

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

CRANK FLOW AND BANK ATTACKING CONCENTRATED FLOW
AT SHARP ANGLE IN A RIVER CHANNEL
OF DIVERGENCE-CONVERGENCE MEANDERING SYSTEM

須賀 如川¹・三品 智和²・唐沢 潔³・竹内 清文⁴・古川 保明⁵

Nyosen SUGA, Tomokazu MISHINA, Kiyoshi KARASAWA, Kiyofumi TAKEUCHI and Yasuaki KOGAWA

¹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)

²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)

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

⁴国土交通省関東地方整備局 渡良瀬川河川事務所 (〒326-0822 栃木県足利市田中町 661-3 番地)

⁵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 crank flow and bank attacking concentrated flow at sharp angle in a river channel which has divergence-convergence meandering system. Since bank erosion due to crank flow has recently become urgent problem in actual rivers, practical consideration was made based on field data of Kinu-river and Watarase-river. And development of crank flow was discussed in accordance with the channel meandering pattern especially of divergence-convergence system. Results of this study is expected to act an important role on practical application and to suggest to further studies.

Key word: *crank flow, concentrated flow at sharp angle, divergence-convergence channel system, jam-up deposit of large stones, disaster restoration works, measure of bank erosion*

1. 研究内容とその背景

近年, 大洪水の減水期や中小洪水等において, 河岸に対し鋭角な水衝流(クランクフロー)の発生・発達が見られ, その被害事例が多く見られるようになった。クランクフローは大きい河岸侵食力を有しており, 例えば鬼怒川では, 平成15年9月出水により中島橋地区(49k)右岸において約30m, 新幹線渡河地区(95k)右岸で約100mの河岸侵食が生じた。

なお, クランクフローの発生要因には種々の条件があるが本論で取扱うクランクフロー¹⁾は, 主として大礫を含む混合粒径河道で実河川の非定常流条件を考慮した蛇行形態を対象としている。この点において, 既往の研究成果²⁾³⁾とは異なり, この種の本格的な研究は十分に議論していなかったものと思われる。

そこで前報¹⁾では, 初の試みとして, クランクフローの分類・クランクフローの発達過程とその要因等, 基本的事

項について考察を行った。その概要は以下の通りである。

クランクフローの直接的な原因は, 河川改修や災害復旧工事等よるところが大きい。特に直線的な築堤や護岸整備(水制無し)は, その前面にみおを呼び込み, さらに以降の洪水において, 護岸前面のみおの延伸がクランクフローの発生・発達を促進している。また, クランクローの発達には砂利採取・みお部の鮮明化と河床低下が関連している。特にみおの鮮明化は, 冠水頻度が減少した砂州部や高水敷等での植生繁茂等に伴う流路固定化の影響が大きい。

本論文ではクランクフローの発達過程の基本を明確にするため, 近年急激にクランクフローの発生・発達の増大が見られる鬼怒川・渡良瀬川を例に考察を行った。対象河川の蛇行形態は, 大礫堆を核とした発散・収束の河道システムを呈しており, クランクフロー形成過程と河道システムとの因果関係を解明するには, 最適な河川であると考えられる。特に発散・収束の河道システムから見たクランク

ンクフローの位置付け、及び戦後の河川改修・災害復旧工事等とクランクフローの発生条件に焦点をあてている。考察の結果が今後のクランクフロー対策の基礎資料になるとともに、護岸・根固・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。

2. 戦後の河川改修・災害復旧工事とクランクフローの実態 — 鬼怒川と渡良瀬川の場合 —

(1) クランクフローの発達

クランクフローは、山地河道等の自然の制約条件が存在する場合を除いて、沖積地を流下する河道において自然的要因に基づいて発達するのは少ない。自然的要因の典型例としては、余笹川・黒川(栃木県)の例⁴⁾が挙げられる。この河川では、沖積地全幅内を直線的なクランク状の蛇行形態を有している。その支配要因は、河床の粒度構成にあり、大礫に比して砂分量が多い場合(黒川)では直線的な蛇行を呈し、砂分が少なく大礫が多い場合(余笹川)において強制屈折を生じていることが認められた。

