

II-44

ヨシを有する河岸の浸食・堆積に関する大型水路実験

北海道大学 学生員 浅井 重政
 北海道大学 正員 長谷川 和義
 北海道開発局 正員 渡邊 康玄
 北海道開発局 正員 金高 州吾

1. はじめに

現在、河川の改修工事などにおいて、自然の生態系をできるだけ損なわない形となるように施工を行おうとする気運が高まっている。そこで、実際に河岸に生えている植生を用いて護岸を施そうとする発想が生まれた。これまでに葦などがその植生の候補にあがり、護岸効果などに関する研究⁽¹⁾がなされるようになった。しかし、これまでの研究の大部分は、矩形水路あるいは水平な高水敷上に植生がある場合を想定し、しかも、植生の配置は整った配列でなされているものが多い。本研究では、より実際に近い現象の再現を念頭に置き、実スケールに近づけた大型水路の河岸斜面部に人工葦をランダムに配置し、河床を移動床として実験を行った。本実験をもとに、河岸に存在する葦が全体の流況や河岸の浸食・堆積にいかなる影響を与えるかについて検討を加えた。

2. 実験水路・実験条件

(1)実験水路： 本実験は、北海道開発局開発土木研究所石狩水理実験場にある屋外に設置された幅4m、長さ40mのコンクリート製直線大型水路⁽²⁾に火山灰土からなる河岸・河床を設け、その中流部の側岸上に人工葦を植え付けて行われた。実験水路の平面図と横断面図を図-2と図-3に示す。

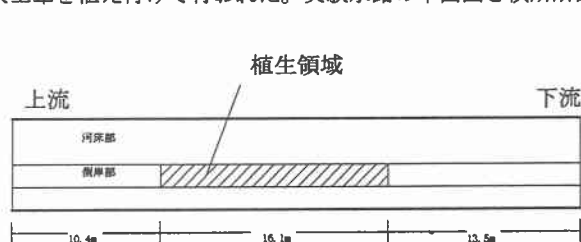


図-2 実験水路平面図

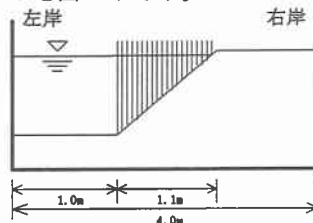


図-3 実験水路横断面図

上図に示すように、植生領域は水路流下方向に16.1m、横断方向に1.1mとなっている。側岸形状は、裸地実験との比較のために金高らの実験⁽³⁾と同一にしている。また、実験水路上流端からはベルトコンベアーを用いて給砂を行い、下流端には水面勾配を調節するための可動堰が設けられている。擬似植生として用いた人工葦は、直径5mm、長さ120cmの木製の棒である。これを、実際のヨシの生え方を参考に、実験水路の中流域の側岸斜面部に1600本/m²となるように一様乱数に従って配置をした。図-4に植生の配置の概略図と植え付けについての図を、また、写真-1に実験施設の様子を示す。

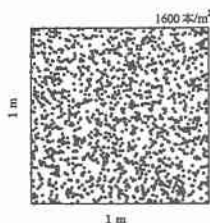


図-4 (a) 植生の配置

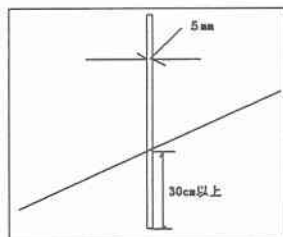


図-4 (b) 植生の植え付け

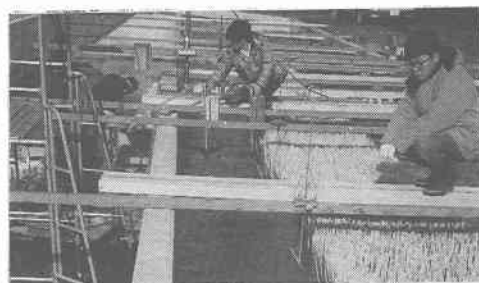


写真-1

An experimental study on bank erosion and accumulation in a large-scale experimental channel with reeds
 by Shigemasa ASAI, Kazuyoshi HASEGAWA, Yasuharu WATANABE, SHUUGO KANETAKA

