

川幅縮小機構についての考察—パウダー川と川内川の観察結果から—

Mechanism of Channel Narrowing Observed in the Powder and the Sendai Rivers

藤田光一*・J. A. Moody**・宇多高明***・R. H. Meade**

By Koh-ichi FUJITA, John A. MOODY, Takaaki UDA and Robert H. MEADE

Channel narrowing triggered by forced channel widening in the Powder and the Sendai Rivers were investigated. The channels have been narrowed by newly formed flood-plains. Their main deposits are wash load (very fine sand and silt), much finer than the bed material. The wash load transport and its deposition on the beds were examined through calculation and its results strongly suggest that vegetation has an essential role in the channel narrowing.

Key words: equilibrium channel width, channel narrowing, wash load, flood-plain formation, vegetation

1. はじめに

それまで安定していた河道に外的擾乱が加わると、低水路川幅が顕著な規模・速さで縮小することがある。川幅縮小をもたらす外的擾乱として、流量の減少、極端に規模の大きい洪水や改修による強制的川幅拡大がある。川幅縮小は、洪水流下能力に影響を与えるだけでなく、河道内の水理環境を大きく変え、また重要なハビタットの1つである高水敷・河岸の自然形成を伴う場合が多いので、その機構を解明し予測を可能にすることは、治水と河川環境保全の両方にとって重要である。

河川工学や力学の立場からは、安定川幅について、経験的な手法に基づく Lacey の研究¹⁾、経験的な手法に力学的考察を組み合わせた山本の研究²⁾、理論的な手法による Parker³⁾、泉・池田⁴⁾の研究など多くの検討が従来から行われている。しかし、川幅縮小過程の力学的機構と予測手法の研究はほとんど行われていない。一方、地形学の分野においては、非常に大きな洪水により強制的に拡幅された川幅のその後の縮小過程が Schumm・Lichty⁵⁾や Osterkamp・Costa⁶⁾によって、また、上流のダム建設により流量の大幅な減少が短期間に起こった河川での川幅縮小過程が Williams・Wolman⁷⁾によって調べられている。これらの研究においては、植生が、その繁茂領域への土砂堆積を促進させ、その結果新しい高水敷を形成させる機能を持ち、川

* 正会員 工博 建設省土木研究所 主任研究員 河川部河川研究室

(〒305 茨城県つくば市旭1番地)

** 米国地質調査所 水資源部

(Denver Federal Center, Lakewood, Colorado 80225)

*** 正会員 工博 建設省土木研究所 室長 河川部河川研究室

幅縮小の重要な因子になっている可能性が指摘されている。近年、Friedman・Osterkamp・Lewis⁸⁾は、川幅縮小過程における河床地形および植生の変化を調べ、その研究対象河川の場合、河床地形の時間変動が植生よりも重要な川幅縮小要因であったとしている。山本ら^{9)、10)}は、日本の河川で生じた川幅変化の事例を分析し、川幅縮小がおよそ3つのパターンに分類できること、川幅縮小の主な要因が河床低下に伴う河床横断方向の段差の発生と植生繁茂であると推定している。以上の川幅縮小についての研究はいずれも巨視的、定性的な考察が中心であり、現象の力学的機構の解明や河川工学につながる予測手法を意識したものには必ずしもなっていない。また、観察されたいくつかの川幅縮小のパターンの関連性も十分には明らかになっていない。

土木研究所では、河道計画や多自然型川づくりに必要な基本情報を得るという目的で、九州地方建設局と共同で、川内川における川幅縮小事例について詳細な調査を行っており、その結果の一部が藤井ら¹¹⁾により分析されている。一方、米国地質調査所においてもパウダー川 (the Powder River; 米国モンタナ州、ワイオミング州) において詳細な地形変化追跡が行われ¹²⁾、そこで川内川と極めてよく似た川幅縮小現象が確認されている。本研究では、両河川での川幅縮小過程を定量的に比較・分析しながら、川幅縮小の特徴を明確にした上で、その機構を力学的に考察する。その結果を踏まえて、この現象を多自然型川づくりなどの河川技術に応用する方途について述べる。

2. 川幅縮小タイプの分類とパウダー川と川内川で観察された現象の位置づけ

本研究では、川幅の10倍程度以上の長さにならないうちに縦断方向に一樣に近い川幅縮小が見られた場合のみを「川幅縮小」としてとりあげ、川幅の2、3倍程度以下の縦断方向スケールしか持たない局所的な河岸堆積は対象外とする。川幅縮小は、航空写真などにお

