

白川・緑川河口域の干潟形成に及ぼす潮位・潮流と河川流入の影響

柿木 哲哉*・滝川 清**・山田文彦***

1. はじめに

海底の地形変化は、その外力となる流体運動と底質との相互作用により生じる。従って、底質の移動量を算定し、地形変化の予測と評価を行うためには、潮汐、波浪や河川水流入等に伴う海域の流況を正確に把握し、流体運動との相互作用に基づく底質移動のメカニズムの解明が重要である。

本研究の対象地である有明海の白川・緑川河口一帯には、両河川から大量の土砂が流入し、砂質及び粘土質の広大な干潟が発達する。大潮時には干満の差がおおよそ4 mにも達し、常時、干潟上で浮泥の巻き上げ・沈降が生じ、荒天時には波浪の発達や大量の河川水が流入するなど極めて複雑な流況を呈する。このような干潟海域での地形変化を評価、予測することは極めて難しく、これまで確立された十分な評価手法はない。

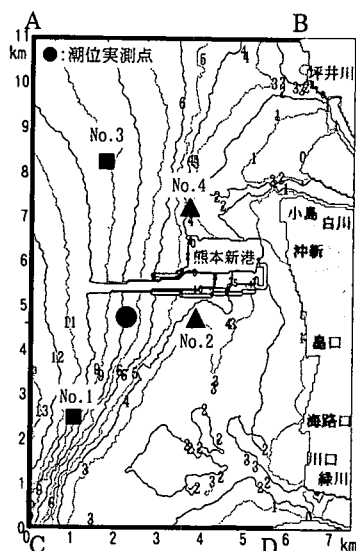
本研究は、この干潟海域での地形変化評価手法の開発、

およびその評価と予測を行うことを目的とし、現地観測と数値解析を行った。このため、現地観測では干潟上の流況と濁度等について調べ、数値解析では干潟上での流況について干潟の水没と干出を再現し、河川流入量を考慮できる潮流と物質拡散の数値解析を行った。また、これに従来の漂砂量の算定公式を用いて地形変化の数値解析を行った。

2. 現地観測

2.1 観測概要

現地観測の対象領域は、図-1 に示す熊本県北部の有明海沿岸部に位置する、白川と緑川の河口付近で、熊本新港の周囲の4地点(No. 1~4)で観測を行った。観測項目は、水温、電気伝導比、塩分、流向、流速、濁度等で、1999年7月8日15:00(長潮)から9日16:00(若潮)の晴天時に自記式流速計を浮吊方式にて海面下1mに係留し、10分毎の流速・水温・電気伝導度を25時間連



图一-1 解析領域

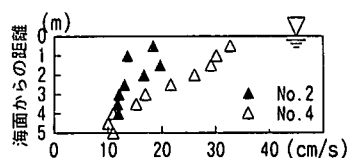


図-2 水平方向流速の鉛直分布

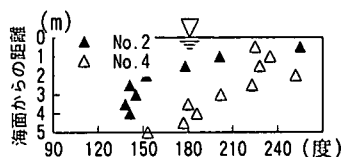
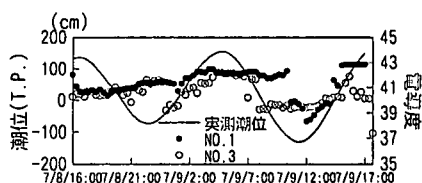


図-3 流向の鉛直分布



図一4 実測潮位と電導度の経時変化

・学生会員 修(工) 熊本大学大学院自然科学研究科
 ・正会員 工 博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科
 ・正会員 博(工) 熊本大学助手 工学部環境システム工学科