(2)実験条件：実験の水理条件を表-1に示す。給砂量は芦田・道上の掃流砂量式⁽³⁾から決定し、植生帯の長さは側岸に植生帯を有する場合の流れの遷移域長を計算で求め、これを上まわるように決定した。⁽⁴⁾

表-1 実験の水理条件

流量	勾配	給砂量	累計通水時間	植生帯長さ
0.7m ³ /sec	1/1500	12 l/min	860min	16.1m

通水は4回に分けて行い、各通水時間を240分、220分、200分、200分とした。

(3)計測項目

計測項目は、通水時に水面勾配、流速、浮遊砂濃度（採水）であり、通水停止後に河床断面を計測した。各測定項目の測定地点、測定時間等の詳細は以下の通りである。

- (a)水面勾配：上流端から4, 6, 8, 10, 12, 15, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 32, 36mの計14点の水位を約1時間間隔にて測定。
- (b)流速：3次元電磁流速計2台並びに超音波流速計2台を用い、上流端から20mの地点において、横断方向に14点、鉛直方向に1～9点の計87点を30秒間、0.1秒間隔で測定。
- (c)浮遊砂濃度：上流端から19mの地点で、流速と同様に87点でサイフォンを利用して採水。ろ過によって重量パーセントを算定。
- (d)河床断面測定：上流端から16, 18, 20, 22, 24mの計5測線と植生区間の水路縦断形状を、通水前後にレベルと河床測定用スタッフを用いて測定。

3. 実験結果

(1)流れの性質

(a)流況：通水後、水路全体にわたって不等流状態が生じた。すなわち、植生区間が急縮状態をなし流速増大、水位低下が起こる一方、上流区間で堰上げが生じた。下流部では植生端からの剥離を伴う水位回復が見られた。このことは植生が密であるために、植生の粗度による影響よりも水路が急縮状態となった影響が大きくなったためと考えられる。植生区間内では、流路幅いっぱいのボイルが植生領域上端から2～3m間隔でわき上がっていた。また、それと前後して、植生域と非植生域の境界上の植生が大きく揺動しているのが確認された。植生境界では、植生域の遅い流れと非植生域の速い流れが混合して水平渦を発生させていた。しかし、従来指摘されてきたような、規則正しい渦列の発生は認め難かった。植生域内の流れは非常に弱く、境界から植生域に5cmほど入ったところで流速が急速に減少することが確認された。

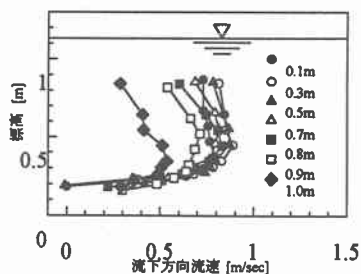


図-5(a) 非植生域の流下方向流速

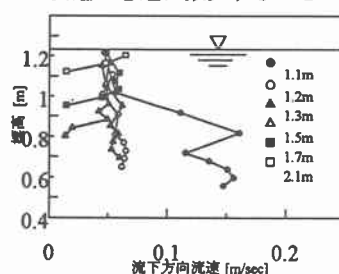


図-5(b) 植生域の流下方向流速

(b)流速分布：非植生域と植生域の流下方向流速の鉛直分布を図-5に示す。図中の数値は左岸コンクリート壁からの距離を示す。非植生域での流速は植生境界に近づくほど小さくなり、鉛直分布が放物線分布からはずれていくのがわかる。また、河床近傍での流速勾配が非常に大きくなっていることが注目される。植生域での流速は、植生境界に近いものが乱れているのを除けば横断方向にも鉛直方向にもほぼ一定の値を示しており、ほぼ一様分布を示している。

次に、水深平均流下方向流速 \bar{u} の横断分布図を図-6に示す。縦軸は \bar{u} 、横軸は左岸コンクリート壁からの距離であり、図中の u_0 は非植生域の一様流速部の速度、 u_1 は植生内部の一様流速部の速度を表している。図-5(b)にも表したように植生内部での流速は横断的にほぼ一様な分布をなしている。植生境界の近傍で大きな流速差が生じており、ここで大きな境界せん断力が起こっていることが推測される。

