Al₂O₃-TiC 複合材切断のための高能率薄刃砥石の作製

足立卓也・松丸幸司・石崎幸三

長岡技術科学大学機械系, 940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1

Fabrication of Highly Efficient Dicing Blade for Cutting Al₂O₃-TiC Composite

Takuya ADACHI, Koji MATSUMARU and Kozo ISHIZAKI

Nagaoka University of Technology (Nagaoka Gijutsu-Kagaku Daigaku), 1603-1, Kamitomioka, Nagaoka-shi, Niigata 940-2188

Highly efficient dicing blades with 28 vol% porosity were fabricated by using a doctor blade casting method and pulsed electric current sintering (PECS). WC and W₂C were formed between diamond grains and tungsten matrix materials during a sintering and enhanced the bonding strength between diamond grains and the matrix materials. Fabricated dicing blades and commercial dicing blades which were 0.09 mm in thickness, were evaluated by a constant feeding force dicing machine under 3.0 N constant feeding force. Al₂O₃-TiC composites which had 1.2 mm in thickness were used as a cutting sample. Speeds of fabricated dicing blade and commercial dicing blade were 6.2 mm/s and 2.9 mm/s at 750 mm of cutting length, respectively. Number of diamonds on surfaces of the fabricated dicing blades was kept constant before and after dicing tests, however, that on the commercial dicing blades decreased to half. Specific grinding energy for the fabricated dicing blades and the commercial ones were 133 GJ/m³ and 213 GJ/m³, respectively. Therefore, efficient dicing blade was produced by introducing pores and increasing bonding strength between diamond grains and matrix.

[Received September 28, 2005; Accepted February 16, 2006]

Key-words: Porous material, Tungsten, Diamond, Al₂O₃-TiC, Pulsed electric current sintering method (PECS), Cutting ability, Specific grinding energy

1. 緒 言

Al₂O₃-TiC セラミックス (AITiC) は、ハードディスクドライブ (HDD) のデータを読み書きする素子を搭載しているスライダ (SLD) の基板材料として用いられている。HDD の需要は、それまで急拡大が続けていたパソコン (PC) 市場の伸び悩みなどで2000年頃には需要安定期に入ると予想されていた。しかしながら2005年にはデジタル家電や携帯機器への搭載などの需要に後押しされて、HDD 総出荷台数は年3億台 (内 PC 用: 2億6千万台, その他: 4千万台) を超えると予測されている¹⁾。近年、デスクトップ型やサーバー PC 用途以外では特に高密度、小型化の要求により SLD の外形サイズは、Pico-SLD (縦1.25 mm, 横1.0 mm, 厚さ0.3 mm, 重さ1.6 mg) から Femto-SLD (縦1 mm, 幅0.7 mm, 厚さ0.23 mm, 重さ0.6 mg) へ縮小化されている¹⁾。それに伴いウエハーから SLD を切り出す工程に使用されている切断砥石の厚さも大幅に薄くなり、今後、更なる SLD の縮小化やコストの削減要求も強まると予測されている¹⁾。そのため、切断工程に使用される切断砥石の薄刃化、高能率化、低コスト化という観点での高性能化は必要不可欠なものとなっている。

それらの要求に対し、Sawada や Kumamoto は砥石母材からの砥粒突き出し量を多くすることで加工能率を高くし、エッジチップングを抑制した薄刃切断砥石の報告を行っている^{2),3)}。砥粒突き出し量を多くするためには砥粒保持力を高めなくてはならないが、その詳細については報告されていない。Onishi は砥粒保持力を高めるために、ダイヤモンド砥粒と母材を化学的に反応させ、更に、母材を多孔質化することで砥粒保持に寄与しない母材は速やかに除去できる高能率研削砥石を開発し、ダイヤモンド砥粒とタングステン (W) 粉末母材との界面には、W の安定な炭化物 (WC 又は W₂C) が生成していることを報告している⁴⁾。しかしながら、この高性能砥石を薄刃切断砥石へ

