

複断面彎曲開水路流れの水理特性に関する実験的研究

Characteristics of Flow in a Curved Open Channel with Flood Plains

京都大学防災研究所 正員 今本 博 健

京都大学防災研究所 正員 石 垣 泰 輔

1. はじめに

複断面彎曲開水路における流れは、複断面開水路流れの特性と彎曲開水路流れの特性とが絡み合い、きわめて複雑な性状を示す。すなわち、複断面開水路では低水路部と高水敷部との境界付近に強いせん断力が働き、流体は激しく混合される。^{1),2)} また、高水敷先端付近より自由水面に向かう斜昇流が現われ、平均速度が比較的小さく、かつ乱れ速度の大きな領域が斜昇流を囲むように形成される。³⁾ 一方、彎曲開水路流れについては、水面付近と路床付近の流れに作用する遠心力の差により、水路横断面全体に広がるらせん流の形成されることがよく知られている。^{4),5)} したがって、複断面彎曲開水路流れは、両者の特性が干渉し合ったものになると考えられるが、詳細については不明の点が多い。

本研究は、複断面彎曲開水路流れの水理特性を解明するための基礎として、ホットフィルム流速計およびプロベラ流速計を用いた点計測と流れの可視化法を用いた面計測により、流れの内部構造について実験的検討を行なったものであって、複断面開水路流れ特有の斜昇流と彎曲開水路流れ特有のらせん流との相互作用について、いくつかの興味ある結果が得られている。

2. 実験装置および方法

実験水路は、水路幅 $B=20$ cm、水路中心の曲率半径 $r_c=60$ cm、路床勾配 $I=1/500$ の 180° 彎曲水路である。また、彎曲部の上・下流側には、それぞれ 3.1 m および 4.1 m の直線区間が設けられている。実験では幅 6 cm、高さ 1.06 cm の高水敷が両側壁に沿い水路全長にわたって敷設されている。なお、流量は高水槽内の三角ぜきで計量するとともに、下流端の可動ぜきにより水位の調節を行なっている。

流速の計測には、直径 3 mm のプロベラ流速計および直径 $70\ \mu\text{m}$ 、長さ 1.25 mm の円柱形受感部を2個組合せたX型ホットフィルム流速計の2種の流速計を用いた。流速計の出力は、プローブを清水中で移動させる検定法により得られた検定曲線を用いて速度に交換した。

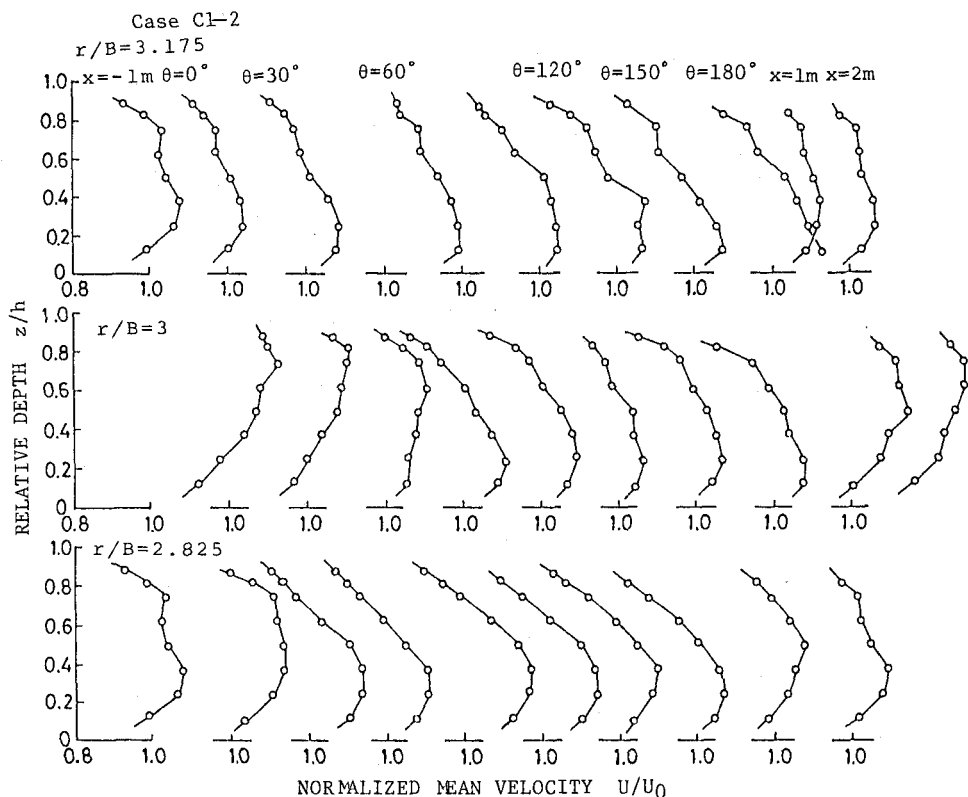
流れの可視化には、平均粒径 0.006 cm の砂粒子、直径約 0.2 cm の電算パンチ屑、平均粒径 0.011 cm の塩化ビニル粒子およびアルミニウム粉末を塗布したおが屑をトレーサーとして用い、 35 mm スチルカメラでその動きを撮影した。

