大口径シリコンウェーハの高平坦両面研磨加工に関する研究*
(加工条件の最適化)廣瀬 研二^{*1}, 榎本 俊之^{*2}Achievement of High Flatness of Large Diameter Silicon Wafer in
Double-Sided Polishing
(Optimization of Polishing Conditions Based on Kinematical Analysis)Kenji HIROSE and Toshiyuki ENOMOTO^{*3}^{*3} Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamada-oka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

Silicon (Si) wafers are the most commonly used substrates for the production of semiconductor devices. The design rule is miniaturization, and the chip size is increasing to improve the degree of the device integration. As the substrate, Si wafer is then required to be manufactured with higher flatness and larger diameter in order to meet the above demand. The double-sided polishing process is widely adopted as the finishing stage of the wafer manufacturing, because wafers with good surface quality and flatness can be obtained economically. However, the polishing technology has a serious problem: it is very difficult to set the appropriate conditions for stably polishing the Si wafer and wearing pad to high flatness in manufacturing. In this study, the optimization of double-sided polishing conditions was proposed and developed for overcoming the problem. As a basis, the model of the distribution of material removal on the wafer and the distribution of wear on the pad was developed based on kinematical analysis. The amounts of removal and wear are considered to be proportional to the sliding distance between wafer and pads. The optimization of the polishing conditions was performed utilizing a quasi-Newton method. As a result, the polishing conditions are clarified by minimizing the deviation of material removal distribution on the wafer and wear distribution on the pads, that is, achieving high flat wafer and pads.

Key Words: Polishing, Lapping, Accuracy, Tool Wear, Engineering Optimization, Flatness, Silicon Wafer, Double-Sided Polishing, Quasi-Newton Method

1. 緒 言

半導体デバイスの高集積化にともなう微細化により、リソグラフィ工程においては基板材料となるシリコンウェーハに対して極めて高い平坦度が要求されている。また製造コスト低減を目的に、一枚のウェーハから取得できるデバイスチップの個数を増やすためにウェーハの大口径化が進んできた。そして現在はφ300 mm ウェーハがおもに量産されているが、φ450 mm ウェーハの検討⁰⁾もすでに始まりつつある。

こうした次世代大口径ウェーハはφ300 mm ウェーハと同様の加工法、すなわち図1に示すような両面研磨加工方式を基本とし、加工装置のスケールアップ等で対応することが考えられている。両面研磨加工法はキャリアによりウェーハを保持するため、片面研磨加工で生じるチャックによる平坦度劣化の恐れがなく、またウェーハより大きな研磨パッドを使用することで加工進行にともなう研磨パッドの変化を抑制しやすく安定した加工特性を得られるといった特徴を有する。これらの理由によりφ300 mm ウェーハは両面研磨加工により量産されている。しかし量産加工されているものの、その安定性や経済性にはいまだ多くの問題があり、さらに大口径化し平坦度仕様も高まる次世代ウェーハ加工に現工法をそのまま適用することは極めて困難である。

* 原稿受付 2008年4月11日。

^{*1} 大阪大学大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)。^{*2} 正員、大阪大学大学院工学研究科。

E-mail: enomoto@mech.eng.osaka-u.ac.jp

そこでウェーハの高平坦研磨を実現するために、加工条件の最適化に関する検討²⁾がなされている。この研究ではウェーハの自転までを考慮したウェーハ研磨パッドの複雑な相対運動をモデル化しているが、ウェーハ面内の加工量の均一化のみを対象としている。しかし実際には研磨パッド内の摩耗量も均一にすることが極めて重要であり、従来 工作物運動軌跡にもとづく解析³⁾が数多く行われてきた。また加工現場においてはキャリアの回転方向を定期的に反転させパッド上でのウェーハ軌跡の偏りを減らしたり⁴⁾、ドレッサによりパッド形状を強制的に修正したりする作業が行われている。しかしそれらの修正作業は作業者の経験に強く依存し、さらに加工コストを大幅に高める要因となっている。またスエードパッドのような軟質な研磨パッドに対しては通常のドレスではパッド形状の制御が極めて困難である。

そこで本研究では大口径シリコンウェーハを両面研磨加工により高平坦に仕上げることを目的に加工条件の最適化を行った。すなわち研磨パッドの偏摩耗を抑制しながらウェーハを高平坦に仕上げられる加工条件を幾何学的・運動学的理論解析にもとづき検討したので報告する。

