

汽水域の河川環境の捉え方に関する手引書

汽水域における人為的改変による物理・化学的变化の調査・分析手法

平成 16 年 5 月

汽水域の河川環境の捉え方に関する検討会

手引書に寄せて

河川の汽水域は、流域の変化が集積して現れる陸と海の接点に位置し、比重等性格の異なる淡水と海水が混合し、かつ周期的に発生する潮汐と海から吹く波浪などの影響を受け、常に変動する特殊な環境を有しています。このため、海域に生息する生物や淡水域に生息する生物のみならず、汽水性の生物が存在し栄養が豊かで高い生産力を有する多様な生態系を形成しています。反面、地形の変化等人為的な影響を受けると淡水と海水の影響のバランスが崩れ、環境への影響を受けやすいといった変化しやすい環境でもあります。

汽水域はその立地から周辺に港が建設されるなど土地利用の圧力が強い地域であり、古くから人為的に改変されてきました。陸上交通が発達する以前は、港の建設及び舟運のための航路維持として澇筋の確保と砂州の発達を抑えるための導流堤等が建設されました。また、沿岸の農地への塩害防止やおお取水（河川表面の淡水を取水するもの）の解消などのため潮止め堰などが建設されました。

近年では、洪水処理の観点から砂州の発達を抑えるために護岸を設置し低水路を固定したり、河道を掘削するなどの工事が行なわれました。特に河道を掘削する場合には、海水の遡上を助長することから、塩害防止のための河口堰が設置されました。

一方、周辺地域においては土地利用の高度化から後背湿地が開発され、沿岸部は埋め立てが進み、また大型の船舶の往来にも対応できる港湾整備やそれにとまなう航路の維持や道路、橋梁の建設などが各地で進められました。

その結果、汽水域の環境は各地で大きく変化し、生物の種類数やその個体数の減少など様々な環境への影響が顕在化してきています。特に生物の生息・生育環境として重要な河口干潟の減少も著しく、現在河川管理上の最重要課題の一つとなっています。

近年、環境に対する国民の関心が急速に高まるなか、利根川や江戸川、吉野川の河口に見るように、干潟をはじめ汽水域の環境にも関心が寄せられており、生物の生息・生育環境や水域を浄化する場として、さらには潮干狩り等のレクリエーション空間としてその重要性が再認識されています。このような状況に対応して河川管理においても、河川環境の整備と保全を重視した取り組みが進められ、最近では、過去に失われた干潟や湿地を復元する自然再生の取り組みが始まっています。

また、河川整備計画を作成する段階で、より適切に環境への影響を把握するため、平成14年12月に「河川事業の計画段階における環境影響の分析方法の考え方」（河川事業の計画段階における環境影響の分析方法に関する検討委員会、委員長：小野勇一北九州市立いのちのたび博物館館長）がとりまとめられ、現在試行されています。

しかしながら、汽水域の河川環境を適切に捉え、人為的改変による河川環境への影響を事前に予測するために必要な調査・分析手法などは体系的に整理されていないのが現状であり、「河川事業の計画段階における環境影響の分析方法の考え方」のとりまとめの際にも、汽水域の河川環境を把握するための調査・分析手法の確立が必要とされていました。

本手引書では、汽水域における河川環境を把握するために必要な基礎的調査、人為的改変とレスポンスの連関及びその調査・分析手法がはじめて体系的にとりまとめられました。本手引書を活用して、河川管理者には、河道掘削や導流堤の建設のようにみずからが事業を行う場合は、その事業による河川環境への影響を予測・評価し、その影響を最小限にとどめ、また、河口部の埋め立てや河口域での海砂採取等の事業の許認可を行う場合は、それらによる河川環境への影響予測を評価し、許認可の判断や改善の指導を行い、さらに汽水域で発生した問題を踏まえて流域の適正な利用等を提言することが期待されます。

なお、汽水域の環境については、研究途上の分野も多く、その調査・分析手法などにおいて今後新たな知見が得られることから、本手引書は今後適宜内容を充実させていくことが望まれます。

本手引書のとりまとめに当たっては、専門家からなる「汽水域の河川環境の捉え方に関する検討会」を平成15年3月に設置し、これまでに6回の検討会が開かれました。一年間、精力的にご審議いただきました福岡委員長をはじめとする委員各位のご尽力に深く感謝申し上げます。

平成16年5月

国土交通省 河川局 河川環境課長
坪香 伸

汽水域の河川環境の捉え方に関する検討会

委員名簿

委員長	福岡捷二	広島大学大学院 教授	
委員	石川忠晴	東京工業大学 教授	
	和田恵次	奈良女子大学 教授	
	古米弘明	東京大学 教授	
	末次忠司	国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室長	
	藤田光一	国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室長 (安田佳哉 前国土交通省 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室長)	
	福濱方哉	国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 海岸研究室長 (鳥居謙一 前国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 海岸研究室長)	
	田中宏明	土木研究所 水循環研究グループ 水質チーム 上席研究員	
	天野邦彦	土木研究所 水循環研究グループ 河川生態チーム 上席研究員 (尾澤卓思 前土木研究所 水循環研究グループ 河川生態チーム 上席研究員)	
	行政委員	金尾健司	国土交通省 河川局 河川環境課 河川環境保全調整官
		宮武晃司	国土交通省 河川局 河川環境課 課長補佐
稲田修一		国土交通省 河川局 河川計画課 河川計画調整室長 (中嶋章雅 前国土交通省 河川局 河川計画課 河川計画調整室長)	
岡村次郎		国土交通省 河川局 河川計画課 河川計画調整室 課長補佐	
池内幸司		国土交通省 河川局 治水課 河川整備調整官	
渥美雅裕		国土交通省 河川局 治水課 企画専門官 (小俣 篤 前国土交通省 河川局 治水課 企画専門官)	
松本秀應		国土交通省 河川局 治水課 課長補佐	
横山晴生		国土交通省 河川局 砂防部保全課 海岸室 海洋開発官 (小池 剛 前国土交通省 河川局 砂防部保全課 海岸室 海洋開発官)	
吉田敏晴		国土交通省 河川局 砂防部保全課 海岸室 課長補佐	
大西 亘		国土交通省 関東地方整備局 河川部 河川調査官	
池田 隆		国土交通省 関東地方整備局 利根川下流河川事務所長	

役職は平成 16 年 3 月末時点、()内は旧委員

事務局	山本晃一	河川環境管理財団 研究総括職
	岸田弘之	河川環境管理財団 研究第二部長
	斐 義光	河川環境管理財団 研究第二部 主任研究員
	大野幸正	河川環境管理財団 研究第二部 主任研究員

担当スタッフ：玉本昌司、天野光歩、小貫聡史、岩見収二

目 次

手引書に寄せて

第1章 本手引書の目的と対象範囲	1 - 1
1.1 本手引書の目的	1 - 1
1.2 汽水域の範囲	1 - 2
第2章 汽水域の現状と課題	2 - 1
2.1 汽水域の位置づけ	2 - 1
2.2 汽水域の特徴	2 - 6
2.3 汽水域の分類	2 - 11
2.4 汽水域の管理上の課題	2 - 26
第3章 汽水域における人為的改変と河川環境への影響	3 - 1
3.1 汽水域で生起する現象	3 - 1
3.1.1 土砂の移動に関する現象	3 - 3
3.1.2 塩水と淡水の挙動に係る現象	3 - 9
3.2 汽水域に係る人為的改変	3 - 11
3.3 人為的改変による河川環境への影響予測	3 - 13
3.4 必要な現地調査	3 - 15
第4章 調査・分析手法	4 - 1
4.1 調査・分析手順	4 - 1
4.2 生じる可能性のあるレスポンスの抽出	4 - 2
4.3 抽出された人為的改変～レスポンスの調査・分析手法	4 - 3
4.3.1 河道の掘削によるレスポンスの調査・分析	4 - 4
4.3.2 河口導流堤の建設によるレスポンスの調査・分析	4 - 34
4.3.3 河口部の埋め立てによるレスポンスの調査・分析	4 - 40
4.3.4 河口域での海砂採取によるレスポンスの調査・分析	4 - 52
4.3.5 橋梁の建設によるレスポンスの調査・分析	4 - 66
4.3.6 汽水域の現象と二次判定のための調査・分析手法との関係	4 - 70

おわりに

巻末資料

現地調査手法	調査 - 1 ~ 調査 - 8
分析手法	分析 - 1 ~ 分析 - 21
参考文献集	参考 - 1 ~ 参考 - 47

コラム 1 : エスチャリー	1 - 3
コラム 2 : 前置斜面、河口テラス (頂置面)	1 - 3
コラム 3 : 日本沿岸の潮位変動の大きさ	2 - 23
コラム 4 : 日本沿岸の波浪の大きさ	2 - 24
コラム 5 : 日本の河川の河床勾配と河床材料	2 - 25
コラム 6 : 日本の河川の流域面積	2 - 25
コラム 7 : 高濁度水塊の形成と移動	3 - 7
コラム 8 : 塩分上昇の生じやすい河川	4 - 8
コラム 9 : 貧酸素水塊の生じやすい河川	4 - 12

第1章 本手引書の目的と対象範囲

1.1 本手引書の目的

本手引書は、汽水域における課題、汽水域での現象、人為的改変とレスポンス、及びこれらを把握するための調査・分析手法をとりまとめることによって、今後、河川管理者が汽水域において河道掘削等の事業を行う場合や、許認可に際しての審査を行う場合に活用されることを目的とする。

< 解説 >

汽水域における人為的改変による影響には直接的なものと間接的なものがある。直接的なものは工事などにより地形そのものを改変する影響（例えば河床掘削により生物が持ち去られたり、生息・生育の場が失われるなど）であり比較的把握しやすいが、間接的なもの（例えば河床掘削により流況等が変化し掘削地およびその周辺において生物の生息・生育環境である河床材料や塩水遡上環境が変わるなど）については周辺環境を踏まえ調査・分析が必要であり、その手法の確立が不可欠である。しかし、汽水域における現象が複雑であり、また河川環境としても特殊であることから、その調査・分析は現場の判断で個別に行われてきた。

本手引書は、汽水域における河川環境を把握するために必要な基礎的調査、人為的改変とレスポンスの連関及びその調査・分析手法を体系的にとりまとめ、今後の河川管理に資することを目的としている。

この手引書に基づいて予測された人為的改変により生じる河川環境への影響と直接的改変の状況をあわせて、現状の生物の生息・生育環境の情報と重ねることで、汽水域の環境に対する影響を評価することが可能となる。

1.2 汽水域の範囲

本手引書で対象とする汽水域の範囲は、縦断的には平常時の河川水位が満潮位と同程度の水位となる地点から河口の前置斜面まで、横断的には堤外地及び河口幅の数倍程度の沿岸とする。

なお、汽水湖は含まない。

<解説>

「汽水域」は、土木用語大辞典では、<コラム>に示すように「エスチャリー」に近いものとして定義されており、「エスチャリー」は「陸水と海水が共存する水域で、何らかの閉鎖性を伴うもの」とされている。

本手引書では河川管理に資することを目的としており、河川管理区域及び当該区域への影響の大きい事業の考えられる区域ならびにその周辺を対象として考えている。汽水域は海からの外力を受けており、河道内に限定せず、海域も含めた調査・分析が必要である。(図 1.2 - 1 参照)

汽水湖は、別途「湖沼技術研究会」(座長：福岡捷二広島大学大学院教授)^{*1}で扱われるため対象としない。

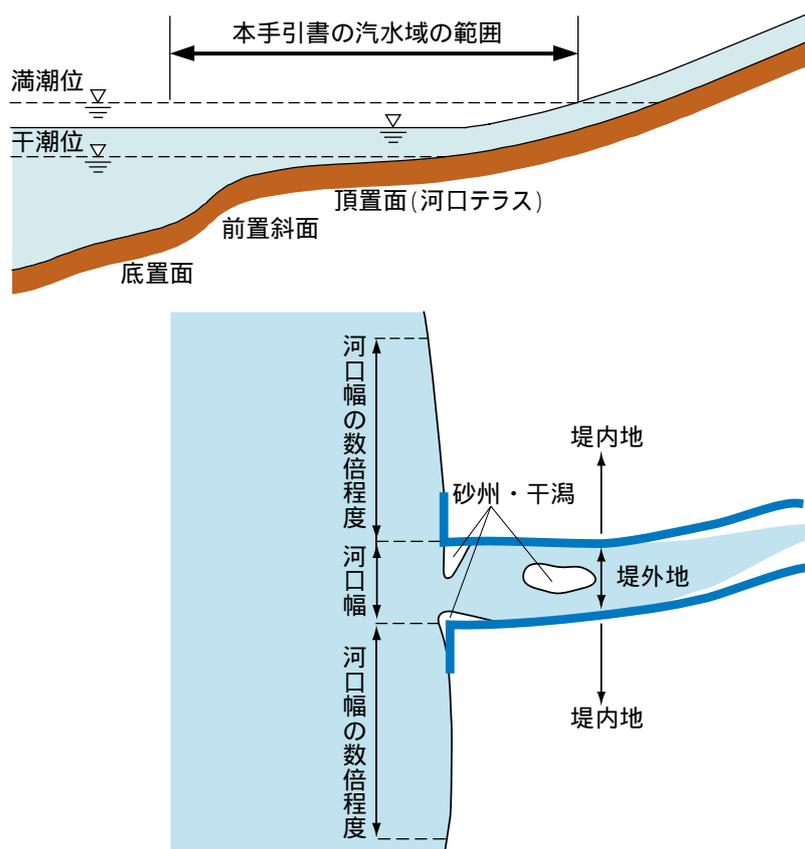


図 1.2 - 1 汽水域の範囲のイメージ図

一般的な河川(汽水域での河床材料の主な構成材料が砂である川)をイメージしたものである

* 1 平成 11 年に官学共同の研究会として発足し、湖水の入れ替わり、密度層の形成や変化などの湖沼の流動現象を十分に把握した上で水質の問題を議論しているものである。平成 15 年 3 月には、我が国の代表的な湖沼における流動現象と水質や生物への影響に関する調査研究成果をとりまとめるとともに、湖沼の流動現象とその影響及び湖沼の流動調査技術の紹介を行い、今後の流動機構研究と総合的な湖沼管理のあり方を「湖沼管理のための流動機構調査」として提言した。

コラム1：エスチャリー

陸水と海水が共存する水域で、何らかの閉鎖性を伴うもの。河口、湾等の形態をとるものが多いが、必ずしも同義語というわけではない。エスチャリーと汽水域はほぼ同義語と考えてよいが、汽水の塩分濃度は海水のそれより低いと定義されているため、この点でエスチャリーとは必ずしも一致しない。例えば、テキサス、南カリフォルニア、オーストラリア等の砂漠性気候が卓越している地域では、エスチャリー内の塩分濃度が外洋水のそれを上回ることが珍しくない。ただし、日本の場合にはこのようなケースはまずないので、エスチャリーと汽水域はほぼ同義と考えてよい。多くの河口域も、わが国の場合は、エスチャリーそのもの、またはエスチャリーの重要な一部を構成しているのが普通である。

エスチャリーとフィヨルド、ラグーン、リアス、海岸平野等の地形的特徴に基づいて分類する試みもあるが、わが国に多い河口 - 湾型のエスチャリーの場合、エスチャリー内の汽水構造に基礎をおく水文学的分類が有用である。これは淡水（一般には河川水）または淡水に近い陸水と海水とがどのように接し、どのように層化共存しているかをもとにした分類で、弱混合型、緩混合型、強混合型等3～4種に分類される。（以下略）（土木用語大辞典）

コラム2：前置斜面、河口テラス（頂置面）

洪水流によって上流から運ばれた土砂は、河口部において流速が急激に減少し、堆積してテラス状の平坦な地形を形成する。これを河口テラス（頂置面）と呼ぶ。河口テラスは海浜流や波による侵食を受け、また洪水により運搬される土砂等により再堆積する。河口テラス前面には急勾配の斜面が形成されこれを前置斜面と呼ぶ。

図1は、由良川の河口部の深浅図である。また、写真1～2は、由良川河口部の平常時と洪水時の空中写真である。

由良川は、流域面積 1,880km²、流路延長 146km を有し、京都府舞鶴市と宮津市の境界において日本海に注ぐ一級河川である。河口部付近の河床勾配は約 1/4,000、河床材料の平均粒径は約 2mm、平均年最大流量は約 1,700m³/s である。

河口の西側に由良海岸、東側に神崎海岸を有し、北近畿地方有数の海水浴場として多く利用されている。両海岸は、冬季風浪から海浜を維持するため、離岸堤や護岸が施工されている。河口砂州は、両岸より伸長している。これは河口部への卓越波の入射方向が現況海岸線と直角方向からであることを示している。

平水時には河口幅の約 9 割が閉塞する状態となり、砂州長、砂州幅ともに大規模であるが、砂州高は T.P. + 1m～2m とあまり高くない。洪水時には河口砂州が流量の増加とともに側方侵食によって徐々にフラッシュされる。さらに流量が増大すると、側方侵食による河積拡大が追いつかなくなり、河道内水位が上昇して砂州を越流する状態になると一挙にフラッシュされる。洪水流は、砂州をフラッシュし、河口沖で舌状のテラスを形成する。

由良川河口部の深浅図によれば、河道の中心に対しほぼ左右対称形に河口砂州が発達しており、開口部中央には - 4m の深みが形成されている。河口の沖合 - 2～ - 4m の間はバー・トラフの発達のため複雑な海底形状であるが、- 4m 以深では等深線が沿岸方向にほぼ平行に伸び、また河口前面でこれらの等深線は沖へ向けて突出し、河口前面テラスが形成されている。

