

側岸に樹木群を伴う直線河道の浮遊砂輸送

Transversal Sediment Transport in Straight Sandy Rivers with Bank Vegetation

菅 和利*, 中井 正則**

by Kazutoshi Kan and Masanori Nakai

Non-steady process of transversal sediment transport in a straight sandy rivers with bank vegetation was experimentally investigated. Location of sediment deposition in a vegetated zone was determined by vegetation density, and it spreads to faraway region from the interface between vegetated and non-vegetated zones with decrease in vegetation density and with time. Thus, deposition rate of suspended sediments in the farway region increases relatively with time. In addition, a concentration profile of suspended sediments also varies with time corresponding to change in sediment suspension and deposition.

Keywords: bank vegetation, deposition, straight sandy river

1. はじめに

側岸に植生を伴う河道では、非植生域から巻き上げられた砂は植生域と非植生域との境界部付近に形成されるせん断層を通じて植生域へと輸送され、河床せん断力の低下した植生域に沈降・堆積する。この様に植生による付加抵抗のために横断方向に流速差が生じ平面せん断流となり、横断方向の土砂輸送が活発となる。この様にして非植生域では河床洗掘が進み、植生域では砂が堆積するために横断方向に河床高が変化する。しかし、こういった現象の非定常過程について詳しく調べたものは少く、横断方向の河床が水平な場合での植生域内の堆積状況の時間変化についての研究(文献3))が僅かにある程度である。そこで、本研究では側岸に樹木群を伴う直線河道河川における浮遊砂輸送の非定常過程について実験的に検討を行なった。

2. 実験装置と実験方法

実験では、長さ25m、幅1m、高さ60cmの可変勾配直線水路を勾配 $I = 1/500$ に設定して用いた。植生域は水路の両側壁寄りの20cmの領域とし、流下方向に6m(ただし、RUN A-1, A-2のみ3.4m)とした。樹木の模型には直径 $d = 2.8\text{mm}$ の釘を用い、樹木の配列は格子状とし、樹木間隔 L は2.0, 4.0, 6.7cmの3通りとした(図-1参照)。なお、同図には実験結果の整理に際して用いた座標 y , z も示してある。

流速計測では、植生域、非植生域ともに固定床とし、水路床高さを横断方向に一定にして流下方向流速を

* 芝浦工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒108 東京都港区芝浦 3-9-14)

** 東京久栄株式会社技術センター (〒333 埼玉県川口市芝鶴ヶ丸6906-10)

直径3mmの超小型プロベラ流速計とA/D変換ボードを装着したパソコンを用いて計測した。データのサンプリング時間は約40秒であり、主流の時間平均流速ならびに乱れ強度を算出した。なお、乱れ強度には高周波成分が十分には反映されていない。流速計測では、予め断面内の代表的な位置に対して、流下方向に数点で主流速を計測し、流速値が流下方向に変化しない平衡領域の計測断面位置 x （ x は植生域の始まり地点からの流下方向距離）を決定した。

移動床実験では、植生域を固定床、非植生域を移動床とし、通水開始時の水路床高さは横断方向に一定とした。非植生域の河床材料には $d_s=0.15\text{mm}$ （中央粒径）のケイ砂を用い、移動床部分は植生域の上流端から約3m上流より下流端の約2m下流までとした。

通水時間は約4～6時間であり、現象の非定常過程を調べるために途中で数回通水を停止し、非植生域の河床形状（洗掘深）と植生域の浮遊砂の堆積量の計測ならびに浮遊砂の堆積位置の観察を行った。浮遊砂の堆積量の測定は一辺2.4cmの採砂箱を用いて行った。また、通水中に内径2mmのパイプで流水中から取水して浮遊砂濃度の測定を行った。

実験条件を表-1に示す。同表のA, B, Cはそれぞれ樹木間隔 L が2.0, 4.0, 6.7cmであることを表わし、また-1, -2は流量 Q が8.09, 3.95(1/s)であることを表わしている。 a は d/L^2 （単位： cm^{-1} ， d ：樹木の直径， L ：樹木の間隔）で定義される樹木密度を表わすパラメーターであり、池田ら（文献4）が用いたのと同じパラメータであり、 a が大きいほど樹木が密な場合に相当する。本研究では樹木密度と土砂輸送特性との関係に注目しているので a は重要な役割を果たすパラメーターである。