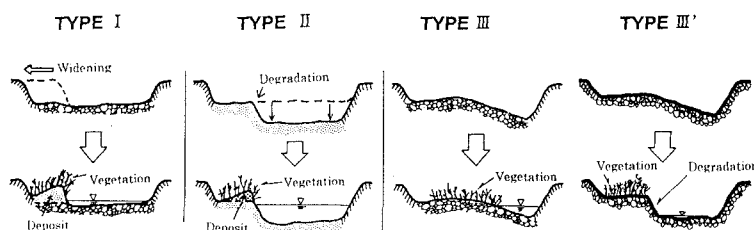


図1 川幅縮小のタイプ

いて、砂礫や水面が露出している領域の幅が小さくなり、植生で覆われた領域にとって代わられたことをもって認識されることが多い。しかし、外見上同じような川幅縮小に見えても、実際は全く異なる機構による川幅縮小である場合もある。したがって、「川幅縮小」を扱う際には、種々のタイプの川幅縮小のうちどれを対象にしているかをあらかじめ明確にしておくことが重要である。前章に述べた川幅縮小についての観察結果および著者らの知りうる事例を総合すると、川幅縮小はおおよそ図1に示す3つのタイプに分類できそうである。タイプIは、河床の一部に堆積が生じることによる川幅縮小であり、堆積する場所以外の河床では有意な変動がほとんど見られない。形成された高水敷には植生が繁茂している。タイプIIは、河床の一部が低下し、低下しないで残った部分に堆積が生じ新しい高水敷となることにより川幅縮小が起こるというものである。このタイプの新高水敷も植生を持つ。タイプIIIは、有意な河床変化を伴わず河床の一部が植生で覆われることにより、外見上川幅が小さくなったように見えるタイプである。なお、有意な堆積は伴わないが、河床の一部が低下し、低下せずに残った部分に植生が繁茂するというタイプもあり、ここではこれをタイプIIIの亜種としてIII'と分類する。次章以降で述べる川内川とパウダー川の川幅縮小はタイプIに分類され、河床の一部に堆積が生じるためだけに起こる最も単純なものである。この場合、平坦に近い初期河床のある部分にだけ堆積が生じ始める機構を明らかにすることが現象解明の鍵となる。

3. パウダー川と川内川における川幅縮小

3.1 パウダー川の場合

パウダー川においては、1978年に非常に大きな洪水が発生し、河道の各所で河岸侵食が生じ、その結果数カ所で川幅が顕著に拡大した。その後流量変化が通常の範囲に収まる状況が現在に至るまで続いている。したがって、これらの川幅拡大区間の1978年洪水後の河道変化は、川幅を強制的に拡大した後の応答と同じと

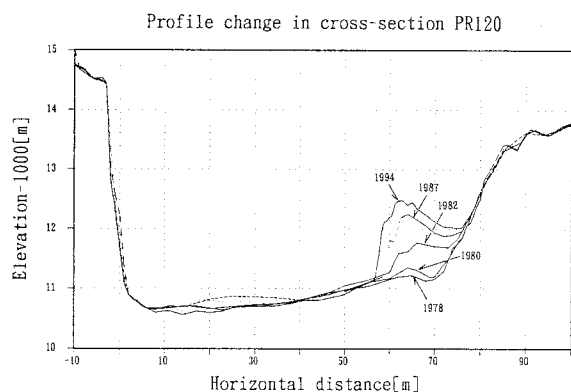


図2 高水敷の発達過程（パウダー川）

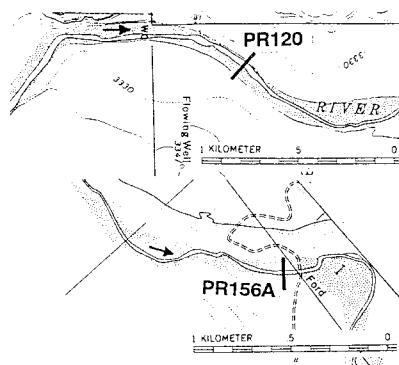
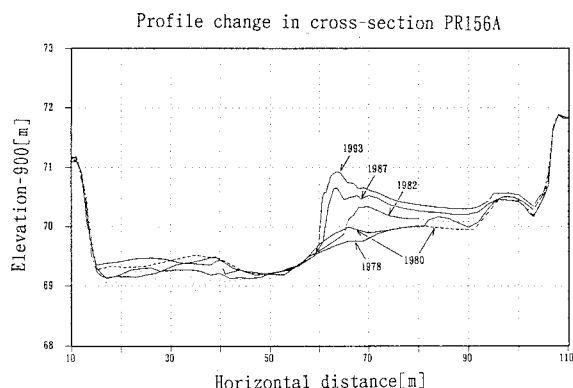