（つづく）

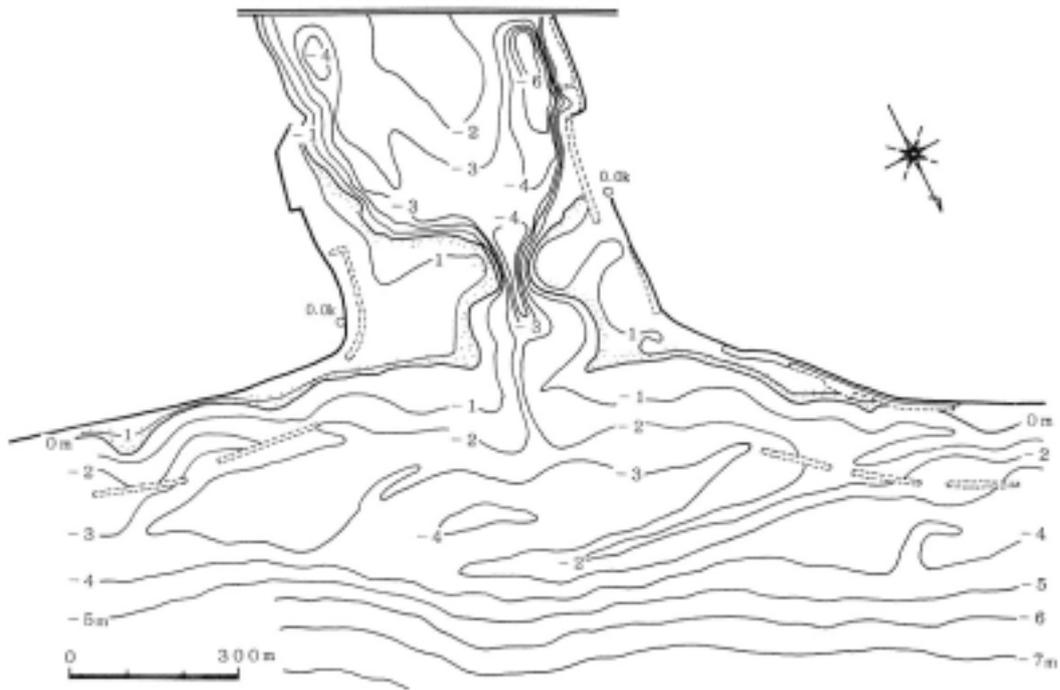


図1 由良川河口部の深浅図（平成3年12月26日）



写真1 由良川河口部の空中写真（平時時：平成4年4月）



写真2 由良川河口部の空中写真（洪水時：平成2年9月）

（土木研究所資料第3281号 河口地形特性と河口処理の全国実態 平成6年6月
建設省土木研究所河川部河川研究室）

第 1 章 本手引書の目的と対象範囲

第2章 汽水域の現状と課題

2.1 汽水域の位置づけ

河口は河川水の海への出口であり、その維持は治水・利水上重要である。その湿地性環境などにより自然的状況が残された貴重な空間を有している河川もあるが、一方で河口域周辺は人為活動の集中する場所であり、港湾・都市の発達、貝や魚類の採取など人間のための利用がなされ、また水質汚濁等様々な環境上の問題も生じてきた。

汽水域では多様な物理・化学的環境やハビタットが微妙な釣り合いの下で成立している。そして、そこに生息・生育する生物はその特殊な環境に依存しているため、環境の変化が生物の生息・生育に大きな影響を及ぼすことがある。このことから人為的改変を行おうとする場合には、影響を十分に検討・把握した上で計画を策定する必要がある。

< 解説 >

我が国は、国土の大半が山地であり、人の利用しやすい平野部は主に沖積地からなり、氾濫による被害を受けやすく、このため洪水を安全に流下させるための河口の維持は重要であり、築堤、護岸、河道掘削・浚渫、放水路、導流堤等多くの治水事業が行われてきた。また、古くから漁港、港湾の整備や農地として開発され、高度成長期に入ると市街化が進み、新たな土地をうみ出すために干拓や埋め立てが行われ、建設骨材として砂利が採取されるなど、地形の改変が進んだ（図 2.1 - 3、図 2.1 - 4 参照）。そして集積・高密度化した都市を守るために、さらなる河川や海岸の改修が進められた。



図 2.1 - 1 河口域開発の一例

このような開発と都市化の進展は、河川や海岸地形を直接変えるのみでなく、用水量の増大による河川流量の減少や汚濁排水（図 2.1 - 5 参照）による負荷を与えてきた。汽水域は、これらの人為的改変にさらされ、大きく変化した。

汽水域は多様な河川環境と豊かな生産力を持つ水域である。汽水域における様々な人為的改変は生物の生息・生育の場を奪い、水質の汚濁がさらにそれを加速させ、それらの人為的な改変等の影響は、豊かな生産力を背景とした漁業に現れた（図 2.1 - 6 参照）。そして、生物の生息・生育の場の減少や水質汚濁、ゴミの投棄・漂着による親水性の喪失、景観の悪化は、人の心を汽水域から遠ざけ、周辺の開発が増々進むという悪循環をもたらした。こうした中で、汽水域の生態系は大きな痛手をこうむってきた。

近年、環境の重要性が再認識されるようになり、動植物との共生、種の多様性の確保等が重要なテーマとなっている。汽水域は、陸と海の接点であり、淡水と海水が混じりあうとともに潮汐による水位変化によって多様な河川環境が見られる。そしてそこに生息・生育する動植物は、その環境に適応した固有なものとなっている。このため、生息・生育環境の変化が動植物への大きなインパクトとなる可能性がある。

人為的改変により、これまでも水質の汚濁や海浜の縮小等、人の生活に係わる様々な問題が生じてきたが、現在は生物への配慮、そして生物の良好な生息・生育環境の保全、再生の視点からの問題が多く顕在化している。

汽水域は人にとっての生活の場、生産活動の場、水との触れ合いの場であるのみでなく、動植物にとっての貴重な生息・生育の場であることを認識し、人為的改変を行おうとする場合にはその影響を十分に検討・把握した上で計画を策定するとともに、既に加えられたインパクトについては十分な追跡調査を行って、河川環境の保全、再生に努めることが必要となっている。



図 2.1 - 2 干潟に生息する生物の一例

出典：（左：徳島河川国道事務所「パンフレット 吉野川のしぜん」、右：栗原康(1980)「干潟は生きている」岩波新書）

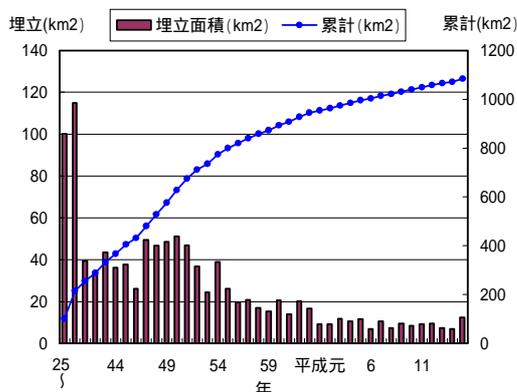


図 2.1 - 3 埋め立て面積の推移

出典：国土地理院 HP
 平成 15 年全国都道府県市町村別面積
 平成 15 年の面積地の特徴 昭和 25 年～平成 15 年の埋立面積の推移

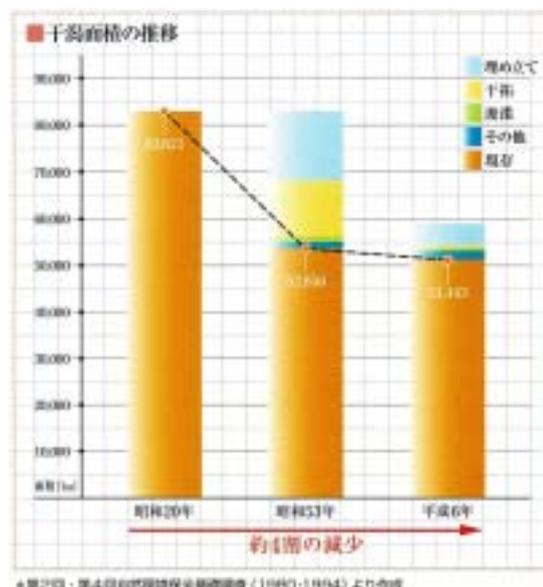


図 2.1 - 4 干潟面積の推移

出典：環境省自然環境局
 「パンフレット いのちは創れない 新・生物多様性国家戦略」

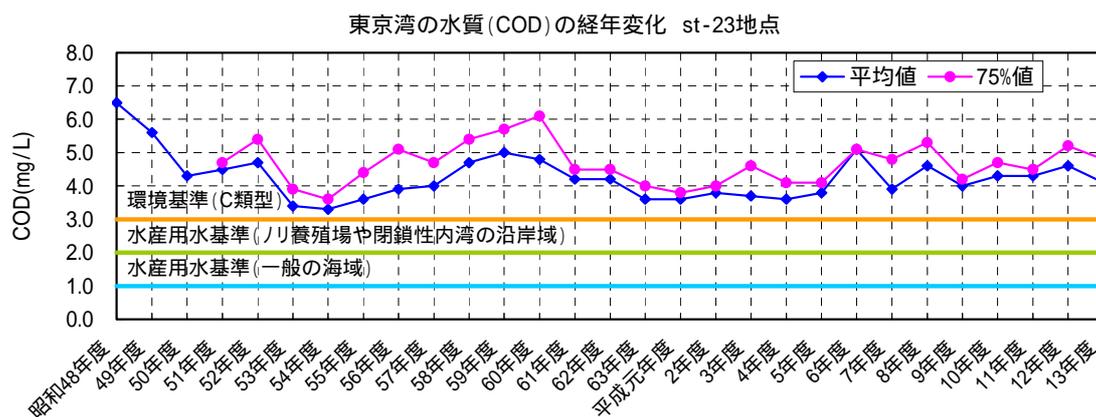


図 2.1 - 5 東京湾の水質の状況

全国公共用水域水質年鑑（1975～2000） 国立環境研究所環境数値データベースより作成
 CODは上層と下層の平均値

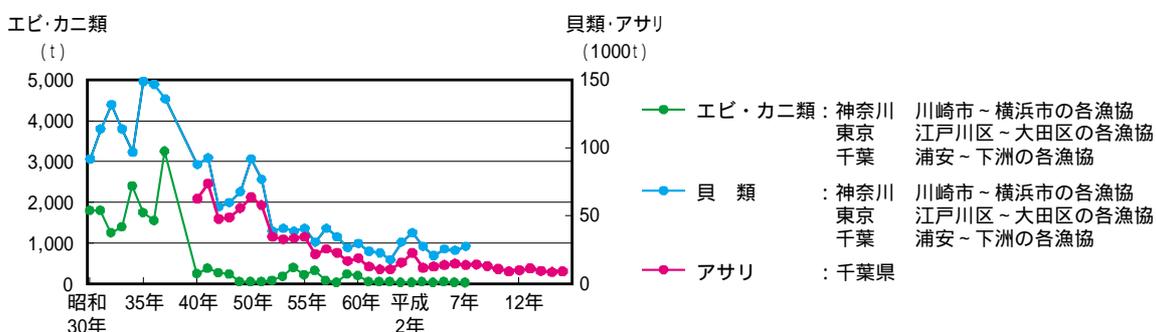


図 2.1 - 6 東京湾の漁獲量

出典：エビ・カニ・貝類：運輸省第二港湾建設局海域整備課（1998）平成 9 年度東京湾環境計画策定基礎調査報告書
 アサリ（千葉県）：柿野純（1992）アサリ漁業をとりまく近年の動向、水産工学 VOL29

<参考>

1945年以降、汽水域においてどのような問題が生じているかを把握するため、平成15年度に全国の一級水系の河口部を管理する72事務所にアンケートを行った。アンケートの回答を見ると「塩害」が19河川で最も多く、ついで「魚介類の減少・へい死」(18河川)、「海岸線の後退」(17河川)、「干潟の減少」(14河川)、「植生の変化」(12河川)、「流下能力の減少」(12河川)であった。その他には「赤潮」や「砂州形状の変化」などが見られた。なお、これらの変化については様々な原因が考えられ、原因が特定できないものも含まれている。

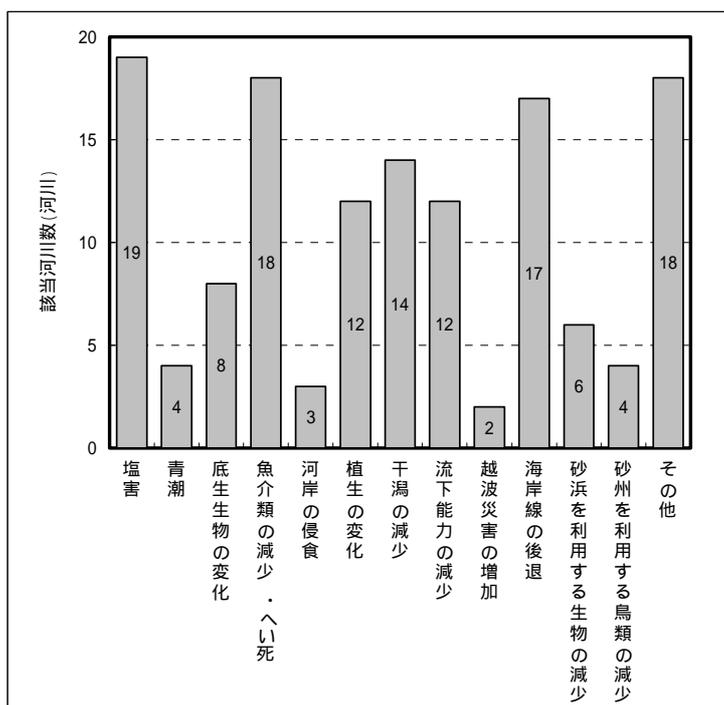


図 2.1 - 7 汽水域で生じている変化 (昭和20年以降に一級水系において生じたもの)



図 2.1 - 8 干潟の減少の調査事例 (鶴川)

出典：平成15年度国土交通省国土技術研究会(アカウントビリティ部門)発表資料

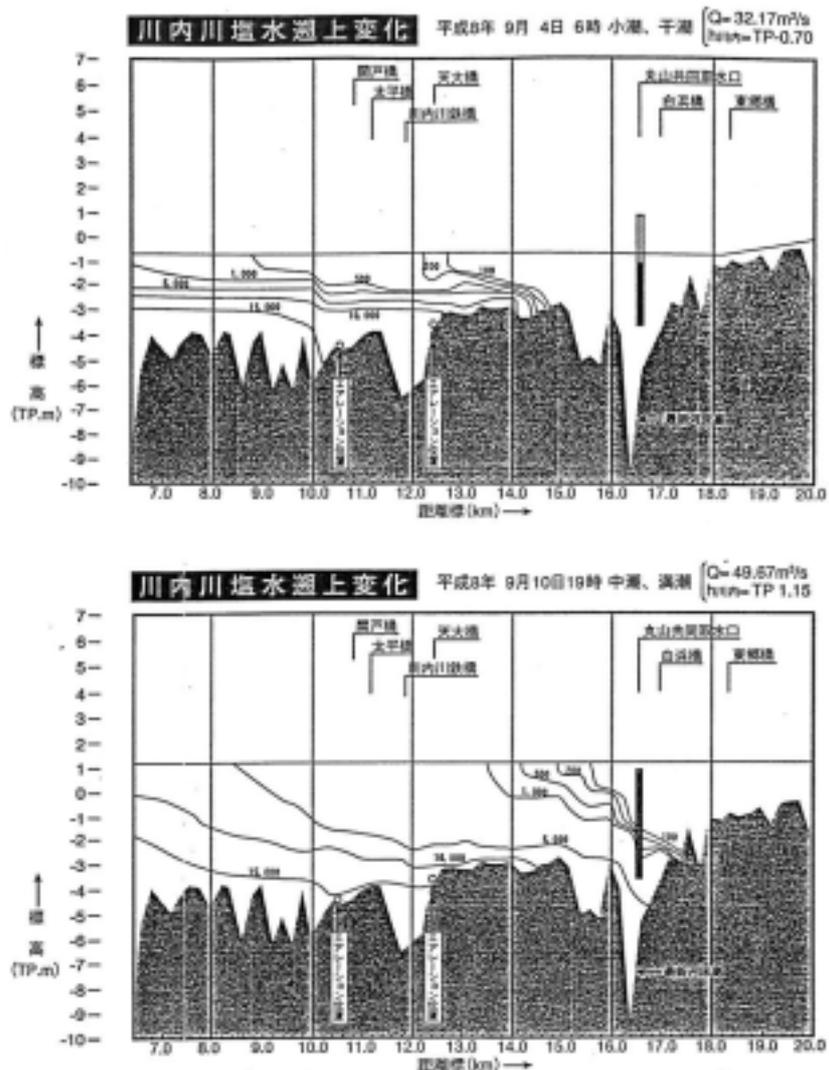


図 2.1 - 9 塩水遡上の調査事例（川内川）

出典：川内川塩水遡上抑制対策検討業務報告書（平成9年3月、川内川河川事務所）、一部加筆

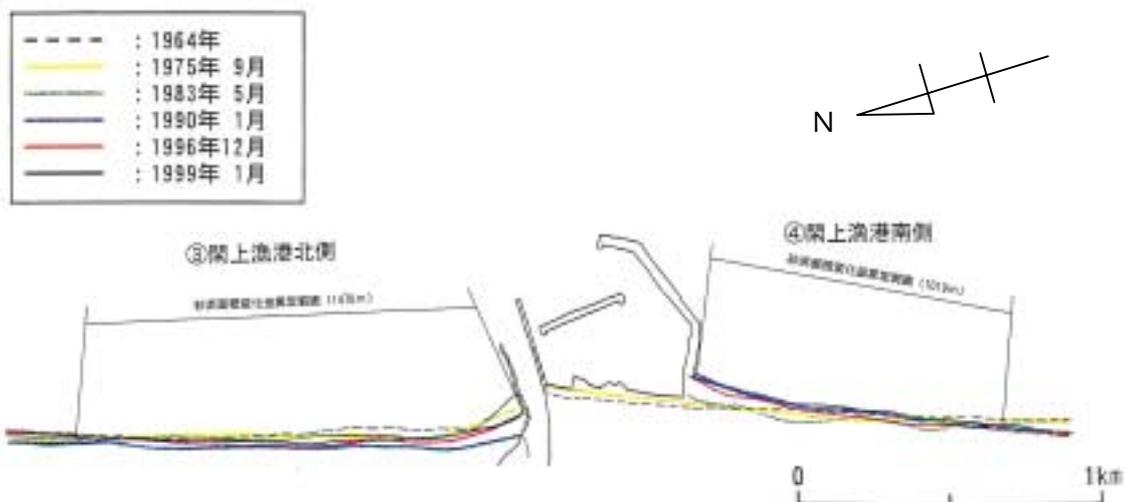


図 2.1 - 10 海岸線の後退の変化調査事例（名取川）

出典：仙台湾沿岸技術調査委員会報告書（平成12年10月、建設省東北地方建設局 宮城県土木部）

2.2 汽水域の特徴

汽水域は、土地利用の変化など流域の変化が集積して現れる陸と海との接点に位置し、海の潮位に規定されるなど、河川上～中流部と異なり、次のような特徴を有する。

(1) 物理・化学的特徴

- 河川と海の双方からの外力を受ける。それらの微妙なバランスの下に成り立っている。
- 入退潮により、水位（水深、湛水域）・流速・塩分濃度などが時間的、空間的に周期的に変化する。
- 上流から流下してきた懸濁態の有機物や栄養塩が海水に触れて凝集沈殿する。