3. 流速分布

以下に平衡領域における流速分布特性について述べる。

(1) 時間平均流速

図-2に各々のケースの水深平均流速の横断方向分布を示す。図-2より、植生域と非植生域との境界部付近に強い速度勾配が発生し、樹木密度が高いほど植生域と非植生域との流速差は大きく、せん断層幅も広がっていることが分かる。以下ではRUN A-1, A-2, B-1, B-2の4ケースのみの結果を示す。

(2) 乱れ強度

図-3に乱れ強度の分布を示す。図中シンボル $\square, \nabla, \triangle, \bigcirc$ は河床からそれぞれ0.7, 1.4, 2.1, 2.9cmの測点の値である。ただし、測定をプロベラ流速計で行ったため、乱れの高周波成分が反映されていない。乱れ強度はRUN A-1で全体的

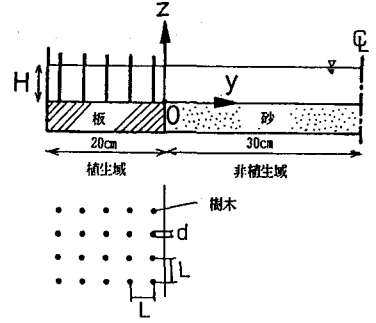


図-1 水路断面形状と樹木の配置

表-1 実験ケース

RUN	流量 Q (1/s)	樹木 間隔 L (cm)	水深 H (cm)		樹木密度 d/L^2 (cm^{-1})
			R	M	
A-1	8.09	2.0	3.4	4.1	0.070
A-2	3.95	2.0	2.7	2.5	0.070
B-1	8.09	4.0	3.4	3.5	0.018
B-2	3.95	4.0	2.6	2.4	0.018
C-1	8.09	6.7	3.5	3.4	0.006
C-2	3.95	6.7	2.7	-	0.006

水路床勾配 $I=1/500$ 水深 R は固定床, M は移動床

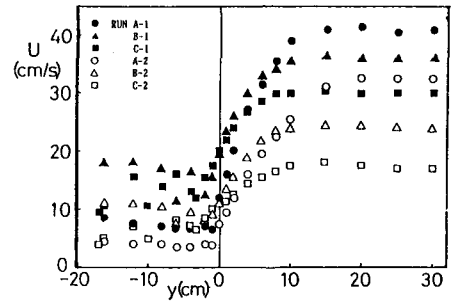


図-2 水深平均流速の横断分布

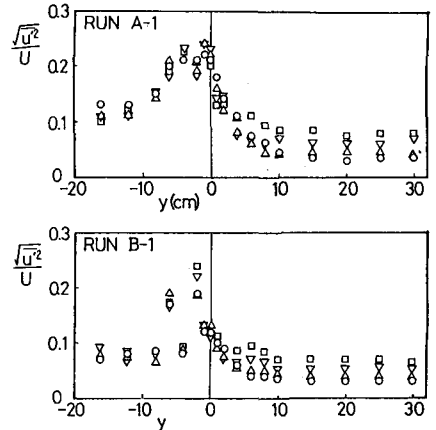


図-3 流速変動の横断分布

に大きく、RUN B-1では相対的に小さい。また、RUN B-1の局所的に大きな値は、この位置が樹木の真後ろにあたり、カルマン渦の影響度が伺われる。これらの点を除くと、乱れ強度は植生域で大きめの値をとり、境界部付近で極大となり非植生域にはいと次第に低減していく傾向を示す。境界部付近の強い乱れはこの領域を通過する大規模渦によるものと考えられる。RUN A-2, RUN B-2についても同様の傾向が得られた。

乱れ強度の水深方向の変化に注目すると、非植生域では、水路床に近づくに従って乱れ強度が大きくなっており、底面境界層の影響を受けていると考えられる。一方、植生域では、乱れ強度は水深方向にはほぼ一定であり、水面付近での乱れ強度も十分大きい。この水面付近の大きな乱れは、水面波の影響と考えられる。

図-2の流速分布を用いて山崎らの方法で横断方向の渦動粘性係数 ν_t およびその無次元値 $\nu_t / u_* H$ を求めると、 $\nu_t / u_* H$ はケースによってややばらつくが、概ね0.1~0.25程度のものであった。池田ら(文献4))は $a = 0.01(\text{cm}^{-1})$ の条件で実験を行い、 $\nu_t / u_* H = 0.15 \sim 0.4$ の値を報告しており、本実験値は彼らの結果に比べ若干小さめであった。