図3 平面図
（パウダー川）

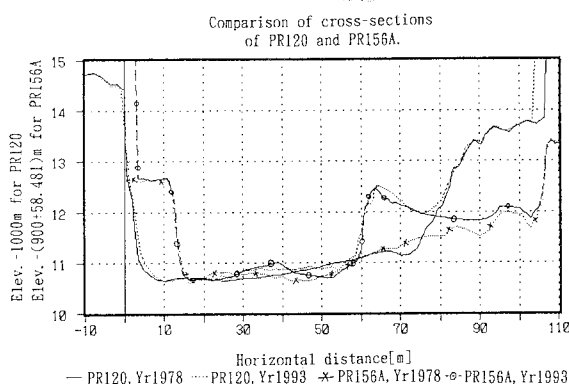


図4 120Km断面と156KmA断面の横断面図重ね合わせ

みなせる。Moody・Meade^{1,2)}は、1975年以来パウダー川の113Km断面（上流側）から206Km断面（下流側）まで間の20断面で1～2年おきに地形変化の詳細な測量を行っている。この区間の河床勾配の縦断変化は小さく、平均河床勾配はおおよそ1/900であり、また、安定状態にある川幅は45～55mである。なお、この区間に堤防は無い。測量結果によると、120Km断面を中心とした河道延長約800mと156KmA断面を中心とした河道延長約400mの2区間においては、1978洪水による川幅拡大後の川幅縮小が特に顕著な形で起こっている。本節では以後、36Km離れたこれらの2区間に焦点を当てる。

図2は、120Km断面と156KmA断面における1978年洪水直後（すなわち川幅拡大直後）から1993あるいは1994年までの横断面図を比較したものである。この図から、両断面とも右岸側に土砂が堆積し高水敷が新しく形成され、明確な川幅縮小が起こっていることがわかる。堆積部分は、水路近傍が最も高く水路から離れるにしたがって低くなる形状を持っている。堆積部分の横断幅は年を追うごとに徐々に広がるのではなく高水敷形成の初期段階からほぼ一定であり、縮小後の川幅（新河岸法尻の位置）が縮小過程の初期段階でほぼ決まっているように見える。土砂堆積が起こっていない河床部分の形状変化はほとんどない。図3は両断面付近の平面図である。120Km付近の堆積は緩い湾曲区間の内岸側に、156KmA付近の堆積はほぼ直線の区間に生じていることがわかる。図4は、図2の2断面の横断形状を重ね合わせたものである。重ね合わせに際しては、平均河床高と新しく形成された河岸の位置をほぼ一致させている。この図から、2断面の堆積部分の横断形状は、36Kmも離れているにもかかわらず同じであることがわかる。120Km断面では、形成された河岸と背後の元の河岸との距離が156KmA断面よりも小さく、そこでの堆積部分の横断形状は、156KmA断面での堆積部分横断形状の右側（水路と反対側）を切り落とした形になっている。これら2断面で川幅縮小前（1978年洪水直後）の川幅が大きく異なり、しかも付近の平面形状が湾曲と直線で異なるにもかかわらず、堆積部分の横断形状が同じで、縮小後の川幅に大きな差がないことは、高水敷形成機構が元河道の川幅や湾曲度に強く依存せず、むしろ縮小後に現れる安定的川幅に依存することを示唆している。さらに、36Km離れた2地点で同じ堆積形状が現れていることは、ここでの川幅縮小が両断面に共通する条件すなわち流量、水深、供給土砂、植生（後に詳述）、それらの時間変化に依存していることを示唆している。

図5は、上記2断面の堆積部分の土質構造と植生繁茂状況である。図6は図5に示す12箇所から採取した堆積土の粒度分布をシルト・粘土と砂に分けて示したものである。これらの図から、堆積土は、シルト粒径以下の分を相当含み（数%～9割：平均でも3、4割）、また砂分もその多くは微細砂（0.063～0.125mm）に分類される。水路から離れるにしたがって粒径が小さくなるという明確な傾向は見られない。一方、河床については120Km断面付近で調査を行った。それによると河床材料は粒径2～3cm程度の礫である。ただし、流量履歴の条件と場所によっては礫

河床が一部砂で薄く覆われる。しかし、その砂に含まれる微細砂・シルト・粘土の割合は多くても3%程度で、堆積土中のそれと比べると無視できるほど少なく、ほとんどが細砂（0.125～0.25mm）以上の粒径である。以上のことから、新しい高水敷の材料は、河床にはほとんど存在しない細粒土（微細砂とシルト、一部粘土）から成ること、すなわち高水敷の材料は河床材料と全く異なっていることがわかる。堆積土に図6に示される割合でシルトが混ざっていることは、土に有意な粘着性が付与され限界掃流力が大きく増大する¹³⁾ことを意味し、地形変化機構を考察する上で重要である。なお、図5からわかるように、堆積部分は水面近く（この時は平水位であった）まで植生で覆われている。また、堆積土中には全体的に根などの植物の痕跡が確認された。

図7は、120Km断面について、発達過程にある高水敷の体積と河床部分の体積の時間変化を、1978年洪水直後を0として単位河道長当たりで表したものである。この図から、高水敷形成が1978年洪水直後からでなく2年たった1981～1982年に始まっていること、その後の高水敷形成はステップ状で特定の年に高水敷堆積が進んでいること、この間河床には有意な変化が無いことがわ

