

水みちの発生・発達過程の実験とシミュレーション

Formation of Meandering Streams in Mountain River Beds

道上正規*・藤田正治**・日下部重幸***

By Masanori MICHIE, Masaharu FUJITA and Shigeyuki KUSAKABE

The erosion process of the river bed are classified into two categories. One is the erosion by the meandering stream at low discharges and another is the erosion by the bank-full flow at high discharges. In this paper, the former process is discussed experimentally and theoretically in both cases of the bed degradation and the dynamic equilibrium channel bed state. The lateral erosion as well as the vertical erosion is essential to the development of the meandering stream. Such a process was simulated by the numerical method based on the 2-dimensional model of the bed variation.

Keywords: Bed erosion, Meander, Sand bars, 2-D simulation

1. まえがき

山地河川では中小洪水時に蛇行流路（以後本論文では水みちと称する）が形成されるが、その流路は時々刻々変動するのが特徴的である。水みちの変動過程の解析は水みちによる河床侵食を議論する上で重要であり、これまで水みちの形成機構や変動機構について検討がなされている。芦田ら^{1), 2)}は、水みちの形成は河床の横断方向の擾乱と侵食速度分布の位相差によるものとして、水みちの形成領域を数値シミュレーションから明らかにし、流路の集中・拡幅・分裂からなる流路の変動プロセスについても実験的に検討している。

本研究では、急勾配の平坦河床に浅い流れを与えたとき、水みちが発生・発達する過程を平衡流砂量を給砂した場合と給砂なしの場合に対して実験的に検討するとともに、2次元河床変動モデルを使ったシミュレーションによってその過程の再現を試みた。とくに、両者の場合の水みちの変動特性の相違点について検討するとともに、通水初期に水路全体に形成される砂州の幾何学的特性が水みちの発生・発達に関係すると考え、砂州と水みちの幾何学的な関連性に着目した実験と数値シミュレーションを行った。

* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科

(〒680 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

*** 正会員 神戸市立工業高等専門学校教授 都市工学科

(〒651-21 兵庫県神戸市西区学園東町8-3)

2. 実験

2. 1 実験の概要

平坦河床からの水みちの発生・発達過程について、給砂のある場合と給砂のない場合を比較しながら検討するために以下のような実験を行なった。実験水路は長さ7m、幅40cmの可変勾配水路で、河床は平均粒径0.6mmの一樣砂を厚さ10cmで平坦に敷き詰めて作成された。下流端には初期河床と同じ高さに砂止め堰が設置されている。実験は、給砂ありと給砂なしの条件で表-1に示すような4ケースについて行なわれた。Case A-1, 2は、勾配1/40、流量0.4ℓ/sで、前者は給砂量1.38cm³/s、後者は給砂なしである。Case B-1は勾配1/20、流量0.2ℓ/sで給砂量3.35cm³/sである。両ケースとも給砂量は平衡流砂量に相当する。Case C-1は、Case A-1と同じ条件であるが、長さ11mのCase A-1より長い水路を用いて行われた。測定項目は河床位および下流端流砂量であり、河床形態のスケッチおよび流況のビデオ撮影も合わせて行われた。

2. 2 水みちの発生と発達

図-1は通水開始後15分および360分におけるCase A-1, 2, Case B-1の侵食深のコンターと流況を表したもので、流況図の黒の部分は浮き州、点線は水没している砂州の前縁を示す。侵食深は5段階（+：侵食）に分けて表示している。まず、平衡流砂量を与えたCase A-1, B-1について考察しよう。通水初期には流水は河床全体を覆い、うろこ状砂州が形成され流水がその影響で蛇行している。やがて、局所的な河床洗掘による流水の集中によって部分的に浮き州が生じ、浅い水みちが形成されている。また、勾配の急なCase B-1の方が急に屈曲した形状になっている。一方、給砂のないCase A-2では、横侵食を伴った上流側の局所的な河床低下により深い水みちが形成されている。

2. 3 水みちの不安定性

水みちの不安定性については、水みちの位置の時間的変化によって検討する。図-2は下流から4m地点における水みちの横断方向の位置の時間変化をCase A-1, 2に対して示したものである。Case A-1では水みちが2つ形成されており、その位置が水路半幅程度の範囲で時間的に変動するのに対し、Case A-2では初め水みちが2つ生じていたが150分後には一つになり、また水みちの変動する範囲もCase A-1に比べると小さいことがわかる。このことから、平衡流砂量を与えた場合、水みちが横断方向に移動し不安定であるのに対し、給砂がなく河床低下するときは水みちが安定化して行くことがわかる。

