

最近の河相変化とその特性

須賀 堯 三

1. はじめに

日本の河川の特性は、他国の多くの河川の特性と異なる。日本の河川のあいだでも、個々の河川毎に、川はそれぞれ異なる。ひとつの川であっても、河道の状況や現象の特性は場所毎に異なる。また、同じ川
の同じ場所であっても、平常時と洪水時とは異なり、周期的・非周期的な変動や経年的な遷移がある。

したがって、川の特性を簡単な方程式によって表わすことは困難である。川の現象は複雑な自然現象であるから予測も容易でない。計算や実験のみでは表現しきれない現象がある。しかし幸いなことに、川は昔から存在し人類は多くの経験を積みあげてきた。河川工学は主としてその経験をいかして発展してきた。そして、そこにはその必然性があるといえる。あるときには巨視的に把え、おおよその現象の範囲を設定する。そして、あるときには目的にあうスケールでの把え方をする。その結果は他の如何なる把え方による結果にまざる。河川を取扱う場合に、科学的根拠に裏付けされた経験工学が不可欠であることは歴史的な定説といえる。

ところが、近年の河川の特性は、大幅に、急激に、かつ従来において未経験な仕方に変化した。特に、上流の山地部を除く大河川および中河川において顕著である。その変化が継続中の河川も少なくなく、大幅に変化している河道において新しい現象が生じている。このような河川に関する変化を総称して河相変化と呼ぶことにすれば、経験を重視する河川工学において、河相変化に関する未経験という言葉の意味が十分吟味されなければならない。

ここでは、河相に関する最近の研究の結果をまとめ、河相が変化した河道に生じる現象についての基礎的な、かつ主として定性的な取扱い方を一般的なかたちで論じる。個々の河川においては、それぞれの河相の変化の仕方があり、個々の条件等があるので、多くの場合問題は複雑となり未解決な点がすくなくないが、基本的な考え方の面では共通点が存在するものと思われる。

2. 河相の定義とイメージの構成

安芸皎一先生の河相論によると、河相とはあるがままの川の姿であるとし、河道においては流れに相応した河床が生じ、これは常に変化するものと捉えられている。河相に関する明確な定義は他にないが、河相を考えるにあたって留意すべき事項は次の4特性であると思われる。

- a 河川のスケール——たとえば流域面積と河道延長、平均的な堤防間隔と低水流路幅、大雨の規模・平面スケールと洪水流量・継続時間、および沖積平野の発達の度合等。
- b 河道特性量——地理・地形区分（山地河道、扇状地河道、中間地河道、緩流・感潮またはデルタ河道、

および河口・海域部), 河床勾配および河床材料の粒度とその構成の関係, 中規模河床形態, 平均的な河道の蛇行, 単・複横断面形状。

c 時間変化量——大雨の頻度, 流量, および流出土砂量などに関連する現象の結果として, 河道変遷, 合流点の変動, 堤内・堤外地盤高の差, および砂礫堆または砂州の移動・変形と変動 (特に, 河床高の上昇過程と低下過程における中規模河床形態の変化の分類と現象の間欠性の効果等)。

d 人工的な条件による変化量——ダム, 砂防, 堰・床固, 河道掘削, 捷水路・放水路, 護岸・水利等の河川構造物, および橋脚等の許可工作物等による河川条件の変化。これらは流域の開発状況, 河川改修の程度, および水利用や河川敷の利用形態などとも関係をもつ。

川を見る場合には, この他にも目的に合わせた項目を考慮する必要がある。しかも, 河相は各種のスケールをもって, 時間的・空間的に捉えられなければならない。河相を簡単な指標によって表現することは困難であるが, 適切な分類を行って, 相違点や類似点を整理することにより, 河相に関する理解を深めることができる。

3. 日本の河川の特徴

日本の河川には, 他の多くの地域の河川に比して顕著な特徴がある。その主要な項目を表－1 にあげる。

表－1 日本の河川の特徴

主要な特徴	関 連 事 項
a 侵食速度が大きい	0.55mm/年, 世界平均の10倍
b 河道延長が短かく, 勾配が大きい	土砂生産の場と生活の場の距離が短い
c 土砂動態が複雑で変動が大きい	時間的・空間的変動が激しい
d 社会・経済活動が活ぱつ	ダム, 砂防, 掘削, 堰の統廃合, 河道改修, 土地利用形態の変化

これを要約すれば, 延長の短かい急峻な川が人口密集地域を流量と流砂量の時間的な大きな変動を伴いながら流下しており, 河道は自然の力と人工の力とによって著しい変動と変化を示しているということであろう。

このような特徴を形成する原因のひとつに, 日本の河川では外力の影響が大陸の川に比して直接的であり, 変化が激しいことがあげられる。その変化の主因となる土砂生産と土砂の流送過程には, 決定論的, 確率論的, および時系列論的現象が混在し, さらに人工的な影響が強調される。流域面積の規模に比して現象の規模は大きく, したがって大きな変化と変動が存在する。また, 土砂生産の場と生活の場との距離が短かく, 河川の下流部においても複雑にしてダイナミックな現象の影響を直接受ける。

いっぽう, 社会の発展に伴って, 洪水の安全度を増大させる要請が高まり, また流域の開発や上流の河

川改修等を行う結果、計画の高水流量を大きくする必要が生じた。洪水流量の増大に対処する各種の方策のうち、河積の拡大方法としては、計画の高水位を高くすることを避け、一部の河川における拡幅と多くの河川における掘削等が行われてきた。また、ウォッシュ・ロード以外の全ての流送土砂を捕捉する大規模なダムが治水と利水上の目的をもって建設されてきた。このような事業が行われた結果、多くの場合洪水災害の頻度や規模の減少がみられ、水資源問題が軽減されてきた。ただし、新たにダメリポテンシャルが増大している場合や水需要の増大がみられる場合は必ずしもこの限りでない。このようにして、河川環境や河道条件が変化し、将来もなお変化が継続されるものと予想される。

4. 河道の分類

河川における以上の特徴の現われ方は河道毎に異なる。特徴をパターン別に分けて一般的な考察を行うためには河道に関する適切な分類が必要である。従来の河道分類は地理学的な分類法にしたがってきた。これは沖積平野の成因・発達を考慮しており、大局的には河川的作用を反映しているとみなしうる。

