

論文 高流動コンクリートの表面気泡性状に及ぼすモルタルの流動性 および型枠界面の影響

一宮 一夫*1・ 出光 隆*2・ 山崎 竹博*3・ 渡辺 明*4

要旨: 一般に、高流動コンクリートの流動性は、骨材間を占めるサスペンションの降伏値と塑性粘度の2つのレオロジー定数で評価される。本研究では、静止流体中の気泡に作用する力のつり合いから、レオロジー定数と表面気泡性状の関係を理論的に考察した。その実験的裏付けとして、流動性の異なるコンクリートの表面気泡性状を実測し、理論との整合性について検討した。また、型枠表面とコンクリートの界面の濡れ性を接触角で評価し、接触角が表面気泡性状に及ぼす影響についても理論と実験の両面から検討した。

キーワード: 高流動コンクリート, 表面気泡, 流動性, レオロジー定数, 濡れ性

1. はじめに

高流動コンクリートの表面気泡は、スランプフローが大きく流動性の良いものほど少ないことが知られている¹⁾。しかし、最近では各種の分離低減剤や高性能AE減水剤などの混和材料が使用されるようになり、スランプフローが同一でも粗骨材間を占めるモルタル相の流動性は様々である。

コンクリートを粗骨材とモルタルからなる二相材料と考え、モルタルをピンガム流体と仮定するとモルタル相の流動性は、降伏値と塑性粘度の2つのレオロジー定数で表すことができる。表面気泡の発生量は、フレッシュ時のモルタル相の流動性の影響を受けると考えられるが、レオロジー定数との関係についての理論的な考察はほとんど行われていない。

また、型枠表面の濡れ性も表面気泡性状を決定する要因の一つであり、接触角で評価することができる²⁾。接触角が小さいほど表面気泡はコンクリート内部に移動し型枠面と接触する線の長さは短い。このため、表面張力による型

枠との付着力は小さくなり、表面気泡は浮力で離脱しやすくなる。その結果、表面気泡の最大径は小さくなると考えられる。

本研究では、表面気泡に作用する、浮力、流体抵抗、重力、表面張力による型枠面との付着力などの力のつり合いから、気泡の放出に関しての理論的な考察をした。その実験的裏付けとして、コンクリートの流動性や型枠面の濡れ性が異なるコンクリートの表面気泡性状を実測し、理論との整合性について検討した。

なお、理論では水平型枠面に付着した表面気泡を、実験では垂直型枠面に発生した表面気泡を対象とした。表面気泡に作用する力は、厳密には型枠面の角度により異なるが、後述のように、理論と実験結果は比較的良く一致しており、表面気泡の大まかな発生メカニズムを説明できると考えた。

2. モルタルの流動性の影響

2.1 降伏値

静止流体中の気泡を剛体と仮定すると、気泡

*1 大分工業高等専門学校助教授 土木工学科 (正会員)

*2 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科, 博士 (正会員)

*3 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科, 工博 (正会員)

*4 九州共立大学教授 工学部開発学科, 工博 (正会員)

には図-1のように上方向に浮力 F_B 、下方向に重力 F_G と流体抵抗 F_R が作用する。モルタルの密度に比べて空気の密度は極めて小さいことから重力 F_G を無視すると作用力は浮力 F_B と流体抵抗 F_R のみとなり、 $F_B > F_R$ の場合に気泡は上昇する。

気泡が流体中で静止している場合は、浮力 F_B と流体抵抗 F_R は等しく、式(1)が成立する。

$$F_B - F_R = 0 \quad (1)$$

気泡の上昇速度 v は、式(1)を変形すると式(2)で表すことができる。

$$v = \frac{4D^2 \rho_1 g - 21\pi D \tau_y}{72\eta_p} \quad (2)$$

ここに、 D : 気泡の直径 (mm), ρ_1 : 流体の密度 (g/mm^3), g : 重力加速度 (mm/s^2), τ_y : 降伏値 (Pa), η_p : 塑性粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