2. 4 初期河床形態と水みちの形状

初期に流れが河床全体を覆っているときに発生するうろこ状砂州と水みちの幾何学的な関連性について考察する。本実験では、 $B/h=82\sim167$ 、 $h/d=5\sim8$ であり、従来の河床形態の領域区分³⁾によれば、どのケースも複列砂州の形成条件にあたり、表-2に示すようなモード、半波長および波高のうろこ状砂州が形成された。ここで、表中の特性長とは、うろこ状砂州の幾何学的な平面形状パターンに含まれるモード1（交互砂州にあたる）の河床波の半波長である。Case A-1とCase B-1の初期河床形態を見ると、Case B-1ではモードが高く波長が短い。しかし、両ケースの特性長はほぼ同じであり、このことよりモードやうろこ状砂州の波長が違っても、一つ一つのうろこ状砂州の平面形状は相似であることがわかる。ついで表-2の水みちの半波長を見ると、Case A-1, B-1, C-1で大きな差異はなく水みちの半波長は砂州の特性長とほぼ一致している。

表-1 実験条件

ケース	流量 (ℓ/s)	給砂量 (cm ³ /s)	* 測定なし	
			初期水深 (cm)	勾配
A-1	0.4	1.38	0.49	1/40
A-2	0.4	0.00	0.41	1/40
B-1	0.2	3.35	0.24	1/20
C-1	0.4	1.38	*	1/40

表-2 通水初期の河床形態と水みちの波長

* 測定なし					
ケース	初期河床形態				水みち 半波長 (m)
	半波長 (m)	波高 (cm)	特性長 (m)	モード	
A-1	0.50	0.46	1.6	3～4	2.0
B-1	0.37	0.40	1.7	4～5	1.8～2.0
C-1	*	*	*	*	2.0～2.5

したがって、水みちはうろこ状砂州の幾何学的平面形状パターンに含まれる特性長を半波長とする河床波と関連して形成されるものと考えられる。ただし、本実験では水路がそれ程広くなく、水みちの形成に側壁の影響が強く表れている。水路が広い場合、水みちの半波長が特性長より小さくなる場合が生じるものと推察されるが、このような場合については今後検討する必要がある。また、図-3はCase A-1およびA-2の水みちの深さの時間的、場所的変化を示したものである。この図から給砂がある場合は、水みちの深さは通水直後形成される砂州の波高の2~3倍程度であり、時間的場所的にほとんど変化しないのに対し、給砂が無い場合、時間が経過すると上流から深く安定した砂州が形成されることがわかる。

2. 5 初期河床形態の幾何特性

通水初期の河床形態は水みちの形成に影響を及ぼすものと考えられ、その幾何特性は水みちのシミュレーションの河床形状の初期条件を与えるときの重要な情報になる。そこで、本実験の通水初期の河床形態の波高および波長の特性について考察する。まず、うろこ状砂州の平均波高 H と一つの砂州の半幅 b の比を $H/b = \alpha (h/b)$ で表わすと、本実験では $\alpha \approx 1$ になった。ここに、 h ：平均水深である。つぎに、うろこ状砂州の半波長 ℓ と b の比 $\beta = \ell/b$ は約3.7でその標準偏差は0.6であった。従来の交互砂州の研究⁴⁾では、 $\alpha = 0.2 \sim 2$ 、 $\beta = 3.5 \sim 7.5$ であり、一つ一つのうろこ状砂州の幾何形状は交互砂州のそれと相似形であることがわかる。したがって、うろこ状砂州の幾何学的平面形状パターンに含まれるモード1の河床波の半波長 L と水路幅 B の比も前述の β の実験値とほぼ一致し、本実験では3.7であった。