現在の日本の河川は、堤防の間におさめられた河川であって、昔の川のような河道変遷はほとんどない。このような河川を対象とする河川工学上の分類には、個々の河川の全体の特性を表わす指標と、河道の縦断的な場所毎の特性を表わす指標が必要である。すなわち、河川工学的分類とは、河川の外力、河道の条件、および運動の内容を主体として考え、社会条件を付加し、目的に応じた時間尺度を用い（一般には構造物の寿命程度）、工学的な目的をもって川の特性を考える方法である。

まず、外力としては主として雨、流量および流出土砂量を考える。雨は年平均降水量、大雨時の強度と継続時間、および平面分布などについて考える。特に後2者が問題となるが、通常確率現象として取扱われる。流量は流域の開発、河道改修、およびダムの築造などにより変化する。ダムは中小洪水を減らす効果をもつ。土砂生産の量はたんに降雨量のみに関係をもつとは限らない。したがって、流出土砂量は必ずしも流量と対応しない。ただし、ダム堆砂資料によると毎年のダム堆砂量は微小堆積年を除くと、図-1に示すように対数正規分布にのところが少なくない。¹⁾ ダムによる捕捉率を考慮することによって得られる流出土砂量の換算値についてもほぼ同様のことがいえる。図-1のそれぞれの直線の勾配は流域面積、地形・地質、気象などの影響が含まれていると考えられる。たとえば、地質では風化の度合や亀裂の度合、および層の傾斜の向きなど

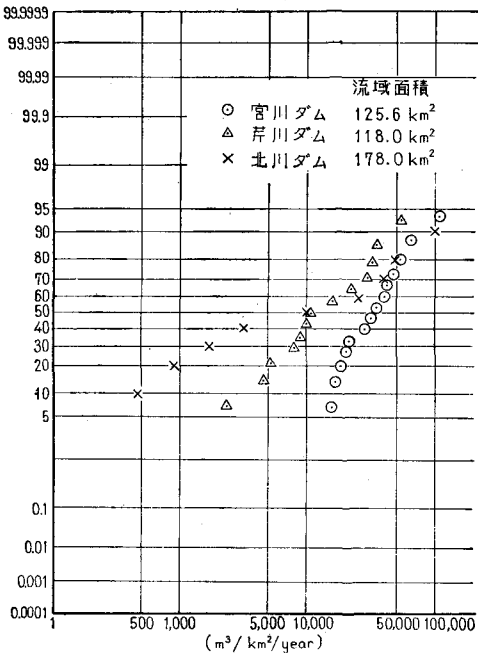


図-1 流出土砂量の対数確率

が岩質に加えて重要視される。山腹の崩壊は過去の履歴が参考となり、山地河道では水衝部の局所洗掘が側岸の崩壊をもたらすことがある。また、崩壊土砂がダム地点まで流送される現象は、流量とその頻度および土砂生産地からの河道距離などと関係があるものと推定される。そこで、それぞれのダムにおける流出土砂の標準偏差を求め、流域面積との関係を調べたのが図-2である。この問題では、支川の影響や川幅変化による土砂調節効果、および勾配変化による土砂調節の影響等に関する検討が必要であり、評価は今後の研究にまたれる。

以上のように、外力としては変動のほか、やや大きいスケールで時間的な変化があり、大規模なダム等が設けられる場合には流量と流送土砂量などの変化が顕著となる。また、砂防ダムによる土砂調節効果の評価も必要となる。これらの外力の変化は河相変化にある面でインパクトとして作用する。河相の変化率は外力の変化率と川に対する外力のスケールに関係する。この意味において、表-1より日本の河川は一般に河相変化が生じ易い河川であることが理解される。

つぎに、河道条件による分類として、水理量的作用に対する安定性、縦断的な変化率、および人工的な条件の変化に着眼する必要がある。河道条件の構成項目としては中規模河床形態、平面形状（わん曲部、低水路平面形と堤防法線形の関係、川幅とその縦断変化）、横断形状（単断面、複断面、深掘れ部）、縦断変化として、勾配、河床材料（平均粒径と粒度分布）、堰や床固の配置など、およびその他として護岸水制等の構造物の配置や、河道掘削などがある。

河道の安定性が得られる条件としては、たとえば流路幅と水深の関係等による蛇行モードの変化が発生しにくいこと、縦断的な砂州のバランスが保持され、河道量の変動を吸収しうること、および流砂量が少ないことなどである。流砂量と河道条件との関係は、火山灰地域およびマサ土地域などの特殊例を除けば、かなり明確である。すなわち、流砂量が多い河道では、縦断的に勾配や河床材料の変化が少なく、川幅は大きく若干の波動性があり、合流点の変動は大きい、河道に直線性が強く、かつ河床材料に細粒分が多い。図-3は、単位面積あたりの年平均ダム堆砂量と河床材料の10%粒径（ダム建設後の変化を無視）との関係を河床勾配をパラメーターと

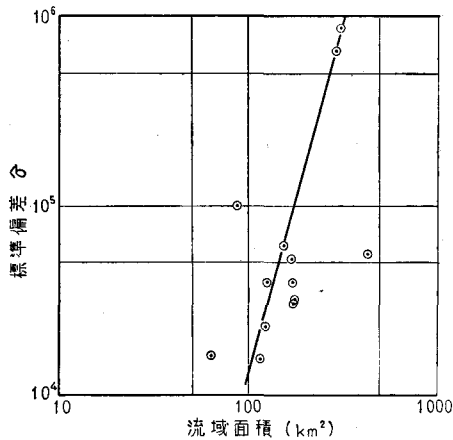


図-2 流域面積と標準偏差の相関

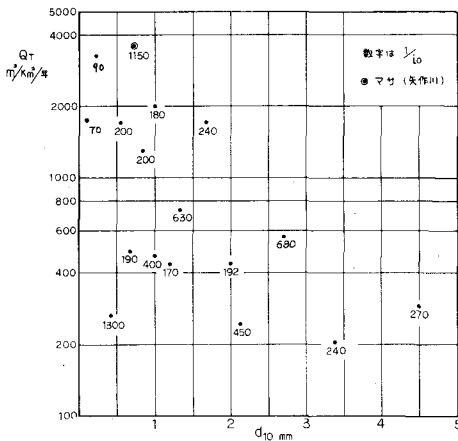


図-3 平均ダム堆砂量 Q_T と10%粒径 d_{10} および河床勾配 i_0 の関係

して調べたものである。²⁾ なお、図-3では洪水流量頻度の影響をほぼ等しいと考えているが、洪水頻度が小さい、たとえば北海道の河川では流出土砂量の年平均値は若干小さくなるものと考えられる。また、流出土砂量は図-1に示すように年変動が大きい、その変動の大きい河川では河床材料の変化も大きいことを付け加えておく。

