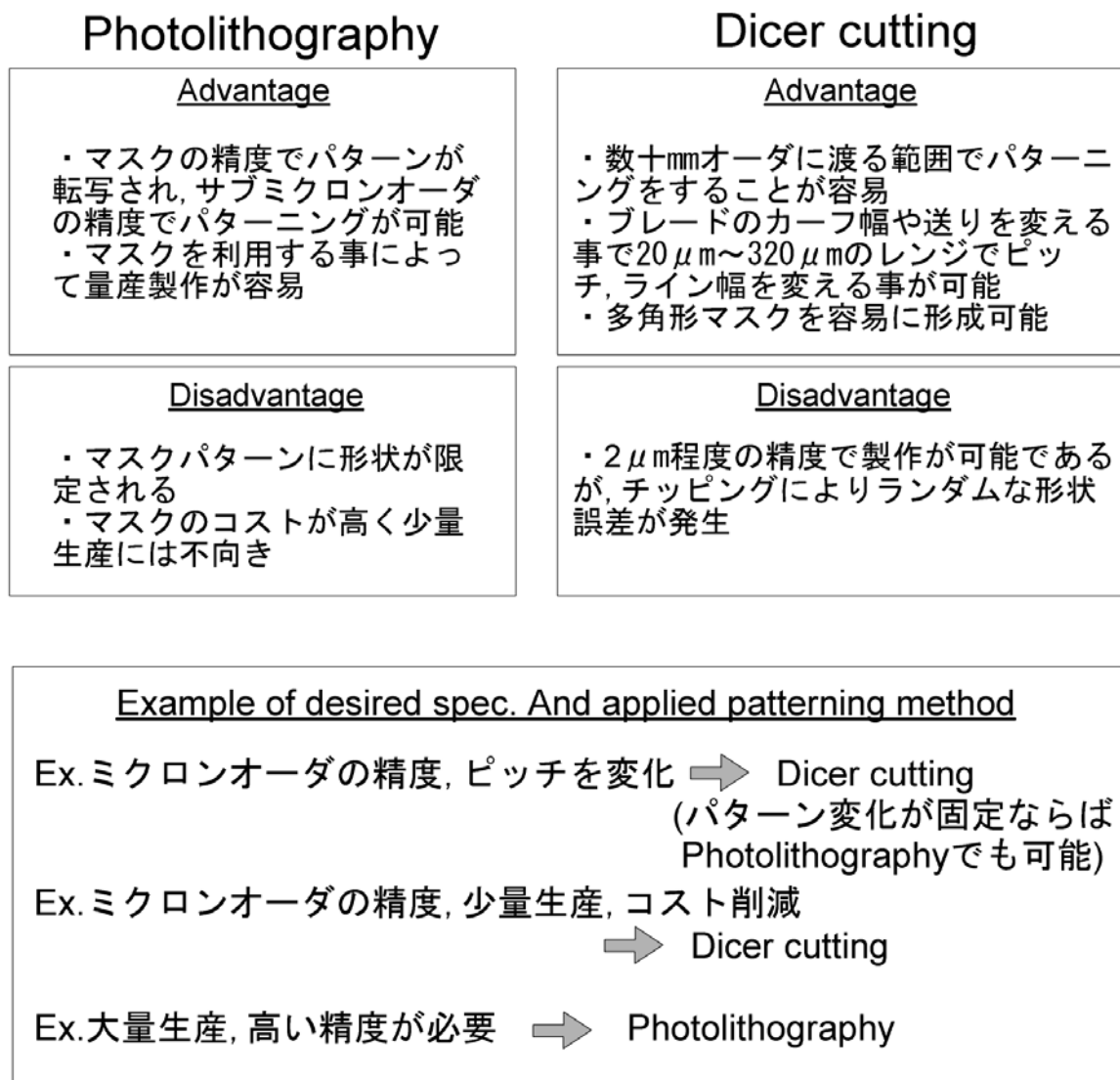


図 4.19 テクスチャ作成についての総括

第 5 章 微小摩擦実験装置の試作と評価

5.1 緒言

マイクロ、またはメゾスコピックトライボロジー分野の研究においては、ヘルツの弾性接触理論に代表されるような理論的解析をもとに摩擦の発生に対してさまざまな考察がされている。しかし、これらの実験的検証は主にピンオンディスクのような点接触や μm オーダ寸法における接触であることがほとんどであり、面接触しゅう動における実験的検証は微小機構の実用化において重要となるにも拘らず、従来の研究では微小しゅう動機構に適用されるような数 mm オーダもしくはそれ以上のオーダの面接触しゅう動における実験的検証は十分に行われていない。物質の表面は代表長さが nm 、 μm オーダにおいては非常に平滑な面が得られても、マクロにみるとうねりのような微小寸法の粗さと相対的に大きな波長のうねりが生じているため、面接触しゅう動は片当たりや面圧分布の不均一が生じやすく、面接触を良好に行うことは非常に困難である。しかし、面接触におけるしゅう動特性は、微小しゅう動機構の設計において非常に重要となる。面接触のしゅう動特性を評価するにあたって、まずしゅう動摩擦実験装置を試作する必要がある。

本章では、接触しゅう動面圧を 3 点で測定する高剛性型面接触しゅう動摩擦実験装置、および自律的に面圧(面接触状態)を補正する自律補正型面接触しゅう動摩擦実験装置の試作を行い、それぞれの装置特性の評価を行う。

また、試作した面接触しゅう動摩擦実験装置を用いて単結晶 Si の微小面圧下におけるしゅう動摩擦特性を実験的に検証する。

5.2 面接触しゅう動摩擦実験装置の装置構成と試作

まず、しゅう動摩擦実験装置において要求される仕様の概要を以下に示す。

- ・ しゅう動面に作用する摩擦力の測定が可能 (テクスチャの方向性を考えると二軸の同時測定が必要)
- ・ 垂直荷重を変化させ、面圧設定の調整が可能
- ・ 試料同士を相対的にしゅう動させるための駆動機構が必要

図 5.1 は、これらの仕様を満たす面接触しゅう動摩擦実験装置の装置構成の概略を示す。ここで試作した面接触しゅう動摩擦実験装置においては、特徴的な機構として 2 つの機構(荷重負荷機構、しゅう動摩擦検出機構)がある。同図左に示すように荷重負荷機構は、回転機構が設けてあり、ステッピングモータが内蔵された電動ステージが設置されている。表 5.1 にこの電動ステージの仕様を示す。このステージ上にウェイトが載せてあり、電動ステージの駆動によってしゅう動摩擦検出機構部にかかる負荷を調節することができ、正から負の荷重(面圧)における測定も可能である。このステージが図右に移動する際には荷重を負荷する方向、同左に移動する際には荷重を除荷する方向になる。同図右中央部に網掛けで示した部分である摩擦力検出機構の試作については次節および次々節で述べる。

また、図右下に示すようにしゅう動は GPIB ボードを介し PC で制御された X-Y ステージによって行う。表 5.2 に X-Y ステージの仕様を示す。図 5.2 に示すように X-Y ステージ上には正三角形の頂点に位置するように配置された Z 軸ステージによる調整機構が設置してあり、片当たりなどの面圧の不均一を調整することができる。図

5.3 に実際の配置を示す．なお Z 軸ステージは回転ステージ上に設置してあり，試料を回転させて，さまざまな方向のしゅう動が可能である．また，本研究において，超音波による接触状態の測定を試みたが，調整不良のためかノイズレベルの信号しか得られなかった．参考として，図 5.4 にジグの写真と実際の配置を示す．

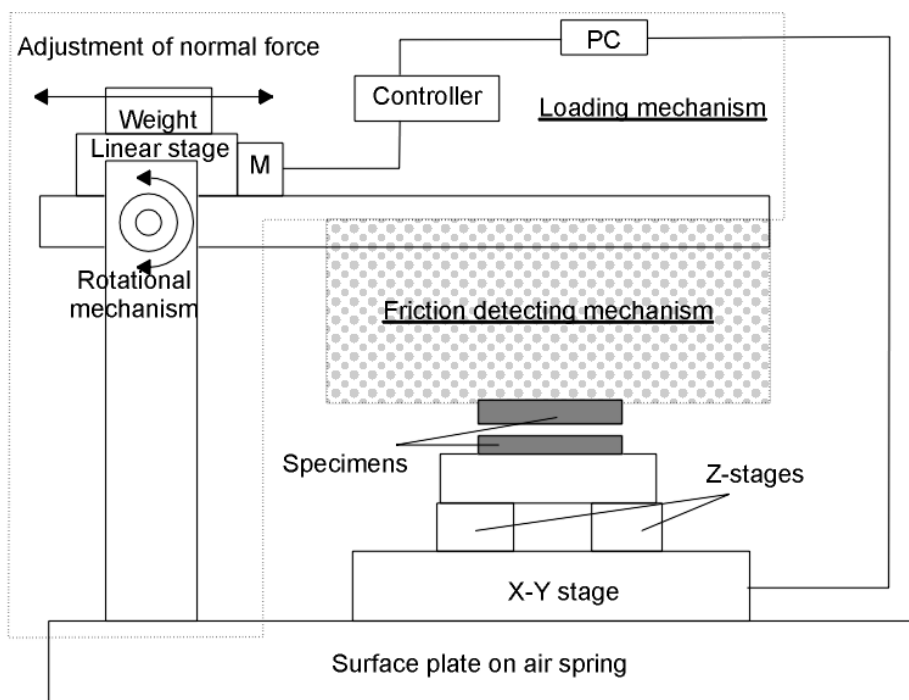


図 5.1 実験装置概要

表 5.1 ステッピングモータステージの仕様

Element	Specification
Model	MMU-60X
Resolution	0.5 μ m
Stroke	± 10 mm
Stopping accuracy	0.04mm
Linearity	0.015mm
Load resistance	49N
Mass	0.45kg

表 5.2 XY ステージの仕様

Element	Specification
Model	ALD-105-H1L
Resolution	0.1 μ m
Stroke	50mm
Stopping accuracy	$\pm 0.2 \mu$ m
Maximum speed	40mm/sec
Load resistance	5.5kgf
Mass	10.7kg

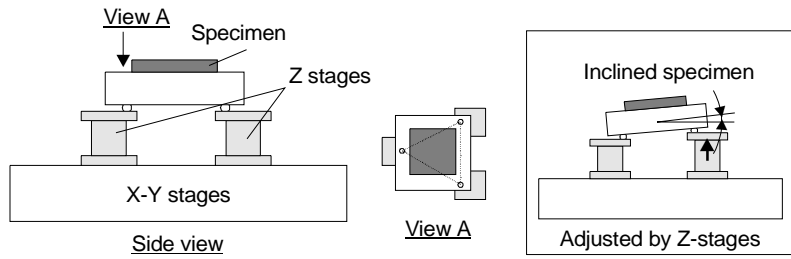


図 5.2 接触状態を調整するための機構

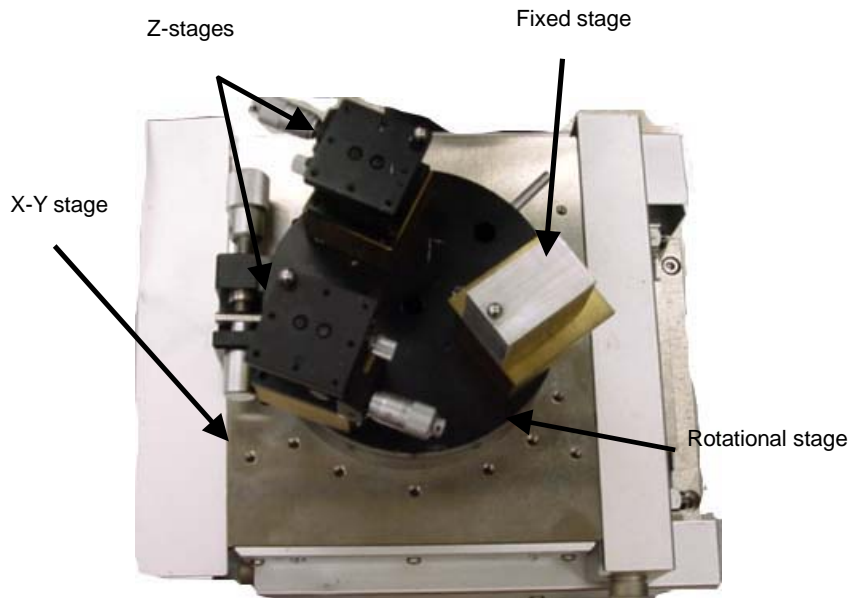


図 5.3 XY ステージ上に載せられた回転ステージおよび Z 軸ステージ,

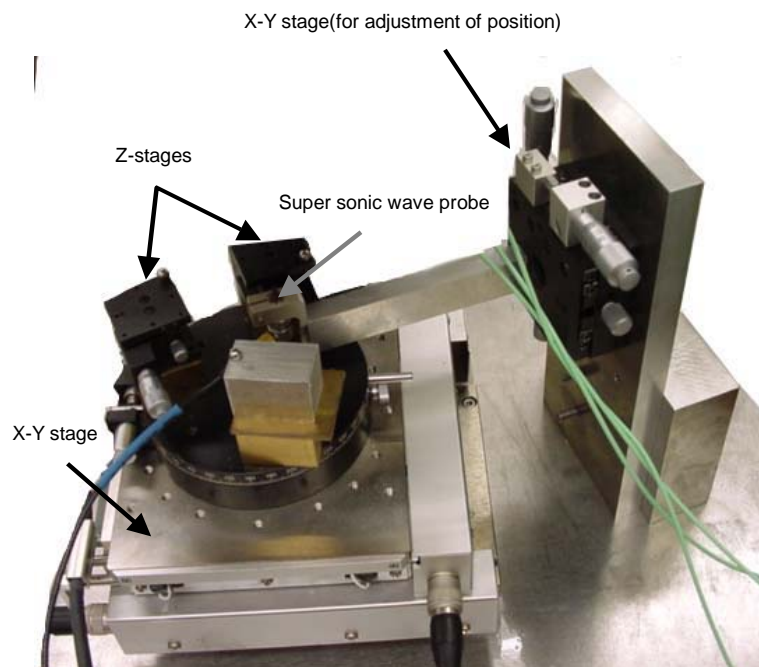


図 5.4 超音波センサによる接触状態の確認

5.3 高剛性型摩擦力検出機構の試作と特性評価

図 5.5 に示すように、面圧分布を把握するためには接触において片当たりを生じた、または面圧に偏りが生じた際に発生するモーメントを検知する必要がある。同図に示してあるような X 軸回り及び Y 軸回りのモーメントを検出するためには、最低 3 点の分力の検出が必要である。また、3 軸力センサの配置は 3 点の間隔をできる限り大きくすることによってよりモーメントの発生に対し感度が高くなる。

これに基づき、面圧が均一になっているかどうかを測定し、面圧分布を調整可能な面圧測定型しゅう動摩擦力検出機構を試作した。図 5.6 には摩擦力検出機構部の概略図、図 5.7 には実験装置構成の写真を示す。図 5.6 に示すように、摩擦検出機構は水晶式 3 軸力センサ 3 つを配置しており、高剛性な機構になっているのが特徴である。3 軸力センサの出力信号は、X、Y 軸方向のそれぞれに関しては出力を加算し各軸 1 つずつの出力信号とし、Z 軸方向に関しては 3 つの信号をそれぞれ検出し、計 5 つの出力信号を得る。これによって前述のように、図 5.6 のように配置した 3 つの各力センサの Z 軸方向出力バランスからどのようなモーメントが作用しているか(どのような片当たりを生じているか)を検出可能であり、この面圧の不均一は前述の図 5.2 の調整機構により面圧のバランスを調整することができる。表 5.3、表 5.4 にはそれぞれ 3 軸力センサ、チャージアンプの仕様を示す。

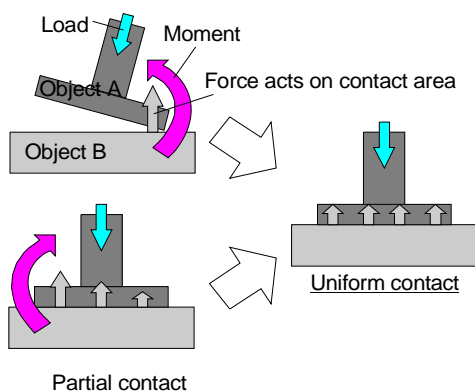


図 5.5 2 面の接触状態 (当りの状態)