気泡が上昇するためには式(2)の分子が正であることが条件である。つまり、上昇可能な最小の気泡径は降伏値 τ_y で決まり、式(3)で計算される。

$$D = \frac{21\pi}{4\rho_1 g} \tau_y \quad (3)$$

モルタルの場合は、上式に $\rho_1 = 2.2 \times 10^3 \text{g}/\text{mm}^3$, $g = 9.8 \times 10^3 \text{mm}/\text{s}^2$ を代入すると、浮力のみで上昇可能な気泡径は式(4)で表される。

$$D = 0.765 \tau_y \quad (4)$$

図-2は式(4)の関係を図で表したものである。既往の研究を参考に、高流動コンクリートならびにモルタル相の降伏値 τ_y の範囲も併記した³⁾。筆者らがこれまでに製作した高流動コンクリートの供試体内部の気泡は、大きくても15mm程度で、ほとんどはそれ以下である。図のモルタルの降伏値の範囲は現実の気泡性状を良く反映しており、高流動コンクリート中の気泡の移動現象を検討する場合は、モルタルレベルの降伏値が妥当と考えられる。

以上のことより、モルタルの降伏値 τ_y は気

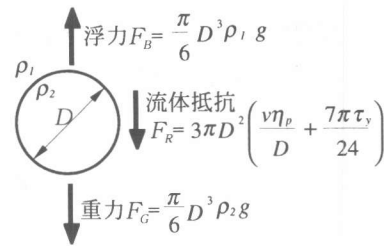


図-1 静止流体中の気泡に作用する力

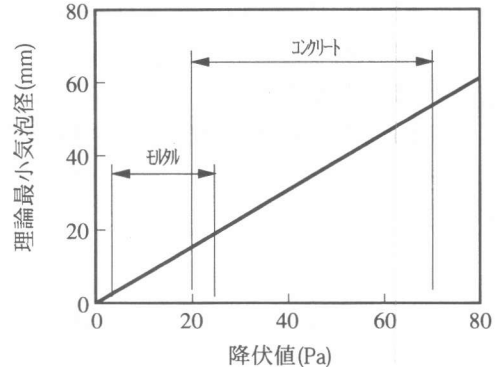


図-2 降伏値ごとの浮力で上昇可能な理論最小気泡径

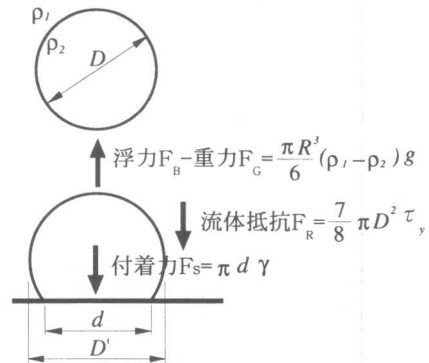


図-3 表面気泡に作用する力と離脱気泡

泡が浮力で上昇する最小の気泡径を決定し、降伏値 τ_y を小さくすることでコンクリート中の気泡は少なくなるといえる。

一方、表面気泡の場合は、表面張力で型枠表面に吸着されており、静止流体中の気泡に作用する力に加え、型枠面との付着力も作用する。図-3は表面気泡に作用する力と浮力で離脱した気泡を表したものである。図のように上方向に働く浮力 F_B に対し下方向には重力 F_G 、流体抵抗 F_R そして表面張力による付着力 F_s が作用する。

前述の静止流体中の気泡と同様に重力の影響を無視すると、 $F_B > F_R + F_S$ の場合に表面気泡は型枠面から離脱し、その後は式 (2) に従ってコンクリート中を上昇する。

前述の表面気泡に関する理論の検証をするために、スランプフロー $S_f=550, 630, 700\text{mm}$ の3水準の供試体を製作し

て表面気泡の発生状況を比較した。コンクリートの降伏値 τ_y は小門らの研究を参考に、式 (5) にスランプフロー S_f を代入して計算した⁴⁾。

$$\tau_y = \frac{15^2 \rho g V^2}{4 \pi^2 S_f^5} \quad (5)$$

ここに、 τ_y :降伏値 (Pa), S_f :スランプフロー (mm), ρ :単位容積質量 (g/mm^3), g :重力加速度 (mm/s^2), V :試験体容積 (mm^3)

計算の結果、スランプフロー $S_f=550, 630, 700\text{mm}$ に対するコンクリートの降伏値 τ_y は、それぞれ $\tau_y=70, 35, 20\text{Pa}$ となった。