河道条件は人工的な要素によっても著しく変化する。たとえば、河道掘削や砂利採取、堰や床固の撤去、捷水路の建設、および護岸・水制の設置などによる変化がある。この場合河道において生じる現象は、人工要素を加える位置・範囲・方法、量（時間的な量と全体の量）、および外力の発生条件などが関連し、時系列論的な考察を必要とする場合が少なくない。このとき、非線型現象の特性が強く出て、因果関係を明確にしがたいところに河川の特殊性の存在を知らされる。

河道条件の変化による河相変化は、安定が得にくい河道の場合に容易に生じるが、多くの場合、特に中河川および大河川の中・下流部においては人工的な要素を無視することができない。表-1に示す日本の河川の特徴から判断すると、河相変化が生じ易い背景が存在するといえる。

河道における運動のうち流れの条件としては、常流と射流、等流と不等流、定常流と非定常流、および2次元流と3次元流などがある。各項目で前者の方が一般に安定とみなすことができるが、これは河道形状の変形に対するインパクトに過ぎない。河道は長い歴史の経過の過程で、ある程度現象に順応し、河道の強度は縦断的に均衡する方向で落着いている場合が多い。河道条件は縦断的な現象の変化が小さくなる方向に自らを変えてゆく。河川がそこに現存しているという事実は、巨視的にみれば安定化が計られた結果を物語る。縦断的に大きなわん曲部が連続するような河道であっても、それが残っている理由が存在する。土砂や砂州・砂礫堆は流れによって運動のエネルギーが与えられるが、水流と同様に、縦断的なバランスが保持されることによって安定が得られる。このとき、水深規模の小規模河床波は流速と流速分布に関連して流砂量と流砂形式に関与し、川幅規模の中規模河床波は流れの蛇行流と関連して河道の蛇行特性の安定に関与する。

また、現象の発生の仕方として3種類のものが混在することをさきに述べた。特に、時系列論な現象は河川の変化をわかりずらくしている。この点でも日本の河川は特徴的であるといえる。このような分類については今後の研究に期待するところが大きい。

水と土砂の運動の条件からみた場合、日本の河川では運動の規模が大きく、かつ縦断的な変化が著しいので、この条件が変化する場合には、いっそう河相の変化が起り易いといえる。また、人工的なインパクトは運動の条件を縦断的に急変させることがあり、ダイナミックな川ではその影響が上下流の方向に急激に伝播する。

河川工学的にみた河川の分類は、未だ確立されているとはいえない。しかし、河川に関する研究と経験の積みあげによって、考え方の基礎は固められつつあると考えてよい。河川に対して以上のような見方することによって、相違点と類似点とを見い出すことが容易となり、河川の現象に対する理解を深めることができる。

5. 河相変化の原因

すでにみてきたように、日本の河川は一般に、本質的に変動が激しく、かつ大きく、河相の変化が容易に生じる河川である。事実は河道変遷の歴史が物語っている。本川、派川、旧河道等が河道として一本にまとめられてからも大きな災害が繰返し発生して来た。堤防が現在のような形で整備されたのは比較的最近のことであるが、河道が堤防の間におさめられてからも、平面的な変動や河床の上昇がつづき、河相は緩やかに変化してきた。このように河相は絶えず変化し、変動するものである。そのうえ、河道条件や流量等の外力条件が変化すれば、その変化に応じて以前の変化や変動の特性は変わる。たとえば、ショート・カット、合流点処理、放水路の建設、平面形状の修正、引き堤、護岸・水制等の構造物の建設、あるいは河口処理など、河道条件の変更を行えば、その規模や実施の方法などに応じて河相に変化が生じる。また、ダムや遊水池あるいは放水路などによって洪水流の流量や水位に変化が生じれば、それに基づく河相の変化が発生する。そして、それ以降の変化や変動は以前のもものと異なるようになる。

河相変化の定量評価は、条件と外力の変化、ならびにその効果による。しかしながら、河川における現象には、各種の現象が非線型に混在するうえ、時系列論の現象の強弱や、外力と条件等に河川ごとの個別性があるので、河相変化の一般的な予測を行って、その因果関係を定量的に明らかにすることはかなり困難であるといえる。

しかしながら、昭和40年代の前半から後半にかけて全国的な規模で大・中河川でいつせいに生じた河相変化は、急激、かつ大幅であって、従来経験した現象の範囲を超えるものであった。その原因は当時の社会状況や高度経済成長と無関係ではあり得ない。この観点からすると、支配的なインパクトを与えた一般にひろく共通する項目は、ダム堆砂による下流河道における供給土砂量の減少、河道掘削（砂利採取を含む）、および取水堰や床固等の横断構造物の撤去等であるといえよう。これらは、治水・利水およびその他の必要理由に応じて実施されたものであり、それらの目的ならびに機能を果たしたかわら、河相変化とも何んらかの因果関係を有するものと考えられる。この因果関係には単純な方程式によって評価することができない複雑な内容が含まれている。

最近の河相変化の主因として以上の3項目を選定した理由は、一般性に欠けるもの、および定量的に効果が小さいと判断されるものを棄却した結果、有意の差をもって残されたものである。つぎにこれらの3項目について関連事項を補足する。

河道掘削および砂利・砂等の河床材料の採取が盛んに行われたのは、河川ごとに、また河道の区間ごとに異なるが、おおよそ昭和30年代後半から40年代の後半までであり、最盛期の採取許可量は全国総計で約6400万 m^3 （昭和48年度）である。いっぽう、ダム堆砂量は約11800万 m^3 /年で、全国の生産土砂量20800万 m^3 /年の56%にあたる。¹⁾ その後、砂利採取量は急減しているが、ダムの築造の進捗はおとろえず、昭和55年現在の多目的ダム数は209（さらに工事中のダム数285）、およびその他の河道内ダム734である。したがって、満砂ダムが少ないところからみて、河道への土砂供給量は継続して減少傾向にある。ただし、供給土砂量がもともと少ない河川ではダム下流への影響は小さい。また、ダム上流河道では背砂により河床が上昇傾向となる。以上のように、河道における土砂収支から判断すると、他に共通する支配的な要因が

