

河川汽水域における河道形状と 干潟分布に関する分析

ANALYSIS OF CHANNEL BED MORPHOLOGY AND DISTRIBUTION OF TIDAL FLATS IN RIVERINE ESTUARIES

大沼克弘¹・遠藤希実²・天野邦彦³

Katsuhiko ONUMA, Maremi ENDOU and Kunihiko AMANO

¹正会員 工修 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 主任研究官
(〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)

²正会員 工修 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室 研究官(同上)

³正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室長(同上)

We have made topographical map and analyzed distribution pattern of tidal flats in riverine estuaries of 16 rivers. Making use of the topographic map and other information, we selected the part of straight channel of 16 rivers and classified those into three areas from a viewpoint of the morphology of sand bar, that is, alternating sand bar, double mode bar, or no sand bar. Furthermore, we have calculated various physical parameter values which can affect the topography of river channel assuming the event of mean annual maximum water discharge and analyzed relationship between morphology of sand bar and those values. In the result, we showed the morphology of sand bar has strong relationships with river channel width/depth ratio at mean annual maximum water discharge but the border line between alternating sand bar and double mode bar is more vague than that in upper alluvium river channel.

Key Words : riverine estuaries, channel bed morphology, tidal flats, sand bar, width/depth ratio

1. はじめに

汽水域では、河川と海の双方から潮位、波浪、洪水、土砂供給などの外力を受け、複雑な現象が生じている。このような環境のもとで、これに適応した特有の生物が生息し、とりわけ干潟は環境上重要な役割を果たしている。そのため、河川環境の一層の向上を図るべく、干潟の造成を中心とする自然再生事業が行われることがあるが、自然の営力により当初の目論見どおりに干潟が維持できていないケースも見受けられる。一方、近年、豪雨による河川災害が頻発しており、環境と治水の両面を勘案した河道の管理が求められている。

こうした中、先述のように汽水域では生起する現象がとりわけ複雑であることも手伝い、河口域の河道の管理を適切に行っていく上で、十分かつ体系的な学術的知見がないのが現状である。とりわけ、管理のカギとなる汽水域の河道形成機構に関する研究の進展が望まれる。

これに関連する既往の知見、研究としては、例えば以下が挙げられる。山本¹⁾は、河口より少しでも上流であ

れば、潮汐流の影響の大きい有明海湾奥に流出する河川(河道の形・スケールが潮汐流に規定されている)を除けば、河道部の小セグメントの川幅、水深等は平均年最大流量、河床材料、河床勾配により規定されており、洪水時に形成される地形面のうち干潮位と満潮位の間部分が干潟面になるとしている。大沼ら²⁾は、太田川放水路で行われた干潟の造成区やその下流の干潟の河床変動傾向を調査・分析し、干潟の地形は、平常時の潮汐や波浪による影響に比べると、ある程度の規模以上の洪水による影響のほうが極めて大きいことを示した。後藤ら³⁾は太田川放水路では約1kmの波長の交互砂州が形成されていることを指摘し、黒木らによる交互砂州の形成領域区分図に平成17年9月洪水及び平成11年6月洪水時の水理量から求めた値をプロットし、交互砂州の領域に位置する時間帯が比較的長いことから、このような洪水により交互砂州が形成されていることを示した。横山ら⁴⁾は、筑後川の感潮河道を対象として地形・底質の季節的な変動特性を調べ、洪水によって河床に堆積している軟泥が洪水によりフラッシュされるが、その後の平水期には高濁度水塊により下流域から浮泥が輸送され、約1ヶ月と

表-1 対象河川の類型

類型		特徴	地形形成要因による類型				
			均衡型	波浪型	潮汐型	流量型	勾配型
			外力が均衡している	波浪が大きい	潮汐が大きい	河川流量が多い	勾配が大きい
平常時の環境形成要因による類型	潮汐Ⅰ型	潮汐がやや大きい	名取川		多摩川, 庄内川, 紀の川, 重信川	揖斐川, 吉野川, 那賀川	
	潮汐Ⅱ型	潮汐が非常に大きい			太田川, 筑後川, 菊池川		
	流量Ⅰ型	河川流量がやや多い			淀川		
	流量Ⅱ型	勾配が緩く流量が多い		天塩川, 赤川			
	勾配型	勾配が大きい					黒部川, 物部川

