

荒川中流部河道への人為的インパクトに対する 河川地形システムの応答

町田 尚久*

キーワード：河川地形システム、人為誘導地形、掃流力、動的平衡、荒川中流部

1. はじめに

河床低下は、日本では高度経済成長期の1960年頃から都市近郊の河川を中心に問題化してきた。例えば、相模川（菊地，1989）などの多くの河川では、橋脚や堤防の基部が露出するなど構造物への被害、および取水障害などが相次いで発生した。その要因として砂利採取が取り上げられ、松本（1964，1965）や三井（1968）などが砂利採取と河床低下の関係の定量化を試みた。荒川中流部でも、砂利採取などの影響によって、江南サイフォンの

露出やその直下の侵食が進み、ほぼすべての区間で河床低下が進行したことが、石田ほか（2006）や町田（2009）によって明らかにされた。また、単に砂利採取量から推測されるよりも大きな河床低下が発生する一方、区間や期間によっては、河床上昇も起きていることがわかってきた。しかし、これらがどのようなプロセスを経て進行したかは、十分論じられていない。

一般に、砂利採取、ダム建設、河川改修など河川に対する人為介入のインパクトは、洪水流の発生や、斜面崩壊・土石流などによる土砂供給の変化などの自然現象と

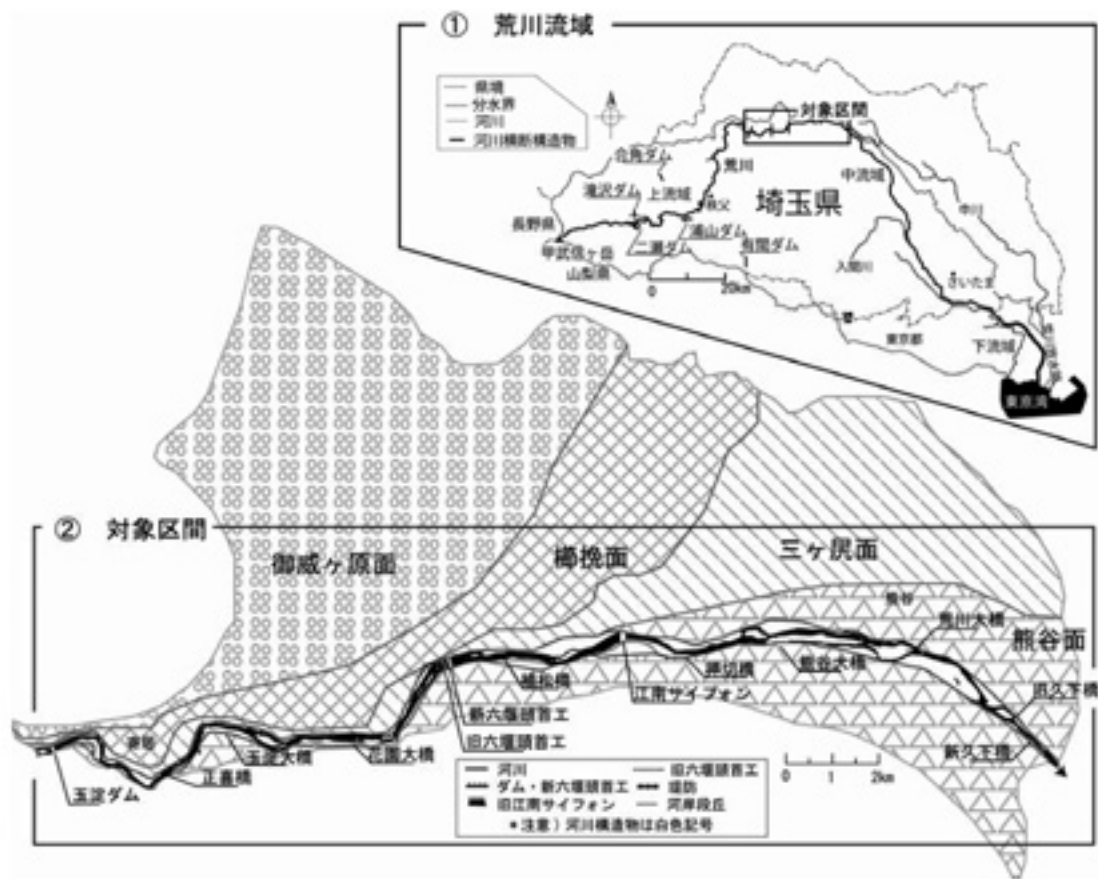


図1 荒川流域 (①) と調査対象区間 (②)
(扇状地区区分は、柳田ほか (1982) と早乙女ほか (2006) を基に作成)

* 立正大学大学院

ともに、地形からみた河川システムへのインプットとしてとらえられ、それに対するアウトプットとして河川地形が変化していると考えられる。本研究では、荒川中流部を中心に、地形からみた河川システムへの人為介入が、具体的にどのようなプロセスを経て地形変化となって表れているかを、資料の解釈と現地調査、および空中写真判読を併用して検討する。その検討の過程で、地形をシステムとしてとらえる方法（Chorley and Kennedy 1971; Schumm 1977, 1981など）や、それに対する人為介入を解析する視点等について、先行する理論的な研究（門村, 1982; 門村・武内, 1983; 中村, 1989など）も随時参照する。

2. 荒川流域への人為的介入の河床地形変化の概要

荒川は、源流を甲武信ヶ岳（標高 2468m）に持ち、流域面積約3000km²、流路延長約180kmの河川である（図1-①）。本研究では、上流部を山地（秩父地方）、中流部を扇状地と氾濫原（寄居から戸田）、下流部を三角州（戸田から東京湾）とした。その中で中流部に位置する寄居から熊谷区間にかけての扇状地区間を対象とする（図1-②）。そこには、形成時代の異なる複数の扇状地が分