みあたらないので、最近の河相変化に支配的なインパクトを与えたものはダムによる土砂かん止と河道掘削であると結論づけられる。

河相変化の原因について現象面から判断すると、まずダムはウォッシュ・ロードと一部の浮遊流砂を下流に供給するのみで、他の流送土砂を流下させないので、下流河道においてはアーミング化と砂州・砂礫堆の変形およびその流下速度の変化がもたらされる。また、貯水池の規模が流域面積等に比し大きいと中・小洪水の流量をカットし、反面二山洪水あるいは超過洪水の場合には流量がカットされずに大きい洪水がそのまま流下する傾向があり、このような流量・水位等の外力の条件に変化をもたらす。

河道掘削の効果は、砂河川と砂利または砂礫河川とは顕著な違いを示す。^{3),4)} 砂利・砂礫河川では砂河川に比し当該区間において掘削の影響が短時間に現われ、時間的・空間的に直接的とみなすことができる。砂河川の場合は流砂量の変化の度合いが緩慢であり、河道変化に対して若干間接的となる。河道掘削と河道変化の関係については、一般に1対1の因果関係を見出すことが容易でなく、安易なブラック・ボックス的な解析手法に信頼を寄せることはできない。たとえば、掘削方法としては砂州部のみを薄くカットする方法、河道中央部をしゅんせつする方法、機械的に計画横断面形状に近づける方法、および除石工やガラバックなどがあり、掘削する砂州・砂礫堆の種類（わん曲部のポイレト・バーや複列砂礫堆の中央砂州など）や橋脚上下流の保安距離を残す方法など、これらの縦断的、平面的、および鉛直的なとり方や時間的なファクターによって、河道に現われる変化が異なるのが通例である。また、現象の発生の仕方は、決定論的および確率論的であるほか、時系列論的な現象が強調される場合も少なくなく、単純な取扱いは許されない。

堰は多くの場合時間の経過と共に劣化する。特にフローティング・タイプの堰は吸い出し現象の影響を受けやすい。このような堰は河道条件の変化や外力の増大などが加わって洪水中に破壊されることがある。また、老朽化や取水条件の変化、および河川改修によって人工的に撤去されることがある。河道にとって堰に関する急激な変更は重大である。堰の撤去に基づく上流のみお部の急激な河床低下、上流部の砂州・砂礫堆の長さの縮小と相対的高さの増大、および下流部における過剰な土砂補給に基づく蛇行特性の変更と、これらの現象が生じる上・下流部河道への現象の伝播および調整などが行われる。

最近の顕著な河相変化は、これらの現象が重って生じたものと考えられる。その他の原因としては、ショートカットや砂防などもあげられる。ショートカットとしては石狩川のように大規模なものもあるが、特殊例と考えられる。砂防工事としては、山腹処理、砂防ダム、流路工および土石流対策などがある。砂防工事の定量的な影響には個性があり、一般性に欠ける面があると考えて、ここでは河相変化の主因から除外したが、河川によっては重大な効果を有する場合もある。

6. 河相変化の個々の現象の分類

最近の河相変化は、流出土砂量の減少、河床低下、および蛇行特性に及ぼす局部的インパクトの伝播等の現象に基づくものであるが、基本的には河床低下の現象であって、各種インパクトの複合作用の結果、そこから次に述べるような個々の現象が発生している。

a 河床低下^{3), 4)}

河床は常に河床変動を行っているが、大局的にみて上昇過程あるいは低下過程にある河床の区別は、測量結果をまつまでもなく、砂州・砂礫堆の形状・高さ、河床材料の構成、および植生などをみれば、歴然としている。それに出水記録があれば判断は確実なものとなる。

河床が上昇過程にある河川は、低平地を除く、ダムや大規模な砂防ダムがない中・小河川においてよく見かけることができる。大河川においても、ダムがない場合、および河道掘削が大規模に行われていない場合などにみられるが、特に上流部や支川等において、河床が上昇傾向となっていることがある。日本の河川では、本来的には河床が上昇過程にあることが特徴であり、上流からの土砂の供給量が多いのである。そしてこの土砂は、合流点下流や著しいわん曲部などにおけるポイントバーの形成のほかは、河道内にはほぼ一様に堆積する傾向にある。もしも、土砂が片寄って堆積し、流れが集中するようになったとすれば、河道の安定を得ることができなく、そのような河川は人為的に強力な対策を施さない限り、存在しえない。土砂の流出が多い場合には、極端なポイントバーが形成されるような場合であっても、それと対になる深掘れ部の洗掘は極端に大きくならない。土砂量の調整対策や法線形の是正が行われる場合にはポイント・バーも発達しない。しかし、縦断的に川幅が大きく変動する山間部の河道等では、洪水時の流速の縦断変化が大きく、全体的には堆積傾向にあっても、狭窄部下流の水衡部における局所洗掘が発生したり、堆積による水衡部位置の移動によって洗掘を受けることがある。また、堆積によって水位が上昇するので、高い位置の側岸侵食（過去に流水の作用を受けていない場合には侵食速度が大きくなることもある）や越水などが生じることがある。以前は大河川でもこのような河道が多く存在した。

これに対して河床が低下過程にある河川では、上昇過程にある河川と逆の現象が起る。河床は一様に低下するのでなく、みお筋部において多く低下する。流れは低いところに集中し、いっそうの河床低下と局所的な洗掘を促進させる。砂州・砂礫堆は相対的な高さが大きくなって、動きがにぶくなり、みおが鮮明となって、流速も増大する。流路幅は減小し、水を集めることも重って、河床低下現象が加速される。また、水衡部における流れのわん曲の度合が著しくなって、局所的な河岸付近の洗掘を増大させる。高くなった砂州部には水がのる頻度が減小し、土砂の団結化と植生の繁茂が生じるから、以前の河道の状態に復することは困難となり、現象の一方向の変化が促進する。

b 蛇行のモード変化

河道内の蛇行には網状（うろこ状）、多列・複列、および単列蛇行がある。また、河道と水理量の規模により、みおと砂州・砂礫堆の相対的な関係に基づく蛇行強度がある。いっぽう、複列砂礫堆の中に単列砂礫堆が存在するというように、蛇行の多重構造性が存在する。これらの蛇行形態は、水理量としての川幅・水深比（ B/h ）、水深・粒径比（ h/d_m ）、無次元掃流力 τ 、および流砂量とその粒度構成などによって変動と変化を行っている。洪水中でも変化することがある。また、その変化は河道の条件によって重大な影響を受ける。なお、ここでは蛇行モードを航空写真によって判断を行う都合上、平常時のみおを尊重して定めるものとする。