使用したコンクリートは、粉体容積の60%を高炉スラグ微粉末で置換した粉体系の高流動コンクリートで、空気量は $2.0 \pm 1.0\%$ とした。スランプフロー S_f は、粗骨材量一定のもとでモルタル相の流動性のみが変化するように高性能減水剤の使用量で調整した。使用材料を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示す。

コンクリートの練混ぜは容量 55 l の水平2軸強制練りミキサを用い、1回の練混ぜ量を35 l とし、骨材と結合材を投入して30秒間のから練りを行った後に水と高性能減水剤を投入して120秒間練り混ぜた。型枠は、内寸法で高さ50cm、奥行き8cm、幅30cmの鋼製のものを使用し、打込みの1時間前に市販の油性離型剤を霧吹きと脱脂綿で丁寧に塗布した。コンクリートの充てんは、型枠の天端の上方50cmの位置から打込み面の中央に90秒間で連続して自由落下させた。

円換算径1mm以上の表面気泡を対象に、表

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント, 比重3.15
高炉スラグ微粉末	ブレン値6000, 比重2.91
細骨材	海砂, 比重2.58, FM2.85, 実積率67.5%
粗骨材	碎石, 最大寸法20mm, 比重2.73, FM7.01, 実積率60.0%
高性能減水剤	ナフタレン系

表-2 コンクリートの配合 (スランプフロー 630mm の場合)

最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)					
					W	C	BS	S	G	SP
20	63±3	2.0±1.0	31.6	51.6	178	236	327	826	819	5.9

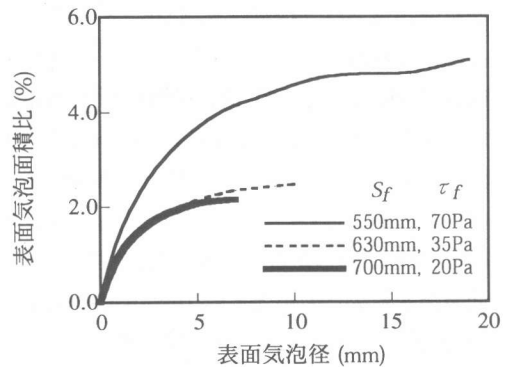


図-4 スランプフローごとの表面気泡面積比

面気泡ごとの面積を画像解析で測定した。画像解析に先立ち、表面気泡のコントラストを明瞭にするために、アセトンで洗浄したコンクリート表面に油性インクを塗布し、表面気泡部に高炉スラグ微粉末を充てんした。その後デジタルカメラで対象面を撮影し、画像をパソコンに取り込んだ。表面気泡性状は、全面積に対する表面気泡の面積比 (以下、表面気泡面積比とする) と表面気泡の最大径 (以下、最大表面気泡径とする) で表示した。

図-4にスランプフローごとの表面気泡面積比を示す。図より、スランプフロー S_f が大きく降伏値 τ_y が小さいほど表面気泡面積比、最大表面気泡径ともに小さく、スランプフローが大きいほど表面気泡は減少する。

一方、理論最大表面気泡径は以下の方法で計算した。まず、モルタルの降伏値 τ_y は、スランプフロー $S_f=630\text{mm}$ のモルタル相の降伏値を

$\tau_y=5.0\text{Pa}$ とし、他のスランプフローの場合はコンクリートの降伏値と同じ比率で算出した。その結果、スランプフロー $S_f=550, 630, 700\text{mm}$ に対し、モルタルの降伏値は $\tau_y=10.0, 5.0, 2.9\text{Pa}$ とした。また、表面気泡の性状は型枠表面の濡れ性の影響を大きく受けるため、理論最大表面気泡径を計算するにあたりコンクリート内部方向の表面気泡形状を知る必要がある。図-5は表面気泡を球の一部が欠けた球欠と仮定し、型枠面との接触角 θ_c ならびに表面気泡の深さ h と径 d の関係を示したものである。この図より、濡れ性が良いほど接触角 θ_c は小さく、深さと高さの比 h/d は大きくなることから、本研究では h/d を測定して表面気泡の接触角 θ_c を推定した。表面気泡の深さ h と径 d は、2mm以上の表面気泡を対象に、レーザー変位計と画像解析を併用して測定した。そして、両者の回帰直線の傾き h/d を計算したところ $h/d=0.44$ であった。表面気泡を球欠とすると、この場合の表面気泡の接触角は $\theta_c=97^\circ$ となるが、簡単のために $\theta_c=90^\circ$ として計算を行った。