かる。これらの性質は156Km断面でも同様に見られる。図8は、各年（10月から翌年9月までのwater yearで表示）毎に、高水敷形成に寄与したと考えられる洪水外力と高水敷体積増加量との関係を示したものであ

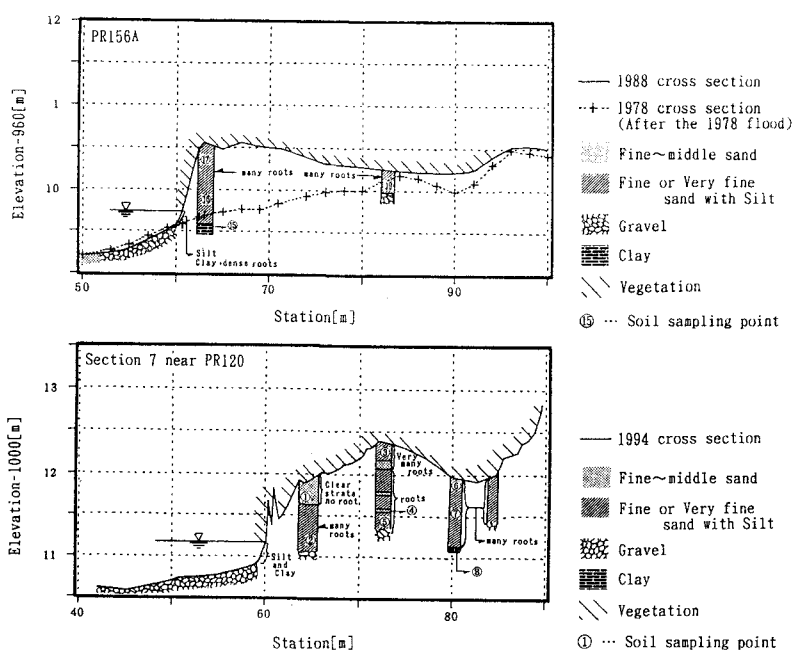


図5 形成された高水敷の土質構造（パウダー川）

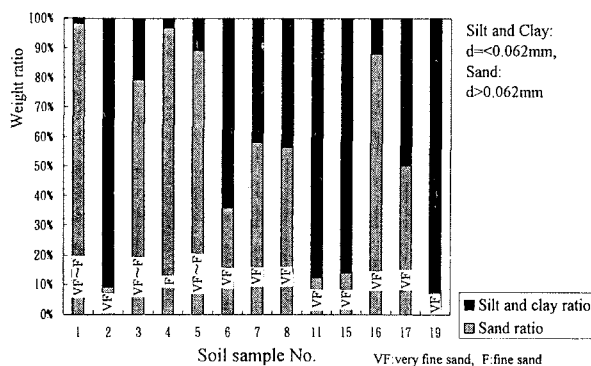


図6 高水敷堆積土の粒度
(Soil sample No. は図5中の丸番号に対応)

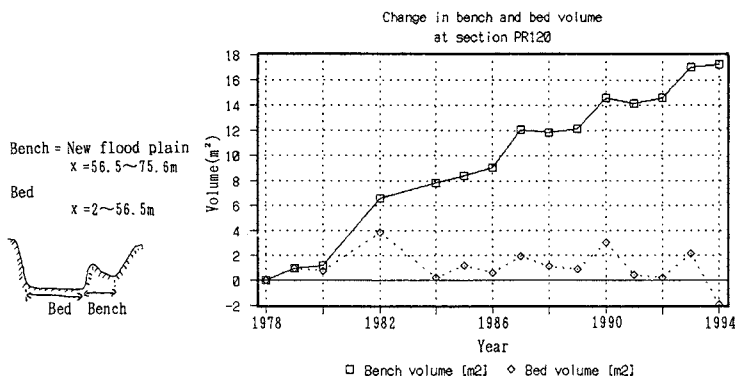


図7 高水敷および河床体積の時間変化（パウダー川）

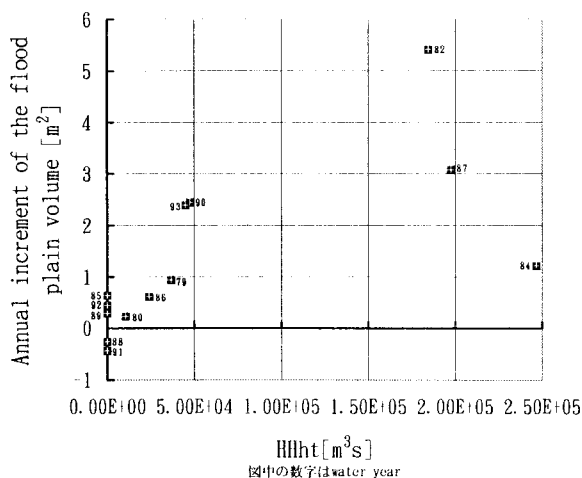


図8 洪水外力 $[\Sigma (H^2 h t) \Delta t]$ と高水数
発達量との関係（パウダー川120Km断面）

る。プロット横の数字は年を表す。各年の洪水外力は $\Sigma (H^2 h t) \Delta t$ で表した。ここで、 H ：形成中の河岸の法尻から図った水深 H 、 h ：発達中の高水数の当該年当初の代表高さから図った水深、 t ：ある水位の継続時間、である。図8は、洪水外力の増大とともに高水数体積増加量が增大するという傾向をはっきり表している。この中で、1990、93年の増加量は、それ以前のデータと比べると洪水外力が小さい割には大きい。このことが、高水数が発達し河床との標高差が大きくなった1990年頃以降、高水数発達の機構が変化したことを示している可能性がある。

