

鬼怒川河道における発散・収束現象と 戦後の護岸施工との相互関係に関する考察

PRACTICAL CONSIDERATION ON THE REVETMENT WORKS FROM DIVERGENCE-CONVERGENCE CHANNEL IN KINU-RIVER

三品 智和¹・須賀 如川²・唐沢 潔³・古川 保明⁴

Tomokazu MISHINA, Nyosen SUGA, Kiyoshi KARASAWA and Yasuaki KOGAWA

¹正会員 工修 中央技術株式会社 設計部 河川チーム (〒310-0902 茨城県水戸市渡里町 3082 番地)

²フェロー員 工博 宇都宮大学名誉教授 河相工学研究堂代表 (〒276-0023 千葉県八千代市勝田台 4-2-4 番地)

³国土交通省関東地方整備局 下館河川事務所 (〒308-0841 茨城県筑西市二木成 1753 番地)

⁴正会員 中央技術株式会社 設計部 河川チーム (〒310-0902 茨城県水戸市渡里町 3082 番地)

This paper deals with the influence of construction of revetment works against the deformation of meandering system from normal morphological concept in Kinu-river. Basic channel meandering pattern was formed by jam-up deposit of large stones as a main formation cause of divergence-convergence channel system. By comprehensive field survey including the protected land, channel patterns are clarified to be different in suffering frequency between the reaches of alluvial fan upstream and of loam layer lateral widening due to bank erosion down stream. In the former alluvial fan, double track meandering channels are stable by rigid jam-up deposit of large stones, and there is a little suffering. In the latter, stability of channel is low in bank erosion, longitudinal suffering frequency is high, and therefore many revetment works have been constructed which is one of the main caused deformation of meandering system. In this way, revetment works has close relation with channel pattern and its stability.

Key word: construction of revetment works, divergence-convergence channel, jam-up deposit of large stones, stability of river meandering system, bank erosion

1. 研究内容とその背景

河岸整備は、築堤にはじまりその後、河川改修・災害復旧・その他事業(公園整備等)によって実施されている。鬼怒川では、第一段階の堤防建設の後、河岸整備事業の大部分が災害復旧によるものである。災害復旧工事では、緊急性かつ迅速性が要求され、必ずしも個々の河道システムに配慮した検討が行われているとは言い難い。ここでは、鬼怒川上流部(83~101.5k)を取上げ、鬼怒川の蛇行形態とその安定性を判断基準に、戦後の護岸施工の実態調査とその考察を行った。蛇行形態の解明には、大礫堆及び発散・収束の河道システムとその安定性、扇状地河道と横侵食河道の安定性など、鬼怒川の特質性を反映させた考察を行った。

次に鬼怒川の河道システムに関するこれまでの検討結果の経緯と本論文の位置付けを示す。鬼怒の河道システムは、巨石・玉石等の大礫の集合帯(大礫堆)を核とした発

散・収束の蛇行形態を基本としている。この大礫堆は、洪水時の非定常性に基づく、流砂の分級作用と大礫のみが集合して堆積するジャムアップ現象により形成されると考えられる。特に大礫堆の安定性が高い場所では、大礫堆によるステップ状¹⁾の縦断地形が存在し、その上流側で発散、下流では収束する発散・収束の河道システムを呈していることが示唆された¹⁾。前報²⁾では、大礫堆に焦点をあて、堤内地情報(堤内地地形、戦前からの水路や集落位置等)及び堤外地情報(河道内巨石の縦断分布、高木樹齢等)を活用し、考察を行った。その結果、鬼怒川の92kmより上流の扇状地河道区間(92k-101.5k)で見られる明瞭な発散・収束河道の形成は、数万年オーダーの高い安定性を持つ大礫堆(基幹大礫堆)が適当な間隔で固定し、その間に緩慢に流下・変形する大礫堆がある程度間隔で存在していることが支配要因となっている。また、扇状地下流のローム層侵食による横侵食河道区間(83k-92k)では、河川年齢が扇状地河道区間に対し若く約7000年³⁾と言われて

おり、かつ基幹大礫堆の形成に必要な大礫の存在が少なく、扇状地河道に比して不安定な発散・収束河道を形成していることが認められた。

本論文では、これまでの知見に鑑み、戦後の護岸施工地区の実態について、河道の蛇行システムとその安定性を基本とし、扇状地河道と横侵食河道における相違点を中心に比較考察を行った。考察の結果が、今後の護岸・根固工・水制等の河岸整備の位置付けやその計画に資することを目的としている。

なお、本論文では、大礫を含む混合粒径と洪水流の非定常性を基本とした河道を取扱っている。そこでは、大礫堆が存在し、その安定と共に明瞭な発散・収束の蛇行システムが形成されている。この点において、一様粒径(流砂関数が明らかにされている範囲の混合粒径を含む)・定常流を基本とする交互砂州に関する研究と異なっている。