と応用するには、薄刃という特殊な形状を厚さ精度±5 μm の高い精度で実現する必要があった。本研究では、ドクターブレード法を予備成形体の成形方法に適用し、ワイヤー放電加工を使用することにより薄刃切断砥石形状への成形を試みた。作製した薄刃切断砥石は定荷重送切断試験を用いて市販の薄刃切断砥石と比較評価を行った。定荷重送切断試験は切断砥石に一定荷重で被加工物を押し当て切断加工を行う加工方法であるため、切れ味のいい砥石は加工速さが速くなり、切断性能を定量的に判断できる利点がある。また、薄刃切断砥石先端表面に存在する砥粒数を切断加工実験前後で調べ、切断加工による砥粒の脱落を評価した。

2. 実験方法

2.1 気孔を有した薄刃砥石の作製

タングステン (W) は Onishi らの報告にもあるとおり、ダイヤモンドと反応し、界面に高強度な炭化物を生成する^{4)~8)}。また、1 μm 以下の微粉末も容易に入手可能であり、熱膨張係数も $4.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ とダイヤモンドの $0.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ と近い⁹⁾。更に、高い熱伝導率178 W/mK⁹⁾は加工中の熱を発散させるのに適している。

したがって、W を砥石母材として適用することにした。表1に本研究で用いた原料粉末及び各種助剤の性状を示す。W の焼結温度を低く抑えるために、コバルト (Co) を焼結助剤として添加した^{10),11)}。

バインダー (Poly Vinyl Butyral) 2.7 g と可塑剤 (Di-Butyl Phthalate) 2.2 g をエタノール19.9 g に溶解し、次に55.1 g の99 mass% W-1 mass% Co 混合粉末を加え、ボールミル¹²⁾にて1 d の混合を行った。その後、10 g の平均粒径10~20 μm のダイヤモンド砥粒を加え、ハンドミキサーにて5 min の混合を行いスラリーを作製した。薄刃砥石の形状を高精度に実現するため

Table 1. Characteristics of Raw Materials as Received

Nomenclature	Particle size/ μm	Purity/%	Type, Producer
Diamond	10-20	—	Genesis, Matsumoto Yushi-Seiyaku Co., Ltd
W	0.6	99.9	Kojundo Chemical Lab Co., Ltd.
Co	0.02	99.7	Kojundo Chemical Lab Co., Ltd.
Ethanol	—	99.9	
Binder (Poly Vinyl Butyral)	—	99.8	BL-S, Sekisui Chemical Co., Ltd.
Plastisizer (Di-Butyl Phthalate)	—	98.0	Nacalai Tesque INC.

Fig. 1. Illustration of constant feeding force cutting system. Linear slider, which enables to apply constant force to cut sample, was installed on the worktable of commercial dicing machine. A dynamometer was placed on the linear slider. 75 mm length AlTiC wafer was on sample holder.

に、ドクターブレード法を用い成形を行った。キャリアフィルム上に厚さ約80 μm の紙状成形体を得た後、この成形体の下面同士を貼り合わせ、成形体上面が裏表両面に現れた薄刃砥石予備成形体を作製した。予備成形体の焼結にはパルス通電焼結法 (PECS 法) を用いた。真空中で、焼結温度は1250°C、単軸加圧力は10 MPa、保持時間は10 min とした。PECS 法にて焼結を行うことで、1250°Cまでの昇温時間が約15 min と著しく短くできる。昇温中のダイヤモンド砥粒の熱損傷を最小限に抑えることができる。焼結後、ワイヤー放電加工にて砥石の外形と内径の加工を行い、外径56.5 mm、内径40 mm、厚さ0.09 $\pm$ 0.005 mm、の薄刃砥石形状を得た。

2.2 定荷重送切試験

薄刃切断機 (ダイシングマシン A-WD2500b/c, Tokyo Seimitsu Co., Ltd.) に、リニアスライダ (2RSR15W2M, THK Co., Ltd.) を取り付け、その上に研削抵抗測定器を取り付けた。研削抵抗測定器は図1中の垂直方向抵抗、 F_z と水平方向抵抗、 F_x が測定可能であり、接線抵抗、 F_t (薄刃切断砥石回転方向) と法線抵抗、 F_n (薄刃切断砥石半径方向) は次式を用い計算した。

$$F_n = F_z \cdot \cos \theta + F_x \cdot \sin \theta \quad (1)$$

$$F_t = F_x \cdot \cos \theta - F_z \cdot \sin \theta \quad (2)$$

ここで、 θ は薄刃切断砥石と被削材が接触している面の中心と薄刃切断砥石回転中心を結んだ線が垂直線となす角度である。被削材として63% Al_2O_3 、37% TiC の複合材 (AlTiC) を用いた。被削材は直径101.6 mm、厚さ1.2 mm のウェハーから切断加工

Fig. 2. Illustration of sample holder. The sample holder has grooves, which enables the dicing blades cut the sample without contacting to sample holder.