布し、それらを縦断して現河道が位置している。河道への人為介入としては、少なくとも中世以来、ところどころで築堤などが行われてきた（彩の川研究会, 2002など）。近世に入ると、1629年に本流の河道を現在の元荒川から和田吉野川へ付け替える大工事が行われた（熊谷市, 1984; 埼玉県, 1988など）。これ以後、荒川中流部より下流側の水害を軽減する目的で、広い堤外地が残されている。また築堤の進展にかかわり、1602年の奈良堰をはじめとして、その後5つの堰が建設された（大澤, 1990）。このような人為介入は、近代に入ると増え、また規模も大きくなった。1920～30年代には、放水路建設や河道の直線化、そして連続堤防への作り替えなどが、荒川中流部から下流部の範囲で行われた。これにより、中流部にあった奈良堰など6つの堰は統廃合され、六堰頭首工や江南サイフォンが建設された。この間、河床高度は図2に示すように、1927～54年間で最大約3m、平均1～2m低下した。この頃の縦断形には、きわだった凹凸はみられない河床低下傾向の河川である。

1950～60年代になると、荒川総合開発事業としてダム建設や支流合流部の改修工事が行われた。19世紀後半にはじまる砂利採取は、高度経済成長期に極めて盛んになったが、1960年代半ばをピークに採取量は減少に転じ、1974

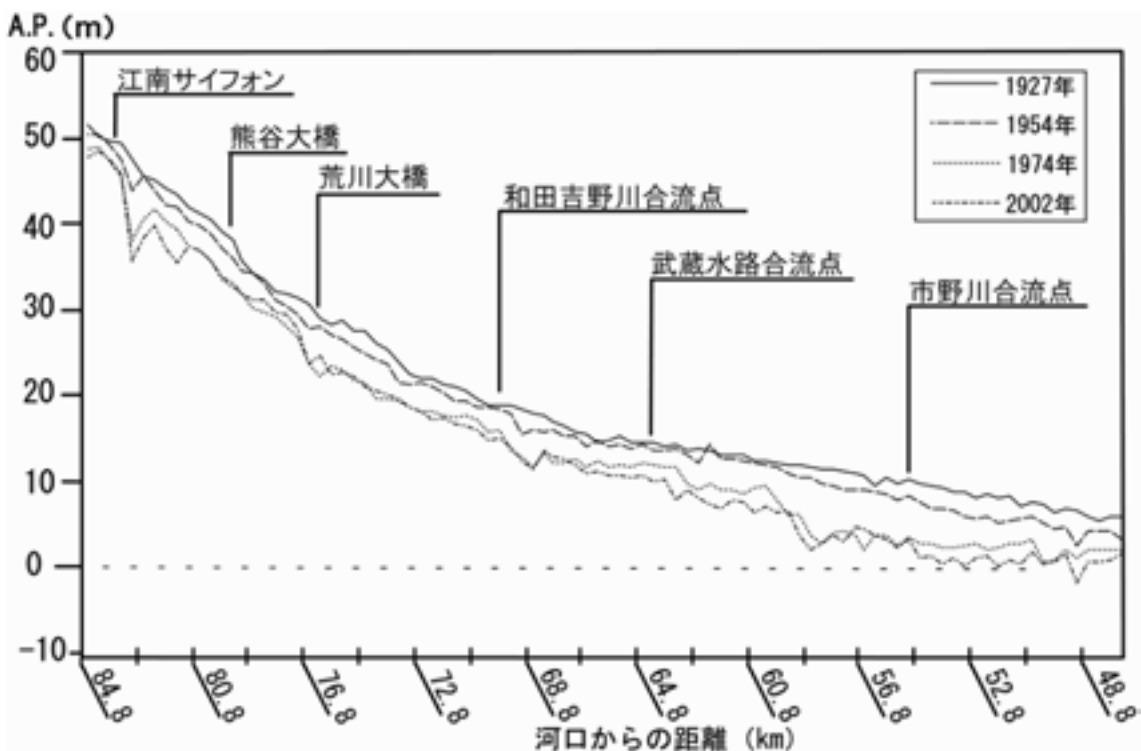


図2 河床縦断形の経年変化

吉野川と荒川の合流点（84.8km）から川越市古谷の大宮国際カントリークラブ付近（46.8km）までの区間である。A.P. は荒川工事基準面（Arakawa peil の略）で、海拔は A.P.+1.134m となる。（荒川上流河川事務所提供資料および立正大学オープンリサーチセンター所有の資料から編集）