河川の資料によると、蛇行モードが河床低下の進行とともに遷移している河川が少なくない。⁵⁾ 蛇行モ

ードの変化の方向は網状・うろこが多列・複列に、複列が単列へと一方向にのみ進行するようである。そして、単列蛇行ではみおが鮮明化し、蛇行の安定度と強度が増大する。もつとも、現実の河川の蛇行形態は複雑であって、多重構造の中の構造変化や、それぞれの蛇行の強度変化が存在する。

このような蛇行モードの一方向の遷移、多重構造とその変動、および蛇行強度の増大等の現象には、流砂量の減少、河床低下、河床材料の粒度組成の変化、時系列的な流量条件の変化、および植生の効果や河床のアーマー化と固結度などが関係を有するものと考えられる。

c 砂州・砂礫堆の長さや高さの変化⁶⁾

砂州・砂礫堆は一般に長さや高さが小さいほど移動速度が大きく、流砂量が十分存在すれば発達し、平面的な規模が増大する。砂州・砂礫堆の規模が小さいうちに、みお部が低下し、砂州高が相対的に増大すると、砂州・砂礫堆の移動速度は減小する。昔は河道においては長い年月の自然の調整によって、砂州・砂礫堆の縦断的なバランスが保たれていた。このような状態では、流砂量や流速の分布に極端な片寄りがなく、変化は全体的であり、かつ平滑であった。

しかし、最近の河床低下に代表される河相の変化によって、すなわちダム堆砂による補給砂量の減少による緩やかな河床低下、あるいは河道掘削や堰の撤去などに基づく急激な河床低下など、それぞれの原因に応じた蛇行モードおよび砂州・砂礫堆の形状の変化が生じ、また伝播速度の変化および砂州・砂礫堆の分裂・発生などの現象が生じた結果、河道における蛇行の特性に縦断的なアンバランスが生じている河道がみられるようになった。

d 河床構成材料の粒度分布の変化

河床構成材料は縦・横断的に、また河床面からの深さによって異なる。この状態は洪水の前後に、それぞれの洪水の規模と土砂の流量によって変化する。一般に、洪水によって多くの土砂が流下する場合には、細粒分が増える。そのため、各地点の粒度は大きい粒径の土砂から細粒土砂まで広く分布し、平均粒径の縦断変化は減小する。河床低下現象の結果は、これと逆の傾向となる。各地点の粒度分布は細粒分のぬけおちが生じる。また、河道掘削や王石の採取等によって大径の砂礫が減少している場合もある。その結果、各地点の粒度分布は均質化し、平均粒径の縦断変化が増大する。

なお、アーマーコートは、河床低下に伴って発達するが、粒度分布が以前のものと異なるので、アーミング現象の効果は従来のものと異なることがある。その内容は、平面的な分布、アーマーコートの厚さ、およびその粒度組成である。

e 流路幅の縮小と水深の増大

河床低下が進行する過程においては、除石土や河道掘削など人工的に流路幅を拡げる場合を除いて、通常はみお筋部が主として低下し、あるいは蛇行のモード数が減少することによって、流路幅の縮小と水深の増大が行われる。図-4は複列蛇行河道が河床低下に伴って単列河道に変化し、流路幅が縮小し、かつ水深が増大した様子を示す。このとき、流路は多くの場合に複断面的な様相を呈し、小洪水は容量が大きくなった低水路に集まる。したがって、低水路においては、ある程度の流量と流速を有する洪水流の発生頻度が増大し、かつ継続時間が増大する傾向を有するようになる。

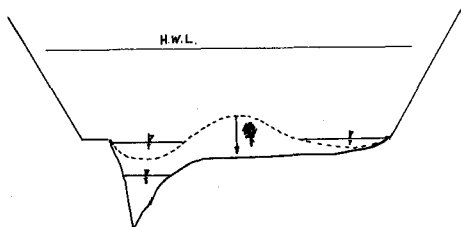


図-4 横断形状の変化

(河床低下
複列蛇行→単列蛇行)
流路幅の減少
水深の増大

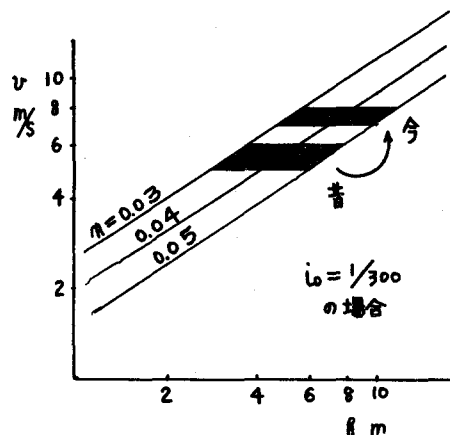


図-5 河相変化による流速の変化
(水深の効果)

f 流速の増大

ダムや堰、および床固等の横断構造物に関する変更がない限り、通常の河川においては平均的な縦断勾配は短期間に大きく変化しない。大きく変化する水理量は水深である。水深の増大によって流速が増大する。たとえば、勾配が $1/500$ 以上の急流河川では、ほぼ等流式が成り立つから、水深 h と粗度 n の変化に対して、流速 v はマンニング式によれば

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{2}{3} \frac{\Delta h}{h} - \frac{\Delta n}{n} \quad \text{———(1)}$$

のように変化する。図-5に例示するように、エネルギー勾配 $i = 1/300$ 程度の大規模な急流河川では、水深の変化によって河相変化前の流速が $v = 5 \sim 6 \text{ m/s}$ であったものが、河相変化後は $v = 7 \sim 8 \text{ m/s}$ 、局部的には $v = 10 \text{ m/s}$ 程度の流速が生じるようになり、処々に射流が現われる流へと変化した。この平均流速の変化の効果は、構造物に対する動水圧は v^2 のオーダー、流砂量や洗掘現象に関しては $v^3 \sim v^5$ のオーダーで作用するので、河道にとっては重要な変化と認識しなければならない。

g 河岸における深掘れと洗掘速度の増大

河相変化に伴う砂州・砂礫堆のモード変化、砂州・砂礫堆長の縮小、および水深の増大等によって、河岸における深掘れが増大する。河岸洗掘が発進する条件は、流水のわん曲角度が大きくなること、らせん流が発達すること、流速が大きくなること、上流からの供給土砂量が減少すること、洗掘位置の移動があまりないこと、護岸の設置条件が適当でないこと、および洗掘を受けやすい土質条件であることなどである。これらはすべて河床低下の現象と関連を有するものである。洗掘の速度は、河相変化が一方方向に進行する限り増大する。平衡の条件についてはなお十分の検討を必要とする。