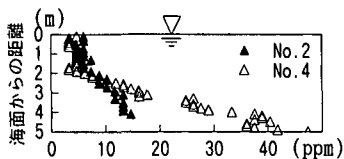


図-5 濁度の鉛直分布

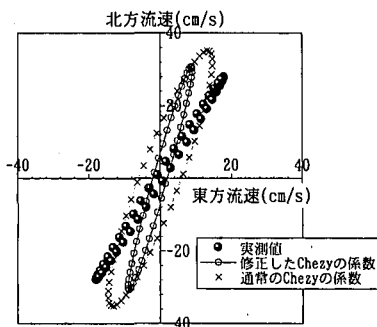


図-6 No. 3 地点における潮流楕円の比較

統観測した。また、濁度と流速の鉛直分布については、7月8日16:00(満潮時)から30分おきに2時間、直読式流速計及び直読式濁度計を観測船からの吊下ろし方式により海面下10 cmから底面付近まで10 cm毎に計測した。

2.2 観測結果及び考察

図-2と図-3は満潮時のNo. 2, No. 4における流速及び流向の鉛直分布である。▲印はNo. 2地点、△印はNo. 4地点を示す。何れの地点も流速は上層の方が下層に比べて大きく、最大で25 cm/s程度の差がある。流向は、真北から時計回りに測った角度で、流れ去る方向を持って定義する。これより、流向も水深方向に異なることがわかる。以上より、干潟のような比較的水深が浅い領域においても、水平方向流速は水深方向に流速、流向が異なり、3次元性を持つことがわかる。

図-4は各観測地点における電導度比の時系列データを表したものである。図中の実線は熊本新港における実測潮位、●印はNo. 1地点、○印はNo. 3地点を示す。この図より、電導度比は満潮時に高く、干潮時に低くなる傾向がある。電導度比は塩分濃度を表す指標であることから、この降下は陸水の流入による海水の塩分の希釈効果と考えられる。このことから、平常時においても河川から5 kmほど離れていても、干潮時には河川流の影響が顕著であることがわかる。図-5は濁度の鉛直分布である。No. 4はNo. 2に比べ底面付近に高濃度域が存在している。これは、河川水の影響のほか底質粒径の相違や海底勾配の影響と考えられる。

3. 数値解析

3.1 潮流及び浮遊物質拡散の数値解析

a) 基礎方程式

潮流と拡散計算は連続の式と運動方程式、及び拡散方程式を水深方向に積分し平均化したものを基礎方程式とした。

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(HU) + \frac{\partial}{\partial y}(HV) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \xi}{\partial x} \\ + \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{HC^2} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \xi}{\partial y} \\ + \frac{gV\sqrt{U^2 + V^2}}{HC^2} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (H\bar{C})}{\partial t} + u \frac{\partial (H\bar{C})}{\partial x} + v \frac{\partial (H\bar{C})}{\partial y} \\ = - \frac{\partial}{\partial x} \left(H \cdot K_H \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H \cdot K_H \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) \\ + P_H - Q_H \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 t は時間、 $H = h + \xi$ は実水深、 U, V は鉛直平均水平方向潮流流速成分、 f はコリオリの係数($=2\omega \sin \phi$, ω :地球の自転速度、 ϕ :代表緯度)、 C はChezyの摩擦係数、 g は重力加速度、 $\bar{C}$ は鉛直平均物質濃度、 K_H は水平流の鉛直分布による移流拡散を含んだ見かけの拡散係数、 P_H, Q_H は鉛直方向に平均化された物質の生成率、消滅率である。Chezyの係数 C はマンニングの粗度係数 n によって次のように表される。

$$C = \frac{1}{n}(h + \xi)^{1/6} \quad (5)$$

佐藤ら(1976)によると、潮流計算においてChezyの係数を式(5)で評価すると、汀線付近で流速を過大評価する傾向があるとしている。そこで汀線付近での流速抵抗を大きくするため、汀線に近い部分でChezyの係数が十分小さくなるように次のような修正をしている。

$$\begin{cases} C = \frac{1}{n}(h + \xi - \alpha)^{1/6} & : h + \xi \geq 1.1(\text{m}) \\ C = \frac{0.683}{n}(h + \xi) & : h + \xi \leq 1.1(\text{m}) \end{cases} \quad (6)$$

n はマンニングの粗度係数、 $\alpha (=1.0(\text{m}))$ は正の定数。

b) 解析領域及び境界条件

解析領域は図-1に示す白川、緑川河口付近の南北方向11 km、東西方向7.5 kmの範囲である。また、実際の現象により近い解析を行うため、それぞれの入力条件・データは極力現地データを使用することとした。潮位の