本論で取上げた発散・収束河道では、巨石・玉石等の大礫を有する混合粒径材料・急勾配・洪水波形等の条件により、分級作用の結果、大礫のジャムアップ現象が生じて安定した大礫堆に発達していることがわかった⁵⁾⁶⁾。大礫堆と発散・収束河道の概念図を図-1に示す。大礫堆の安定が高い場所(長い間その場所に留まっている)には、図に示すように大礫堆によるステップ地形が存在し、その上流側で発散、下流では収束する河道システムが形成される。特に発散面では大流量時等の高速流は、射流の場合が多く直進性を有することから河道中央部を流下し、このときのみ巨石等の大礫は流れによって輸送される(中小

洪水時には限界流速以下となる)ため、河道中央部において縦断方向に筋状の大礫堆が形成される。実測⁵⁾によれば、筋状大礫堆はときに下流ほど標高が高くなる逆勾配、頂点下流で急な順勾配の三角形状の縦断形状を呈している。また、その横断形状はカマボコ型となる。また、減水期の中小洪水では大礫の移動は少なく安定する。これらが発散面の基本形態となる。

筋状大礫堆の河道内における相対的高さは、砂利・砂の供給量や流量等と関係がある。築堤した場合には、堤防前面の相対的に低い場所が平水・低水の流路となることが多い。これが2列蛇行である。河道幅が適正であると、大流量時には河岸付近の流速は中央部に比し相対的に小さい。また、左右のみおの標高は同一ではないが、水深が大きくなることによる流速の低減効果も生じる。このような場合には、みおの河床低下の進行がない限り、河岸侵食は顕著ではない。すなわち、当時の築堤位置は試行錯誤の結果であったが、発散面河道の護岸を必要としない河道づくりであったと考えられる。

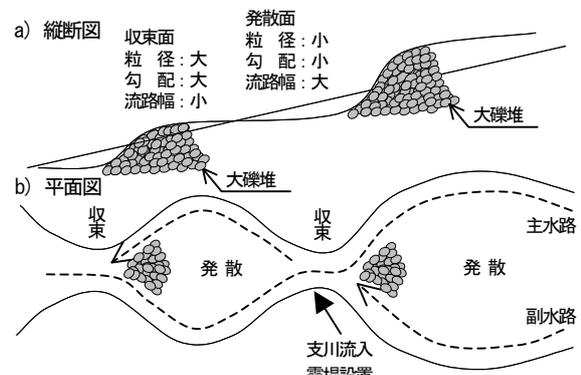


図-1 大礫堆と発散・収束現象の概念図

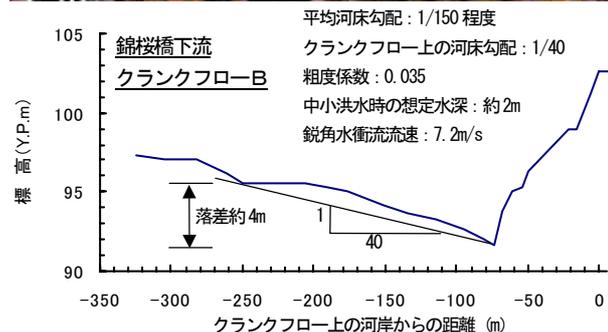
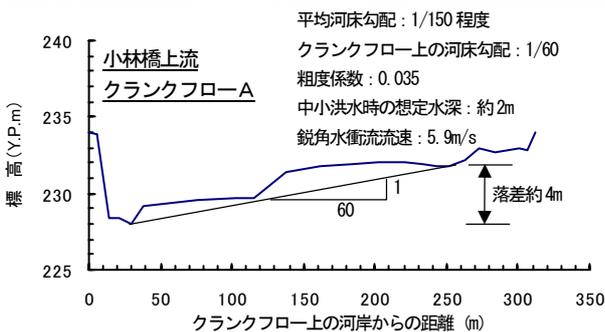


図-2 クランクフロー上の河床地形と調査地点航空写真(鬼怒川・渡良瀬川の場合)