7 河相変化の運動的特質⁷⁾

河相変化の現象を考察するにあたって、その特殊性について砂州・砂礫堆の運動や洗掘現象を例として

検討を行う。

水理計算や水理模型実験によって得られる解は近似解である。その近似度にもよるが、一般にモデルに反映させることが困難な事項を表－2に示す。流砂の現象は、河道延長が短かくて土砂生産の場と当該地

表－2 模型に反映させることが困難な事項の例。

	事 項	備 考
外 力	時系列的な流量ハイドログラフの効果 流砂量とその粒度分布、および流砂形式 水位	特に時間的に長い中小流量 特に細粒砂の効果が問題 粗度係数、小規模河床波等
条 件	底質の粒度構成、平面と鉛直分布 大洪水による底質の変化 底質の固結度、植生 河川構造物の強度、破壊特性 河道掘削（砂利採取）	代表粒径、細粒分は模型でカット 小流量時に徐々に変化 アーマリング、河岸等 護岸、水制、堰、堤防等 （実態把握）
現 象	小規模河床波の発達 時間縮尺（水流と河床変動に対するもの） 河床低下過程の現象（長時間尺度の効果） 蛇行のモード変化、蛇行の強度変化 砂礫堆の変化 河床変動、局所的な洗掘と堆積 浸透による流量の縦断変化	粗度、流速、流砂量 一般には異なる、不定流効果 河床上昇過程と異なる 一方向にシフト、強化 平面形と横断形 捨石等過去の対策工の効果、安息角

の距離が小さいほど、決定論的現象からはなれ、時系列論的現象の色彩を強める。そのような場合には、流砂量は必ずしも流量等の水理量と対応しない。また、流砂の粒度分布を定める方程式が定まらない。砂州・砂礫堆の運動は初期条件の影響を受けるので、その運動は流れる流量の順番や土砂の出方に関係する。また、考えている区間の上下流端の境界条件には生きた河川の状況を十分に反映させることが必要である。

もっとも、砂礫堆運動の現象を長い時間尺度をもってみれば、砂礫堆の縦断的なバランスが保たれていることが多く、多くの現象が実験によってシミュレートされることが示されてきた。しかし、河川の砂礫堆の運動の中には、必ずしも以上の如くにならない特殊な例が存在する。そのような例が存在する場合には、その現象に関する河川工学上および河道計画上の意義が注目される。

表－3は単列蛇行の場合に限定したときの砂州・砂礫堆の長さの変化の種類を、変動・拡大・縮小に分け、現象の発生の仕方と条件、ならびにその例を示す。砂州・砂礫堆の長さが変化する条件は、縦断的にある種の安定を保つ状態で配列されている砂州・砂礫堆の伝播速度に不調和が生じること、および蛇行のモード変化、河道掘削や捷水路の建設などによって、砂州・砂礫堆の配列に安定が得られていないことである。また、砂州・砂礫堆の長さの変動は、流量と流砂の生起条件およびそのとき粒度構成に関連し、その変動幅や平均的な周期等は河床変動状況（河床の上昇過程と低下過程とでは現象に大差がある）にも支配される。このとき、短期的な現象と長期的な現象と区別した方が都合がよいこともある。たとえば、上流流域の一部が貯水池流域となっている場合には、満砂までの期間には徐々のその効果が現われ、満砂後にはダム建設以前とは若干異なった特性が現われる。また、ときには植生の発達によって中小洪水では砂州・砂礫堆上および周辺に砂礫の堆積が促進され、砂州・砂礫堆の縦断的なバランスが崩れることもある。

表－３ 砂礫堆長さの変化（単列砂礫堆の場合）

現象の種類		変 動	拡 大	縮 少
現象の発生 仕方		a) 上流側に伸縮 b) 下流側に伸縮 c) 固定点にて膨縮 d) 移動しつつ膨縮	a) 一定区間内に入る 砂礫堆数が出るも のより少ないこと b) 合併 c) 消滅	a) 一定区間内に入る 砂礫堆数が出るも のより多いこと b) 分裂 c) 新規発生
現象が発生する 卓越条件		流量と流砂の変動 河道形状による伝播速度の差 河床変動過程の効果 植生	河床低下過程 河床上昇過程	河床低下過程
現象が 発生する 場所	平面現象の 例	わん曲部ポイントバー 合流点ポイントバー	わん曲部▽ 狭窄部下流＊ 本川河床低下の場合の 合流支川の上流＊	ショート・カット＊ 長いわん曲部＊ 流出土砂が多い支川合流 部の下流＊
	横断現象の 例		流路幅の拡大▽ 護岸の設置＊	流路幅の縮小＊
	縦断現象の 例	勾配変化点	ダム下流＊ 堰下流＊ 掘りのこし部下流＊ 堰撤去後の下流部▽	掘り残し部上流＊ 堰撤去後の上流部＊

〔注〕１ ＊印：河床低下に関連する現象

▽印：河床上昇に関連する現象

〔注〕２ モード変化等は除外，また土石流等も除く

その結果，大洪水時に流失するという現象もある。このような現象を無視することができない河川がある。

表－３に示す現象は，条件に遷移がなく変動のみの変化であれば，ほとんど全てについて，変動のカテゴリーの中で処理される筈である。したがって，砂州・砂礫堆長の拡大や縮小が行われるのは，原因と結果が入りくみ，大きな意味の河相変化に関係する。河相変化は，大雑把にみて表－１に示す特徴の強弱に応じて，顕著な現象となった。そして，砂州・砂礫堆長の運動もこの河相変化の内容に応じて変化する。河相変化の中では河床低下によるものが多い。河床低下は既述のように，流路幅の縮小，砂州・砂礫堆の移動速度の減小，流れの集中，局所的な河岸付近の洗掘の増大，および流速の増大等をもたらすので，非線型効果を無視しえない。河床低下の仕方は表－４に示すように単純でない。たとえば，砂河川と砂利河