Fig. 3. Schematic illustrations of LSM analysis. Number of grain on the surfaces of dicing blades was estimated by observing 8 points around dicing blade.

長さが75 mm になるようにあらかじめ端面を切り取った。被削材を支持する治具は図2に示すように、長さ80 mm、幅50 mm、高さ4 mm のジルコニアセラミックスに、幅1 mm、深さ2 mm の溝加工を施したものを使用した。この治具を使用することで切断加工中に切断砥石が被削材以外のものと接触することを防ぐことができる。研削抵抗測定器は温度に対しても非常に敏感なため、本実験では研削液を流し、研削抵抗測定器の温度が一定 (約21°C) となった状態で加工実験を開始した。各薄刃切断砥石は、加工実験前に #600 (平均粒径28 μm) のアルミナ砥粒砥石を切り込み深さ1.0 mm、総加工距離240 mm の加工を行うことでダイヤモンド砥粒の目立てを行った。切断性能評価として、3.0 N の一定荷重で10ライン、計750 mm の切断加工試験を行った。切断試験中、1ラインを切断するのに要する時間 t 、 F_x 及び F_z を測定した。

2.3 薄刃切断砥石先端表面評価

薄刃切断砥石先端表面の砥粒の数を共焦点レーザー顕微鏡を用いて測定した。共焦点レーザー顕微鏡は被測定物の任意の高さでの断面図を測定できる利点がある。図3にその概要図を示す。各薄刃切断砥石に対し、砥石全周の8個所の測定を行った。各観察位置において切断砥石表面上空から表面に向かって測定位置 (深さ Z) を変化させ、初めて断面図が現れる測定位置を $Z=0$ と定義した。各測定位置における砥粒数を用いて、砥石表面の砥粒脱落を評価した。

Table 2. Characteristics of Fabricated Dicing Blade, WCo and Commercial Dicing Blade, CM. Grain Size, G_s , Volume% of Pore, V_p , Volume% of Grain, V_g and Volume% of Matrix Material, V_b

Nomenclature	Bond	Grain mesh No	$G_s/\mu m$	$V_p/\%$	$V_g/\%$	$V_b/\%$	Blade Thickness / μm
WCo	W-Co*	#800	10-20	28	50	22	85-90
CM	Ni**	#800	10-20	0	50	50	80 (85)

*10.6 μm Tungsten, 1%-0.02 μm Cobalt
**Electro plated diamond wheel

Fig. 4. Fractured surfaces of (a) fabricated blade, WCo and (b) the commercial blade, CM. There are gaps between diamond grains and matrix materials on the CM blade.

Fig. 5. Result of XRD analysis of fabricated WCo blade. WC, W₂C and Co₃W₉C₄ were detected as main peak. Degradation of diamond to graphite was not detected.

3. 実験結果と考察

3.1 作製した薄刃切断砥石と比較用市販切断砥石の性状

表2に作製した薄刃切断砥石(WCo)とAlTiC切断用として市販されている比較用切断砥石(CM)の砥粒サイズ G_s , 気孔率 V_p , ボンド率 V_b , 砥粒率 V_g , と砥石厚さを示す. WCo砥石は約28%の気孔を有している.

3.2 破断面観察

図4に(a)WCoと(b)CMの破断面電子顕微鏡写真, 図5にX線回折(XRD)結果を示す. WCoの破断面はダイヤモンド砥粒が多孔質の母材に包まれており, 市販砥石の砥粒保持形態とは異なっていることが分かる. XRD結果より, 砥石の主な成分はWC及びW₂Cとなっており, この結果はOnishiの示したダイヤモンド砥粒とW母材の界面観察結果⁴⁾と一致している. したがって, 作製した砥石のダイヤモンド砥粒とWの界面は, Wの炭化物であるWC又はW₂Cであり, ダイヤモンド砥粒が母材と化学反応により結合され, 保持されていると考えられる. また, XRDの結果からは, ダイヤモンド砥粒の黒鉛化は確認できなかった. 一方, CMの破断面はダイヤモンド砥粒と母材の間に数 μm の隙間ができていて個所が目立つ. これは, 破断面観察のために砥石を破壊した際, 母材が塑性変形し

Fig. 6. Cutting speed, S vs cutting length, L under 3.0 N constant feeding force. The fabricated dicing blades show about 2 times faster cutting speed than the commercial dicing blades.