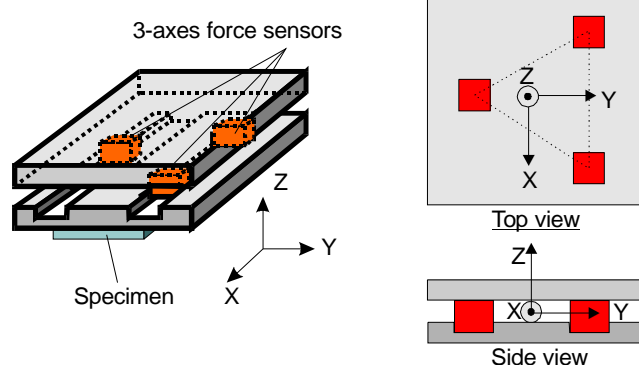


図 5.6 3 点での力測定による摩擦力測定

表 5.3 3 軸ロードセルの仕様

Model	KISTLER Type9251A
Measuring range (in axis z)	±4900 N
Measuring range (in axes x and y)	±2400N
Resolution	10mN
Overload capacity	20%
Sensitivity (z)	4.2pC/N
Sensitivity (x, y)	7.6pC/N
Stiffness in z-direction	980N/μm
Natural frequency	8 kHz
Linearity	± 1%
Stiffness in x- and y-direction	294N/μm
Temperature coefficient	-0.02%/°C

表 5.4 チャージアンプの仕様

Model	KISTLER TYPE5007
Measuring ranges	$\pm 10 \dots 500,000 \text{ pC}$
Transducer sensitivity	$0.1 \dots 11,000 \text{ pC/M.U.}$
Accuracy (of two most sensitive ranges)	$< \pm 3\%$
Output voltage	$\pm 10\text{V}$
Accuracy (of other range stages)	$< \pm 1\%$
Linearity	$< \pm 0.5\%$
Calibration capacitor	$1,000 \pm 0.5\% \text{ pF}$
Zero stability	$\leq \pm 0.2 \text{ mV}$

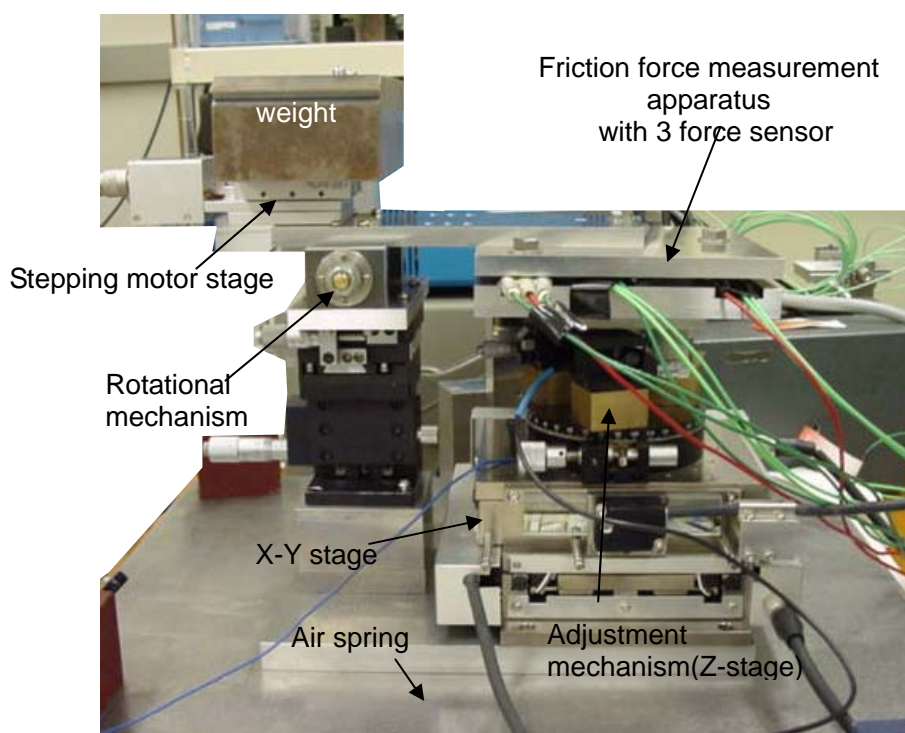


図 5.7 高剛性型力測定装置 (1)

図 5.8 には定常状態における実験装置の信号出力波形を示す。横軸には時間、縦軸には出力電圧を示してある。出力信号には時間に依存した大きなドリフトがみられるが、しゅう動実験時間内においては線形であるとみなし、補正を行った。同図、出力波形をみると、CH4(X)の出力波形の変動が目立った。これは、力センサ自身の影響であり、接触不良などの何らかの原因でチャージが外部に漏れ不安定になっているものと考えられる。

また、高剛性しゅう動摩擦力検出機構部の固有振動数は約 2.3KHz であった。

図 5.9 に、面圧に偏りがある接触状態パターンの出力信号例を示す。横軸には時間、縦軸には力センサにかかる負荷を示してある。図に示すように、Z 軸方向の出力によりどのように片当たりしている状態が認識できる。図 5.10 には、調整機構によって調整をした後の比較的良好な面圧分布が得られたときの出力波形例である。この図のようにある程度の差(ここでいう差とは、各チャンネルに作用する負荷の平均値の差)

まで荷重のバランスを調節可能であるが、調整機構が手動調節でもあり 100mN 程度以下の差に抑えることは困難であった。また、トータルの垂直荷重における偏差は 220mN 程度であり、標準偏差は 50mN 程度であった。このときの、垂直荷重は接触前(負荷前)と接触後(負荷後)の差分で計算され、この図では 2470mN である。

X, Y, Z 方向の出力信号に対して、キャリブレーションを行った。キャリブレーション結果を図 5.11 に示す。

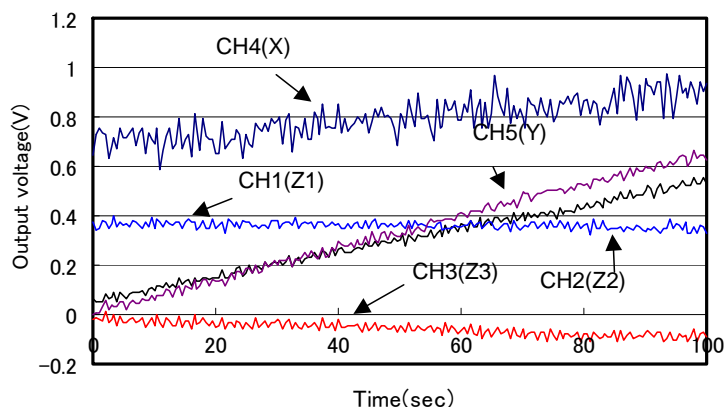


図 5.8 各軸出力のドリフト

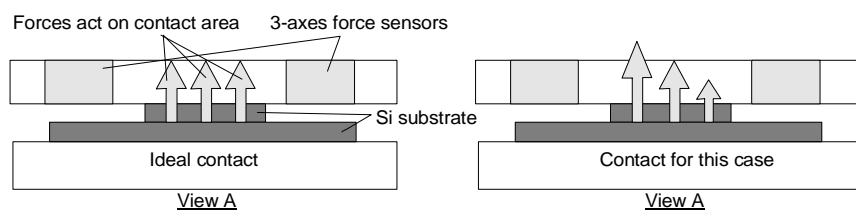
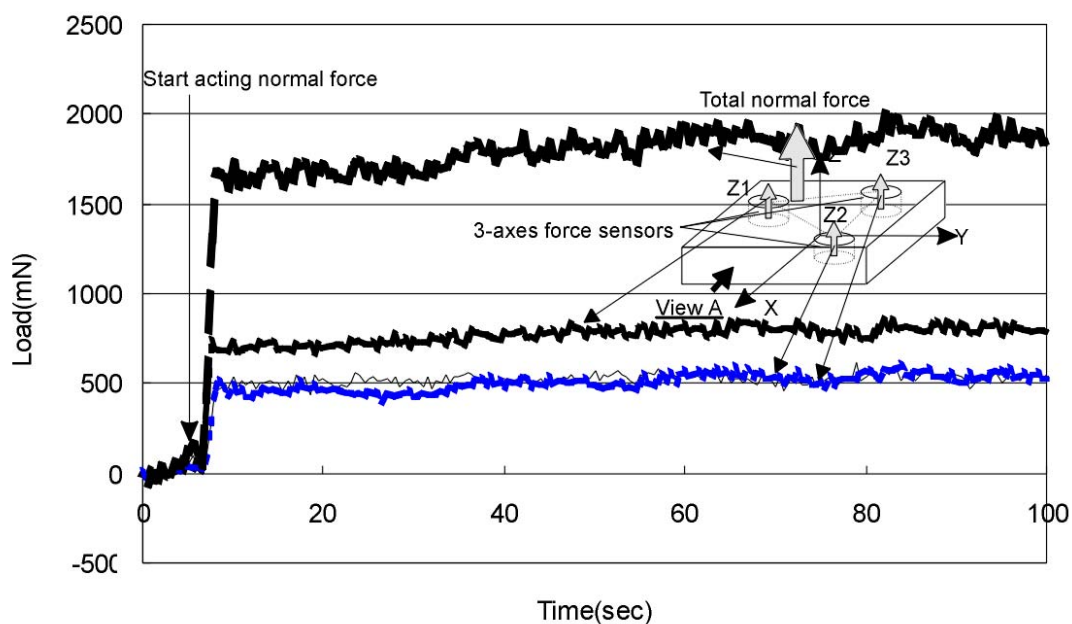


図 4.9 当りの不良と測定例

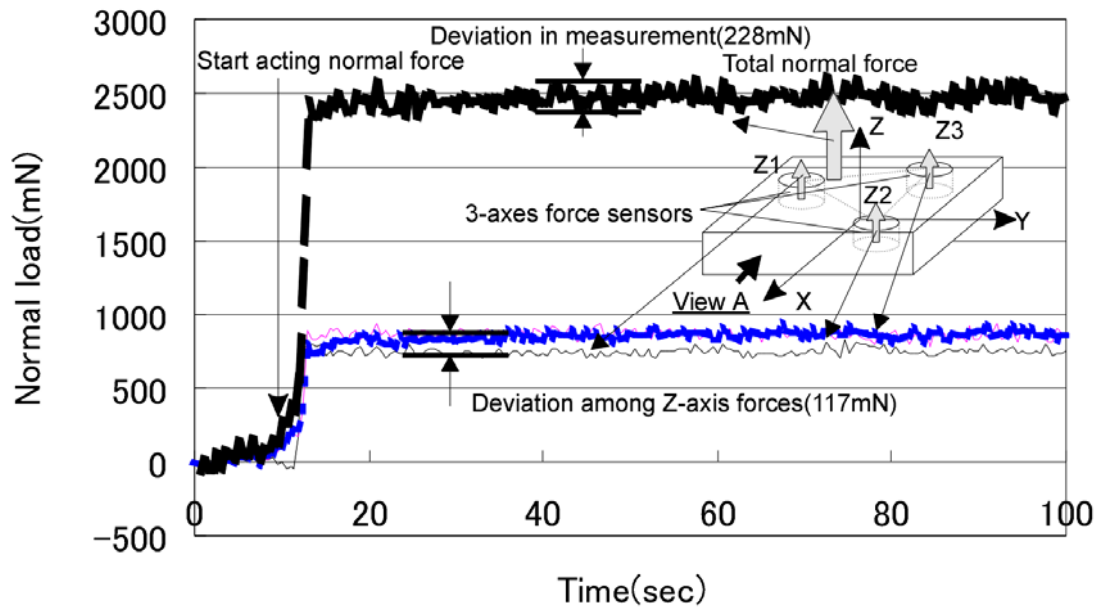


図 5.10 当りを調整した後の力分布

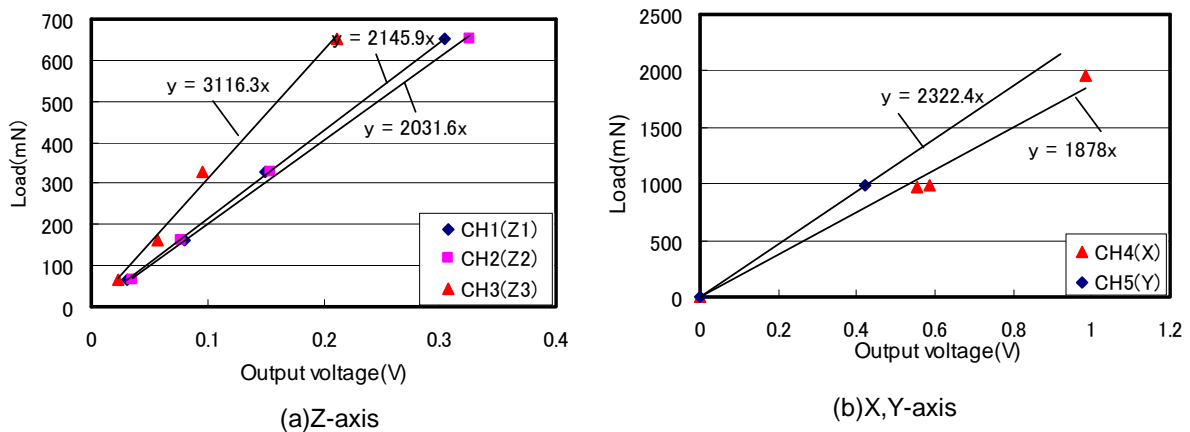


図 5.11 キャリブレーション結果

5.4 自律補正型摩擦力検出機構の試作と特性評価

5.4.1 しゅう動試験装置の設計指針

前節では、面接触状態を測定する高剛性測定型しゅう動摩擦力検出機構を試作した。これとは対照的に、面接触を自律的に補正するしゅう動摩擦力検出機構を試作した。自律的に接触状態を補正し、面接触しゅう動を行う装置を試作するにおいて考慮すべきことは、図 5.5 に示したように、接触において片当たりを生じた、または面圧に偏りが生じた際に発生するモーメントをキャンセルするような機構にすることが最も重要となる。

またしゅう動による摩擦測定を行うため、静的に面接触を補正するだけでなく、動的に補正する必要がある。そのためしゅう動する際にしゅう動面にピッチングを生じさせるモーメントを作用させないような構造にする必要がある。

5.4.2 実験装置の試作

図 5.12 に示すような、自律的に接触状態を補正しつつ摩擦力を測定する機構を試作した。1 軸力センサを三角錐の稜線に沿って配置したトライポッド構造であり、1 軸力センサの両端に弾性ヒンジを設けることによって、1 軸力センサには軸力のみが作用し、1 軸力センサに作用するモーメントをキャンセルする構造になっている。また、同図のように 1 軸力センサを 3 次元的に配置し、ある傾斜角で傾けることによって 1 軸力センサに作用している軸力を幾何学的関係から分力を計算し、3 軸方向の力を算出することが可能である。3 つのセンサ、つまり 3 つの出力信号のみで面接触しゅう動特性の評価を行うことが可能であり、高剛性型では 5 つの信号出力であったことに比べて簡便である。ここで傾斜角は 20° とした。この角度は、ターゲットとしているシリコン-シリコン間の静止摩擦係数が 0.4 前後である報告⁽⁹⁾があることをもとに X 軸の分解能 : Z 軸の分解能が 5 : 2 程度になるように設計したためである。

さらに、図 5.13 に自律補正型しゅう動摩擦力検出機構の構造を示す。同図のような設計によって、しゅう動面に作用する摩擦力としゅう動する際の駆動力を X-Y 平面に作用させ、しゅう動中にピッチングを生じさせるようなモーメントの発生を極力小さくしている。またトライポッド機構部は慣性モーメントをしゅう動中心において点対称に等価になるように設計している。

