

エネルギー平衡方程式に基づく浅海波浪推算モデルの適用性

山口正隆*・畑田佳男**・日野幹雄***・小沢恵一郎****

1. 緒 言

大部分の海岸・港湾構造物は浅海域に建設されることから、その計画・設計にあたっては、まず浅海域での来襲波浪を適切に推定する必要がある、このためエネルギー平衡方程式に基づくスペクトル法やハイブリッドパラメータ法が開発されてきた。これらの方法のうち、現段階で浅海域における波浪の屈折の影響が考慮されるのは前者のスペクトル法に限られており、近年 Collins¹⁾をはじめ Darras, Sand ら, Cavaleri ら²⁾, Young らおよび Golding³⁾により種々の浅海波浪推算モデルが開発されている。しかし、観測結果との比較に基づくモデルの適用性の検討は、Cavaleri らおよび Golding のモデルを除き報告されていないし、またいずれのモデルも碎波に伴うエネルギー減衰項の表示に深海での平衡方向スペクトルを使用していることから、浅海での碎波減衰項の表示が適切にモデル化されていないと考えられる。こうした状況から、著者ら^{4),5),6)}は浅海平衡周波数スペクトルに基づいて浅海での碎波減衰項を表示した浅海波浪推算モデルを開発するとともに、台風時の大阪湾における波浪追算を行い、観測結果との比較からその適用性を明らかにした。その結果、浅海域では屈折および shoaling に伴い、低周波数成分が変形するので、スペクトルなどの波浪の詳細な特性を再現するためには浅海波浪推算モデルを使用する必要があることが明らかになった。しかし、比較の対象とした MT 局での波高計設置水深は相対的に大きいため、波高に及ぼす浅海性の影響はほとんど見出されなかったし、計算対象も台風 7916 号の 1 ケースに限られていた。

そこで、本研究では、水深が小さい水域をもつ計算対象領域として伊予灘、周防灘および豊後水道よりなる瀬戸内海西部海域をとりあげ、外洋での計算結果を境界条件に与えた波浪追算を 4 つの台風時について実施し、主として設置水深が小さい波高計による観測結果や深海波

モデルによる計算結果との比較から、浅海波浪推算モデルの適用性及び波浪に及ぼす海底地形の影響を考察する。

2. 浅海波浪推算モデルの概要^{4),5),6)}

海底地形が緩やかに変化する場合、浅海におけるエネルギー平衡方程式は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial t} + c_g \cos \theta \frac{\partial F}{\partial x} + c_g \sin \theta \frac{\partial F}{\partial y} \\ + \frac{c_g}{c} \left(\sin \theta \frac{\partial c}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial c}{\partial y} \right) \frac{\partial F}{\partial \theta} = cc_g S(f, \theta) \\ \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに、 $F = cc_g E(f, \theta)$ 、 c ：成分波の波速、 c_g ：成分波の群速度、 $E(f, \theta)$ ：方向スペクトル、 f ：周波数、 θ ：方位角および $S(f, \theta)$ ：エネルギー⁷⁾の流入を表わす source function、である。

さて、本研究のモデルでは source function として、(i) Miles 機構による風波の発達項、(ii) 成分波間の非線型干渉項、(iii) 減衰状態におけるエネルギーの減衰項、(iv) 逆風によるエネルギー減衰項、(v) 底面摩擦項、(vi) 浸透項、が直接的な関数表示の形で考慮されている。そして各項の表示式は (i)~(vi) に対応してそれぞれ、(i) Barnett の式 $\beta_B E(f, \theta)$ 、(ii) Barnett のパラメータ式の修正式 $\Gamma - \tau E(f, \theta)$ 、(iii) Gelci らの式 $-D_d E(f, \theta)$ 、(iv) 磯崎らにならって Miles 機構が減衰項として作用すると仮定した井上による波の発達式 $-\beta_I E(f, \theta)$ 、(v) Collins の式 $-D_f E(f, \theta)$ 、(vi) Shemdin らの式 $-D_p E(f, \theta)$ 、である。これらは順風状態 ($|\theta - \theta_w| < \pi/2$) の風波 (a) およびうねり (b) と逆風状態 ($|\theta - \theta_w| > \pi/2$) のうねり (c) に対して次式のように与えられる。

