マルチ・ワイヤソー切断におけるワイヤ走行速度および インゴット送り速度の効果*

— $\phi 400\text{mm}$ シリコンインゴットの切断に関する研究 (第2報) —

大石 弘**

浅川慶一郎***

塚本和繁***

宇野義幸†

Effects of Wire Running Speed and Work Feed Rate on Multiwire Saw Slicing
— Study on 400mm-Diameter Silicon Ingot Slicing (2nd Report) —

Hiroshi OISHI, Keiichiro ASAKAWA, Kazushige TSUKAMOTO and Yoshiyuki UNO

This paper presents the effects of a wire running speed and a work feed rate on the multiwire saw slicing of 400mm-diameter silicon ingots from the viewpoint of the cutting force and the slurry layer thickness adhering onto the running wire. The cutting force, which becomes a cause of warp and waviness, is proportional to a work feed rate and inversely proportional to a wire running speed. The change of slurry layer thickness, which makes the global wafer thickness variation (GBIR), is derived from Navier-Stokes equation, and becomes more uniform along a cutting chord length at a higher wire running speed. By increasing the wire running speed from 500m/min to 850m/min (on an average) and optimizing the work feed rate, the GBIR and warp of the sliced wafers are reduced to half of the conventional products.

Key words: 400mm-diameter silicon ingot, multiwire saw slicing, wire running speed, work feed rate, slurry layer thickness

1. 結 言

半導体デバイス (DRAM, MPU) の集積度はこわすか 20 年程の間に 64k ビットから 256M ビットへと指数関数的に向上してきている。これを実現するために、一方ではデザインルールの縮小、他方では個々のチップサイズの拡大がなされてきた。特に後者について、製造コストを増加させることなく、大面積のデバイスチップを製造する唯一の方法は、できるだけ大口径のシリコン基板ウエハ (以下、ウエハと記す) を使用してウエハ 1 枚当たりのチップの生産数を一定数以上 (おおむね 100~150 個と言われる) に維持することである。これに伴い、その黎明期には $\phi 10\text{mm}$ だったウエハサイズも現在 $\phi 200\text{mm}$ に達し、 $\phi 300\text{mm}$ の実用化も目前である。更に筆者らは、集積度 4G ビットの次々世代半導体デバイスに向けて、 $\phi 400\text{mm}$ ウエハの生産技術の開発を行っている。

従来、ウエハの素材となるシリコン単結晶インゴット (以下、インゴットと記す) の切断はほぼすべて内周刃スライサによって行われ、インゴットの直径が大きくなるにつれて装置や内周刃ブレードを大型化することで対応してきた。しかし $\phi 400\text{mm}$ ウエハを切断するためには必須である、1600mm 幅のステンレス製ブレード台金を入手する目処がいまだたっており、もし将来入手できたとしても、その時の切断代は約 450~500 μm とワイヤソーの 2 倍以上になると考えられる。一方、マルチ・ワイヤソー (以下、ワイヤソーと記す) は切断代が 220

~240 μm と小さく、切断したウエハの反りが小さいことから $\phi 200\text{mm}$ 以降、シリコンインゴットの切断にも使用され始めた。当初 10%以上あった切断中のワイヤ破断も、ワイヤ自体の改良やワイヤソー装置の同期運転精度の改善によって、現在 1%以下に減少し、 $\phi 400\text{mm}$ の切断に対しても最も現実的な代替手段と考えられる¹⁾。

筆者らは $\phi 400\text{mm}$ インゴットの切断技術に関して、主に (1) ワイヤソー装置²⁾、(2) ワイヤソー用水溶性クーラント³⁾、(3) 標準切断条件の最適化の 3 点から、品質、生産性、およびコストの最適化を目指している。本報告ではそのうち、切断条件の最適化に関して、ワイヤ走行速度やインゴット送り速度が切断抵抗とスラリ層厚さに与える効果と、これらを利用して $\phi 400\text{mm}$ アズカット・ウエハの品質を改善した結果を明らかにする。併せて、ワイヤソーの切断状況をリアルタイムでモニタする手段として新たに実用化した、渦電流式のワイヤたわみセンサについてその概要を説明する。