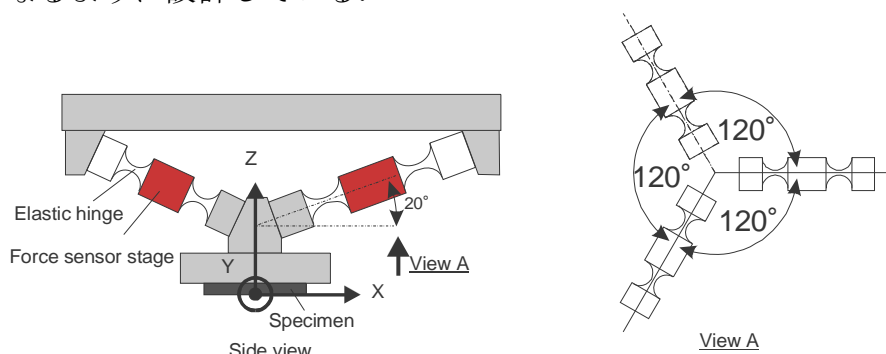


図 5.12 トライポッド機構

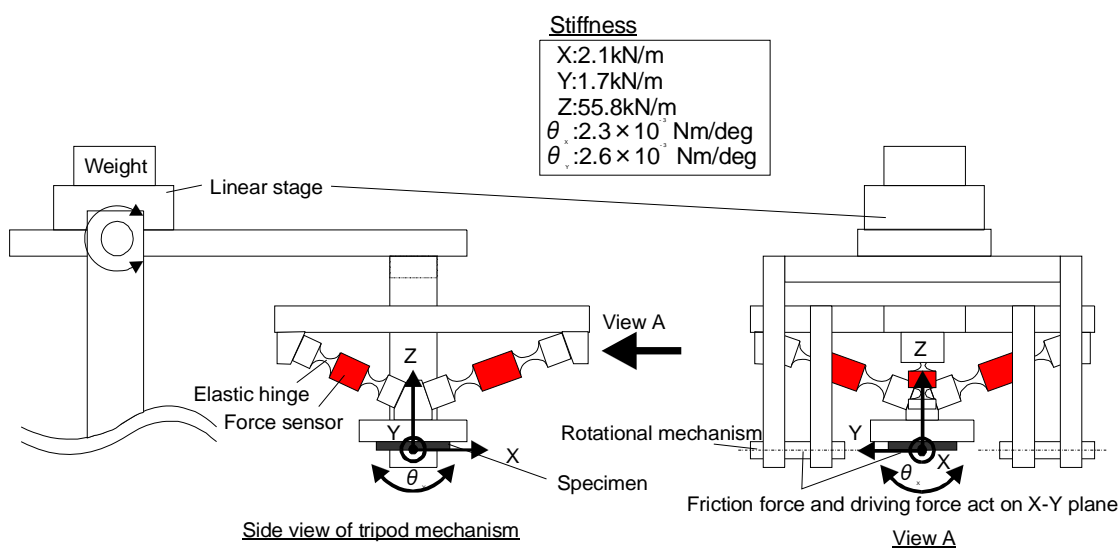


図 5.13 面圧自律調整機構

5.4.3 実験装置特性

図 5.13 には自律補正型しゅう動摩擦力検出機構の各軸及び X, Y 軸回りの剛性についてまとめたものも示してある. 図 5.14 には実際の装置写真を示す. この評価結果から X, Y, Z 軸方向のばね剛性は数百 kN/m 以上と非常に高く, X 軸回り, Y 軸回りのモーメントに対する剛性はそれに比較して非常にやわらかい構造になっている. 設計指針のように, モーメントをヒンジによって吸収しキャンセルするような構造であることが分かる.

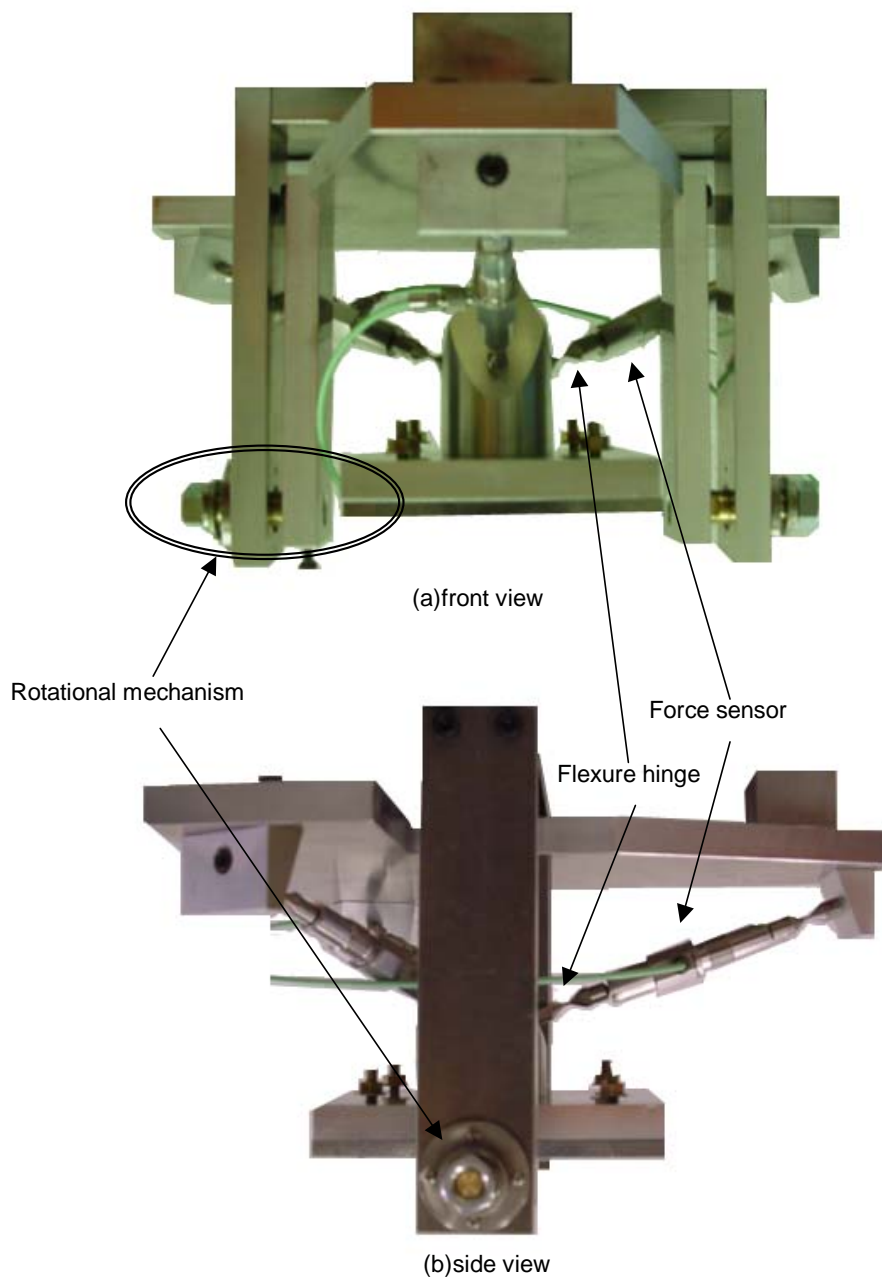


図 5.14 自律調整型摩擦測定装置

図 5.15 には装置構成の概略図を示し，同図中には各軸方向の測定分解能および測定可能レンジを示してある．図 5.16 は装置全体写真を示す．図 5.17 には荷重負荷機構の下部に用いたスペーサについて示してあり，3つのスペーサが組み合わされている．③のスペーサを取り外し，スペーサ①および②を組み合わせると高剛性型しゅう動摩擦装置の高さに合うように設計してある．

高剛性型同様，静止中及び X-Y ステージによるしゅう動中において，力センサの各出力信号はひずみアンプを介して AD 変換され，PC に取り込まれる．1軸力センサの仕様を表 5.5 に，チャージアンプの仕様を表 5.6 に示す．

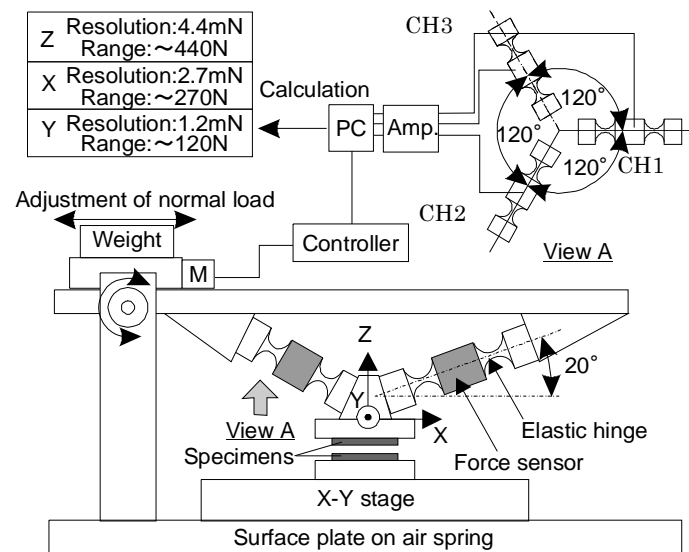


図 5.15 装置構成図

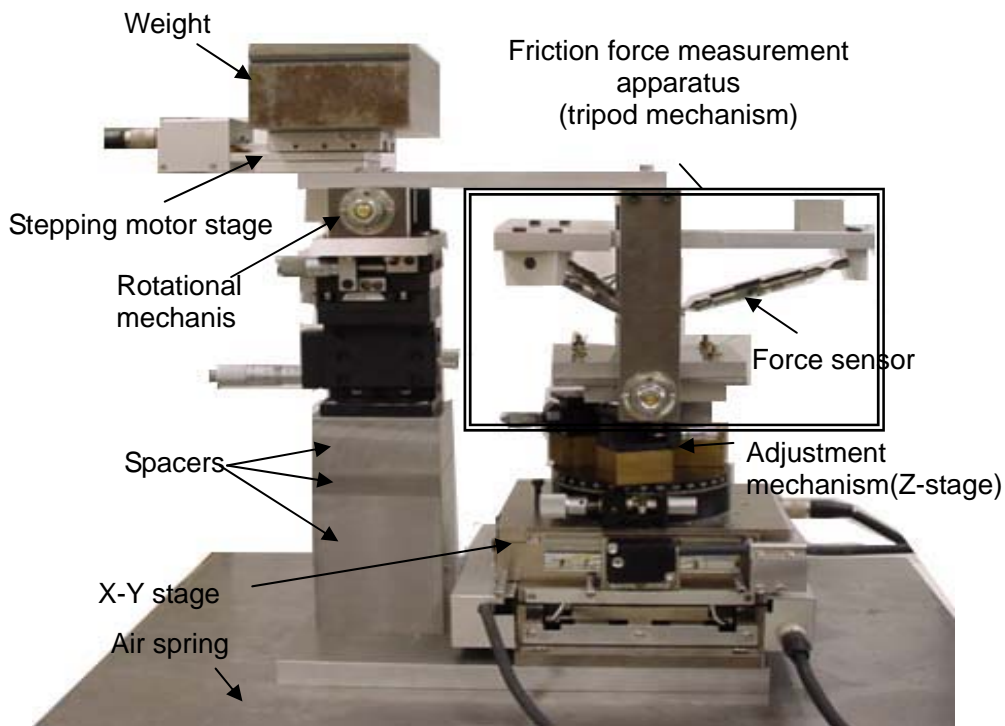


図 5.16 実験装置概要

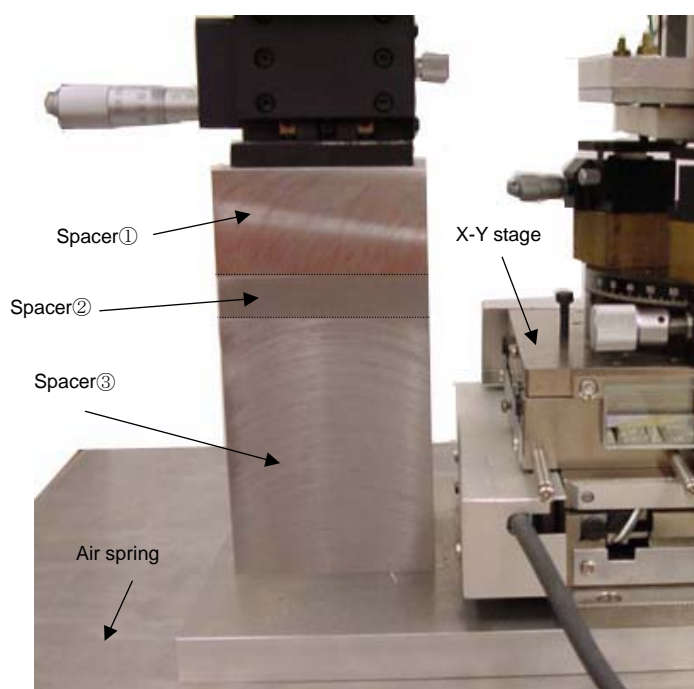


図 5.17 組合せスペーサ

表 5.5 カセンサの仕様

Model	KISTLER Type9205
Measuring range	-50...50N
Load resistance	-75/150N
Resolution	$0.5 \cdot 10^{-3} \text{N}$
Sensitivity	-115pC/N
Linearity	$\leq \pm 1\% \text{FSO}$
Maximum allowable bending moment	0.25Nm
Maximum allowable torque	0.15Nm
Sensitivity for bending moment	$\approx 3 \text{N/Nm}$
Stiffness	$\approx 4 \text{N}/\mu \text{m}$
Natural frequency	>10kHz
Temperature coefficient	-0.02%/°C
Sensitivity for Acceleration	$\approx 0.03 \text{N/G}$

表 5.6 チャージアンプの仕様

Model	KISTLER TYPE5007
Measuring ranges	$\pm 10 \dots 999,000 \text{ pC}$
Transducer sensitivity	$0.01 \dots 9,990 \text{ pC/M.U.}$
Output voltage	$\pm 10 \text{V}$
Output current max.	$\pm 5 \text{ mA}$
Output resistance	10Ω
Linearity	$< \pm 0.05\%$
Drift at 25	$< \pm 0.03 \text{ pC/s}$
Zero transition	$< \pm 0.2 \text{ pC}$
Noise signal at 9,99 pC/V	$< 0.5 \text{ mV}_{\text{rms}}$

自律補正型しゅう動摩擦力検出機構部の一次の固有振動数は、150～170Hz 程度、装置全体の一次の固有振動数は140～155Hz 程度であった。出力信号には40～60Hz 程度のノイズがのっていた。高剛性型の機構とは異なり、ドリフトはほとんどみられなく、非常に安定していた。定常状態の出力波形例を図 5.18 に示す。偏差は 10mN 程度であった。

負荷をかける垂直荷重は、あらかじめ電動ステージの位置でキャリブレーションしておき、負荷を調節した。X 軸、Y 軸方向のキャリブレーションに関して用いた滑車ジグの写真と接続の概略(X 軸)を図 5.19 に示す。図 5.20 には各チャンネルの軸に作用する軸力のキャリブレーション結果を示す。