(2)河床変動

はじめに、図-7に植生区間の縦断河床形状の時間変化図を示す。植生境界近傍（左岸コンクリート壁か

ら1 m地点)で測定が行われた。植生区間全体に顕著な浸食低下が生じており、上流ほど浸食が激しい。これは、前述の急縮流れに対応して生じたものと考えられ、植生域外では河床の体積上昇が認められた。実験技術的には、給砂方式の改善を必要とする問題であるが、部分植生のおたらず河床変動として現実にも起こり得ることであり、注意が必要である。このほか実験では約2 m周期のDuneの形成が確認でき、ボイル発生位置などとの関連が考えられる。

次に、図-8 (a) (b)に側岸に植生がある部分の横断河床形状の時間変化図を示す。いずれも通水を開始して220分後には植生境界近傍で河床部の低下に伴う浸食が起こっているのがわかる。しかし、平成4、5年度に行われた裸地河岸の実験の場合とは異なり、側岸部の浸食は完全に抑制されており、むしろ、若干の堆積が起こるだけであった。これは植生によって流速及びせん断力が著減させられ、横断方向の土砂が静止させられた結果によるものである。このため浸食の進む植生境界への土砂供給が断たれ、通水時間後半には境界近傍の植生が根本まで浸食されるという現象が起こった。

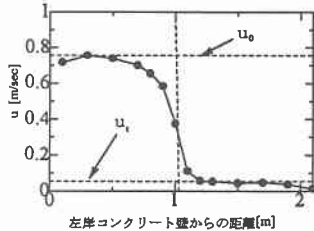


図-6 横断分布図

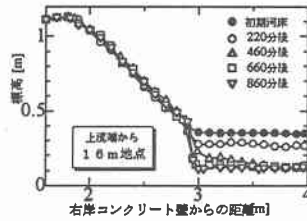


図-8 (a) 16m地点

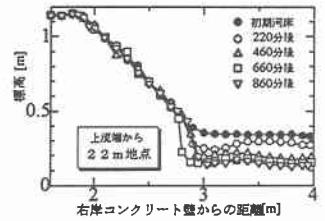


図-8 (b) 22m地点

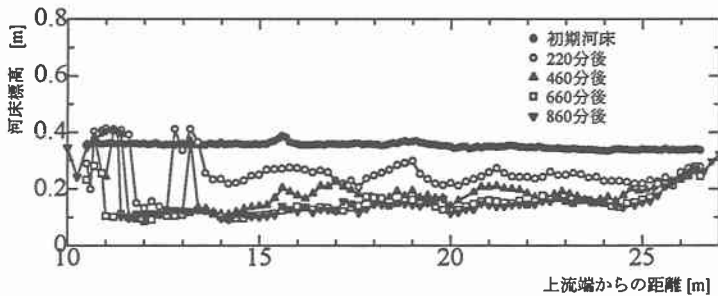


図-7 縦断河床形状の時間変化図 (植生区間)

4. 考察

(1) 植生境界せん断力

まず、植生による粗度を求めるために水路を河床部分だけの矩形水路だと仮定し、その矩形水路の合成粗度係数を実測の流速、エネルギー勾配、径深をManning式に代入して求める。ここでの合成粗度はコンクリート壁、河床および植生の3つの要素によって構成されているものとする。各要素の潤辺並びにコンクリート壁と河床の粗度係数を既知として合成粗度係数の分割を行い、植生の粗度係数を求める。河床の粗度係数は、この実験と同じ河床材料で行われた裸地河岸浸食実験(前述)の結果を用いた。分割した粗度係数から、植生に対応する径深 R_T を求め、それを式(1)に代入して境界せん断力を求める。

$$\tau_{bc} = \rho g R_T I_e \dots (1) \quad \text{ここで、} \tau_{bc} : \text{境界の粗度係数、} \rho : \text{水の密度、}$$

g : 重力加速度、 R_T : 植生に対応する径深、 I_e : エネルギー勾配である。

表-2に各通水回ごとに求められた境界せん断力値などを示す。植生境界上で水位を計測した1回目の通水の値はエネルギー勾配が負になるなど、精度上の難点があるのでここでは除外することにする。また、ここで用いたコンクリート壁の粗度係数は $0.013 (m^{1/3} \cdot sec)$ 、河床の粗度係数は $0.0242 (m^{1/3} \cdot sec)$ (摩擦係数で表して $C_f = 0.0058$)である。