表-1 潮流および拡散計算の計算ケース

ケース	潮位	河川流量 (換算)
		上段: 白川・緑川, 下段: 坪井川
1	天文潮位 (平常時)	1 時間毎の実測 (平常時)
		5 (m^3/s) (昭和 48 年平均流量)
2	実測潮位 (台風時)	1 時間毎の実測 (台風時)
		23.2 (m^3/s)
3	天文潮位 (平常時)	1 時間毎の実測 (台風時)
		23.2 (m^3/s)
4	天文潮位 (平常時)	H 6 最大流速 白川: 1765.4 (m^3/s) 緑川: 1961.2 (m^3/s)
		H 6 最大流速 441.35 (m^3/s)

境界条件は、図-1の A-B, A-C, C-D 間で与えるが、熊本新港における潮位を点 C に与えた。平常時の潮位の境界条件は、当日の実測潮位と天文潮位に大きな相違が見られなかったため、熊本新港における天文潮位を点 C に与えた。台風時の潮位の境界条件は、実測潮位と天文潮位に顕著な差があったことから、熊本新港における実測潮位を点 C に与えた。また A-C 間での潮位の位相差を考慮するために 1 次元波動方程式を CIP 法 (山田ら, 1998) を用いて解き、潮位分布を決定した。A-B 間, C-D 間については点 A, 点 C の潮位を汀線方向に線形に減少させることで与えた。

c) 計算ケース

計算ケースは表-1 に示す 4 ケースとした。ケース 1 は気象・海象共に穏やかであった 1999 年 7 月 8 日を平常時とするもので、ケース 2 は 1999 年 9 月に九州地方に甚大な被害をもたらした台風 9918 号来襲時を台風時とするものである。ケース 3, 4 は仮定のケースで、ケース 3 は潮位を平常時、河川の流入量のみを台風時としたものである。さらに、河口近辺の干潟は洪水等の高水時に大きな変形を受けると考えられ、最大出水時をケース 4 として計算を行った。この場合、潮位については平常時のものを用い、河川流入量については 1994 年の流量年表より最大流量を決定した。

d) 潮流計算の精度検証

図-6 は図-1 中の No. 3 地点における潮流楕円の比較である。●は実測値、○は Chezy の係数の計算に式 (6) を用いたもの、×は式 (5) を用いたものである。式 (6) を用いた結果は長軸の傾きが実測値に比べやや大きいものの、短軸方向の扁平化が再現できている。従って、以後はこの修正した Chezy の係数を用いる。

e) 計算結果及び考察

図-7 (a)~(d) は、拡散計算開始後 2 潮汐後の浮遊物質拡散の計算結果を表す。これは、坪井川・白川・緑川河口に、100 ml/s の浮遊物質の負荷を与え続けたもので、浮遊物質の濃度分布である。

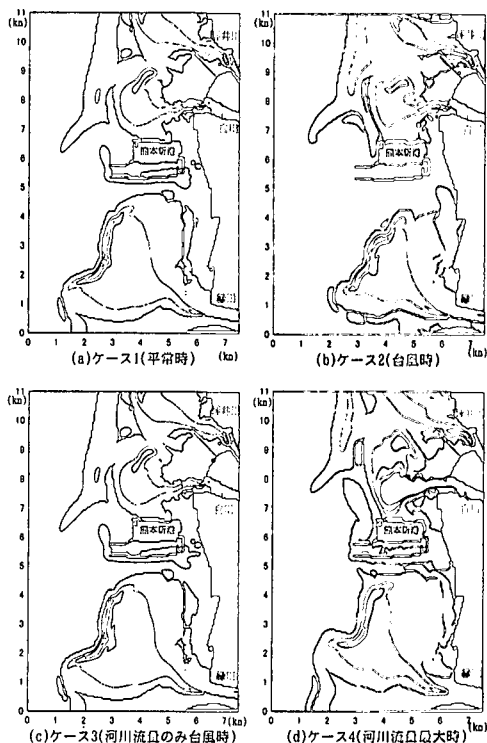


図-7 拡散計算結果 (2 潮汐後)