Fig. 7. Number of grain at optional depth, Z . Number of grain of WCo was about 20 at $Z=15 \mu m$ before and after cutting test, however, the number of grain of CM was 27 before cutting and 14 after cutting test.

てできた隙間であると考えられるが, 隙間が容易にできるということは, すなわち, ダイヤモンド砥粒と母材の間には接合力がないことを示す.

3.3 切断試験結果

図6に3.0 Nの一定荷重下での切断距離に対する切断速さの変化を示す. 切断幅は両ブレード共に0.09 mmであった. 切断速さは, WCoは平均6.2 mm/s, CMは2.9 mm/sと, WCoがCMに比べて約2倍の切断速さを示した. 切断速さは切断距離が長くなるにつれて低下し, 10ライン(750 mm)の切断長さでWCoは6.8 mm/sから6.0 mm/s, CMは4.3 mm/sから2.3 mm/sまで低下した. WCoに比べてCMでは最初の1ライン目と2ライン目の速さ変化が激しい.

図7に薄刃砥石先端表面の砥粒先端からの深さ Z における砥粒数を示す. WCoは砥粒数がCMに比べてなだらかに増加しており, 切断加工実験後も砥粒数の変化はほぼない. WCoの砥粒数が Z に対してなだらかに増加するのは, 母材に気孔が存在しているためであり, WCoは砥粒が脱落してもすぐに次の砥粒が出現する自生発刃作用を備えていると考えられる. 一方, CMは $Z=15 \mu m$ において, 切断加工実験前はWCoに比べ砥粒数が多いにもかかわらず, 切断加工実験後は砥粒数が少ない. これは, 切断加工実験中に砥粒が脱落したことを示しており, 自生発刃作用もないことを示している.

Fig. 8. Normal force, F_n and tangential force, F_t of WCo and CM blade. F_n of WCo is almost same as CM blade, however, F_t of WCo is larger, 1.5 N than that of CM, 0.5–1.5 N.

Fig. 9. Grinding force ratio, F_t/F_n vs cutting length for WCo blades and CM blades.

図6のCMの切断速さの変化は、この砥粒脱落が原因である。

図8、図9は法線抵抗 F_n と接線抵抗 F_t 及びそれらの比、 F_t/F_n である。 F_n はどちらの薄刃切断砥石もほぼ3.0 Nを示しているのに対して、 F_t についてはWCoで1.5 N、CMで0.5~1.5 Nとなっていた。図1で示したように、 F_n は薄刃切断砥石の周方向に対して垂直方向の力であるから、砥石に対する材料の押し付け力、 F_t は周方向の力であるから、引っかく力とみなすことができる。同じ押し付け力に対して引っかく力が大きい方が、より多くの被削材を除去していることになる。

WCoの F_t/F_n は平均0.46、CMは平均0.34とWCoはCMに比べて高い値を示している。WCoは砥粒の母材による保持力が高いために、引っかく力も強いと考えられる。また F_t/F_n は、WCoではほぼ一定の値を示しているのに対してCMでは不安定である。 F_t/F_n が不安定であることは、砥石が被削材を引っかく力が不安定であることを示し、その原因は、図7からも分かるように、砥石表面のダイヤモンド砥粒の脱落が激しいためである。

図10にそれぞれの砥石で加工を行ったときの比研削エネルギー、 SGE の値を示す。 SGE は次式にて求めた⁵⁾。

$$SGE = (F_t \cdot S) \cdot V_r^{-1} \quad (3)$$

ここで、 F_t は接線抵抗、 V_r は体積除去速さ、 S は薄刃砥石外周の周速度 ($60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) である。体積除去速さは単位時間当たり

Fig. 10. Specific grinding energy (SGE) vs cutting length. Fabricated dicing blade shows 133 GJm^{-3} in average, which indicates that effective cutting was achieved than CM dicing blade.