2. 河道条件別の護岸施工区間の実態

蛇行システムの変化やクラックフロー⁵⁾⁶⁾の発達及び河岸侵食に関する事項は、以下の a) ~e) 等であるが、ここでは護岸施工に焦点をあてて考察を行う。a) 砂利採取、及び供給土砂量の減少(ダム・砂防ダム建設)に伴う河床低下。 b) 護岸施工によるみおの鮮明化とその延伸。 c) 河床低下の進行、及び砂州冠水頻度に伴う固結化(中州植生繁茂)。 d) 攪乱要因の減少(ダム建設に伴う中小洪水の長時間化)。 e) 2 列流路から単列流路への蛇行モードの変化とその変形(高水敷の土地利用に伴う 2 列流路の単列化)。

(1) 鬼怒川における戦後の護岸施工

鬼怒川における護岸施工と年最大流量(佐貫観測所)の経年変化を図-1 と図-2 に示した。戦後、大規模な護岸施工は 5 回程度実施されている。①昭和 25 年・②昭和 33~35 年・③昭和 40~42 年・④昭和 52~57 年・⑤平成 2~6 年である。関連する洪水流量を図-2 に番号で示している。護岸実施率は両岸総延長 37km 中 22.5km (61%), 左右岸別では 18.5km 中、左岸 12.5km (68 %), 右岸 10km (54 %) である。

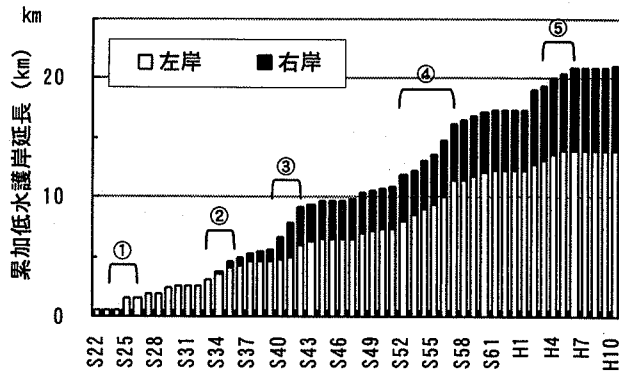


図-1 鬼怒川における護岸累加延長の経年変化
※ 区間：83~101.5km 間(L=18.5km), 昭和 22~平成 10 年工事履歴より測定。

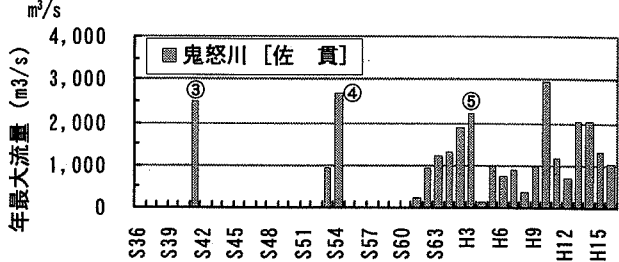


図-2 鬼怒川の年最大流量(佐貫観測所 107k 地点)
※ 図番号は、図-1 の原因となった洪水年度と対応。データ無しは欠測。

図-3 には護岸施工の累加延長を実施年代別に示した。なお、500m ピッチに測定しており、累加延長が 500m を超える区間は、2 回以上被災を受け、再度護岸を施工していることを示す。相対的に見て 92k 下流は累加延長が 500m を超える区間が多く、被災頻度が高い傾向にある。特に左岸 91.5~92.5k 間は累加延長が 1km を越えており、被災頻度が極めて高く、繰返し護岸が施工されている。なお、鬼怒川の堤防建設は、戦前より下流から上流に向けて実施されている。特に昭和 30 年代以前の堤防建設は、護岸施工と併せて実施されている場所も存在している。

(2) 扇状地河道及び横侵食河道の河道形態

鬼怒川河道では、概ね氏家大橋付近(92k)を境に河道形態が異なる。鬼怒川全体では、扇状地地形を形成するが、特に本論文では、氏家地区より上流側は、上流からの流送土砂による堆積地形となっており、一般的な扇状地性の河川特性を持っており、扇状地河道区間とした。一方、氏