(2) ハビタットの特徴

- 特殊な物理・化学的環境の下に縦断的・横断的に多様なハビタットが形成され、それに適応した固有の生物が生息・生育している。

このように多様で微妙なバランスの下に形成される河川環境が多様な生物を育てており、汽水域の河川環境を捉えるには、このような特徴を充分理解しておくことが必要である。

< 解説 >

(1) 物理・化学的環境の特徴

汽水域は、淡水と海水のまじり合う所であり、河川と海の双方から潮位、波浪、洪水、土砂供給や汚濁負荷などの外力を受けて、複雑な物理・化学的現象が生じている。また、河川や海からの外力の他に、大気や沿川からの外力も受けている。それらの外力は、常に一定なものではなく、変動する。変動には周期的なものと非周期的なものがある。また、風波などのように時間的に短期間で繰り返されるものから、半月周期の潮汐などのように中長期的のものまである。

< 水位、流速の変化 >

河口における潮位の変化は、潮汐波となって河川上流に伝わる。これに伴って水位、流速、塩分濃度が周期的に変化する。(図 2.2 - 1、図 2.2 - 2 参照) なお、潮汐波の上流への伝搬は長波で伝わるため、河口潮位の満潮と河道内での満潮は概ね一致する。一方、下げ潮時には、河川の流下流速が河床勾配、底面摩擦等で決まり、干潮となる時間が上流ほど遅れる。

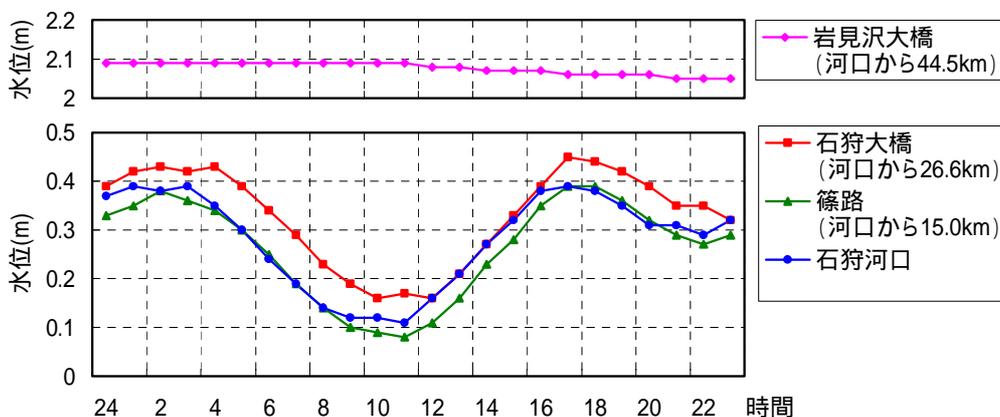


図 2.2 - 1 感潮域における水位変化のイメージ (石狩川) 2003 年 1 月 2 日

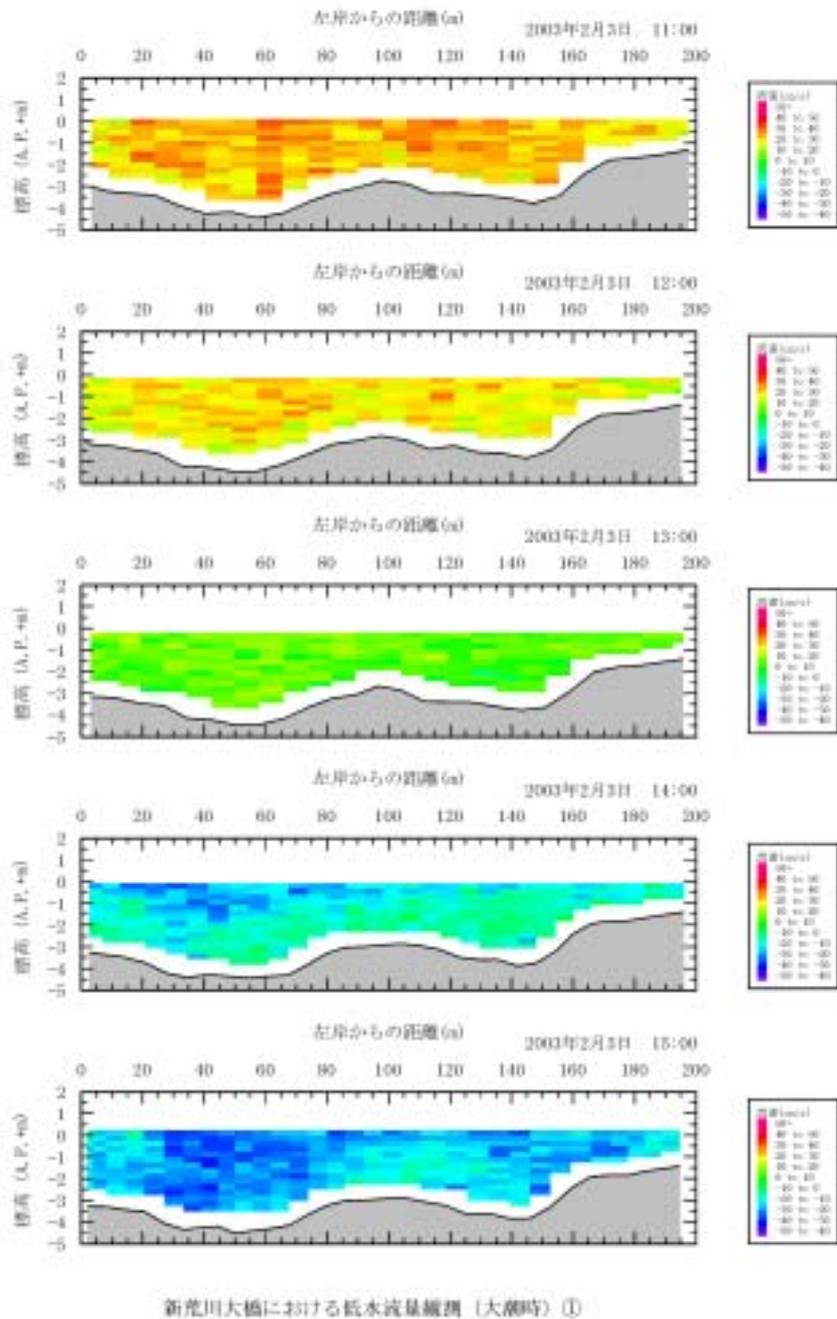


図 2.2 - 2 荒川下流部における流速分布観測結果例 (大潮時) - 新荒川大橋地点 -
 順流 (上流 下流方向): プラス流速 逆流 (下流 上流方向): マイナス流速

< 塩分濃度の変化 >

入退潮による海水の侵入により感潮域内で塩分濃度が変化する。海水の侵入形態は後述するように、弱混合、緩混合、強混合のような混合形態に分けられる。図 2.2 - 3 は弱混合の河川における塩水遡上の観測事例である。

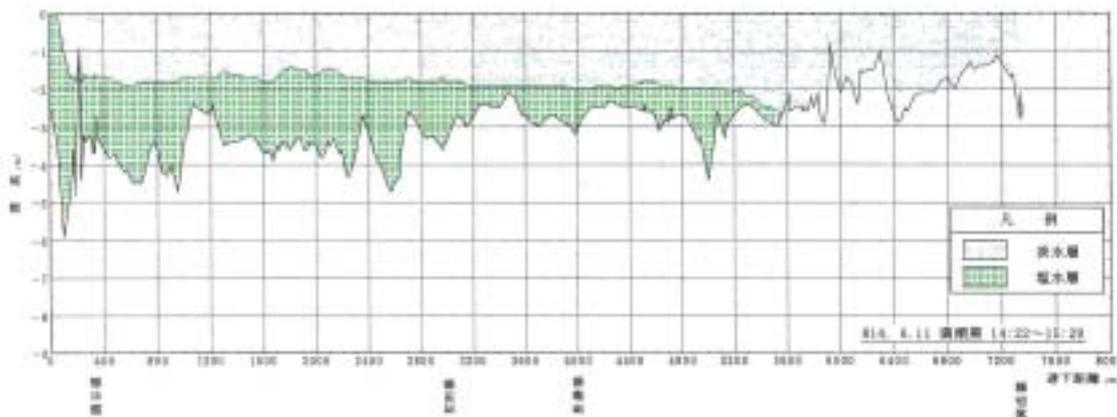


図 2.2 - 3 塩水楔の縦断形状調査事例（尻別川）

出典：平成 14 年度尻別川河川性状調査業務報告書（平成 15 年 3 月、(社)北海道栽培漁業振興公社）

< 懸濁態物質の堆積 >

河川の上流域や汽水域から流入してくる淡水には懸濁態の有機物や栄養塩が豊富に含まれている。それらは、海水と淡水の混合による凝集沈殿や密度流による下層の流速の減少によって汽水域に堆積しやすい。

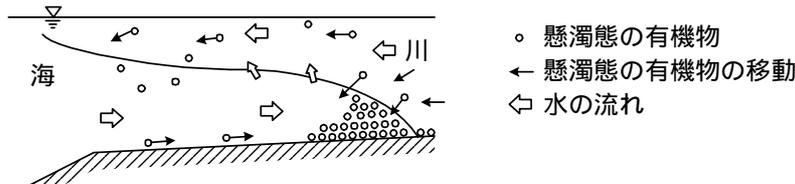


図 2.2 - 4 懸濁態物質の堆積のイメージ図

(2) ハビタットの特徴

汽水域のハビタットには、縦断的、横断的な特徴がある。

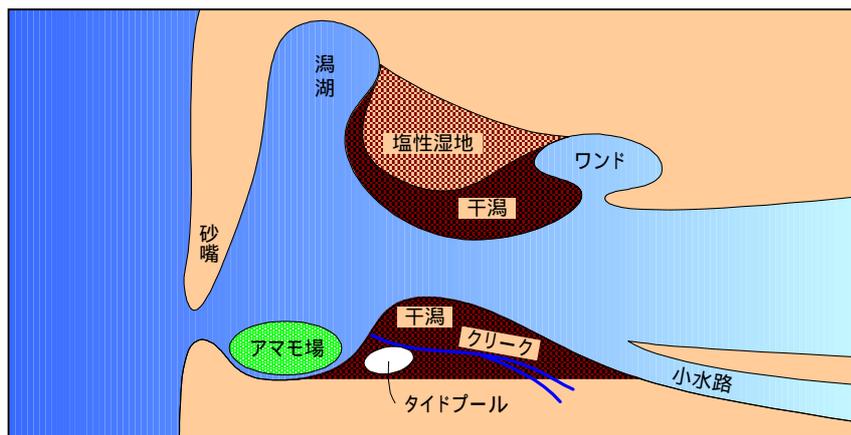
縦断的特徴は、主に入退潮による塩分濃度、河床材料により規定される。汽水域では干満によって塩分が淡水から海水まで変化するため、生物は塩分の浸透圧の変化に耐えられるもの、或いは変化に応じて移動できるものでなければならない。また、河床中に営巣するものは底質の貫入抵抗が変わると棲めなくなる可能性がある。或いは底質によって泥中への酸素の供給形態が変わるため、生息環境が規定される。

横断的特徴は、主に干満による水位の変化によるもので、水深や河床の乾湿が変化する。

汽水域ではこのような特徴を持つ物理・化学的な河川環境の下で、これに適応した特徴的なハビタット（生物の生息・生育空間）が形成されており、人為的な改変が加えられた場合に生息・生育環境が破壊され、生態系が一変することも考えられる。これを防ぐために汽水域における特徴的なハビタットを全体的に把握しておく必要がある。

汽水域においては、浅場に広がるアマモ場、砂嘴の背後に発達する湿地、小水路の合流点やその滯などの縦・横断的なだけでは把握しきれない特徴的な場が形成され、それぞれの場が多様な生物の貴重なハビタットとなっている。従って、それらのハビタットとそこに生息・生育する生物の状況を河川環境情報図にまとめる等により平面的に捉えて、ハビ

タットの縦断的横断的な特徴と併せて汽水環境を全体的に把握することが重要であり、波浪、河床材料、水の流れの状況、塩分濃度の分布及び生物の生息・生育状況などの基礎的な調査を行う必要がある。



<ハビタットの縦断的特徴>

- ハビタットの縦断的特徴のイメージを図 2.2 - 5 に示す。
- 前置斜面～沖合部（太陽光の届く浅海部）では、藻場が形成され、魚介類の産卵場所や棲みかとなっている。
- 河口付近は底生生物の働きにより汽水域の水質を保全する役割を果たしている。
- 碎波や海浜流等により潮目や渦流が発生しやすい前置斜面では、浮遊幼生の沖への拡散を防ぎ、河口付近では塩分境界層が発達し、ヤマトシジミの幼生などが塩水くさびの流れに乗って上流に移動するなど、生物の繁殖、分布にも関与している。
- 汽水域は、遊泳能力の高い魚や、塩分濃度の変化に対応出来る底生生物の生息の場となっている。
- 汽水域は、上流からの豊富な栄養塩が供給され、生産力の高い水域となっている。
- 淡水域は、汽水域に水、物質を供給する源であり、淡水～汽水～海水のように回遊する魚類等の生息の場ともなっている。

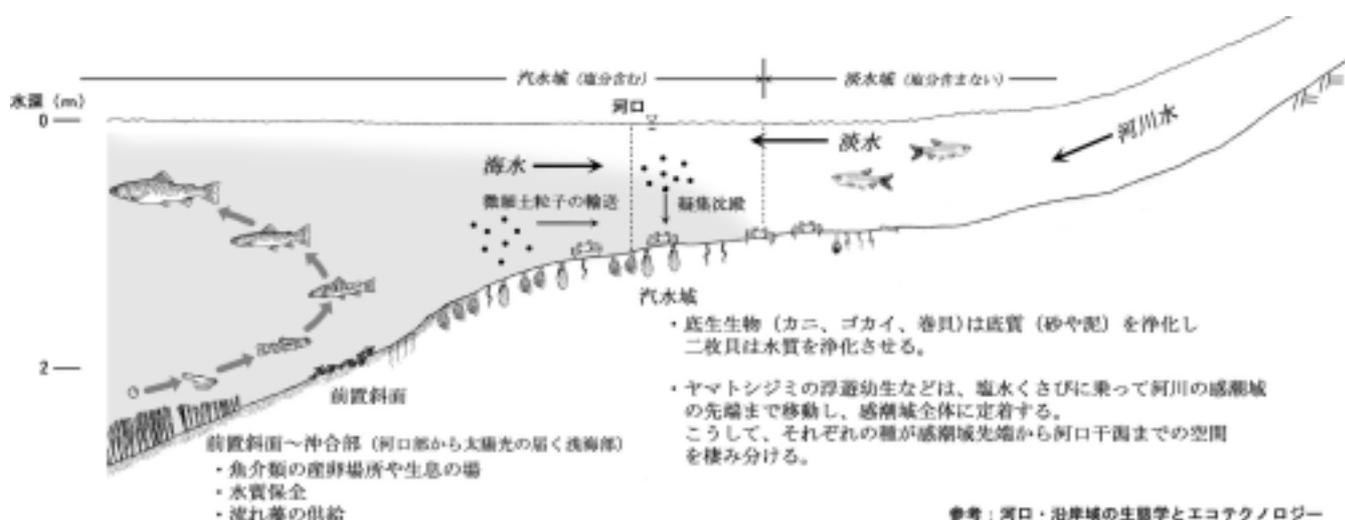


図 2.2 - 5 汽水域とその周辺の縦断イメージ

<ハビタットの横断的特徴>

- ハビタットの横断的特徴のイメージを図 2.2 - 6 に示す。横断的には、亜潮間帯、潮間帯、及び潮上帯域に区分出来る。
- 亜潮間帯は、餌となるプランクトンが豊富であり、魚介類の幼生の生息場所であり、塩水くさびの流れに乗って幼生が移動する。
- 潮間帯は、原則として1日に2回、潮汐により干出と水没を繰り返している環境変化の大きな場所である。干潟が形成され、固有の底生生物の生息場所となっている。また、水位の変化による土中の水の移動や底生生物の働きにより、水の浄化機能を持つ。干潟は生産力も高く、鳥の採餌場ともなっている。
- 背後の塩性湿地や河岸は、ヨシ原等の固有の植生の生育場所であり、鳥やほ乳類などの営巣・繁殖・採餌の場ともなっている。