いう短期でも河床面が50~100%復元していることを観測している。また、大沼ら⁵⁾は、太田川放水路及び旧太田川を対象に、各干潟の平面的な分布の特徴や、標高、横断形状、主要構成材料等の物理的な類似性に着目して干潟を類型化し、類型ごとに形成機構が異なることを示した。

しかしながら、数多くの河川の汽水域における河道形状や干潟の分布パターンについて分析し、これらに大きな影響を及ぼす因子について分析や考察を行っている事例はほとんどない。

河道形状や干潟の分布のパターンについての研究の進展は、持続可能な干潟の造成方法の検討、高水敷造成による影響評価、治水対策として川幅拡張を行う際の川幅の検討や河道掘削を行う際の掘削形状の検討等に役立つものであり、環境と治水を勘案した河道整備・管理に資すると考えられる。

本研究は、横断測量等の既往の調査成果を活用して、16河川の汽水域を対象に河道形状や河口干潟の分布パターンについて整理・分析し、直線的な河道では骨格的な河道形状は中規模河床形態で概ね説明がつくことを示し、単列砂州と複列砂州等の領域区分について既往の研究成果と比較し、共通点と相違点について考察を行ったものである。

2. 方法

(1) 対象河川及び対象区間

本研究では、干潟が多い河川を優先し、様々な特徴の河川をできるだけ網羅し、かつ地域のバランスを考慮して、対象16河川を選定した。岸田ら⁶⁾は、全国109一級水系を対象に悉皆調査を行い、汽水域環境を強く規定すると考えられる河川及び海洋の物理環境指標を用いてクラスター解析により類型化を行っている。その類型を今回の対象河川にあてはめたのが表-1である。平常時の環境形成要因による類型では、潮汐Ⅰ型が最も多く、次に潮汐Ⅱ型が多いが、この二つの類型は干潟が多い河川が多く、潮汐Ⅰ型は全国河川の約4割を占めていることから、

本研究の対象河川が多くなっている。地形形成要因による類型では潮汐型が多いが、これも干潟が多い河川が多く、また全国河川の約1/3を占めていることから、今回多めの選定となっている。このような偏りはあるものの、全ての類型を網羅した選定を行っている。

対象区間は各河川の汽水域を基本としているが、汽水域が10kmを越える場合は10kmまでを対象とし、3kmに満たない場合は3kmを対象としている。ただし、赤川と重信川についてはこの3km区間内に床止めがあることから、床止めまでを対象とし、赤川は1.8k（以後距離標は慣例に倣いkで表示する）まで、重信川は1.7kまでを対象とした。筑後川については、6k付近で分流し、さらにその上流では輪中もあることから、5.8kまでを対象とした。

(2) 河道地形図の作成と河口干潟の抽出

既往の横断測量成果を使って、直線補間した標高値を持つデータを作成し、河道地形図を作成した。なお、各河川で用いた横断測量成果年度は、天塩川：2008、名取川：2008、赤川：2002、多摩川：2004、黒部川：2009、庄内川：2005、揖斐川：2003、淀川：2007、紀の川：2007、太田川：2006、吉野川：2006、那賀川：2007、重信川：2005、物部川：2008、筑後川：2008、菊池川：2009である。いずれも200mピッチもしくはそれより細かいピッチで横断測量が行われている。河道地形図をもとに、感潮帯に入る範囲を簡易的に干潟として抽出した。すなわち、標高の下限は、河口に最も近い検潮所における朔望平均干潮位を河口の出発水位としてそこから平均河床勾配で上乗せした高さとし、上限は朔望平均満潮位として、この標高内に入る部分を干潟として抽出した。

このような簡易的な干潟抽出方法では厳密な抽出はできないが、ここでは干潟の分布パターンを把握するための一つの手段として行うものであり、その範囲内においては支障ないと考えた（太田川の河道地形データを用いて、朔望平均干潮位及び朔望平均満潮位を出発水位として平水流量が流れた時の水位を不等流計算により求め、両者の間に入る部分を抽出したところ、先述の方法で抽出した結果とほとんど変わらないことを確認している）。