ケース 1 (平常時) とケース 2 (台風時) を比較すると、ケース 2 の方が浮遊物質の拡散領域が全体的に広く、また、汀線近くまで拡散領域が及んでいる。従って、台風時の浮遊物質の拡散は平常時に比べ、広い範囲に及ぶと考えられる。ケース 1 とケース 3 (河川流入量のみ台風時) を比較すると、顕著な差異が認められない。従って、平常時の 5 倍程度の河川流入量であれば、河川水がこの海域における浮遊物質の拡散に与える影響は軽微であると考えられる。ケース 1 とケース 4 (河川流入量最大時) を比較すると、ケース 4 の方が河川の流下軸方向に拡散の範囲が伸張される傾向があり、また、汀線近くまで拡散領域が及んでいる。従って、河川流量が最大の場合は、河川水がこの海域における拡散に影響を与えと考えられる。ケース 2 とケース 3 を比較すると、ケース 2 の方が浮遊物質の拡散領域が全体的に広がっており、また、汀線近くまで拡散領域が及んでいる。従って、浮遊物質の拡散は、潮流によっても大きく影響を受けると考えられる。

3.2 地形変化計算

a) 地形変化の計算式

底勾配の影響を最も簡単に表現するため、渡辺ら (1984) の提案した次式を底面高変化の計算に用いる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(q_x - \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(q_y - \varepsilon_s |q_y| \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) + Q \cdots \cdots (7)$$

ここで、 z_b は任意の高さを基準にした局所底面高、 t は時間、 ε_s は正の定数である。

b) 漂砂量算定

ここでは地形変化計算を現地（有明海）へ適用することを試みるが、この海域は波浪よりも潮流の影響が大きいこと、また実際の海域における波浪空間分布の解析や実測そのものが難しいことから、まず流れ（潮流）のみを考慮した地形変化を考える。そこで、流れのみの情報で掃流砂だけでなく浮遊砂の効果も評価できると言われる Brown の流砂量公式の適用を考える。また、Brown の式には Gilbert の修正曲線に基づき修正された式を用いた（入江ら、1985）。

$$q = \begin{cases} 0 & \psi \leq \psi_c \\ 40\omega d\psi^3 & 0.6 > \psi > \psi_c \\ 10.86\omega d\psi^{0.45} & \psi \geq 0.6 \end{cases} \cdots \cdots (8)$$

ここで、 q は単位幅単位時間当たりの流砂実質体積、 d は底質粒径、 ψ は shields 数、 ψ_c は限界シールズ数で、岩垣の限界掃流力の条件を与えるシールズ数の値である。 ω は粒径 d の粒子の静水中における沈降速度である。沈降速度は粒径に応じて Rubey の式と Stokes の法則を使い分けることとする。

c) 地形変化計算の検証

本モデルの妥当性を検討するため、渡辺ら（1984）が行った構造物（離岸堤）周辺における海浜変形実験結果との比較検討を行った。解析領域・計算ケースは渡辺らが行った実験に準ずる。実験は図-8 に示すとおり、沿岸方向 7.2(m)、岸沖方向 4(m)、初期海底勾配 1/20、初期汀線から離岸堤までの距離 1.8(m) で行われている。また、実験領域は離岸堤の中心を垂直に通る軸に対して対称であることから、数値計算はこの軸から上半分の領域に対して行い、その他、入射波等のケースは表-2 に示す

