

港湾域における浮防波堤の平面配置問題に対する 近似解析法について

中村孝幸*・水谷法美**・許 東秀***・金 度三****

ここでは、港湾域における浮防波堤の平面的な配置問題の取り扱い方法およびそのとき用いる近似解析法を展開する。この方法論は、浮防波堤の詳細な特性量が知られていない段階、すなわち計画段階で利用することを想定している。近似解析法では、浮防波堤を仮想的に固定透過堤に置き換え、最初に浮防波堤よりの透過波を無視して港湾域境界よりの反射波・回折波を考慮して効果的な浮防波堤の設置長・配置の代表案を抽出する。引き続き、代表案に対して浮防波堤よりの透過波の影響をも考慮して波高算定を行い、最終的に最も効果的と考えられる案を判定するという手法を採用している。そして具体的に、このような方法の現地適用例についても紹介した。

1. ま え が き

港湾域において浮防波堤の平面的な配置を計画する際、最も労力を要するのが、静穏化効果を最大化ならしめる浮防波堤の設置長や空間的な配置を決定することである。設置長や空間的な配置の中には、構成する浮防波堤の1基の長さや開口部の長さの要素なども含まれる。このような計画を検討するとき、いわゆる港内静穏度プログラムが利用されるが、浮体式構造である浮防波堤の取り扱いが問題になる。

平面波浪場における浮防波堤の取り扱い方法は、各種のものがあるが、最も厳密な方法は、平面波浪計算に浮体の波浪動揺やそれによる回折散乱波・発散波を考慮する方法(永田ら, 1991; 中村ら, 1994)である。しかしながら、計画段階では、浮防波堤の詳細構造が判明していることは少なく、逆にどの程度の消波効果をもつ浮防波堤が必要なのかを推定することが要求されることもあり、計算労力を考えると、このような厳密解析法の利用は不適切と言わざるを得ない。

このような状況下では、単に浮防波堤を仮想的に透過堤と置き換え、その波浪制御特性を反射・透過率などの1次元的な指標だけで表現することが望まれる。ただし、配置計画で要求される浮防波堤の1基の長さや開口部の長さの要素だけは考慮に入れて静穏化効果を推定する必要がある。これは構造物による静穏化効果を推定するとき、港湾境界や浮防波堤による波の回折効果が重要になるからである。本研究は、このような計画段階で浮防波堤の配置問題を近似的に解析する方法論を展開するもので、そのとき用いる数値解析法についても紹介する。

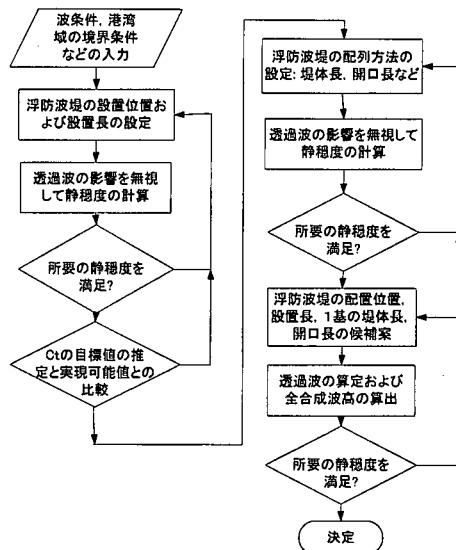


図-1 近似解析による浮防波堤の配置計画等の流れ

2. 浮防波堤による静穏化効果の評価法

ここでは計画段階で利用される浮防波堤の配置問題を近似的に解析する方法論を展開する。このとき、浮防波堤の詳細構造は判明していないものとして、その波浪制御特性は、平面配置時においても反射・透過率などの1次元的な指標を用いて表現できるものとする。

この方法論は、概略的に以下の2ステップからなる。図-1は、この近似解析の流れ図を示す。

(1) 第1ステップ(透過波を無視した解析)

この段階では、透過率で表される浮防波堤よりの透過波の影響を無視して静穏度計算を実施する。このとき、不透過堤としての浮防波堤および他の港湾境界による波の回折・反射の効果は考慮する。効率的に算定を進めるため、初期段階では浮防波堤の設置長および配置方向のみに着目して効果を検討し、引き続き、この中で最適と判断される候補案に対して、配列する浮防波堤の1基の長さや開口部の長さなど配列方法について検討すること