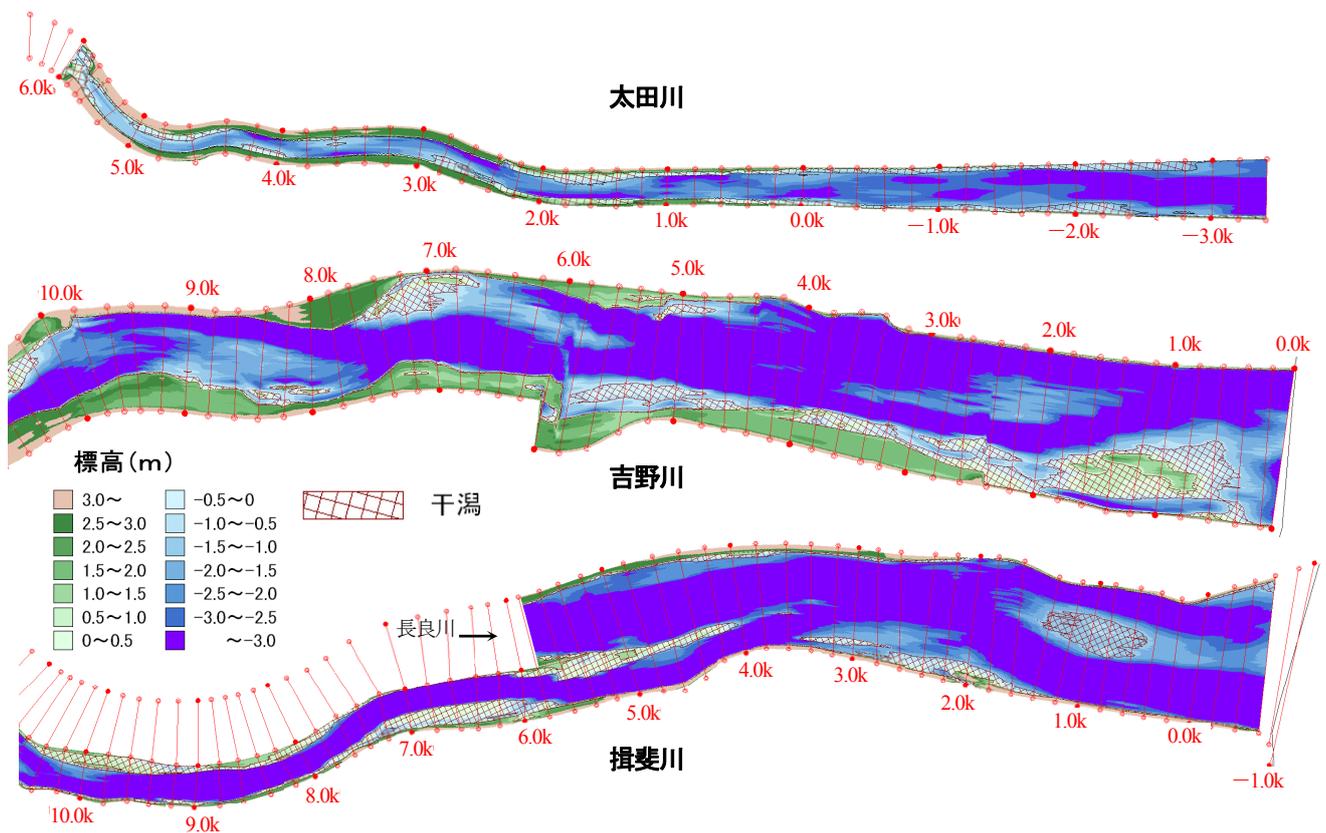


図-1 河道地形図の例

(3) 分析のための諸量の算出

先述の横断測量成果や河道地形図を用いて、各河川について砂州の形態を分析し、単列砂州、複列砂州、砂州なしの区間に分類するとともに、砂州の長さを目視により算出した。このような砂州の分類や砂州長の算出にあたっては既往の研究では空中写真を用いることが多いが、本研究では、先述の手法により、写真ではわからない水面下の河道形状パターンからも砂州形態を分類している。なお、このような方法による砂州形態ごとの区間区分が3kmを越える場合は適宜区間を分割し、分析を行っている。また、平均潮位を出発水位として平均年最大流量が流れた時の不等流計算結果を各測線での水位とし、その水位における水面幅を平均年最大流量時川幅、水位と平均河床高の差を平均年最大流量時水深とした。また、先述の砂州形態に着目した区間区分ごとに、その区間で行った既往の粒度分析調査に基づく代表粒径の値を平均し、その区間の代表粒径とした。