図-6はモルタルの降伏値 τ_y から算出した理論最大表面気泡径とコンクリートでの実験結果を比較したものである。両者は良く一致しており、コンクリート内部の気泡同様に、表面気泡性状もモルタルの降伏値で評価が可能である。

2.2 塑性粘度

モルタルの降伏値がコンクリートの表面気泡性状を決定することから、塑性粘度に関する考察もモルタル相を対象にした。

図-7にモルタルの塑性粘度 η_p と式(3)で計算した気泡上昇速度 v との関係を示す。気泡の上昇速度の計算は、スランプフロー $S_f=630, 550\text{mm}$ のモルタル相の降伏値に相当する $\tau_y=5.0\text{Pa}$ と $\tau_y=10.0\text{Pa}$ に対して行った。図より塑性粘度 η_p を小さくすることで気泡上昇速度 v は大きくなり、特にモルタルの塑性粘度に相当する $\eta_p=1\sim 25\text{Pa}\cdot\text{s}$ では塑性粘度の少しの変化で気泡上昇速度 v は大きく相違する。また同一の塑性粘度でも降伏値や気泡径により気泡上昇速

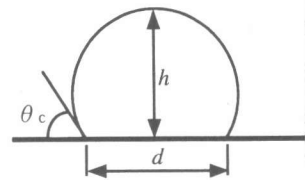


図-5 表面気泡の形態を表すパラメータ

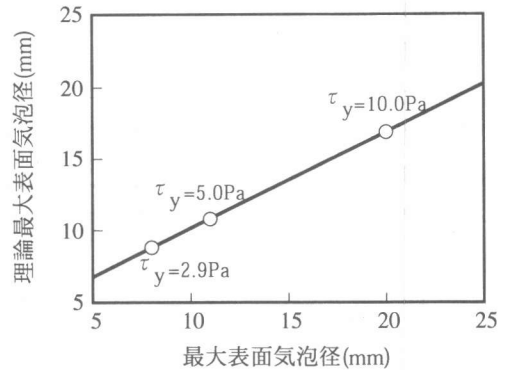


図-6 モルタル相の降伏値より計算した最大表面気泡径の理論値と実験値

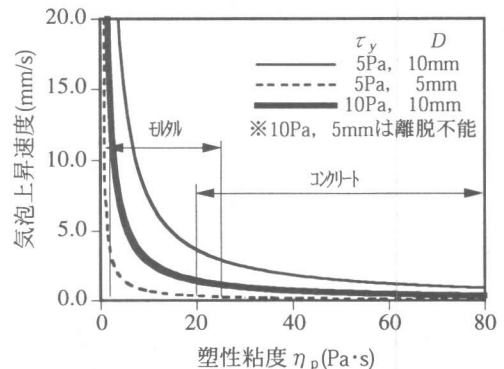


図-7 塑性粘度と気泡上昇速度

度 v は異なる様子がうかがえる。

高流動コンクリートは、容積の30~35%は粗骨材が占め、これが気泡の上昇を阻害するために、実際の気泡の上昇速度は図-7に示すものよりも小さくなる。また気泡上昇速度 v が小さいほど抜け出るまでに長い時間を要し、配合によってはこの間に流動性が低下して気泡の上昇が阻害されるものと思われる。従って、高流動コンクリート中の気泡の量は、モルタル相の粘性だけでなく、粗骨材の存在や気泡が放出されるまでに必要な時間などにより異なることになる。このような、気泡の上昇速度を低下させる