2. 主な切断パラメータ間の関係

図 1 にワイヤソー切断における切断抵抗とワイヤのたわみの関係を模式的に示す。ワイヤソー切断において、ウエハの品質、生産性やコストに直接影響する主要な切断パラメータには、ワイヤ走行速度 U 、インゴット送り速度 V 、ワイヤ張力 T 、および砥粒径 S がある。これらと図 1 の y 方向 (法線方向) の切断抵抗 P およびのワイヤたわみ δ_y の間には、これらパラメータの実用的な大きさの範囲内で次式 (1)、(2) に示す単純な関係がある。なお砥粒径 S との関係は多少複雑であり、ここでは言及し

$$P \propto V/U \quad (1)$$

$$\delta_y \propto P/T \quad (2)$$

* 原稿受付 平成 12 年 3 月 22 日

** 正会員 (株) スーパーシリコン研究所 (安中市野谷 555 番地の 1)

*** (株) スーパーシリコン研究所

† 正会員 岡山大学工学部 (岡山市津島中 3-1-1)

Fig.1 Cutting force and wire deflection in wire saw slice

ない。これらの関係式はφ100～125mm 程度の小口径インゴットに対して経験的に得られたものであり、そのうちの式 (1) はラッピングやポリシングについて知られているプレストンの式とも合致する。一方、x 方向（切断面に垂直な方向）へのワイヤ変位 δ_x はワイヤの偏摩耗によってその断面形状が真円からずれることや、短時間中のスラリの不均一な流れによって生じ、次式 (3) のように表される⁴⁾。

$$\delta_x \propto P / T \quad (3)$$

式 (1)～(3) から分かるように、生産性（インゴット送り速度 V ）を維持しつつ、ワイヤソーで切断したウエハの反りやうねり⁵⁾の原因となるワイヤ変位 δ_x を押さえるには、切断抵抗 P を小さくするか、ワイヤ張力 T を大きくすることが望ましい。しかしワイヤ張力 T に関しては、使用するワイヤ強度に限界があることから、高張力切断を行うためにはそれに応じた太さのワイヤを使用することになり、切断代増加の原因となる。そこで、本報告では切断抵抗 P に影響するパラメータのうち、ワイヤ走行速度 U とインゴット送り速度 V について、φ400mm インゴットに対してその効果を検証する。

また、アズカット・ウエハの品質のうち、厚さむら（GBIR, Global-flatness Backside Ideal Range）の低減は、スライスの次工程であるラッピングや両頭研削での取り代を削減し、品質を安定させ、生産性やコストを改善するために特に重要な要素である⁶⁾。本報告ではワイヤ走行速度やインゴット送り速度がウエハの厚さむらに与える影響について、走行するワイヤに付着するスラリ層の厚さと関係づけて言及する。

3. 加工実験および考察

3.1 ワイヤソー装置概要およびワイヤたわみ測定用渦電流センサ

図2に実験に使用したワイヤソー装置の全体図を示す。ワイヤソーはφ400mm シリコンの切断研究用に今回新たに開発したものであり、新規開発した85kW出力の小型ACサーボモータとワイヤ駆動系を7軸精密同期制御することによって、最大ワイヤ走行速度1000m/minを可能にした。

また、ワイヤソー切断時の切断抵抗をリアルタイムでモニタする手段として、渦電流式のワイヤたわみセンサを導入した。渦電流センサはスラリが飛散する劣悪な環境でもメンテナンスなしで使用でき、かつ5mm以上のダイナミックレンジが得られる唯一のセンサである。

渦電流センサでは、センサ・コイルから発生する交番磁束が対向して置かれた導体と交差し、導体には磁束の変化を打ち消す方向に渦電流が生ずる。この渦電流はセンサ・コイルのインピーダンスとして作用し、センサと導体との距離の関数として検出される。本実験ではセンサに対向する導体（鋼線）がφ0.16～0.18mmと極めて細いワイヤであるため、原理的に十分な渦

Fig.2 Schematic diagram of multiwire saw for 400mm-diameter slicing

Fig.3 Installation position of the wire deflection sensor

電流が流れるかどうか懸念された。そこでφ13～40mmの各種センサを試験し、最終的にφ40mmの大口径センサを使用して検出感度を高めることで、その後の信号処理に十分なだけのS/N比（約60dB）を得た。