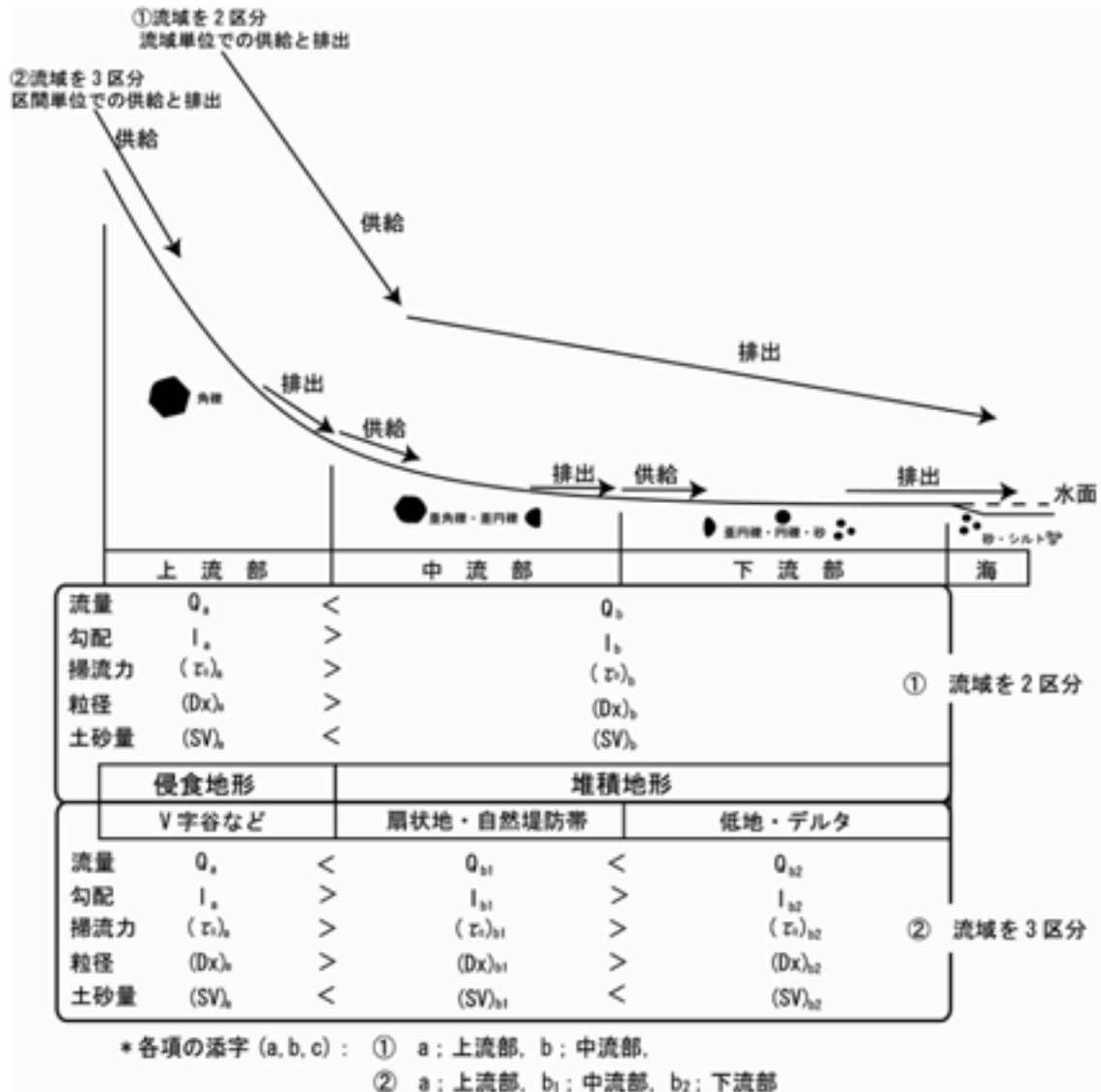


図3 河川地形システムに関わる因子の縦断方向の一般的变化傾向

- ①流域を2つ（侵食区間と堆積区間）に区分した時の縦断方向の因子の変化
- ②流域を3つ（上流部・中流部・下流部）に区分した時の縦断方向の因子の変化

ある任意区間へ供給される土砂や水量は、その区間を通過するときには排出となり、さらに隣接する次の任意区間へは、その排出が供給となる。

①は、流域を大きく2つに区分した。上流は土砂生産域であり、下流はその堆積域にあたる。それぞれ、上流と下流で土砂や水量などが異なり、それは侵食地形・堆積地形と対応する。②は、一般に用いられている上流・中流・下流の3つに区分した。上流から下流まで土砂や水量などが変化するが、この変化がその区間ごとの河川地形の安定をもたらし、勾配に応じた地形として扇状地やデルタなどとして堆積地形を分類することができる。

年になると河川からの砂利採取は法規制によって姿を消した。この砂利採取期間を通して河床低下がみられ、1954～74年に最大約7m、平均2～3mも低下した（町田, 2009）。その後2002年までは、比較的安定した河床状況であるが、その間に低下を伴うと同時に、河床の凹凸が顕著に表れ、河床変動の激しさを物語っている（図2）。

このほか、荒川上流域では二瀬ダムをはじめ4基の大規模ダムが稼働している。また中流部上端には玉淀ダム、その下流の熊谷扇状地扇頂部付近には六堰頭首工がある。

それらのダムや堰の上流側には土砂が堆積し、下流側の縦断形に凹凸がみられるようになった。六堰頭首工の下流は、現在では撤去・改修された江南サイフォンが、河川横断構造物としてみられた。1939年に河床下に設置された江南サイフォンは、河床低下が進んだ1960年代初めに露出して以来、造瀑層と化してその脚部で局所的な洗堀を引き起こし、それに続く区間での著しい河床低下を導いた（石田ほか, 2006; 町田, 2009）。六堰頭首工は、1999年の洪水によって河川を横断する固定堰が破壊され、

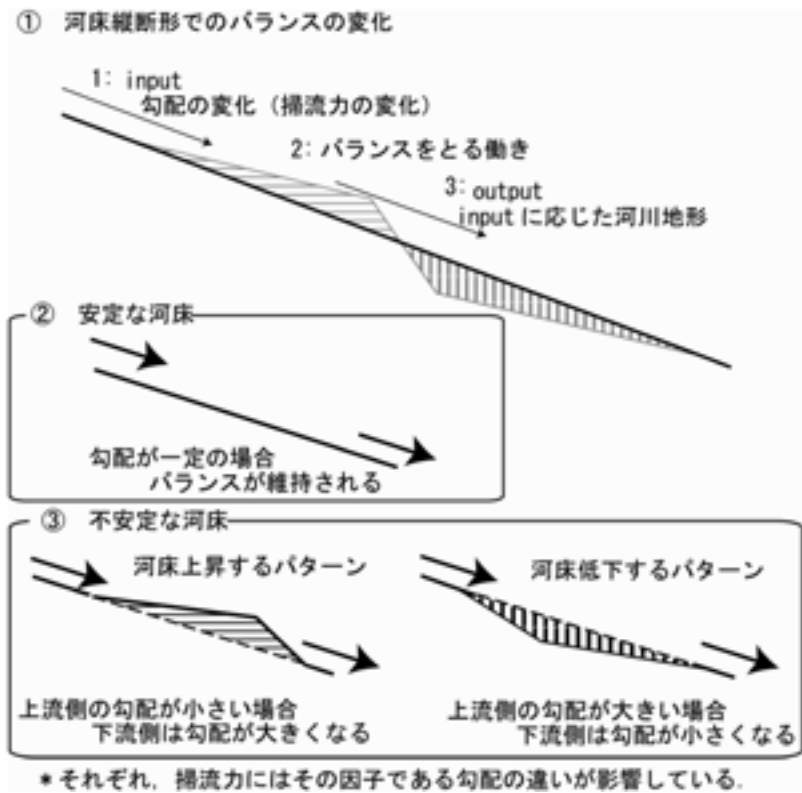


図4 河床縦断形からみた河床のバランス

河床縦断形では、①のようにinputからoutputに至る間でバランスをとる働きがある。勾配が一定の場合は、②のように安定な河床となる。しかし、上流側がその下流側の勾配よりも大きい場合や小さい場合、掃流力にも変化が生じ1→3の過程で安定に向かう作用が働き、3で、それに対応するような地形が形成される。