2. 両面研磨加工のモデル化

2.1 モデル化の考え方 $\phi 450$ mm ウェーハの両面研磨加工においては、研磨装置のサイズなどを考慮して1つのキャリア内には1枚のウェーハが収容され则认为される。そこで1バッチあたり5キャリア、1キャリアあたり1ウェーハの遊星歯車式両面研磨機(キャリア径 約 23 インチ)を対象としてモデル化することとした(図2, 表1)。ウェーハは $\phi 300$ mm とした。

ここで同図に示すように研磨パッド中心を原点とした直交座標系 xy 、同じく研磨パッド中心を原点とした極座標系 $r\theta$ 、ウェーハ中心を原点とした極座標系 $r_w\theta_w$ を設定し、次節以降で述べるモデル化を行った。なお、 xy および $r\theta$ は静止系に固定された座標であり、 $r_w\theta_w$ はウェーハとともに回転する座標である。そしてウェーハおよび研磨パッド内の各位置における研磨量、摩耗量はお互いの相対運動長さ、つまり摩擦摺動距離に比例するとし、これを求めることで研磨量および摩耗量分布の導出を行った。

2.2 ウェーハ上のある位置における研磨パッドに対するウェーハの相対速度 摩擦摺動距離を求めるにあたり、まず $r_w\theta_w$ 座標系で表されたウェーハ上のある位置 $(r_{waf1}, \theta_{waf1})$ におけるパッドに対するウェーハの相対速度を求めた。

Fig. 1 Double-sided four-way polishing machine

Fig. 2 Model of the double-sided polishing

Table 1 Polishing machine specifications

Internal diameter of pad	550.00 mm
External diameter of pad	1635.00 mm
Diameter of carrier	584.91 mm
Diameter of sun gear	507.59 mm
Diameter of internal gear	1677.41 mm
Distance between centers of carrier and wafer	120.60 mm

キャリアの自転および公転角速度を ω_{crot} , ω_{crev} とし、加工開始後 t におけるウェーハ中心位置を xy 座標で表したものを $(x_{waf1}(t), y_{waf1}(t))$ とする。これより r_{waf1} , θ_{waf1} を xy 座標系で表すと次式のようになる。ここで、 ω_{waf} はキャリアから見たウェーハの自転角速度を表し、時間によらず一定であるとする。

$$x_{waf1}(t) = x_{wafc1}(t) + r_{waf1} \cdot \cos\{(\omega_{crot} + \omega_{waf}) \cdot t + \theta_{waf1}\} \quad (1)$$

$$y_{waf1}(t) = y_{wafc1}(t) + r_{waf1} \cdot \sin\{(\omega_{crot} + \omega_{waf}) \cdot t + \theta_{waf1}\} \quad (2)$$

式(1), (2)をそれぞれ時間微分することでウェーハ上のある位置 $(r_{waf1}, \theta_{waf1})$ の xy 座標系におけるウェーハ速度 $v_{waf1}(t)$, $v_{waf1}(t)$ が求まる。

ここでウェーハの自転角速度 ω_{waf} は次のように求めた。ウェーハはパッドより受ける摩擦力によってキャリア内で自転する。この摩擦力はパッドに対するウェーハの相対速度に依存するものと考えられるため、ウェーハに働く回転モーメントの評価関数として J_0

を設定する。ウェーハは中心回りの回転モーメントが釣り合った状態で自転するはずなので、 J_0 が0となる ω_{waf} が理論的なウェーハ自転角速度となる。ここでは、黄金分割法で J_0 を最小にする ω_{waf} を求め、ウェーハ自転角速度とした。

次に、xy座標系で表したウェーハ上のある位置 x_{waf1} , y_{waf1} を $\text{mp}\theta\text{p}$ 座標系で表すと次式のようにになる。

$$r_{pad1}(t) = \sqrt{x_{waf1}(t)^2 + y_{waf1}(t)^2} \quad (3)$$

$$\theta_{pad1}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{y_{waf1}(t)}{x_{waf1}(t)} \right) \quad (4)$$