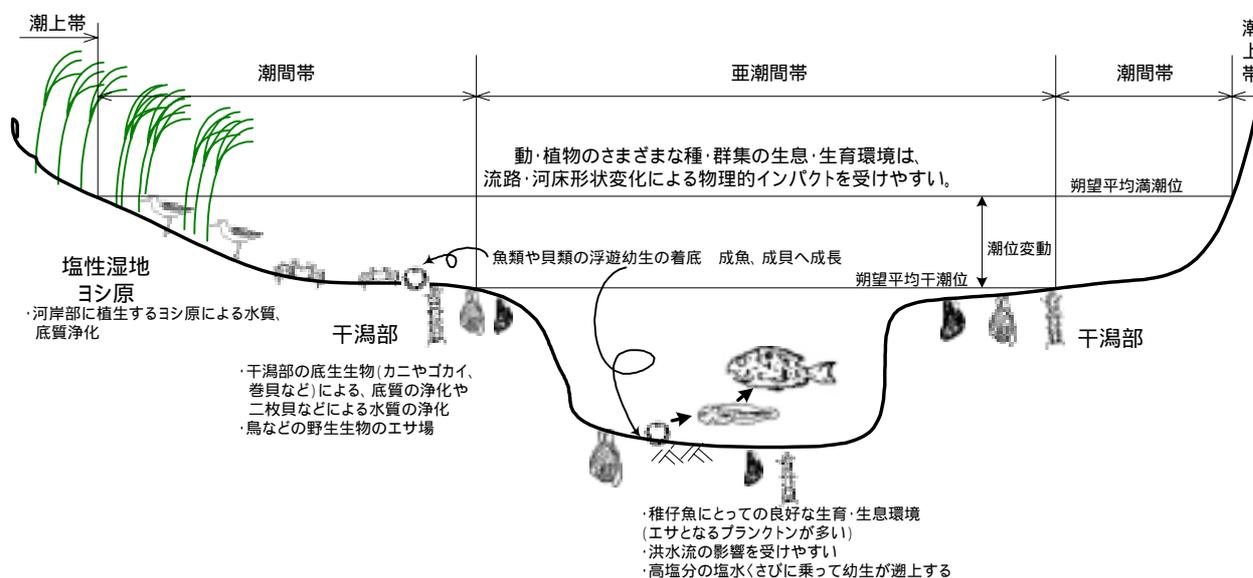


図 2.2 - 6 汽水域とその周辺の横断イメージ

汽水域の河川環境を捉えるに当たっては、河川によって異なる生物の生息・生育環境の要素を整理し、生態系の構造を理解しておく必要がある。環境の要素としては、波浪、河床材料、水の流れの状況、塩分濃度の分布などの状況が挙げられる。それら要素が変化すると、要素の系の上に成り立っている生態系が大きく変化する可能性がある。

2.3 汽水域の分類

汽水域を規定する多様な要素の中から、潮位変動の大きさ、波浪の大きさ、河床材料を用いて、日本の汽水域をおおまかにタイプ分けすると、次のようになる。

- 日本海に流入する河川
- 瀬戸内海の東部に流入する河川
- 太平洋、オホーツク海に流入する河川
- 東京湾、伊勢湾、瀬戸内海に流入する河川
- 上記を除く九州沿岸に流入する河川
- 有明海に流入する泥・砂河川
- ～ はさらに泥・砂河川と砂利河川に分かれる

< 解説 >

(1) タイプ分類に用いた指標

< 潮位変動の大きさ >

河口近傍潮位観測所における直近 1 ヶ年の朔望平均満潮位と朔望平均干潮位との差（以下「潮位差」と呼ぶ）を用いた。

< 波浪の大きさ >

河口の位置により内湾型と外海型の別を判断した結果を用いた。内湾型は、東京湾、伊勢湾、瀬戸内海、有明海等の内海に流入する河川で、河口砂洲が形成されにくい。一方、外海型は外海に面し、波浪により河口砂洲が形成されやすい。

< 河床材料 >

河床材料から砂・泥河川と砂利河川の別を判断した結果を用いた

低水路における概ね 1km 毎の粒度試験結果から、 D_{60} （60%粒径）を求め、河口近傍の値を見て 5mm を超える箇所が 2 ヶ所以上ある場合、或いは 5mm を超える箇所は 1 ヶ所であるが、他の地点も同等の値を示す場合に砂利河川とし、砂利河川以外を砂・泥河川とした

(2) タイプ分類結果

タイプ分けした結果を図 2.3 - 1 に示す。同図では潮位変動と波浪の大きさの 2 つの地域性指標で色分けを行っている。

< 緑色で示したグループ：泥・砂 23 河川、砂利 10 河川の計 33 河川 >

日本海に面した河川で、潮位差が 0.6m 以下と小さいグループであり、泥・砂河川と砂利河川がほぼ同数である。流域面積を見ると、砂利河川は 211～1,190km²、泥・砂河川は 270～14,330km² となっており、砂利河川に比較的流域規模が小さい河川が多い。

< 青色で示したグループ：泥・砂 2 河川、砂利 2 河川の計 4 河川 >

瀬戸内海に流入する河川で、潮位差 0.6～2m 程度のグループであり、泥・砂河川と砂利河川が 2 河川ずつとなっている。

<空色で示したグループ：泥・砂 16 河川、砂利 15 河川の計 31 河川>

太平洋、オホーツク海に面した河川で、潮位差 0.6~2m のグループであり、泥・砂河川と砂利河川がほぼ同数である。流域面積を見ると、砂利河川は 508~3,990km²、泥・砂河川は 464~16,840km² となっており、砂利河川に比較的流域規模が小さい河川が多い。

<茶色で示したグループ：泥・砂 18 河川、砂利 7 河川の計 25 河川>

東京湾、伊勢湾、瀬戸内海に流入する河川で、潮位差 2~4m のグループである。球磨川も含まれる。このグループはさらに河床材料によって泥・砂河川と砂利河川に分けられる。流域面積を見ると、砂利河川は 140~1,465km²、泥・砂河川は 235~8,917km² となっており、砂利河川に比較的流域規模が小さい河川が多い。

<黄色で示したグループ：泥・砂 6 河川、砂利 2 河川の計 8 河川>

九州沿岸の河川で、有明海と瀬戸内海に流入する河川を除く外海に面した河川であり、潮位差 2~4m 程度である。これらのほか、このグループには天竜川、菊川も含まれる。

<赤色で示したグループ：8 河川>

有明海に流入する河川で、潮位差 4m より大のグループで泥・砂河川である。

図 2.3 - 2 には、これらの河川を潮位差と汽水域内の 0~5km 地点での代表粒径の平均値とで散布させたものを示した。このような図に対象とする河川をプロットすることで、類似性を考察することが出来よう。なお、同図で矢印で示したものは、河口付近の 0~1km の代表粒径と 2km より上流のそれが大きく異なるため、0~1km の平均の代表粒径を用いた場合についても示したものである。

全国の主要な河川の汽水域のイメージを伝えることを目的として、河口域の写真を示した。

表 2.3 - 1 タイプ分けした河川のグループ

潮位差	内湾型		外海型	
	泥・砂河川	砂利河川	泥・砂河川	砂利河川
4m超	本明川 六角川 嘉瀬川 白川 矢部川 菊池川 緑川 筑後川			
2m ~ 4m	鶴見川 鈴鹿川 小瀬川 佐波川 雲出川 大分川 豊川 芦田川 庄内川 多摩川 太田川 旭川 矢作川 球磨川 吉井川 高梁川 荒川(関東) 木曾川	土器川 重信川 柳田川 山国川 宮川 脇川 大野川	菊川 松浦川 肝属川(1.964) 遠賀川 川内川 大淀川	小丸川 天竜川
0.6 ~ 2m	大和川 淀川	揖保川 加古川	番匠川 高瀬川 名取川 鳴瀬川 網走川 久慈川 五ヶ瀬川 常呂川 馬瀬川 釧路川 那珂川 吉野川 阿武隈川(2.11) 十勝川 北上川 利根川	物部川 安倍川 狩野川 那賀川 清瀬川 鶴川 大井川 沙流川 湧別川 仁淀川 紀の川 相模川 渡川 新宮川(熊野川) 富士川
0.6m以下			留萌川 梯川 常願寺川 小矢部川 赤川 関川 庄川 千代川 円山川 尻別川 由良川 斐伊川 岩木川 神通川 九頭竜川 江の川 米代川 雄物川 天塩川 最上川 阿賀野川 信濃川 石狩川	北川 天神川 黒部川 後志利別川 姫川 手取川 日野川 高津川 荒川(北陸) 子吉川

平成14、15年度のアンケート調査及び潮位表により作成したものである。
 ()書き数字は、潮位差のタイプ分けの基準値からはずれている場合に特記したものである。
 各欄の河川は流域面積の小さい順に並べてある。



黒部川 (砂利河川)



阿賀野川 (泥・砂河川)



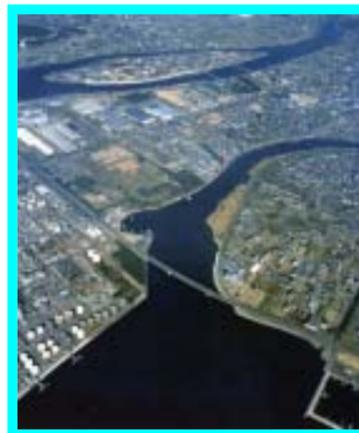
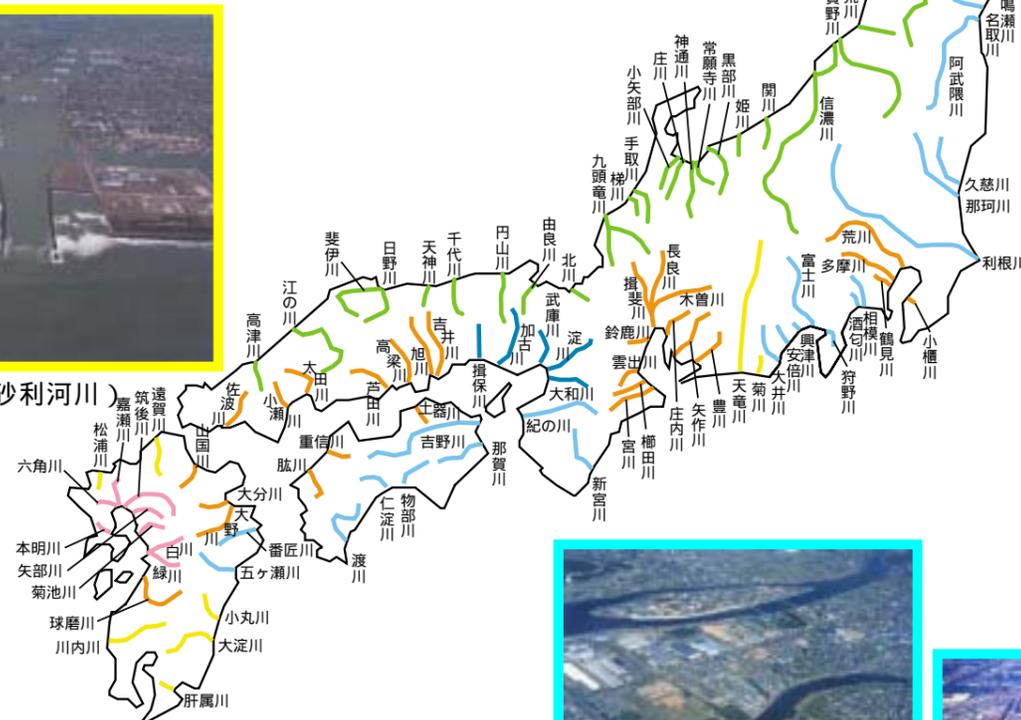
筑後川 (泥・砂河川)



松浦川 (泥・砂河川)



大淀川 (砂利河川)



揖保川 (砂利河川)



大和川 (泥・砂河川)



重信川 (砂利河川)



那珂川 (泥・砂河川)



多摩川 (泥・砂河川)



富士川 (砂利河川)

図 2.3 - 1 タイプ分けの結果

注) 地図中には、二級水系の小櫃川、酒匂川、興津川、武庫川も示している

平均(0km~5km) 但し矢印で示したものは河口付近とそれ以外の区間の粒度が大きく異なるため、0~1km 平均を併記したものである。

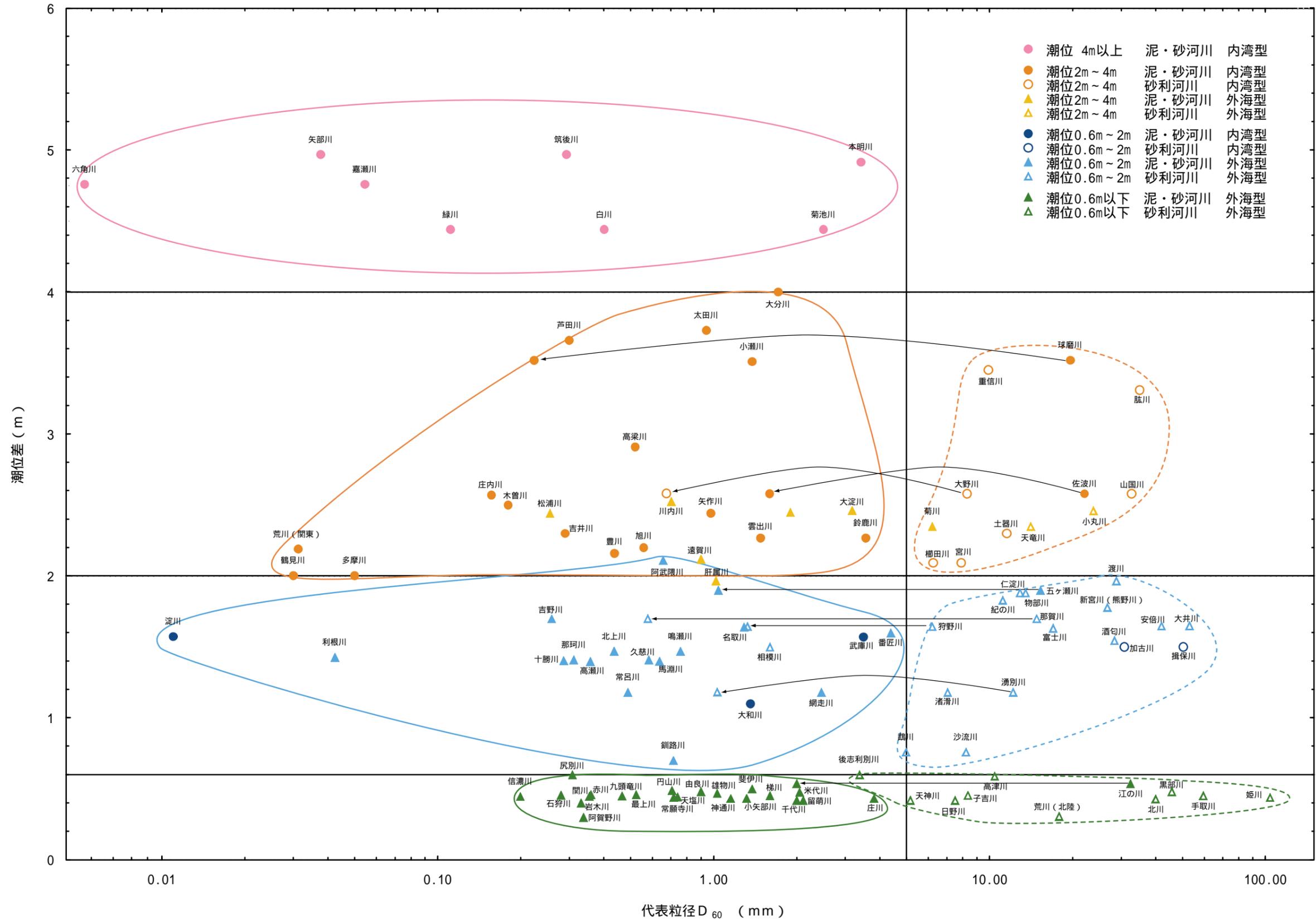


図 2.3 - 2 潮位差と代表粒径による河川の散布図

注) 图中には酒匂川、武庫川も示している



全国一級水系を中心とした河口の状況 (1/8)