$$S(f, \theta) = \begin{cases} \text{(a)} \quad \Gamma + (\beta_B - \tau - D_f - D_p) E(f, \theta) \\ \quad \quad \quad ; f > \delta f_{PM} \text{ and } E(f) \leq E_L^w(f) \\ \text{(b)} \quad \Gamma - (\tau + D_d + D_f + D_p) E(f, \theta) \\ \quad \quad \quad ; f \leq \delta f_{PM} \text{ or } E(f) > E_L^w(f) \\ \text{(c)} \quad \Gamma - (\beta_I + \tau + D_d + D_f + D_p) E(f, \theta) \\ \dots\dots\dots (2) \end{cases}$$

ここに、 θ_w ：風向、 f_{PM} ：Pierson-Moskowitz スペクトルのピーク周波数、 δ ：補正係数 (0.8)、 $E(f)$ ：周波数

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科

** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部海洋工学科

*** 正会員 工修 出雲グリーン株式会社

**** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科

スペクトルおよび $E_{\infty}^2(f)$: 浅海平衡周波数スペクトル, であり, 本モデルでは $f \leq \delta f_{PM}$ の周波数領域では常によりなることが仮定されている. また, 風波の発生項は実用上無視する風速 $U_{10}=2\text{ m/s}$ に対する Pierson-Moskowitz スペクトルおよび $\cos^4 \theta$ 型方向分布関数から計算される方向スペクトルを初期値として与えることにより考慮する.

一方, 砕波によるエネルギー減衰項の表現は, 発達段階にある波浪は砕波によって平衡周波数スペクトルで表わされる以上のエネルギーを獲得できないことおよび方向分布関数は砕波によっても不変であることを仮定して次式により行われる.

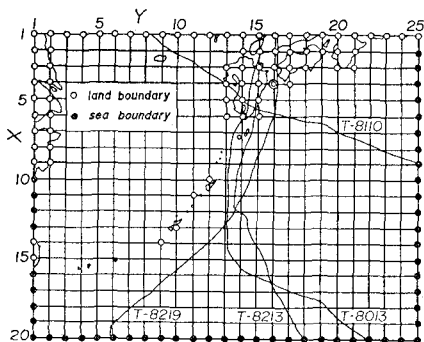
$$E_{\text{new}}(f, \theta) = E_{\text{old}}(f, \theta) \{E_{\infty}(f)/E_{\text{old}}(f)\} \dots (3)$$

ここに, 添字 old および new は砕波前および砕波後を示す. そして砕波の評価に用いられた平衡周波数スペクトルは Kitaigorodskii らの高周波側に対する平衡スペクトルとピーク周波数付近に対する JONSWAP スペクトルを組み合わせた TMA スペクトルの修正式である.

また, 式(1)の数値積分は右辺を0とした移流伝播方程式と移流伝播項を0とした発達・減衰方程式を1タイムステップ内で交互に解く時間分割法を使用する. そして移流伝播項の計算には piecewise ray method と方向に関する1次内挿補間式を併用する方法を採用する一方, 発達・減衰計算は各タイムステップの各格子点において移流伝播計算結果を初期値として解析解を使用して行う.

3. 外洋における波浪追算

まず, 外洋から瀬戸内海西部海域に伝播する波浪を評価するために, 西太平洋の一部および東シナ海を対象領域とした深海波浪の計算を行った. 計算に用いた周波数は $0.045 \sim 1.0\text{ Hz}$ の20個, 方向は $0 \sim 360^\circ$ を $\Delta\theta = 20^\circ$ ごとに分割した19個である. 一方, 海上風は台風内の気圧分布を Meyer 式で近似するとともに, 台風半径, 気圧深度, 吹き込み角および台風位置を1時間ごとに与