表-2 境界せん弾力

通水回	V(m/sec)	Ie	N	n _T	R _T (m)	τ _{bc} (kg/m ²)
2回目	0.785	1/651	0.0233	0.0308	0.485	0.745
3回目	0.737	1/351	0.0345	0.0584	0.724	2.06
4回目	0.721	1/751	0.0242	0.0332	0.532	0.708

V：平均流速(m/sec)、N：合成粗度係数(m^{1/2}·sec)、n_T：植生の粗度係数(m^{1/2}·sec)

(2)境界混合係数F

境界せん断力を式(2)に代入して、境界混合係数Fを求める。

$$\tau_{bc} = \rho F(u_0 - u_T)^2 \quad \dots (2)$$

ここで、u₀：非植生領域の一樣流速部の速度、u_T：植生内部の一樣流速部の速度である。結果のFは、3回目通水で0.0370、4回目通水で0.0140という値となった。八木⁽⁶⁾によれば、境界混合係数は植生幅の増加とともに増加し、植生幅が2cmから40cmまで増加するとに伴って境界混合係数が0.005から0.017程度まで増加するとされている。今回の実験は植生幅が1mであり、上述の増加傾向が正しいとするならば、3回目通水の値は妥当なものと言えるが、2、4回目の値は大きく異なっている。さらなる実験データによる詳細な検討が必要であろう。

(3)流速分布

(a)鉛直方向分布

流下方向流速の鉛直分布について、渡邊ら⁽⁶⁾の樹木が存在する水平床河道における理論との比較を行う。この理論の基礎式は次式で表される。ここで、～のついた数字は有次元を示しており、g̃：重力加速度、H̃：水位、ε̃：渦動粘性係数、h̃：水深、ū：流下方向流速、ā：樹木密度、C_d：樹木の抗力係数である。

$$0 = -\tilde{g} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\tilde{\varepsilon} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} \right) - \tilde{a} C_d \tilde{u}^2 \quad \dots (3)$$

式(3)をu = ū / ū_a, a = ā h̃, z = z̃ h̃ によって無次元し、整理後に解いた式が式(4)である。

$$u = \sqrt{\frac{2}{a C_d}} + \frac{\kappa}{3a C_d} [C_0 \exp(\chi z) + C_1 \exp(-\chi z)] \quad \dots (4)$$

ここで、κ：カルマン定数、χ = (72aC_d / ε̃³)^{1/4} である。C₀, C₁は水面境界条件 du/dz = 0、河床境界条件 ε̃ du/dz = CfU_b²によって定められているが紙数の都合で再記しない。

式(4)にā = 1600 × 0.005 = 8 (本/m)、C_d = 1.20などの実験条件を入れて実測と比較したものを図-9に示す。この図において、横軸は上記の無次元流下方向流速、縦軸は河床からの高さを水深で無次元化したものである。また、図の右上にある数字は左岸コンクリート壁からの距離を表す。図から分かるように、理論値(白丸)は実測値(黒丸)より大きく表れれている。これは、理論が平坦河床上の植生を対象としているため、斜面効果を考慮しなかったことによるものと推測される。そこで、斜面上の摩擦速度が平坦河床上の摩擦速度のcos θ倍(θ：側岸斜面勾配)であると考え、理論値にcos θを掛けて比較する(図中△)。この場合には、実測とだいたい合っている。

(b)横断方向分布

鉛直方向分布と同様に、流下方向流速の横断分布の理論と実測の比較を試みる。側岸に樹木を有する河道に対する流下方向流速の横断分布が池田⁽⁷⁾らによって提示されている。同理論式の基礎式は次式で表される。ここで、C_f：河床の抗力係数、S：縦断方向河床勾配、ε_y：横断方向渦動粘性係数、D_c：河床中央部水深、ū：水深平均流下方向流速、C_D：植生の抗力係数、D：水深である。

非植生域の運動量のつり合い式

$$\rho C_f \bar{u}^2 = \rho g D_c S + \rho \varepsilon_y D_c d^2 \bar{u} / dy^2 \quad \dots (5)$$

植生内の運動量のつり合い式

$$\rho C_f \bar{u}^2 / \cos \theta = \rho g D S - \rho C_D a D \bar{u}^2 / (2 \cos \theta) + \rho \varepsilon_y d (D d \bar{u} / dy) / dy \quad \dots (6)$$