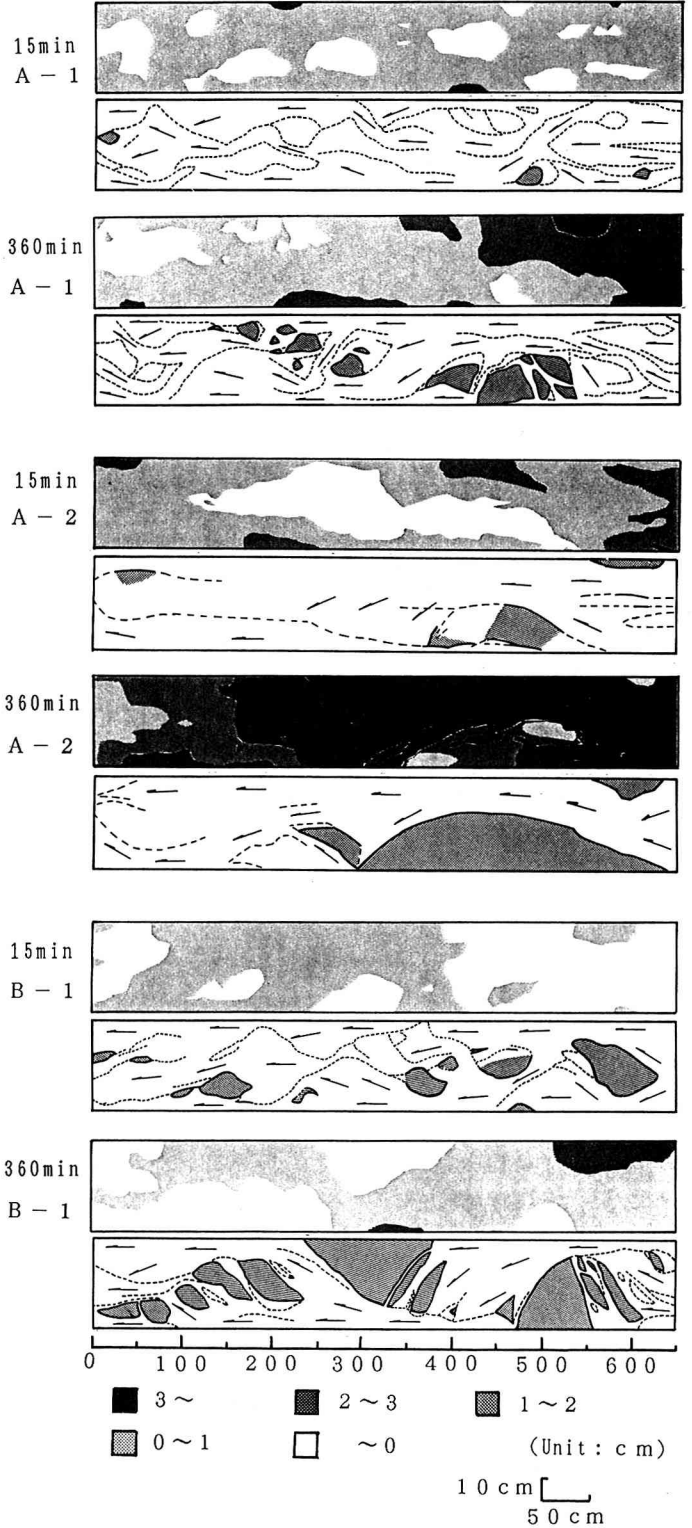


図-1 侵食深のコンターと流況

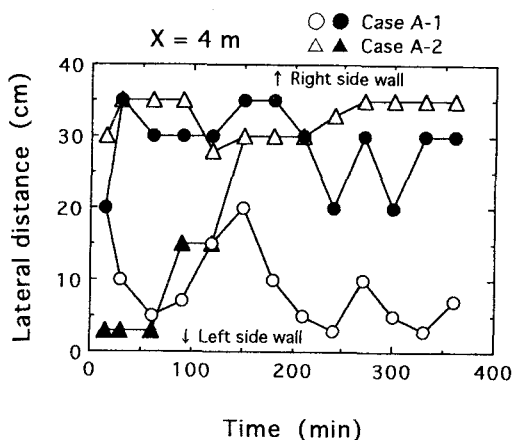


図-2 水みちの位置の時間的变化

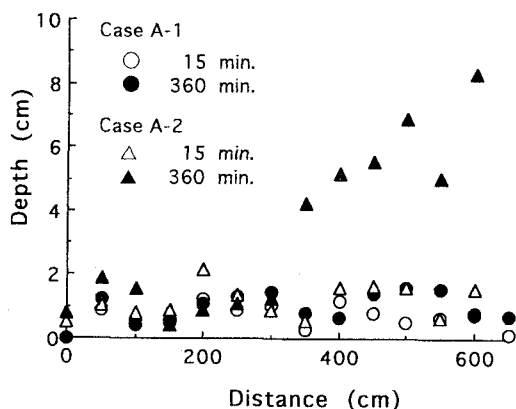


図-3 水みちの深さの時間的・場所的变化

3. シミュレーションのモデル

3. 1 計算モデルの概要

本研究では、水みちの変動を対象としているので2次元の河床変動モデルが必要であるが、水深が小さいことを考慮すると流水の解析には浅水流モデル⁶⁾が適用できるものと考えられる。ただし、縦横断方向の流砂量式にはそれぞれ芦田・道上の式⁶⁾および長谷川の式⁷⁾を適用する。これらの式については参考文献を参照されたい。水みちの発達過程の計算では、側岸侵食や浮き州の形成・消滅に伴う計算領域の変化、初期河床条件、境界条件が重要であるので以下にこれらの点について述べる。

3. 2 計算領域の変化

側岸侵食および浮き州の形成・消滅によって流水領域が変化する。したがって、側岸侵食量と浮き州の形成・消滅条件を決める必要がある。図-4のような横断面形状ABCDにおいて斜面勾配 θ が水中安息角 ϕ より大きいとき、長谷川⁷⁾は側岸の侵食量を次のように求めている。すなわち、水際より上部の斜面は元の斜面と平行に後退するものとし、水中では斜面勾配が水中安息角になるものとする。侵食量と堆積量の体積が等しくなるようにすれば、側岸侵食後の河床形状がAEGHDのように求められる。本実験では、これに類似した側岸侵食過程が見られたのでこの方法を適用する。