Table 3. Specific Grinding Energy of Various Dicing Blades for Cutting $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$

Matrix material – Cutting condition	Turning velocity/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	θ		F_t/F_n	Removal rate/ $\text{mm}^3\cdot\text{s}^{-1}$	Specific Grinding Energy/ $\text{GJ}\cdot\text{mm}^{-3}$	Diamond Grain size
WCo – 3N constant force	60	21°	Up-cut	1.48	0.67	133	#800
CM – 3N constant force	60	21°	Up-cut	1.1	0.31	213	#800
Metal ¹⁴⁾	43	20°	Down-cut	3.58	0.28	550	#500
Metal with Co additive – cutting condition1 ¹⁵⁾	78.5	14°	Down-cut	1.77	0.67	207	#800
Metal with Co additive – cutting condition2 ¹⁵⁾	78.5	14°	Down-cut	3.23	1.3	195	#800
Metal with Co additive – cutting condition3 ¹⁵⁾	78.5	14°	Down-cut	3.94	2	155	#800
Electro plate – cutting condition1 ¹⁶⁾	25	18°	Down-cut	8.85	0.6	369	8-20 μm
Electro plate – cutting condition2 ¹⁶⁾	25	18°	Down-cut	5.85	0.6	244	8-20 μm
Electro plate – cutting condition3 ¹⁶⁾	25	18°	Down-cut	5.85	0.6	244	8-20 μm

に除去された被削材の体積である。

SGE はダイヤモンド砥粒と被削材が接触したときの材料固有の値となるため、理想的な切断が行われたときの砥石の研削性や材料の物性評価にも用いることができる¹³⁾。WCoの SGE は平均 133 GJ/m^3 、CMの SGE は平均 213 GJ/m^3 であった。 SGE は単位体積当たりの被削材の除去エネルギーであるので、 SGE の値が小さいことは、効率的に材料を除去していることを示しており、WCoはCMに比べ高効率な砥石であることが分かる。

また、CM砥石の SGE の値がばらつく原因は、砥粒の脱落により F_t がばらつくためである。

表3は $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 材を被削材とした各種切断砥石の SGE を本実験で解析した方法と同様の手法を用いて計算したものである。すべて垂直方向と水平方向の抵抗値が報告されているので、その値から砥石に対しての接線方向の力、 F_t を算出した。 F_t の算出には砥石が被削材と接触している接触弧の中心位置及び砥石の回転中心を結ぶ線と砥石回転中心線を通る垂線とがなす角 θ が必要である。接触弧の中心位置は砥石の切り込み量と被削材の厚さから算出し、 θ を算出した。体積除去速度はテー

ブルの送り速さと砥石厚さ、被削材の厚さから算出した。

算出した *SGE* は最大 550 GJ/m³ で、砥粒径が #500 (平均粒径 34 μm) と大きいものであった。母材の種類 (材料) は明らかにされていないが、砥石の横ブレについて議論されており¹⁴⁾、この砥石の切断能力に対して過度の送り速さ条件での切断を行っていると考えられる。最も小さい *SGE* を示したものは、コバルト系金属を用いた砥石の高速送り速さ (300 mm/min) の条件で 155 GJ/m³ であるが、報告によると切断幅に約 10 μm のうねりがあり¹⁵⁾、砥石の切断能力を超えた条件での加工であることが分かる。*SGE* が低くなった理由としては、テーブル送り速さを速くしたために研削抵抗に対して大きな体積除去速度が得られた (被削材を破壊しながら切断した) ためと考えられる。その他の砥石や切断条件に対する *SGE* は約 200~350 GJ/m³ を示しており、本実験で作製した WCo 砥石の *SGE*, 133 GJ/m³ は、これらの砥石に対し約 40%~60% 効率的に材料を除去していることを示している。作製した薄刃切断砥石は、砥石破断面の SEM 写真 (図 4) 及び XRD 結果 (図 5) から明らかなように、ダイヤモンド砥粒が母材と化学反応を起こし、安定な炭化物である WC 及び W₂C を生成することで強固な砥粒保持力を有している。