式(4)では、逆正接の中での分母が負の場合 $\theta_{pad1}(t)$ に π を加える。式(3), (4)より、位置 $r_{pad1}(t)$, $\theta_{pad1}(t)$ でのパッドの速度をxy座標系で表すと次式のようにになる。ここで、 ω_{pad1} はパッドの角速度を表す。

$$v_{padx1}(t) = -r_{pad1}(t) \cdot \omega_{pad} \cdot \sin(\theta_{pad1}(t)) \quad (5)$$

$$v_{pady1}(t) = r_{pad1}(t) \cdot \omega_{pad} \cdot \cos(\theta_{pad1}(t)) \quad (6)$$

$v_{wafx1}(t)$, $v_{wafy1}(t)$ からそれぞれ式(5), (6)を引いたものがパッドに対するウェーハの相対速度のxy成分 $v_{relx1}(t)$, $v_{rely1}(t)$ となる。これより、パッドに対するウェーハの相対速度の絶対値および周方向成分は次式のようにになる。

$$v_{rel1}(t) = \sqrt{v_{relx1}(t)^2 + v_{rely1}(t)^2} \quad (7)$$

$$v_{rel\theta1}(t) = -v_{relx1}(t) \cdot \sin\left\{(\omega_{crot} + \omega_{waf}) \cdot t + \theta_{waf1}\right\} + v_{rely1}(t) \cdot \cos\left\{(\omega_{crot} + \omega_{waf}) \cdot t + \theta_{waf1}\right\} \quad (8)$$

2.3 研磨パッド上のある位置におけるウェーハに対するパッドの相対速度 パッド中心を原点とし、パッドとともに回転する座標系 $\text{mp}\theta\text{p}'$ を定義し、 $\text{mp}\theta\text{p}'$ 座標系で表されたパッド上のある位置 $(r_{pad2}', \theta_{pad2}')$ におけるウェーハに対するパッドの相対速度を求める。加工開始後 t におけるウェーハ中心位置をxy座標系で表すと次式のようにになる。

$$x_{wafc2}(t) = \frac{d_{sun} + d_{car}}{2} \cdot \cos\left(\omega_{crev} \cdot t + \frac{2\pi}{5} \cdot n_{car}\right) + l_o \cdot \cos\left(\omega_{crot} \cdot t + \frac{2\pi}{5} \cdot n_{car}\right) \quad (9)$$

$$y_{wafc2}(t) = \frac{d_{sun} + d_{car}}{2} \cdot \sin\left(\omega_{crev} \cdot t + \frac{2\pi}{5} \cdot n_{car}\right) + l_o \cdot \sin\left(\omega_{crot} \cdot t + \frac{2\pi}{5} \cdot n_{car}\right) \quad (10)$$

ここで、 n_{car} はキャリア番号であり5つあるキャリアをそれぞれ0~4とする。

r_{pad2}' , θ_{pad2}' は $\text{mp}\theta\text{p}$ 座標系で次のように表される。

$$r_{pad2} = r_{pad2}' \quad (11)$$

$$\theta_{pad2}(t) = \theta_{pad2}' + (\omega_{pad} \cdot t) \pmod{2\pi} \quad (12)$$

r_{pad2} , θ_{pad2} はxy座標系で表すと次式のようにになる。

$$x_{pad2}(t) = r_{pad2} \cos(\theta_{pad2}(t)) \quad (13)$$

$$y_{pad2}(t) = r_{pad2} \sin(\theta_{pad2}(t)) \quad (14)$$

式(13), (14)をそれぞれ時間微分することでパッド上のある位置 $(r_{pad2}', \theta_{pad2}')$ のxy座標系におけるパッド速度 $v_{pax2}(t)$, $v_{pay2}(t)$ が求まる。

$x_{pad2}(t)$, $y_{pad2}(t)$ は $\text{rw}\theta\text{w}$ 座標系では次式になる。

$$r_{waf2}(t) = \sqrt{(x_{pad2}(t) - x_{wafc2}(t))^2 + (y_{pad2}(t) - y_{wafc2}(t))^2} \quad (15)$$

$$\theta_{waf2}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{y_{pad2}(t) - y_{wafc2}(t)}{x_{pad2}(t) - x_{wafc2}(t)} \right) \quad (16)$$

式(16)では逆正接の中での分母が負の場合 $\theta_{waf2}(t)$ に π を加える。ここで $r_{waf2}(t) > 150$ の時、パッド上のある位置 $(r_{pad2}', \theta_{pad2}')$ ではパッドはウェーハと接していないので相対速度を0とする。