表-2 計算および実験（渡辺ら）ケース

周期 T	沖波波高	底質粒径	斜面勾配
0.87(s)	4.5(cm)	0.2(mm)	1/20

とおりである。また、海浜流場の計算には拡張型ブシネスク方程式（平山ら、1998）を用いた。図-9 は渡辺らの行った実験結果、図-10 は計算結果である。これによると、離岸堤前面の波状の地形変化、離岸堤背後の侵食と堆積の傾向は実験値を概ね再現できていることがわかる。この結果から Brown の公式を用いた本モデルの妥当性が示されたといえる。

d) 現地適用例

i) 解析領域及び計算ケース

解析領域は潮流・拡散計算と同様で、図-1 に示すおりである。計算格子間隔は 50 m、分割数 150×220 で計算を行った。計算ケースは潮流・拡散計算と同様で、表-1 に示すとおりである。地形変化計算で使用する底質粒径の空間分布は熊本港底質調査報告書（1976）によるものを用いた。また、河川から流入する浮流土砂量の計算式は、建設省熊本工事事務所において白川の基準点での浮流土砂量と洪水流量との関係を表した次式を用い、緑川、坪井川もこれに準じるとした。

$$Q_s = 9.9 \times 10^{-8} \cdot Q^{2.70} \cdots \cdots (9)$$

ii) 計算結果及び考察

図-11(a)～(c) は地形変化計算結果である。図-11(a) 図は潮流計算を 2 潮汐行った後、地形変化の計算を 2 潮汐行ったもので、地形変化の計算を行う際、流れの場は一定として扱った。色が濃くなるほど侵食傾向、薄くなるほど堆積傾向であることを示す。(b) 図は潮流の計算を 1 ステップ行う毎に地形変化の計算を行い、その地形変化を次の潮流計算に反映する形をとったものである。(a) 図より地形の変動は河口から滞筋に沿って干潟域全体に広がっている。これを従来の観測結果に照らし合わせると、その傾向は概ね一致しているが、干潟域（水深 1 ～ 2 m）より水深の深い位置での地形変化が評価で