現実には筋状大礫堆はひとつとは限らない。またそれぞれの筋状大礫堆の安定性も異なる。これは土砂条件等の自然変化の影響が大きいと考えられ、河道の不安定化の一因となっている。この場合を除けば、クランクフローの発達の大部分は人為によるものである。その主要原因については前報⁹⁾にて論じたとおりであるが、土地利用と防災の必然の結果と言える。

本論においては、鬼怒川における築堤直後及び低水護岸設置後のクランクフローの発達条件、並びに渡良瀬川における単列蛇行河道への変化後のクランクフローの発達条件について考察を行う。なお、渡良瀬川においては足利・桐生と地域社会の発展は古く、河道幅を十分に確保することが困難であったと推定されること、及び現在の地域社会の要望による多数の公園用地を河道内に確保する施策により発散・収束システムと発散面における筋状大礫堆に基づく2列蛇行が単列蛇行に変化してきたことの諸事情がある。

(2) クランクフローの水量

鬼怒川・渡良瀬川のクランクフローについて、地形測量を行った結果を図-2に示す。鬼怒川小林橋地区(103.5k)は、鬼怒川の中でも比較的規模の大きい大礫堆が存在しており、右岸側堤内地の集落は大礫堆の上に立地し、かつ洪水流に対し安定した土地条件を呈している⁶⁾。クランクフローは、その上流の発散から収束に移行する場所で発生している。このクランクフローの要因は、上流右岸側のみおの延伸によるもので、左右岸の高低差は約4mあり、横断方向の勾配は1/60である。また、河岸侵食速度は3年間(H11⇒H14)で約17m生じた。図-2(左上)には、河岸侵食後にコンクリートブロック護岸を設置した様子がわかる。

渡良瀬川は、鬼怒川に比べ高水敷の土地利用が盛んに行われている。対象地区は錦桜橋下流の48.5k地区で、クランクフローの上下流に公園が存在する。この地区のクランクフローは、左右岸交互の公園整備に伴う、強制的なクランクフローと言える。左右岸の高低差は約4m、横断勾配は1/40であり、水衝部には対処工法として、不透水の水制工が設置されている。

水量の把握には、クランクフローが最も顕著に現れる砂州天端以下の水深を想定し、簡易的に等流速流式(マニング式)を用いて算出した。その結果、水深2mとした場

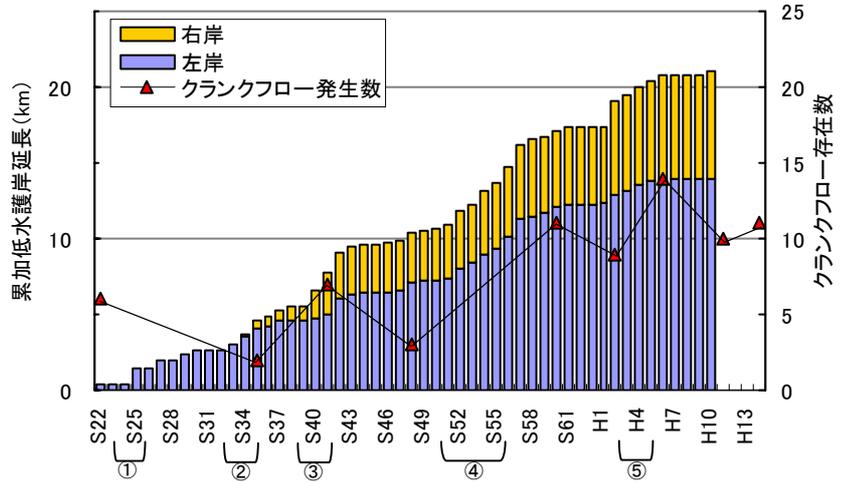


図-3 鬼怒川における低水護岸累加延長とクランクフローの存在数
(区間：83～101.5km間(L=18.5km)、昭和22～平成10年工事履歴より測定、クランクフロー発生位置は航空写真からの判断)