米国地質調査所では、Moorhead（パウダー川115Km断面付近）において、継続的に水位・流量および浮遊砂を観測している。図9は、高水数形成の主材料である微細砂とシルトについて、浮遊砂観測により得られた流送量を流量との関係で示したものである。微細砂、シルトともに流量と良い相関をもっており、前者は後者の2乗に概ね比例している。前述のように、河床には微細砂とシルトはほとんど存在しないことから、図9のシルト、微細砂はいわゆる Wash load であり、これらの流送量と流量との良い相関は、河床材料と掃流力との水理的関係を反映したものでなく、土砂生産域の条件と降雨あるいは流量との関係から決まるものである。したがって図9の関係は、高水数になり得る材料の上流からの供給量を規定するもの、すなわち高水数形成の上流端境界条件の1つと言える。

図10には、高水数形成が生じた間の水位の頻度分布および超過曲線が示されている。この図から、120Kmと156Kmの両方において、形成された高水数の河岸法尻の高さが、2000日程度（全期間の1/3弱に当たる）の間水面上に露出する高さと同じであることがわかる。

3. 2 川内川の場合

藤井らの研究成果¹¹⁾を用いて川内川での高水数形成の特徴を述べる。川内川においては、1979年に捷水路

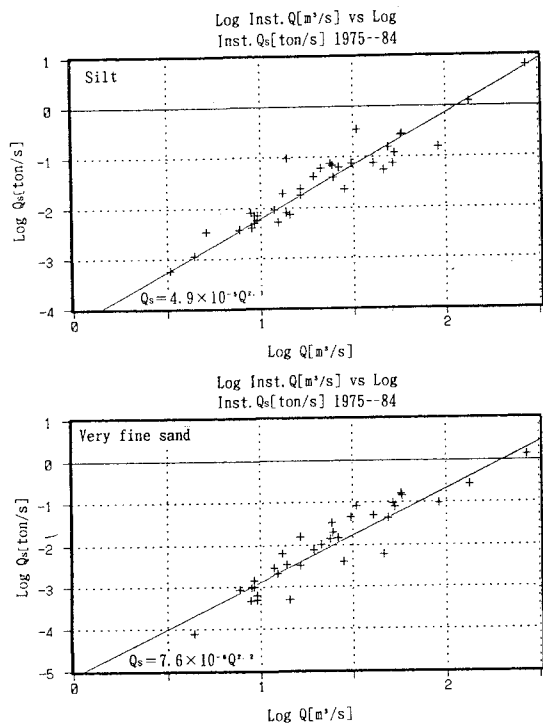


図9 シルト、微細砂の流送量 Q_s と流量 Q との関係
（Moorhead 地点）

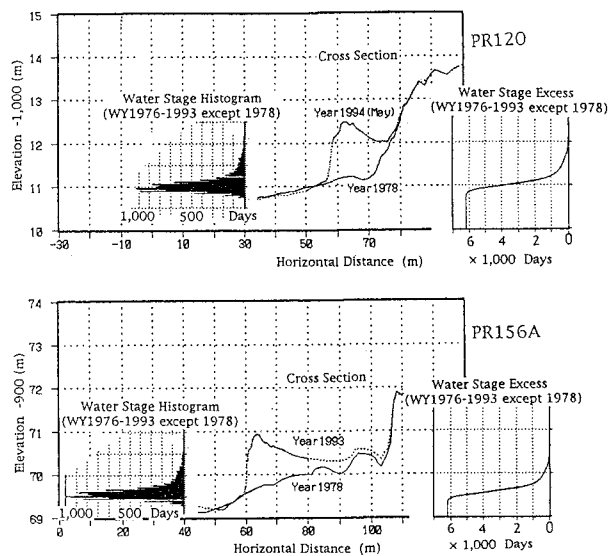


図10 位況と横断形状との比較（パウダー川）

工事が完成し、その際低水路川幅が元の2倍程度に拡げられた。この区間の河床勾配は現在1/1300程度である。この区間の河床材料は粗砂～礫である。図11に平面図を示す。図12は、代表的断面