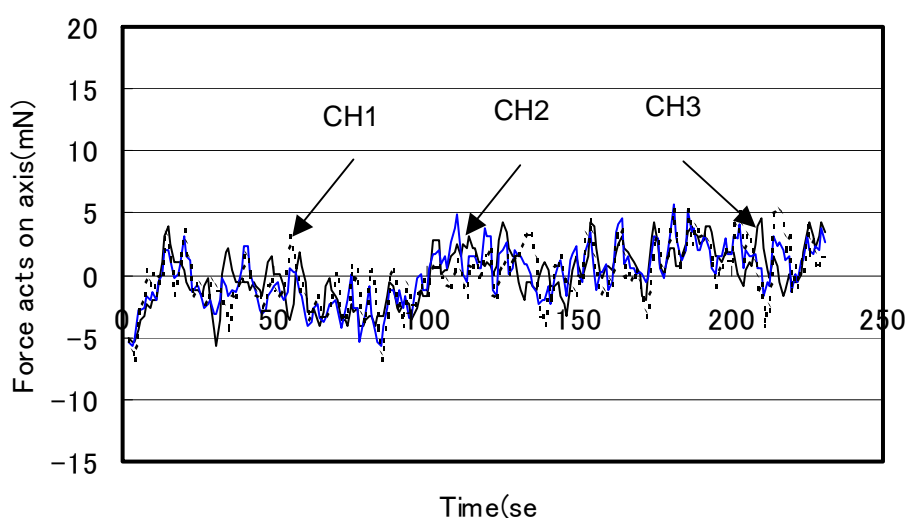


図 5.18 定常状態でのノイズ

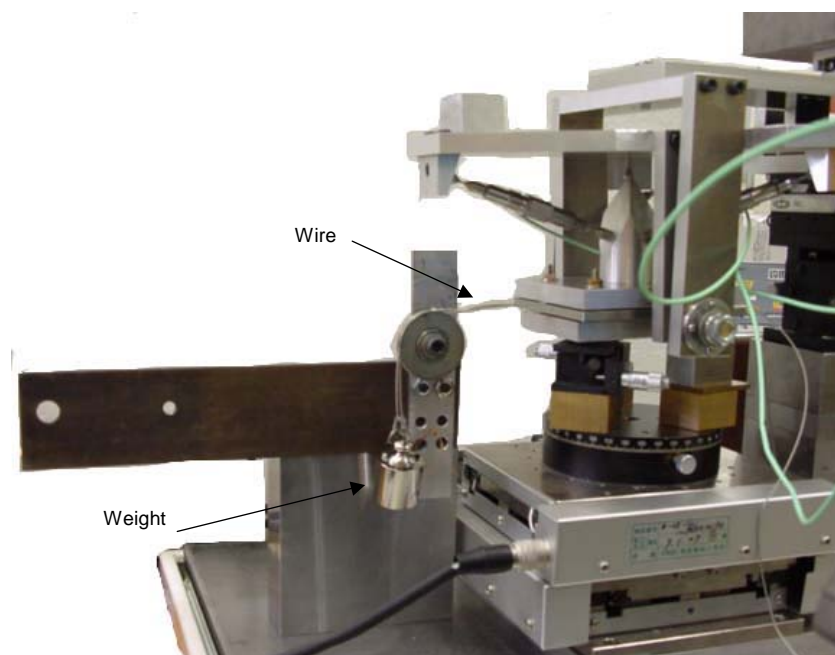


図 5.19 キャリブレーションのセットアップ

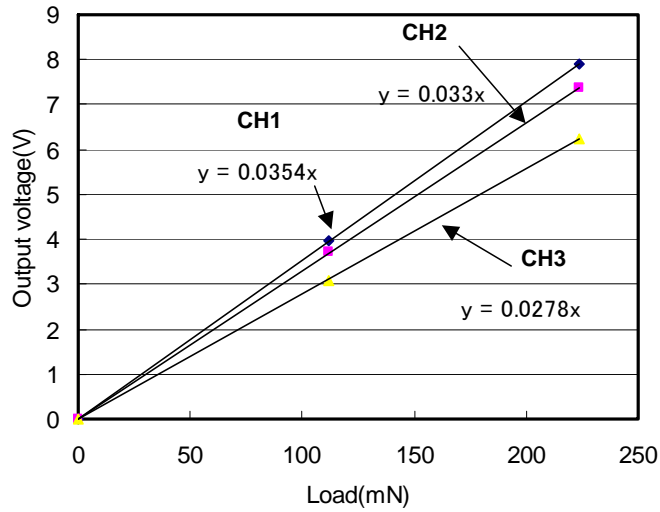


図 5.20 各軸に対するキャリブレーション結果

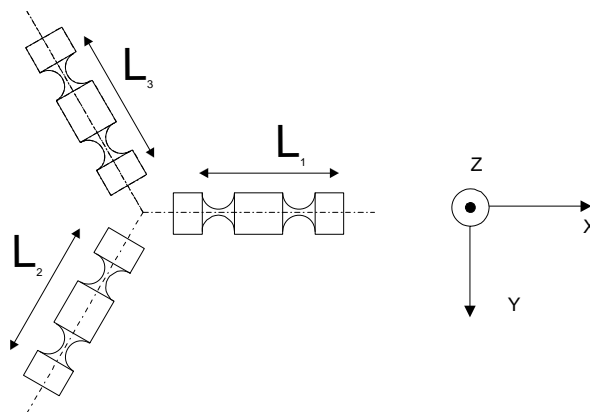
5.4.4 分力による各軸方向の力の計算

1 軸力センサの幾何学的関係から作用している軸力の分力を以下のような計算によって算出し、摩擦力、垂直荷重を算出する。

図 5.21 のように各力センサの座標系を設定し、静的な垂直荷重がトライポッド機構に負荷されたときに力センサ L_1 、 L_2 、 L_3 に作用した力をそれぞれ F_1 、 F_2 、 F_3 とすると、垂直荷重 F_n は各力センサ分力の Z 軸方向成分の和になる。圧縮方向を正、引張り方向を負とすると、

$$F_n = F_1 \times \sin 20^\circ + F_2 \times \sin 20^\circ + F_3 \times \sin 20^\circ \quad (5.1)$$

せん断方向に力が作用した場合、各力センサにそれぞれ F_1' 、 F_2' 、 F_3' が作用したとすると、X、Y 軸方向各せん断力 F_x 、 F_y が以下のように求まる。



Top view of force sensors

図 5.21 センサに作用する力と軸力の定義

$$F_x = F_2' / \cos 20^\circ \times \sin 30^\circ - F_3' / \cos 20^\circ \times \cos 30^\circ \quad (5.2)$$

$$F_y = F_1' / \cos 20^\circ - F_2' / \cos 20^\circ \times \sin 30^\circ - F_3' / \cos 20^\circ \times \sin 30^\circ \quad (5.3)$$

これより，せん断力 F_f および X 軸からのずれ方向を示すせん断方向 θ は以下のよう
に求まる．

$$F_f = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (5.4)$$

$$\theta = \tan^{-1}(F_y / F_x) \quad (5.5)$$

5.5 結言

試作した高剛性測定型面接触しゅう動摩擦装置は，面圧制御を手動で調整するため，
100mN 程度の調整精度であった．そのため，同条件でしゅう動摩擦試験を行うこと
は非常に困難であり，データにも大きなばらつきを生じていた．

そこで，モーメントの吸収に優れた構造で面間の接触状態を自律的に調整する自律
補正型面接触しゅう動摩擦実験装置を試作し，安定性，分解能等について調べ，その
有効性を確認した．

第 6 章 しゅう動摩擦の方向性制御

6.1 緒言

微小しゅう動機構の実用化においては、摩擦に関する種々の問題が生じ、従来のマクロスコピックであるトライボロジーから微小領域への関心が移行し、マイクロあるいはメゾスコピックトライボロジーという分野が確立されつつある。この領域では、表面改質や、潤滑をおもに利用することによって摩擦を低減する研究が多くなされてきている。また、テクスチャで摩擦係数を低減する試みが行われている。この中において特に摩擦係数の異方性等を制御しようという試みはない。そこで本章では、まず微小面圧下におけるしゅう動摩擦特性を平面、平面間のしゅう動で調べ、マイクロテクスチャリングを利用して、しゅう動摩擦における摩擦係数の低減や方向性制御を実験的に試み、テクスチャ面によるしゅう動摩擦の方向性制御について論じる。なお、すべての実験は第 4 章で試作した非対称 V 溝断面テクスチャ面および第 5 章で試作したしゅう動摩擦実験装置を利用して、しゅう動摩擦実験を行った。

6.2 微小面圧下における平面-平面間のしゅう動摩擦特性

6.2.1 実験方法および実験条件(高剛性測定型しゅう動摩擦実験装置の利用)

まず、微小面圧下におけるしゅう動摩擦特性を評価するにあたり、平面-平面間のしゅう動特性の評価を行うこととする。

試験に用いた試料は、単結晶(111)Si ウエハ、単結晶(100)Si ウエハをダイサによって 50mm×50mm の寸法に切り出したものである。実験は 5 章で試作した高剛性測定型しゅう動摩擦実験装置によって行った。

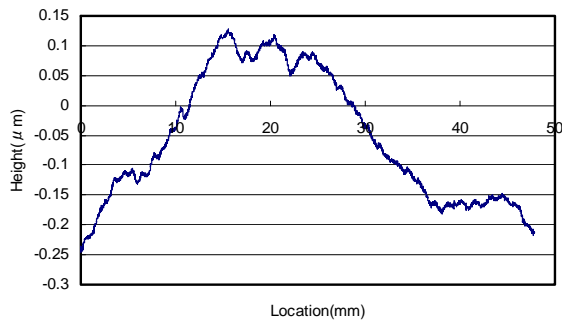
表 6.1 には、それぞれの試料におけるうねりおよび表面粗さの計測結果を示す。試料は(100)面および(111)面それぞれで対になっているため、各面方位で 2 つずつの測定結果を示してある。図 6.1(a)~(d)に、3 次元表面粗さ測定機によって測定した試料の表面波形の例を示す。この表面波形をみると、非常に長い波長のうねりが数 μm オーダで生じていることが分かり、計測位置によってうねり波形が多少異なっていることが観察された。

前章で述べたように、試料同士を接触させる前から、力センサの出力を取り込み、試料接触させ、その変化の差分を垂直荷重とした。なお、接触時間を 3 分以内で、しゅう動試験を行った。しゅう動速度は $30\ \mu\text{m/s}$ 、しゅう動距離は $200\ \mu\text{m}$ とした。

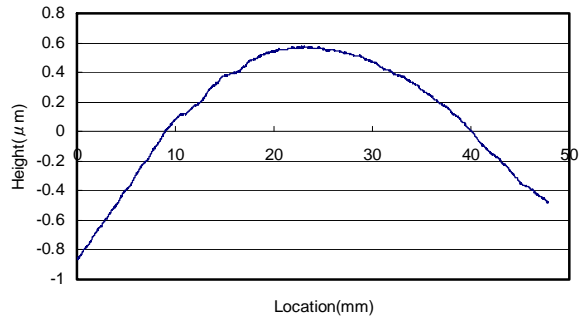
実験は $23\pm 1^\circ\text{C}$ の大気環境中で行い、試料はエタノール洗淨(5 分間×1)、純水洗淨(5 分間×2)を行い、ドライ窒素による十分な乾燥を行った後 1 時間以内で実験を行った。

表 6.1 試験片の表面粗さ

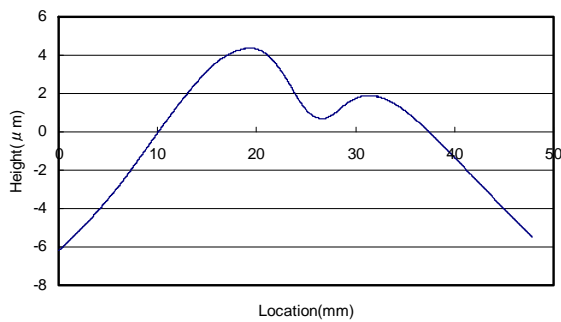
Surface orientation	Amplitude of surface waviness($\mu\text{m}/50\text{mm}$)	Surface roughness (nmRa/ $5\ \mu\text{m}$)
(100)	①0.35	0.3
	②2.7	0.6
(111)	①6.6	0.7
	②10.8	0.5



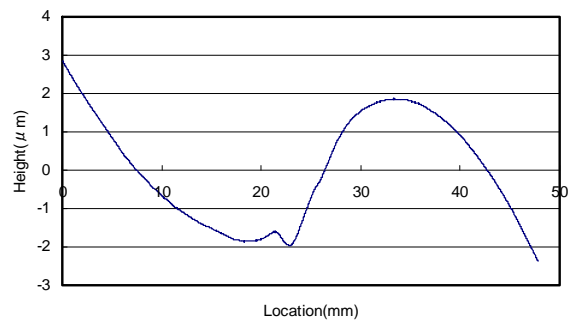
(a) (100) Si 基板の断面曲線 (1)



(b) (100) Si 基板の断面曲線 (2)



(c) (111) Si 基板の断面曲線 (1)



(d) (111) Si 基板の断面曲線 (2)

図 6.1 シリコン基板の断面曲線

6.2.2 しゅう動摩擦試験の結果

図 6.2 に、しゅう動を行った際の摩擦力の典型例を示す。この図に示すように、動摩擦力には約 166mN の偏差がみられた。なお、標準偏差は約 40mN であった。

図 6.3 に、しゅう動試験を行った結果を示す。横軸には面圧、縦軸には動摩擦係数をとってある。しゅう動試験後の表面には特に変化は観察されなかったが、試料端面には一部欠けがみられた。

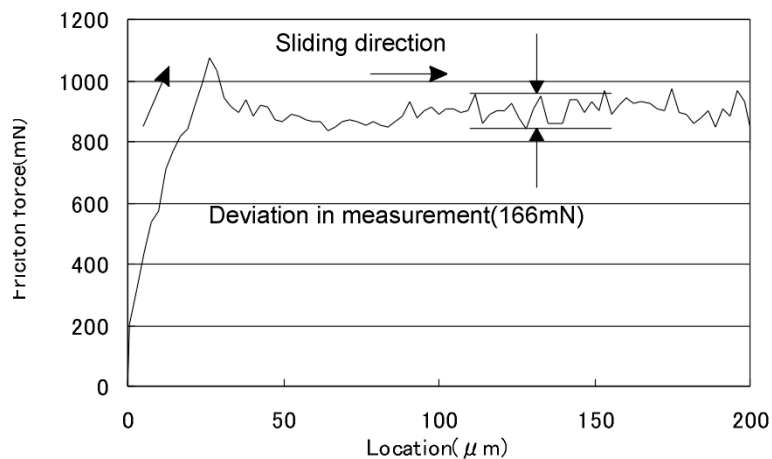


図 6.2 摩擦力の測定例

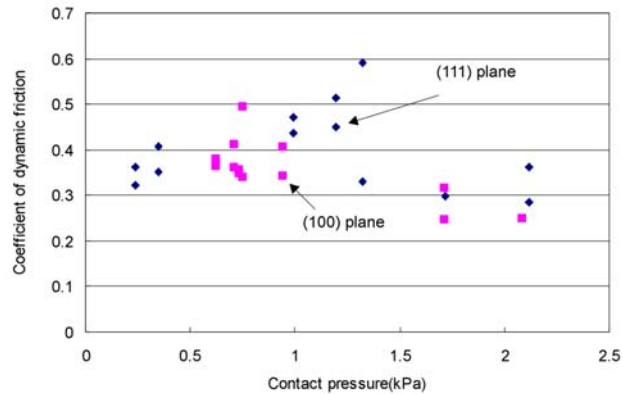


図 6.3 接触面圧と摩擦力（結晶方位の影響）

6.2.3 しゅう動摩擦試験の考察

図 6.3 の結果をみると、測定面圧下において 0.25 から 0.6 程度の範囲で動摩擦係数はばらついていることが分かる。このばらつきについて考えられる原因の一つは、面圧調整の不一致であると考えられる。3 つの力センサの垂直荷重分布が、しゅう動実験ごとに異なり、同面圧分布下でのしゅう動が行えなかったためであると考えられる。また試料寸法が、50mm×50mm と大きいため、うねりの影響を受け、真実の接触面積が非常に小さい可能性がある。図にまとめた結果は平均値であり、偏差を考慮すると、20%程度の摩擦係数の変動が考えられる。

また、結晶面方位による違いは特にみられなかった。多少、面圧が低下するとともに動摩擦係数が増加する傾向があるようにもみられるが、この実験結果からは断言できない。

6.2.4 実験方法および実験条件(自律補正型しゅう動摩擦実験装置の利用)

同実験を高剛性型のしゅう動試験を行った。しゅう動試験に用いた試料は、同じ仕様の単結晶(111)Si ウエハ、単結晶(100)Si ウエハをダイサによって 50mm×50mm の寸法に切り出したものである。表 6.2 には、それぞれの試料における形状評価結果を示す。同様に図 6.4(a)~(d)に、3次元表面粗さ測定機で測定した表面波形の例をそれぞれ示す。

なお、接触時間を 1 分以内とし、しゅう動試験を行った。しゅう動速度は 30 μ m/s、しゅう動距離は 200 μ m とした。実験は 23 \pm 1 $^{\circ}$ C の大気環境中で行い、試料はエタノール超音波洗浄(5 分間×1)、純水超音波洗浄(5 分間×2)を行い、ドライ窒素による十分な乾燥を行った後 1 時間以内で実験を行った。