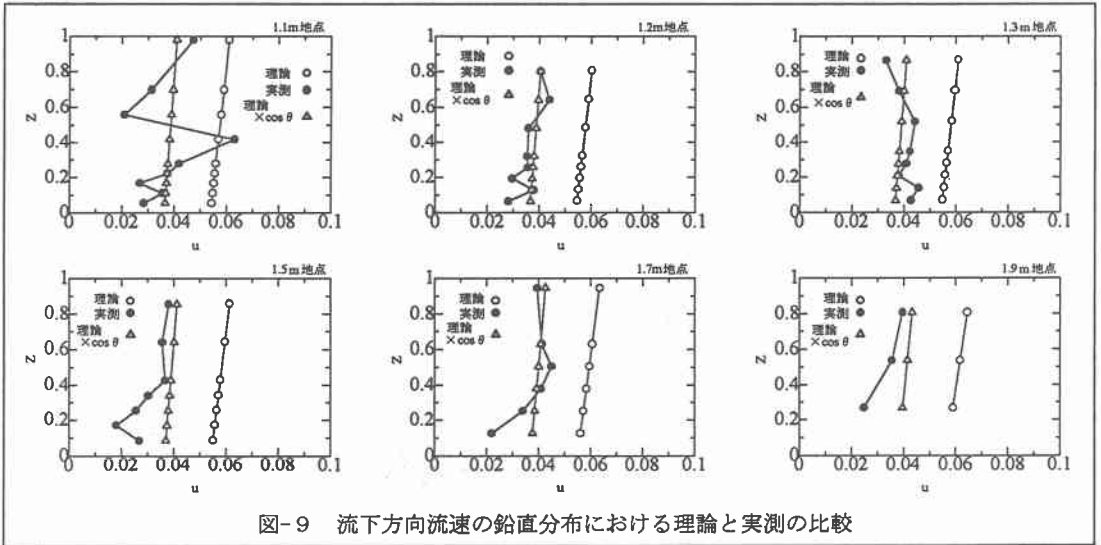


図-9 流下方向流速の鉛直分布における理論と実測の比較

植生幅)、 $p = \eta / v^{1/2}$ などを使って整理すると、次式が導かれる。

$\phi = \phi_0 + v^{1/2} \phi_1 + v \phi_2 + \dots$ (7) ここで ϕ_0, ϕ_1, ϕ_2 は非植生域、植生内部で異なる解をもつ。

非植生域: $\phi_0 = 1, \phi_1 = \tilde{C}_0 \exp(\sqrt{2}p), \phi_2 = C_2 \exp(\sqrt{2}p) + (\tilde{C}_0^2 / 6) \exp(2\sqrt{2}p)$ (8)

植生域:

$$\begin{aligned} \phi_0 &= 1 / \sqrt{1 + \chi}, \quad \phi_1 = \hat{C}_0 \exp(-\sqrt{2} \sqrt{1 + \chi} p) + \frac{s_\eta(0)}{2(1 + \chi)^{3/2}} p \\ \phi_2 &= \hat{C}_2 \exp(-\sqrt{2} \sqrt{1 + \chi} p) + \frac{\hat{C}_0^2 (1 + \chi)^{3/2}}{6} \exp(-2\sqrt{2} \sqrt{1 + \chi} p) \\ &+ \frac{\hat{C}_0 s_\eta(0)}{4\sqrt{2}(1 + \chi)^{3/2}} p^2 \exp(-\sqrt{2} \sqrt{1 + \chi} p) - \frac{4\chi + 3}{8(1 + \chi)} \hat{C}_0 s_\eta(0) p \exp(-\sqrt{2} \sqrt{1 + \chi} p) \\ &+ \frac{2(1 + \chi) s_{\eta\eta}(0) - (1 + 4\chi) s_\eta^2(0)}{8(1 + \chi)^{3/2}} p^2 + \frac{s_\eta(0)}{4(1 + \chi)^2} - \frac{2\chi - 1}{8(1 + \chi)^3} s_\eta^2(0) - \frac{\sqrt{C_f} s_\eta^2(0)}{4\alpha(1 + \chi)^{3/2}} \dots (9) \end{aligned}$$