3. 結果

(1) 河道地形図の作成と河口干潟の抽出

先述のような方法により作成した河道地形図の例を図-1に示す。

太田川（放水路）では、後藤ら³⁾や大沼ら⁵⁾が指摘し

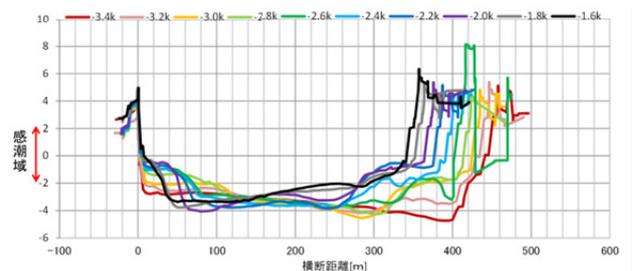


図-2 太田川放水路の横断形状(2006)の重ね合わせ

ているように、低水路において単列砂州が形成されているのが、この図からも見てとれる。この図のもととなっている横断測量成果を-3.4kから-1.6kにかけて重ね合わせたのが図-2である。現地を見ると、左岸では3.0k付近から干潟が出現しはじめ、-1.4k付近まで上流に行くに従って干潟の幅が狭くなる傾向が見られるが、これはこの図からもわかるように単列砂州の形状に符合していることがわかり、このようなことから、干潟の形状は中規模河床形態と関連が深いことが理解できる。さらに図-1（太田川）の上流を見ると、2.0k付近から平面形状が蛇行しはじめ、その湾曲内岸に砂州が形成されているのが見てとれる。さらに、この図からはわかりにくいですが、0.2k付近から2.2k付近にかけては、敷石護岸に沿って干潟が形成されている。太田川放水路ではこのように、3タイプの干潟が存在していることを大沼ら⁵⁾は指摘している。

表-2 砂州形態分類結果

河川	区間	砂州の実態	$I^{0.2}B/H$ 平均	u_s/ω 平均	土砂動態
天塩川	0~1.8k	砂州なし	7.82	0.51	掃流卓越
	2.0~3.8k	単列砂州	12.05	0.86	
	4.0~6.8k	単列砂州	10.94	0.97	
名取川	0~1.8k	単列砂州	33.61	1.41	掃流・浮遊混在
赤川	0~1.8k	砂州なし	8.48	1.73	掃流・浮遊混在~浮遊卓越
多摩川	0~1.8k	複列砂州	37.32	1.66	掃流・浮遊混在
	2.0~4.0k	単列砂州	28.15	0.44	掃流卓越
黒部川	0~3.0k	複列砂州	149.14	0.17	掃流卓越
	0~3.0k	単列砂州	23.44	2.27	浮遊卓越
庄内川	3.2~4.6k	砂州なし	10.21	2.12	浮遊卓越
	4.8~7.0k	単列砂州	10.92	2.38	浮遊卓越
	3.2~6.8k	単列砂州	11.89	1.39	掃流・浮遊混在
揖斐川	0~1.8k	砂州なし	37.20	1.59	掃流・浮遊混在~浮遊卓越
	2.0~4.4k	複列砂州	30.89	1.71	掃流・浮遊混在~浮遊卓越
	4.6~7.6k	単列砂州	21.66	0.98	浮遊卓越
紀の川	0~2.0k	単列砂州	21.07	1.02	掃流卓越
太田川	-3.4~-0.4k	単列砂州	23.32	1.05	掃流卓越~掃流・浮遊混在
	-0.2~2.0k	単列砂州	13.69	1.27	掃流・浮遊混在
吉野川	0~3.8k	複列砂州	42.19	3.17	浮遊卓越
	4.0~6.6k	複列砂州	32.67	1.68	掃流・浮遊混在~浮遊卓越
	6.8~7.4k	単列砂州	29.88	1.20	掃流・浮遊混在
那賀川	0~2.8k	複列砂州	42.22	0.48	掃流卓越
	3.0k~5.8k	単列砂州	25.82	0.38	掃流卓越
重信川	0~0.8k	複列砂州	86.49	0.29	掃流卓越
	1.0k~1.8k	単列砂州	31.48	0.30	掃流卓越
物部川	0~3.0k	複列砂州	50.40	0.26	掃流卓越
	-1.4~-0.6k	複列砂州	70.98	0.65	掃流卓越
筑後川	-0.4~3.0k	単列砂州	33.78	1.05	掃流卓越~掃流・浮遊混在
	3.2~5.8k	砂州なし	17.22	1.39	掃流・浮遊混在
菊池川	0~2.6k	単列砂州	34.27	0.76	掃流卓越