表 6.2 試験片のうねり

Surface orientation	Amplitude of surface waviness(μ m/50mm)	Surface roughness (nmRa/5 μ m)
(100)	①2.7	0.3
	②1.2	0.5
(111)	①9.3	0.5
	②5.5	0.9

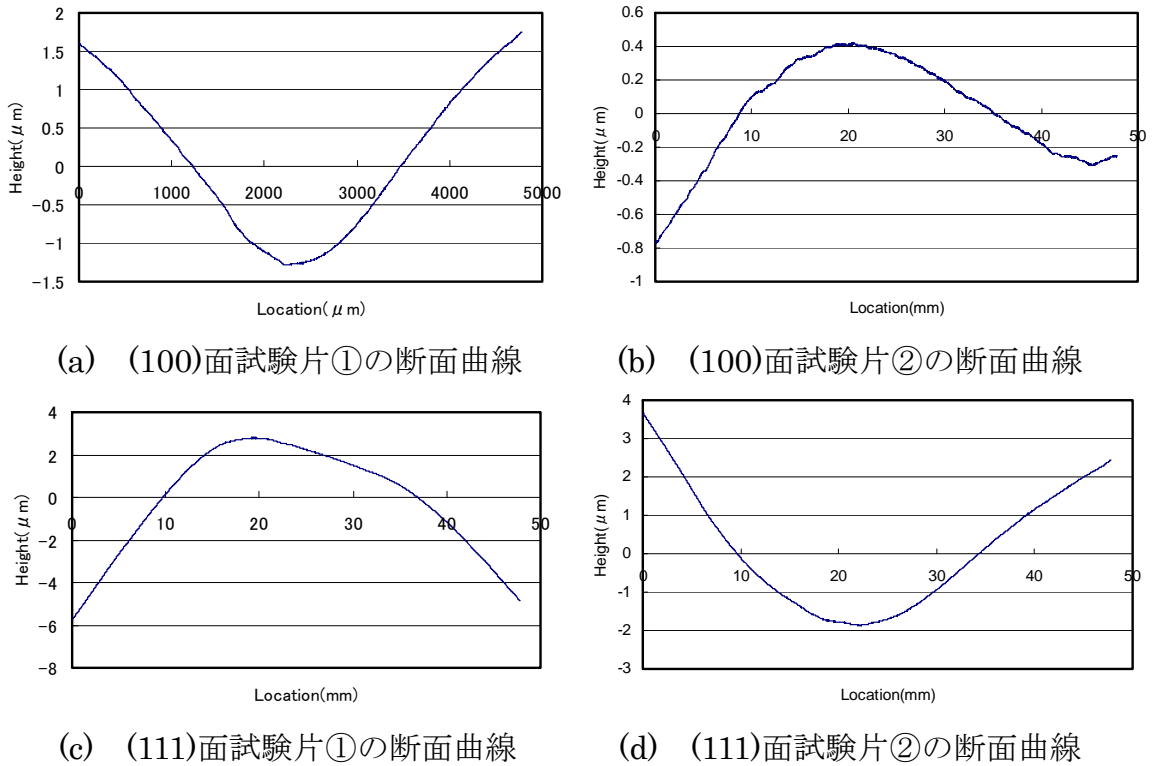


図 6.4 試験片の断面曲線

6.2.5 しゅう動摩擦試験の結果

図 6.5 に、しゅう動を行った際の摩擦力の典型例を示す。この図に示すように、動摩擦力には約 20mN の偏差がみられた。なお、標準偏差は約 6mN であった。

図 6.6 および図 6.7 に、しゅう動試験を行った結果を示す。図 6.6 は、横軸には面圧、縦軸には動摩擦係数をとってある。図 6.7 は同結果を横軸には面圧、縦軸には動摩擦力をとって示してある。しゅう動試験後の表面には特に変化は観察されなかった。

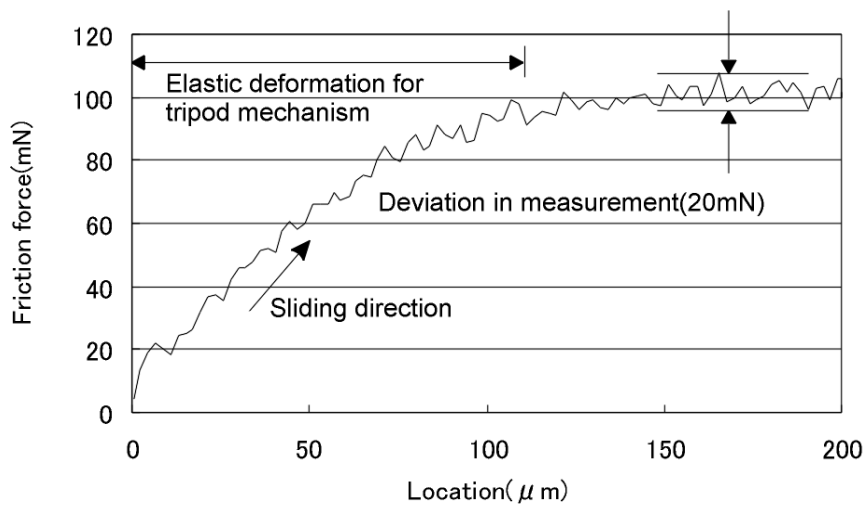


図 6.5 自律調整機構による摩擦力測定例

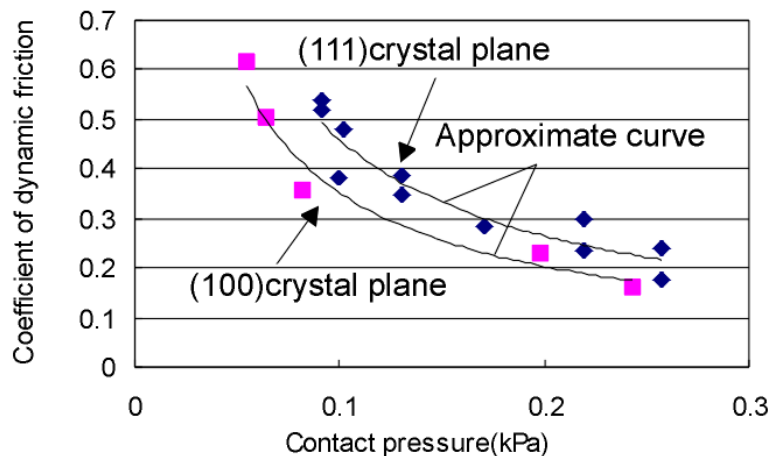


図 6.6 接触面圧と摩擦係数（結晶方位の影響）

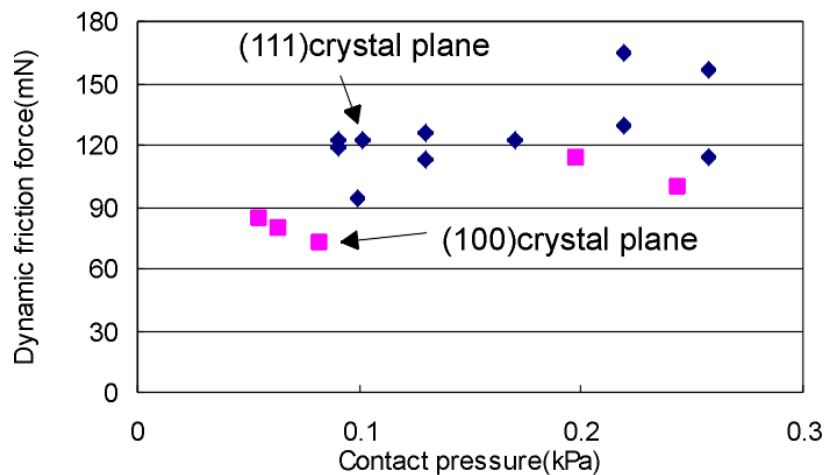


図 6.7 接触面圧と摩擦力（結晶方位の影響）

6.2.6 しゅう動試験結果の考察

図 6.6 の結果をみると、両試料においても面圧の減少につれて動摩擦係数の増加がみられる。この現象は、試料表面間の吸着力が原因と考えられ¹⁰⁾、微小しゅう動機構でも問題となる。また、(111)面同士の動摩擦係数は、(100)面同士のそれに比べ、相対的に大きな値になっている。図 6.7 をみて分かるように、動摩擦力の差は 30mN 程度であり、この実験装置で十分測定可能な値である。

この原因と考えられるのは、まず表面のうねりの影響である。前述のように実験に用いた試料は数 μm 程度のうねりを生じており、面接触させたときに接触点数に差が生じ、真実接触面積が異なり、摩擦力の差が生じたということである。うねりを示す図 6.4 をみるとこの可能性は高いように思われる。

結晶面における影響因子としては、表面エネルギーの違いである。表 6.3 に、単結晶 Si の特定結晶面の表面エネルギーをまとめたものを示す。バックボンド数が(111)面では 3 本、(100)面では 2 本となっており、表面エネルギーに表によると 2 倍近くの差が生じる。実験は大気環境中で行っており、洗浄およびドライ窒素による十分な乾燥を

行っているものの、試料表面に不純物質が付着する可能性は高い。表面エネルギーが高いということは、(111)面に比べ不安定な面である(100)面に、何らかの原因で表面に不純物質が(111)面に比べ相対的に接触界面に多く付着する可能性がある。水などの付着物質が微量であるにも拘らず、微小面圧下においてはこの物質が潤滑油としての役割を果たし、純粋な Si-Si 間の凝着力を低下させ^(11, 12)、結果として、(100)面の摩擦力が減少したものと考えられる。

図 6.8 は、高剛性型面接触しゅう動摩擦実験装置で行った図 6.3 の結果と組合せたものを示す。両結果に大きな食い違いは生じていない。0.5kPa 付近での(111)面同士の動摩擦係数の実験データがかなり近い値を示しており、実験に用いた試料寸法においては、0.3kPa 程度までの摩擦係数はほとんど一定であることがうかがえる。この付近の面圧を境に摩擦係数が上昇すると考えることができる。

面圧の減少により、表面吸着力の影響が大きくなることは分かっているものの、定量的にその減少を明らかにすることは、真実接触面積を測定できないことには難しい。本実験装置においては真実接触面積を測定できなく、何らかの方法で定量的に測定することが必要である。

表 6.3 面方位と表面エネルギー⁽¹⁰⁾

Orientation	Face angle [deg]	Surface energy [J / m ²]
(001)	0	1.989401511
(117)	11.42175366	1.950003521
(115)	15.79316905	1.914302497
(113)	25.2394	1.799481374
(112)	35.26438968	1.624339532
(335)	40.31554221	1.516904432
(111)	54.7356	1.148581498
(332)	64.7606	1.272425482
(221)	70.5288	1.326267674
(331)	76.7373	1.369200023
(551)	81.9505	1.392859658
(110)	90	1.406719299

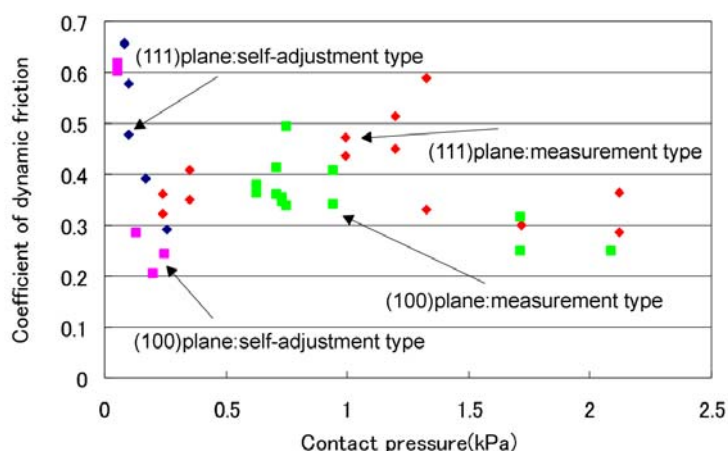


図 6.8 2つの測定機構を用いた実験の総括

6.3 テクスチャの影響と組合せ方向の影響

6.3.1 実験方法および条件

実験に使用した試料は、前述の(111)4° オフアングル付き単結晶 Si ウェハで試作したピッチ $12\mu\text{m}$ とほぼ同じ形状で $\theta_1=3.3^\circ$, $\theta_2=41.3^\circ$ の非対称 V 溝断面テクスチャ面を用いた。断面形状が非対称であるためテクスチャ面の組合せによって、図 6.9 に示すような 4 種類のしゅう動方向が考えられる。この 4 種類のしゅう動方向における実験を行った。試料はダイサによって $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ に切り出したものである。また、テクスチャの影響を調べるために、同寸法、同条件で Si の平面-平面間のしゅう動試験を行った。

なお、実験は自律補正型しゅう動摩擦実験装置を用い、 $23\pm 1^\circ\text{C}$ の大気中で行い、試料はエタノールによる超音波洗浄(5 分間 \times 1)、純水による超音波洗浄(5 分間 \times 2)を行った。実験に用いた試料はダイサによって切り出し、寸法は $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ である。本実験でのしゅう動距離は $250\mu\text{m}$ とした。

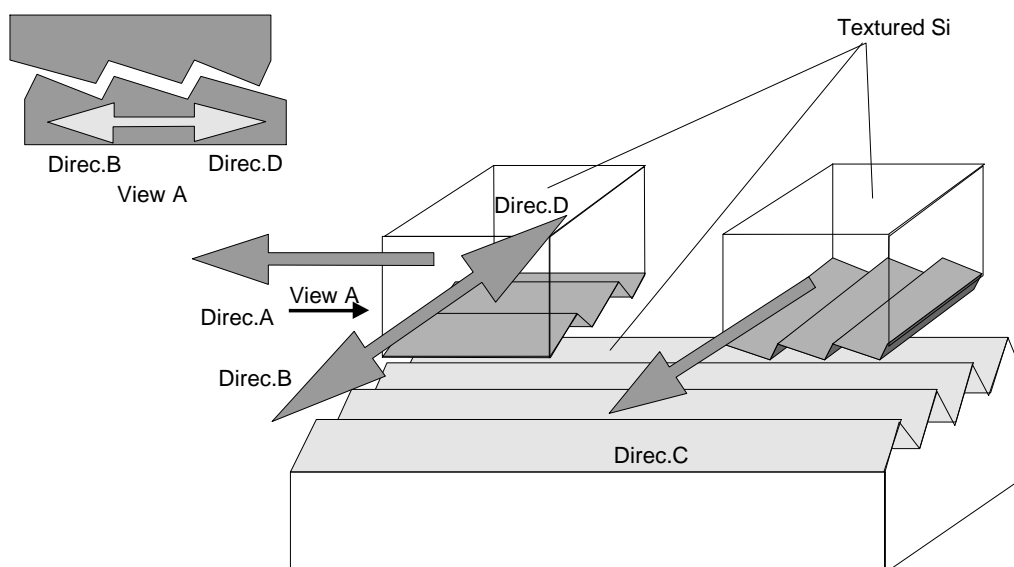


図 6.9 テクスチャの方位とすべり方向の定義

6.3.2 平面-平面間およびテクスチャ面同士のしゅう動特性と組合せ

図 6.10 には、同図中に示すしゅう動方向における往復しゅう動摩擦力を示してある。Direc.D 方向において、スティック-スリップを示す波形がみられる。これは、自律補正型しゅう動摩擦力検出機構部の弾性変形によるものであると考えられる。ピッチング、ローリング方向には非常にやわらかい構造に起因する。非対称 V 溝断面形状の傾斜角度が 41.3° の傾斜角側の斜面同士がかみ合うように、つまりリッジのような役割を果たし、非常に大きな抵抗を示しているため、上記のような現象が生じたと考えられる。このような大きな力を生ずるかみ合わせが生じたことから、試作した試料の精度が高いことが伺える。動摩擦を測定する実験結果において、Direc.D は、動摩擦に値する安定した力をほとんど生じないため、テクスチャ面同士の動摩擦力の比較対象からは省いた。また、復路のしゅう動では、同図下に示してあるように、摩擦力の波形信号がしゅう動に用いた試料のピッチ $12\mu\text{m}$ のほぼ倍数の波長であること

