

取水港湾における砂およびシルトの港内堆積予測

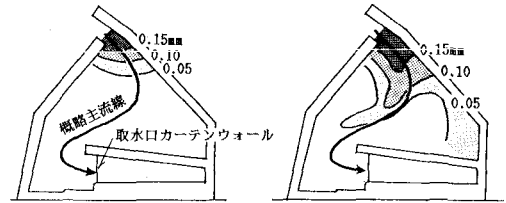
近藤浩右*・清水琢三**・金山 進**・村山恒雄***

1. ま え が き

冷却水を港口より取水している発電所港湾における港内堆積現象は、波、流れが比較的大きく、しかも外力減衰の大きな港口部で流入砂が堆積するという現象（港内堆砂）と、取水流によって港外から浮遊状態で流入したシルト・粘土が静穏な港内中央から奥にかけて沈降・堆積するという現象（シルテーション）の二つの異なった現象に大別される。この問題に対して、これまで総合的な現地調査に基づき、港口流入砂量のみならず、シルトの港内堆積についても、個々に予測手法が提案されている〔丸山ら¹⁾、近藤ら²⁾〕。しかしながら、維持浚渫の時期および量などの効率的な浚渫計画を立案するためには、堆積量だけでなく、その分布形状の予測も必要不可欠である。そこで、本研究では、港内を仮想水路にみたてた簡便な取り扱いにより、取水流下方向の砂およびシルトの港内堆積を同時に考慮できる予測手法（一次元水路モデル）について検討した。さらに、このモデルを基に、浚渫区域と浚渫土量を予測する実用的な方法についても検討した。なお、上記モデルは、元来、砂の堆積が卓越する地点を対象に開発されたものであるが、本論文では、シルトの堆積が主流を占める取水港湾へ適用した結果について報告する。

2. 検討対象地点の港内堆積の現状

本研究の検討対象地点である福島第二原子力地点は、これまで検討されてきた福島第一地点の南約12kmに位置する。両地点の位置する福島県の太平洋側の相双海岸は汀線にはほぼ平行な等深線を有する緩勾配海岸であり、両地点の波浪特性はほぼ同一とみなすことができる。また、防波堤形状、港口の位置と水深、取水量が類似しているにもかかわらず、両地点はそれぞれ特徴的な異なる港内堆積特性を示す。両地点とも、港口で砂が、港奥でシルトが堆積するという粒径段階別の堆積特性については基本的に差異はないが、福島第一地点は砂の堆積が支



(a) 昭和57年8月

(b) 昭和82年10月

図—1 検討対象地点の中央粒径分布

配的であるのに対し、福島第二地点はシルトの堆積が支配的であり、全港内堆積土量の約80%を占める。これは、海域の土砂の供給源である海崖が、福島第一地点では主に砂質土で構成されているのに対し、福島第二地点ではほとんど泥岩で構成されていることに対応していると考えられ、非常に興味深い結果となっている。

図—1は検討対象地点の底質の中央粒径分布を示したものであり、図中には現地調査の結果得られた概略主流線も併せて示されている。昭和57年8月当時は取水量が現在の1/3~1/4と少なく、0.1mm以上の砂の堆積域が港口に限られていたのに対し、昭和62年10月以降には取水量の増加に伴い主流線に沿って砂の堆積域が港内へ移動している様子がわかる。また、0.1mm未満のシルトは、港内中央から取水口にかけて広く堆積しており、中央粒径は0.01~0.03mmと非常に細かくなっている。

3. 一次元水路モデルによる港内堆積予測

3.1 一次元水路モデルの概要

取水港湾における砂およびシルトの港内堆積現象は、その流送・堆積の形態が異なるため個別に現象のモデル化が行われているが、少なくとも、移動方向に関しては、主に取水流によって支配されているという点で一致している。したがって、港内を取水流の主流線方向に連結した台形格子に分割して仮想水路にみたてれば、両者を同一差分格子で計算することが可能となる。そこで、本検討では、砂とシルトの港内堆積分布に関する計算を同一の時間ステップ内で行い、侵食・堆積による水深変化が次のステップの流況に与える効果を介して砂とシルトの両者がお互いに及ぼす影響を計算に反映させるよう考慮