$r_{waf2}(t)$, $\theta_{waf2}(t)$ はxy座標系では次式のようにになる。

$$x_{waf2}(t) = x_{wafc2}(t) + r_{waf2}(t) \cdot \cos\left\{(\omega_{crot} + \omega_{waf}) \cdot t + \theta_{waf2}(t)\right\} \quad (17)$$

$$y_{waf2}(t) = y_{wafc2}(t) + r_{waf2}(t) \cdot \sin\left\{(\omega_{crot} + \omega_{waf}) \cdot t + \theta_{waf2}(t)\right\} \quad (18)$$

式(17), (18)をそれぞれ時間微分することで、ウェーハ上の位置 $(r_{waf2}(t), \theta_{waf2}(t))$ のxy座標系におけるウェーハ速度 $v_{wafx2}(t)$, $v_{wafy2}(t)$ が求まる。

$v_{pax2}(t)$, $v_{pay2}(t)$ からそれぞれ $v_{wafx2}(t)$, $v_{wafy2}(t)$ を引いたものがウェーハに対するパッドの相対速度のxy成分 $v_{relx2}(t)$, $v_{rely2}(t)$ となる。これよりウェーハに対するパッドの相対速度の絶対値は次式のようにになる。

$$v_{rel2}(t) = \sqrt{v_{relx2}(t)^2 + v_{rely2}(t)^2} \quad (19)$$

2.4 摩擦摺動距離 ウェーハおよび研磨パッド面内の研磨量や磨耗量はお互いの摩擦摺動距離に比例すると考え、その摩擦摺動距離 L および L_p を以下の式より求めた。なお、計算の際には表2の値を用いた。

$$L = \sum_{k=1}^2 \left(\int_0^T v_{rel1,k}(t) dt \right) \quad (20)$$

$$L_{p,k} = \int_0^T v_{rel2,k}(t) dt \quad (21)$$

3. 研磨加工条件の最適化

3.1 最適化のための目的関数 ウェーハおよび研磨パッドを高平坦化する、すなわち摩擦摺動距離を各面内で均一にすることが本報の目的である。そこで式(20)をウェーハ全面にわたって計算し、その最大値と最小値の差をウェーハに関する目的関数 J_w とする。同様に、式(21)よりパッドに関する目的関数を得る。なお上パッドに関する目的関数を J_{pu} 、下パッドに関する目的関数を J_{pl} とする。

次に、これらのウェーハおよび上下パッドの目的関数に、それぞれ重み係数を掛けて足し合わせた多目的関数 J_{wp} を定義する。 J_{wp} を目的関数とした最適化（最小化）を行うことでウェーハおよびパッド面内摩擦距離分布を同時に均一化することができる。

3.2 加工条件の最適化 加工条件、すなわち設計変数を太陽・内歯車、上・下パッド回転数の4変数とし、準ニュートン法を用いて最適化を行った。なお実際の研磨加工装置の仕様を考慮し、歯車と研磨パッドの最大・最小回転数をペナルティ関数として設定した。また、研磨量を一定量に収めるためにウェーハ面内の最大摩擦距離が初期値の $\pm 10\%$ 、パッド面内の最大摩擦距離が初期値の $\pm 20\%$ に収まるようにやはりペナルティ関数として考慮した。

ここで最適化計算を行う4変数の初期値としては、加工現場で実際に用いられることの多い条件（表3中 Initial）⁽⁴⁾とした。これはウェーハと各研磨パッド間の摩擦距離全体がほぼ等しくなることを考え、設定されており、各面内での分布についてはまったく考慮されていない。

4. 加工条件の最適化計算結果

4.1 初期条件による面内摩擦距離分布 表3に最適化後の設計変数（歯車等の回転数）および初期値・最適化条件における目的関数（ウェーハ面内摩擦距離最大差 J_w 、上・下パッド面内摩擦距離最大差 J_{pu} 、 J_{pl} ）の値を示す。また、ウェーハおよびキャリアの運動としてウェーハ自転回転数 ω_{waf} とキャリアの自転 ω_{crot} 、公転回転数 ω_{crev} を示す。ここでウェーハのみを目的関数として最適化した場合を Ow 、ウェーハ、上パッド、下パッドを同時に最適化した場合を Owp とした。各々の結果に対応するウェーハ面内摩擦距離分布とパッド面内摩擦距離分布を図3、図4に示す。