ついで、浮き州の形成・消滅に伴う計算領域の変化には、浮き州が否かを判定するしきい値を設定する必要がある。一般的な値を決めることは難しいので、試行錯誤的に水深が0.1mm以下になると浮き州になり、浮き州の周囲の平均水位が浮き州の河床位より1mm以上大きくなったとき浮き州が消滅するものとする。これらの値は、Case A-1ではそれぞれ水みちの深さの1または10%程度の値である。

3. 3 初期条件と境界条件

水みちの形状は前章で考察したように初期に形成される河床形状に影響される。そこで、前章で明らかにしたような幾何特性を持つ砂州形状を河床の初期条件として与える。まず、発生すると考えられるうろこ状砂州のモードmを決める。ついで、砂州の幾何特性を与える α 、 β を従来の研究成果に基づいて与える。それをもとに水路幅の β 倍の半波長の交互砂州を包絡線とするようなうろこ状砂州を波長とその標準偏差、波高(または波形勾配)が実測値と一致するようにして

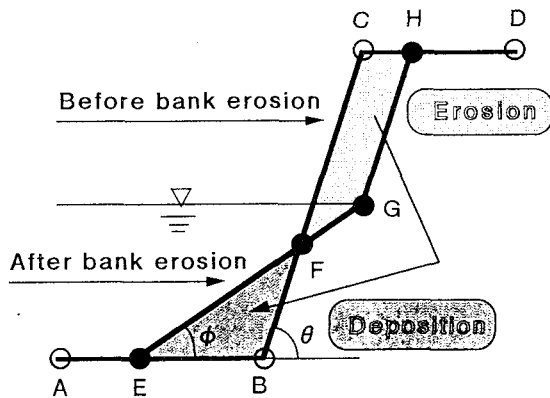


図-4 側岸侵食のモデル

求める。例えばCaseA-1, A-2ではモードが3であるので、兩岸を結ぶ折れ線で近似した特性長を半波長とする包絡線上に2点の砂州の頂点を与える位置を求める。求め方は、線分を3等分する位置を中心とし、標準偏差 $\gamma \{B \sqrt{(1+\beta^2)}\} / m$ の正規分布に従って乱数を発生させて頂点の位置を決める。ただし、うろこの形状は2次関数で近似する。波形勾配は一定とし1/238 とする。いくつかの水利条件に対して、描かれたうろこ状砂州と実験で得られたうろこ状砂州の波長の標準偏差を比較すると係数 γ は約0.2となった。