(No. 7断面)での河道横断形状の改修後の時間変化を示したものである。この図から、右岸側においてパウダー川の場合と良く似た特徴を持つ高水敷形成が起こっていることがわかる。なお、この高水敷は密な植生で覆われている。図11には、改修後に形成された高水敷の範囲が示されており、これから、高水敷形成が湾曲区間内外岸、直線区間を問わず全般的に起こっていることがわかる。図13は、図12のCの位置において縦断方向に掘削したトレンチの縦断面を示したものである。堆積材料の大部分は細砂・微細砂・シルト混じり細砂からなり、河床材料を構成する粗砂～礫とは異なる。このことは、高水敷材料が河床からでなく土砂生産源から直接供給されたであることを示している。図14は、高水敷形成過程での水位状況をNo. 7断面+220m(上流側)について示したものである。この図と図12を比較すると、形成された高水敷の河岸の法尻高さが平水位とほぼ同じであることがわかる。

3. 3 共通の特徴

以上の分析結果を総合すると、パウダー川の2区間と川内川の1区間の川幅縮小現象には、種々の周辺条件が異なるにもかかわらず、次のような

共通の特性が広範にあることがわかる；①高水敷形成は湾曲内岸に限らず湾曲外岸や直線部にも起こりうる；②高水敷形成は川幅の10倍程度あるいはそれ以上にわたるもので、川幅変化と呼べるものである；③新しく形成された高水敷の材料は、河床材料よりも細かく、wash loadが起源である；④高水敷は主に微細砂・シルトからなり、限界掃流力に有意な影響を与えるだけの粘着性を持つ；⑤形成された高水敷の河岸は河床に比べはるかに急な横断勾配を持っており、また、高水敷高は水路から離れるほど低くなる；⑥新高水敷の横断方向の幅はその形成初期から大きな変化がなく、新高水敷の河岸法尻の横断面内での位置が初期から決まっているように見える。⑦高水敷形成領域以外の河床の形状変化は高水敷形成領域に比

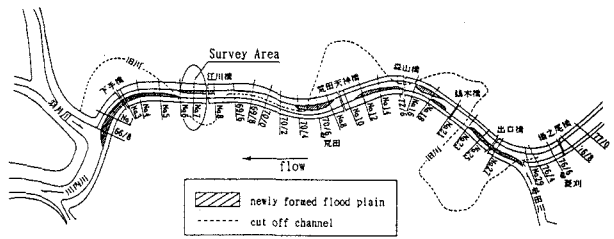


図1-1 平面図(川内川)

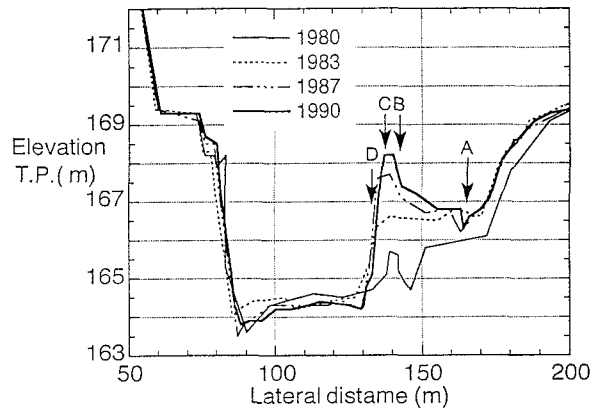


図1-2 高水敷の発達過程(川内川)

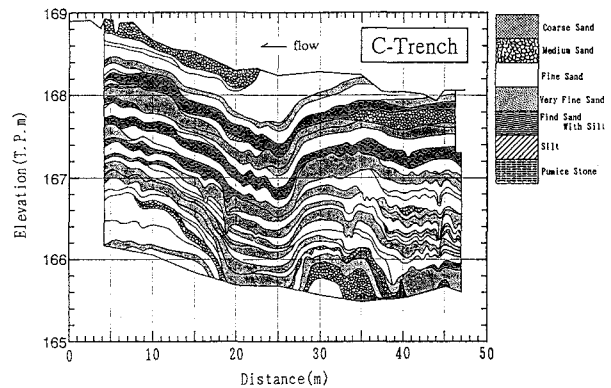


図1-3 形成された高水敷の土質構造(頂部の縦断面図；川内川)

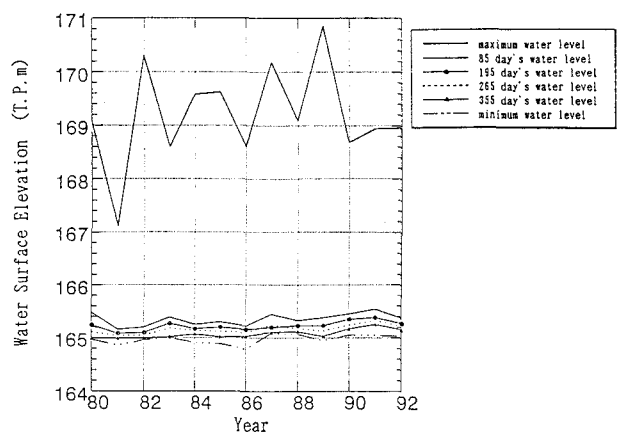


図1-4 位況と横断形状との比較(川内川)