* 正会員 工修 五洋建設(株)技術部技術企画課

** 正会員 工修 五洋建設(株)土木設計部

*** 正会員 東京電力(株)原子力建設部土木建築課

した。

(1) 砂の港内堆積分布計算モデル

主流線方向の漂砂の連続式により水深変化を計算する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 h : 水深、 t : 時間、 x : 主流線方向の距離である。また、主流線方向の局所漂砂量フラックス q は福島第一地点の研究結果¹⁾ に基づき次式で与えた。

$$q = \frac{\alpha D}{1 - \varepsilon} |\Psi| \cdot u \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 D : 中央粒径、 ε : 空隙率、 Ψ : シールズ数、 u : 波と流れの合成流速、 α : 無次元定数、 $—$ は波一周期間の時間平均を表す。

(2) シルトの港内堆積分布計算モデル

時間ステップ毎に外力と濃度の定常状態を仮定すると、主流線方向の濃度変化は沈降・巻き上げ項とのバランスにより次式で与えられる²⁾。

$$u_c \frac{\partial C}{\partial x} = D = \gamma(C_{eq} - C) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\gamma = w_0 / \beta h \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 u_c : 取水流速、 C : 浮遊シルト濃度、 C_{eq} : 平衡濃度、 w_0 : 沈降速度、 β : 鉛直平均濃度と底面濃度の比、 h : 水深である。また、平衡濃度は福島第一および第二地点では堆積過程が支配的であることを考慮して、港口濃度と関連付けた式(5)を用いて評価した²⁾。

$$C_{eq} / C_0 = 1.5 \tau_{max} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 C_0 : 港口流入浮遊シルト濃度、 τ_{max} : 最大底面剪断応力である。

水深変化は、式(3)で求まる沈降・巻き上げ量とのバランスにより次式で与えられる。

$$\rho_s g (1 - \varepsilon) \frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial t} = D = \gamma(C_{eq} - C) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 ρ_s : シルトの密度、 g : 重力加速度である。

3.2 計算入力条件の設定

(1) 港湾形状のモデル化

港内を図-2に示す水路にモデル化し、港口部から取水口カーテンウォールに至る延長1150mの主流線に沿って50m間隔で23の要素に分割した。主流線は流況調査結果に基づき定めた。また、有効流域は要素内の断面平均流速を妥当に評価するために設定するもので、北防波堤背後の循環流領域および南防波堤隅角部の死水域を除くように考慮した。

(2) 外力条件

①港内波高分布 当地点における過去22年間の波浪観測データによれば、来襲波の波向はEが55%、ESEが22%、ENEが17%で合計94%を占めるため、この3方向について検討した。港内波高分布は、グリーン関数

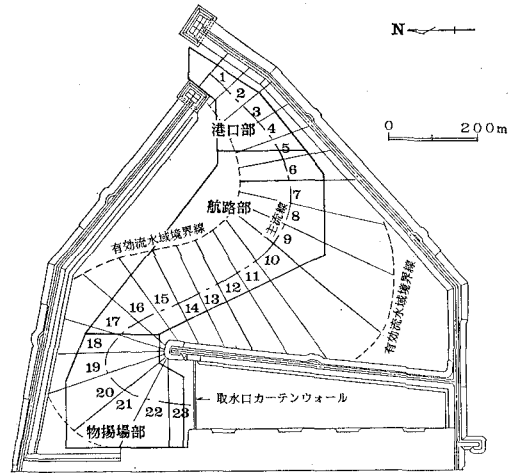


図-2 港内の領域分割と浚渫対象区域

を用いた不規則波の回折・反射計算法³⁾により、各要素毎に3方向の波向に対応した波高比をあらかじめ求めておき、入射波高を乗ずることにより評価した。

②取水量 南防波堤からは取水量の一部が透過しており、港口からの取水量は全取水量の約84%と見積られている。各要素境界上での取水流速の算定に当たっては、港口部の取水量を84%とし、港湾のほぼ中央(要素10)において100%に達するように取水量を直線的に漸増させた。