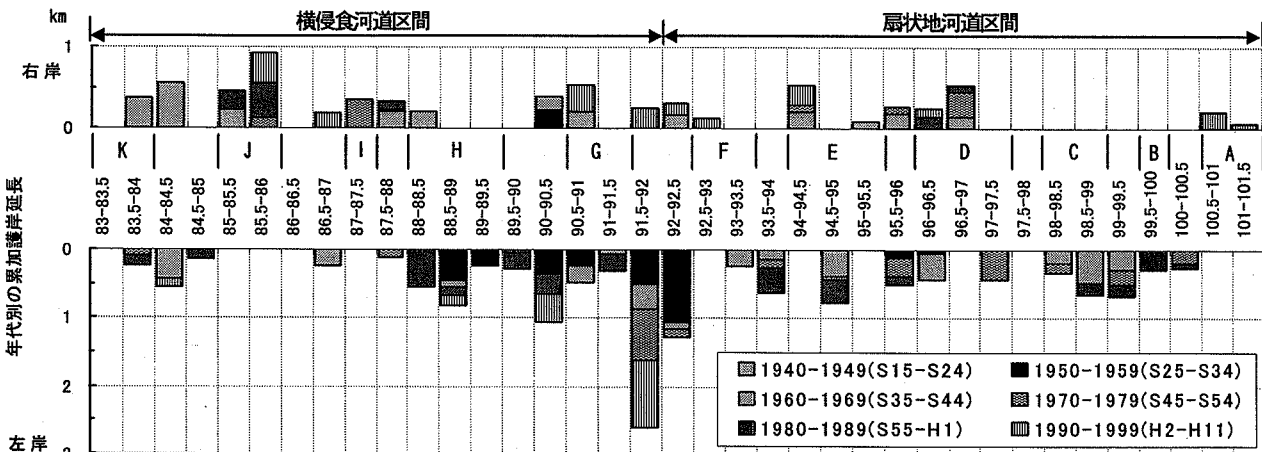


図-3 年代別の累加護岸延長 (500m ピッチ)
※ 年代別の累加護岸延長は、護岸施工履歴を基に区間別(500m ピッチ)に示し、図中の A~K は、図-5 に示す最深河床高の横断振れ幅の極大値から極小値への減少区間と対応。

家下流側では、数段の段丘面で構成されており、現在流下する低位段丘面は、ローム層を横(側方)侵食によって形成された河道であり、横侵食河道区間とした。扇状地河道区間は、河道内に50cm超の大礫を多く含み、平均河床勾配が1/200程度であり、河川年齢としては1万年オーダー³⁾である。これに対し、横侵食河道区間は、河道内に大礫が少なく、平均河床勾配が1/250程度であり、7000年未満³⁾の河道である。

図-4には、航空写真判読による昭和22年以降のみお筋の経年変化を横侵食河道区間(86～92k)と扇状地河道区間(92～98k)に区分して示した。相対的に見て、両区間ではみお筋の流路変化が異なっており、扇状地河道区間ではみお筋変化が小さいのに対し、横侵食河道区間では大きい傾向にある。この違いについて、最深河床高の横断振幅及び河床低下・上昇速度で表現したのが図-5である。なお、最深河床高の横断振幅は、昭和39年以降の13回の定期測量を対象とし、最深河床高の横断位置を標準偏差で表したものである。その値は、大きいほど横断的なみお筋の変化が顕著であることを示している。次に、振幅の極大値から極小値へ下流に向かって減少する区間をA～Kとした。また、河床低下速度は負の値が河床低下を表し、正の値が河床上昇を表している。

扇状地河道区間では、横断振幅の極大値と極小値に明確な差が生じている(図-5上のA～F参照)。これは、過去のみお筋の横断変化において、流路変動が少なく流れが収束する場所と流路変動が顕著な場所とに区分されていることを意味する。また、河床低下速度は、昭和39～55年に扇状地河道区間で顕著な河床低下が生じている。

一方、横侵食河道区間では、横断振幅に扇状地河道区間ほどの明確な差はない(図-5上のG～K参照)。また、河

床低下速度は、各期間共にほぼ一様な傾向が見られる。

河床低下の関連事項として、図-6に年度別の砂利採取許可量を示した。総許可量では、横侵食河道区間が若干大きい、ほぼ同一である。砂利採取による河床低下への影響は、相対的に見て扇状地河道区間において顕著であるのに対し、横侵食河道区間では影響が少ないようである。

以上の結果、護岸施工の実施状況、及び河道形態を整理すると次のようである。a)扇状地河道区間と横侵食河道区間では、流路変動と被災頻度に密接な関係があり、流路変化が著しい場所で被災頻度が高い傾向にある。b)扇状地河道区間では、場所毎の流路変動に発散・収束の規則性を持ち、区間全体を通して、被災頻度は少ない傾向にある。c)横侵食河道区間では、流路変動に規則性が乏しく、扇状地河道区間に比べ、被災頻度は高い傾向にある。

3. 鬼怒川の河道形態とその安定性

大礫堆と発散・収束河道の基本構造、及び各河道形態区間別の大礫堆の実態とその安定性を以下に示す。

(1) 大礫堆と発散・収束の河道システム

鬼怒川の河道システムは、大礫堆(巨石・玉石等の集合帯)を核とした発散・収束の蛇行形態を基本とする。これは、大礫を多く含む混合粒径河道で、かつ土砂量の多くない河川で見られる。類似河川としては、鬼怒川・渡良瀬川等が該当する。土砂量の多い河川では、大礫のジャムアップ現象が生じ難く、大礫堆が発達し難い。以下に大礫堆と発散・収束河道に関する既往の研究成果¹⁾²⁾を簡潔に示す。