例えば上流側で周囲より勾配が大きい時、掃流力が強くなる。その下流側では、その掃流力の変化を解消するように勾配の小さな縦断形が形成される（③の右図）。実際の河川では、このような地形のバランスが瀬・淵構造の場所でみられる。これらは、土砂や流量のバランスの変化にも適用できると考えられる。

（Wolman and Miller, 1964を基に編集）

一時的に下流への礫の供給源となり、堤外地段丘を形成した可能性がある。その後、六堰頭首工や江南サイフォン本体の改修工事が継続的に行われ、新六堰頭首工が2009年に完成した。時をほぼ同じくして江南サイフォンも撤去され、侵食防止の河床工が付いた落差工に作り替えられた。これらの改修は、その後、少なくともサイフォン下流側7kmの区間で河床上昇をもたらしたようにみえる（町田, 2012）。

そしてそれらを移動させる掃流力がある。このうち掃流力についてはいくつかのとらえ方、表現法があるが、本研究のような複雑な河川地形の現象を単純なシステムとしてとらえる場合、次の式（1）のようないわゆる無次元公式が便利である。

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot R \cdot I \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 τ_0 : 掃流力、 ρ : 水密度、 g : 重力加速度、 R : 径深 ($R = \text{断面面積} / \text{潤辺}$)、 I : 勾配。

3. 河川地形システムのとらえ方

一般に地形からみた河川システムは、それに関連するパラメータに何らかのインパクトが加わると、それをインプットとしてシステムのネットワークが働き、それに対応するアウトプットとして地形が形成されるという仕組みであり、河川地形システムとして表現できる。

河川地形システムを構成する主要要素は、中流部においては、河床の形状、それを作る物質である砂礫や土砂、

特に扇状地区間では、勾配がしばしば変化するため掃流力に顕著な変動がみられ、それは堆積物の粒径や堆積範囲などに影響する。そのため扇状地では、掃流力の変化をもたらすインプットが、それに対応して、堆積・侵食による地形変化というアウトプットをもたらす。この変化は、扇状地区間の河川勾配が、氾濫原やデルタ区間より大きく、山地区間よりも小さいため、侵食や堆積の現象に影響を受けやすいと考えられる。掃流力公式（1）



図5 洪水規模の時間間隔を基にした河道周辺の地形区分
荒川中流域の扇状地の洪水規模を基にした。

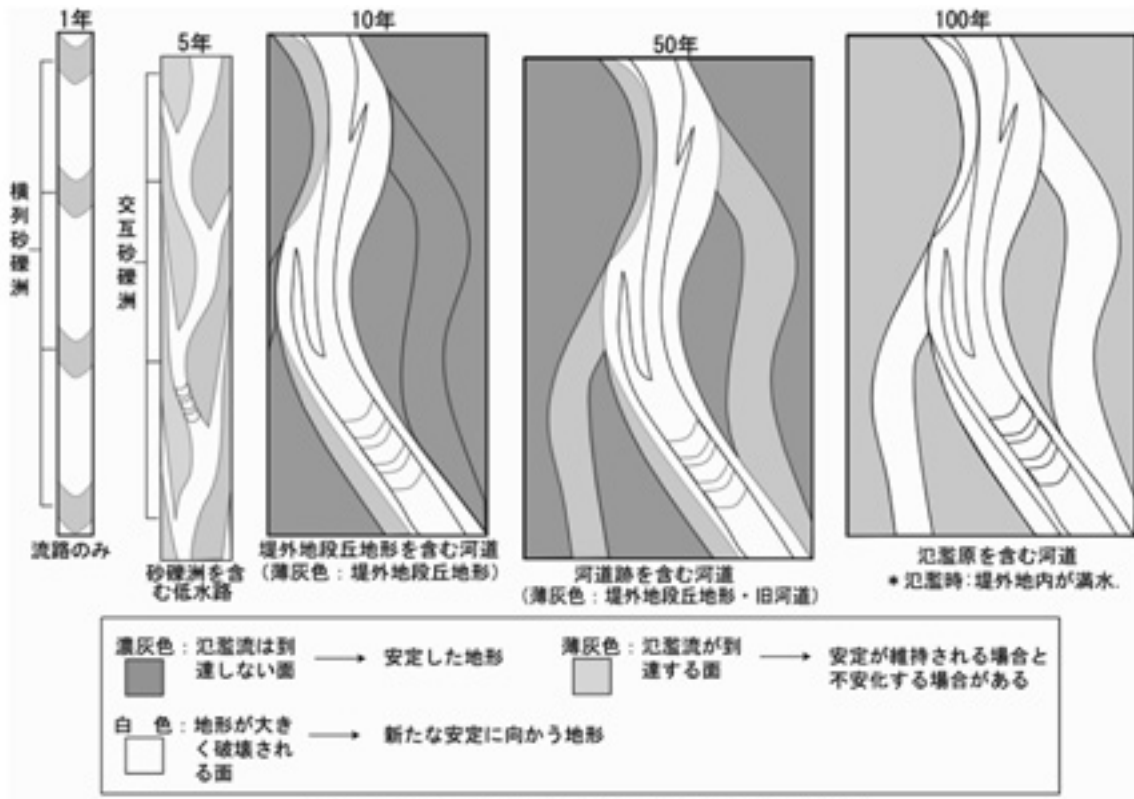


図6 洪水規模の時間間隔を基に区分した安定となる地形と破壊される地形（模式平面図）

荒川中流域の扇状地に対応する区分である。他の河川で用いる場合、洪水規模やその時間間隔を再検討する必要がある。

には、河川構造にかかわるパラメータも含まれているので、掃流力の変化から、河川地形の特徴にみあうように区間を区切ることもできる（図3）。一方で土砂についての変化も、侵食・堆積や砂礫堆の移動など、掃流力に対応した地形の変化としてとらえることができる。このように、掃流力に対する各パラメータのかかわり方を整理することで、河川地形システムとその構造の相互関係を明らかにすることができる。

河川の作用にシステム論的な解釈を適用した Wolman and Miller (1964) は、河川における平衡を、その場に合った特徴をもった勾配を維持するように、インプットと