要因の影響を少なくし、気泡が放出されやすくするには、打込み面の上昇速度を気泡上昇速度 v よりも低くするとよいと考えられる。図-8は、工場製品を製造する際の実績を参考に、打込み面の上昇速度ごとの表面気泡面積比を示したものである⁹⁾。図より打込み面の上昇速度が低いほど表面気泡面積比、最大表面気泡径ともに小さく、表面気泡は少ないことがわかる。実際には打込み面の上昇速度が低いと打込み面の乱れが生じにくいなど、打込み面の上昇速度で巻き込み空気量が変わることが予想されるが、この影響を無視して打込み面の上昇速度と最大表面気泡径の関係を表すと図-9のようになり、大きな径の表面気泡ほど打込み面の上昇速度の影響が大きい。

なお、図-7には、既往の研究を参考に高流動コンクリートとそのモルタル相の標準的な塑性粘度も併記した。コンクリートの塑性粘度は $\eta_p = 20 \sim 80 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、モルタル相の塑性粘度は $\eta_p = 1 \sim 25 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ で広範囲にあるが、一般に高流動コンクリートの流動性はスランプフローで管理する場合が多く、自己充てん性と分離抵抗性などの複数の性能を同時に実現するために様々な材料や配合が採用されるためと考えられる。普通コンクリートでは、流動速度といった粘度に起因する性質が重要視されることはなかったが、高流動コンクリートのように粉体量が多かったり、増粘剤の添加されたコンクリートでは、コンクリートの流動速度により施工時間のみでなく表面気泡の発生量も大きく影響される。従って高流動コンクリートでは軟度のみならず粘度も目標とした配合設計を行う必要がある。

3. 型枠面の濡れ性の影響

前述のように型枠面の濡れ性の程度で表面気泡の接触角 θ_c は決まり、濡れ性が良く接触角 θ_c が小さいほど型枠と接する表面気泡の線分は短く、表面張力による付着力 F_s が小さくなる。そのため、離脱に必要な浮力 F_B も小さくなるので離脱後の気泡径も小さくなる。

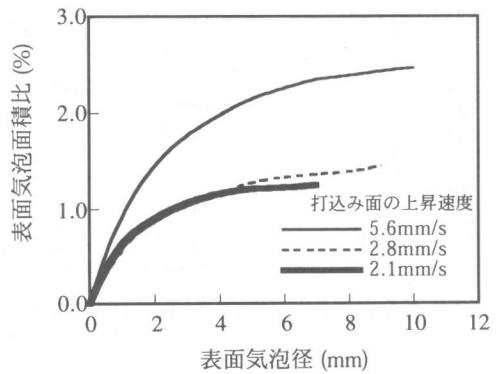


図-8 打込み面の上昇速度ごとの表面気泡面積比

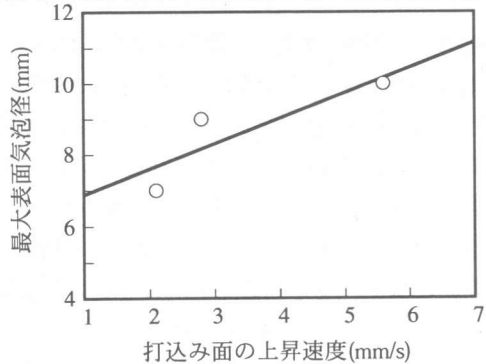


図-9 打込み面の上昇速度と最大表面気泡径

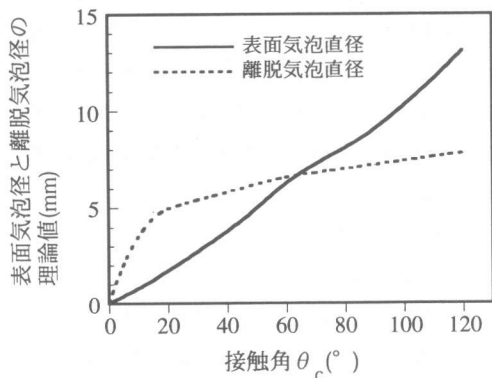


図-10 接触角と理論表面気泡径ならびに理論離脱気泡径

接触角 θ_c を考慮した表面気泡に作用する力のつり合いから、接触角 θ_c ごとの離脱に必要な最小表面気泡径を計算すると図-10のようになる。また、計算結果の妥当性を確認するために、接触角 θ_c の異なる供試体の最大表面気泡径と表面気泡面積比を測定した。接触角 θ_c は、はく離剤の種類を変えて調整した。はく離剤には、主成分がパラフィン系炭化水素の油性はく