* 正会員 工 博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科

** 正会員 工 博 名古屋大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻

*** 正会員 博(工) 名古屋大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻

**** 正会員 博(工) 韓国海洋大学校工科大学副教授 土木環境システム工学科

が望ましい。

このような静穏度計算には、各種の数値算定法が利用できるが、ここでは第2ステップでの解析の連続性から、鉛直線グリーン関数法(中村ら, 1985)を使用した。

一般的に浮防波堤は港内を遮蔽するように設置されるため、この段階で着目している港内の静穏度を満足しない浮防波堤の設置長や空間配置は不適切であり廃棄できる。これは、透過堤よりの透過波を考慮すると、静穏度はさらに悪化するからである。

(2) 第2ステップ(透過波の影響)

透過波を無視した第1ステップの計算による対象海域の波高値に着目すると共に、所要目標の波高値を参照して概略的に必要となる浮防波堤の透過率を推定する。もし、この透過率が最初に想定されている透過率よりも低いと判断される場合には、配列方法を再検討するか、初期設定の透過率を変更する必要がある。

第1ステップでの最適候補案を対象にして、浮防波堤を透過する透過波の算定を行う。この透過波は、後述するように第1ステップで求められる入射波と反射波の合成波を浮防波堤に入射させ、透過率を考慮して求める。また、このように求めた透過波を、再度港湾域に作用させて、反射・回折の算定を行い、上記の透過波の結果に加算することで総合的な透過波の算定値とする。

この透過波の算定結果と第1ステップでの算定結果を合成して、最終的な港湾域の波高分布を求める。もし、この結果が所定の静穏度を満足しないようであれば、透過率の設定を変更するなどで対処する。透過率の変更が難しいときには、第1ステップに戻り、配列方法などを変更する。

3. 近似解析で用いる算定法

(1) 浮防波堤よりの透過波の影響を無視した解析

このステップでの解析では、浮防波堤を仮想的に不透過堤と仮定するため、低反射境界の取り扱いが可能な一般の静穏度計算プログラムが利用できる。

ここでは、湧き出し分布法において、鉛直線グリーン関数を核関数に用いる算定法を適用する。

この算定法は、線形波動理論に基づくもので、入射波が港湾域に作用するとき、反射波を含む回折波ポテンシャルを浮防波堤を含む港湾陸域境界上に鉛直線グリーン関数で表される湧き出しを分布させて表現する。

具体的な算定式は、次式で示される。

$$\varphi_D(x, y) = \int_{C_B + C_L} f_D(X, Y) G(x, y, X, Y) dC(X, Y) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 φ_D : 回折波ポテンシャルの時間振動項を除く複素振幅、 (x, y) : 港湾域の一般点の座標、 (X, Y) : 湧き出

し関数を配置する港湾境界上の座標、 f_D : 湧き出し強さ、 G : 鉛直線グリーン関数、 C : 港湾域の陸域境界で浮防波堤の境界線 C_B とそれ以外の陸域境界 C_L で構成される。

湧き出し強さ f_D は、境界 C 上の運動学的な境界条件に相当する反射条件を考慮して決定できる。この具体的な算定式は次式で表される(中村ら, 1993)。

$$\begin{aligned} & \int_C f_D(X, Y) \left\{ i k \alpha(x, y) G(x, y; X, Y) \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial G(x, y; X, Y)}{\partial n} \right\} dC \\ & = - \left\{ i k \alpha(x, y) \varphi_I(x, y) + \frac{\partial \varphi_I}{\partial n} \right\} \Big|_{(x, y) \text{ on } C} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここに、 φ_I : 入射波ポテンシャルの振幅、 k : 波数、 $\partial/\partial n$: 境界 C 上での法線微分、 $\alpha(x, y)$: 吸収率であり、境界 (x, y) おける反射率 $C_r(x, y)$ と反射波の遅れの位相角 $\delta(x, y)$ を用いて次式で表される。

$$\alpha(x, y) = \frac{1 - C_r(x, y) e^{i\delta(x, y)}}{1 + C_r(x, y) e^{i\delta(x, y)}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(2)は湧き出し強さ f_D を未知数とする1次元の積分方程式で、これを離散化した数値方程式を解くことにより f_D が求められる。一旦、湧き出し強さが求められると、式(1)から回折波ポテンシャルが算定でき、入射波ポテンシャルとの合成和を考えて、このときの港湾域の波高分布が求められる。