3. 実験結果および検討

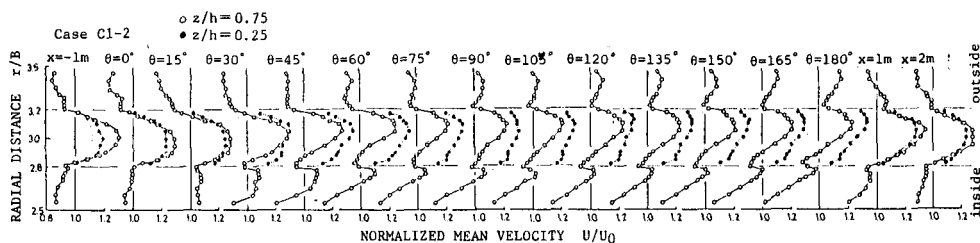
実験結果の整理に用いた座標系は、直線部では流下方向を x 軸（彎曲部入口より上流側を負、彎曲部出口より下流側を正とする）、横断方向を y 軸、鉛直上向を z 軸とする直交座標系であり、彎曲部では流下方向を θ （彎曲部入口を $\theta=0$ ）とする、横断方向を r 、鉛直上方を z とした円柱座標系である。なお、以下に示す結果は、流量 $Q=0.6441/\text{s}$ 、低水路水深 $h_o=2.00$ cm、レイノルズ数 $Re=2330$ の場合のものである。

3.1 点計測による流速分布特性の検討

図-1は、低水路内の鉛直分布を外岸側 ($r/B=3.175$)、水路中央 ($r/B=3.0$) および内岸側 ($r/B=2.825$) で示したものである。図より、上流側直線部では斜昇流の存在により高水敷高さ付近で極小値をもつ複断面特有の分布形状を示しているが、彎曲部に入ると2次流の影響により流下とともに路床付近で増加、自由水面付近で減少し、複断面開水路流れ特有の分布特性は認められない。また、最大流速点は流下とともに下降し $\theta=60^\circ$ 付近で相対水深にして 0.2 付近となり、彎曲部出口まであまり変化しない。