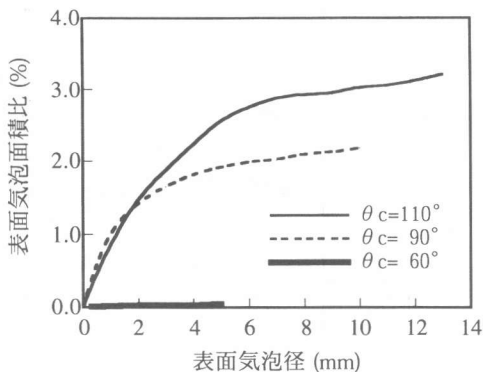


図-11 表面気泡の接触角ごとの表面気泡面積比
 離剤を2種類と水性はく離剤を使用した。表面気泡の接触角 θ_c の測定は、前述のように表面気泡の深さ h と径 d をレーザー変位計と画像解析で測定し、両者の回帰直線の傾き h/d から表面気泡を球欠と仮定し計算により求めた。図-11に表面気泡の接触角 θ_c と表面気泡面積比の関係を示す。図より接触角 θ_c が小さいほど表面気泡面積比、最大表面気泡径ともに小さいことがわかる。最大表面気泡径で図-10の理論値と図-11の実験値を比較すると図-12のようになり両者はほぼ一致した。このことから接触角 θ_c も最大表面気泡径を決定する要因の一つであり、接触角 θ_c を事前を知ることで表面気泡の発生傾向を予測することができるものと考えられる。

4. まとめ

本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) 静止流体中の気泡に作用する力のつり合い条件から、モルタル相のレオロジー定数でコンクリート中の気泡の移動現象を説明できる。
- (2) モルタル相の降伏値は表面気泡の最大径を決定し、降伏値が低いほど気泡は浮力で上昇しやすく残存する表面気泡の最大径は小さくなる。
- (3) モルタル相の塑性粘度は浮力による気泡の上昇速度に影響を及ぼし、塑性粘度が小さいほど気泡上昇速度は速く、表面気泡は少なくなる。また、打込み面の上昇速度を気泡上昇速度

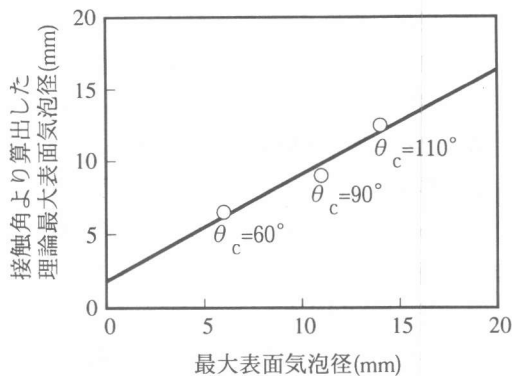


図-12 接触角より算出した最大表面気泡径の理論値と実験値

よりも遅くすると表面気泡は少なくなる。

- (4) 型枠表面の濡れ性が良く型枠面と表面気泡の接触角が小さいほど表面気泡は型枠面から離脱しやすく表面気泡は少ない。また、接触角も降伏値同様に表面気泡の最大径を決定する。

参考文献

- 1) 一宮一夫, 出光 隆, 山崎竹博, 渡辺明: 高流動コンクリートの打設条件が表面気泡特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, pp.61-66, 1997.6
- 2) 一宮一夫, 出光 隆, 山崎竹博, 渡辺明: 高流動コンクリートの表面気泡に及ぼす型枠とコンクリートの界面の影響, 平成11年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. 804-805, 2000.3
- 3) 土木学会: 高流動コンクリートに関する技術の現状と課題, コンクリート技術シリーズ 15, pp.98-99
- 4) 小門 武, 宮川豊章: スランプフロー試験による高流動コンクリートのレオロジー定数評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.113-129, 1999.11
- 5) 長尾 之彦, 竹富 昌之, 遠藤 南志, 渡辺 敬一: 高流動コンクリートを使用したコンクリート製品の表面気泡に関する実験的検討, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, pp.656-657, 1996.9