(2) 浮防波堤よりの透過波の影響の算定法

透過波ポテンシャルの複素振幅 φ_T は、 φ_D と同様に鉛直線グリーン関数を核関数とする湧き出し分布法により表せるものとする。

$$\varphi_T(x, y) = \int_{C_B} f_T(X, Y) G(x, y; X, Y) dC(X, Y) \quad \dots\dots\dots (4)$$

湧き出し強さ f_T は、入射波と浮防波堤を除く周辺境界よりの回折波(反射波を含む)の影響を考慮して次式により決定する。

$$\frac{\partial \varphi_T(x, y)}{\partial n} = \left\{ \frac{\partial \varphi_I(x, y)}{\partial n} + \frac{\partial \varphi_R(x, y)}{\partial n} \right\} C_t(x, y) e^{i\delta_T} \quad (x, y) \text{ on } C_B \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 C_t : 透過率、 δ_T : 透過現象に伴う位相遅れの角度、 φ_R : 浮防波堤を除く周辺境界より浮防波堤へ入射する波のポテンシャルを示し、式(1)において積分領域を C_L に変更することで求められる。

式(5)を離散化した数値方程式を解くことで、湧き出し強さ f_T が求まり、これを式(4)に代入して、透過波ポテンシャルが算定できる。

このように透過波ポテンシャルが求められると、これを波源にして港湾境界条件を満足する回折波(反射波)

を求める必要がある。これは、単に式(2)の右辺の入射波ポテンシャルの代わりに式(4)の透過波ポテンシャルを代入して、湧き出し強さを求め、式(1)に代入することで算定できる。算定精度を上げたいときには、再度繰り返して、この求めた波浪ポテンシャルを波源として透過波ポテンシャルを算定すればよい。

そして、浮防波堤よりの透過波の影響は、これら透過波ポテンシャルと透過波に起因する港湾境界からの反射波のポテンシャルの総和で表される。また、港湾域の波高は、上記の(1)で求めた結果と透過波の影響の総和を考えることで求められる。この詳細は、中村ら(2000)にあり、それを参照していただきたい。

4. 適用例

上記した方法論の適用例として、韓国 W 港の例を紹介する。図-2 は、W 港の平面図を示すもので、図中には最終的に求められた浮防波堤の配置および配列状況についても示す。作用波は、図中に示す 2 条件(① $T_{1/3}=3.9$ s, $H_{1/3}=1$ m, 卓越波向き S75 度 E, $S_{max}=10$, ② $T_{1/3}=3.2$ s, $H_{1/3}=0.7$ m, 卓越波向き N40 度 E, $S_{max}=10$)である。このとき浮防波堤の反射率 C_r と透過率 C_t は、幅 7 m の矩形の浮防波堤を想定して $C_r=0.8$, $C_t=0.3$ とした。目標の静穏度は、埠頭前面波高が 0.3 m 以下、港湾域の波高が 0.6 m 以下とした。

(1) 設置長および設置方向の検討

まず最初に、図-2 中に示す港湾域における静穏度に基づき浮防波堤の設置長と配置する方向について検討してみた。このとき、図中に示す浮防波堤の配置方向角として、より厳しい波条件である S75 度 E の作用波に対し

て防波堤の長軸がほぼ直角になる 67 度を含めて、51 度から 126 度の範囲内で 7 種類に変化させた。また、浮防波堤の設置長は、200 m と 250 m の 2 種類に変化させ、総計 14 種類の試行を行った。このとき、浮防波堤は、開口部がない 1 基の直線堤で近似した。

図-3(a), (b) は、初期基本計画で想定されていた設置長 200 m, 配置方向角 67 度に対する上記①の波条件のときの波高分布を示し、図中では、有義波高 (単位 m) の分布で表してある。図-3(a)が浮防波堤よりの透過波を無視したとき、図-3(b)が考慮したときの結果に相当する。