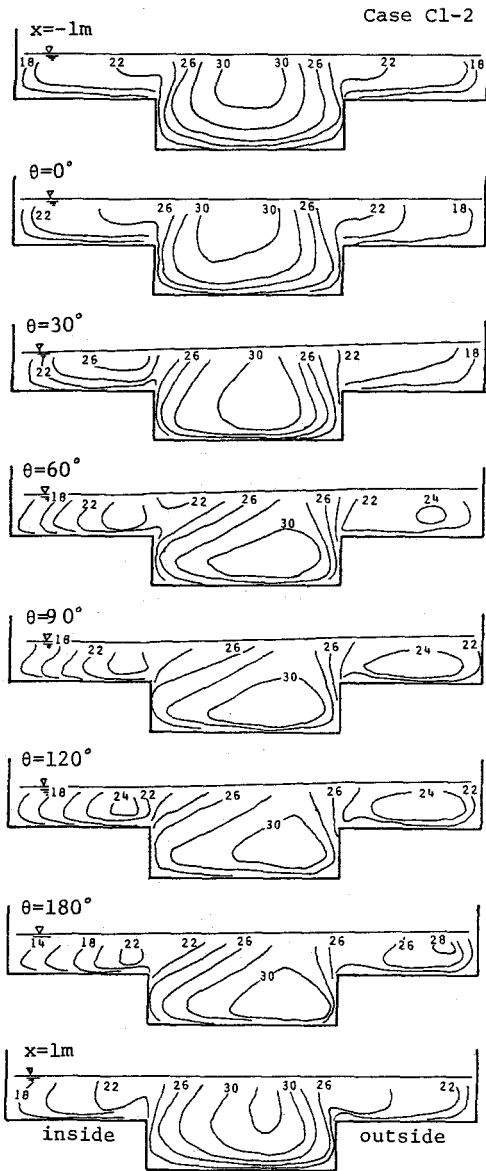
図一 平均速度の鉛直分布



図二 平均速度の横断分布

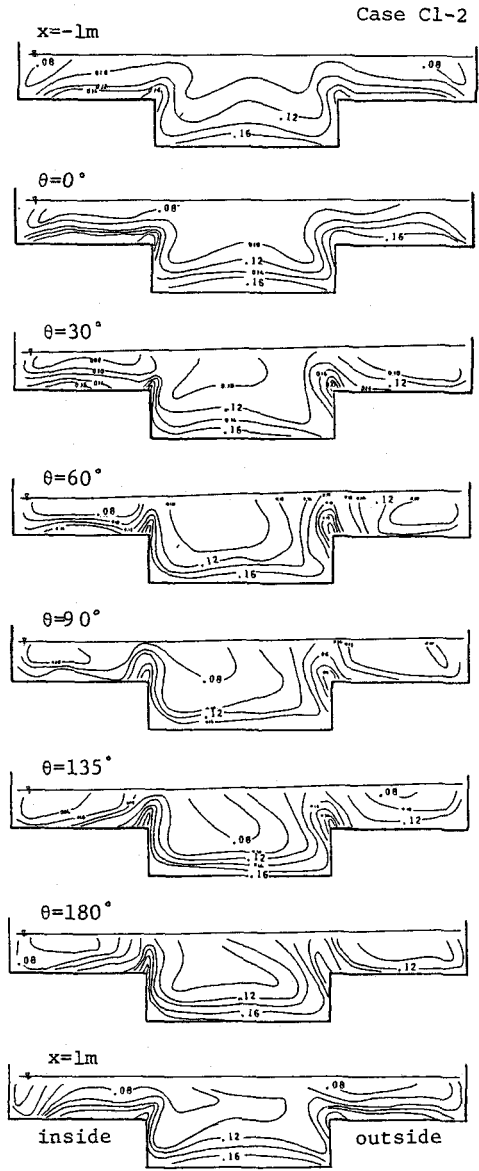
つぎに、横断分布特性について検討する。図-2は、高水敷上水深の半水深付近および高水敷高の半高さにおける計測結果を示したものである。図より、彎曲部内においても高水敷先端付近に流速の極大値および極小値をもつ分布特性を示しており斜昇流の存在が推測される。また、全体をみると、内・外岸側高水敷上および低水路内で変化特性は異なるものの、彎曲の影響により自由渦型横断分布から強制渦型横断分布へと移行する過程が認められる。

以上の結果を用い横断面内の等流速線を図化すると図-3のようになる。図より、上流直線部においては高水敷先端付近より低水路内自由表面に向って広がる低平均速度領域が存在するとともに、低水路内の高平均速度の領域が高水敷上の自由表面近傍へと広がっている。彎曲部に入ると、内岸側高水敷上先端付近の低平均速度領域の存在が明確となり、直線部に比して低水路中央寄りに位置する一方、外岸側高水敷先端付近



CONTOUR LINE OF MEAN VELOCITY U (cm/s)

図-3 横断面内の等平均速度線図



CONTOUR LINE OF RELATIVE TURBULENCE INTENSITY u/u_0

図-4 横断面内の等乱れ速度線図

の低平均速度領域はやや外岸側に片寄る。また、低水路内の最大流速域に着目すると、上流側直線部において水路中央自由表面近傍に位置した領域は、彎曲部流入後内岸側に移行したのち、流下とともに外岸側路床付近へと移っている。最大流速域の移行過程は高水敷上でもほぼ同様であるが、高水敷上の領域は低水路内には移行せず、複断面彎曲流では高水敷上および低水路内の領域に区分された内部構造をもつと考えられる