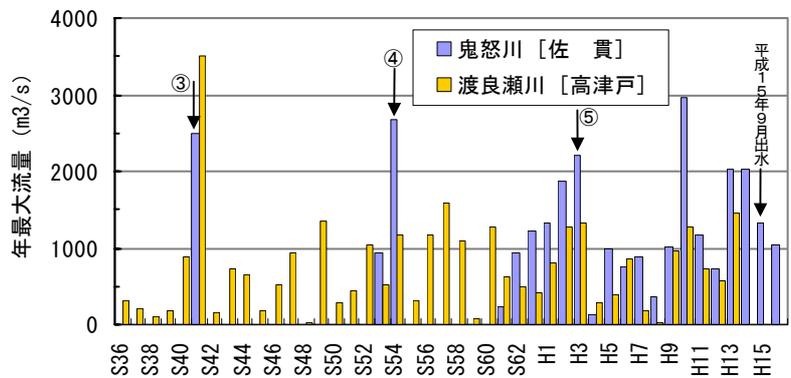


図-4 鬼怒川・渡良瀬川の年最大流量
(図番号は、図-3の原因となった洪水年度と対応)

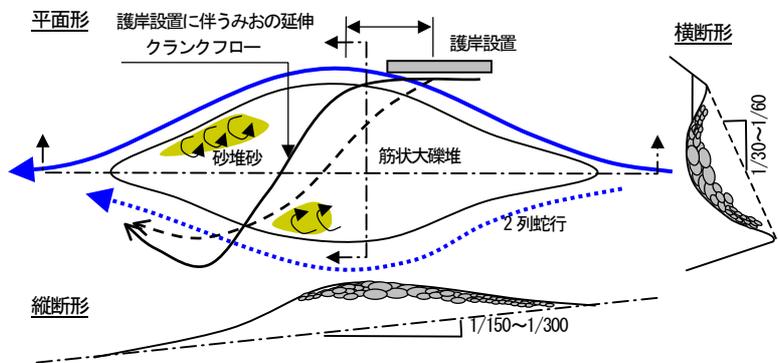


図-5 発散面における筋状大礫堆とクランクフローの概念図

合、およそ鬼怒川で6m/s、渡良瀬川で7m/sである。

なお、クランクフローの発生は砂州天端以下の水深を想定しているが理由は以下のようなものである。鬼怒川では、基本的には昭和22年の航空写真で見られる多くの2列蛇行が現在も維持されており、相対的にみて安定した河道を有している。従って、戦後の大洪水が河床変動に与える影響は少なかったと考えられる。しかし、近年蛇行形態がところにより徐々に変化し、バランスの不具合が目立つようになった。河岸沿い流れの延伸とみお部の河床低下の進行である。そのため兩岸を横断する流路が水路状に発達した。このような河道条件の変化を考慮すると、鋭角水

衝流の発生・発達が顕著になるのは、高い砂州が水面上に現れてからであり、大洪水時の減水過程と中小洪水時である。

(3) 戦後の災害復旧とクランクフローの存在数

鬼怒川における戦後の護岸施工(大部分は低水河岸の災害復旧工事)とクランクフロー存在数の関係を図-3に示した。

クランクフローの存在数は、相対的に増加傾向にあり、平成6年時に最大14ヶ所発生している。また、戦後大規模な災害復旧工事は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。その原因となった洪水流量を図-4に示す。これから判断する限りでは、大規模な災害工事後、クランクフローの存在数は増加し、その後減少し、再び大規模な災害復旧実施後にクランクフローがさらに増加する傾向にある。

なお、鬼怒川における初期のクランクフローは、航空写真による判読結果から堤防建設(高水護岸を含む)に伴うものが大部分である。特に発散部で築堤を行った場合には、流れが河道中央部に押込められ、両堤防沿いの流れが強調される。この当時(昭和22年時)のクランクフローの存在数が少ない原因は、堤防前面から対岸方向に流れるものの、複数の筋状大礫堆の存在により、対岸まで達することなく途中で流向を変えているためと読取れる。