吉野川について見てみると、6.6k付近までは複列砂州の形状が見られ、その上流は単列砂州形状となっているのがこの図からもわかる。横断面までさかのぼると、ここで干潟と見られるところの多くが蒲鉾のような形状をしており、このことから干潟の形状が中規模河床形態と関連が深いことが理解できる。

揖斐川について見てみると、0.0kより下流の左岸で川幅が急激に広がっているところで州が形成されているのがわかる。また、長良川が合流する付近では導流堤による影響と考えられる干潟が見られる。

その他、天塩川の7.6k付近のように、人為的に感潮帯まで高水敷を切り下げたため干潟となっているところもある。

このように、河口干潟の分布や形状を見ると、単列砂州、複列砂州といった中規模河床形態によるもの、湾曲内岸のポイントバー、川幅の急拡大による土砂堆積によるもの、人工構造物によるもの、河道掘削等の人為的影響によるものに分類できると考えられた。

(2) 中規模河床形態の領域区分及び砂州スケールに関する分析

先述のような干潟の形成要因のうち、中規模河床形態によるものに絞り、その領域区分について、既往の研究と比較できるよう、平面形状が比較的直線状となっているところに絞って整理・分析を行った。

先述の手法により、河川ごとに砂州形態に着目して区間区分をした結果を表-2に示す。さらにその区間ごとに、先述の方法で代表粒径を算出し、その代表粒径における沈降速度 ω をRubeyの準理論式を用いて算出し、それにより、200mピッチで算出した摩擦速度を除し、その値が1.08を下回る場合は掃流卓越領域、1.08~1.67の場合は掃流・浮遊の混在領域、1.67を上回る場合は浮遊卓越

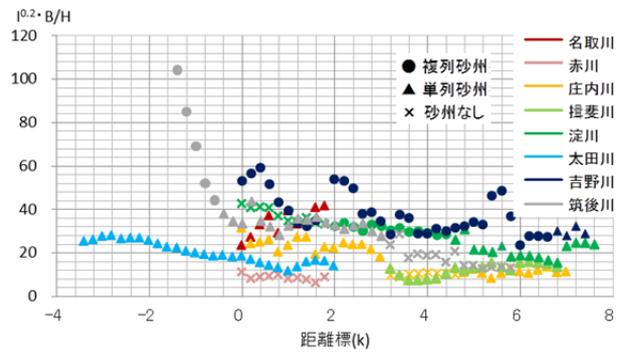
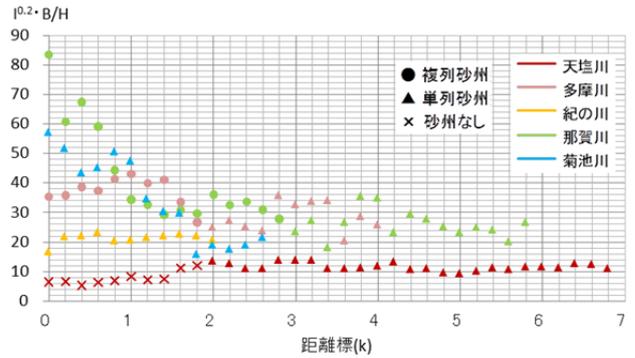