Table 2 Parameters for calculating sliding distance

L		Lp	
Δr_{waf}	10 mm	Δr_{pad}	21.7 mm
$\Delta \theta_{waf}$	20 °	$\Delta \theta_{pad}$	20 °
T	60 s	T	60 s

Table 3 Multi-objective optimization for polishing conditions

Design variables (Rotation of gears and pads)			
	Initial	Optimized Ow	Optimized Owp
ω_{sun} rpm	11.00	29.19	12.14
ω_{int} rpm	10.00	-10.96	6.75
ω_{padu} rpm	-10.00	-10.28	-9.93
ω_{padl} rpm	30.00	30.34	31.89
Objective function (Max. difference in sliding distance on wafer and pads)			
	Initial	Optimized Ow	Optimized Owp
J_w mm	64706	4765	7897
J_{pu} mm	18244	11906	14900
J_{pl} mm	17752	36231	24565
Calculated rotation of wafer and carrier			
	Initial	Optimized Ow	Optimized Owp
ω_{waf} rpm	0.43	38.63	6.73
ω_{crot} rpm	9.57	-28.38	4.41
ω_{crev} rpm	10.23	-1.64	8.00

Ow : Optimized for only wafer

Owp : Optimized for wafer and pads

表3中の初期条件での目的関数および図3、図4より、初期条件においてはウェーハ面内摩擦距離分布がテーパー状の傾きを示し、摩擦距離最大差が大きくなっている。この時、パッド中心に対するウェーハの回転であるウェーハの相対自転回転数 ω_{wrel} は次式のように表される。

$$\omega_{wrel} = \omega_{waf} + \omega_{crot} - \omega_{crev} \quad (22)$$

初期条件においては ω_{wrel} 0.23 rpm であり、ほぼ0に近い。このため、ウェーハが加工中にパッド中心に対してほぼ回転せず、摩擦距離分布がテーパー状になったと考えられる。研磨パッドに関しては、各パッド面内の摩擦距離の差はあるものの上下で比較するとパッド面内摩擦距離が均等な分布となっている。これは3.2節で述べたように、初期条件においてはキャリアの公転回転数 ω_{crev} とパッドの回転数との相対回転数が上下でほぼ等しいためと考えられる。なお研磨パッドの半径方向中央付近で摩擦距離が増大しているが、これは実際の実験結果例⁽⁹⁾と対応するものである。

4.2 ウェーハのみの平坦化を目的とした最適化 表3および図3、図4からわかるように、ウェーハ面内摩擦距離分布が初期条件に比べて均一化されている（Ow）。最適化条件Owでは ω_{wrel} 11.89 rpm であり、ウ

ウェーハがパッド中心に対してよく回転しているために平坦化されたと考えられる。一方、研磨パッドに関しては上パッドに対して下パッド面内の摩擦距離は3倍以上となり（図4）、また各面内での最大差も下パッドでは3倍程度大きくなってしまふ（表3）。これはキャリア公転回転数 ω_{crev} とパッド回転数との相対回転数が下パッドでは上パッドの3倍以上となっているためと考えられる。

このようにOwではウェーハのみの平坦化を目的としているため、ウェーハ面内摩擦距離分布は均一化されているが、パッドに関しては最適化においてまったく考慮していないために上下パッドの不均等な摩擦距離や、下パッド面内摩擦距離分布の偏りが発生している。

4.3 ウェーハと上下パッドの同時平坦化を目的とした最適化 ウェーハと上下パッドの同時平坦化を目的とした最適化の結果

（Owp）、ウェーハ面内摩擦距離分布が初期条件に比べて平坦化されている（表3、図3）。Owpでは ω_{crev} 3.14 rpmであり、Owによる結果ほどではないが、ウェーハがパッド中心に対してよく回転しているために平坦化されたと考えられる。研磨パッドに関しては、初期条件に比べると多少上下パッドの面内摩擦距離に差があるが、上下パッドはほぼ同程度の摩擦距離分布となっている。これはキャリアの公転回転数 ω_{crev} とパッドの回転数との相対回転数が上下で近い値のためと考えられる。

以上、Owpではウェーハと同時にパッドの平坦化も目的としているため、ウェーハ面内摩擦距離分布を均一にしつつ、同時にパッド面内摩擦距離分布が面内もしくは上下で不均一になることを抑えることができた。