渡良瀬川では、古くから護岸の施工が実施されており、蛇行形態の安定性は鬼怒川の場合より小さい。しかし、河道幅が小さいこともあり、堤防の安全は特別の場合を除き、河川管理者の努力により確保されていた。渡良瀬川における最近のクランクフローは、公園等の高水敷利用に伴う単列蛇行形態への移行とその変形、及び直線的な護

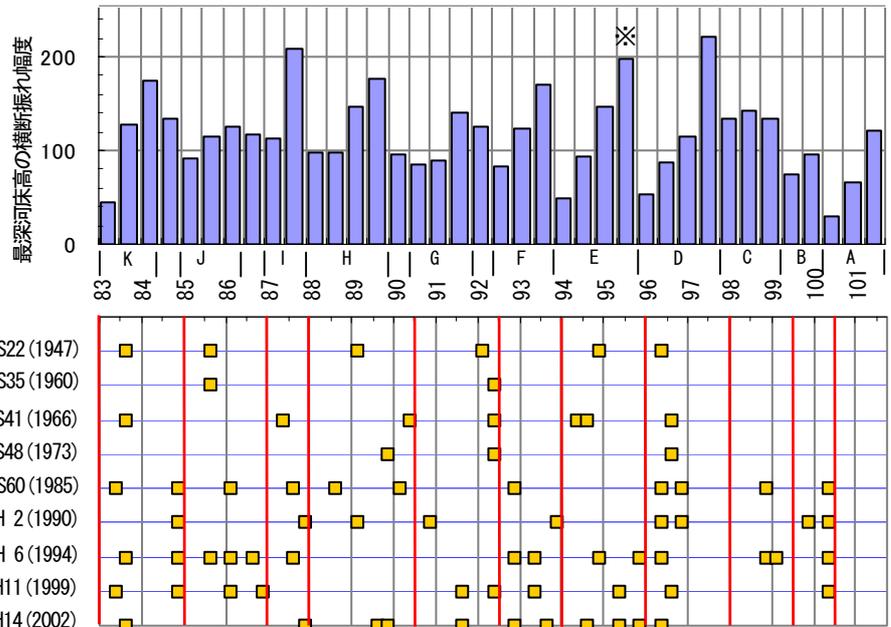


図-6 鬼怒川における最深河床高の横断振れ幅度(上)、及び年度別クランクフロー発生位置(下)

(最深河床高の横断振れ幅度は、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た値の標準偏差である。測定年度はS39～H13年の13ヶ年分を使用した。下流に向かって振れ幅のピーク値から減少する区間をA～Kに分類した。)

岸整備に伴う護岸前面みおの鮮明化と延伸等によるものであり、鋭角水衝流のもつ河岸侵食力の増大が顕著である。

3. 発散・収束の河道システムから見たクランクフローの発生条件

(1) 筋状大礫堆とクランクフローの発生条件

鬼怒川のような正常な発散・収束河道でのクランクフローの発生位置は、主として発散面の河道幅が広く、河道内砂州の横断形状がカマボコ型を呈する場所で発生している。この河道内中央部においてカマボコの頂部を形成し縦断方向に伸びる砂州を筋状大礫堆と称する。筋状大礫堆とクランクフローの基本形態の概念図を図-5に示す。筋状大礫堆は、大礫堆下流の収束部から発散部に掛けての土砂堆積区間で形成される。その基本形態は以下のようである。