図一 外洋における計算格子網

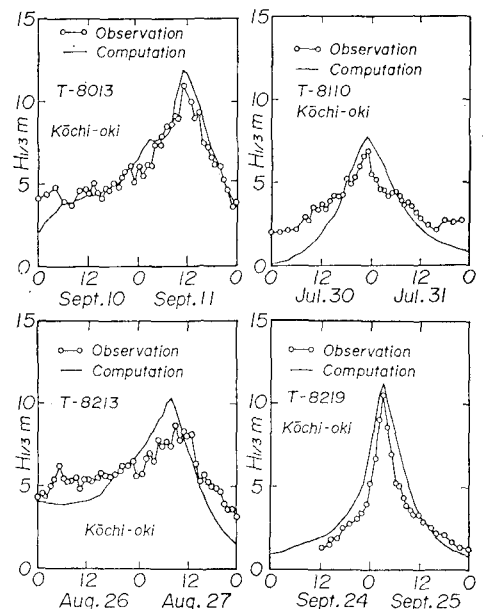
えた台風モデルにより推定した. 図一1 は計算格子網および波浪追算の対象とした台風 8013 号, 8110 号, 8213 号および 8219 号の経路を示したものである. 計算は格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 80\text{ km}$ の計算格子間隔に対して計算時間間隔 $\Delta t = 1\text{ hr}$ で実施したが, 外洋に面した境界では Ross model に基づく JONSWAP 型スペクトルと Hasselmann らの方向分布関数から計算される方向スペクトルを流入方向に与えた⁹⁾. そして, 豊後水道に位置する格子点での方向スペクトルを瀬戸内海西部海域に対する境界条件として記憶させた.

図一2 は4台風時の高知沖における有義波高の観測結果と計算結果の比較を示したものである. これらの図によれば, 8110 号および 8213 号時の計算結果は発達初期におけるうねりを若干過小評価するし, 逆に 8219 号時には過大評価するけれども, 計算結果は観測結果を比較的良く再現すると言えるであろう. また, 図一3 は台風 8013 号時の高知沖における周波数スペクトルを観測結果と計算結果について示したものであり, 波高の対応が良好であれば, ピーク周波数やスペクトル形状も相互に良く対応することがわかる. 以上のことから, 高知沖に近い豊後水道での波浪は台風モデルに基づいて海上風を推定した深海波モデルにより適切に評価できると判断される.

4. 瀬戸内海西部海域における波浪追算

(1) 計算方法

瀬戸内海西部海域における波浪追算は外洋で計算された豊後水道における方向スペクトルを流入境界条件とし



図二 有義波高の観測結果と計算結果の比較 (1)

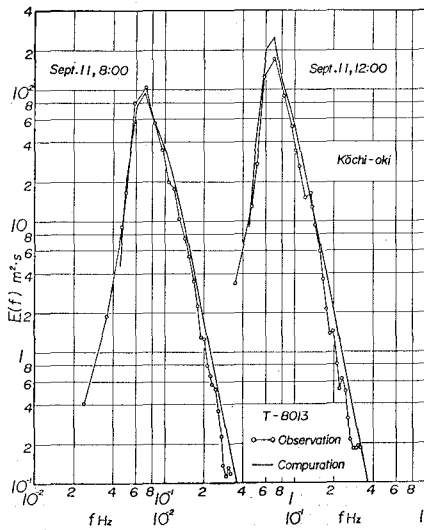


図-3 周波数スペクトルの観測結果と計算結果の比較

と与えるとともに、海上風を実測風の平面内挿補間^{7),8)}から推定した浅海波モデルにより実施した。また、計算に及ぼす海底地形の影響を検討するため、深海波モデルによる波浪追算も行った。

図-4 は格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ km}$ で 30×35 に分割した計算格子網および実測風の平面内挿補間に基づく海上風の推定法を適用する場合に用いる三角形要素網を示したものであり、三角形要素網の各頂点が風速計設置点に対応する。実際の数値計算は、当該海域周辺の 17 地点における 1 時間ごとの風向風速記録に平面補間式と時間に関する線型内挿式を適用して 20 分ごとに推定した海上風を吹送させるとともに、外洋と接続する豊後水道の境界で外洋での波浪追算結果を 4 min ごとに線型内挿して流入方向に与えることにより実施された。この際、他の境界は陸地境界であると仮定し、方向スペクトルを