境界条件は、流水については上流で流量を下流で実験水位を与え、流砂については上流端で給砂量を下流端では堰の位置で河床変動が生じないように堰を通過する流下方向の流砂量と直上流の流下方向の流砂量を等しくした。また、浮き州の形成にともなって、上流端の流水幅が減少した場合は、流水および給砂を均等に再分配して与えた。

4. シミュレーション結果

上述のようなシミュレーション方法をCaseA-1, 2に適用した。図-5は、うろこ状砂州の幾何形状の統計的特性を実験と一致するようにして求めた通水初期の不規則な砂州を示したものである。図-6はCase A-1, A-2 の通水初期（0分）、15分および360 分後の流速ベクトルと侵食深のコンターを示したものである。ただし、両ケースの0 分における結果は等しいので、この図のいちばん上に示している。この図から、不規則な砂州状の蛇行した流れが水みちへと発展してゆく様子が再現されている。図-1の実験値と比較するとCase A-1では、計算の方がより明確な水みちが形成されている。図-7

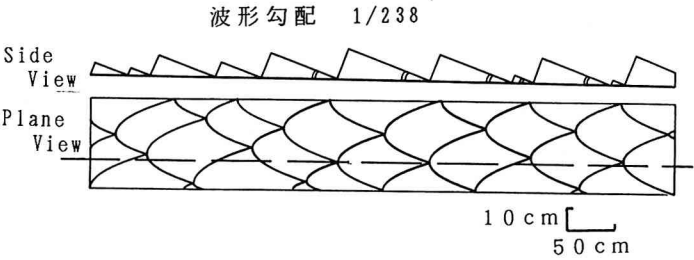


図-5 不規則な砂州形状

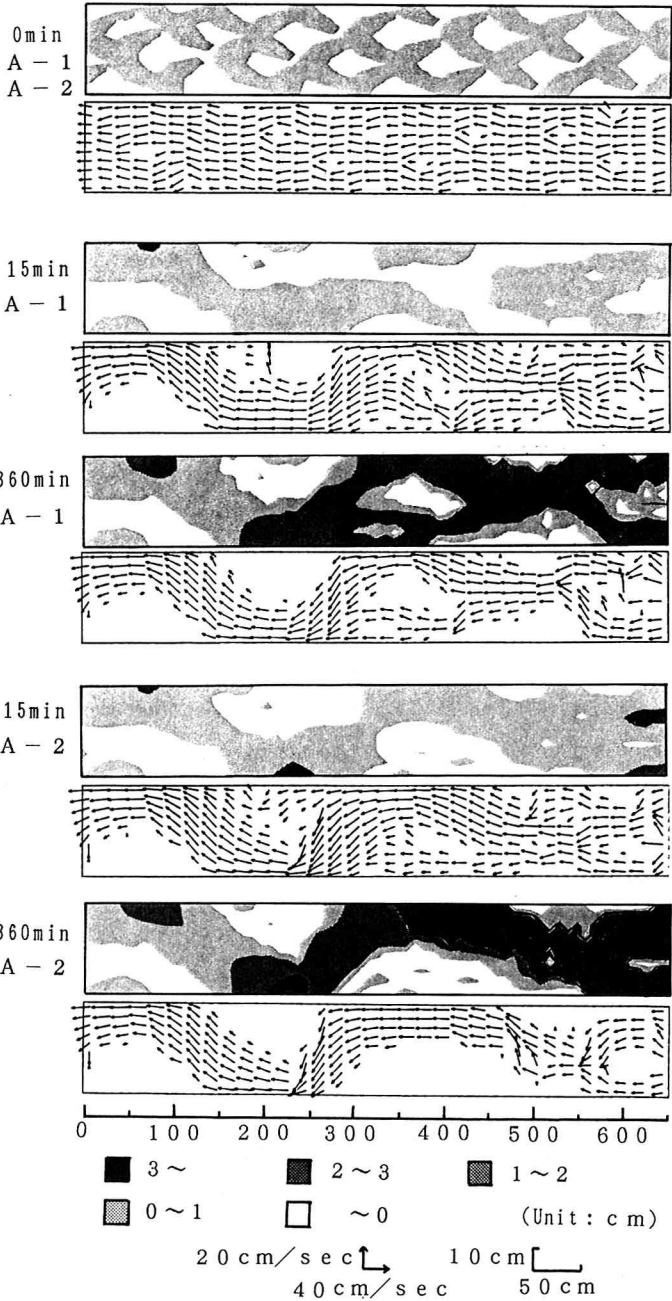


図-6 侵食深および流速ベクトルの計算値

は下流から4mの地点での水みちの位置の時間変化を示したものである。図-2と比べると、実験と同様に2つの水みちが形成されており、その位置も平均的には一致していることがわかる。しかし、その位置は固定されており、実験のような不安定性が見られない。Case A-2では、上流の侵食深の計算が小さくなっているが、水みちの形状はほぼ再現できている。また、両ケースとも実験では水路下流端付近で明確な水みちが形成されなかったが、計算では水みちが形成されている。

ついで、Case A-1の水みちの波長について考察する。

計算で再現された水みちの半波長は約1.6mであり、表-2の実験値とほぼ一致していることがわかる。初期の河

床形状の波長を2倍にして計算を行うと、Case A-1の場合水みちの半波長が2.6mになり、図-6に示す結果の1.6倍程度になった。このことより、本実験のように水路がそれほど広くなく、水みちの形成に側壁の影響が表れるような場合、シミュレーションにおいても実験と同様に、うろこ状砂州の幾何学的平面形状パターンに含まれるモード1の河床波と関連して水みちが形成されることが推察される。

5. あとがき