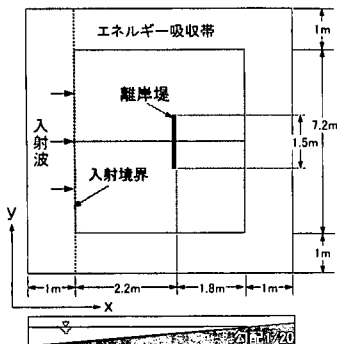


図-8 地形変化実験領域（渡辺ら）

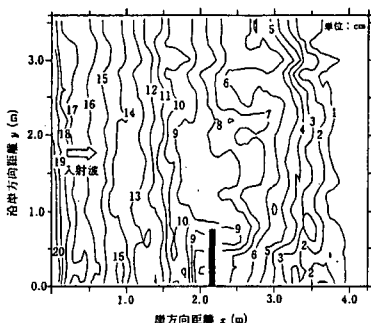


図-9 地形変化実験結果（渡辺ら）

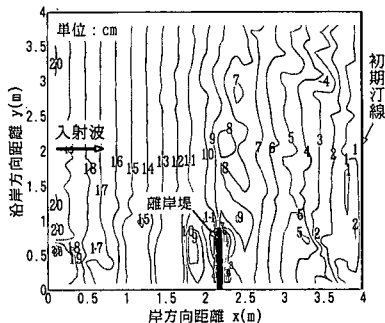


図-10 地形変化計算結果

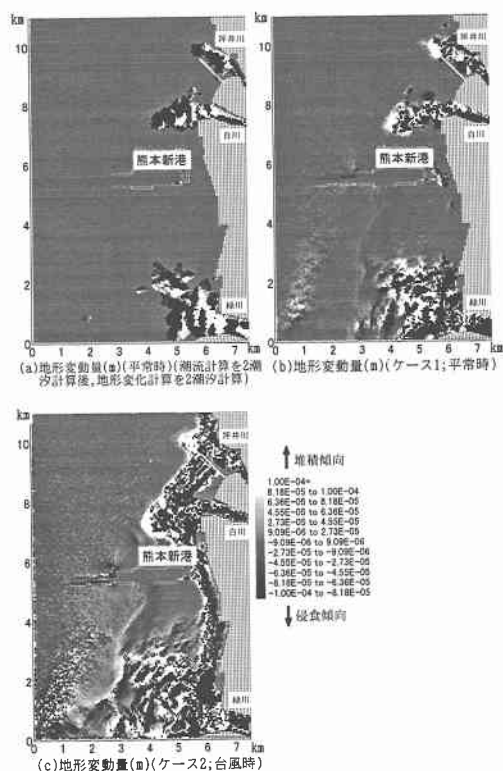


図-11 地形変化計算結果

きていない。それに對し、(b) 図は緑川河口沖の海底斜面に堆積領域が生じ、熊本港航路沖でも地形変化が生じている。これらのことから、潮位差の大きい領域における、潮流による地形変化計算を行う際には、潮流・潮位の時間変動と地形変化の相互作用を考慮する必要があることがわかった。従って、以後の計算結果は(b) 図でとった方法で行ったものである。

図-11(b)～(c)は、地形変化計算開始後2 潮汐後の結果である。ケース2 はケース1 に比べ、各河川河口前面の干潟域の地形変動領域が若干広くなっており、また緑川河口沖の海底斜面の堆積範囲が広がっている。これは、干潟前面においてケース2 の流速がケース1 の流速より大きいことによるものと考えられる。従って、台風時は強い流れによって、平常時よりも地形変動量は大きくなり、その領域は干潟よりも水深が深い領域にまで及ぶことが分かった。ケース1、3 及び4 を比較したところ、地形の変動領域と大きさに顕著な違いが見られなかった。これは、従来から得られている知見に対して、若干不整合である。その原因として、本手法では掃流砂のみを漂砂として取り扱っていること、漂砂移動形態を平衡状態と仮定していることなどが挙げられる。その結果として、河川からの流砂の移流拡散及び、その沈降・巻き

上げの過程を十分に評価できていないと考えられる。

4. 結 論

本研究では、有明海沿岸部における潮流場と物質拡散及び干潟地形変動のメカニズムの解明及び、その予測モデルの開発を行うことを目的とし、現地観測と数値解析を行った。計算結果は渡辺ら(1984)の実験結果と比較・検討を行った。また、現地への適用例として、白川・緑川河口付近の沿岸域における干潟地形変形の数値解析を行った。今回は特に、干潟が受ける外的因子として潮流及び河川流入を取り上げ、これらの外力を受ける場合と平常時との比較を行った。その結果得られた結論を要約すると、以下のようになる。

a) 現地観測から、干潟のような比較的水深が浅い領域においても、水平方向流速は水深方向に流速、流向が異なり、3次元性を持つことがわかった。

b) 干潟上では底面付近に高濃度の浮泥層が存在するが、その様態は河川や地形の影響を受けることがわかった。

c) 潮位差の大きい海域における、潮流による地形変化計算を行う際には、潮流・潮位の時間変動と地形変化の相互作用を考慮する必要がある。

d) 台風時は強い流れによって、平常時よりも地形変動量は大きくなり、その領域は干潟よりも水深が深い領域にまで及ぶことが分かった。

謝辞：現地観測を行うに際しては、運輸省第四港湾建設局並びにアジア航測株式会社の御協力を頂いたことを記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 入江 功・栗山善昭(1985): 底質の移流沈降過程を入れた航路・港内埋没の予測, 港研報告, 第24巻, 第2号, pp. 156-204.
- 運輸省第四港湾建設局(1976): 熊本港底質調査報告書.
- 運輸省第四港湾建設局(1999): 熊本港(広域)埋没量予測調査業務報告書.
- 加藤一正・田中則男・灘岡和夫(1979): 干潟上の潮流計算および干潟変形予測の手法, 港研報告, 第18巻, 第4号, pp. 3-75.
- 佐藤昭二・木村久雄・高松恭文(1976): レクリエーション海浜における突堤・離岸堤の汚染拡散に対する影響, 港研報告, 第16巻, 第2号, pp. 27-62.
- 平山克也・上原 功・永松宏一・平石哲也(1998): 珊瑚礁リーフにおける波と流れの計算法の適用性, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 161-165.
- 山田彦彦・滝川 清・飯尾昌和(1998): 密度関数の解法にCIP法を用いたVOF法の解析精度に関する研究, 応用力学論文集, 第1巻, pp. 283-292.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・柳山 勉(1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.