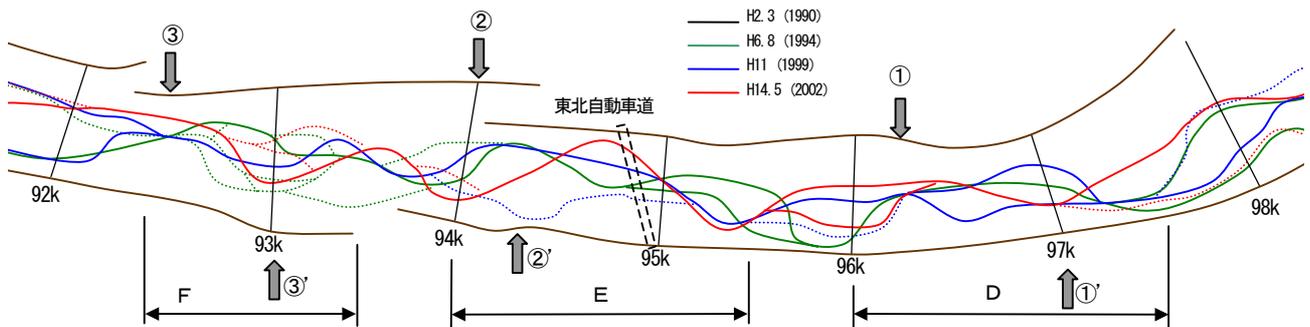


図-7 鬼怒川におけるみお筋の経年変化(92～98K)

(実線は主流、点線は副流を示す。矢印①～③は堤内地情報(堤内地の地形、支川・派川、霞堤)から推測した大礫堆のステップ位置を左右岸別に示す。D～Fは、図-6に示す最深河床高の横断振れ幅度の減少区間と対応する。)

横断形状は、カマボコ型を呈し、その中央部では河床材料の粒径が大きく、端部はそれより小さい材料で構成されている。縦断形状は下流方向にときに逆勾配を呈し、ピーク付近に大きい河床材料が集合し、その後急勾配となり、それより下流では粒径も小さくなる傾向にある。また、関連事項として、筋状大礫堆の下流部では、洪水時の減水期に規模の大きい平面渦が発生し易く、砂の堆積が生じることもある。

クランクフローは、筋状大礫堆の逆勾配のピーク付近末端より下流での幅が広い場所で発生していると考えられる。この付近は、広い発散面を有し、カマボコ形状が扁平化している場所である。発生条件としては、左右岸の標高差に大差があり、その高い位置を流れ、護岸設置等によるみおの鮮明化と下流側への延伸等の諸条件が揃えば、いっきに横断するクランクフローへと発達する可能性が高いと推察される。特に上述のクランクフローへの発達過程は、場所によっては一回の洪水で急速に発達している。例えば¹⁾、鬼怒川中島橋地区(49k)では河岸材料が大礫混じりの砂・礫質であり、河岸の耐侵食性が小さく、一洪水で30m超(航空写真判断)の河岸侵食が生じている。

渡良瀬川の場合には、鬼怒川と同様の原理に基づくクランクフローの発達はありますが、その多くは基本的な発散・収束の河道システムを残したまま、別の形態で発達したものである。すなわち、高水敷の土地利用は発散部が主体であり、収束部のステップ形状は残存している。発散部の筋状大礫堆は多くの場合除去され、かつ低水路に相当する部分は高水敷のなかに取り込まれることによって、2列蛇行が単列蛇行に変形した。しかし、収束部の形態は残されており、大きな縦断落差を有するステップ形状に関連したクランクフローが発達した。しかもその発達は急激であった。事実、渡良瀬川では、堅固なベースを有する大規模な水制群で堤防が守られている地先が近年急激に増大した。これは例えば10年前にはみられなかったことである。

(2) 鬼怒川の既往河川資料に基づくクランクフローの発生位置の検証

鬼怒川における発散部と収束部の分類には、築堤前後の大礫堆位置を基準に行った。築堤以前のオリジナル大礫堆は、論文⁶⁾で示した堤内地情報(堤内地の地形、支川・派川、霞堤位置等)からの推定位置を用い、築堤後の大礫堆は、堤外地情報(堤外地の地形、最深河床高の横断位置等)より判断した。

図-6(上)には最深河床高位置の横断振幅の縦断変化を示し、同図下には各年代別のクランクフローの発生位置を示した。なお、横断振幅は昭和39年以降13カ年分の最深河床高の横断位置を標準偏差で表したもので、値が大きいほど流路変動が大きいことを示している。また、図中A~Kは、振幅が下流に向かって極大値から極小