べ無視できるほど小さい；⑧新高水敷は密な植生に覆われている；⑨新高水敷の法尻の高さは平水位とほぼ一致する；⑩川幅は強制的拡幅後ほぼ元の川幅に戻る。

4. 高水敷の初期発達機構についての考察

高水敷形成が進み、新しい高水敷と河床との間に一定の段差ができた状態では、出水により水位が高水敷高を上回ったときに低水路から輸送された浮遊砂が高水敷に堆積する。このことは、少なくとも定性的には従来から良く知られている。本研究で取り上げた現象で特徴的なのは、図2、図12からわかるように、横断面内で緩い勾配を持った斜面(河床)の中程からシルト、微細砂を主材料とする高水敷の成長が始まることであり、これが後の川幅縮小現象を大きく規定しているように見える。そこで、パウダー川の場合を取り上げて、この高水敷初期発達の機構について考察を行う。

まず、パウダー川120Kmおよび156KmA断面付近の河道諸元を参考に、図15のケースAに示す横断形状を持つ矩形一様断面水路を設定する。この水路に水とシルトが流下した時に、河床にシルトがどのような速度で堆積するかを計算した。計算では、図9に示した流量～シルト供給量の関係を用いて流量からシルト供給量を与え、それから鉛直方向拡散を考慮してシルト濃度の鉛直分布を求め(横断方向には濃度一様と仮定)、得られた底面シルト濃度 c_b とシルト粒の沈降速度 w_o 、河床からのシルト浮上能力 q_{ub} よりシルト堆積速度を求めた(堆積速度 $=c_b w_o - q_{ub}$)。なお、シルトの粒径 d_{ws} として0.05mmを、河床からのシルト浮上能力をItakura-Kishiの式¹⁴⁾より求めた。この結果、流量規模によらず $c_b w_o < q_{ub}$ が成立するため、水深数cmから3mまでの領域でシルトの堆積が起こらないことがわかり、シルトがパウダー川でWash loadとしての性質を持つ理由が明らかになった。以上のことは、シルト分を堆積させるためにケースA以外の機構を必要とすることを意味する。そこで、次に、図15のケースBに示す状況、すなわち右岸に1:35の横断勾配を持つ傾斜河岸を付け、右岸への横方向拡散による浮遊砂の輸送が発生しうる条件を設定した。これは、高水敷形成前の120Kmおよび156KmA断面付近の横断形状をモデルにしたものである。計算では、主流路右端(左岸から40m)でケースAのシルト濃度条件が成立するとし、そこを濃度の境界条件とし、そこから右岸への拡散・堆積の計算は、Parkerの方法³⁾およびそれを修正した泉・池田⁴⁾の方法を用いた。計算の結果、主流路水深1.2m、1.4m、1.8mのいずれの場合も、右岸傾斜河岸のどこにもシルト堆積が生じない結果となった。これは、シルト粒径が小さいため、横断方向に浮遊砂輸送が起きないような横断濃度分布の下、右岸近傍の浅い水深の場所でも $c_b w_o < q_{ub}$ が成立するためである。図15のケースCではさらに、ケースBの傾斜河岸を水平にし、右岸より20mの範囲に植生を繁茂させた条件を設定した。これは、高水敷成長前に右岸よりの河床の一部に植生があった場合を想定したものである。濃度境界条件の設定法、横方向拡散・堆積の計算法は基本的にはケースBの場合と同じである。ただし、福岡らの方法¹⁵⁾を用いて、植生領域内外の組織的な流体混合の効果を横方向拡散係数に反映させている。植生諸元としては、現高水敷上の植生繁茂状況を参考に、1m²当たり直径7mmの茎が225本ある状況を想定した。水深1.8mについての結果を図16に示す。この図から、ケースBとちがって、10m程度の幅に20cm/日程度の有意な堆積が生じていることがわかる。この堆積速度は120

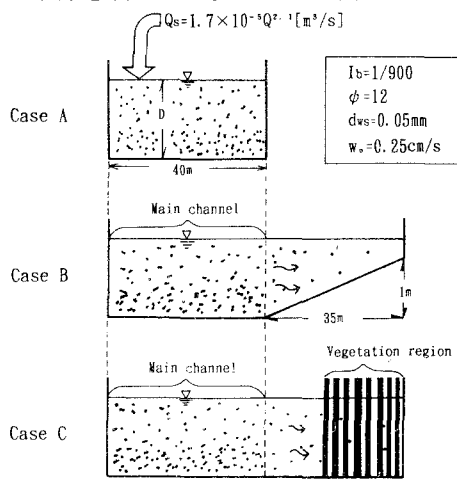


図15 シルト堆積速度の計算の対象としたモデル河道

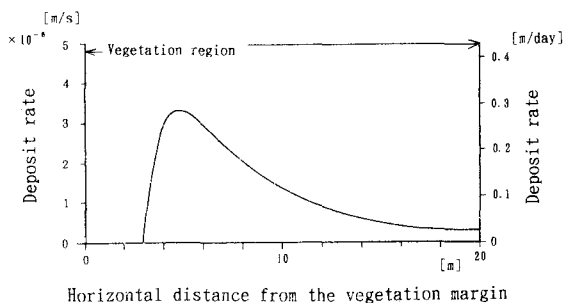


図16 シルト堆積速度の計算結果
(ケースC河道；水深1.8m)