図3に渦電流センサの設置位置を模式図で示す。図3の幾何学から、ワイヤたわみ δ_y (mm) とワイヤ1本当たりの切断抵抗 P (N) の間には、ワイヤが静的にたわんでいる状態で近似式(4)に示す関係がある。

$$\frac{P/2}{T} = \frac{\delta_y}{\sqrt{\{(L-D)/2\}^2 + \delta_y^2}} \quad (4)$$

ワイヤ張力 T を24.5 N (2.5kgf) とすると式(4)を得る。

$$P \approx 4 T \delta_y / (L-D) = 0.31 \delta_y \quad (4')$$

式 (4') を確認するため、ワイヤソー装置のインゴット取付け部に圧電式のロードセルを挿入し、φ400mm インゴット切断時に δ_y と P の大きさを測定した。圧電式のロードセルはプローブ自体の剛性が大きく、測定精度は高いが、ドリフトが約 5×10^{-3} N/s と大きく、φ400mmでは現在約24hかかる長時間の連続測定には向かないという欠点があった。このため今回の測定では、5minごとを目処に切断を中止して、ワイヤたわみが無くなるまでインゴット送りを戻し、切断抵抗が零になったところでロードセルの読み値を零にリセットした。

図4に上記の方法で測定した δ_y (mm) と P (N) の関係を示す。両者の間には式 (4') に示したような比例関係があり、ワイヤのたわみを測定することで容易に切断抵抗に換算できることを確認した。以下、ワイヤたわみをもって切断抵抗を代表させるものとする。但し、実測値では近似式より比例定数が38%

Fig. 4 Wire deflection(δ_y) vs. cutting force (P)

Fig. 5 Changes of work feed rate and wire running speed

大きく測定されている。実際の切断時には、高速で走行するワイヤにはその接線方向にも切断抵抗が働く。この力によってインゴットおよびこれを取り付けた切断抵抗測定器（4個のロードセルから構成されている）には、ワイヤ走行方向にねじる力が作用する。今回使用した切断抵抗測定器は、このようなねじりの力に対して影響を受けないようにする考慮が不足していたため、誤差を生じたと考えられる。

なお本報告では詳述しないが、切断中のワイヤたわみを監視することで、切断抵抗の変化、ひいては切断に使用するスラリの成分であるクーラントや砥粒の性能の違いやその変化を測定・管理でき、これは作業上、有益なモニタ手段であることが分かった。

3.2 ワイヤ走行速度・インゴット送り速度と切断抵抗およびスラリ層厚さ

3.2.1 切断抵抗

ワイヤを一方向のみに走行させる切断方式により、 $\phi 400$ mmのインゴット内で図5に示すように、ワイヤ走行速度とインゴット送り速度をそれぞれ500~1000m/minおよび0.083~0.250mm/minの範囲内で段階的に変化させ、そのときのワイヤたわみを測定した。まずワイヤ走行速度 U を500m/minに保ったまま、インゴット送り速度 V を0.083から0.250mm/minまで切込み深さ15mm間隔で変化させた。次にインゴット送り速度を0.200mm/minに保って、ワイヤ走行速度を1000から500m/minまで変化させた。実験はインゴット中央部の、切込み深さによる切断弦長の変化ができるだけ小さい位置で行った。それでも切断弦長には最大で約5%の差ができるが、ワイヤたわみ δ_y から求めた切断抵抗 P はそのときの切断弦長には関係しないという幾何学上の特徴があるため、特別なデータの補正は行っていない。

まず、ワイヤ走行速度 $U = 500$ m/minの一定条件下でインゴット送り速度を変化させた時のワイヤたわみの変化を図6に示

Fig. 6 Work feed rate (V) vs. wire deflection (δ_y)

Fig. 7 Wire running speed (U) vs. wire deflection (δ_y)

Table 1 Slicing conditions for a 400mm-diameter ingot

Ingot	402mm in dia., 200±10mm in length
Wafer	1.02mm in thickness
Wire (high tension steel)	0.177mm in diameter
Wire tension	24.5N (2.5kgf)
Slurry tank capacity	400L
Slurry flow rate	110L/min
Slurry temperature	23.5±0.1°C
Coolant	Polypropyleneglycol-based water-soluble type
Abrasives	GC#600 (50wt% in slurry)

示す。同様に、インゴット送り速度 $V = 0.200$ mm/minの一定条件下でワイヤ走行速度を変化させた場合のワイヤたわみ変化を図7に示す。なお、上記以外の切断条件を表1にまとめる。

図6および図7より、ワイヤたわみ δ_y 、すなわち切断抵抗 P はインゴット送り速度 V に比例し、ワイヤ走行速度 U に反比例すること（式(1)）を $\phi 400$ mmインゴットに対して検証した。