図-3 $I^{0.2}B/H$ の距離標ごとの値と砂州形態

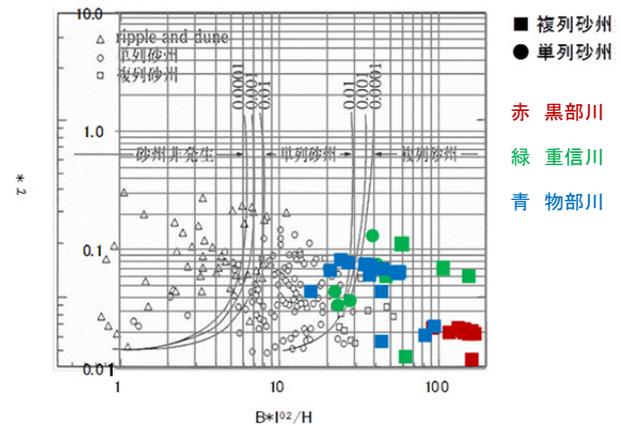


図-4 黒木らによる砂州領域区分へのあてはめ

領域として(参考文献7)による)、平均年最大流量時の土砂動態を整理した。

黒木ら⁸⁾は、広矩形直線流路における中規模河床形態の形成領域区分及び発生機構について理論的な検討を行い、掃流砂を対象に解析した結果から得られた形成領域区分を集約して、実用的な領域区分図を提案している。さらに、無次元掃流力が0.1より大きい場合は簡略して川幅水深比に河床勾配の0.2乗を乗じたものが、7より小さければ砂州非発生領域、7~30であれば単列砂州領域、30より大きければ複列砂州領域となることを示した。

そこで本研究では、無次元掃流力が0.1を上回っている区間と下回っている一連の区間を分けて整理することとした。前者について、平均年最大流量時の $I^{0.2}B/H$ を算出した結果を砂州形態別に示したのが図-3である。上

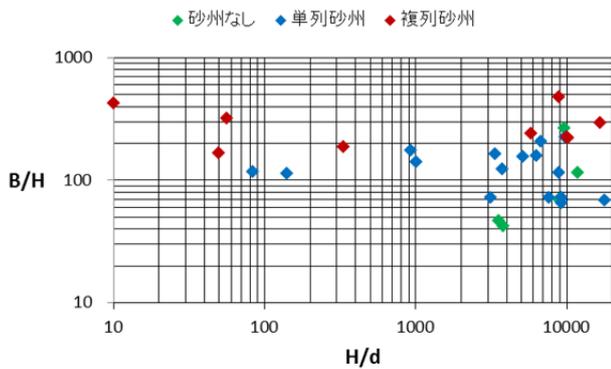


図-5 砂州の形態と川幅水深比、水深粒径比の関係

段は本来適用すべきである掃流卓越領域が多い河川について、下段はそれ以外の土砂動態の区間が多い河川についてまとめたものである。無次元掃流力が概ね0.1を下回っている黒部川、重信川、物部川については、図-4のように、黒木らが提案している領域区分図に落として整理した。

また、山本⁹⁾は、土木研究所で行われた模型実験の結果及び木下の実験結果や、荒川等の実河川について、横軸に平均年最大流量時水深 H を平均粒径 d で除したものの、縦軸に川幅 B を H で除したものとしてプロットし、その結果から、川幅 B の河川に何列の砂州が発生するかは、 H/d が40以上であれば、 B を水深の50倍で割ればよいとしている。ここでは、表-2の区間ごとに平均値を算出し、これと同様の整理を行った結果を図-5に示す。

砂州のスケールについては、山本⁹⁾が、河道がほぼ直線状である場合の砂州のスケールを、主に水理実験による観測資料を用いて整理しており、砂州長 L_s の川幅 B に対する相対長さ L_s/B が、 B/H 、 H/d によってどのように変わるかを調べ、図-6のように整理している。

本研究においても、表-2の区間ごとの平均値で同様な整理を行った結果を図-7に示す。

4. 考察

考察にあたり、まず最初に留意すべきことは、本稿で取り上げている中規模河床形態の領域区分や砂州スケールに関する研究では、実験水路や対象としている河川の大部分が潮位変動を前提としたものとなっていないことである。そもそもそのような知見を本研究で対象とした河川汽水域にあてはめて良いのかという問題である。

しかしながら、3章で示した結果から、河川汽水域においても、一部の河川や区間を除けば、中規模河床形態の区分は平均年最大流量時の川幅水深比やそれに河床勾配の0.2乗を乗じたものとの関連が深いと言えそうである。このことは、潮汐の影響を受ける河川汽水域においても、その河道形状は洪水による影響が大きいことを裏