が分かり、傾斜面を乗り越え時に生じた変動であることがわかる。

Direc.A 方向に関しては図 6.11 に示すように、偏差が 20mN 程度の動摩擦力を示す摩擦力がみられ、特に周期性はみられなかった。実験において動摩擦力は平均値をとった。

図 6.12 には、平面-平面間およびテクスチャ面同士の 3 方向のしゅう動試験結果を示す。図 6.13 に、平面-平面間の結果を除いて、テクスチャ面間の結果を拡大したものであり、両結果ともに横軸には面圧、縦軸には動摩擦係数をとった 3 方向における実験結果を示す。

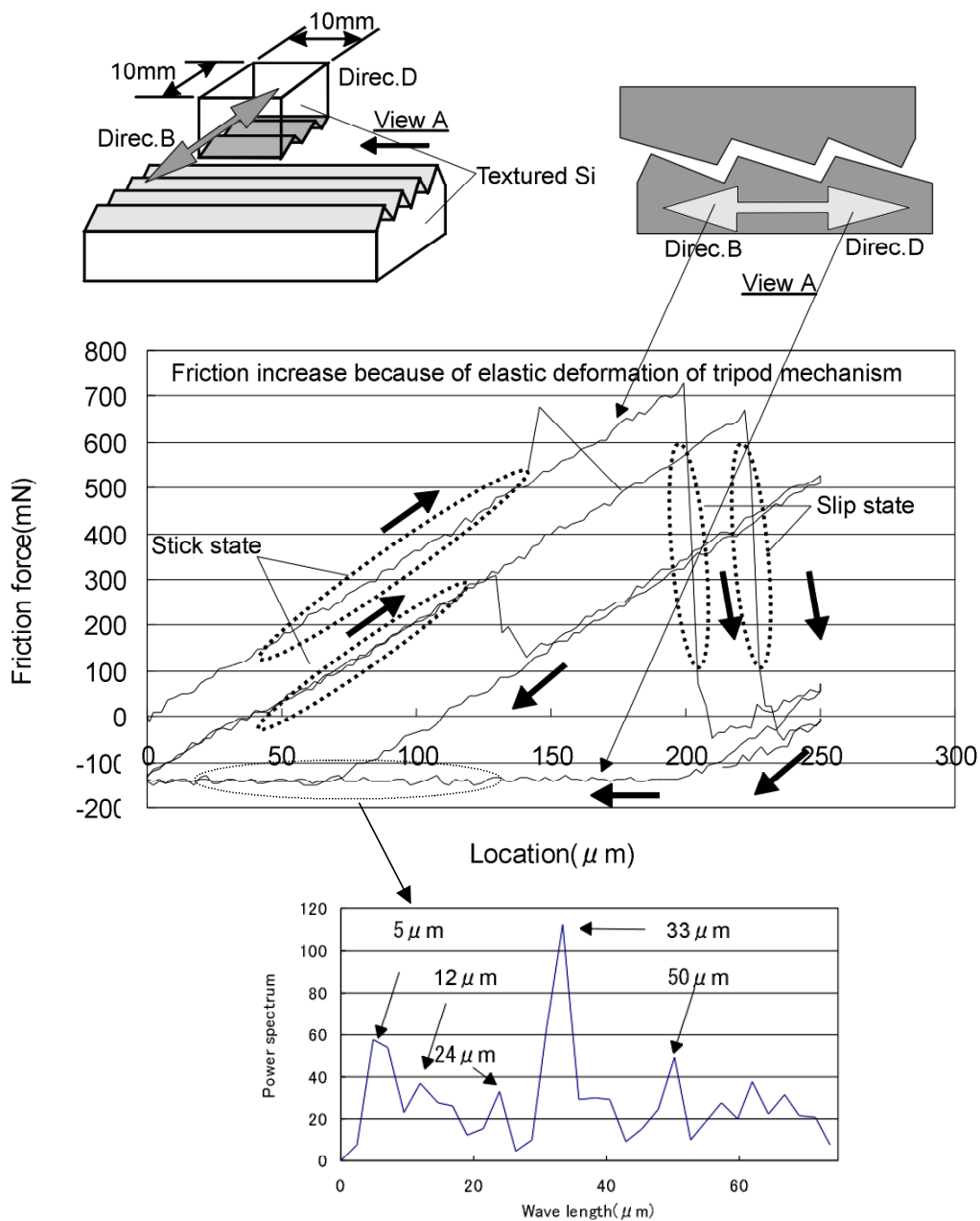


図 6.10 測定機構の変形に起因するスティックスリップ (D 方向) と波長 (B 方向)

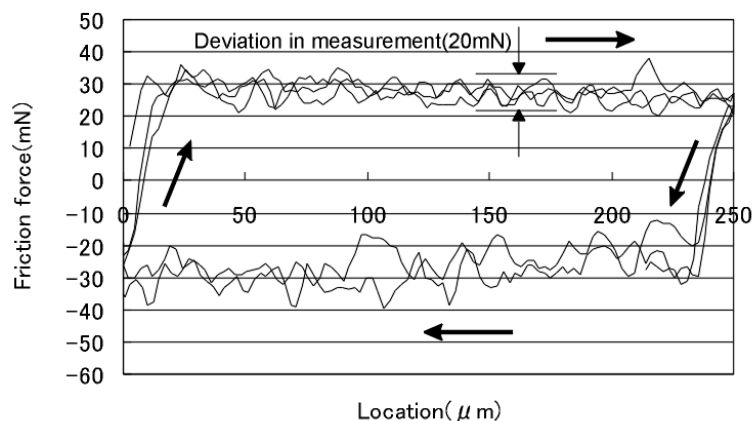


図 6.11 テクスチャ Si どうしを接触させた時の摩擦 (A 方向)

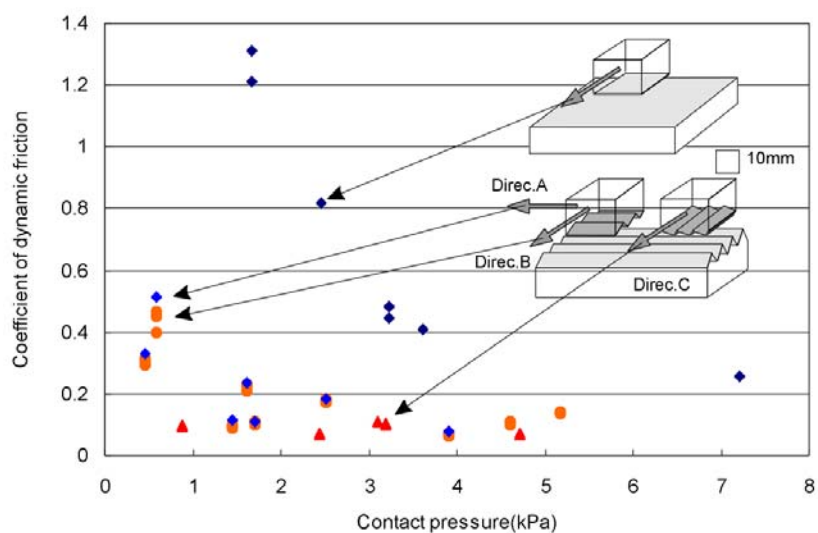


図 6.12 接触面圧と動摩擦係数 (テクスチャの影響)

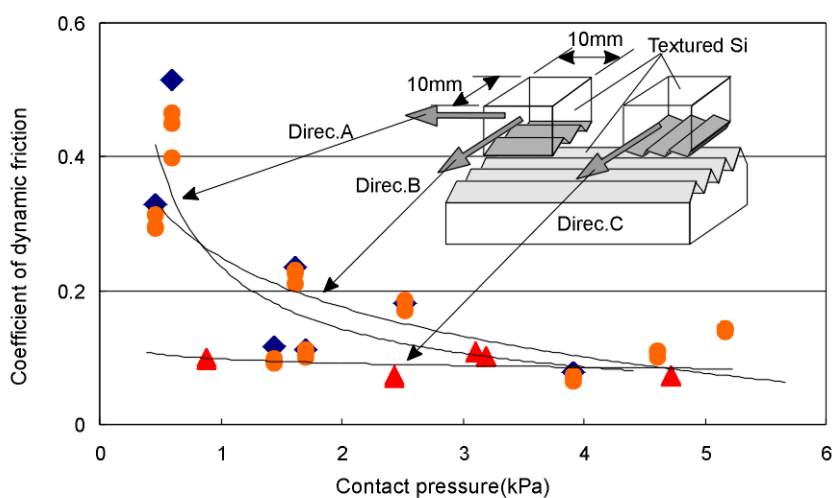


図 6.13 接触面圧と動摩擦係数 (テクスチャ方向の影響)

6.3.3 しゅう動実験結果の考察

図 6.12 の結果をみると、テクスチャによって、摩擦係数が大幅に減少していることがわかる。1.6kPa 程度には約 1.0 低下している。この低下の度合いは面圧が低下するに顕著になっている。これは、見かけの接触面積に対して、真実接触面積を大幅に減少させたことに起因するものと考えられる。テクスチャによる摩擦力制御は非常に有効と考えられる。

図 6.13 から、面圧が減少するにつれて動摩擦係数が増加する傾向が前節の実験同様にみられた。テクスチャ面同士のしゅう動においても、同様の結果であり、3kPa 以上の面圧ではほとんど動摩擦係数は等しかった。

ただし、図中に示すようにテクスチャ組合せの向きを交差させるようにしてしゅう動させると、3kPa 以下での動摩擦力の上昇がみられなく、上記の傾向は弱くなった。この結果も同様に、真実接触面積の減少により、試料間の凝着力や、水などの介在物の影響などで作用する吸着力の影響が小さくなったためであると考えられる。

このように、テクスチャによって、動摩擦力を大幅に減少させられることがわかり、さらにテクスチャの組合せ方向によって、動摩擦力を変化させることが可能であることが検証できた。本実験においては、前者では 1.0 程度、後者においては 0.2 程度の動摩擦係数の減少がみられた。

6.4 テクスチャによるしゅう動摩擦の方向性付与

6.4.1 実験方法および条件

実験に使用した試料は、前章で示した(111)4° オフアングル付き単結晶 Si ウエハで試作したピッチ 6 μm の非対称 V 溝断面テクスチャ面を用いた。しゅう動摩擦対象となり試料には Si, ポリプロピレン, 普通紙の 3 種類を選定した。表 6.4 には、それぞれの試料の表面粗さ, ヤング率を示し、後に述べるしゅう動摩擦測定後の表面粗さを加えて示す。紙においてはナノインデントから得られたデータであり、得られた値の平均値から、0.38 GPa と同定した。図 6.14 にはナノインデントの外観図を示す。実験に用いたテクスチャ面試料はこれまでと同様にダイサによって切り出したもので、寸法は 10mm×10mm である。

なお、実験は自律補正型しゅう動摩擦実験装置を用い、23±1°Cの大気中で行い、普通紙以外の試料はエタノールによる超音波洗浄(5 分間×1), 純水による超音波洗浄(5 分間×2)を行った。実験に用いた試料はダイサによって切り出し、寸法は 10mm×10mm である。本実験でのしゅう動距離は 1500 μm とした。

表 6.4 試験片の表面粗さとしゅう動後のヤング率

	Surface roughness		
	(111) Si	PP	Paper
Before sliding	0.3nmRa	0.5 μmRa	12.9 μmRa
After sliding	0.4nmRa	0.6 μmRa	12.8 μmRa
	Young's modulus (GPa)		
	186.5	3.0~3.3 ⁽¹³⁾	0.2~0.5

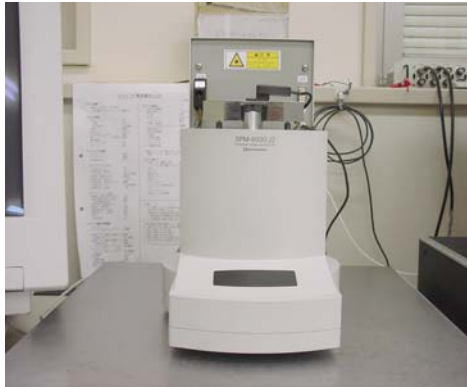


図 6.14 ナノインデント

6.4.2 テクスチャ面と平面におけるしゅう動摩擦特性

図 6.15, 6.16, 6.17 それぞれに, しゅう動対象である(111)単結晶 Si, ポリプロピレン, 普通紙における典型的な往復しゅう動摩擦力を示す. 横軸には位置, 縦軸には摩擦力を示してある.