③底面剪断応力 港内の波向はほぼ流れの方向と同一とみなせるため、波、流れ共存場の底面剪断応力は、波と流れの交差角を0として、田中・首藤⁴⁾の評価法を用いて評価した。また、底質の中央粒径は、実測値を基に港口部の0.19mmから港奥部の0.01mmまで段階的に変化する値を用いた。

(3) 砂の計算入力条件

①漂砂量係数 式(2)中の無次元定数 α は福島第一地点における昭和54年7月から昭和55年11月の港口流入砂量の実測値と計算値の比較により0.92という値が得られている¹⁾。これは港口断面上の流速の横断方向分布を考慮して得られたものであるが、横断方向に一樣な流速分布を仮定した場合には $\alpha=1.24$ となる。本検討では横断方向に現象の一樣性を仮定した水路モデルであること、また、港口部での外力条件、底質条件が福島第一地点と類似していることを考慮して、福島第一地点と同じ係数1.24を用いることにした。

②限界シールズ数 式(2)で表される局所漂砂量算定式では限界シールズ数は考慮されていないが、要素境界上での最大シールズ数が細砂の限界シールズ数0.11⁵⁾以下の場合には漂砂量フラックス q を0とした。

③透過砂 南防波堤は透過防止工が未施工であるため透過砂が存在するが、図-2に示す浚渫対象区域にはほ

とんど流入していないと判断されたので無視した。

(4) シルトの計算入力条件

①港口流入濃度 港外から流入する浮遊シルト濃度は、シルトの港内堆積分布を計算する上で極めて重要なパラメーターである。波によって巻き上げられた海域の浮遊シルト濃度は、一般的には、港外の波浪条件と海域底質のシルト含有率の関数となっていると考えられる。福島第一地点では、約1年間にわたる港口流入濃度の実測値に基づき、波浪条件と関係づけて定式化することが試みられている²⁾。

$$C_0 = 5.04 + 3.47H_1^2 + 1.95H_2^2 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 C_0 は港口流入濃度、 H_1 と H_2 はそれぞれ当日と前日の入射波の有義波高である。

これに対して福島第二地点では、式(7)のような実測値に基づく回帰式は得られていないが、土砂供給源である海崖がほとんど泥岩で構成されているため海域のシルト含有率は高く、浮遊シルト濃度も式(7)による推定値よりも高くなることが予想される。実際、実測のシルト堆積量を本モデルで再現するためには、式(7)を3.4倍する必要があることがわかった。また、昭和61年8月に実施した取水口カーテンウォール前面での高波浪時の浮遊シルト濃度の実測結果からもその妥当性がある程度確かめられている。

②その他 平均濃度と鉛直濃度の比 β を0.8、浮遊シルトの代表粒径を0.03mmとした。

3.3 現地への適用性の検証

(1) 主流線方向の港内堆積分布

仮想水路流下方向の水深変化の分布について、実測値と計算値を比較した結果の一例を図-3に示す。実測値としては、図-2に示す浚渫対象区域(航路区域)の北側と南側の境界上ならびにその中央での水深変化を港内深浅測量成果を基に内挿した結果を示している。また、計算値としては、砂による水深変化とシルトによる水深変化も併せて示した。

計算結果によれば、図-1(a)に示した同一時期の底質の中央粒径分布に対応して、港口のみに砂が堆積し、港内では全般的にシルトが堆積する様子が再現されてい

る。しかも、砂とシルトを合計した水深変化の計算値は、浚渫区域全域の平均的な水深変化の実測値と概ね一致している。

(2) 浚渫区域の領域別堆積土量変化

図-2に示す浚渫区域を港口部、航路部、物揚場前面部の3領域に分け、領域別の砂とシルトの堆積土量変化について、実測値と計算値の比較を行った。図-2に示すように、仮想水路と浚渫対象区域は必ずしも一致していないが、前項(1)の結果からもわかる通り、水路モデルによる水深変化量の計算値は浚渫区域の平均的な堆積分布形状を表しているとみなすことができる。そこで、港口部は要素1から5、航路部は要素5~17、物揚場前面部は要素18~23の平均水深変化量に各領域の面積を乗ずることにより、各領域の堆積土量を評価した。

図-4は、図-3と同一期間の各領域の堆積土量変化について、実測値と計算値の比較を示したものである。図中には $\pm 20\%$ の推定誤差範囲も示されているが、各領域とも計算値が実測値の変化傾向を概ね再現している。