本研究は平坦河床の浅い流れから水みちが発生し発達する過程を平衡流砂量を給砂した場合と給砂なしの場合に対して実験とシミュレーションから検討したものである。本研究で得られた成果を以下に整理する。

(1) 水みちの波長は、通水初期に形成されるうろこ状砂州の形状に依存し、本実験ではうろこ状砂州の幾何学的な平面形状パターンに含まれるモード1の河床波と関連して水みちが形成された。水みちの深さは平衡流砂量を給砂した場合では、通水初期のうろこ状砂州の波高の2～3倍程度であった。

(2) 平衡流砂量を給砂した場合水みちは不安定であり、その位置は時間的に変動するのに対し、給砂がなく河床低下の条件では水みちが時間とともに安定化した。

(3) 2次元河床変動モデルにより平坦河床からの水みちの発生発達過程を計算した。通水初期の河床形態の幾何学的特性を実験と一致させると水みちの波長は再現できた。また、河床低下の場合、水みちが安定であるため水みちの形状がほぼ再現されたが、平衡流砂量を与えた場合、水みちの不安定性が表現できなかった。

今後、水みちの不安定性の要因を明らかにしてそれが説明できるモデルの構築を試みたい。最後に、本研究を遂行するにあたり、当時学生の喜田雅紀君、村津 薫君、羽田紀行君の協力を得た。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 芦田・江頭ら：砂防ダム堆積域の侵食と流路の形成機構，京大防災研年報，第31号，B-2，pp. 507-523，1988.
- 2) 芦田・江頭・里深：網状流路における流砂量，水工論文集，第35巻，pp. 391-396，1991.
- 3) 村本・藤田：中規模河床形態に関する研究，京大防災研年報，第20号B-2，pp. 234-258，1977.
- 4) 吉川（編）：流砂の水理学，丸善株式会社，pp. 170-174.
- 5) Fujita, M. and Michiue, M. : River bed erosion by meandering streams, Proceedings, 9th Congress of APD, pp. 344-351, 1994.
- 6) 芦田・道上：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木論文集，第206号，pp. 59-69，1972.
- 7) 長谷川：非平衡性を考慮した側岸侵食量式に関する研究，土木論文集，第316号，pp. 37-50，1981.

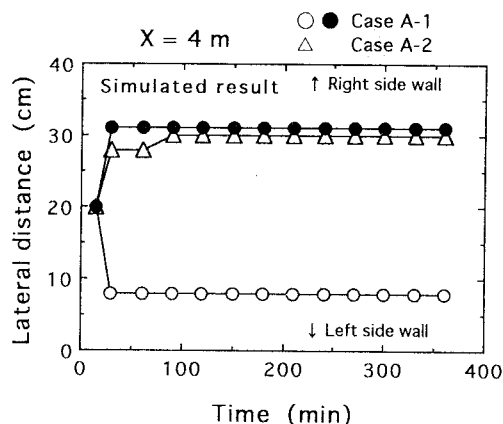


図-7 水みちの位置の時間的变化