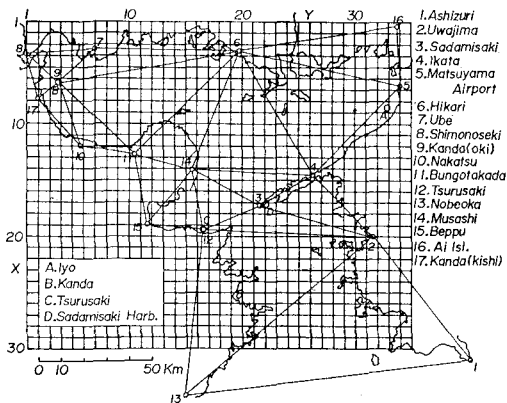


図-4 瀬戸内海西部海域における計算格子網

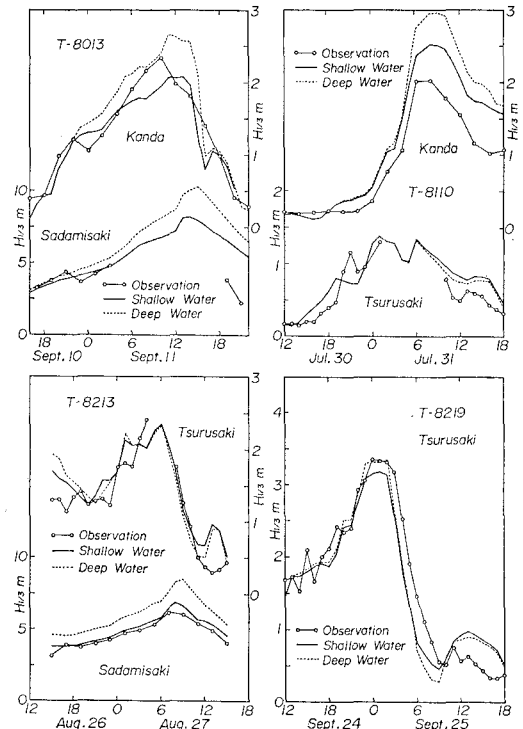


図-5 有義波高の観測結果と計算結果の比較 (2)

0 と置いたし、浅海波モデルの適用に必要な当該海域の水深として海図から読み取られた値に平均潮位を加えたものを使用した。

(2) 観測結果との比較

図-5 は前述の 4 台風時における瀬戸内海西部海域各地での有義波高の観測結果と計算結果を比較したものである。まず、台風 8013 号時の刈田 (水深 9m) では、いずれの計算結果も観測結果の経時変化を良く再現しているが、最盛時付近の観測結果は浅海波モデルと深海波モデルによる計算結果の中間に図示される。一方、佐田岬漁港 (水深 15m) では最盛時付近の観測結果が得られていないので、十分な比較が行えないけれども、発達期前半での外洋から侵入する波浪の傾向は良く再現されている。また、台風 8110 号時における刈田ではいずれの計算結果も最盛時における観測結果を過大評価するけれども、浅海波モデルによる結果は深海波モデルに比べて観測結果に近い値を与える。一方、鶴崎 (水深 24m) では観測結果が取得されていない最盛時を除けば計算結果は観測結果と良く一致する。ただし、別府湾内に位置する鶴崎では刈田に比べて観測水深が大きく、発生波浪も小さかったため、両者のモデルによる相違は小さい。つぎに、台風 8213 号時の鶴崎および佐田岬漁港での結果をみると、佐田岬漁港では外洋から侵入する波浪が直接入射するので、波高の絶対値そのものが非常に大きい