本検討で提案した水路モデルは簡単なモデルではあるが、航路浚渫区域の平均的な堆積厚分布と堆積量の予測という点で実用上十分な精度を有することがわかる。

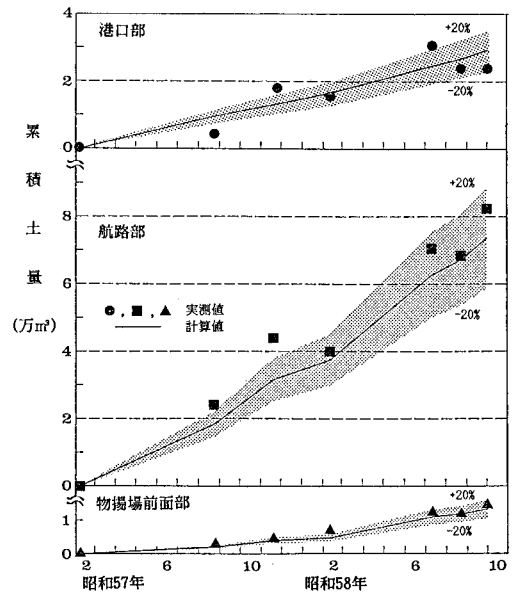


図-4 領域別土量変化の実測値と計算値の比較

3.4 波浪の年変動が堆積土量に及ぼす影響

3.3の検討の結果、波浪条件(入射波の有義波高、有義波周期、波向)と取水量の時系列データならびに初期水深が与えられれば、一次元水路モデルにより浚渫区域内の堆積土量を精度良く算定できることが明らかとなった。しかしながら、浚渫計画に役立てるべく堆積土量の将来予測を行う場合には、外力条件、中でも波浪条件を

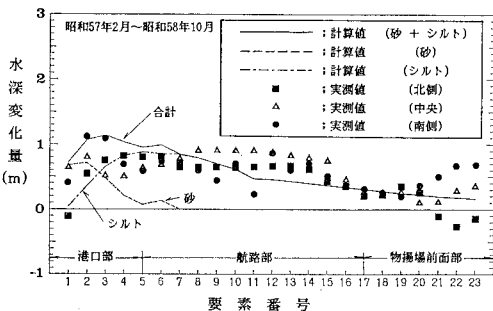


図-3 港内堆積分布の実測値と計算値の比較

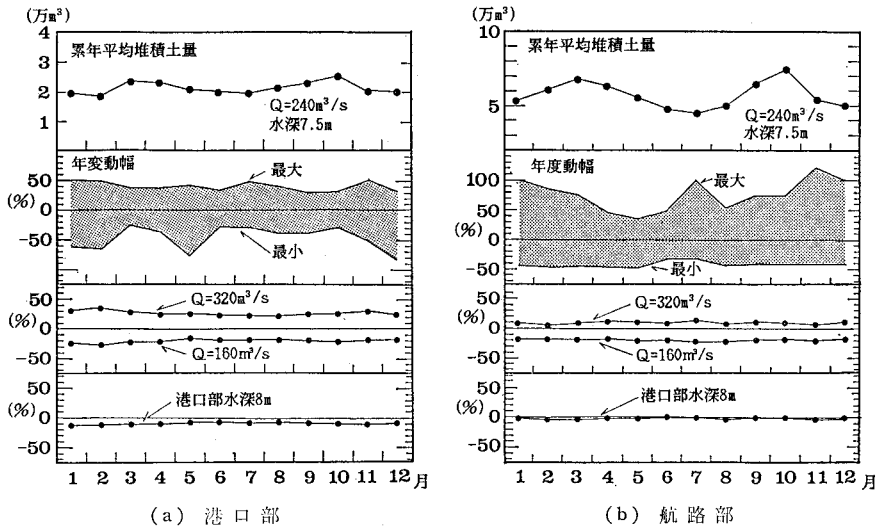


図-5 波浪の年変動が月間堆積土量に及ぼす影響

いかに設定するかが重要な課題となる。幸い、福島地点においては、昭和40年より20年余りにわたり波浪観測資料が蓄積されている。そこで、本検討では、昭和40年から昭和61年までの過去22年間の波浪観測データをそのまま時系列データとして用いて浚渫対象区域の年別月別堆積土量を計算し、波浪条件の年変動性が堆積土量の予測値に与える影響について検討した。