アウトプットがバランスをとっている状態と定義した。それは、平衡河床縦断形をもつ河川は流域全体で掃流力を介してシステムが働くことでバランスを維持していると解釈できる。つまり、土砂と流量の関係に変化が生じると、堆積や侵食を通してバランスをとっているのである（図4）。さらに Chorley and Kennedy (1971) は、一般的に属性や階層をもつ組織化された構造をシステムと呼び、相互作用を行うさまざまなシステムを、スケールなどに基づいて分類した。そのうち、たとえば平衡状態を保つ河川地形は、制御システムであるといえる。河川地形にかかわるシステムへの外からのインプットに対し

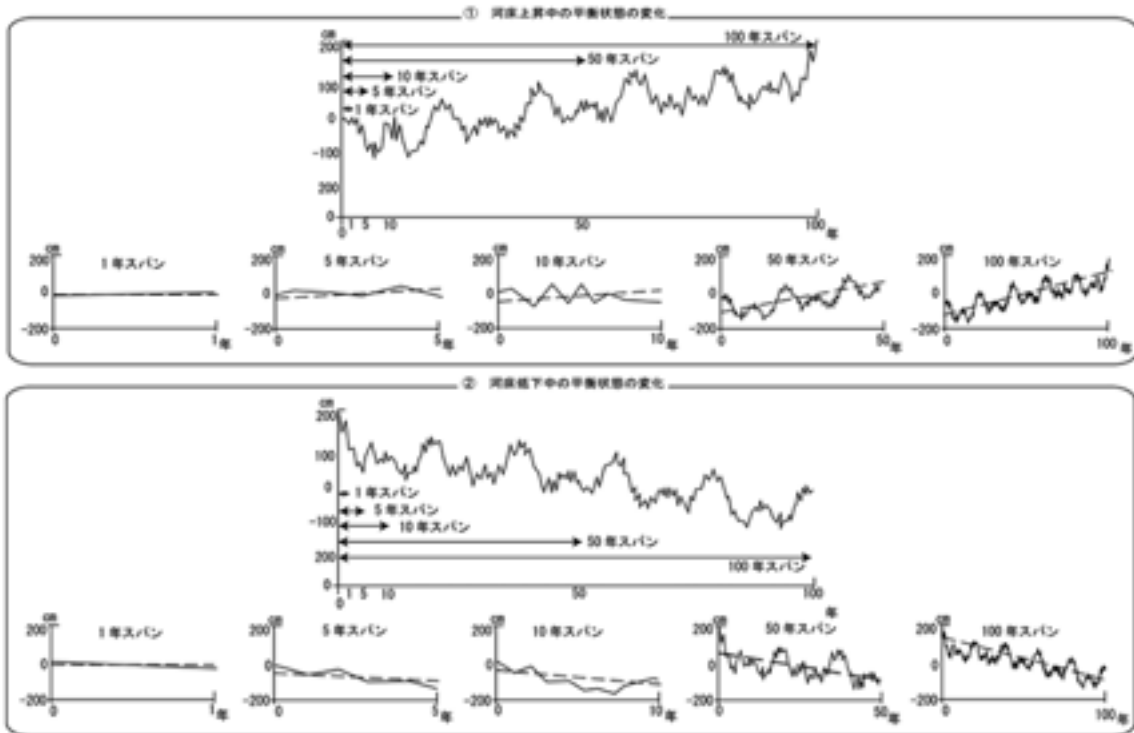


図7 一定方向へ向かう河床縦断形の変化とその時の平衡状態の概念図

①は河床上昇中の変化、②は河床低下中の変化、縦軸は河床の上下変化。



図8 ダムの影響が上・下流に影響を及ぼした地形変化の模式図

ダムのタイプによっても異なる。

では、安定を維持しようとする制御システムが働き、同時にシステムのネットワークが運動して働くことで、河川地形システム全体へ影響が拡大する。これらの解釈に用いられている安定状態の概念は、Gilbert (1877) や Davis (1899) に始まる平衡の概念の発展型である。

地形変化には、さまざまな時間スケールや空間スケールのものがあるため、(1)式に示したような、定数である重力加速度以外は無次元化された掃流力だけでは、縦断方向の長さを考慮せずに、流域全体を通しての地形変化と誤解釈されかねない。そこで、システム論的解釈を適用する現象に応じた時間スケールや空間スケールを設定することで、(1)式をより実態的な変化に合わせて運

用することを試みた。洪水発生と地形変化の時間・空間スケールについては、中村 (1988, 1989) にまとめられている。それを研究対象地である荒川の扇状地に適用するために、ここでは洪水規模などに注目する。

洪水は、河川地形を形成・破壊する機能を持つ。その記録は、少なくとも数百年前から現在までの氾濫や水害の記録と台風などの洪水当時の状況が市町村史などにまとめられている。それらを整理することで、多様な洪水発生時の時間・空間スケールを明らかにできる。それを基に、洪水によって破壊される地形や安定した地形が比高で区分でき、図5のように10年間隔あるいは100年間隔といった時間スケールともよく対応することがわかった。