土砂量が多く比較的粒径が小さい急流河川では、河床勾配は一定であるか、あるいは変化するにしても徐々に変化し、その変化は連続的と考えられる。しかし、比較的

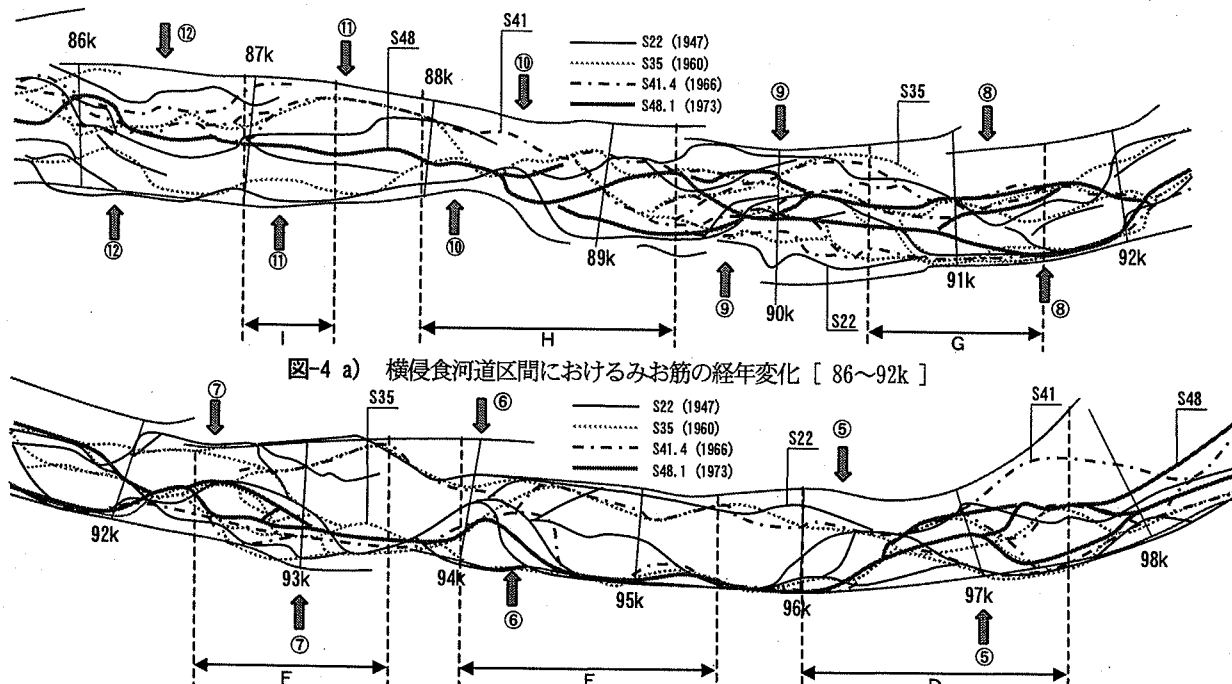


図-4 a) 横侵食河道区間におけるみお筋の経年変化 [86～92k]

図-4 b) 扇状地区間におけるみお筋の経年変化 [92～98k]

※ 矢印⑤～⑫は、図-8に示す堤内情報から推測した大礫堆のステップ位置を左右岸別に示し、D～Iは、図-5上に示す最深河床高の横断振幅の減少区間を示す。

土砂量が少なく、大礫(巨石・玉石等)を多く含む混合粒径河川では、河床高(例えば平均河床高)は、緩やかなステップ状となっており、一様でない。また、大礫径も上流から下流に向けて連続的に小さくなっているわけではない。

実際には、図-7 に示すように、大礫のジャムアップ現象がみられ、ステップを形成する。このステップの安定性が高い場合には、ステップの上流区間で堆積が進行し、発散面を形成し、ステップ直下流では流れが収束し、収束面を形成する。特にステップ下流では、支川の合流があり、霞堤が設置されていることが多い。

(2) 扇状地河道区間及び横侵食河道区間の河道安定性

鬼怒川の蛇行形態とその安定性の判断には、堤外地情報(堤外地の縦断地形、流路変動等)と堤内地情報(堤内地の地形・大礫の分布・霞堤位置等)を活用した。特に大礫堆の安定性は、築堤以前の堤内地情報からの大礫堆位置を基準とし、堤防建設後の堤外地情報からの大礫堆位置の移動変化より安定性の見極めを行った。