しかし図3、図4からわかるように、研磨パッド面内摩擦距離分布においてはどの結果でもパッド半径方向中間部で大きく、中心および外縁に向かって小さくなっていく山型の分布となっている。これはパッド上のウェーハ軌跡からパッド中間部では縁に比べてウェーハとの接触時間が必然的に長くなるためであり、この山型の偏摩耗分布は歯車およびパッド回転数を最適化するだけでは抑制することができない。そこで次章においてキャリア内でのウェーハ位置に着目した平坦化方法について検討することとした。

5. 研磨パッド平坦化に関する検討

5.1 キャリア内ウェーハ偏心量の検討 キャリア中心からのウェーハの偏心量（オフセット）を小さくすることで、パッド面内摩擦距離分布の改善を図る。これはパッド半径方向のウェーハの移動量を小さくす

Fig. 3 Distribution of sliding distance on wafer

Fig. 4 Distribution of sliding distance on upper and lower pad

ることで、パッド半径方向中間部に集中した摩擦距離の偏りを緩和することを目的としている。

4章での最適化における初期条件と同様の条件でオフセットを0, 60, 120.6 mmと変化した時のパッド面内摩擦距離分布を図5に示す。オフセットを60 mm, 0 mmと小さくすることで摩擦距離分布の最大値付近

で摩擦距離が増大し、結果としてパッド中間部での摩擦距離分布の傾きが緩やかになった。しかし、縁に向かうにつれて傾きが急になり、また全体的に摩擦距離が増大しパッドの消耗が早くなると考えられる。

5.2 キャリア内ウェーハ偏心量および偏心方向の検討 ウェーハ偏心量だけでなくその方向も考慮することでパッド面内摩擦距離分布の改善を図る。まず5つのキャリア内のウェーハ初期位置を交互に内（オフセット -120.6）と外（オフセット 120.6）に配置し、太陽・内歯車を同期させて加工を行う。このとき研磨パッド全体を均一に覆うようなウェーハ軌跡となる。

加工条件を ω_{sun} 10 rpm, ω_{int} 10 rpm, ω_{padu} -10 rpm, ω_{padl} 30 rpm とした時 (alteration) と4章での最適化初期条件と同じ初期位置と加工条件 (normal) でのパッド面内摩擦距離分布を図6に示す。パッド中間部で摩擦距離が一部突出している部分はあがるが、グラフの概形をみると全体的に平坦な分布となっており、パッド面内摩擦距離の山型分布を改善できることがわかった。

6. 結 言

大口径シリコンウェーハを両面研磨加工により高平坦に仕上げることを目的に、理論解析にもとづき加工条件の最適化を行った結果、次のような結論を得た。

- (1) ウェーハ平坦化のみを考慮した最適化ではウェーハ面内の研磨量分布は均一化されるが、上下の研磨パッドの摩擦量が著しく異なってしまう。
- (2) ウェーハおよび上下研磨パッドの平坦化を同時に考慮し最適化することで、研磨パッドの偏磨耗を抑制しつつウェーハを平坦化できることがわかった。
- (3) 研磨パッド面内の摩擦量分布の不均一は、キャリア内でウェーハを適切な位置に設定することで改善できる可能性があることがわかった。

本研究の遂行にあたり多大なご協力を賜りました浜井産業株式会社に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) *International Technology Roadmap for Semiconductors 2007 Edition, Executive Summary Final Draft*, (2007-Dec.), p.77.
- (2) Nakagawa, Y., Optimization of Double Sided Polishing Conditions in order to Unify Friction Distance Distribution in a Wafer, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.72, No.5 (2006), pp.641-646. (in Japanese)
- (3) Uhlmann, E. and Ardetl, T., Influence of Kinematics on the Face Grinding Process on Lapping Machines, *Annals of the CIRP*, No.48, No.1 (1999), pp.281-284.
- (4) Arai, H., Planarization Polishing Technique for Large Diameter of Bare Silicon Wafer, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.73, No.7 (2007), pp.756-759. (in Japanese)
- (5) Abe, K., Study for Lapping Technology of 400 mm diameter wafers -3rd report-, *Proceedings of Spring*

Fig. 5 Effect of offset distance on sliding distance

Fig. 6 Effect of offset distance and direction on sliding distance

Conference of the Japan Society for Precision Engineering, (1998), p.566. (in Japanese)