一方、図-4は乱れ速度の流下方向成分 u の計測結果を横断面内の等乱れ速度線で示したものである。図より、高水敷先端付近より自由水面に広がる高乱れ速度領域は、彎曲部内岸側では鉛直上方に向い、外岸側では低水路自由表面に向っている。これらの領域は、彎曲らせん流と反対回りの2次流が形成され、激しい流体の混合が生じていると考えられる。

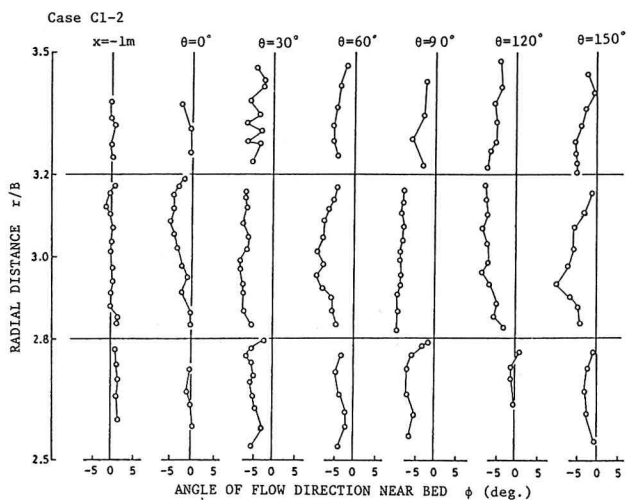


図-5 路床付近の流向の横断分布

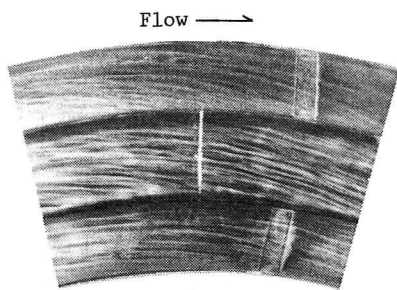


写真-1 路床付近の流況

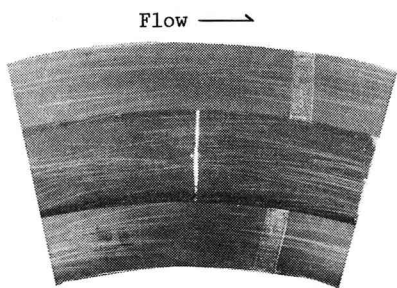


写真-2 自由表面付近の流況

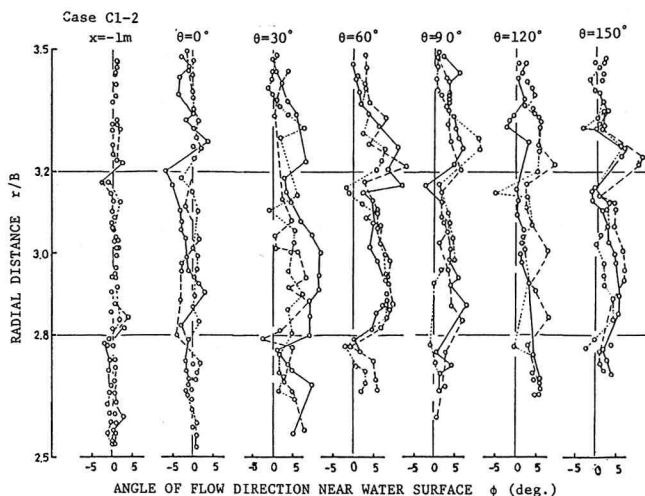


図-6 自由表面付近の流向の横断分布

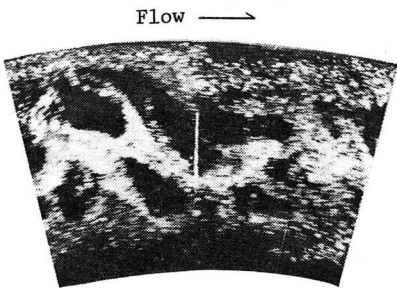


写真-3 表面ボイル

3.2 可視化法による流況特性の検討

複断面彎曲開水路流れの路床付近および自由表面付近の流況を可視化法により観察し、流れの内部構造について検討を行なった結果を以下に示す。

路床付近の流況を、圭砂8号をトレーサーとして撮影した例が写真-1である。このような写真よりトレーサーの軌跡を図化し、各断面において接線方向からの偏角を外岸側を正として測定した結果を示すと図-5のようになる。図より、路床付近では内岸向きの流れが卓越していることが知れる。