図-8 には、堤内地・堤外地(高水敷高・低水路高)の地盤高、及び最大大礫径の縦断変化を示した。なお、地盤高は平面図(1/5,000)のコンターを縦断方向に250m 間隔に区切り、その区間毎の平均値を示したものであり、最大大礫径は現地観測により河道内に存在する代表的な大礫径を3 点法により測定した平均的な直径である。また、図に示すステップ位置は、図-7 のステップに相当する場所を堤内地の縦断形状から判断し、番号で示した。

対象区間内では、大礫堆③⑤⑨の規模が比較的大きいものであり、その諸元を図-8 の表に示している。中でも⑤の大礫堆は縦断落差(左岸6.1m・右岸7.4m)が大きく、安定性が比較的高い大礫堆(基幹大礫堆)と推定される。事実、現在の河道内最大大礫径も⑤のステップ上下流で異なっており、大礫堆下流で極端に小さくなる傾向にある。これに関連する事項として、過去の鬼怒川分岐点位置と大礫堆⑤とがほぼ一致していることがあげられる。すなわち、約7000 前³⁾に五行川から現在の鬼怒川に転流した理由として大礫堆の関与が考えられる。この大礫堆は、現在でも安定しており(実測で確認)、左岸側で下流に傾く平面形状を取っている。大礫堆の規模とその方向を考えると、導流堤のような役割を果たしたことで、現在の鬼怒川に流路を変更したものと推察される。また、大礫堆⑥～⑨では、霞堤の位置とほぼ一致しており、築堤後から現在まで(100 年以上)、砂利採取による河床低下があったにも拘らず大礫堆の安定性は保たれていると考えられる。事実、氏家大橋(92k)の橋脚ボーリング資料によると、大礫堆を鉛直方向に見た場合、大礫層が50m 以上存在しており、砂利採取に伴う河床低下が大礫堆の変形に与える影響は少ないものと判断される。

次に扇状地河道区間と横侵食河道区間の安定性について、堤内地情報と堤外地情報より比較考察を行う。堤内地

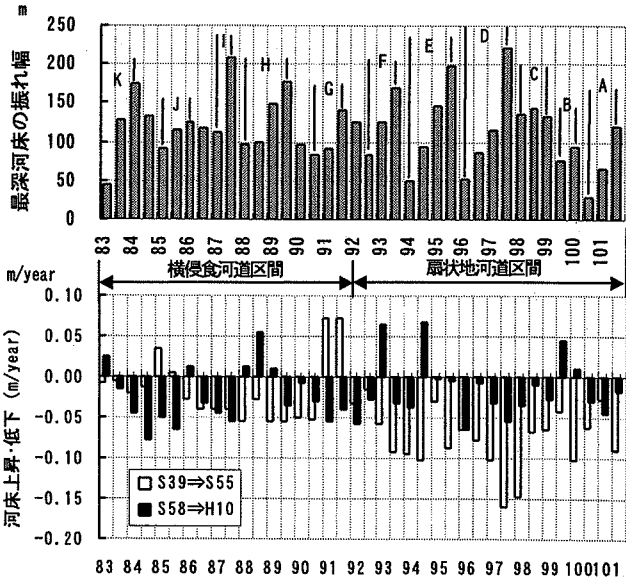


図-5 最深河床高の横断振幅(上)、及び河床低下速度(下)

※ 最深河床高の横断振幅は、左岸堤防から最深河床高位置までの距離を年度別に測定し、その標準偏差である。測定年度は昭和38 年以降の13 回分の定期横断とし、振幅のピーク値から減少する区間をA～K に分類した。