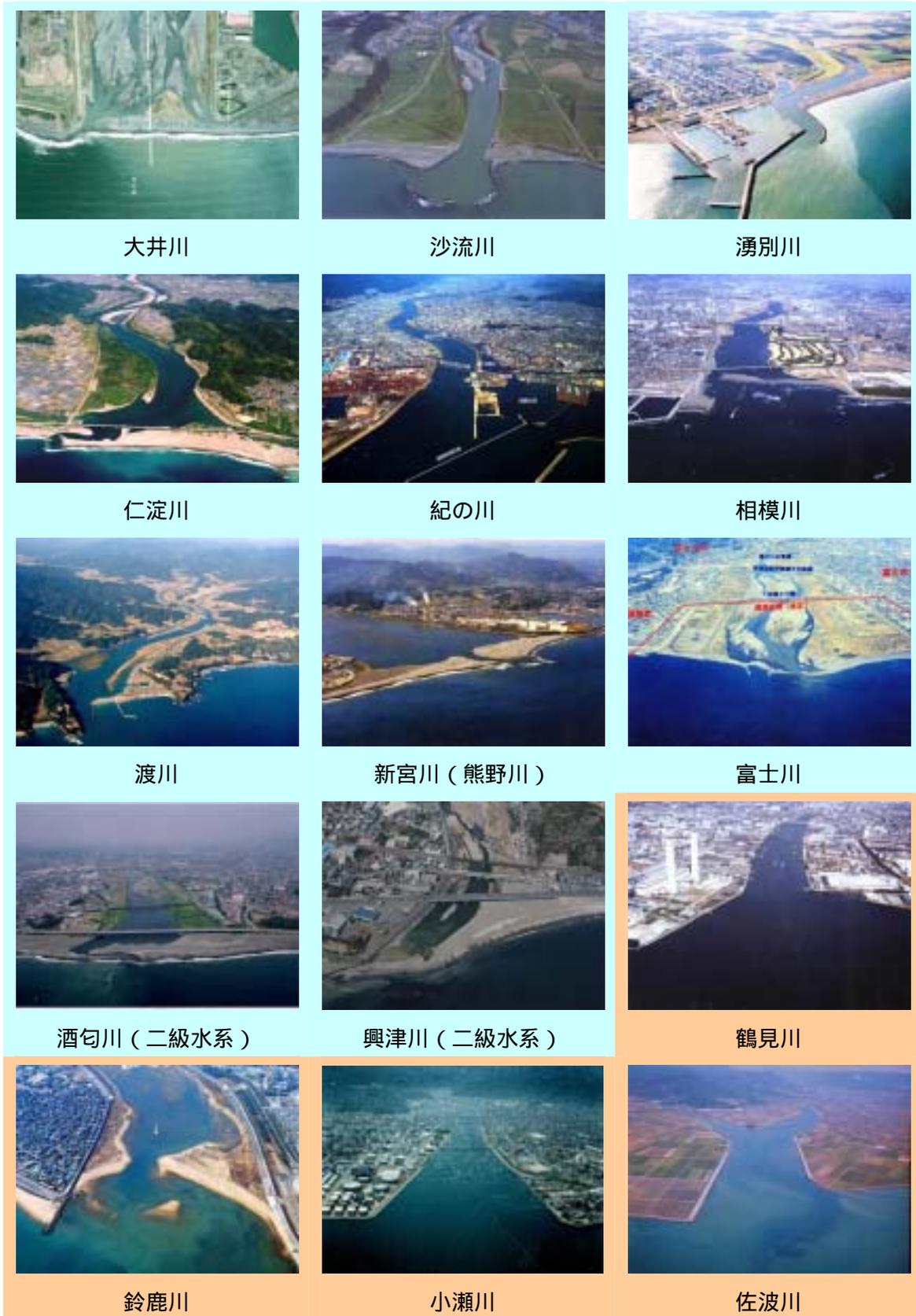
全国一級水系を中心とした河口の状況 (2/8)



全国一級水系を中心とした河口の状況 (3/8)



全国一級水系を中心とした河口の状況 (4/8)



全国一級水系を中心とした河口の状況(5/8)



全国一級水系を中心とした河口の状況（6/8）



全国一級水系を中心とした河口の状況（7/8）



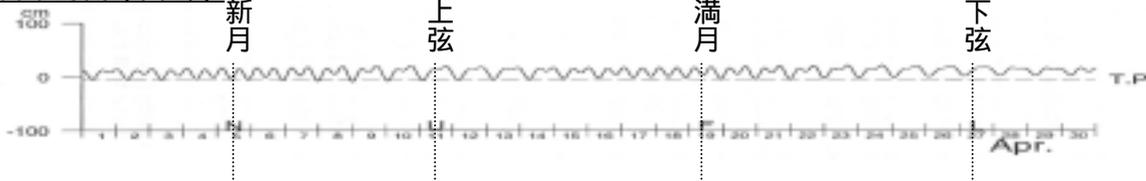
全国一級水系を中心とした河口の状況 (8/8)

コラム3：日本沿岸の潮位変動の大きさ

日本海側は、潮位変動が小さく混合型は弱混合で塩水くさびを生じやすい。太平洋側は、大潮時の潮差が1~2m程度、有明海は、大潮時の潮差が5mに及び混合形態は強混合である。東京湾・瀬戸内海は、大潮時の潮差が2~3m程度となっている。



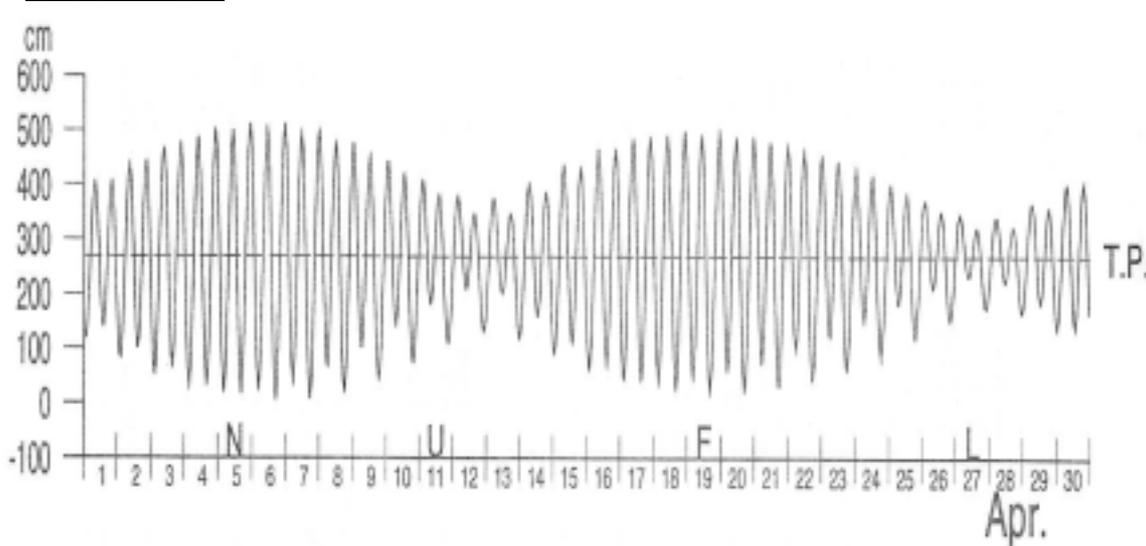
日本海側(富山)



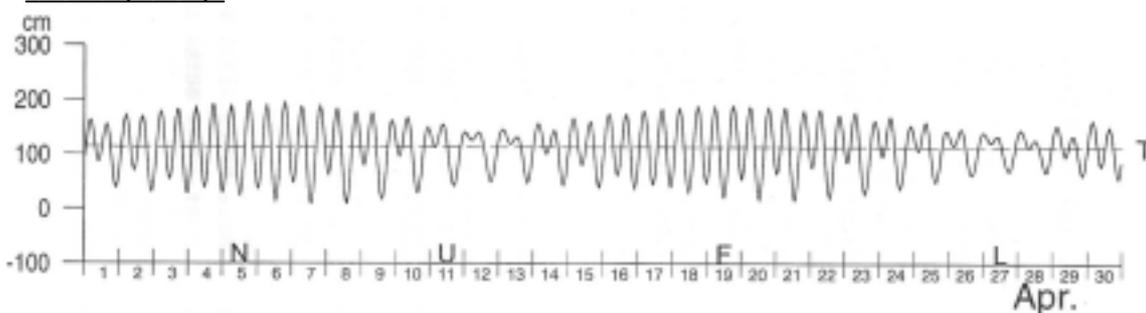
太平洋側(串本)



有明海(大浦)



東京湾(東京)



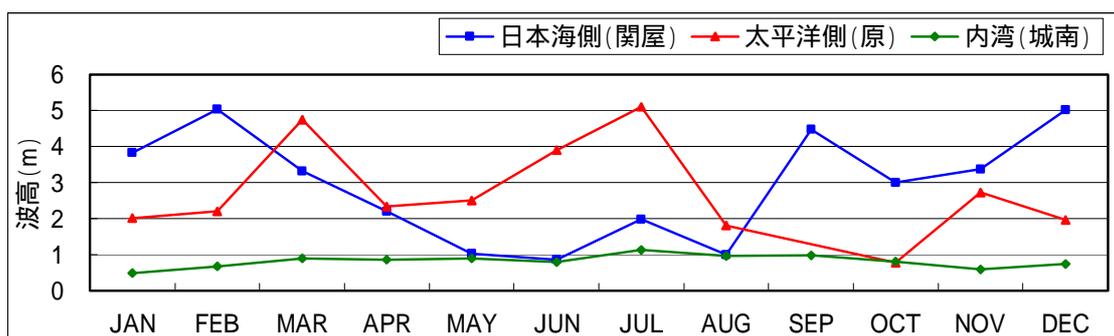
平成12年 潮位表

コラム4：日本沿岸の波浪の大きさ

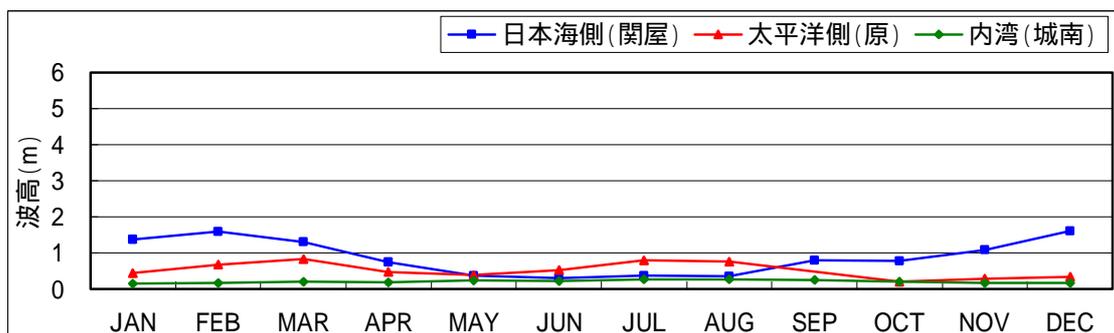
- ・日本海側では、冬季に波高が高く、夏季は穏やか
- ・太平洋側では、春先と台風時期に波高が高い
- ・内湾では、通年、波高が低い



月最大有義波高* (平成12年)



月平均有義波高 (平成12年)

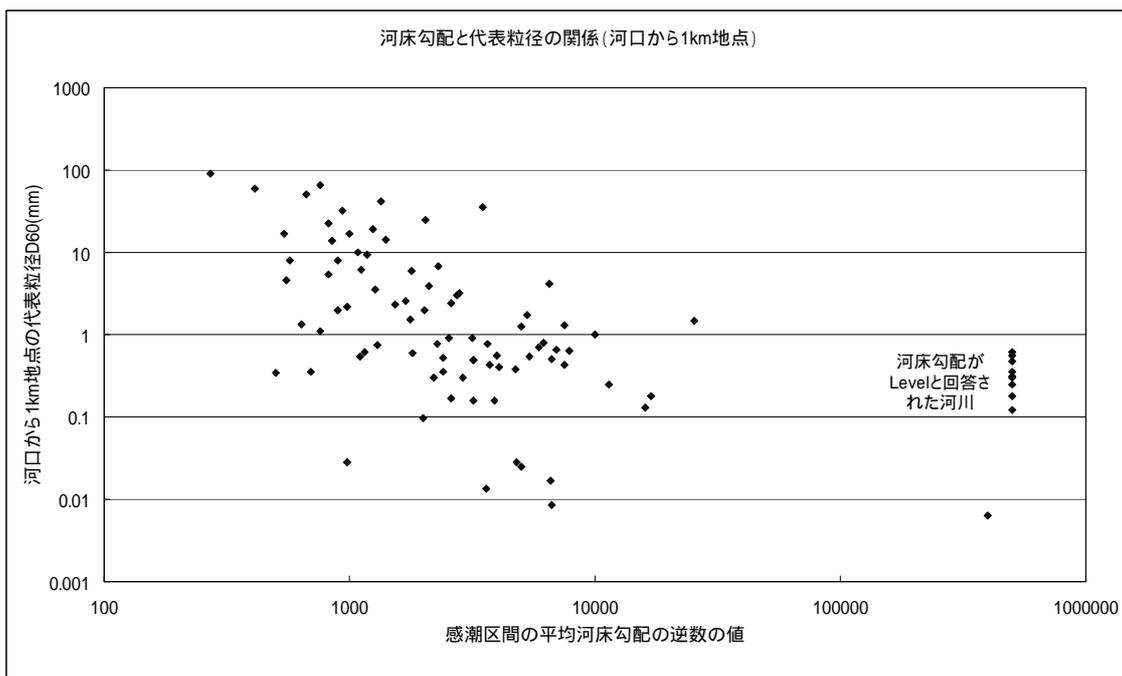


海象年表 (H12) より作成した

* 有義波高：ある地点で連続する波を観測したとき、波高の高いほうから順に全体の 1/3 の個数の波を選び、これらの波高を平均したもの

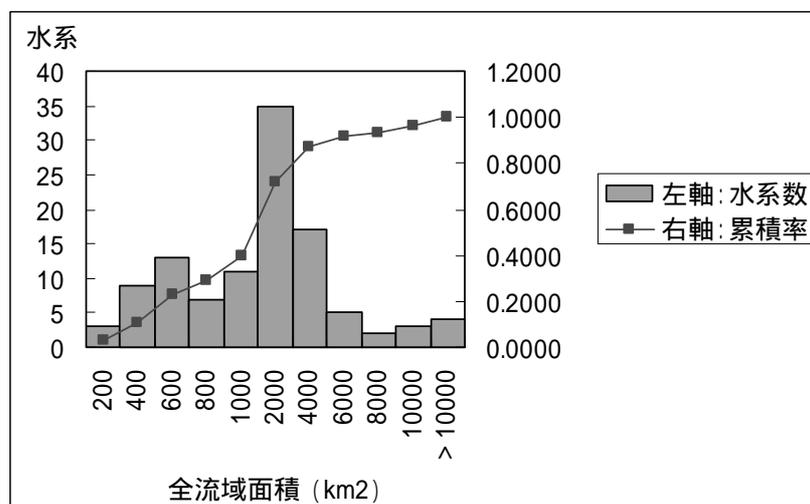
コラム 5 : 日本の河川の河床勾配と河床材料

下図は、平成 15 年度のアンケート結果を用いて作成した、一級水系における河口から 1km 地点の代表粒径 (D₆₀) と感潮区間平均 (セグメントが分かれる場合は下流側のセグメント平均) の河床勾配の逆数の値の関係である。代表粒径は 10⁻² ~ 10² mm、河床勾配は 10² ~ レベルまで幅広く見られる。また、河床勾配が大き (河床勾配の逆数が小さい) ほど代表粒径が大きい傾向が見られる。



コラム 6 : 日本の河川の流域面積

汽水域は河川と海の双方の影響を受けており、流域面積の大きい河川の汽水域は、河川からの影響も大きいと思われる。下図は、一級水系 109 水系について、流域面積別の水系数を示したものである。流域面積 4000km² 以下の河川がほぼ 9 割を占めている。



2.4 汽水域の管理上の課題

汽水域における管理上の課題には次のものがある。

- 環境の把握や人為的改変に伴う環境への影響に関する調査・研究を進める
- これまで得られた知見を基に人為的改変による物理・化学的現象の調査・分析手法を取りまとめる
- 必要な調査の実施やデータの整理を通じ、汽水環境を適切に捉える
- 河川整備の計画段階において環境に及ぼす影響を事前に予測・評価するとともに、その影響の回避低減を行うとともに、許可工作物の工事及び占用許可の際の適切な審査に活用する
- 汽水域の環境を復元する自然再生の取り組みなどを行う

< 解説 >

これまでの河川管理は平野部における人口や資産の増加、集中に対する対応として治水・利水を重視したものとなっていた。河川環境の整備と保全を目的に追加した河川法の改正などに基づき、河川環境を重視した河川整備が前提となった今日においても、汽水域については他の河川区域と比較して、人為的改変による環境への影響の調査・分析を行うのに必要なデータが十分整理されていないなど、その取り組みは十分進んでいるとはいえない状況である。