3.2.2 スラリ層厚さ

図8に $U = 500$ m/minの一定条件下で、インゴット送り速度を変化させた場合のウエハ厚さの変化を、ワイヤ走行方向（図5の短冊形状の長手方向）に沿って測定した結果を示す。インゴット送り速度が増加するほど、短冊形状サンプルの厚さおよび厚さむら（厚さの最大値と最小値の差）は大きくなる。ワイヤを巻きかけたローラ（グループローラと言う）の溝間隔は1.280mm、使用したワイヤ径は $\phi 0.177$ mmと一定であるため、切断したサンプルの厚さ変化は、ワイヤに付着したスラリ層厚さの変化と考えてよい。なお、サンプルの厚さむらのもう一つの原因は、前述した切断面に垂直な方向へのワイヤ変位 δ_x が隣り合うワイヤ同士で互いにばらばらに変位するためであるが、これについては3.4節で言及する。

図9(a)は $U = 500$ m/minの一定条件下で、インゴット送り速度 V が0.083mm/minと0.250mm/minの場合のワイヤ両側

Fig. 8 Sample thickness change vs. work feed rate (V) Fig. 10 Sample thickness change vs. wire running speed (U) Fig. 9 Slurry layer thickness changes by (a) work feed rate (V), and (b) wire running speed (U)

面のスラリ層厚さ変化を模式的に示したものである。砥粒の平均粒径 $20 \mu\text{m}$ を 1 層として計算すると、 $V = 0.083 \text{ mm/min}$ の場合にはワイヤ入口側で 2.9 層分あったスラリ層が、ワイヤ抜け側では 2.1 層に減少している。スラリ層厚さはインゴット送り速度とともに徐々に減少し、 $V = 0.208 \text{ mm/min}$ ではワイヤ抜け側で 1.3 層まで低下した。 $V = 0.250 \text{ mm/min}$ ではワイヤ抜け側の直前でスラリ層が枯渇し、砥粒による正常な切断が行われず、サンプルの厚さむらは、 $V = 0.208 \text{ mm/min}$ の場合の $25 \mu\text{m}$ から $75 \mu\text{m}$ に、表面粗さ R_a は同じく約 $15 \mu\text{m}$ から $60 \mu\text{m}$ に急激に悪化した。このときの切断代の増加は、ワイヤがインゴットと直接接触する箇所が生じて、ワイヤ自体の振動が大きくなったためであると推測される。これらの急激な悪化は、スラリ層の厚さが 1.0 層を下回る切断条件をしきい値として起こることが分かる。

同様に、 $V = 0.200 \text{ mm/min}$ の一定条件下でワイヤ走行速度を変化させた場合のウエハとスラリ層厚さの変化を図 9(b) および図 10 に示す。この場合にはワイヤ走行速度が増加するほど、サンプルの厚さおよび厚さむらは小さくなる。また、 $U = 500 \text{ m/min}$ のときには、ワイヤ入口側で 2.6 層分あったワイヤ両側面のスラリ層は、抜け側では 1.7 層に減少している。一方、ワイヤ走行速度を $U = 1000 \text{ m/min}$ に増加することによって、スラリ層の厚さはワイヤ入口で 2.9 層、抜け側で 2.4 層と、インゴットの奥部まで均一になっている。

Fig. 11 Schematic diagram for the slurry thickness analysis

3.3 スラリ層厚さの解析

以下、スラリ層厚さの変化を流体力学の視点からもう少し一般化してみる。前節の短冊状サンプルの厚さをくさび形状と近似して、ワイヤに付着するスラリ層の厚さを図 11 に示した模式図で表す。すなわち、速度 U で z 方向に走行するワイヤと、これに対して傾斜をもつインゴット（固定壁）からなる 2 次元モデルを考える。

インゴットとワイヤ側面との距離（スラリ層の厚さ） h は

$$h = h_1 - \frac{h_1 - h_2}{D} z \quad (0 \leq z \leq D) \quad (5)$$

但し、 h_1 : ワイヤ入口側のスラリ層厚さ

h_2 : ワイヤ抜け側のスラリ層厚さ

D : インゴットの直径

で表される。ここで 2 次元モデルのナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu \frac{d^2 u}{dy^2} \quad (6)$$

但し、 p : スラリの圧力

u : インゴットとワイヤ側面間のスラリの流速分布

μ : スラリの粘度

を次の境界条件、すなわち

- ① ワイヤ表面 $y = 0$ のスラリ流速は、ワイヤ走行速度 U に等しい。 ($u = U$)
- ② インゴット表面 $y = h$ のスラリ流速は零。 ($u = 0$)
- ③ ワイヤ入口側、抜け側 $h = h_1, h_2$ における圧力は大気圧 p_0 に等しい。 ($p = p_0$)