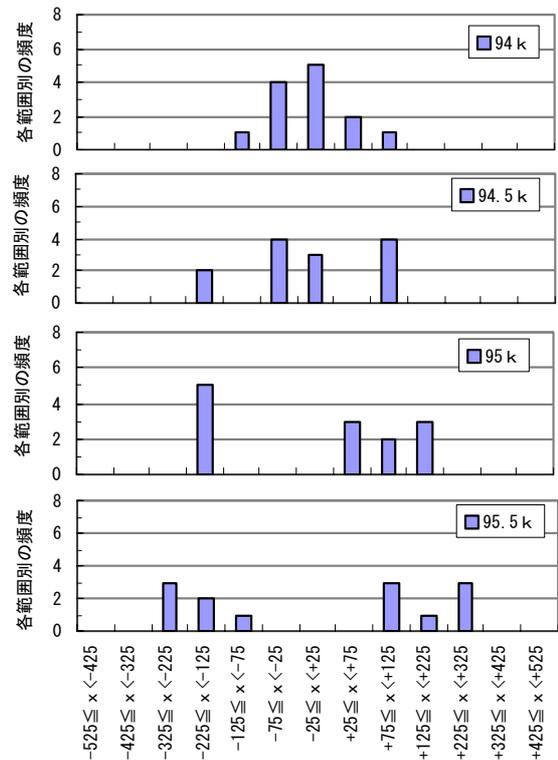


図-8 鬼怒川における最深河床高の横断位置の頻度分布 (図-6上に示す鬼怒川94~95.5k間の減少区間Eに対応する。横軸は、左岸距離標から最深河床高までの平均距離からのズレ幅を各範囲別に区分し、縦軸はその頻度を示す。測定年度はS39~H13年の13ヶ年分を使用した。)

値に減少する区間である。図-7には92~98k間の航空写真判読によるみお筋の経年変化を示し、図中には図-6の振幅減少区間(D~F)及び堤内地情報からのオリジナル大礫堆のステップ位置(図-1のステップ位置に相当する場所)を左右岸別に示している。

その結果、最深河床高の横断振幅(図-6上参照)を用いることで、概ね発散部と収束部を表現できることがわかった。例えば94k地点は、堤内地情報からの判断では大礫堆の下流に位置する場所で流路が収束しており、みお筋変化が少なく、振幅は小さい傾向を示している。一方、95.5k地点は大礫堆の上流に位置し、みお筋の変化が顕著であり、振幅は大きい傾向を示している。この結果は、これまでに示した発散・収束河道の基本概念⁵⁾⁶⁾と一致している。

次にクランクフローの発生は、図-6に示す振幅減少区間内(A~K)の極小値付近(図-6下の赤線)には発生しておらず、その上流の流路変動の大きい場所(発散部)で発生していることがわかった。ここで、図-8には、東北新幹線前後の94~95.5k間の横断振幅の頻度分布を示した。対象区間は、平成14年時に大規模なクランクフローが発生しており、その河岸侵食量は3年間(H11→H14)に約100mを超えるものであった。このクランクフローの直接原因は、上流左岸沿いのみおの延伸とこれまで安定していた筋状大礫堆の発達、及び左右岸のみおの河床高の高低差増大にあると考えられる。すなわち、95.5k地点の振幅は、極大(図-6※印参照)を示し、その頻度分布(図

-8 参照)は両河岸に2分されている。このことから95.5k付近では、過去に流路は河道内中央部を流下しておらず、両河岸に集中した安定性の高い典型的な2列蛇行と言える。従って、筋状大礫堆の発達が目撃されており、左右岸の標高差が大きく、左岸側の護岸設置に伴うみおの鮮明化とそれに伴う延伸が生じた結果、筋状大礫堆末端の95.5k下流で左岸から右岸に直線的で鋭角なクランクフローへと発達したものと推察される。