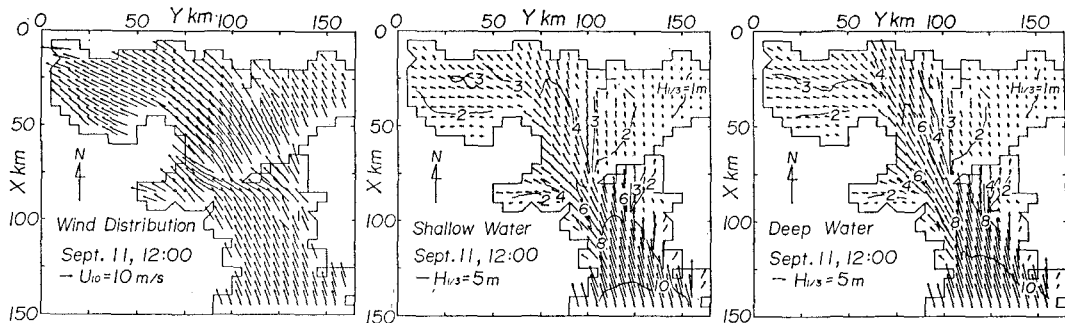


図-6 海上風の推定結果および有義波高の平面分布

が、その変化特性は浅海波モデルにより比較的良く再現される。しかし、より詳細には浅海波モデルによる結果も観測結果より大きい値を与えるし、深海波モデルはかなり観測結果を過大評価する。一方、鶴崎では波高計設置水深が比較的大きいので、両者の計算結果の相違は小さく、観測結果との対応も良好である。さらに、台風8219号時の鶴崎では、計算結果は観測結果の傾向と良く一致するが、浅海波モデルは最盛時付近で観測結果よりやや小さい値を与える。

以上の比較によれば、浅海波および深海波モデルのいずれもが観測結果の経時変化特性を比較的良く再現するが、対象地点の水深が小さい場合にはおおむね浅海波モデルによる追算結果が観測結果とのより良好な対応を与える。

(3) 波浪分布に及ぼす海底地形の影響

ここでは浅海波および深海波モデルを用いた波浪追算結果の比較から、海底地形変化が波浪の平面分布特性に及ぼす影響を考察する。図-6は台風8013号の台風中心が九州中部にあった11日12時における海上風ベクトルと両モデルに基づく有義波高の等値線図およびカスター図(有義波高を矢印の長さで、平均波向を方向で表示した図)を示したものである。この時点における海上風はほぼ台風中心に関して反時計方向の空間変化を示し、豊予海峡付近で局所的な地形の影響を受けるが、豊後水道でS方向をもつ風が周防灘ではしだいにSE方向に変化している。また、台風中心より離れた伊予灘東部の海域では風速が減少している。一方、有義波高の平面分布図によれば、局所風向にほぼ対応した波向を示す周防灘西部および伊予灘では、浅海波モデルによる波高は深海波モデルによる結果とほぼ同様な平面分布を示すのに対し、豊後水道および豊予海峡から国東半島東部および山口県防府市付近に至る海域では外洋から伝播する波浪の影響が卓越し、高波域が形成されている。また、浅海波モデルによる結果では水深の制約に伴う浅海性砕波の影響を受けて豊予海峡から伝播する波浪の規模が深海

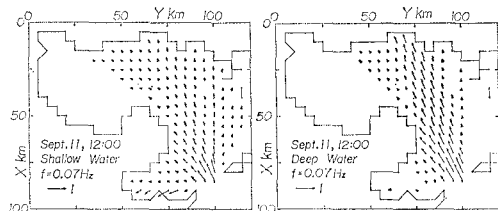


図-7 低周波数成分波の周波数スペクトル密度の平面分布

波モデルによる結果に比べて1m程度小さい。しかし、外洋から侵入する長周期波浪と局所風に伴う風波が混在するので、全周波数に関する平均波向に及ぼす水深の影響はこれらの高波域においても明らかでない。そこで、外洋から侵入する長周期波浪に及ぼす海底地形の影響をより詳細に検討するため、 $f=0.07\text{ Hz}$ をもつ成分波の周波数スペクトルに関するカスター図(矢印の長さは豊予海峡における値で無次元化された周波数スペクトル密度を、矢印の方向がその平均波向を表わす)を浅海波および深海波モデルの計算結果について示したのが図-7である。深海波モデルでは豊予海峡からNNW方向に伝播する成分波は直進するので、佐賀関半島、佐田岬半島および国東半島によって幾何学的にしゃへいされる別府湾、伊予灘西部および周防灘東部には外洋からの伝播波浪が到達しない。これに対して、浅海波モデルによる結果では成分波のエネルギーは豊予海峡を通過した直後に急減するけれども、屈折によりこれらの海域にも伝播するので、長周期波は深海波モデルによる結果に比べて空間的に広がった分布を示す。図-8は図-7と同時刻の鶴崎における周波数スペクトルを両モデルに基づく計算結果について比較したものである。これによると、局所風によって発達する高周波側のスペクトルはほぼ同じであるが、一方、低周波側では浅海波モデルの結果に外洋から伝播する波浪に対応するピークが存在するので、両者のスペクトルに大きな相違が現われる。また、図-9は同時刻の方向スペクトルの等値線分布を示