透過波の影響を無視した図-3(a)では、港湾域・埠頭前面の両者に 0.3 m 程度の波高値が見られ、透過波を考慮するとこれ以上の波高値が出現するため、この場合の設置長・配置方向は不適切と判定される。事実、透過波を考慮した図-3(b)では、港湾域・埠頭前面の両者に 0.5~0.6 m 程度の波高値が見られる。

本研究では、浮防波堤の設置長を 200 m と固定して配置方向角を各種に変化させて検討を進めたが、浮防波堤よりの透過波を考慮すると、所定の静穏度が確保できないことが判明した。このため、設置長を 250 m に延長する方策を採用し、同様に方向角の影響を検討した。

このときの結果の代表例を図-4, 5 に示す。図-4 は、図-3 に比較して設置長を 250 m に延長したときの結果に相当する。一方、図-5 は、設置長 250 m で方向角を 113 度としたときの結果で、最も静穏化効果が認められたケースに相当する。各図の (a), (b) 図は、上記の例と同様に前者が透過波の影響を無視した場合、後者が考慮した場合に相当する。これら 2 つの配置方向角に対する結果を比較すると、透過波の影響を無視した (a) 図の比較を行えば概略的に優劣の判定が行え、透過波の影響を考慮した (b) 図の比較をあえて実施する必要のないことがわかる。

(2) 浮防波堤のユニット長および開口長の影響

上記の検討で最も効果的と判断された図-5 のときの設置長および配置方向角を採用して、浮防波堤のユニット長および開口長の影響についてさらに検討してみた。浮防波堤のユニット長は、耐波性能や経済性の面からも検討されるもので、静穏化効果のみから決定できない。また、開口長についても、隣接する浮体同士の衝突を避ける必要があり、同様に効果のみで決定できない。このため、ここでは、ユニット長 l_b として 20~30 m 程度のものを、また開口長 l_o として浮体同士の衝突を避けるため 4 m 程度以上と制限してみた。

図-6, 7 は、設置長 250 m, 開口長 $l_o=4.3$ m と固定して、それぞれユニット長 $l_b=24$ m (配置数 9 基), 32 m (配置数 7 基)としたときの波高分布を示す。各図の (a),

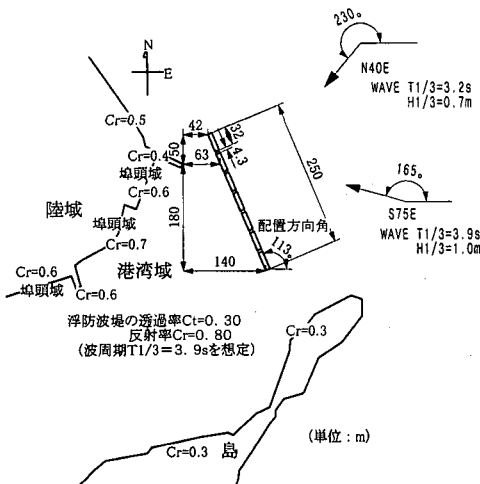


図-2 韓国 W 港の平面形状と浮防波堤の配置状況
(CASE 5, 浮防波堤 1 基の長さ 32 m, 開口長 4.3 m, 設置長 250 m)

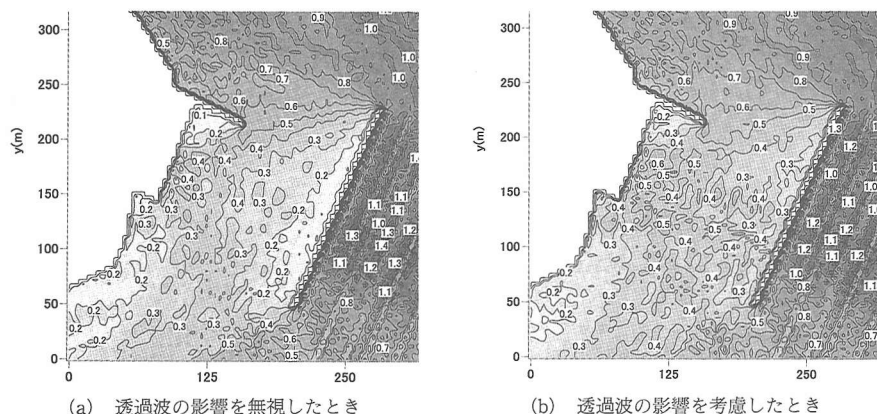


図-3 有義波高の分布 (設置長 200 m, 配置方向角 67 度, $T_{1/3}=3.9$ s, $H_{1/3}=1$ m, $S_{max}=10$)