$s (= D/Dc)$ は側岸形状を表し、池田らは別途土砂の静的安定条件から解を導いている。 $\hat{C}_0, \tilde{C}_0, \hat{C}_2, \tilde{C}_2$ などの積分定数は底面および植生境界における条件によって決定されるが、詳しくは原論文を参照された。式(9)に対し実測と合うようにパラメーターを決めた結果を図-10示す。

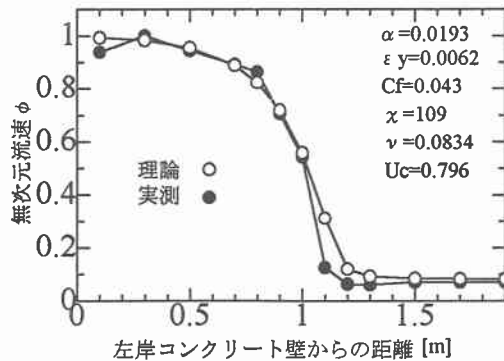


図-10 横断流速分布

同定されたパラメータは、 $C_f = 0.043$, $\varepsilon_y = 0.25\varepsilon_z$ であり、通常の値に比して C_f が過大に、 ε_y が過小になっている。この値を用いると先に示した植生境界におけるせん断力が合わなくなる。ところで、図-5(a)によれば底面近傍の流速勾配が非常に大きくなっており、しかも植生域から離れた左岸域でも同様な現象が起きている。これは、河床摩擦が非常に大きくなっていることを意味し、 $C_f=0.043$ となる一つの根拠を与えている。もし、つり合いの大部分が河床摩擦によって受け持たれるならば、植生境界のせん断力が小さくてすむことになる。実際、 $C_f=0.043$ を用いて再度 τ_{bc} を求めると 0.0282kg/m^2 （3回目通水）程度になり、 ε_y の減少と符合する。本実験のように植生密度が非常に大きな場合の植生帯は、激しいボイルの発生と共に、河床せん断力の増加と、境界せん断力の減少という極めて興味深い現象をひき起こすのであろうか。河床の著しい浸食低下は、縮流による流速増加に対応したものと解釈してきたが、河床せん断力の集中的増大に対応して考えるべきかもしれない。

5. まとめ

- (1) 今回の実験での植生の摩擦係数は $0.03\sim 0.06(m^{-1/2} \text{ sec})$, 境界混合係数 F は $0.014\sim 0.370$, 植生境界せん断力は $0.70\sim 2.06(kg/m^2)$ となった。
- (2) 植生区間における非植生域の流下方向流速の鉛直分布から、河床に大きなせん断力が発生していることが分かった。
- (3) 植生内の流下方向流速の横断分布はほぼ一様分布となり、その鉛直分布は、側岸部に位置するものであっても平坦河床を想定した理論式を修正してほぼ合わせられることが分かった。
- (4) 側岸に植生を有した流れにおける無次元流下方向流速の理論解を、植生が密な場合の実測と合わせると、横断方向拡散係数 ε_y が過小な値となり、河床せん断力が植生境界せん断力を受け持つような解釈ができる。

参考文献

- (1) 福岡捷二・渡辺明英・新井田 浩・佐藤健二；オギ・ヨシ等の植生の河岸保護機能の評価、土木学会論文集 No. 503/II-29, pp59～
- (2) 金高州吾・渡邊康玄・長谷川和義・亀田祐二；火山灰流路の側岸浸食に及ぼす材料・天端高・掃流力の影響、土木学会北海道支部 論文報告集 平成4年度 pp415～
- (3) 河村三郎；土砂水理学1、森北出版
- (4) 辻亜紀子・泉倫光・岡田敏治・本橋健・辻本哲朗、側岸に植生帯を有する流れの遷移過程に関する実験、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第2部(A) pp364～、1995
- (5) 八木 宏；新たな乱流モデル開発に基づく浅い水域での大規模複雑乱流場の解析、東京工業大学学位論文、1994
- (6) 渡邊康玄・北條紘次・清水康行；樹木内の存在する河道の流況特性、水工学論文集 第35巻、1991
- (7) 泉典洋・池田駿介；側岸に樹木を有する直線礫床河床河川の安定横断河川形状、土木学会論文集 第411号、1989