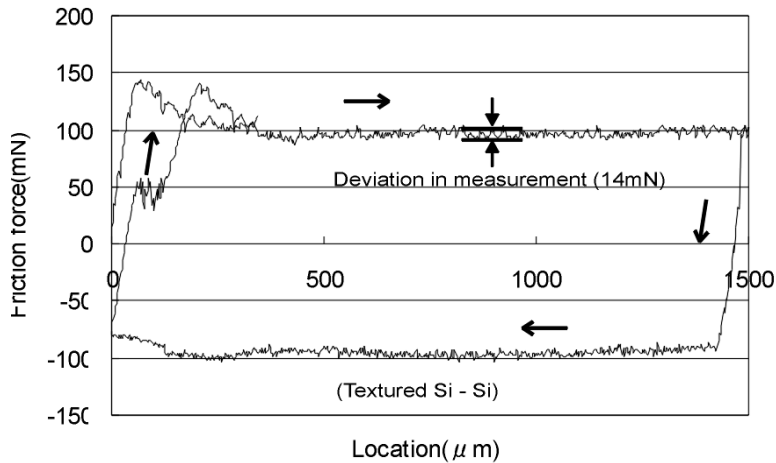


図 6.15 シリコンに対する往復しゅう動時の摩擦力

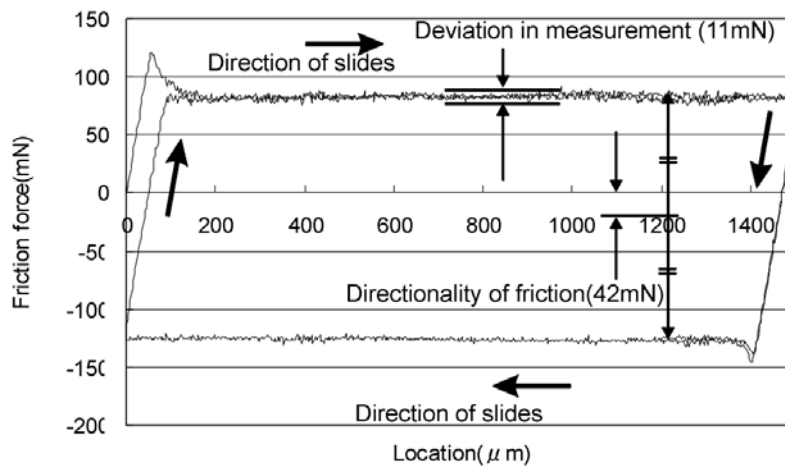


図 6.16 ポリプロピレンに対する往復しゅう動時の摩擦

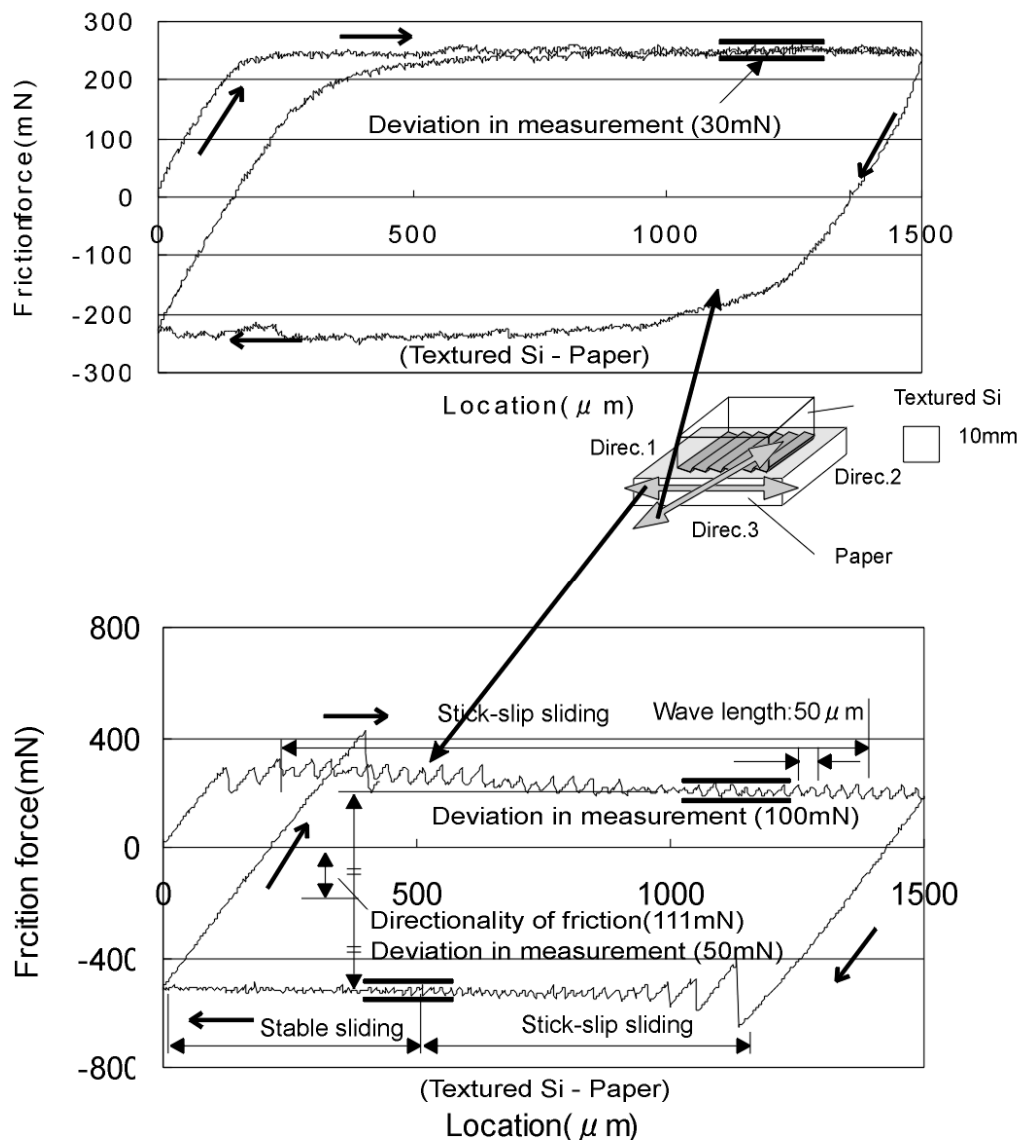


図 6.17 紙に対する往復しゅう動摩擦

Siにおけるしゅう動は、図 6.15 に示すように約 14mN 程度の偏差があるが、しゅう動方向による違いは特にみられなかった。ポリプロピレンの場合も図 6.16 に示すようにしゅう動方向による違いはみられず、摩擦力は約 11mN 程度の偏差であった。

普通紙のしゅう動摩擦において、図 6.17 に示すように明らかなスティック-スリップを示す波形がみられる。これは、図 6.10 の Direc.D の結果と同様に、自律補正型しゅう動摩擦力検出機構部の弾性変形によって蓄えられた弾性エネルギーの開放に起因するものであり、他の材料と比較して相対的に摩擦係数が高く、静止摩擦力の発生が顕著であることから弾性エネルギーが開放された後の慣性力、復元力、摩擦力の間で構成される装置や試料などからなる振動系が不安定となって自励振動を起こしたスティック-スリップと考えられる。往路、復路でも、振幅は次第に減衰するが、往路に関しては、波長が 40~50 μm 程度の定常的なスティックスリップが続いており、

偏差は 100mN 程度であった。復路に関しては偏差が 50mN 程度のランダムな波形を示していた。往路，復路における減衰率は 0.02 程度であった。スティックスリップ現象の発生や減衰率については特に考察は行わなかった。往路に関する動摩擦力の算出は摩擦波形の振幅の変動が 10% 以内に安定している領域であるしゅう動距離が $1300\mu\text{m}$ から $1500\mu\text{m}$ の間で平均をとったものを動摩擦力として計算した。

図 6.18 は，普通紙のしゅう動中の摩擦変動を示した結果である。この結果において往路のしゅう動中には 27mN 程度の変動がみられた。普通紙は，湿度の影響を受けやすく，その硬さが変わって⁽¹⁴⁾，動摩擦力に変化が生じたことが考えられたが，2 度目の往路におけるしゅう動はほぼ最初の往路の摩擦変動と等しくほぼ同地点で上昇していた。つまり，時間的変化ではなく，しゅう動場所の形状に起因したものと考えられる。これは，普通紙の表面粗さが他の材料に比べ大きいことから，うねりなどの変形から生じた結果であると考察される。

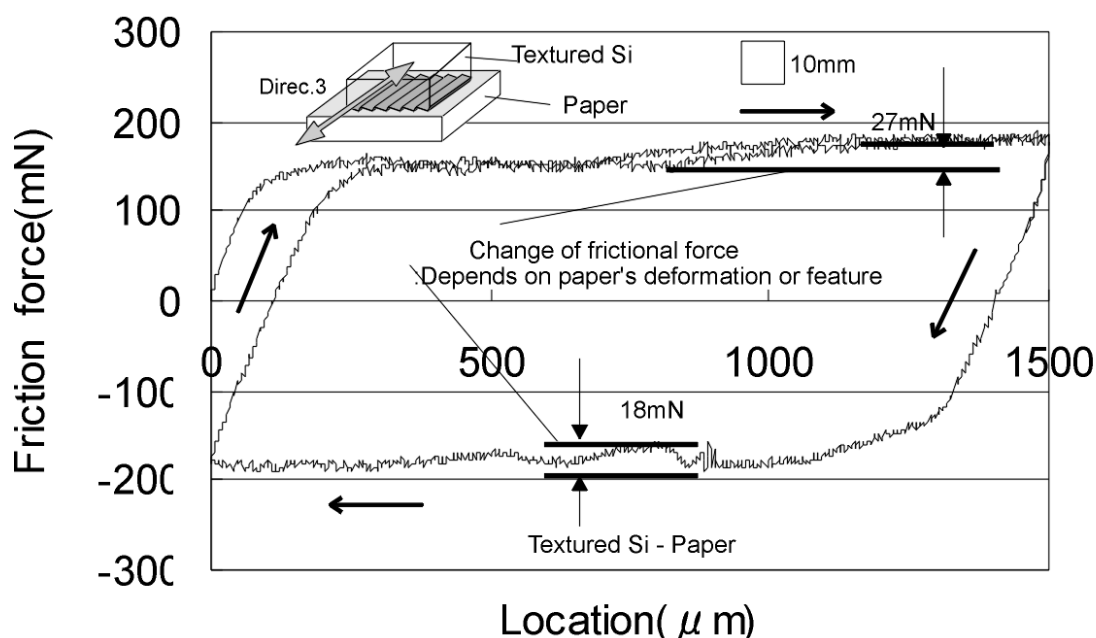


図 6.18 紙に対する摩擦の変化

図 6.19 はテクスチャ Si と Si とのしゅう動における面圧が非常に低いときの不確かな挙動を示したときの摩擦力である。他のしゅう動実験結果とは異なり，非常に周期性にある挙動を示した部分があった。波長が $41\mu\text{m}$ であり，時間換算すると 0.7Hz 程度の振動周期となり，系の固有振動数に比べ，非常に長い周期の振動であった。この挙動は前後に振られる挙動であり，原因は考察できないが，今回実験を行った面圧よりもさらに微小な面圧においては，このような不確定なしゅう動現象が生ずる可能性があると考えられる。表面力はしゅう動中に経時的に変化する事が考えられる。

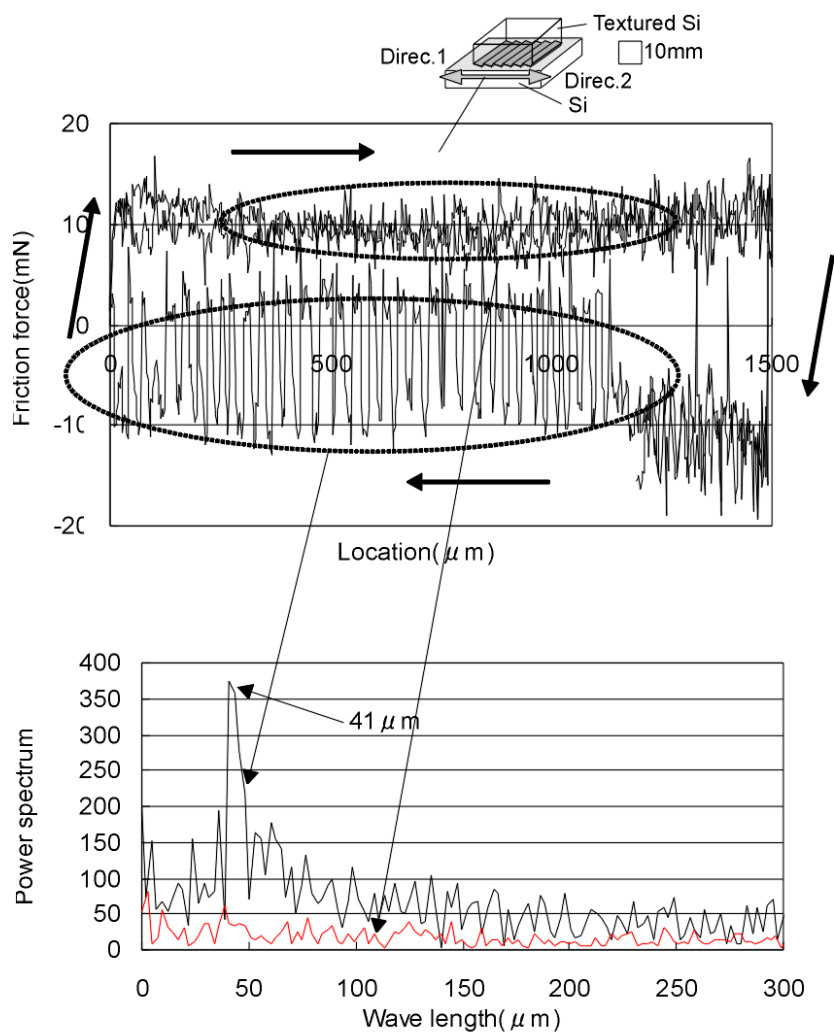


図 6.19 低面圧時の不安定挙動

6.4.3 しゅう動摩擦実験

図 6.20, 図 6.21, 図 6.22 それぞれに (111)単結晶 Si, ポリプロピレン, 普通紙を対象とした実験結果を示し, 横軸には面圧, 縦軸には動摩擦係数をとったものである.

図 6.23 は, 3 種の異種材料における実験結果を示しており, 横軸には面圧, 縦軸には往復の動摩擦力の比 (Direc.2 の動摩擦力/Direc.3 の動摩擦力)をとってある(傾斜角度の関係については図 6.1 参照).

表 6.5 に示すように, シリコンは結晶面によってヤング率が異なる. 本実験に用いた試料は(111)面もしくは(111) 4° オフ面であり, 数値的な解析においては[111]面のヤング率を用いるのが妥当であると考えられる.

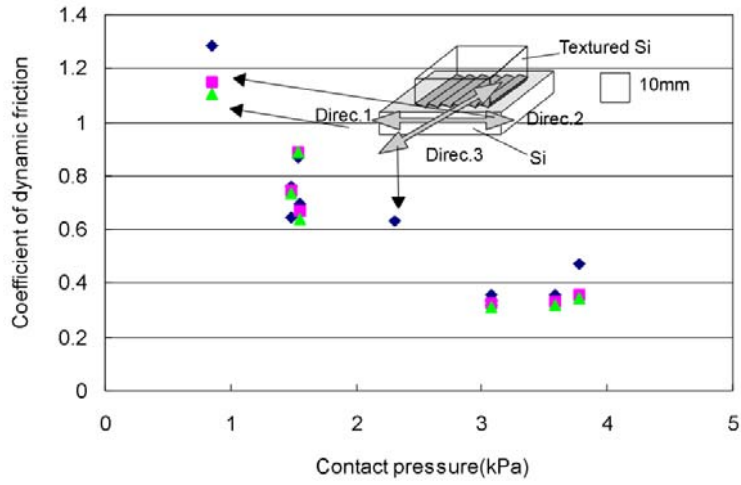


図 6.20 シリコンに対する接触面圧と動摩擦係数

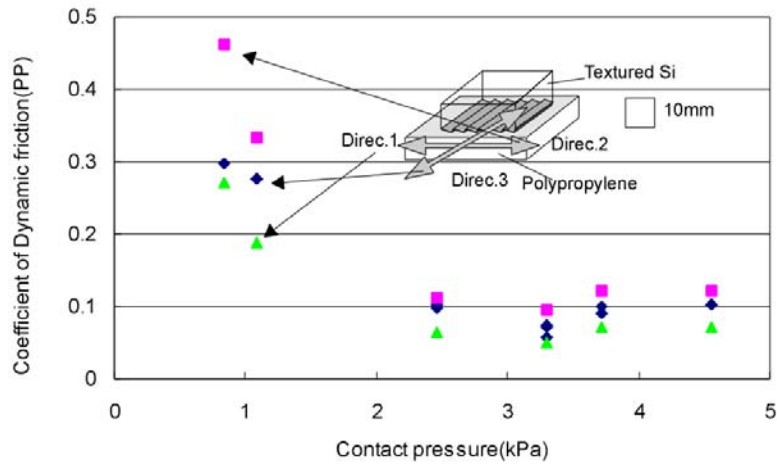


図 6.21 ポリプロピレンに対する接触面圧と動摩擦係数

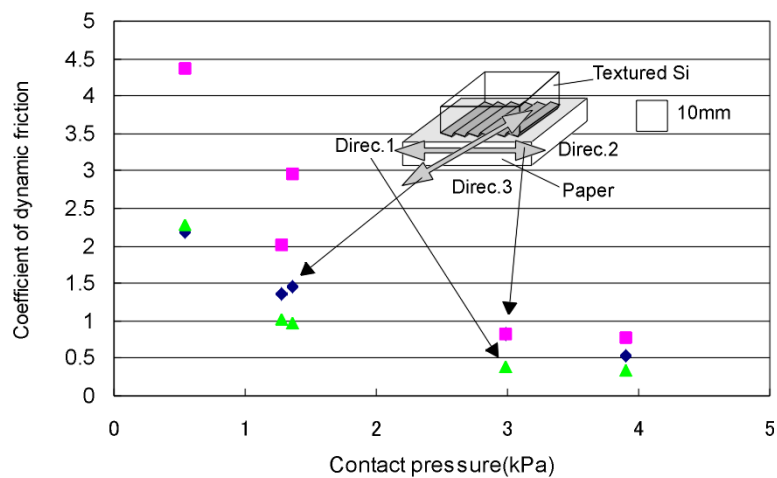


図 6.22 紙に対する接触面圧と動摩擦係数

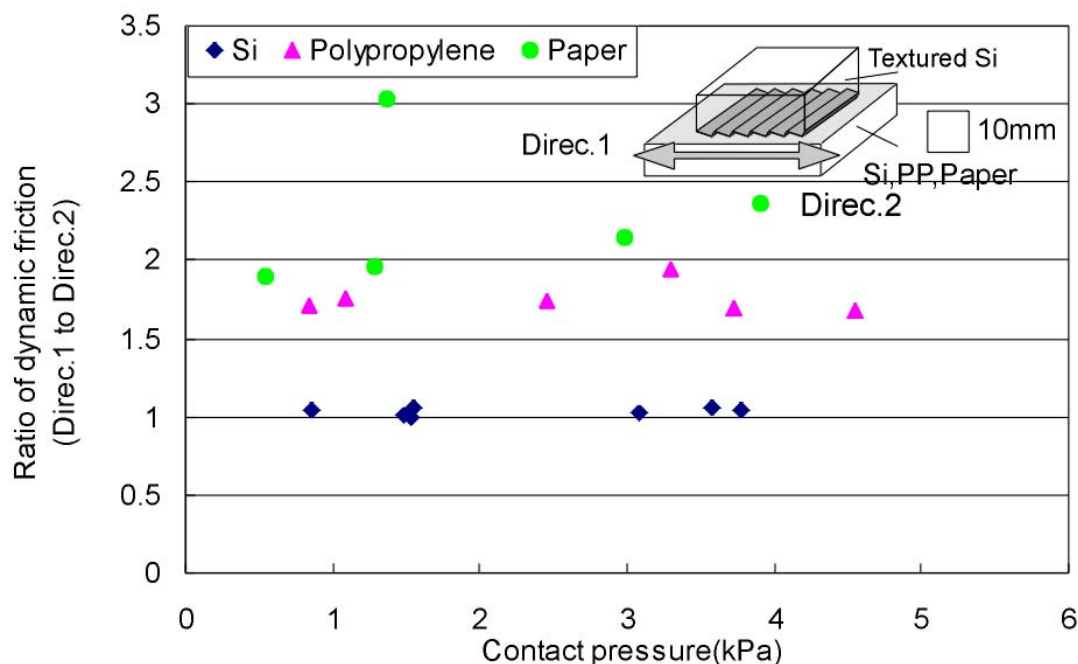


図 6.23 各材料に対する接触面圧と摩擦方向性

表 6.5 単結晶シリコン各面方位での機械的特性の違い⁽¹⁵⁾

Miller index for orientation	Young's modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)
[100]	129.4	79.0
[110]	168.0	61.7
[111]	186.5	57.5

6.4.4 しゅう動摩擦実験の考察

図 6.20～図 6.22, および図 6.23 をみると, まず動摩擦係数が面圧の減少に伴って上昇する傾向が今までの実験同様にみられた. また, 紙とのしゅう動において摩擦係数がテクスチャをしゅう動させる方向によって 4.5 にまで上昇しており, 同一面圧下において, 他方向にしゅう動させたものに比べ摩擦係数に 2.0 程度の差が生じていた. これは後述の異方性が生じた原因と考えられるヤング率の影響であると考えられる. 表 6.2 からしゅう動前後の表面粗さにはほとんど変化はなく, 弾性変形を生じてしゅう動していたものと考えられる.