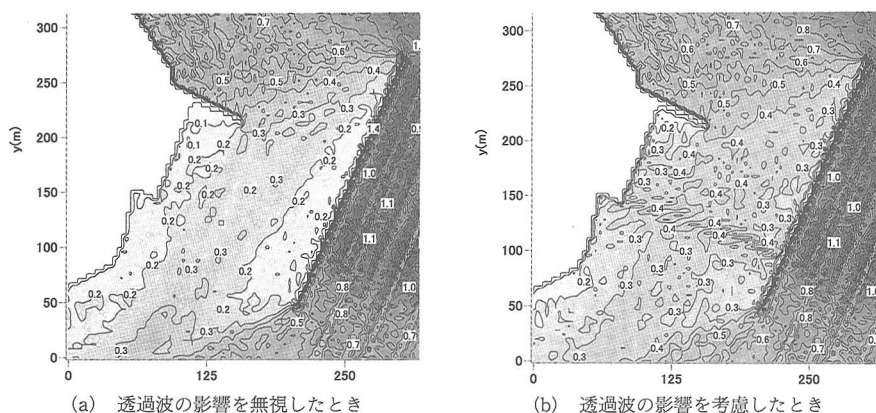


図-4 有義波高の分布 (設置長 250 m, 配置方向角 67 度, $T_{1/3}=3.9$ s, $H_{1/3}=1$ m, $S_{max}=10$)

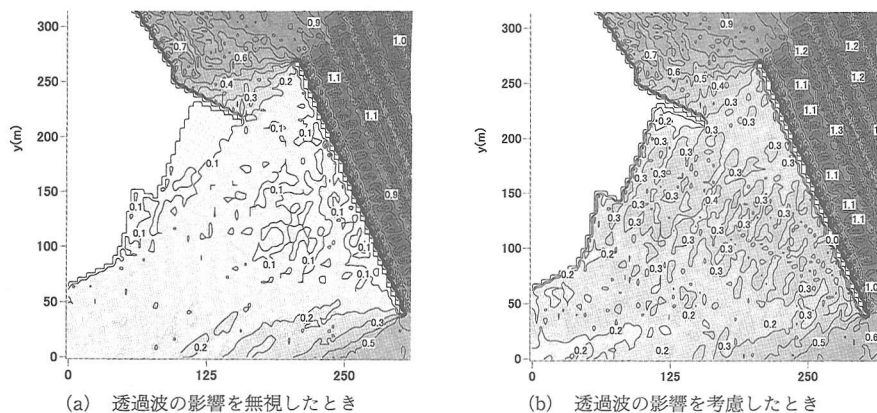


図-5 有義波高の分布 (設置長 250 m, 配置方向角 113 度, $T_{1/3}=3.9$ s, $H_{1/3}=1$ m, $S_{max}=10$)

(b) 図は、やはり透過波の影響を無視および考慮した場合に相当する。

これらの図より、当然のことながら、開口部を設けることにより、前出の開口部のないときの結果 (図-4) に比較すると静穏化効果は劣るようになる。そして、堤体

下部よりの透過波の影響を無視した各図の (a) 図の比較を行えば、概略的に優劣の判定は行え、透過波の影響を考慮した (b) 図の比較まで必ずしも必要のないことがこの場合でも再確認される。