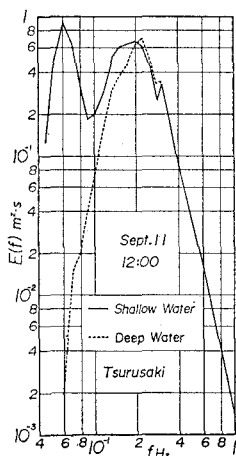


図-8 周波数スペクトルの比較

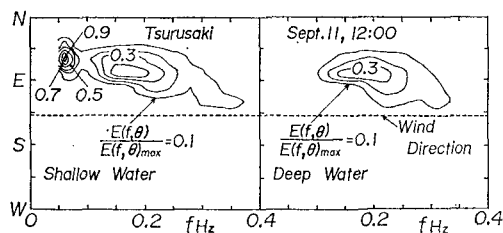


図-9 方向スペクトルの比較

したものであり、等値線の値は浅海波モデルによる方向スペクトルの最大値で無次元化されている。両者を比較すると、高周波側の方向スペクトルは相互に良く似ているのに対し、浅海波モデルによる結果の低周波側にはENE方向からの顕著なうねりが見られる。0.06 Hzのピーク周波数をもつこのうねりはその周波数から判断して内海で発生した波浪成分でなく、屈折により外洋から伝播したものである。

5. 結 語

以上、本研究では著者らが開発した浅海波推算モデルを用いて外洋から長周期波浪が侵入する台風時の瀬戸内海西部海域における波浪推算を実施し、観測結果との比較から本モデルの適用性を明らかにした。すなわち、

まず外洋から瀬戸内海西部海域に伝播する波浪は、台風モデルに基づいて海上風を推定した深海波モデルにより適切に評価できることが高知沖における観測結果との比較から確認された。ついで、瀬戸内海西部海域における波浪は、海上風を実測風の平面内挿補間により推定した場合、浅海波および深海波モデルのいずれによっても比較的精度良く再現されるけれども、対象海域の水深が小さい地点での波浪は水深の制約に伴う浅海砕波の影響が増大することから、浅海波モデルによってより良好な精度で推定されることがわかった。また、低周波数成分波は浅海域で屈折および shoaling により著しく変形するので、スペクトルなどの詳細な波浪特性を推定するためには浅海波モデルを使用する必要があることが示唆された。

最後に、貴重な風および波資料を提供戴いた運輸省第三および第四港湾建設局を始めとする関係各省庁に謝意を表明するとともに、本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究(2)(代表 山口正隆)および奨励研究(A)(畑田佳男)による研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- Collins, J. I.: Prediction of shallow water waves, Jour. Geophys. Res., Vol. 77, No. 15, pp. 2693~2707, 1972.
- Cavaleri, L. and P. M. Rizzoli: Wind wave prediction in shallow water; theory and applications, Jour. Geophys. Res., Vol. 86, No. C11, pp. 10961~10973, 1981.
- Golding, B.: A wave prediction system for realtime sea state forecasting, Quart. Jour. Royal Meteorol. Soc., Vol. 109, pp. 393~416, 1983.
- 山口正隆・畑田佳男・細野浩司・日野幹雄: エネルギー平衡方程式に基づく浅海波の数值予知モデルについて, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 123~127, 1984.
- 山口正隆: 波浪推算法とその適用性, 1985年度(第21回)水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, 土木学会水理委員会, B-2-1~20, 1985.
- 山口正隆・畑田佳男・日野幹雄・小淵恵一郎: エネルギー平衡方程式に基づく浅海波推算モデルの適用性について, 土木学会論文集, No. 369/II-5, pp. 233~242, 1986.
- 山口正隆・渡辺 健・畑田佳男: 大阪湾における海上風の平面分布特性について, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 168~172, 1981.
- 山口正隆・畑田佳男・大福 学: 瀬戸内海西部海域における海上風の平面分布特性, 愛媛大学工学部紀要, 第11巻第1号, pp. 291~300, 1986.