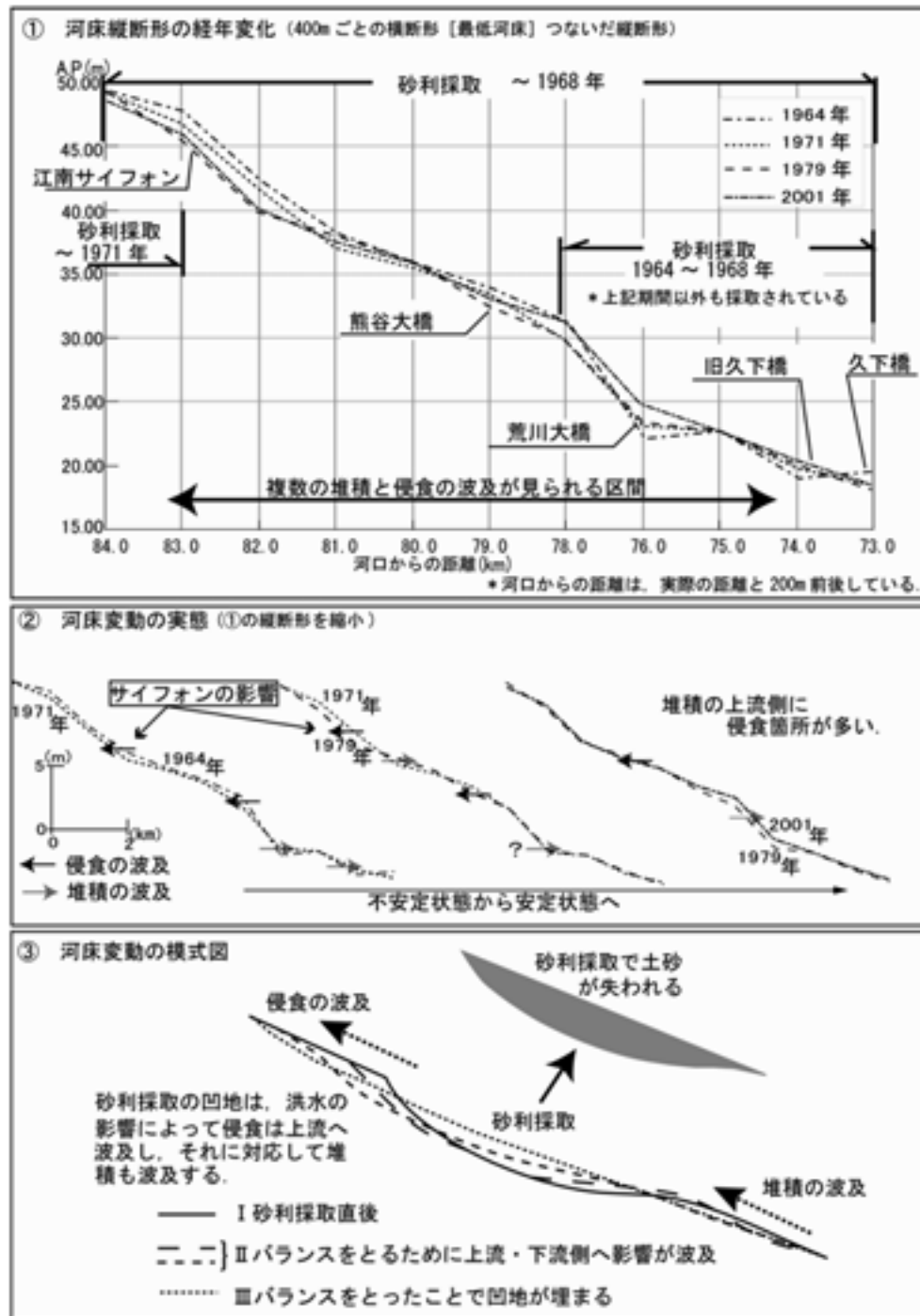


図9 砂利採取の影響を受けた河床の侵食・堆積とその上流・下流への波及
 9-①: 河床縦断形の経年変化, 9-②: 河床変動の実態, 9-③: 河床変動の模式図
 (荒川上流河川事務所提供資料を加工)

加えて、洪水の規模に応じて破壊される平面的な広がりも区別することができる(図6)。これは、ある空間スケールの地形が安定して維持されるか、破壊されるかは、ある規模の洪水が発生する時間間隔に規制されており、その地形の破壊や維持の時間スケールと空間スケールの間に相関があるためである。

地形変化の時間スケールを任意のエリアでの河床変動としてとらえた場合、平衡状態の変化は図7のような概

念図として表現される。地形は、多様なインプットを受け、様々な時間間隔で、安定方向へ向かうように変化する。そのため、河床が上昇中か低下中かにかかわらず、変化速度が同じ程度ならば、同じような規模の地形が形成される。これは河川が、Hack (1960)、Chorley and Beckinsale (1980) などが用いる動的平衡状態にあるからと解釈される。