Km断面での高水敷初期成長速度と同じオーダーである。また、堆積高さが急に大きくなった後、主水路から離れるにしたがって堆積高が次第に減少するという実際の高水敷と似た特徴が図16に現れている。

以上から、パウダー川を参考にしたモデル河道において、河床の一部分に植生が存在することによって、本来堆積が極めて起こりにくいシルトが、実現象のオーダーと同じオーダーの速度で植生領域に堆積するようになることが示された。このことは、高水敷の初期成長にとって植生の存在が不可欠であることを強く示唆している。図10に示すように、新高水敷の法尻位置は平水位に対応しており、通常平水位以上には植生が繁茂しやすいことから¹⁶⁾、高水敷成長前の1980年の時点で高水敷の初期成長が起こる範囲に植生が存在していた可能性は十分あると考えられる。

5. 河川技術への応用について

植生がシルトの堆積に決定的な役割を果たしているという前章の推論については、堆積計算のモデルについていくつかの改良すべき点があるが、改良後も植生のシルト堆積に果たす役割の重要性は変わらないと仮定すると、本研究で扱った現象は次のような応用性があると考えられる。すなわち、植生などを意図的に活用して、通常の条件ではほとんど堆積しないシルトを堆積させ、自然河岸を形成させるという工法である。供給土砂のうちシルト・粘土などの細粒分は、通常河床変動には直接寄与しないものの全供給土砂量の大きな部分を占めると言われており¹⁷⁾、シルト堆積条件をうまく整えれば、図2あるいは図12のように急速な自然河岸形成が期待できる。今後、河川技術に従来取り上げられることの少なかった Wash load の挙動と植生、河岸形成との相互関係を十分利用した技術開発が、多自然型川づくりの新しい柱として重要になると考えられる。

謝辞：川内川の調査に際して九州地方建設局から多大な援助を受けました。また、本研究は、筆者の一人（藤田）が科学技術庁長期在外研究員として米国地質調査所に在籍した間に行われたものであります。さらに、R.S.Parker, J.M.Nelson, J.Friedman の各氏からは有益な助言をいただきました。関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1)たとえばLacey.:Stable channels in alluvium, Minutes of Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Vol. 229, 1929. 2)山本:沖積河川学、山海堂、第3章、1994. 3)Parker: Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part 1, J. Fluid Mech., Vol. 89, 1978. 4)泉・池田:直線砂床河川の安定横断河床形状、土木学会論文集、No. 429/II-15, 1991. 5)Schumm・Lichty:Channel widening and flood-plain construction along Cimarron River in southwestern Kansas, USGS Professional Paper 352 D, 1963. 6)Osterkamp・Costa: Changes accompanying an extraordinary flood on a sand bed stream, in Mayer and Nash eds. Catastrophic flooding, London, Allen and Unwin, 1987. 7)Williams・Wolman: Downstream effects of dams on alluvial rivers, USGS Professional Paper 1286, 83p, 1984. 8)Friedman・Osterkamp・Lewis: The roles of vegetation and bed-level fluctuations in the process of channel narrowing, Geomorphology (in print). 9)山本・藤田・佐々木・有澤:低水路川幅変化における土砂と植生の役割、河道の水理と河川環境シンポジウム論文集、1993. 10)山本・藤田・佐々木・有澤:河岸形成における水と植生の役割、土木技術資料35-8、1993. 11)藤井・宇多・深谷:河岸の形成過程、土木学会第49回年講、II-242、1994. 12)Moody・Meade:Channel changes at cross sections of the Powder River between Moorhead and Broadus, Montana, 1975-1988, USGS Open-File Report 89-407, 1990. 13)たとえば、佐々木ほか:大型不攪乱供試体を用いた堤防・自然河岸の耐侵食強度評価実験、水工学論文集、第38号、1994. 14)Itakura・Kishi: Open channel flow with suspended sediment, Proc. of ASCE, J. of Hyd. Div., Vol. 106, HY8, 1980. 15)福岡・藤田:洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響、土木研究所報告、第180号、3-4, 5-2, 1988. 16)たとえば宇多ほか:河道特性による植物群落の分類、土木技術資料36-9、1994. 17)山本・藤田・赤堀:沖積河道縦断形の形成機構に関する研究、水工学論文集、第37巻、1993.