※ 河床低下は、河床高を時系列に並べて、最小2 乗法により求めた傾きで示した。

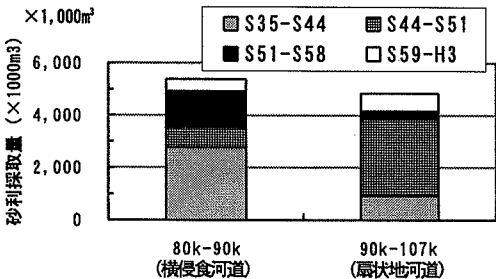


図-6 年代別の砂利採取許可量

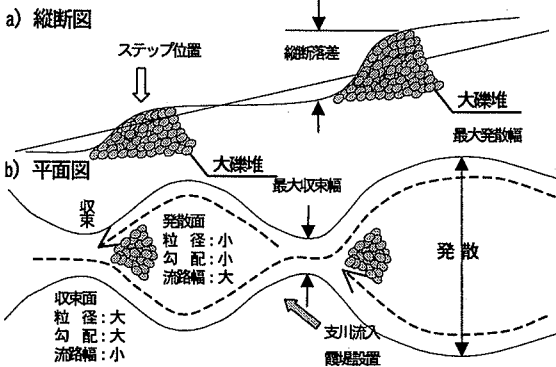


図-7 大礫堆と発散・収束現象の概念図

情報からの大礫堆位置(⑤～⑫)及び最深河床高振幅度の減少区間(Ⅰ～Ⅲ)を図-4 に示している。扇状地河道区間では、大礫堆⑤⑥⑦のステップ位置と減少区間の極小値がほぼ一致しているのに対し、横侵食河道区間では、大礫堆⑧⑩⑪は250m 以上下流側で振幅度の極小値を示し、大礫堆⑨に対応する振幅度極小値は見あたらない。これから判断する限りでは、扇状地河道区間の大礫堆は、堤内地と堤外地の情報から大礫堆のステップ位置はほぼ同一位置(堤内・堤外)であり、河床低下後も移動が小さいことが言える。一方、横侵食河道区間の大礫堆は、堤外地のステップ位置が堤内地のステップ位置より下流側に200～300m 程度移動しており、築堤建設の歴史から判断すると、

その安定性は数百年オーダーと推定できる。

上述の結果の関連事項として、図-9 に最深河床高振れ幅の減少区間(D・J)の頻度分布を示した。これからも扇状地河道区間では発散部から収束部に掛けて、流路変動幅750mから200m程度に流路が収束しており、大礫堆の安定性に基づくものと考えられる。一方、横侵食河道区間では、流路変動幅が500m前後でほぼ同程度となっている。これは大礫堆の安定性が扇状地河道区間に比べ低く、明確な発散・収束河道が生じていないことを物語っている。

このように、築堤後の現河道における大礫堆の安定性の判断には、堤内地情報と堤外地情報から総合的に検討することが有用である。この場合、まず発散・収束河道の基本形成に関したオリジナル大礫堆位置を堤内地情報より推定し、次に堤外地情報より築堤後の大礫堆を推定し、両者の大礫堆がほぼ同一位置であれば、安定性が高いと判断される。

4. 総合考察

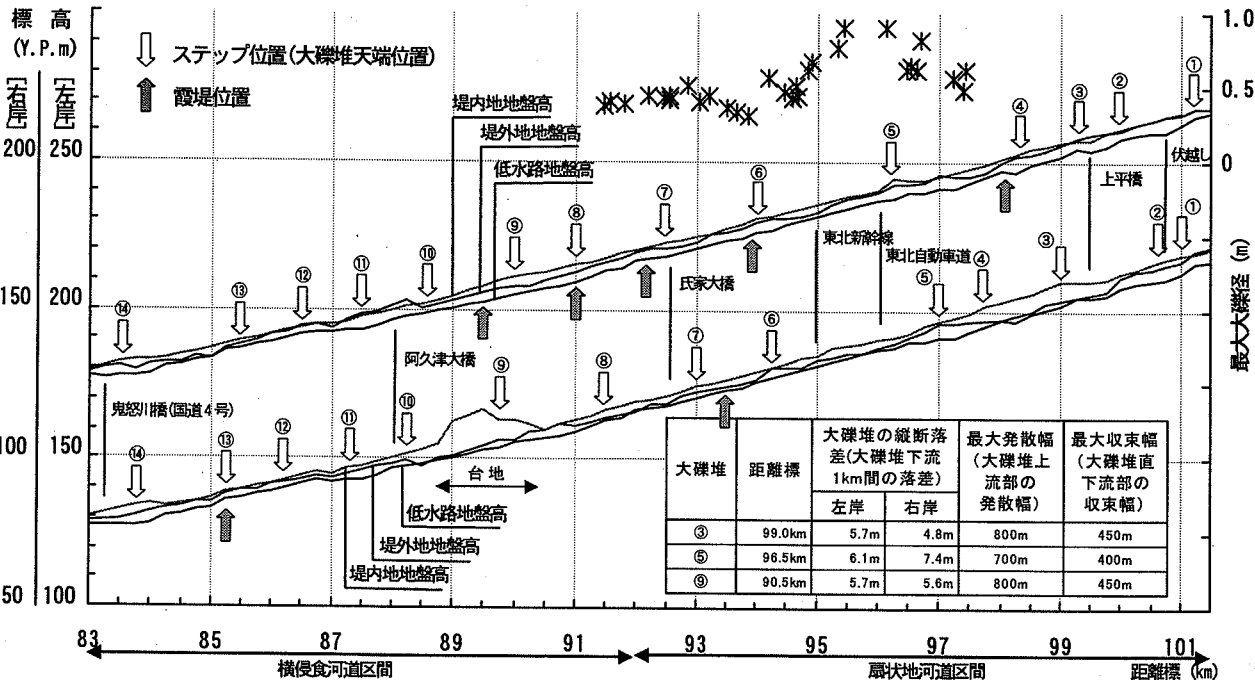
本論文では、鬼怒川の蛇行形態とその安定性を判断基準に、戦後の護岸施工の実態とその考察を行い、以下の知見を得た。