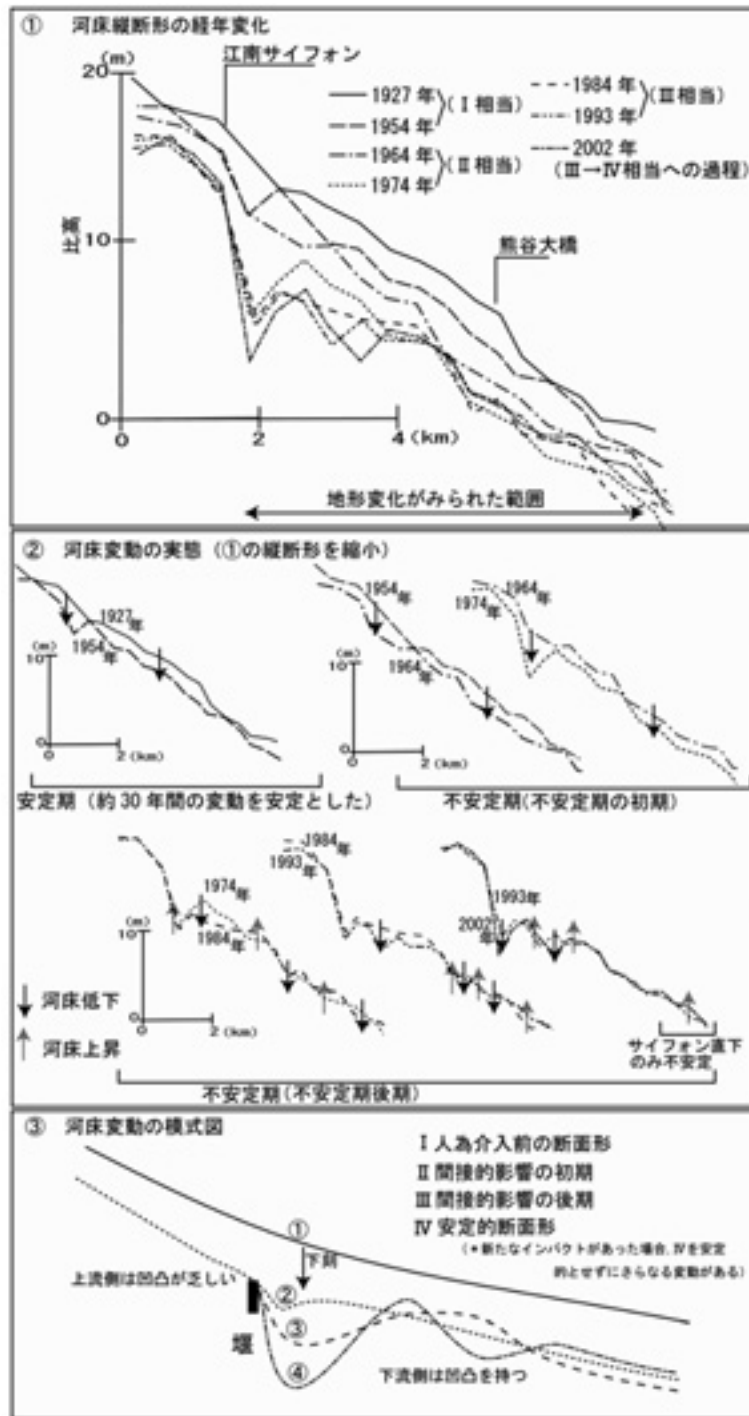


図10 江南サイフォンの間接的影響による河床変動
10-①：河床縦断面の経年変化、10-②：河床変動の実態、10-③：河床変動の模式図

江南サイフォン下流側の河床変動は、2002年に縮小傾向となり、安定的断面形になりつつある状態と考えられる。しかし1999年の六堰頭首工の破壊とサイフォンの改修工事の影響が、新たな変動として河床に影響し、現在もその影響が続いている可能性が高い。

4. 河川地形システムからみる河川地形の変化

河川地形システムへのインパクトには、気候変動や地殻変動だけでなく、築堤や河道の直線化などの河川改修、ダム建設やそれにかかわる治水管理、そして堰や砂利採取などの資源利用という人為的作用がある。これらは、低水路の一部にさまざまな時間スケールで介入し、1～

50年程度の安定期間をもつ地形に、次のような変化をもたらす。

ダムや堰などの横断構造物のインパクトは、河川の一部を閉塞させ、土砂と水を規制するインプットとなる。それによって下流側では、洪水時の流量が減少し掃流力が減ると同時に、上流側からの河床物質の供給が制限さ



図11 江南サイフォンでのインプットに対応するアウトプットとして熊谷大橋付近に形成された堤外地段丘

(荒川上流河川事務所提供資料を加工)

*2010年測量データは、研究室有志によって作成したオリジナルデータ。

れ、下流への土砂移動に負のインプットを生じるような影響が継続する(図8)。一方、築堤や河道の直線化のインパクトは、流水を水路の横断面で一ヶ所へ集中させることから、径深(断面積/潤辺)を増大させ、掃流力を増大させるインプットを持つ。これらは荒川でも起こったと考えられるが、それを検証する資料は得られていない。

砂利採取がもたらすインパクトは、河床物質の安定に直接的に影響する(町田, 2009)。それは、採取が低水路部を中心におこなわれ、安定状態の河床を直接不安定化させるからである(図9-①)。しかし砂利採取終了後も河床勾配の変化が上・下流へ向けて波及し、アウトプットとして採取地を安定させるような地形変化をもたらした。1964~71年の期間にみられる熊谷大橋から旧久下橋に相当する区間の変化は、1964~68年の間におこなわれた砂利採取の影響によるものである。その後の1971~79年の期間は堆積域と侵食域の移動が次第に終息に向かうような河床変動が見られ、1979~2001年の期間では、最終的に凹地が埋ったような河床断面形となった(図9-②)。これは、局部的に河床物質が安定に向かうようにバランスを取る作用が働いた結果と解釈される(図9-③)。

そのような河川地形システムの応答が続き、より長い区間で全体的な河床低下が進んだ。それが及んだ上流側では、1939年に埋められた江南サイフォンが、1960年代初めにその上面が露出して以来、造瀑層と化してその脚部の局所的な洗堀(図10-①)を引き起こした(石田ほか, 2005; 町田, 2009など)。この局所的な侵食は、河川地形システムへの新たなインパクトとなり、江南サイフォン直下で侵食力の局所的増大を招きサイフォンを洗い出すだけでなく、その下流側の河床変動も引き起こした。一方でサイフォンの上流側には、河床低下が遡及し、1999年に六堰頭首工の堤体を破壊させるような影響がおよび、

上流側からの土砂供給の増大につながったと考えられる。

このように人為インプットと自然現象とが二重三重に連鎖することが、河川地形システムへの新たなインプットとなり、それに続く下流側の区間で著しい河床変動というアウトプットを導いた。その変動は、サイフォンから荒川大橋区間のさらに約1 km下流までみられ、広範囲にわたり大小のアウトプットをもたらした。激しい変動はさらに、サイフォンから下流側の勾配にも影響し、1974~2002年間までに勾配が小さくなった(図10-①)。その影響でサイフォンより下流側では、50年間隔で安定する地形である堤外地段丘が形成したと考えられる。またサイフォン直下の洗堀の影響が縮小することで、図10-②のような激しい河床変化が、2002年になると縮小に向かっていると解釈できる。それらの変化は図10-③のように模式化される。この安定化過程におけるアウトプットが、熊谷大橋付近に形成された堤外地段丘地形である(図11)。一方1999年に人為インプットと自然現象の影響をうけた結果、六堰頭首工の堤体が破壊され、上流側からの土砂供給の増大させた。その影響は、荒川大橋付近に1~10年間隔で安定する地形として砂礫堆を発達させた。さらに2011年には、荒川大橋下流側の一部で厚さ約2 mの堆積が砂礫堆に生じるなど、顕著な地形変化が認められた(町田, 2012)。

これらを踏まえると荒川中流部は、少なくとも1927年から何らかの理由により河床低下傾向の河川であったが、昭和中期の人為介入によって極端にその傾向が強くなり、その場での河床上昇あるいは低下だけでなく、主に人為介入した区間の下流側や上流側にも河床変動として影響を及ぼしたと考えられる。その影響は、現在も続いていると考えられるが、2002年頃には50年間隔の安定した地形であり、大きな変動の乏しい堤外地段丘地形を形作ったと考えられる。その後の2010年までには、洪水の影響