Fig.12 Schematic diagram of slurry inner pressure ($p-p_0$)Table 2 Change of $f(U)$ vs. wire running speed U

U m/min	h_2 μm	$m = h_1/h_2$	$f(U)$
500	32.1	1.63	12.0
625	36.7	1.46	13.1
750	40.9	1.34	13.4
875	45.2	1.25	12.9
1000	48.5	1.20	12.6

の下で解くと

$$p-p_0 = \frac{6\mu DU}{h_1^2-h_2^2} \frac{(h_1-h)(h-h_2)}{h^2} \quad (7)$$

となる。式 (7) はスラリの内圧分布を表し、図 12 にこの概略を示す。なお、この解析ではワイヤ入口側と抜け側でスラリ中の砥粒濃度は変化せず、これに伴うスラリ粘度 μ の変化はないものと仮定している。砥粒濃度が変化する状況として一番可能性があるのは、切断中にワイヤ溝の中でスラリから砥粒が分離してウエハとウエハの間に徐々に堆積してしまうことである。このときには砥粒濃度は実質的に下がり、濃度変化 1wt%あたりスラリ粘度は約 2~3%減少する⁹⁾。しかし実際には、このような砥粒の分離現象は、よほど分散性に劣るクーラントを使用しているスラリを調べた場合以外には経験がなく、通常使用しているスラリでは、ワイヤ入口側と抜け側で粘度は一定と見なし、今回の解析には差し支えないと考えられる。

ここでインゴットとワイヤとの反力を W (図 12 を積分したもの)、ワイヤ入口側と抜け側のスラリ層厚さの比を $m = h_1/h_2$ とすると

$$\begin{aligned} W &= \int_0^D (p - p_0) dz \\ &= \frac{6\mu D^2}{h_2^2} \frac{U \{ \ln m - 2(m-1)/(m+1) \}}{(m-1)^2} \\ &= \frac{6\mu D^2}{h_2^2} f(U) \end{aligned} \quad (8)$$

となる。 m は U とともに変化するため、式 (8) 右辺の後半を開数 $f(U)$ で表し、前節の実験結果を代入すると、表 2 に示すようにほぼ一定値と見なせることが分かった。

ここまではインゴット送り方向に対してワイヤ両側面位置のスラリ層を考えてきた。ここで、インゴット送り方向に対してワイヤ両側面のスラリ層の内圧、およびワイヤ正面のスラリ層の内圧をそれぞれ考える (図 1 の右図参照)。もし両者に差があると、圧力の高い側のスラリは圧力の低い側へ移動し、瞬時にその側のスラリ層が枯渇してしまう。現実には通常の切断において、そのような現象は生じていないことから両者のスラリ内圧は等しいと考えてよい。そこで、式 (8) においてワイヤ側面方向への反力 W (x 方向へ向く) の代わりに前節で検証した

Fig.13 $U^{1/2}$ vs. slurry layer thickness (h_2) Fig.14 $(1/V)^{1/2}$ vs. slurry layer thickness (h_2)

Fig.15 Programmed work feed rate before and after modification

式 (1) の切断抵抗 P (ワイヤの正面方向へ向く) を代入してワイヤ抜け側のスラリ層厚さ h_2 について整理すると次式 (9) が得られる。

$$h_2 = k(\mu U/V)^{1/2} \quad (k \text{ は任意定数}) \quad (9)$$

図 13 および図 14 は、ワイヤ抜け側のスラリ層厚さ h_2 をワイヤ走行速度 U の平方根、およびインゴット送り速度 V の逆数の平方根に対してそれぞれプロットしたものである。図中の●印は h_2 の実測値を、実線は原点を通るように引いた回帰線である。これらの結果から h_2 は式 (9) で近似できることが検証された。スラリ層厚さは従来、使用する砥粒径の 1.5 倍と定説的に信じられてきたが、式 (9) からこれはスラリ粘度、ワイヤ走行速度、およびインゴット送り速度によって変化することが分かった。

3.4 ワイヤ走行速度およびインゴット送り速度の最適化

前章の結果を応用して $\phi 400\text{mm}$ アズカット・ウエハの品質改善を行った。ワイヤを往復方向に反転して走行させる通常の切断方式において、ワイヤ平均走行速度を従来標準の 500m/min から新たに 850m/min (最大速度は 1000m/min) に 70%増加した。また、インゴット送り速度は一般に切断負荷ができるだけ広い範囲内で一定となるように、インゴットの切断弦長に反比例する曲線でプログラムされている。本実験では図