また、母材に気孔を導入することで加工中に容易に砥石母材が除去され、砥石表面に存在する砥粒数を保つことのできる切断砥石である。したがって、母材に強固に保持された砥粒が、加工中、その数を保つことにより、高い研削抵抗比と速い加工速さを維持し、その結果低い *SGE* が得られたと考えられる。

4. 結 論

母材に W, Co を用い、PECS 法にて焼結を行うことで母材とダイヤモンド砥粒が強固に保持された多孔質薄刃切断砥石の作製を行った。

作製した薄刃切断砥石は、定荷重送切断試験において市販薄刃切断砥石に比べて約 2 倍の速い切断速さを示した。また、作製した薄刃切断砥石は砥石表面の砥粒数が加工試験前後で変化しないのに対し、市販薄刃切断砥石は切断加工実験後の砥粒数が半減していた。作製した薄刃切断砥石の F_t/F_n は平均 0.46、市販薄刃切断砥石では平均 0.34 と市販薄刃切断砥石に比べて高い値であった。比研削エネルギーは、133 GJ/m³ と比較用市販薄刃切断砥石の 213 GJ/m³ よりも 40% 低い値を示し、他の薄刃

切断砥石に対しても比研削エネルギーは 40%~60% 低く高能率な薄刃切断砥石であった。以上の結果より、母材に気孔を導入し、砥粒保持力を化学反応を利用して強固にすることにより作製された切断砥石は、高性能な薄刃切断砥石であることが示された。

References

- 1) Horiuchi, Y., "HDD Gyokai no Doko," IDEMA Japan News No. 61, [7, 8] (2004) [in Japanese].
- 2) Sawada, T., *J. JSAT*, Vol. 46, No. 11, pp. 24-26 (2002) [in Japanese].
- 3) Kumamoto, K., *J. JSAT*, Vol. 46, No. 11, pp. 30-32 (2002) [in Japanese].
- 4) Onishi, H., Doctoral Dissertation of Nagaoka Univ. of Tech. (1998) pp. 52-56 [in Japanese].
- 5) Onishi, H., Kondo, Y., Yamamoto, S., Tsukuda, A. and Ishizaki, K., *J. Ceram. Soc. Japan*, Vol. 104, pp. 610-613 (1996) [in Japanese].
- 6) Matsumaru, K., Takata, A. and Ishizaki, K., *J. Ceram. Process. Res.*, Vol. 3 [2], pp. 80-81 (2002).
- 7) Ishizaki, K., Yamamoto, S., Takata, A. and Kondo, Y., Kokai-Tokkyo-Koho, JP 3055084 [in Japanese].
- 8) Ishizaki, K., Yamamoto, S., Takata, A. and Kondo, Y., Kokai-Tokkyo-Koho, JP 3101145 [in Japanese].
- 9) Kubo, R., Nagakura, S., Iguchi, Y. and Ezawa, Y., "Rikagaku-Jiten Dai 4 han," Iwanami-Shoten, Tokyo (1987) [in Japanese].
- 10) Suzuki, H., "Cho Ko Gokin to Shoketsu Koshitsu Zairyo," Maruzen, Tokyo (1986) pp. 22-55 [in Japanese] (ISBN 4-621-03057 C3047).
- 11) Kobayashi, K., Takayanagi, T. and Miwa, K., *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy*, Vol. 40 [1], pp. 62-65 (1993) [in Japanese].
- 12) Kondo, Y., Hashizuka, Y., Nakahara, M., Yokota, K. and Ishizaki, K., *J. Ceram. Soc. Japan*, Vol. 101, pp. 819-823 (1993).
- 13) Takata, A., Doctoral Dissertation of Nagaoka Univ. of Tech. (1998) pp. 108-139 [in Japanese].
- 14) Ohbuchi, Y., Matsuo, T. and Ueda, N., *Annals of the CIRP*, Vol. 48[1], pp. 285-288 (1999).
- 15) Okanishi, Y., Yamadori, K., Ishitori, Y., Inoue, H., Fukunishi, T. and Miyake, M., *JSME, Proceeding of the 1st Manufacturing and Machine Tool Conference*, pp. 169-170 (1999) [in Japanese].
- 16) Oikawa, N., Takahashi, T. and Shimizu, M., *JSPE, Proceeding of Spring Conference*, pp. 877-878 (1988) [in Japanese].