4. 植生域での浮遊砂の堆積位置

非植生域河床から巻き上げられて横断方向に輸送された浮遊砂は植生域内に沈降、堆積する。横断方向の堆積位置、堆積幅ならびにそれらの時間変化を樹木密度との関係で整理を行った。

(1) 浮遊砂の堆積の概況

平衡領域における植生域での浮遊砂の堆積状況の概況を述べる。樹木密度 a が $0.07(\text{cm}^{-1})$ と最も高いケースでは、通水開始の初期には浮遊砂は植生域と非植生域との境界部のすぐ横($y = -1 \sim -3\text{cm}$)に堆積し、十分に時間が経過した $t = 120$ 分では浮遊砂の堆積位置

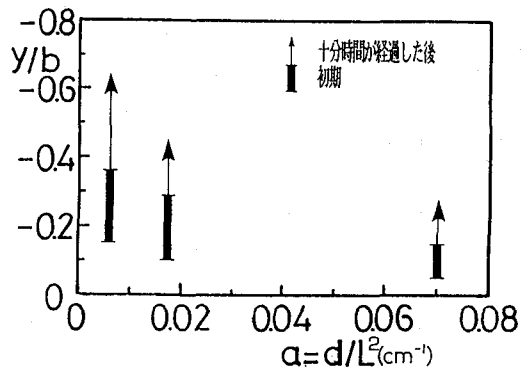


図-4 浮遊砂堆積位置の時間変化

は $y = -2 \sim -6\text{cm}$ と、植生域奥側(境界部から離れる方向)に移動して堆積幅も広がった。樹木密度 a が $0.018(\text{cm}^{-1})$ の場合には初期の堆積位置は前記の場合と大差ないが、時間が十分に経過すると積幅はかなり広くなり、堆積もやや疎らであった。樹木密度 a が $0.006(\text{cm}^{-1})$ と最も小さいケースでは初期においても堆積位置は $y = -3 \sim -7\text{cm}$ とかなり植生域奥側であり、十分な時間経過後は堆積はかなり疎らで非常に広がっていた。

(2) 浮遊砂の堆積位置・堆積幅と樹木密度の関係

樹木密度 a と堆積位置との関係で示したのが図-4である(平衡領域の結果を対象としている)。ただし、縦軸は植生域幅 b で無次元化した横断座標である。なお、本実験で取り扱った2つの流量では、流量による堆積位置の変化はほとんどなかったので同一の図に整理した。同図より、以下のことが理解される。樹木密度 a が大きいほど、浮遊砂の堆積は境界部寄りに狭い堆積幅で集中的な堆積が生じる。また、樹木密度 a の値にかかわらず時間の経過に伴って堆積位置は植生域奥側にまで広がっている。

著者らは複断面直線河道の高水敷上での浮遊砂の堆積位置の決定機構について考察し、浮遊砂の堆積位置の決定には小さいスケールの乱れによる輸送 $c'v'$ (c' , v' はそれぞれ浮遊砂濃度および横断方向の乱れ速度)と2次流 v (横断方向成分)による輸送が重要な役割を果たすという仮説を提案している(ただし、小さいスケールの乱れとは大規模渦の寄与を差し引いたものを指す)。この仮説は、小さいスケールの乱れと2次流が局所的な主流速の大きさにほぼ比例するという仮定に基づいており、定性的には矛盾は生じないようである。そこで、本研究においてもこの仮説を採用することにする。平均流速分布の結果(図-2)から、同一の流量に対しては植生域内の主流速は樹木密度 a が大きいほど小さく、前述の仮説より a が大きいほど小さいスケールの乱れと2次流による横断方向の浮遊砂の輸送力が弱くなり、そのために境界部寄りに浮遊砂

が堆積すると考えることが可能である。一方、時間と共に堆積位置が植生域奥側へと移動する原因については明確につかめていないが、河道の「複断面化」による2次流の強化が、浮遊砂の堆積位置を植生域奥側へ移動するのになんらかの寄与をしているものと思われる。

5. 植生域での浮遊砂の堆積率分布

浮遊砂の堆積位置について明らかになったので、単位時間・単位面積当りの浮遊砂の堆積質量で定義する堆積率 ($\text{mg}/\text{cm}^2 \text{ min}$) についての結果を以下に述べる。