また、河川と海の双方から影響を受ける汽水域においては、河川区域にとどまらず汽水域に影響を及ぼす海域にまで視野を広げる必要があるが、実態としてそのような対応はほとんどとられていないのが現状である。

さらに、今日国民の環境に対する関心が高まる中、汽水域は生物の生息・生育の場や、人と自然とのふれあいの場として、また水域の浄化機能を有する場などとして多様な価値が期待されているにもかかわらず、現実にはそのニーズに十分応えられる状態とはいえない。

汽水域についてはこれまで洪水の流下などの治水面や舟運、塩害の防止などの利水面からの調査・研究が主に行われてきた一方で、他の河川水域と異なり、既述のとおり現象が複雑であることから、環境の把握や人為的改変に伴う環境への影響に関する調査・研究は十分進められていなかった。

今後適切な河川管理を実現するため、環境の把握や人為的改変に伴う環境への影響に関する調査・研究を進めるとともに、これまで得られた知見を基に人為的改変による物理・化学的現象の調査・分析手法を取りまとめる必要がある。また、各河川においてそのために必要な調査の実施やデータの整理が望まれている。

このような取り組みを通じ、汽水環境を適切に捉え、河川整備の計画段階において環境に及ぼす影響を事前に予測・評価するとともに、その影響の回避低減を行うことや、許可工作物の工事及び占用許可の際の適切な審査、さらに積極的に汽水域の環境を復元するための自然再生事業などを行うことが重要な課題である。

第3章 汽水域における人為的改変と河川環境への影響

3.1 汽水域で生起する現象

汽水域で生じる主な現象は、河川と海域の双方からの外力による土砂の移動と海水及び淡水の挙動に係るものに大別出来る。土砂の移動には、「河口地形の形成」と「河床・河岸の形成」がある。また、海水及び淡水の挙動に係るものとして「塩水遡上」と「貧酸素水塊の形成」がある。

< 解説 >

汽水域では河川や海からの自然の外力を受けてさまざまな現象が生じている。これらの現象の上に人為的改変が加わって汽水域の現象が変化する。自然の外力に対して人為的改変が大きい時、汽水域の環境が大きく変化し、人為的改変による問題が顕在化する。図 3.1 - 1 は、汽水域で生じている代表的な現象をイメージ図にしたものである。

汽水域では潮汐に伴う半日、半月周期の干満による流れと、時折生じる出水や強風・波浪による流れがあり、この流れにともなって、土砂の移動・堆積、塩分の混合等、複雑な現象が生じている。

出水時には河川の流れの影響が卓越し、海水や河床表層の細粒分はフラッシュされる。出水後の流量の低減時には流速の低下に伴って河口付近に土砂が堆積し、河口テラスが形成される。波浪の強い時は頂置面から土砂が運ばれ河口付近に堆積し、河口砂州が形成される。内湾では、波浪や潮汐流によって細かい砂や泥が移動・堆積し、干潟が形成される。

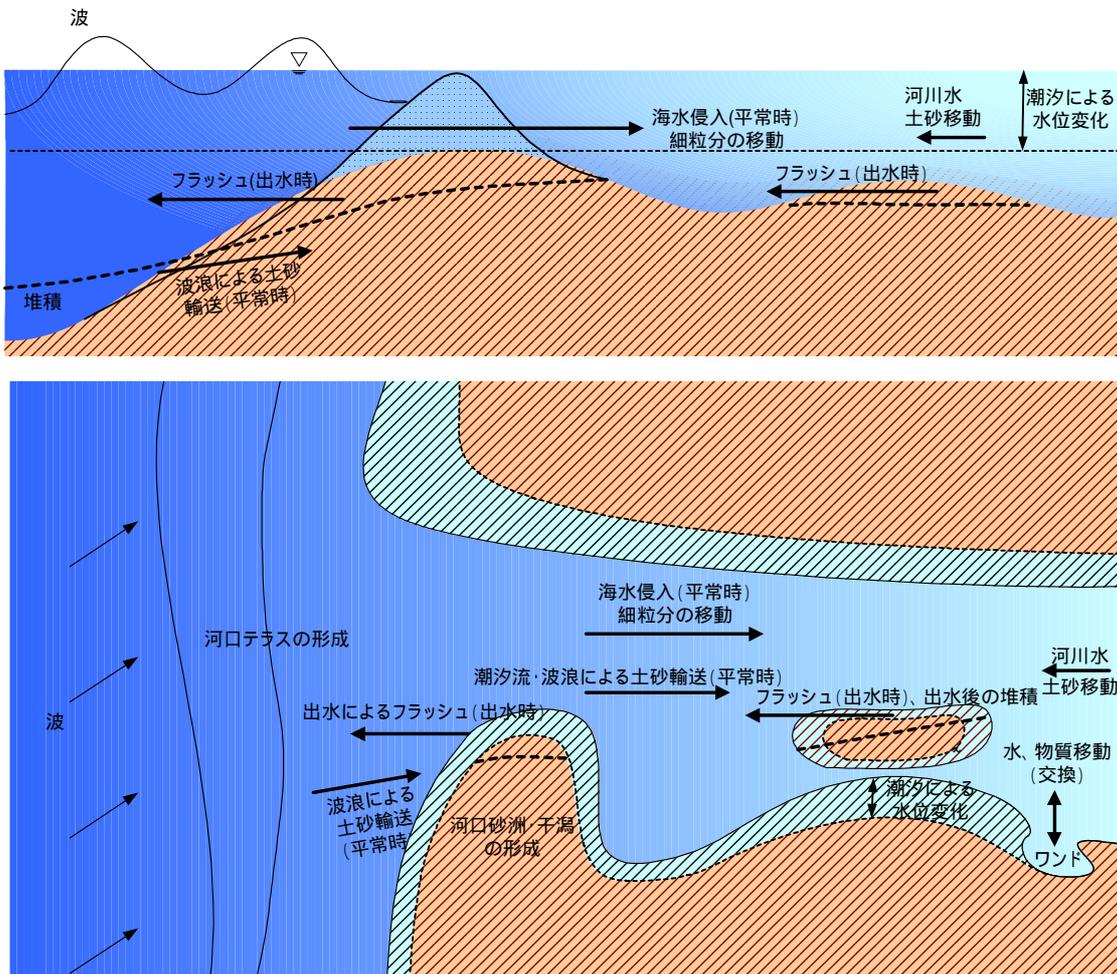
平常時は潮汐により水位（水深）が周期的に変化し、それに伴って砂州・干潟が干出と水没とを繰り返す。また、波浪や潮汐流により河床の底泥細粒分が巻き上げられ高濁度水塊を形成し、遡上流により上流に移送され堆積する。さらに、上流から流下して来た物質が海水と接して凝集沈殿を生じ、塩水くさび面で高濁度となる。

入退潮により淡水と海水がまじり合うが、その混合の状況によって塩分の濃度分布が決まる。潮位変動が少なく汽水域の長い河川では混合が弱く塩水くさびを形成しやすい。

淡水と海水の接する部分では境界面で混合を生じ、海水は淡水の流れに連行され下流に移動する。これを補う形で、塩水くさびの中を先端に向かう流れが生じる。（エスチャリー循環流）

海水が侵入する際に、淡水との混合が弱ければ塩分濃度躍層を生じ、表層からの酸素の供給が少なくなる。一方、水中や河床表層では有機物の分解等による酸素消費が進むため、河床付近に貧酸素水塊が形成される。

< 河口地形の形成、河床・河岸の形成のイメージ >



< 塩水遡上、貧酸素水塊の形成のイメージ >

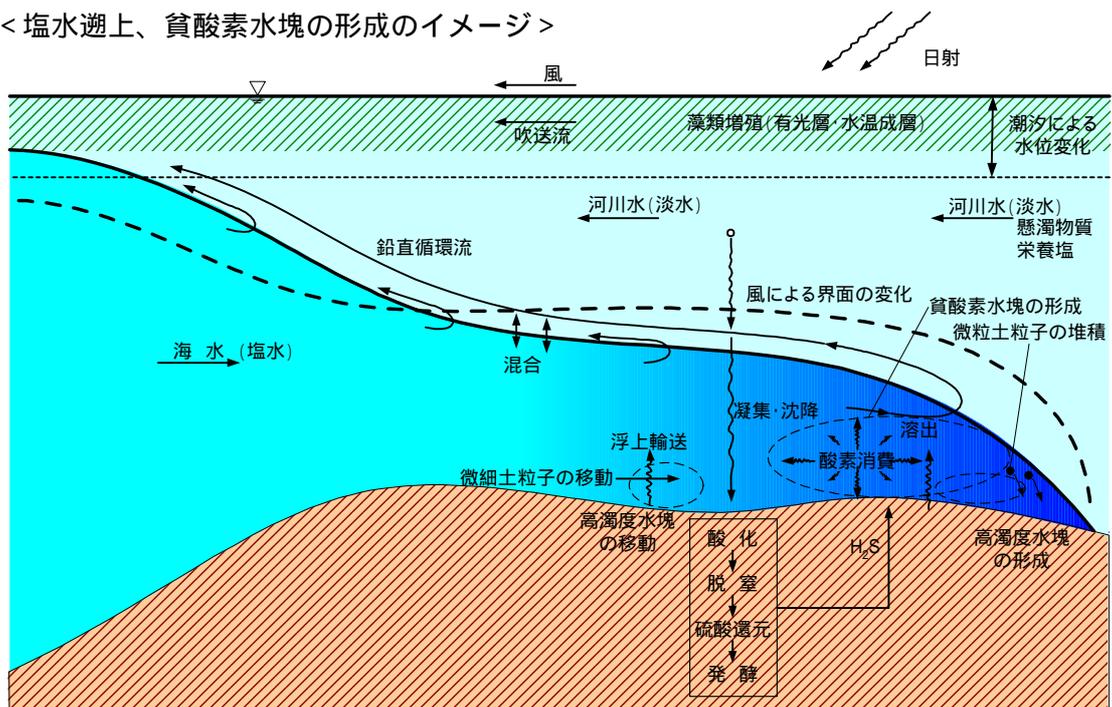


図 3.1 - 1 汽水域の代表的な現象のイメージ

3.1.1 土砂の移動に関する現象

土砂の移動に関する現象としては、「河口地形の形成」と「河床・河岸の形成」に大別される。

「河口地形の形成」に関しては、上流からの土砂供給や潮汐流、波浪および沿岸漂砂などにより規定され、「河床・河岸の形成」に関しては上流からの土砂供給、洪水時の掃流力、潮汐流および波浪などにより規定される。

< 解説 >

(1) 河口地形の形成

河口部には、波浪・潮汐流・河川流などの複数の外力が作用し、さらに密度流効果も重なるために、その地形変化はきわめて複雑である。

洪水時には河川の流速と水深の増により、河床に働く掃流力が大きくなって、河床の堆積土砂がフラッシュされる。洪水時の水位上昇が緩やかで、河口が開いている場合は、側岸侵食により砂州が徐々にフラッシュされる。完全閉塞している河口や部分的に開いている河口であっても、洪水時の水位上昇が速い場合には、洪水により水位が砂州を越えるようになり、砂州全体が一挙にフラッシュされる。このときの水位は、流量の増加に伴う砂州部開口河積の拡大が追従できないため、急激に上昇し、流量ピーク以前に河口水位のピークが現われる。このような現象は、中小河川でその傾向が強く、流量ハイドログラフの立ち上がり部分の流量変化速度や河口砂州高が大きく影響する。

河川から流出した土砂は、河口部における潮汐流と碎波に伴う海浜流とによって立体的な河口砂州を形成する。土砂供給の大きい河川では出水時に流出した土砂により河口テラスが形成される。内湾に面した河川においては、波による変形は少ないが、外海に面した河川においては河口テラスは変形され、汀線方向に運ばれ縮小する。

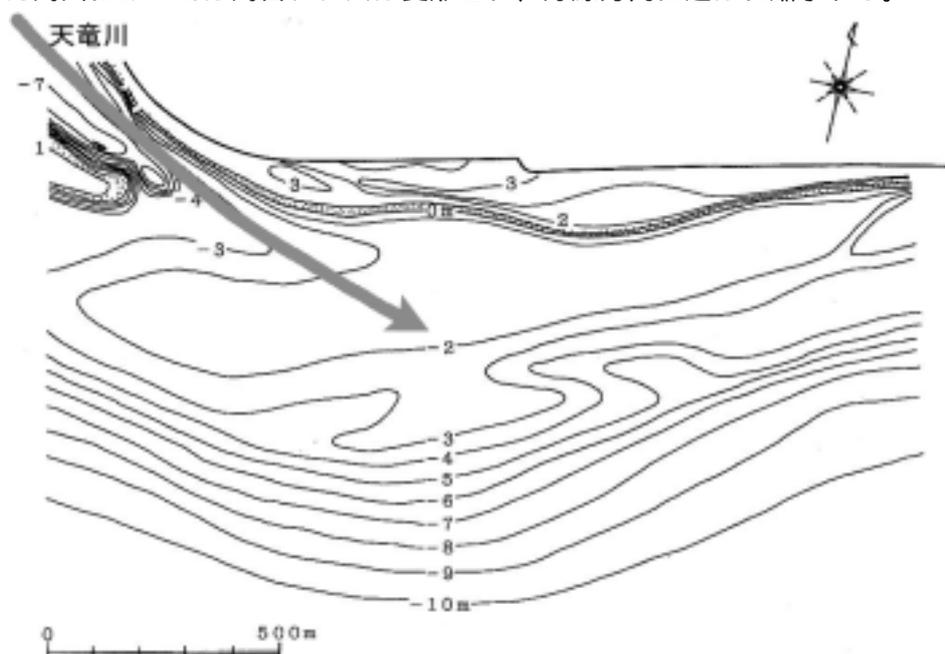


図 3.1 - 2 天竜川河口部の深浅図 (平成 5 年 9 月)

「土木研究所資料第 3281 号 河口地形特性と河口処理の全国実態 平成 6 年 6 月 建設省土木研究所河川部河川研究室」に加筆

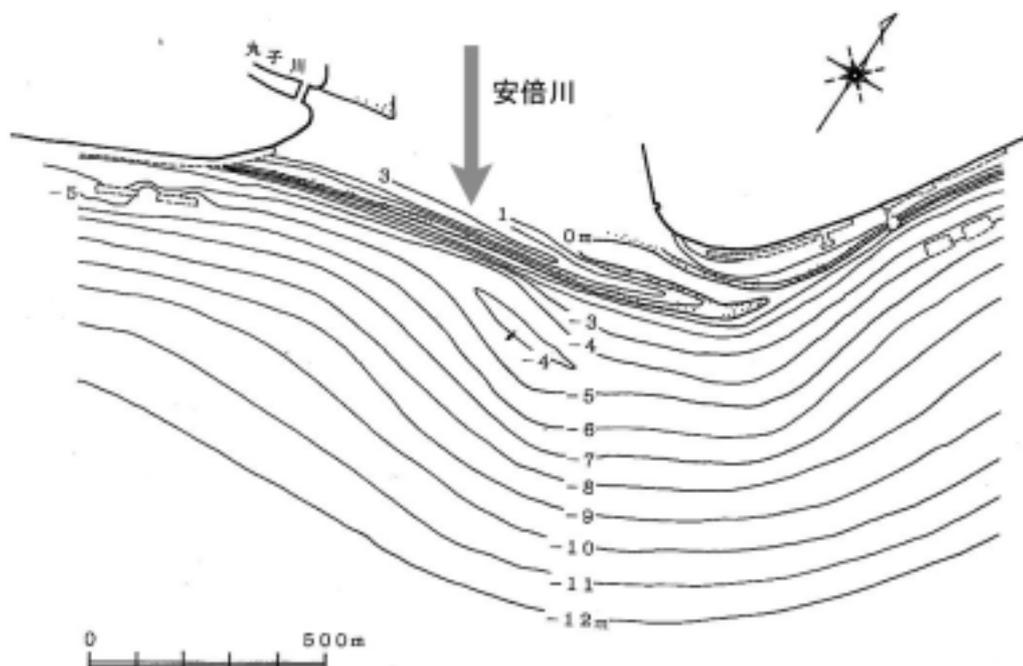


図 3.1 - 3 安倍川河口部の深浅図（平成4年9月）

「土木研究所資料第3281号 河口地形特性と河口処理の全国実態 平成6年6月

建設省土木研究所河川部河川研究室」に加筆

河口砂州の高さは波浪の波高、周期、海浜材料の粒径、海浜勾配に依存して変化し、波高が高く、周期が長く、かつ粒径が大きいほど砂州高は高くなる。

河口の開口部の位置は、河川流量や波浪条件の変化に応じて変動する。沿岸漂砂の卓越する海岸では、河口位置が沿岸漂砂の下手側に移動し、また元に戻るという変動を示す場合も多い。

導流堤等によって沿岸方向の砂移動が阻止される場合には河口位置の変動幅は小さくなる。沿岸漂砂が卓越している場合には上手側に土砂が溜り、下手側は河岸侵食が生じる。

河川からの流出土砂が多い場合には、河口部に土砂が堆積して河口が沖へ移動し、反対に河口上流での河床掘削などにより供給土砂量が減少し、沿岸漂砂によって運び去られる量との均衡が失われると、河口砂州は陸側へ移動する。開口部の幅や断面積は、潮汐流および河川流の作用によって広くなり、波浪の作用によって狭くなるといった変動を繰り返す。

なお、外海に面している河口では、掘削によって河口砂州を取り除いても、沿岸漂砂が河道内に入り込み、砂州が再発達する。



写真A 新宮川河口部の空中写真(平水時:平成2年5月29日)