(1) 月間堆積土量の年変動

図-5の上段は、浚渫区域の水深を7.5m(平均潮位0.8mを考慮)、取水量を240m³/sとした場合の港口部と航路部における月間堆積土量の累年平均値の季節変化を示したものである。月間堆積土量は3~4月と9~10月に多くなる傾向にあり、それぞれ台湾坊主と呼ばれる南岸低気圧と台風による高波浪の出現時期と一致している。

図-5の上から二段目は、月別累年平均値を基準に波浪条件の年変動に伴う堆積土量の変動幅を示したものである。変動幅は、港口部で±50%、航路部で-50~+100%に達し、月間堆積土量の年変動がかなり大きいことがわかる。図-5の上から三段目は、240m³/sの結果を基準に取水量160m³/sと320m³/sの場合の月別累年平均堆積量を示したものであるが、取水量変化に伴う変動幅は高々±20%程度であり、波浪による年変動性に比べれば小さい。また、図-5の最下段は港口水深を8.0mと深くした場合の結果であり、砂堆積域の港口部では初期水深の影響を受けるものの、シルト堆積域の航路部ではその影響はほとんど無視できることがわかる。これは、水深が深くなると流入砂量が減少するため、水深変化は砂の移動にのみ影響することを示している。しかし、水深変化の影響は港口水深が0.5m変化しても高々

10%程度であり、浚渫区域の全堆積量に与える影響は小さい。

(2) 年間堆積土量の年変動

図-6は、22年間の累年平均値を基準に浚渫区域の年間堆積土量の年変動を示したものである。計算条件は図-5と同じく、水深7.5m 取水量240m³/sである。また、最下段の図には各年の平均有義波高と最大有義波高も示されている。

各領域の堆積量の年変化は波浪条件の年変化にはほぼ対応している。また、港奥の領域にいくにつれ、年間堆積量の変動幅が大きくなる傾向がみられるものの、各領域とも年変動性は概ね±20%程度に収まっており、モデル自身の予測精度と同程度になっている。このことは、短期的には波浪の年変動性は大きい、長期的にみれば比較的小さいことを示している。

したがって、数カ月後の浚渫計画といった短期的な港

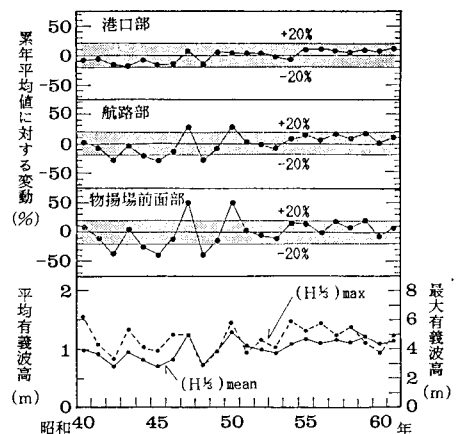


図-6 年間堆積土量の年変動性

内堆積土量の予測に際しては、予測値は波浪条件に大きく左右されるため、たとえ波浪条件の平均的な季節変化を考慮したとしても十分ではなく、波浪の年変動を念頭において余裕を持った計画を立てる必要がある。一方、1年以上の長期的な予測に対しては波浪の年変動性の影響は小さいので、長期的な浚渫計画に対しては平均的な波浪条件を用いて予測すればよいと考えられる。

4. 実用的な浚渫土量予測手法

4.1 平面的な港内堆積分布の予測

航路維持浚渫は、所定の航路水深よりも浅くなった区域についてのみ実施されるため、一般的には浚渫土量と堆積土量は一致しない。したがって、浚渫区域と浚渫土量を予測するためには、平面的な水深変化を予測する必要がある。