や人為の影響をうけながらも、1～5年間隔で安定する地形を形成する状態に移行し、砂礫堆を形成したと考えられる。

このように人為の介入は、河川地形システムに影響を及ぼした。それは、主に①掃流力に対する影響、②河床物質に対する影響、さらに③として①と②の直接的影響をうけての間接的な影響である。人為の介入が河川地形に加える影響の継続時間には違いがあり、ネットワークへの影響も異なる。継続時間に応じてネットワークの相互作用が働くので、アウトプットの地形の応答も異なる。インプットの継続時間の違いは、地形変化の規模や変化速度にも影響すると考えられる。

河川地形に対する人為の介入は、人間社会のシステムの一部から加えられる。そのインプットは、河川地形システムに加えられ、掃流力などの自然のネットワークの相互作用が働き、アウトプットとして新しい地形が形成される。

現在の河川地形の多くは、様々な河川管理のインパクトをうけつつ、自然の地形形成作用によって作り出されている。そのような地形を Zapletal (1973) の人工地形の分類¹⁾に従えば、人為誘導地形と呼ぶことができる。

システム論的解釈は、本論で扱った人為誘導地形の形成だけでなく、複雑で様々な変化をたどる地形を実態に即して解釈するための1つの重要な手法と考えられる。

注

1) 田村ほか (1983) より引用。

謝 辞

国土交通省関東地方整備局荒川上流河川事務所調査課の皆様には、荒川にかかわる資料及び情報提供をして頂くとともに、お忙しい業務の中、多大なご協力を頂きました。また立正大学文部科学省学術研究高度化推進事業オープンリサーチセンターには、資料提供を頂きました。深く感謝致します。

参考文献

- Chorley, R. J. and Beckinsale, R. P. (1980): 'G.K. Gilbert's geomorphology', Geological Society of America Special Paper 183, 129-142.
- Chorley, R. J. and Kennedy, B. A. (1971): Physical geography : a systems approach, London, Prentice-Hall, 370p.
- Davis, W. M. (1899): The geographical cycle, Geographical journal, 14.5, 481-504.
- Gilbert, G. K. (1877): Report on the geology of the Henry Mountains, Washington, DC, US Department of the Interior, 160p.

- Hack, J. T. (1960): Interpretation of erosional topography in the humid temperate regions. American Journal of Science, Bradley Volume 258-A, 80-97.
- 石田 武・長田真宏・吉崎秀隆・田村俊和・菊地隆男・門村浩・高村弘毅 (2005): 荒川中流域の洪水と河床変動, 立正大学文部科学省学術研究高度化推進事業オープンリサーチセンター (ORC) 整備事業平成16年度事業報告書, 114-117.
- 石田 武・田村俊和・宮下香織・早乙女尊宣・町田尚久・樋口英梨香・門村 浩・高村弘毅 (2006): 荒川中流域における人為的河床微地形変化と河辺林の立地, 立正大学文部科学省学術研究高度化推進事業オープンリサーチセンター (ORC) 整備事業平成17年度事業報告書, 118-125.
- 門村 浩 (1982): 地形プロセスの人為的变化にまつわる諸問題, 地形, 3, 97-106.
- 門村 浩・武内和彦 (1983): 地形改変研究の動向-その展望, 地理学評論, 56, 199-222.
- 菊地隆男 (1989): 砂利採取による相模川河床の変化, 相模川の砂利採取, 相模原市教育委員会, 134-170.
- 熊谷市 (1984): 荒川と橋, 熊谷市史 通史, 第四章, 416-478.
- 町田尚久 (2009): 荒川中流域の砂利採取と河床変動, 日本地理学会発表要旨集, 75, 212.
- 町田尚久 (2012): 荒川中流部における人為介入がかかわる地形形成, 日本地球惑星科学連合, 予稿 PDF, <http://www2.jpgu.org/meeting/2012/session/PDF/H-GM21/HGM21-04.pdf>.
- 松本繁樹 (1964): 安倍川下流部の最近の河床低下, 地理学評論, 37, 548-559.
- 松本繁樹 (1965): 富士川下流部における最近の河床変動と砂利採取, 東北地理, 17, 197-203.
- 三井嘉都夫 (1968): 河床変動と水利用, 地理学評論, 41, 99-102.
- 中村太士 (1988): 河川の動態解析に関する砂防学的研究, 北海道大学農学部 演習林研究報告, 45, 2, 301-369.
- 中村太士 (1989): 野外科学におけるスケール論 時空間問題の整理, 北海道大学農学部 演習林研究報告, 46, 2, 287-313.
- 大澤章一 (1990): 六堰用水の研究, 埼玉県教育委員会長期研修教員報告, 126p.
- 彩の川研究会 (2002): 埼玉県内に残る旧堤の調査報告書, (社) 日本河川協会, 562p.
- 埼玉県 (1988): 砂利採取, 荒川利用の多角化, 荒川 人文 II, 荒川総合調査報告書 3, 第4章, 第7節, 埼玉県, 625-641.
- 早乙女尊宣・栗下勝臣・石田 武・門村 浩・高村弘毅 (2006): 荒川扇状地の微地形と地盤構造 - 地形・地盤情報の解析・図化とデータベース作成 -, 立正大学オープンリサーチセンター (ORC) 整備事業平成17年度事業報告書, 114-117.

- Schumm, S. A. (1977) : The fluvial system, Wiley, New York, 338p.
- Schumm, S. A. (1981) : Evolution and response of the fluvial system, sedimentological implications, Society of the Economic Paleontologists Special Publication, 31, 19-29.
- 田村俊和・山本 博・吉岡慎一 (1983) : 大規模地形変化の全国的把握, 地理学評論, 56, 4, 223-242.
- Wolman, M. G. and Miller, J. P. (1964) : Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes, Journal of Geology, 68, 54-74.
- 柳田 誠・百瀬 貢・大熊良章 (1982) : 荒川の河岸段丘. 駒澤大学大学院地理学研究, 12, 3-14.
- Zapletal, L. (1973) : Naprime antropogenni geomorfologicke proesy a jejich vliv na zemsky povrch. Acta Universitatis Palackianae Olomouensis, Facultes Rerum Naturalium 42, Geographica-Geologica, 13, 239-261.

Response of Fluvial System to Human Impact on Riverbed Forms and Material in the Mid-Arakawa, Central Japan: a Preliminary Discussion

MACHIDA Takahisa *

*Graduate school of Rissho University

Keywords: fluvial geomorphology, river system, human impact, tractive force, dynamic equilibrium, Arakawa