(1) 平衡領域における堆積率

図-5はRUN A-1 ($x = 232\text{cm}$, 平衡領域)の結果である。このケースでは堆積率 q_d が時間的に大きく減衰するので、縦軸の堆積率の縮尺を違えて表示した。初期には浮遊砂の堆積率は境界部付近 ($y > -4\text{cm}$) で大きく、それ以外の領域での堆積率は非常に小さい。そして、時間の経過に伴って堆積率は急減するが、それとともに植生域奥側 ($y < -4\text{cm}$) での堆積率が相対的に大きな割合を占めてくる。このことは先の浮遊砂の堆積位置の時間的な変化の様子ともよく一致している。

図-6にRUN B-1 ($x = 380$)の結果を示す。時間の経過に伴って堆積率は全体的に徐々に減衰していき、RUN A-1のような激しい減衰は見られない。また、分布形について見てみると、初期 ($t = 13.5$ 分)には境界部付近での堆積率が大きく、植生域奥側にいくに従って急減する形であるが、時間が経過すると ($t = 58$ 分以降)、 $-3\text{cm} \geq y \geq -7\text{cm}$ で堆積率が相対的に優勢になってほぼ一定の分布形となった。

図-7はRUN C-1 ($x = 383.5$)の堆積率分布である。堆積率のピーク値を示す位置は初期の境界部に近いところから時間とともに $y = -5 \sim -7\text{cm}$ といった植生域奥側へ移動している。

ところで、植生域の始まりの点から流れが平衡になる位置までの距離 D_e は、樹木の間隔 L にほぼ比例すると考えられ、中原によれば D_e/L は60程度である。本ケースでは、 $L = 6.7(\text{cm})$ より $D_e = 402\text{cm}$ となり、 $x = 383.5$ では土砂輸送がまだわずかに平衡状態になっていない可能性がある(ただし、主流速分布は $x = 380\text{cm}$ で既に一定となっている)。

(2) 堆積率の時間変化

次に、平衡領域における浮遊砂の堆積率の時間変化について述べる。ここでは、植生域の内 $y = -10 \sim 0\text{cm}$

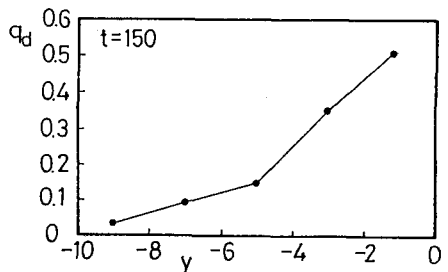
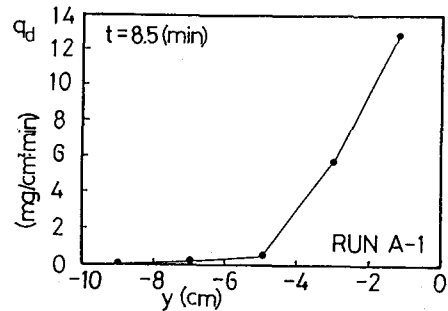


図-5 植生内での堆積率の変化 (RUN A-1)

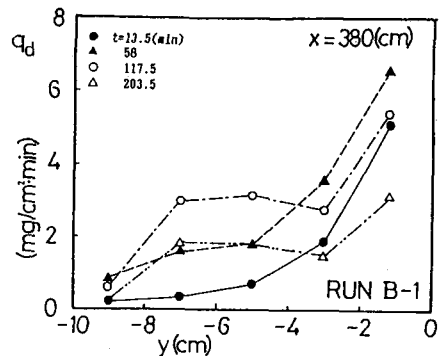


図-6 植生内での堆積率の変化 (RUN B-1)

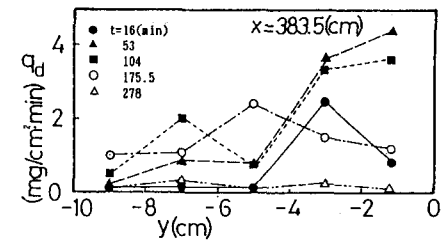


図-7 植生内での堆積率の変化 (RUN C-1)