そして、図-6 と図-7 の比較を行うと、設置長にわた

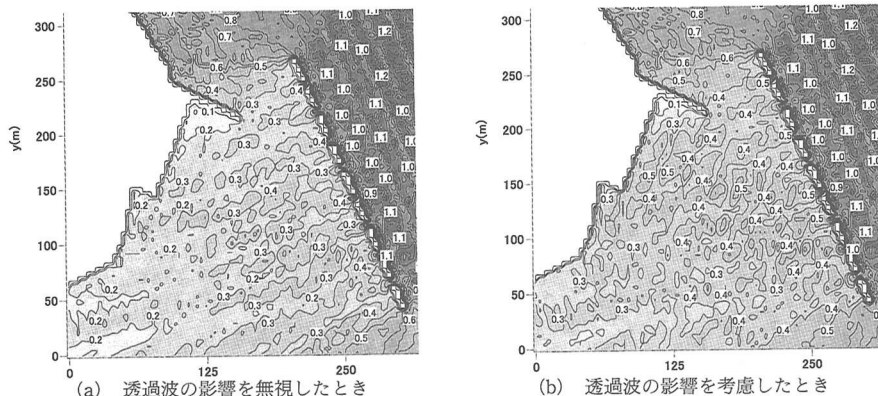


図-6 有義波高の分布 ($l_b=24$ m, $l_g=4.3$ m, 配置数 9 基, 設置長 250 m, 配置方向角 113 度, $T_{1/3}=3.9$ s, $H_{1/3}=1$ m, $S_{max}=10$)

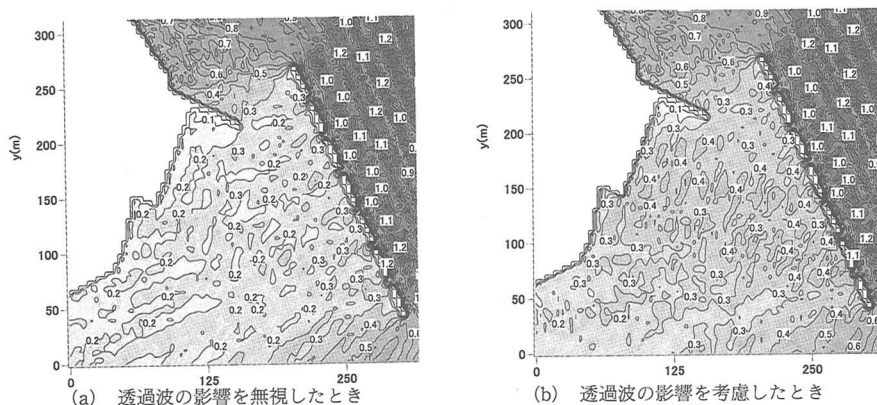


図-7 有義波高の分布 ($l_b=32$ m, $l_g=4.3$ m, 配置数 7 基, 設置長 250 m, 配置方向角 113 度, $T_{1/3}=3.9$ s, $H_{1/3}=1$ m, $S_{max}=10$)

る総開口長が短くなる図-7 の場合の方が設定目標の静穏度により近く効果的と判定される。また、図-2 の配置では、上記の②の波浪条件に対しても、同様に静穏度目標がほぼ達成できていることを確認している。

5. 結 語

本研究で提案した方法論は、第1ステップとして平面配置された浮防波堤群よりの反射波や開口部および両端部からの回折波の影響のみを取り扱っていることから、容易に効果的な配置が判定でき、従来の港内静穏度プログラムも利用できる利点がある。また、設定波高基準と浮防波堤を不透過堤と仮定するときの波高との比較から、逆に必要となる浮防波堤の透過率なども概略的に推定できるなどの利点もある。

また、第2ステップで使用する透過波の解析では、1次元的な指標である透過率のみが知れば静穏度の算定

が可能で、浮防波堤の詳細構造が不確定な計画段階で利用しやすい方法といえる。

参 考 文 献

- 永田修一・藤田 孝・三宅成司郎・巻幡敏秋・小田一紀 (1991): 有限長の防波堤と3次元係留浮体の波による干渉, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 771-775.
- 中村孝幸・奥 吉雄 (1985): 任意平面形状を有する堤体構造物まわりの波変形の解析法について, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 594-598.
- 中村孝幸・岩崎和弘 (1993): 直線配列された消波堤による平面的な波変形に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 626-630.
- 中村孝幸・大森慎敏 (1994): 浮桟橋を含む港湾域の波高分布の算定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 971-975.
- 中村孝幸・村上浩司・国本栄一 (2001): 港内静穏度に及ぼす防波施設の反射・透過波の周期特性の影響について, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 305-310.