4. 総合考察

本論文では、鬼怒川・渡良瀬川を例に、発散・収束の河道システムから見たクランクフローに関する実態調査とその考察を行い、以下の知見を得た。

- 1) 鬼怒川では、戦後昭和20～30年代で既にクランクフローの発生があった。その存在数は83～101.5k(延長18.5km)間で5ヶ所程度である。ただし、この段階でのクランクフローの持つ河岸侵食力は現在のものと比較すると小さかったと考えられる。クランクフローの侵食力は、河道の蛇行形態の変形と直線的な護岸設置とともに増大していると考えられる。それにより存在数の増大もみられる。実際にはクランクフローは、昭和50年代以降急増し、平成6年には最大14ヶ所発生している。クランクフローの発生には、災害復旧工事と密接に関係しており、復旧直後の数年で急増し、その後しばらくの間存在数は減少傾向となるが、また次の工事によりさらに増大するという傾向がみられた。
- 2) クランクフローの規模は、大礫堆下流の発散面で形成される筋状大礫堆の規模とその安定性に左右される。洪水流に対し安定性が高く、幅広の筋状大礫堆の場合には、その横断形はカマボコ形状を呈し、砂州上端部では逆勾配、頂点下流で急な順勾配の縦断形を基本とする。この場合、筋状大礫堆左右端の高低差に大差が生じ、かつ直線的な護岸設置によっては、護岸前面のみおの鮮明化と延伸により、大規模なクランクフローへと発達するのが特徴的である。
- 3) クランクフローの発生予測には、発散面における筋状大礫堆の実態とその安定性を見極めることが重要であり、これに関連する事項として、護岸設置位置・露岩位置・巨石分布・植生繁茂等が挙げられる。
- 4) クランクフロー対策として、護岸前面に水制等を設置し、みおの延伸を防ぐ処置が必要とされる。この場合、河岸に対し鋭角な水衝流とならないよう適切な水制配置を検討する必要がある。また、河岸沿いに露岩が存在する場所、あるいは砂利採取に伴う流路固定と河床低下が生じている場所は、急速にクランクフローへの発達が予測されるため、定期的なモニタリングが必要となる。また、筋状大礫堆上の植生繁茂は、河岸沿いの河床低下の進行を促進させる場合があり、左右岸の標高差が大きい場合に

は、要注意である。

5) 渡良瀬川においては、多くの場合発散・収束河道の基本システムは大きく変形し、収束部の特性のみが残されている。高水敷の造成と土地利用等による護岸整備は、極端な見方をすれば結果として、強制的にクランクフローを発生させ、収束部において鋭角水衝流を助長させているともみられる。そのため、近年多数の水衝部において強固な水制群による対応策がとられている。

5. 結語

クランクフローとクランクフローに伴う鋭角水衝流は、強い河岸侵食力を有しており、近年ではその勢力増強と事例数の急増が目撃されてきた。しかるに、研究例は少ないので前報の続編として、実例について河川資料及び現地調査による検討を加え基本的事項の充実を図った。

実例としては、典型的なクランクフローの出現がみられる発散・収束河道を取上げることとし、鬼怒川及び渡良瀬川を例に調査結果に基づき考察を行った。その結果、河川が本来有する河道形態の基本システムの見極めとその尊重が最重要であることがわかった。

幸いなことに河川法が変わり必ずしも工事実施基本計画(工実)に従う必然性はなくなり、計画断面を重視する必要がなくなった⁷⁾。旧河川法を踏襲すると河道の加速変化が予測されるが、これからは河川の実態尊重が促進されることとなる。

クランクフローについては、発達のメカニズム、流れの構造、河岸侵食機構及び対策工のあり方など多くの課題が残されている。本研究が今後の発展に寄与することを期待している。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 芦田和男・江頭進治・里深好文・後藤隆之・寺西直之：網状流路における混合砂礫の分級と流路変動，京都大学砂防研究所年報，34B-2，pp1-14，1991.
- 3) 竹林洋史・江頭進治：自己形成流路の形成過程と形成水理条件，土木学会論文集，No. 677，II-55，pp75-86，2001. 5.
- 4) 三品智和，須賀如川，助川純一郎，古川保明：谷底沖積地の自由蛇行河川における護岸・根固の現地調査と二・三の考察，河川技術論文集，VOL. 9，pp131～136，2003.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.

(2005. 9. 30 受付)