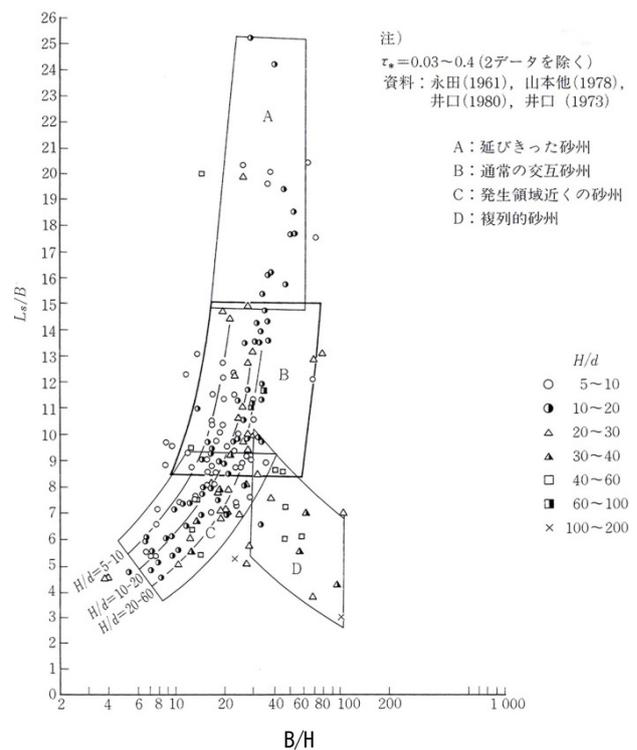


図-6 交互砂州波長と L_s/B と B/H の関係⁹⁾

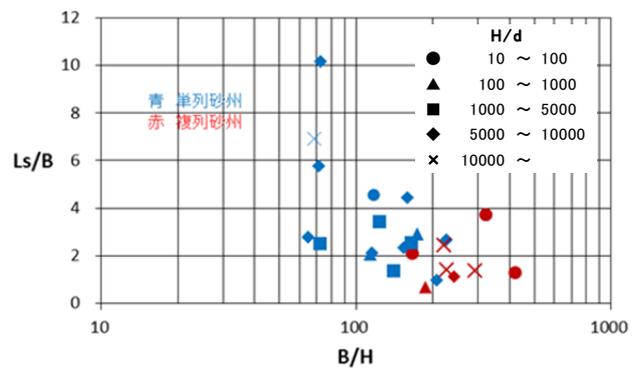


図-7 砂州長川幅比と川幅水深比の関係

付けるものと考えられる。

図-3を俯瞰すると、一部の区間を除けば、黒木らが示した砂州非発生と単列砂州の境界の7、単列砂州と複列砂州の境界の30より、やや高い値で領域区分ができそうである。また、黒木らは掃流砂が卓越する領域を対象に理論構築を行っているが、下段のそうではない河川についても結果的には適合性は悪くなかった。この領域区分からの乖離が大きい区間としては、淀川の0.0~1.8kの砂州なし区間、筑後川の3.2~5.8kの砂州なし区間、菊池川の0.0~1.0kの単列砂州区間が挙げられる。淀川については、該当区間の横断測量成果を見ると微妙に複列砂州のような形状になっており、砂州の高さが小さい複列砂州ととれなくもない。菊池川については、1963年や1972年の横断測量成果まで遡ると複列砂州が形成されていることがわかる。しかし、その後砂利採取や航路浚渫

が該当区間でも行われていることから、その影響を受けた可能性がある。

図-4については、概ね適合性は良いが、物部川の1.8 kより上流で単列砂州領域でありながら実態は複列砂州となっているところが散見される。ただし、物部川の汽水域は1.0 k付近までであり、その範囲では適合性は良い。

山本⁹⁾は平均年最大流量時水深粒径比が40以上であればその影響は小さく、平均年最大流量時川幅水深比100が単列砂州と複列砂州の境界となっていることを指摘している。本研究では、水深粒径比の影響が小さく川幅水深比による影響が大きい点は一致しているが、川幅水深比による境界については大きく異なり、200程度となっている(図-5)。砂州なしにもかかわらずB/Hが266と大きいものがあるが、これは淀川であり、図-3の考察と同様である。