の幅での単位時間・流下方向単位長さ当りの堆積量 q について考える。浮遊砂の大半は $y = -10 \sim 0 \text{ cm}$ の領域に堆積しているため、 $y = -20 \sim -10 \text{ cm}$ の領域の堆積量を無視して取り扱った。非植生域の河床洗掘過程を支配するパラメーターと考えられる無次元時間 t_* で整理したのが図-8である。 t_* は $t_* = t \cdot u_*^3 / (\sigma / \rho - 1) g d_s H$ で定義されている。ただし、 u_* :初期摩擦速度、 σ :砂粒子の密度、 ρ :水の密度、 g :重力加速度、 d_s :砂粒子の粒径、 H :初期水深である。RUN A-1では堆積量 q は時間に対して単調に減少するのに対して、RUN B-1、C-1ではいったん上昇し、ピーク値を取った後に減少していくことがわかる。また、ピーク値を取る時刻はRUN B-1の方が若干早いようであった。この現象の差について考えてみる。非植生域から植生域への浮遊砂の横断方向輸送には当然境界付近に形成されているせん断層の特性が直接関与しているものと思われる。すなわち、せん断層内の速度勾配あるいはせん断層両端での速度差といった量が重要な役割を果たしている。池田らの結果によると、横断方向の物質輸送量（ここでは浮遊砂）は植生域と非植生域との流速比が増大するに従って増大し、約1/3のときにピークをとり、さらに流速比が大きくなると逆に単調に減少していくことが得られている。さて、本実験について考えてみる。時間の経過に伴い非植生域の河床は低下していき、同時に水面も低下していく。この河床低下によって河道は徐々に「複断面化」し、時間とともにより多くの流量が非植生域の低水路を流れることになり、植生域と非植生域との流速差は時間とともに増大し、流速比は時間的に単調に減少していくことになる。本実験における初期の流速比は固定床実験の結果（図-2）からRUN A-1、RUN B-1、RUN C-1でそれぞれ約0.18、0.47、0.52である。この流速比が時間的に減少していくので、RUN B-1、RUN C-1では途中で流速比1/3の状態を経ることになり、このときに浮遊砂の横断方向輸送量が最大となり、その結果植生域での浮遊砂の堆積率がピークになるのではないかと推定される。一方、RUN A-1の堆積量が単調減少する結果も、初期の流速比が1/3より小さいことより、池田らの結果と矛盾しない。また、本実験の3ケースに限っては堆積率がピーク値を示すのはいずれも $t_* < 5$ においてであり、非植生域の河床洗掘過程において植生域との境界付近が集中的に洗掘されている状態に相当している。