平面的な地形変化予測手法としては、港内の平面的な波浪、流況、地形変化を繰り返して計算する、いわゆる三次元海浜変形予測モデルが最も本質的な取り扱いである。しかしながら、取水港湾においては、港内の堆積速度分布が概ね決まっていることや、計算に要する時間を考えると、過去の実測値から経験的に得られる堆積速度分布に、3.の一次元水路モデルによる浚渫対象区域の平均的な水深変化を乗じて平面的な港内堆積分布を予測する方が実用的であると考えられる。事実、昭和57年2月から昭和58年10月の間に実施された合計8回の深浅測量データを用いて経験的固有関数法による解析⁶⁾を行ったところ、1次の固有関数ベクトルは実際の堆積分布をよく表しており、しかも1次のモードが全体の95%を占めることがわかった。このことから、上述の予測手法の妥当性が確かめられる。

4.2 現地への適用性の検討

図-7は、初期水深から約1年半後の水深分布を予測した結果を実測値とともに示したものであるが、両者は概ね一致している。また、図-8は浚渫水深をO.P.-6.5mとした場合の浚渫土量と浚渫面積の経時変化を示しているが、実測値と計算値の対応は良好である。

5. あとがき

砂のみならずシルトの港内堆積を同時に考慮できる一次元水路モデルを用いて、実用的な浚渫土量予測手法を提案した。本手法は、取水港湾における港内堆積現象を比較的単純にモデル化したものであるが、簡便かつ良好な予測精度を有するため、現在、実際の浚渫計画に役

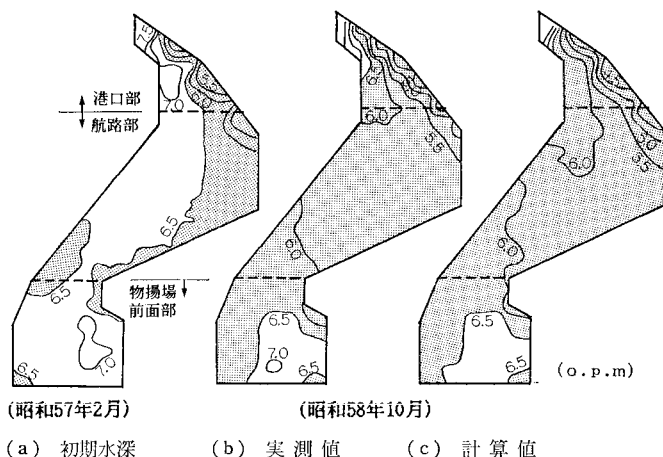


図-7 水深コンターの実測値と計算値の比較

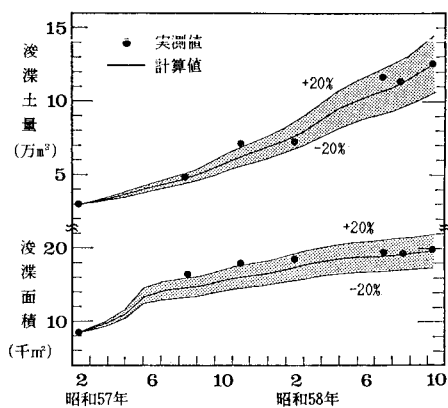


図-8 浚渫土量と浚渫面積の実測値と計算値の比較

立てられている。しかしながら、港口流入浮遊シルト濃度の定量的評価や沈降・巻き上げ項の評価など、シルトの挙動については、現地データを基にさらに検討すべき課題が数多く残されている。

参考文献

- 1) 丸山康樹・鹿島遼一・成廣明雄・近藤浩右：発電所港湾における港内堆砂量の予測モデル，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 294～298，1982。
- 2) 近藤浩右・清水琢三・金山 進・鈴木義和・丸山康樹・鹿島遼一：取水港湾におけるシルテーションについて，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 392～396，1987。
- 3) 近藤浩右・清水琢三・山田耕一：グリーン関数を用いた港内波方向スペクトルの計算法，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 106～110，1987。
- 4) 田中 仁・首藤伸夫：波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 163～167，1980。
- 5) 渡辺 晃：振動流境界層と海浜過程，水工学に関する夏期研修会，Bコース，pp. B-3-1～B-3-13，1981。
- 6) 加藤一正・吉松 晃：三次元の固有関数法による深浅図解析法，港湾技術研究所報告，第23巻，第2号，pp. 27～47，1984。