以上のように、砂州の領域境界は、黒木ら⁸⁾の研究による $I^{0.2}B/H$ や山本⁹⁾らの研究によるB/Hの境界に比べ、本研究では高くなっている傾向が見られる。その理由としては、これらの研究で挙げている実河川は、潮汐の影響を受けない礫床河川や自然堤防帯河川が中心となっていることと関係していると考えられる。すなわち、特に砂河川では、洪水の末期の流量が低減して水深が小さくなる過程においても砂州形成に影響を与えているのに対して、汽水域では潮汐の影響で水深があるレベルで下げ止まる河川が多いことが関連していると考えられる。

しかし、先述のように、横山ら⁴⁾によれば、筑後川では洪水で河床が大幅に低下しても、その後1か月程度の短期間で河床が相当戻っており、平常時の潮汐等が河道形状に及ぼす影響は無視できない事例も見られる。本研究においても筑後川と菊池川については適合性が悪い結果となっているのは、有明海に流入し、潮汐差が日本で最も大きい部類に入る河川では、潮汐等による河道形状への影響が大きいことが要因である可能性は否定できない。しかしながら、表-1で示したように、岸田ら⁶⁾の研究でこの2河川と同じ類型に入るとされる太田川は、筑後川や菊池川より潮汐差は小さい河川であるが、大沼ら⁹⁾による干潟を対象とした河床変動調査によれば、洪水による影響に比べると平常時の潮汐等による影響は軽微であった。

以上から、河道形状について、有明海に流入する潮汐差が最も大きい部類に入る河川は潮汐等平常時の影響は大きい、それ以外の河川については小さい可能性がある。本研究では、有明海に流入する河川は2河川しか対象としていなかったが、この仮説を立証するためには、さらに有明海流入河川を中心に検討対象を広げ、研究を進めていく必要がある。

図-7については、図-6に比べると全体的に Ls/B が小さく、川幅水深比による境界は大幅に大きいことが見て取れる。前者については、図-6は実験水路によりまと

まった時間一定量通水しているため、流量が波形を持っている実河川より砂州が長くなる傾向が出ると考えられる。参考文献9)でも、砂州形成実験では、通水初期においては砂州長が短く、時間が経つにつれ成長して長くなる傾向があるとしている。

5. おわりに

16河川の汽水域を対象に河道形状や河口干潟の分布パターンについて整理・分析を行うとともに、そのうち直線的な区間について砂州形状による区間区分を行い、砂州長を計測した。その結果、その領域区分は平均年最大流量時の $I^{0.2}B/H$ やB/Hで相当説明がつくが、その境界値については既往の研究と比較すると大きな値となることがわかった。

河川汽水域は、平常時には潮汐等の影響を受けるとともに、洪水時には潮位変動はもちろん、河口砂州のフラッシュによりドラスティックに水理特性が変化することがあり、そもそも簡易的な手法で砂州や干潟の形成を説明することに無理がある可能性は否定できない。しかしながら、現場の河道管理のためにも簡易的な手法が求められており、先述のような残された課題に今後も取り組んでいく必要がある。

参考文献

- 1) 山本晃一：河川汽水域，pp.67-79，技報堂出版，2008。
- 2) 大沼克弘，藤田光一，望月貴文，天野邦彦：太田川放水路を事例とした河口干潟の設計・管理方法の枠組みに関する研究，河川技術論文集，第17巻，pp.185-190，2011。
- 3) 後藤岳久，福岡捷二，阿部徹：太田川放水路と旧太田川への洪水流量配分及び感潮域の河床変動，水工学論文集，第54巻，pp.757-762，2010。
- 4) 横山勝英，山本浩一，一寸木朋也：筑後川感潮河道における地形・底質の季節変動に関する研究，海岸工学論文集，第53巻，pp.471-475，2006。
- 5) 大沼克弘，藤田光一，望月貴文，天野邦彦，佐藤泰夫，阿部徹：太田川放水路における河床変動特性と干潟の安定機構に関する考察，水工学論文集，第54巻，pp.781-786，2010。
- 6) 岸田弘之，天野邦彦，大沼克弘，遠藤希実：河川汽水域の環境管理技術確立のための全国一級水系の汽水域環境類型化，水工学論文集，第55巻，pp.1273-1278，2011。
- 7) 椿東一郎：水理学II，森北出版，1974。
- 8) 黒木幹男，岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第342号，pp.87-96，1984。
- 9) 山本晃一：沖積河川—構造と動態—，pp.70-80，技報堂出版，2010。