表－４ 河床低下の主因の区分

直接原因	内 容	備 考
洪給土砂量の減小 河道掘削 河道改修	ダム，砂防，森林保全，整正，掘削 計画断面，砂州部，法線形変更 複断面化，ガラベッグ，除石工 旧堰の撤去，複断面化（Ｂ小）	減少量と粒度組成に違いがある 低下の仕方は砂道と砂利河道， および掘り方により異なる 堰の撤去は急激な変化

川とでは流砂の特性の違いによって変化の様子が異なる。まず，平均的な河床低下の現象は，砂利河道では河道掘削の効果が大きく，掘削を停止した後はただちに落ちつく傾向がみられるのに対し，砂河道では掘削停止後も上流部の影響で引き続き河床の低下現象が緩慢に持続する傾向にある。いっぽう，最大洗掘

深は砂利河道では掘削開始時期からやや遅れを伴って増大し始め、掘削停止後もしばらくの間引き続き増大するのに対し、砂河道では流水の集中が砂利河道ほど著しくならないので、その影響が顕著ではないとみなすことができるようである。河道に現われる結果は、それぞれの原因とその程度によって異なる。砂州・砂礫堆長の变化や洗掘の現象はこのような河相変化の現象の一部として現われるものである。

表－５は、河相の変化と河川の特異性を考慮しなければならず、実験のみによる推定では十分でない現象の例をあげたものである。

表－５ 河川の現象の特異性

砂礫堆の長さが変化する現象の例	X	Y	Z	X：日本の河川に特有 (河相変化) Y：河川の特質が卓越 する現象 (分類の必要度) Z：実験による シミュレーションの 困難性 大・中・小…X・Y・Z の効果の程度
ダム下流河道の砂礫堆（給砂量減少、小洪水減少の 場合は長さは大きくなり消滅の方向）	小	中	小	
橋脚の上下流の掘残し部の上流の砂礫堆長の減小と 河岸洗掘深の増大（伝播速度のアンバランス）	大	中	大	
小洪水にて砂礫堆上流に堆砂し、流れの角度が大き くなって河岸侵食をおこす（河床低下と高い砂州）	大	大	大	
旧堰撤去による上下流の砂礫堆の変化 蛇行のモード変化と蛇行強度	大	大	大	

8. 対策工に対する考え方の基礎

今後の河道整備の方向としては、洪水流量の増大、流速の増大、および安全度の拡大に対処するため、堤防強度の増大、河積の拡大、ダムや遊水池による貯水能力の増大、放水路の建設、および流域の遊水・保水機能の改良等が、質的かつ量的に従来の方法が若干修正されつつも、なお継続して実施されるであろう。特に、減水期の河道災害が注目されているように、質的側面として、全ての流量の段階に対して有すべき河道強度が、いっそう論議されることとなるであろう。

このとき、重要なことは一方向性と加速性を有する河相変化を制御しつつ、構造物の強度拡大と劣化しつつある構造物への対処の方法の検討を行うことである。また、河川は一面望ましいことでも、全体への配慮から早急な実施が適当でないことが少なからず存在するという特徴を有している。たとえば、水位を下げることは治水上好ましいことであるが、それによって地下水位が急激に低下すれば支障が出ることもある。川は良い方向に、バランスを保ちつつ徐々に変えてゆくべきであって、一般には急変を避ける必要がある。

日本の河川は時間的な変化にも富んでおり、ヨーロッパの河川のような安定性に欠け、平衡状態は、短かい時間スケールの状態を除き、考えづらい。また、外力や河道条件の変化、ならびに社会条件の変化にも富んでおり、河川の計画を複雑にしている。そこで、たとえば霞堤、二線堤、あるいは水防林等の重要性は、一般にいっそう増大しているので保護することが大切である。このことに注釈を加えると、たとえば霞堤の開口部付近は歴史的な条件からみて連続堤とした場合に相対的に弱点となる場合があるが、二線堤が存在すれば破堤してもそれが効果を発揮して広範囲の侵水を防止し、下流に霞堤があれば、その開口部より氾濫水が容易に戻り、被害を軽減することがある。水防林は、河岸を護り、越流水の流速を減殺し、

そこに土砂を沈積させて、氾濫流の猛威を抑える効果がある。このような機能を生かす多目的の有効利用をはかるべきである。河相が変化しても周辺の条件を無批判に変えることは得策でない。個々の条件には、それがよってたつ理由があり、機能が存在する筈である。

河川には、超過外力が存在し、予測が十分に行えない河相変化があり、河川構造物の強度の劣化があり、また悪影響を軽減するための対策を含めた総合的な対応策を講じるためには金と時間がかかるという特徴がある。このような河川の特徴が認識されるならば、河川以外からの圧力に十分対抗しうる力を養い、臨機応変の対応策に合理性と有機性を、従来にまして一層追求することが望まれる。

以下に当面の問題点について基礎的な考察を行う。

a 災害形態の変化の分析

最近の河相変化により、蛇行形態と流れのパターンの変化、流速の増大、および流送土砂量の減少と局所洗掘深さの増大等の現象があって、従来の経験の範囲を超えることがあり、そのために災害形態が変化していると考えられる。経験工学を発展させるために、河川において実際に生じた災害から多くのことを学びとることが不可欠である。このとき、現象に関して科学的な考察を十分に行うことが大切であり、そのためには現地の適切な資料を得ることが重要である。さらに、河相変化の影響を一般化するために、多くの河川の資料に基づき、災害の種類とその程度を対応する外力（流速と水位、継続時間）との関係において把握し、それと年々変化する河相要素とを結びつけて検討を行うことが必要である。

b 治水からみた構造物の重要度とその河相による変化

最も重要な構造物は堤防であり、護岸・根固・水制とつづく。堤防に関しては、河床低下によって越水破堤の件数は減少しているが、放置すれば侵食の危険性は増大し、堤体漏水や基盤漏水の現象に関する条件が変化した。古い水制についても、河相変化によって作用する外力が増大している。土出し水制が護岸と一体となっているために、水制の被災が護岸に波及し、ついで堤防が部分的に欠壊することがある。また、護岸が堰本体の上に乗っているために、堰の劣化に伴うわずかの沈下によって生じた護岸下部の空隙からの護岸裏込土砂の吸出しが、護岸の崩壊と引き続く堤防の欠壊をもたらすことがある。これも、河床低下による堰に対する外力の増大と堰下部の土砂の吸出し現象の増大などが関連していると考えられる。