写真C 新宮川河口部の空中写真
(平水時:平成2年10月30日)



写真B 新宮川河口部の空中写真(洪水時:平成2年9月20日)

平水時には(写真A),両岸から細長い砂州が伸びているために開口部は河口のほぼ中央に位置している。そして河口部の沖合では半円形状の碎波帯が見られることから,この当時開口部の沖側直近には浅い河口テラスが発達していたことがわかる。写真Bに示す洪水時の状況では,砂州の両岸でフラッシュが進行し,沖に向かって舌状のテラスが形成されている。河口砂州は河道中央部付近を残し,大部分がフラッシュされた。左右の流出状況を比較すると,左岸側の方が白濁領域の突出度が高いことから,洪水の主流部は左岸側にあることが推察できる。当河川では,平成2年9月30日には再び洪水が発生した。従って,10月30日に撮影された写真Cは洪水後,1ヶ月しか経過しておらず砂州は完全に復元されていない。右岸の砂州は砂州フラッシュ後の河道内への侵入波浪により,右支川を巻き込むように河道内へ発達形成された。その後,中央部の砂州の発達とともに右側開口部も浅くなり,やがて2つの砂州は結合され,右岸側の開口部は閉塞されるものと思われる。

図 3.1 - 4 河口テラス消長の事例

出典:土木研究所資料第3281号 河口地形特性と河口処理の全国実態 平成6年6月

建設省土木研究所河川部河川研究室

(2) 河床・河岸の形成

河床・河岸の形成は、上流からの土砂供給、洪水時の掃流力、潮汐流および波浪などにより規定される。

洪水時には、河床に働く掃流力により砂洲のフラッシュや河床に堆積された土砂が流出する。一方上流からは多量の土砂が供給され、特に流量低減時に汽水域に堆積し、河岸・河床を形成する。

平常時には、潮汐により水位（水深）・流速が周期的に変化し、それに伴って河岸や河岸前面の干潟（河岸干潟）が干出と水没とを繰り返す。また、波浪により河床の底泥細粒分が巻き上げられ、高濁度水塊を形成し、遡上流により上流に移送され堆積するなど河床において土砂の分級が促進される。

さらに、上流から流下して来た物質が海水と接して凝集沈殿を生じ、塩水くさび面で高濁度となる。

低水路幅・河岸高などの河道特性は河床材料の代表粒径や河床勾配で規定される。また平均年最大流量時の掃流力によって河床材料が規定されている。

河岸形状については河床材料と波浪などの外力および植生の存在によっても、河岸形状が規定されている。

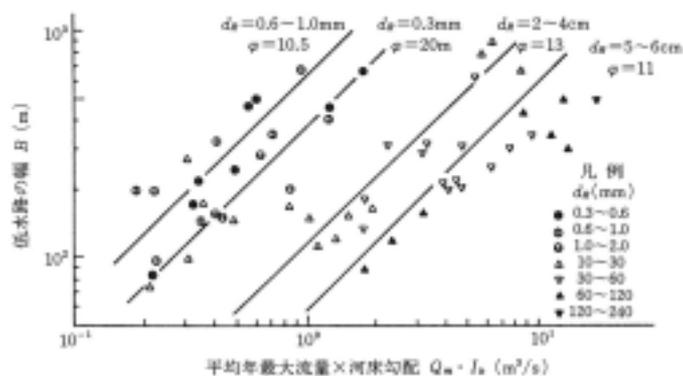


図 3.1 - 5 わが国の河川における低水路幅 B と $Q_m \cdot I_b$ の関係
出典：「沖積河川学 堆積環境の視点から」山本晃一著 山海堂 P.45

コラム7：高濁度水塊の形成と移動

河川水中の浮遊懸濁物質（SS）は、海水と淡水の境界域や河口付近で沈降が促進され、河床上に高濃度SS水塊、いわゆる浮泥層が形成される。浮泥層の形成には、底泥の巻き上げや沈降、潮汐と河道内の地形特性に伴う水理学的影響なども関与している。また、SSが沈降する際には、水中の様々な物質を取り込みながら河床に沈積するため水中の汚濁物質を高濃度に集積させることになる。

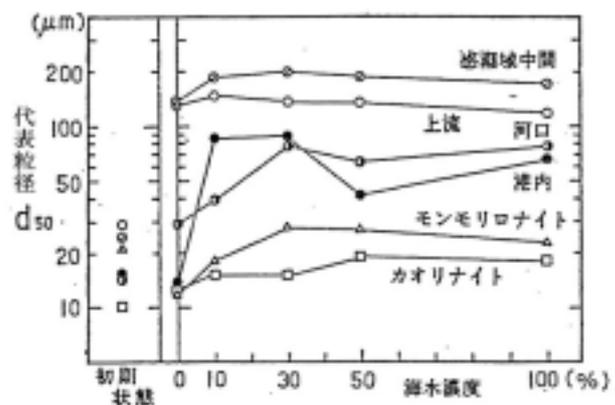
汽水域における堆積環境を支配する要因として、懸濁粒子の凝集作用がある。水中の粒子の沈降速度 W_s は微細な粒子の遅い運動に対する Stokes の流体抵抗則によって次式で与えられる。

$$W_s = (1/18\mu)(s - w)gd^2$$

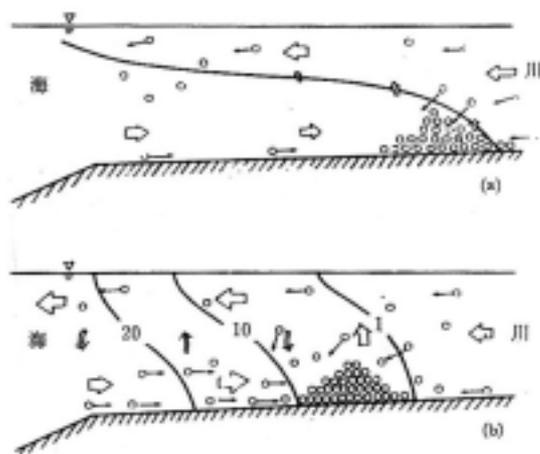
ここに μ ：水の粘性係数、 s ：粒子の密度、 w ：水の密度、 d ：粒子の直径、 g ：重力加速度である。

もし個々の粒子が数個合併して大きな粒子になると、粒子の間に水を取りこむので、その大きい粒子の見かけ密度 s はもとの粒子の密度よりは小さくなるが、直径 d の増加の影響の方（二乗）が大きいから、粒子の凝集によって大きい粒子ができると、その沈降速度は大きくなり、堆積が促進される。

凝集は、海水中の金属イオンの吸着、微生物の作用、流れ、波が複雑に関係している。右図は海水濃度と現地底泥等の代表粒径の関係を実験的に検討した例であり、10%程度で凝集が見られる。



海水濃度(割合)を変化させた場合の凝集による代表粒径の変化
 出典：「河口・沿岸海域におけるシルトの凝集と沈降に関する研究」
 第33回海岸工学講演会論文集 三村信男 他 一部加筆



Turbidity Maximum 出現の機構
 (a)弱混合、(b)緩混合（数字は塩分）

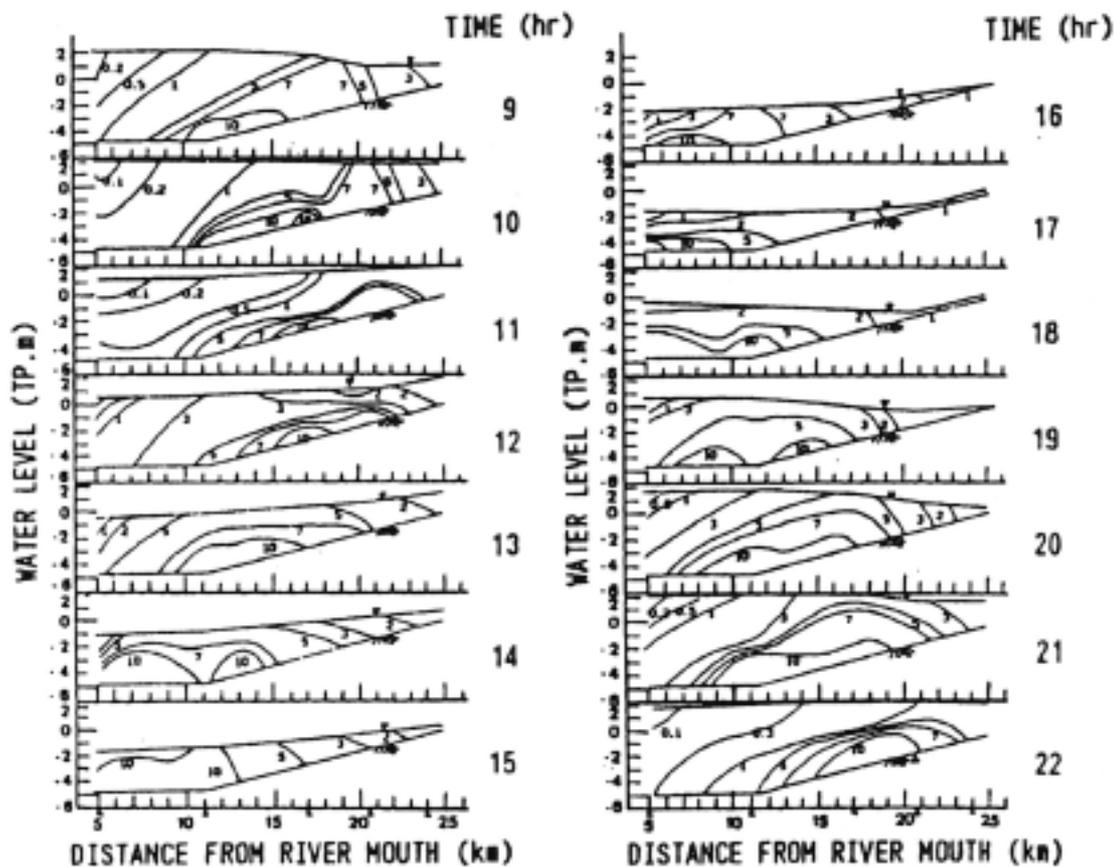
出典：「河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー」
 杉本隆成 1988 東海大学出版会 P8

また、汽水域では、潮汐流によって左図のように高濁度水塊が上流へ移送され、濁度最大域（Turbidity Maximum）を生じる。

下図には、六角川における高濁度水塊の観測例を示す。



佐賀県六角川現地調査地点



1983年11月20日における六角川縦断方向のSS濃度 (mg/l)

六角川における高濁度水塊の観測例

出典 : (財) 河川環境管理財団 (H12.9) : 「感潮河川の水環境特性に関する研究」 p154

3.1.2 塩水と淡水の挙動に係る現象

塩水と淡水の挙動に係る現象としては、「塩水遡上」と「貧酸素水塊の形成」に大別される。
 「塩水遡上」に関しては、潮汐流や河道の地形、河川流の特性などにより規定され、「貧酸素水塊の形成」に関しては塩水くさびの形状、流域からの負荷、底泥の状況、および気温などにより規定される。

(1) 塩水遡上

一般に河口部においては、海水と淡水の密度差により、海水は河川水の下に入り込んで力学的平衡に達しようとする流れを生じる。この場合、潮汐や河道の地形、河川流の特性等の影響により、淡塩水の混合状態が図 3.1 - 6 に示すように、弱混合型（塩水くさび）、緩混合型および強混合型の3種に分類される。

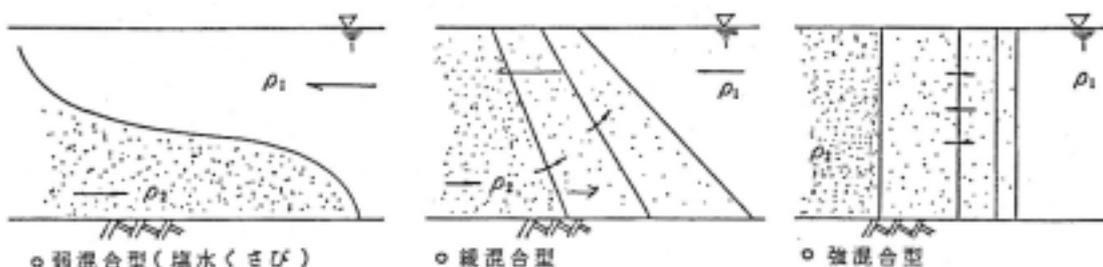


図 3.1 - 6 混合形態の分類

弱混合型は、海水と淡水の混合を促すような働きが弱く、両者は鉛直方向に二層の状態となり、内部の境界面は、そこに働くせん断力の作用によってある傾きを有し、一般に塩水くさびと称する形状となる。従って、混合現象の役割は小さく、異種の流体の相互運動という面が大きい部分を占める。

緩混合型は、ある程度乱れによって淡水と海水との混合が生じる場合で、密度の変化が鉛直方向に連続しているような状態である。強混合型は、鉛直方向の密度差がほとんどなく縦断方向に密度の勾配が存在している場合の状態を示す。しかし、このような混合形態の分類については、明確な定義に基づいたものではなく、またこれらに明瞭な境界が存在するわけでもない。

一般に潮位変動量の小さい日本海側の河川では弱混合型が多く、潮位変動量が大きくなると強混合型へと移行する。潮位変動量と周期は、月齢によって変化するので、混合形態もそれによって変化する。

洪水時において、流速条件や河床地形の状況によっては河道内に侵入した塩水が洪水時に残存することがあるが、洪水流量が増大し流速が大きくなると遡上した塩水はフラッシュされる。

(2) 貧酸素水塊の形成

汽水域は、河川の上流から供給される栄養塩により、栄養が豊富な水域となっている。また、周辺の都市排水の流入による水質の汚濁や河床への有機物の堆積が見られる。

河口潮位の変動が少ない弱混合～緩混合の河川では塩水くさびが発達しやすい。塩水くさびが来ると上層と下層の間の酸素等の物質交換が著しく減少する。この時、有機汚濁の進んだ河川では、有機物やアンモニア・亜硝酸性窒素などが酸化されるため、下層で急激に酸素が消費され、このため貧酸素水塊が形成される（躍層をはさむ上下層の密度差が発達し酸素飽和度が40%以下になると拡大し、さらに20%以下になると急速に無酸素化に近づく傾向がある）*1。酸素が無くなると、海水中に多量に含まれている硫酸イオンが硫酸還元菌により還元されて硫化水素が発生する。このような状況下では底生生物などが死滅するなどの影響を受ける。

*1 「東京湾の貧酸素水塊」沿岸海洋研究ノート,26:99-100. 鬼塚正光(1989)

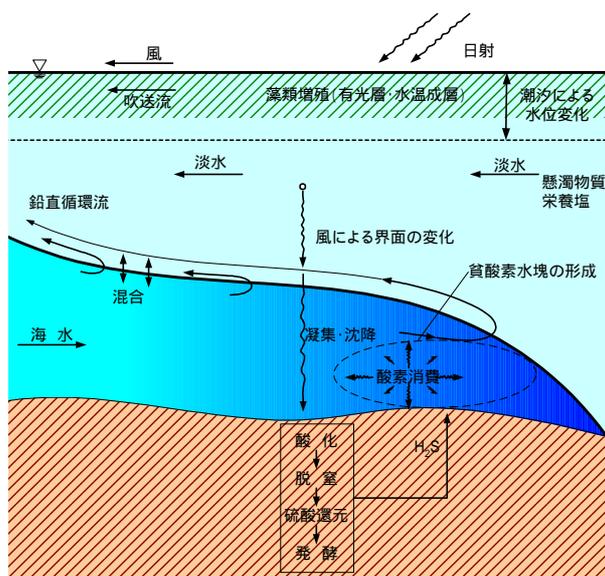


図 3.1 - 7 貧酸素水塊の発生機構模式図

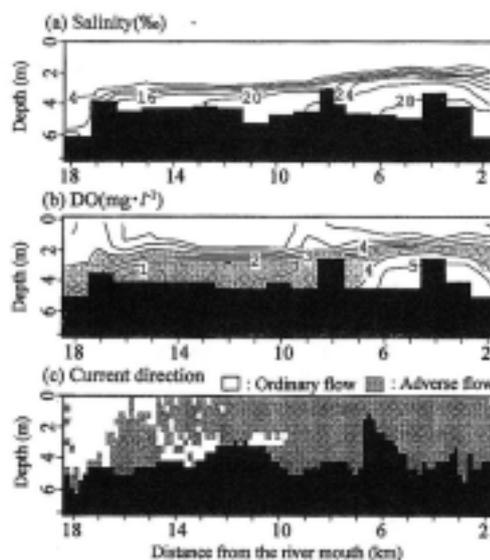


図 3.1 - 8 貧酸素水塊の挙動及び流れの構造

出典：感潮河川の水環境特性に関する研究
平成11年度 (財)河川環境管理財団

さらに表層水が強風などで一方の岸に押しやられると、それを補うように深層の貧酸素水塊が表層に湧昇してくることがある。その中に含まれる硫化水素が空気に接すると硫黄コロイドができ、光を散乱させて青みがかった色を呈するため、青潮とよばれる現象が生じる。これにより岸近くに生息する魚介類が死滅するなどの大きな影響を受ける。



図 3.1 - 9 青潮発生状況 (H14.8.20 千葉県提供資料)