Table 3 As-cut wafer qualities with a high wire running speed and the modified work feed rate curve

Wire running speed (average) U		500m/min	850m/min
Thickness variation (GBIR)	$\bar{x}$	40 μm	19 μm
	σ	6 μm	4 μm
Warp	$\bar{x}$	40 μm	21 μm
	σ	12 μm	4 μm

Fig. 16 Cross-sectional wafer thickness profiles before and after optimization

15に示すように、この曲線に切断開始点から終了点に向かって減少するような傾斜を付けることでスラリ層厚さを徐々に増加させ、切断中の砥粒の微破砕による切断代の減少分 約 10 μm を補正した。

切断結果を表 3 および図 16 に示す。図 16 はインゴット送り方向およびワイヤ走行方向の厚さ断面図である。ウエハの厚さむら (GBIR)、反り (Warp) とも、従来の約 1/2 の大きさに改善した。反りはワイヤ走行速度を増加することで切断抵抗が減少し、ワイヤに作用する切断面に垂直な方向への力が軽減したことにより改善したと考えられる。インゴット送り方向の厚さむらの改善には、同様の理由で、隣り合うワイヤ同士で互いにばらばらに変位する、切断面に垂直な方向へのワイヤ変位 δ_x を減少させた効果と、インゴットの送り速度の傾斜制御によって砥粒の微破砕による切断代の減少を補正した効果が寄与している。また、ワイヤ走行方向の厚さむらは、スラリ層の厚

さがインゴットの奥部まで均一になったことにより、改善したと考えられる。

4. 結 言

$\phi 400\text{mm}$ インゴットのマルチ・ワイヤソー切断において、ワイヤ走行速度およびインゴット送り速度が切断抵抗とスラリ層厚さに与える効果を明らかにし、さらにこれを利用して $\phi 400\text{mm}$ アズカット・ウエハの品質を改善した。

- (1) インゴット切断中のワイヤたわみをリアルタイムで測定できる渦電流式センサを実用化した。実際の切断抵抗 P を圧電式ロードセルで測定し、ワイヤたわみ δ_y との比例関係 $P \propto \delta_y$ を確認した。
- (2) ワイヤ方向切断方式で、ワイヤ走行速度 U およびインゴット送り速度 V をそれぞれ 0.083~0.250mm/min、500~1000m/min の範囲で段階的に変化させてそのときのワイヤたわみ δ_y を測定することで、 $\delta_y \propto V/U$ を $\phi 400\text{mm}$ インゴットに対して検証した。
- (3) インゴットとワイヤ間のスラリ層厚さ h_2 はナビエ・ストークス方程式から導かれた関係式 $h_2 \propto (\mu U/V)^{1/2}$ で近似される。またこのスラリ層の厚さが砥粒層 1 層分を下回ると、スラリはワイヤの抜け側まで到達せず、ウエハ品質は急激に悪化する。
- (4) ワイヤ往復切断方式で、ワイヤ平均走行速度を従来標準の 500m/min から新たに 850m/min に増加して $\phi 400\text{mm}$ インゴットを切断した。これにより、ウエハの厚さむらと反りを従来の約 1/2 の大きさに改善した。

参 考 文 献

- 1) H. Oishi, K. Asakawa and J. Matsuzaki : Design concept of multiwire saw for 400mm-diameter silicon slicing, Proc. 1998 ASPE Spring Topical Meeting, (1998) 109.
- 2) 大石 弘, 浅川慶一郎, 松崎順一 : $\phi 400\text{mm}$ シリコン切断用マルチ・ワイヤソーの設計コンセプト, 1999 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1999) 672.
- 3) 大石 弘, 浅川慶一郎, 松崎順一, 芦田昭夫 : マルチ・ワイヤソー切断用水溶性クーラント流動特性の実験によるシミュレーション, 1999 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1999) 598.
- 4) M. Fujisawa et al. : Precision sawing with wire, Ann. CIRP, 32 (1983) 87.
- 5) H. Oishi, K. Asakawa and J. Matsuzaki : Qualities of 400mm-diameter as-sliced wafers and quality changes through wafer shaping process, Precision science and technology for perfect surfaces, JSPE, Tokyo, (1999) 393.
- 6) 石川憲一, 諏訪部 仁, 松川孝史 : マルチワイヤソーの加工特性に関する研究 (最適砥粒濃度に関する検討), 1999 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1999) 675.