現存の河道は、洪水の作用と対策工事の長い歴史の結果を経て現在に至っている。これは従来の範囲内の現象に対するある種の保証を意味すると考えてよい。いっぽう、外力と条件が変化している。河川の現象は多数の現象が非線型に複合されたものであって、単純な方程式で表現することができない。そこでは、従来の経験が科学的に評価されて活かされることが最良と考えられる。

c 従来工法のみなおし

河相変化に伴い、蛇行流と流速および洪水ハイドログラフ等の変化があるので、従来安全であった構造物の強度が必ずしも十分でない場合が生じており、種々の対策が実施されている。また、構造物等が有すべき機能が変化している。たとえば、水制には河岸付近の局所洗掘に対応する新しい機能を保持させる必要があり、異形コンクリート・ブロックも重量・形状・連結方法に新しい工夫が要る。また、護岸の根継ぎや床固・堰の補強等についても、河相変化を助長させない工法とすることが望ましい。

d 河床低下のコントロール

河床を低下させることは望ましいことであるが、急変を避け、悪影響を排除することが特に大切である。河床低下に伴う河道内の悪影響としては、蛇行のモード変化、砂州・砂礫堆長の縮小、および蛇行強度の増大による流速の増大と河岸付近の洗掘深の増大等があり、河相変化の速度とも関係がある。対策について考察を行うためには、水系一貫の土砂動態（ダム・砂防・河道・海岸）の調査を行って、縦断的なバランスについて、その度合、変動、および変化に関する検討を行う必要がある。この場合、現象の一方への変化と変化のスピード制御が問題となり、流砂量と粒径、河床の横断パターン形状と掘削方法、川幅および床固等についての考え方の再整理が重要と考えられる。

e 複断面河道と低水路幅

堤防保安長の確保、河道掘削および高水敷の有効利用などのため、複断面河道は今後増加する傾向にある。ガラバック、除石工、および浮きあがった護岸の根継工等はこの問題に関連する。複断面水路の流れには、低水路と高水敷の境界面の剪断力（渦の発生もある）の評価や高水敷の粗度などに未解決の問題があり、水位による粗度係数の変化やわん曲複断面水路の縦断的な非一様性、わん曲形状とその位相差などの複雑な問題が残されている。しかし、ここでは川幅の縮小の問題を特に重視したいと考える。

川幅の縮小は、蛇行のモード変化、多重性の変化、蛇行強度の増大、流速の増大（施設対応が不能な範囲がある）、河床低下、および河床構成材料の変化などをもたらす。また、河岸渦の発生や粗度係数の変化をもたらす。単列河道は、取水条件から判断すると好ましいが、単列蛇行河道となってしまう低水路幅は水位の条件を満す限り狭くしてもよいとする意見がある。それは、低水路内の蛇行法線と低水路法線とのなす角が小さく局所洗掘が大きくなるためであるという。これは直線の河道で流砂の条件が安定している場合には、河床低下に対する床固工に問題がない限り是認される。しかし、上流からの供給土砂量の変動がある場合、および曲線河道では不安定となりうるうえ、河道の歴史を無視した考え方であるとしなければならない。実験結果は細粒土砂の効果や、流砂形式および堆積の効果など、全ての相似条件を満たしているものではなく、実験のみに頼ることはできない。川幅の縮小は条件の変化に見合った範囲内にとどめるのが適当と考える。

f 床固

床固は、河道の縦断的なバランスを維持・改善するために、たとえば天井川の解消、掘込み河道の形成、取水位と地下水位の維持、構造物の保護、流水エネルギーの減殺、分流条件の維持、河床低下の調整、流路の調整と安定化、および土砂量の調整等の目的をもって設けられることがある。しかし床固は一方において、河道に弱点を与えることがあり、河相変化に対する順応性に欠け、また河道の縦断的な連続性を阻害するなどの弊害を有する。したがって、床固のような横断構造物は、本質的には河道に安易に設けるべきでない。床固は、やむを得ず多くの場合暫定的に設けるものと位置づけられる。また、床固は工費や維持費もかさむので、河床低下に伴って河道が床固だらけにならないように留意する必要がある。

g 河床変動特性の変化

河道では縦断的な川幅の変化や勾配の変化があって、流砂の調整が行われ、河床変動が一定の範囲内に

おさまってある程度の安定が保たれてきた。河床低下、河道掘削および川幅の縮小等はこの条件を崩す効果をもつ。その結果、河床の粒度組成は変化し、河床変化が生じ、かつ変動幅に変化をきたすことになるのであろう。また、蛇行特性の変化は局所的な洗掘深の変動幅にも変化を与えることになる。この変動幅は、河相変化に伴って、河川毎に、また場所毎に異なるものである。

9. おわりに

河相変化が急激に進行し、現象が変化している。ここでは現象に関する認識の重要性和基本的な考え方の提示を行った。なかには直観に基づく記述もあるが、今後の調査の結果をまっとう必要があれば補足修正をできたいと考えている。また、今回の巨視的に扱えた河相の細部の内容についても今後つめる必要がある。河相は条件の変化にしたがって常に変化してゆく。特に、ダムが満砂状態となれば再び大きな変化が生じる。研究すべき多くの課題を提供している。

報文の長さの制限から、河床の中規模形態の変化を示す航空写真、河床縦断形や横断形の経年変化を示す実例、および底質材料の経年変化など、多くの参考資料を割愛した。また、必要なことでも省略せざるを得なかったことがある。講演時に補足したいと考えている。なお、以上の考察は、著者が建設省土木研究所に22年間在籍した間に、建設省の河川技術者を中心とする技術集団等から得た知識に基づいて行ったものである。ここに、深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 須賀堯三・島貫徹・徳永敏朗：全国河川上流部の流出土砂量，土木技術資料，18－2，1976。
- 2) 須賀堯三：河相に及ぼす細粒土砂の効果，土木学会年講1981。
- 3) 須賀堯三：河床低下に起因する局所洗掘に関する考察，土木学会水講論文集，1981。
- 4) 須賀堯三：河床低下と河岸洗掘，土木技術資料23－8，1981。
- 5) 須賀堯三：河川における蛇行のモード変化，土木学会年講，1982。
- 6) 須賀堯三：河床低下による砂礫堆長の縮小，土木学会水講論文集，1983。
- 7) 須賀堯三：砂礫堆長の変化と河道現象の特質，土木学会年講，1983，（投稿中）。