つぎに、自由表面付近の流向を見るために、電算パンチ屑をトレーサーとして可視化実験を行なった。撮影例を写真-2に示す。路床と同様の方法で流向を測定して整理すると図-6のようになる。図より、彎曲部では偏角 ϕ は高水敷先端付近($r/B=2.8, 3.2$)をのぞいて正となっており、外岸側へ向う流れが卓越している。また、高水敷先端付近で ϕ が負となっている部分は彎曲らせん流の反対回りの2次流が形成されていると考えられる。さらに、高水敷先端付近の流況を塩化ビニル粒子をトレーサーとして観察した。その結果



写真-4 カメロン撮影例 ($\theta=90^\circ$)

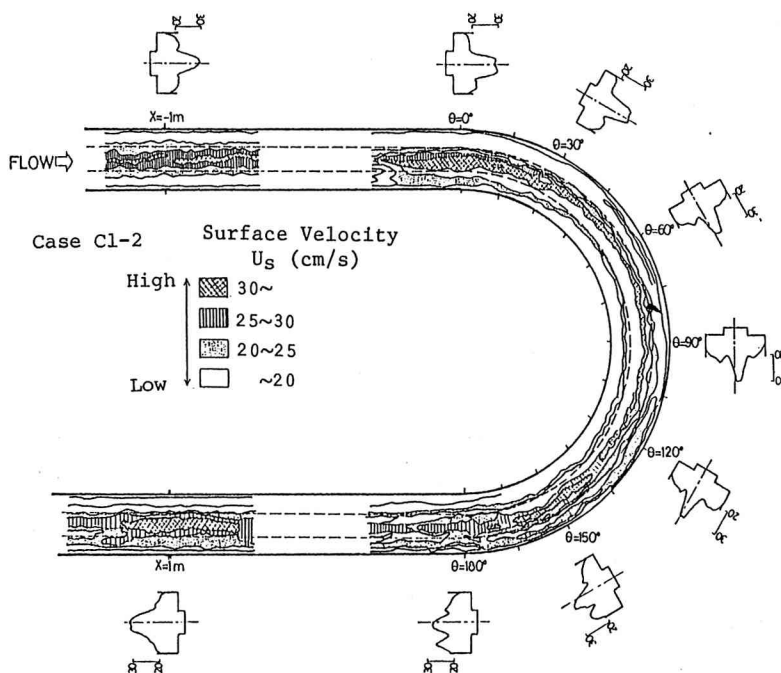


図-7 カメロン撮影結果による等速度線図

写真-3に示すようにトレーサーが周囲に押しやられている領域が高水敷先端付近で観察された。この領域は、流体が下方より水面に達しボイル状の渦を形成する部分と考えられる。これらの表面ボイルは、彎曲部に入ると発生個数が増加し、その発生位置も直線部では高水敷先端よりやや低水路内にあったものが、内岸側では低水路内に、外岸側では高水敷上に押し寄せられる。⁹⁾

以上より、路床付近では内岸向き、自由表面では外岸向きの流れが卓越しており彎曲らせん流が形成されていることが知れるが、さらに詳しく検討するために、カメロン効果⁷⁾を利用して自由表面における瞬間速度の平面分布の可視化を行なった。撮影は、微小時間間隔 30ms にて2台の35mmスチルカメラを用いて行ない写真-4のような結果が得られた。これら2枚の写真を実体視し、図化機にて等流速線図を抽いたものが図-7である。なお、各区間の瞬間速度分布を連らねることには問題はあるが、高速部および低速部の位置はそれほど変化せず、定性的な検討を行う上ではそれほど問題とならないと考えられる。

図より、彎曲流入直前より外岸側に比し内岸側高水敷上の速度が増加するとともに低水路内でも高速部が内岸側に偏っている。低水路内および内岸側高水敷上の高速部は、 $\theta=30^\circ$ 付近まで外岸側へ移行し、 $\theta=60^\circ$ 付近から彎曲部を流出するまで外岸寄りに位置している。一方、外岸側高水敷上では、彎曲部流入後