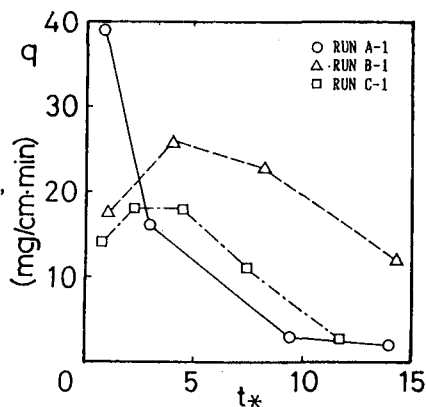


図-8 堆積率の無次元時間変化

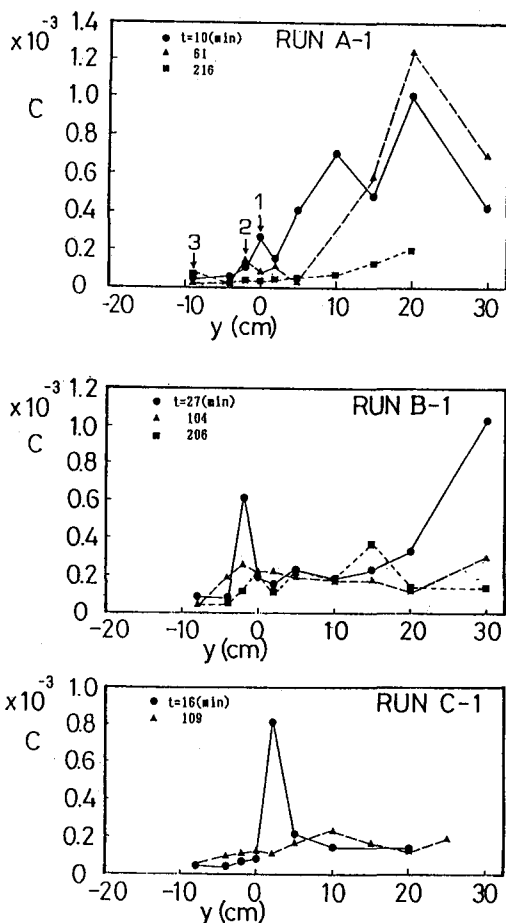


図-9 底面付近の浮遊砂濃度分布（上から a, b, c）

6. 浮遊砂濃度分布

流水中の浮遊砂濃度の分布についての結果を示し、さらに非植生域での河床洗掘過程ならびに植生域での浮遊砂の堆積の結果と関連させて考察を行う。

図-9にRUN A-1, B-1ならびにC-1における底面付近 $z = 0.6\text{cm}$ (底面より 0.6cm の位置) での横断方向の浮遊砂濃度分布を示す。ただし、RUN A-1 ($t=216\text{分}$)、RUN B-1 ($t=206\text{分}$) では非植生域の河床洗掘を考慮して、 $y > 0$ ではそれぞれ $z = -0.9, 0.0\text{cm}$ で濃度を測定した。最初に、非植生域について見てみる。初期には (●印)、図-9 (a) から (c) の順に $y = 10, 5, 2.5\text{cm}$ の位置で極大値を示している。とくに、図-9 (a) と (c) では明瞭である。これらの領域 (植生域との境界付近) は初期に洗掘が激しい位置である。なお、樹木密度 a が小さくなるほどこの位置が境界部寄りになるのは、せん断層幅すなわち大規模渦が通過する領域が a が小さいほど狭いためと考えられる (図-2 参照)。また、図-9 (a) で $t = 61\text{分}$: $y = 20\text{cm}$ 、(b) で $t = 206\text{分}$: $y = 15\text{cm}$ のピークについても該当時刻において河床洗掘が進んでいる地点である。一方、植生域では、初期において図-9 (a)、(b) でそれぞれ $y = 0, -2\text{cm}$ の位置で極大値をとる。これらの点は初期に浮遊砂の堆積が激しい位置とほぼ一致する。特に、図-9 (a) では $t = 10\text{分} \rightarrow 61\text{分}$ に対して極大値の位置が $y = 0 \rightarrow -2\text{cm}$ と移動しており、浮遊砂の堆積位置が時間とともに植生域奥側に移動することよく対応している。なお (c) では極大値はみられないようである。

以上のように、河床面付近で浮遊砂濃度が極大値を示す点は、該当時刻において非植生域では河床洗掘が進んでいる位置に、植生域では浮遊砂の堆積が激しい位置によく対応している。

7. むすび

側岸に樹木群を伴う直線河道の流れの構造および土砂輸送の非定常特性について実験を行い、通水開始からの経過時間と樹木密度による現象の変化について述べた。本研究により以下の結果が得られた。

(1) 植生域における浮遊砂の横断方向の堆積位置は樹木密度が高いほど境界部寄りとなり、また横断方向の堆積幅は狭く、より集中的な堆積が生じる。時間の経過とともに、樹木密度にかかわらず堆積位置は植生域の奥側に広がっていく。さらに、この浮遊砂の堆積位置の決定には小さいスケールの乱れ (大規模渦の寄与を除く) と2次流が重要な役割を果たしていることが推察された。

(2) 植生域での浮遊砂の堆積率については、時間とともに植生域奥側での堆積率が相対的に優勢となり、(1)の結果を裏付けている。また、植生域全幅にわたる浮遊砂の堆積量の時間変化は樹木密度等の水理条件によって異なる特性を示すが、この特性は植生域と非植生域との流速比に関連していると思われる。

(3) 河床面付近での横断方向の浮遊砂濃度分布は概ね植生域で大きく、非植生域で小さい。また、ここでの浮遊砂濃度分布においてピークを示す位置が現れ、その位置は時間的に移動していく。それらの点は該当時刻において非植生域では河床洗掘が、植生域では浮遊砂の堆積が激しい位置に相当する。

〈参考文献〉

- 1) 菅 和利・玉井信行：土木学会第45回年次学術講演会概要集第2部，pp. 362-363，1990.
- 2) 中井正則・菅 和利ら：土木学会第47回年次学術講演会概要集第2部，pp. 304-305，1992.
- 3) 池田駿介・太田賢一ら：土木学会論文集，No. 447/II-19，pp. 25-34，1992.
- 4) 池田駿介・泉典洋：土木学会論文集，No. 434/II-16，pp. 47-55，1991.
- 5) 泉 典洋・池田駿介ら：第33回水理講演会論文集，pp. 313-318，1989.
- 6) Ikeda, S. and Izumi, N. : Water Resour. Res., Vol. 26, No. 10, pp. 2353-2364, 1990.
- 7) 芦田和男・藤田正治ら：京大防災研究所年報，第31号B-2，pp. 461-475，1988