また, 図中に示してあるように Direc.1 と Direc.2 の動摩擦係数にはどの材料においてもほとんど差がみられなかった. 摩擦係数に違いがあることから定性的に異方性が生じていることが分かる.

図 6.23 から, 単結晶 Si を対象としたしゅう動摩擦力には摩擦異方性はほとんど生じていなかった. しかし, 同図に示されるようにポリプロピレン, 普通紙においてはしゅう動方向(Direc.2, Direc.3)によって大きく動摩擦力が異なり, ポリプロピレンでは 1.7～1.8 倍程度, 普通紙では 2.0 倍程度の異方性を生じていた. 普通紙でばらつきがみられるのは, 紙の硬さが大気中の湿度に強く影響されるためであると考えられる⁽¹⁴⁾.

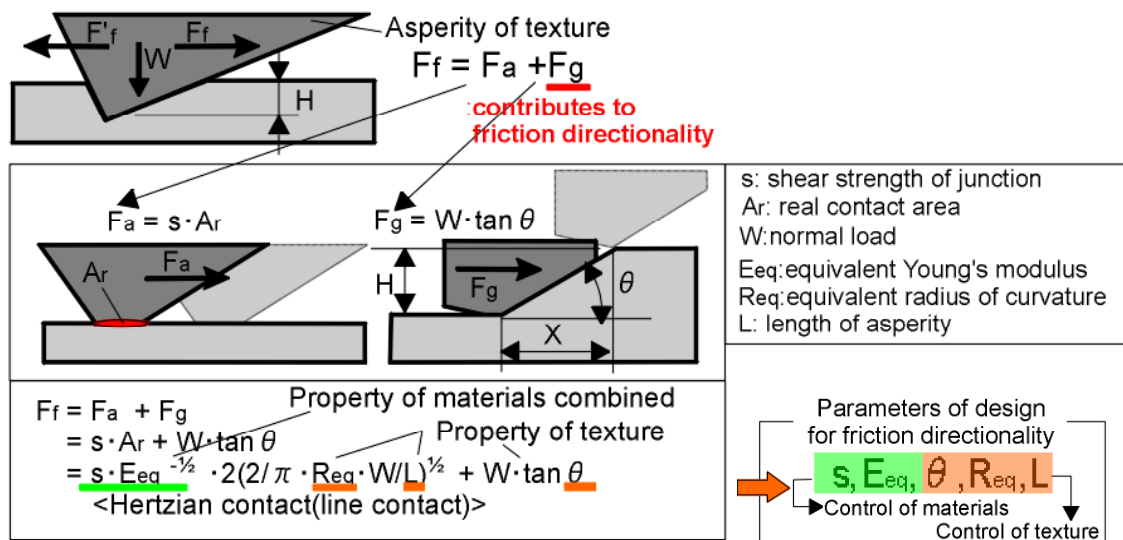


図 6.24 摩擦方向性に対する説明モデルと設計指針

異方性が生じた大きな理由は、ヤング率の違いに起因すると考えられる。Si と比較してヤング率が相対的に小さいポリプロピレンや普通紙においては変形を生じ、突起前方を押しのける力の大きさの差が摩擦力異方性となって生じたものと考えられる。

また、表面粗さにも影響されたものと考えられる。単結晶 Si を対象としたしゅう動においては、ヤング率が他の材料に比べ大きく、変形が生じなかったためであると考えられる。それに対し、ポリプロピレン、普通紙のような材料は表 6.4 に示されているようにヤング率が小さく非対称断面 V 溝形状の突起による変形を生じた。そのため、しゅう動において突起前方を押しのける、または乗り越える力が強く作用したためであると考えられる。

これらの実験結果を踏まえて、考えてみた。図 6.25 に、非対称 V 溝テクスチャによって摩擦力に方向性が生じた理由を説明する簡単なモデル図を示す。摩擦力の発生は一般的に凝着説で考えられている。近年は分子動力学を考慮に入れた解析など複雑な解析が進められているが、一般的には凝着説が用いられている。凝着説では、摩擦力は凝着部をせん断するのに必要な力(凝着項)と、物体を押しのけるのに必要な力(乗り越え項)の和で考えられており、一般の材料では表面の粗さが小さく、後者の項は無視して考えられている。

ここでは摩擦力を、凝着部をせん断するのに必要な力(凝着項)と、物体を乗り越えるのに必要な力(乗り越え項)の和で考えた。乗り越え項は、突起が高さ H まで乗り越える際のエネルギーが一定であることを利用すると、テクスチャ突起の傾斜角の正接に比例すると考えられ、 θ が変化する、すなわちテクスチャの形状が変化するとこの項は変化する。つまり、この項が方向性を生じる原因項である。ヘルツの弾性接触理論(線接触)をテクスチャ突起のモデルに適用すると、凝着項は同図下に示してあるように、凝着部のせん断強さや等価縦弾性率などに依存することが分かる。本実験では、テクスチャの形状は同一であり、同一荷重下においても材料により摩擦に方向性が生じていた。乗り越え項の影響が大きくなると方向性を示すと考えられ、この項が凝着項に対して相対的に大きくなるのは、凝着項の $s \cdot E^{-1/2}$ が小さいときである。ポリプロピレンや普通紙は Si に比べせん断強度やヤング率(それぞれ、3.2GPa, 0.38GPa)が

小さいと考えられ、方向性を生じたと考えられる。

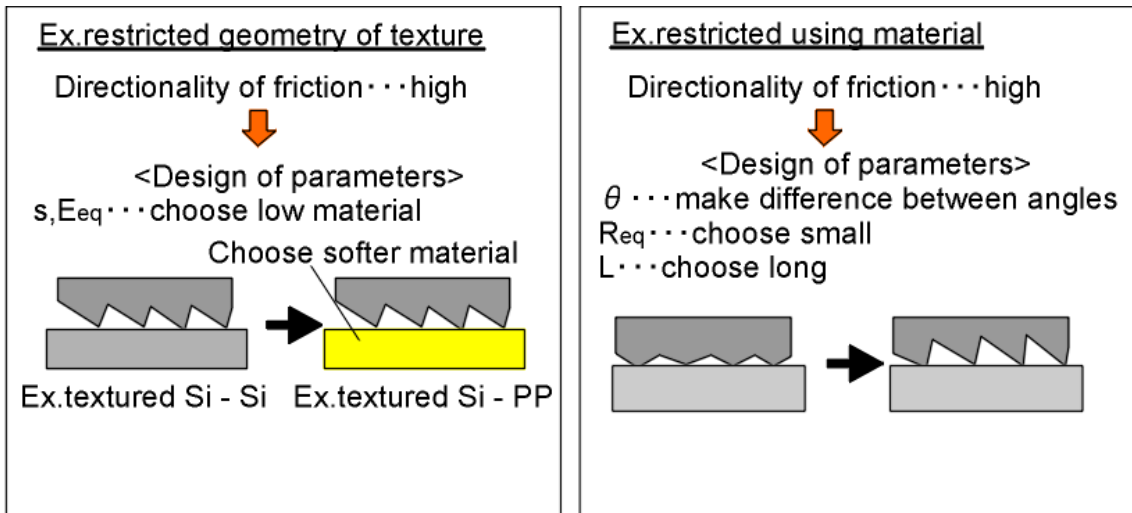


図 6.25 テクスチャ設計と材料選択の考え方

6.4.5 マイクロテクスチャリングによるしゅう動摩擦の方向性制御の可能性

前述のように、テクスチャによって、またテクスチャの組合せによっても大幅に動摩擦力を減少させることが可能であることがわかった。さらに 6.4 節から、摩擦の方向性を制御するにあたって、材料のせん断強度やヤング率、先端曲率半径などの材料物性が動摩擦力の方向性への影響パラメータとなることが考えられる。図 6.26 には、摩擦方向性を制御する上で設計すべきパラメータについての設計概念を示す。

これらのパラメータを制御するによって、摩擦力を変化させることが可能であると考えられる。他研究において、ナノオーダの深さおよびピッチを持つテクスチャが凝着力、摩擦力を減少させ、先端曲率半径が摩擦力に起因するということが示されており⁽⁷⁾、定性的に立てたモデルと一致する。これらの影響因子と摩擦力との関係を明らかにすることによって、使用する材料の特性によって最良の選択をすることができ、しゅう動面におけるテクスチャの設計指針が確立できるものと考えられる。

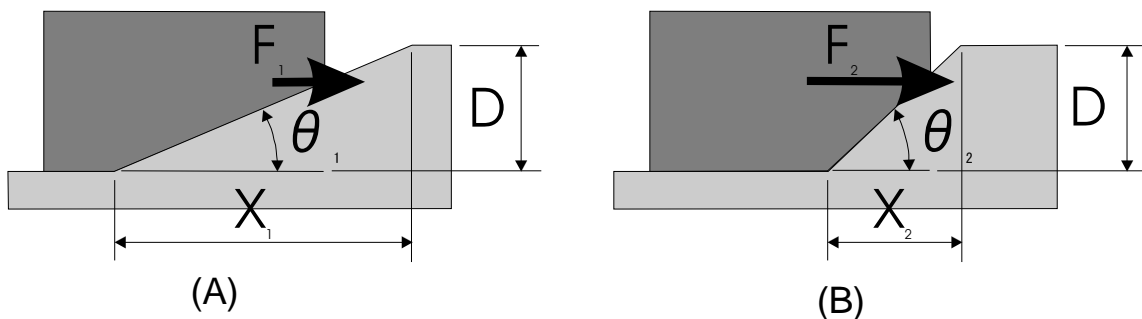


図 6.26 傾斜面に作用する力

6.5 結言

本章で得られた知見をまとめると以下のようなになる。

- (1) 単結晶 Si の微小面圧下の面接触しゅう動においては，対象材料によらず面圧が低下するにつれ，度合いは異なるものの動摩擦係数が上昇する特性があり，動摩擦係数は面圧に依存することが分かった。
- (2) 平面-平面間のしゅう動摩擦力に比べ，テクスチャ面同士，またはテクスチャ面-平面におけるしゅう動摩擦力は非常に小さく，テクスチャによって真実接触面積が減少し，場合によっては摩擦力が 1.0 程度減少した。
- (3) 組合せを考慮したテクスチャ面同士のしゅう動摩擦において，面圧低下に伴う動摩擦係数の上昇を抑制し，0.2 程度の動摩擦係数を軽減することができた。
- (4) しゅう動試験に使用した非対称 V 溝断面形状テクスチャ-平面のしゅう動方向において，しゅう動対象材料を変えることによって 2 倍前後のしゅう動摩擦異方性がみられた。これは，しゅう動対象材料の弾性変形が理由であると考えられ，テクスチャ側と平面側のヤング率による等価縦弾性係数や，テクスチャ先端突起曲率半径などを選択する事によって 2 倍以上の摩擦の方向性制御が可能であると考えられる。

第 7 章 結論

本研究ではシリコンを構造材料とする微小すべり機構の実現を最終目的として、その接触・摩擦特性評価を行ってきた。具体的な目的は以下のとおりである。

- (1) シリコン微小すべり機構における表面吸着力を実験的に明らかにする
- (2) 雰囲気を変えることでこのメカニズムの解明を試みる
- (3) 異方性エッチングを用いたテクスチャによる摩擦係数の低減を試みる
- (4) 摩擦係数の方向性制御を試みる

得られた成果および明らかになった事項をまとめると以下のようになる。

- (1) Si の接触機構では真空環境下では表面吸着力のばらつきが減少する
- (2) 真空環境下では、大気環境下よりも表面吸着力が小さくなる
- (3) 濡れ性を減少させることで表面吸着力を減少させることができる
- (4) 見かけ接触面積がサブミリオダの微小領域においては真空環境下で表面吸着力が減少し、真空中では見かけの接触面積と表面吸着力がほぼ比例する
- (5) シリコンの結晶面方位を利用したテクスチャ設計指針を明らかにした
- (6) 異方性エッチングによる非対称 V 溝断面テクスチャの試作を行い、設計指針の妥当性を検証した
- (7) 面接触しゅう動摩擦装置について、高剛性測定型と自律補正型とを試作し、その有効性を確認した
- (8) 微小面圧下でのしゅう動においては、対象材料によらず面圧が低下するにつれ動摩擦係数が上昇する特性がある
- (9) テクスチャ面同士、またはテクスチャ面-平面におけるしゅう動摩擦力は、テクスチャによって真実接触面積が減少するため大きく減少する
- (10) テクスチャを有するしゅう動材料の組合せにより、しゅう動摩擦に方向性を付与できる

参考文献

- 1) 土谷茂樹 ほか：マイクロ構造における表面間力に関する理論的検討，計測自動制御学会論文集，32-5（1996），637-643.
- 2) 諸貫信行ほか：微小しゅう動機構に作用する表面吸着力（第2報）精密工学会秋季大会講演論文集（1999），383.
- 3) 井上陽一：吸着減少に起因した静摩擦力解析の現状，トライボロジスト,39-3（1994），201-207.
- 4) 佐藤昌明:異方性エッチングによるマイクロセンサ基台の設計と試作に関する研究 東京都立大学(1999)
- 5) 平井聖児:単結晶シリコンの異方性エッチングプロセスのモデル化とその適用に関する研究,1996
- 6) K.N.G. Fuller & D. Tabor: Proc. Royal Soc.Lomdon,A,345(1975) 327
- 7) Y. Ando & J.INO: Wear, 216(1998)115
- 8) 吉川丈法:平成7年度特別研究論文 異方性エッチングによる微小機械要素の製作技術に関する研究,東京都立大学(1996)
- 9) 渡辺ら:シリコンウエーハ間の静摩擦特性に対する温度の影響,T.IEE Japan vol114-A,No2 '94 など
- 10) 金子新,古川勇二:分子線エピタキシによる面創成に関する研究(第2報)－基板面方位と Si-Si ホモエピタキシャル成長機構の関係－,精密工学会誌(掲載予定)
- 11) 王浩洋:微小接触時の摩擦・磨耗現象に及ぼす雰囲気の影響に関する研究
- 12) 金子礼三:ゼロ磨耗への挑戦, マイクロトライボロジーの世界,オーム社(1992)
- 13) 村橋俊介ら:プラスチックハンドブック,朝倉書店(1961)
- 14) 門屋ら:新・紙の科学,中外産業研究会, 1989
- 15) Mark Madou: Fundamental of Micro Fabrication, CRC Press, 1997