- 1) 鬼怒川の護岸施工は、その大部分が災害復旧工事によるものであり、昭和30年代末頃から頻繁に実施されている。その内、大規模な護岸施工は過去5回程度実施されている。その実施状況は、氏家大橋(92.5k)より上流側の扇状地河道区間、及び下流側のローム層侵食による横侵食河道区間で異なり、その直接要因は大礫堆の安定性の相違によるものと判断される。
- 2) 扇状地河道区間では、築堤以前と同様に築堤後も低水

路内で大礫堆を核とした発散・収束の河道システムが機能しており、その安定性は高い。この区間の護岸施工は、主に大礫堆上流の発散部で実施されているが、2列蛇行の基本形態は安定しており、横侵食河道区間に比べ被災頻度は少ない傾向にある。また、同区間の収束部では、大礫堆の安定性により流れが収束し、低水路幅内での流路変動は小さい。そのため、過去に計画断面を侵すことは少なく、仮に護岸施工が行われても、その後再度被災を受けることはなかったと考えられる。

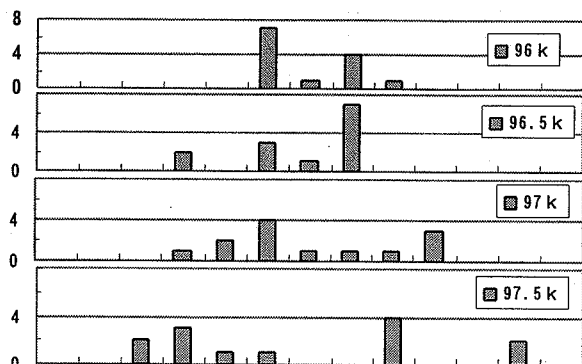
3) 横侵食河道区間では、扇状地河道区間に比べ、大礫堆の安定性が低く、不安定な発散・収束河道を呈しており、護岸施工の実施率は高い傾向にある。これは、築堤前後の大礫堆位置を比較した場合、築堤後の大礫堆位置は下流側に200~300m程度移動しており、その安定度は数百年オーダーと考えられる。区間全体を通して、発散・収束河道の安定性が低下しており、流路変動が大きく、度々計画断面を侵し、護岸施工が行われたものと考えられる。

4) 急激な河床低下は、昭和39年から昭和55年に掛けて、扇状地河道区間において生じている。河床低下の直接原因は、大規模な砂利採取による影響が大きい。他には、支川大谷川の砂防堰堤及び流路工等の砂防工事による供給土砂量の減少が挙げられる。特に扇状地河道区間では、区間上流からの供給土砂量が少なく、表層の大径材料を含めて一括採取しており、その後表層に残された小径材料(砂分)の流出があり、顕著な河床低下が生じたものと考えられる。ただし、昭和58年以降は採取土砂も少なく、所々に河床上昇(堆積)が見られており、河床低下は生じていない。一方、横侵食河道区間では、区間上流の扇状地河道区間からの砂分の供給があり、河床低下の緩和に貢献しており、かつ不安定な河道を呈するため、区間一様に



※ 矢印①~④は、堤内・外地縦断形状より比較的縦断落差の大きいステップ位置を示し、図-7の大礫堆ステップ位置に相当する。
※ 91kより下流側の最大大礫径については、左岸側にはゴルフ場、右岸側には低水護岸が存在しており、オリジナル大礫の実測が困難に付き、欠落。

扇状地河道区間 [最深河床高の振れ幅度(0)]



横侵食河道区間 [最深河床高の振れ幅度(0)]