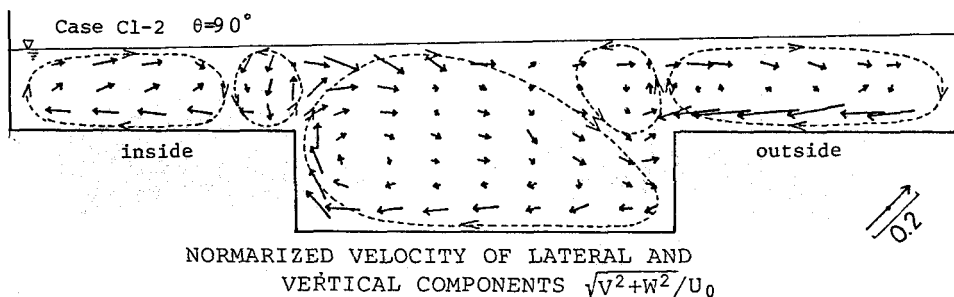


図-8 横断面内の速度ベクトル図

一様に流速が減少し、 $\theta = 90^\circ$ を過ぎた付近より外岸側に高速部が現われ、 $\theta = 150^\circ$ 付近では低水路内と同程度の高速部へと発達している。このように、複断面彎曲開水路流れでは低水路部と内・外岸側高水敷上で独立したらせん流が発生・発達している。

以上の結果と図-8に示した速度ベクトルの計測結果より流れの内部構造について検討する。図-8より路床付近で内岸向、自由表面付近で外岸向の流れが卓越しており、彎曲らせん流の形成が見られ、これは流向の可視化結果とも一致する。また、カメロン撮影結果において、高速部は2次流が下降する部分に相当し、低速部は2次流が上昇する部分に相当することを考慮すれば、高水敷先端付近で上昇部と下降部が存在することが確認される。以上の2点と彎曲らせん流が低水路部と高水敷部で独立に発生・発達することにより、複断面彎曲開水路流れでは、図-8の破線で示すような2次流の配列が推定される。⁸⁾

4. おわりに

本研究では、複断面彎曲開水路流れの水理特性について実験的検討を加え、以下の点が明らかとなった。すなわち、1) 複断面彎曲開水路においては、複断面開水路流れ特有の斜昇流と彎曲開水路流れ特有のらせん流が共存している。2) その結果、低水路部と内・外岸側高水敷部で独立に彎曲らせん流が発生・発達する。3) 以上より、複断面彎曲開水路流れの内部構造は、低水路部および内・外岸側高水敷部での彎曲らせん流と斜昇流により喚起される反対回りの2次流により表わされる。今後は、流れの3次元構造および抵抗特性について研究を進めて行く予定である。

参 考 文 献

- 1) Zheleznyakov, G.V.; *Gidravlicheshe obosnovanie metodov rechnoi gidrometrii*, Izdatelstvo Akademii Nauk, SSSR, Moskva-Leningrad, 1950.
- 2) Sellin, R.J.H.; A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain, *La Houille Blanche*, No.7, 1964, pp.793-802.
- 3) 今本博健, 久下俊夫: 複断面流れの水理特性に関する基礎的研究, 京都大学防災研究所年報, 第17号B, 昭49, 10, pp.665-669.
- 4) Boussinesq, J.; *Memoire sur l'influence de frottement dans les mouvement reguliers des fluids*, XII *Essai sur le mouvement permanents d'un liquid dans un canal horizontal a axe circulaire*, Jour. de Math. Pures et Appl., 2^{eme} Serie, Tome XIII, 1868, p.413.
- 5) Thomson, J.; On the origin of windings of rivers in alluvial plains with remarks on the flow of water in bends in pipes, *Proc. Royal Soc.*, A25, 1876, p.5.
- 6) 石垣泰輔, 今本博健, 稲田修一: 複断面開水路彎曲流の流況特性に関する実験的研究, 第36回土木学会年次学術講演会講演概要, Ⅱ-231, 1981.
- 7) Cameron, H.I.; *Measurement of water current velocities by Parallax Method*, *Photogrammetric Engineering* 18, 1952.
- 8) 今本博健, 石垣泰輔, 藤沢 寛: 複断面彎曲開水路流れの水理特性について(1), 京都大学防災研究所年報, 第25号B-2, 昭57.4, pp.529-543.