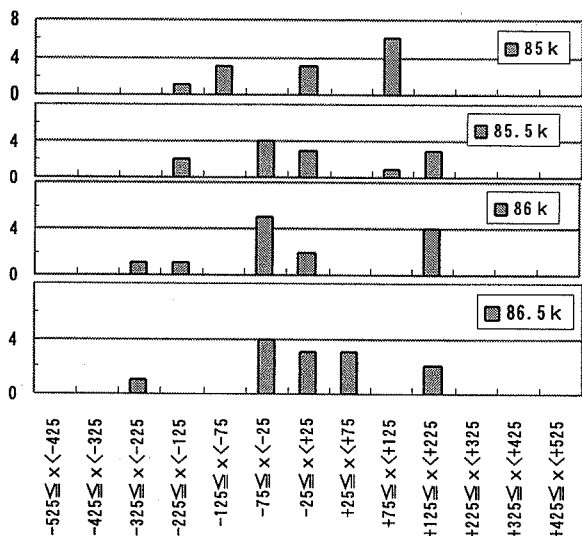


図-9 最深河床高の横断位置の頻度分布

※ 横軸は、左岸距離標から最深河床高までの平均距離からのズレ幅を各範囲別に区分し、縦軸はその頻度を示す。測定年度はS39～H13の13回分使用。

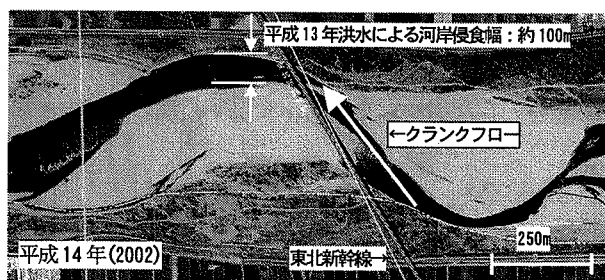


写真-1 鬼怒川のクランクフロー [東北新幹線地区, 94k]

河床低下が進行しているものと考えられる。

5) 戦後の人為作用(砂利採取・築堤・護岸施工・河道内土地利用等)に伴い蛇行モード(2列流路から単列流路)に変化が生じた。その結果、大洪水の減水期や中小洪水等では、河岸に対し鋭角な直進性を有する水衝流(クラクフロー⁵⁰⁾)が散見されるようになり、大きい河岸侵食を招いている。写真-1には、鬼怒川の東北新幹線地区(94k)のクランクフローを示した。当該地区では、平成13年洪水により、一回の洪水で約100mの河岸侵食が生じ、堤防が危険視されるほどであった。鬼怒川の場合には、扇状地河道区間では大礫堆の基本形態が安定しており、河岸侵食が生じる場所が限定されている。当該区間のクランクフローは、みおの発達・延伸と左右岸の高低差の増大等により著しい

鋭角水衝流に発達し、大きい河岸侵食力を有している。一方、横侵食河道区間では、大礫堆の安定性が相対的に低く、区間全体を通して、みおの横断変動が著しく、クランクフローが十分発達するまでには至っていない。しかしながら、この区間においてもクランクフローが発達すると河岸侵食が生じ、現地河川においては繰返し護岸施工が行われている。

5. 結 論

護岸工事は、主に計画断面を侵した場合、既存護岸が破損・変形等が生じた場合あるいは高水敷利用に関連した場合等を実施されてきた。本論文では、既往の河川資料(主に堤外地情報)に堤内地情報(堤内地地形、支川・派川・霞堤位置等)を加え、総合的観点から鬼怒川の蛇行形態と護岸施工の関連性について考察を行った。その結果、戦後の護岸施工の実施状況には、大礫堆を核とする発散・収束の蛇行システムと密接な関係にあることが認められた。

今後は、更なる鬼怒川の河道システムに関する調査・検討を行い、大礫堆の正確な位置と安定性を見極めることが必要である。その結果を受けて、大礫堆下流の流れが収束し、流路変動が少ない場所では、強固な護岸は極力控え、必要最小限の工法(植生河岸、水制等)で河岸維持を図ることが望ましい。一方、大礫堆上流の発散部では、低水路幅内での流路変動が大きく、時にクランクフローの発生・発達が顕著である⁵⁰⁾。今後は、クランクフローの原因を追求すると共に、堤防への危険性が及ばない範囲内で、適切な河岸侵食の許容幅を設定する等の考え方も検討に値する。この場合、許容幅内の侵食であれば、基本的には護岸設置を行わず、植生河岸と水制等で河岸を維持し、維持修繕を前提とした河岸整備を行うことが望ましい⁴⁵⁾。

参考文献

- 1) 須賀如川：大礫を含む混合粒径河川における河道システムの本質に関する考察，河川技術論文集，Vol. 10，pp95～100，2004. 6.
- 2) 三品智和・須賀如川・古川保明：発散・収束河道の大礫堆に関する堤内地を含めた総合的現地観測とその考察，河川技術論文集，Vol. 11，pp375～380，2005. 6.
- 3) 貝塚ら：日本の地形 4 関東・伊豆小笠原，(財)東京大学出版会，pp180～182.
- 4) 須賀如川：新河川法を規範とする河川整備方策の基本事項に関する考察—川の個性の尊重と社会・自然環境の反映—，河川技術論文集，Vol. 11，pp203～208，2005. 6.
- 5) 須賀如川：大きい河岸侵食力を有するクランクフローの基本的事項に関する考察，水工学論文集，pp955～960，Vol. 49，2005. 2.
- 6) 須賀如川・三品智和・唐沢潔・竹内清文・古川保明：発散・収束河道のクランクフローに関する現地調査とその考察，水工学論文集(CD-ROM)，pp979～984，Vol. 50，2006. 2.
- 7) 長谷川和義・藤田睦博：ステップ・プールに視点をのいた山地河道の流れの抵抗，水理講演会論文集，pp79～84，Vol. 30，1986. 2.

(2006. 4. 6受付)