3.2 汽水域に係る人為的改変

汽水域の河川環境を形成する要因には、洪水や濁水、あるいは波浪のような自然の攪乱によるものと、人為的な改変によるものがある。人為的改変には、河道の掘削、河口導流堤の建設、河口部の埋め立て、河口域での海砂採取、橋梁の建設、河口堰の建設などがある。

本手引書では、人為的改変とそのレスポンスの関連を整理し、あわせて調査・分析法を検討する。

<解説>

図 3.2 - 1 に示すように、汽水域は海と河川の双方の微妙なバランスの下に成り立っており、人や生態系に影響を与え、またそれらからの影響を受ける。この系に人為的な改変が与えられると系が変化する。人為的改変は汽水域における現象の変化を通じて人や生態系と密接に係わっている。

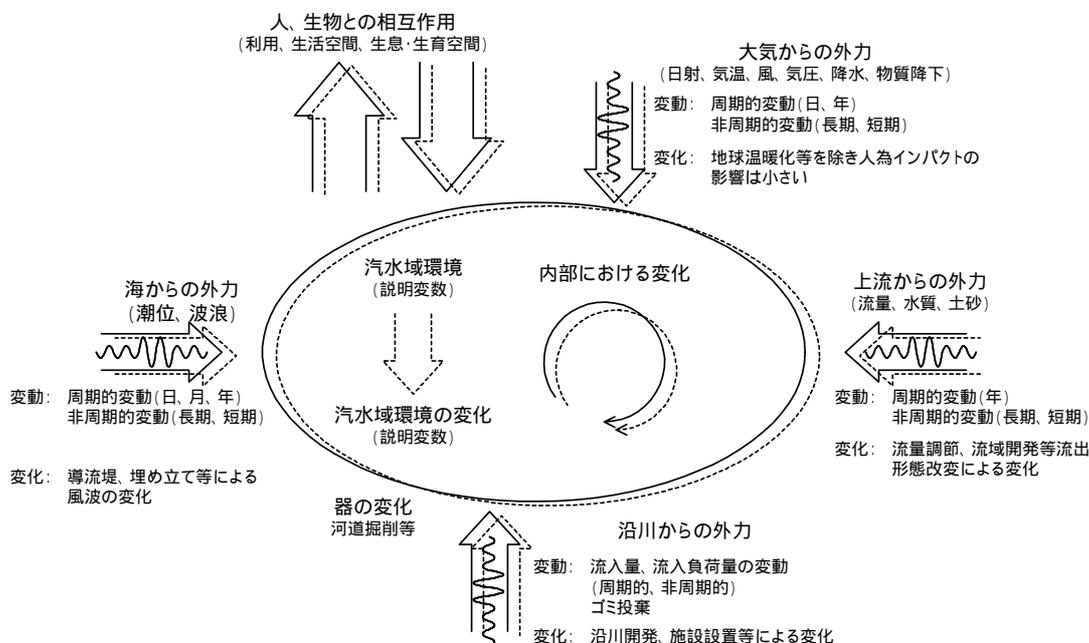


図 3.2 - 1 汽水域への外力とその変化の概念図

この図では変動を含む系において、人為による系の変化を「変化」と表している。

先に述べたように、汽水域は人為による改変が集中しやすく、図 3.2 - 2 に示すようにこれまで多くの人為的改変が加えられてきた。平成 15 年度において一級水系の管理事務所に行ったアンケートで見ると、戦後一級水系の汽水域に加えられた人為的改変として図 3.2 - 3 のようなものがある。

「橋梁の建設」が 129 河川中 105 河川、次いで「河道の掘削」が 68 河川、「河口導流堤の建設」が 37 河川、「河口部の埋め立て」が 32 河川、「河口堰の建設」が 29 河川、「河口域での海砂採取」が 9 河川、「放水路の建設」が 4 河川、「排水機場の建設」、「床固め」が 2 河川となっている。

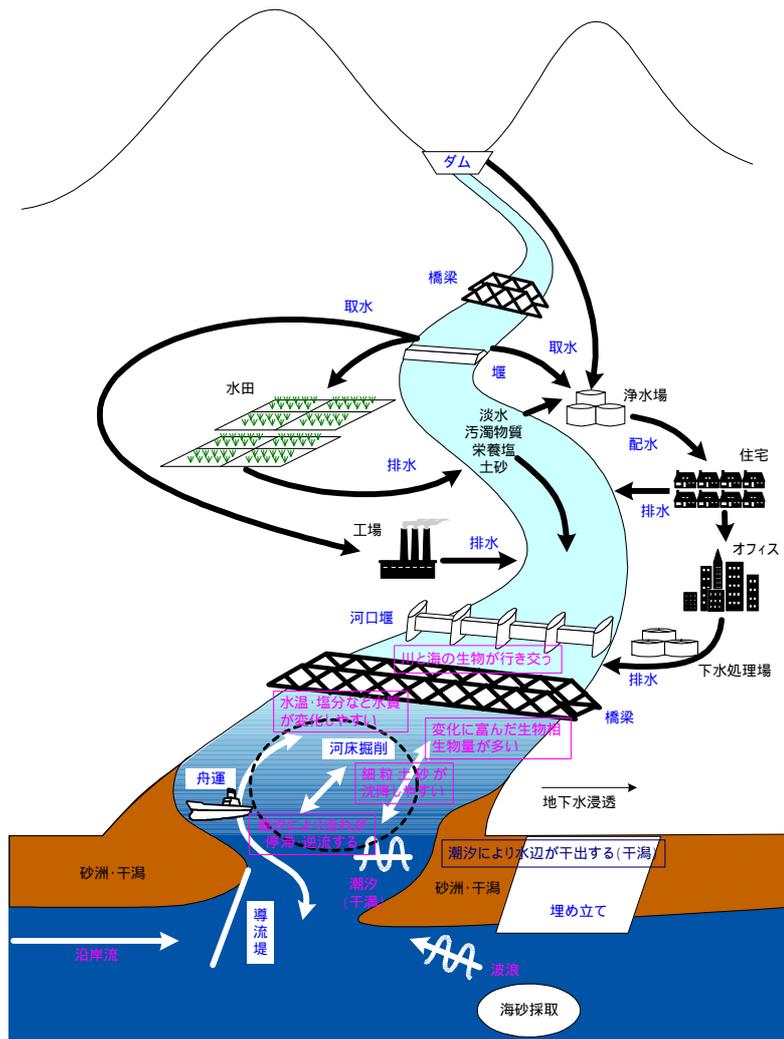


図 3.2 - 2 汽水域への人為的改変のイメージ

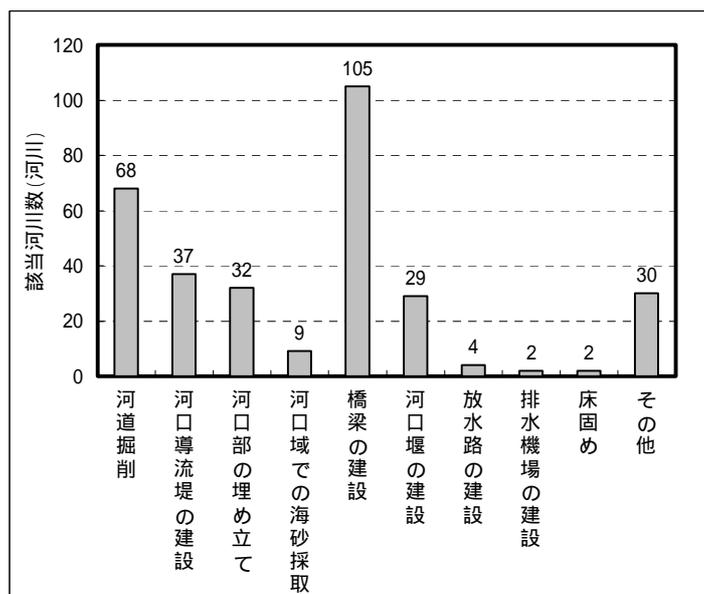


図 3.2 - 3 汽水域への人為的改変

(昭和20年以降、一級水系109河川 派川含み129河川でのものである)

3.3 人為的改変による河川環境への影響予測

人為的改変の内容によって生じ得る河川環境への影響は、シミュレーションや過去の事例を整理する等により行う。

なお、このような人為的改変に対する河川環境への影響は、即座に生じるものと段階を経て生じるものがある。特に生物への影響は、長い時間の経過の中で発生することも考えられ、本手引書に示す調査・分析に加えて、モニタリングにより監視をしていくことが大切である。

< 解説 >

(1) 対象とする人為的改変について

汽水域の河川環境を変化させる要因には自然の攪乱によるものと人為的な改変によるものがある。本手引書では、人為的な改変による影響の予測についてとりあげることとし、その中でさらに代表的なもの、影響の大きいもの、今後多数予想されるものとして次の5つの人為的改変を対象としている。

なお、「河口堰の建設」については、長良川や利根川等において河口堰設置後のモニタリング調査により、そのレスポンス等を具体的に把握しつつあることから、本手引書では対象としていない。

- ・ 河道の掘削
- ・ 河口導流堤の建設
- ・ 沿岸域の埋め立て
- ・ 河口域での海砂採取
- ・ 橋梁の建設

本手引書で対象とした人為的改変以外にも自然の攪乱（例えば洪水や濁水）が考えられるが、それらについては、できるだけ計算の与条件として扱うなどの工夫を行う。

(2) 人為的改変による河川環境への影響予測

人為的改変により生じる河川環境への影響は、人為的改変による現象の変化をシミュレートすることで、或いは過去の事例を整理することである程度予測が可能である。これに直接的改変の状況をあわせて現状の生物の生息・生育環境の情報と重ね合わせることで、汽水域の環境に対する影響を評価することが可能となる。

本手引書では図 3.3 - 1 に示すインパクト～レスポンスの連関をフローにまとめた。

なお、本検討では人為的改変による物理・化学的な変化を対象とした。レスポンスの結果生じる問題発生の判定のための基準は、調査研究途上にあり、今後ともさらに調査を推進し知見をとりまとめていく必要がある。

汽水域における人為的改変による河川環境への影響予測フロー

以下に人為的改変による河川環境への影響予測フローを、人為的改変とレスポンスとの連関を中心にとりまとめた。連関の強さや調査分析手法の技術的難易度を、線の太さや色により表現している。

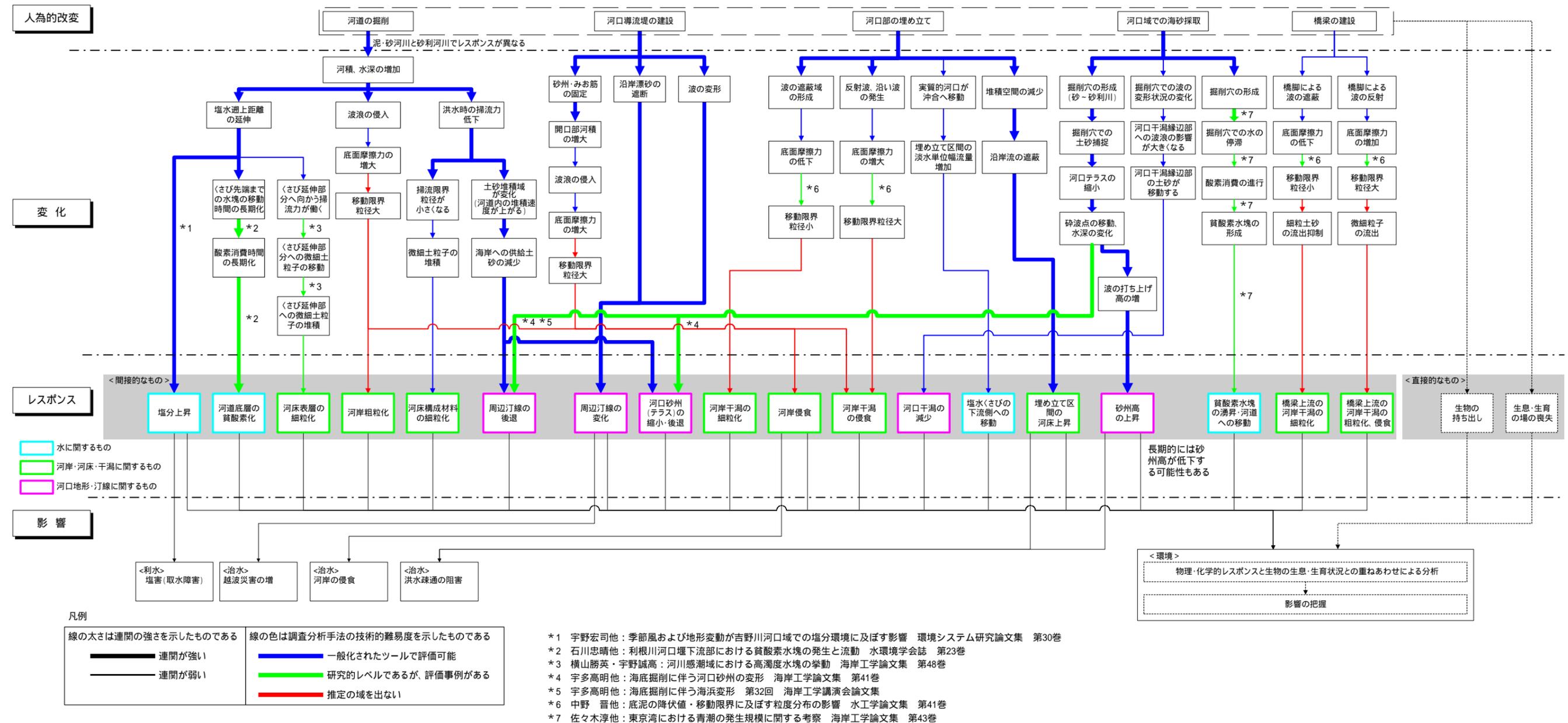


図 3.3 - 1 汽水域における人為的改変による河川環境への影響予測フロー

3.4 必要な現地調査

河川管理上、汽水域の河川環境を把握することや人為的改変による問題発生の可能性を判断する上で、当該河川の基礎的なデータを常日頃より把握しておくことが重要である。

< 解説 >

河川管理上必要となる基礎的なデータは下表に示すように、現況把握や一次判定のために定常的に収集しておくべきものと、二次判定が必要となった場合に追加調査を行うものがある。(p4 - 1 参照) また、影響追跡のために事後に実施するものもある。

調査段階	現況把握	一次判定	二次判定	影響追跡
分析手法	(変化図) (分布図)の作成等	他での事例比較 簡易なシミュレーション	模型実験 シミュレーション	モニタリング
基礎的なデータの収集方法	共通基盤として定常的に実施、関係機関による既往データの収集			
			必要なデータの追加調査	モニタリング項目を決めて追跡調査
収集時期	常時	計画時点		実施後

(1) 現況把握、一次判定のための現地調査

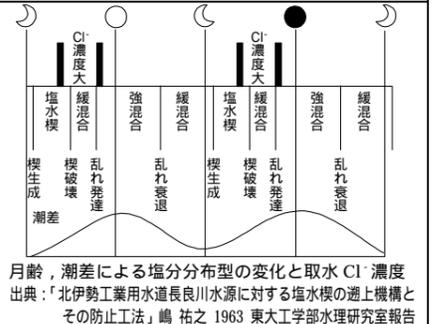
汽水域を管理していく上では、例えば上流から流れてくる水質が変わることによって、今まで起きていなかった河道底層の貧酸素化が生じることもあることから、環境の状況把握が重要であり、また人為的改変を行おうとする場合には当該水域での環境への影響の可能性を予測する必要がある。そのため表 3.4 - 1 に示す項目について現地調査を行い、当該河川の河川環境を常日頃より把握していく必要がある。

現地調査を行うに際しては、まず当該汽水域を活動の場とする地域住民や学識者などへのヒアリング結果や既存文献をもとに、調査の必要性や内容、視点を明確にしておくことが重要である。また、ハビタットは生物種によって非常に小さなスケールの場合があるため、当該区域の注目種などを考慮し、地形や植生についても細かく調査することが望ましく、浅場に広がるアマモ場、砂嘴の背後に発達する湿地、小水路の合流点やその滞などの特徴的な場を把握することが重要である。

なお、既往の調査結果については、これまでも汽水域における水文、水質調査等は行われてきたが、治水、利水の観点から行われている場合が多いため、これらのデータだけでは汽水域の環境に対する影響を適切に評価することが困難であることに注意が必要である。

表 3.4 - 1 必要な現地調査

調査項目	調査目的・把握する現象	調査場所	調査頻度	備考
河道縦横断形状	<ul style="list-style-type: none"> 出水、波浪、潮汐流による土砂移動 経年的な変化傾向とともに急激な、或いは大規模な変化が生じていないかどうか確認 	感潮区間内、縦断方向 200m ピッチ程度。合わせて河口海域（沖合方向前置斜面の先端まで、沿岸方向河口河川幅の3倍くらいまで、以下同じ）の地形（深淺測量）。	数年に1回程度、及び河床が大きく変化するような大規模な洪水の後。	定期縦横断測量として実施。ただし、水深の測定にソナーを用いる等、精度がやや劣るもののコストが小さく短時間で測定出来る簡便な方法を用いても良い。（現地調査手法の「ソナーを利用した河道横断形状の測定」(p調査-1)及び「ビデオ撮影による砂州動態観測」(p調査-2)参照) 河川砂防技術基準第9章河口調査 2.9 河川・海岸地形調査参照
河床材料	<ul style="list-style-type: none"> 出水、波浪、潮汐流による土砂移動による河床材料の経年的な変化の把握 ハビタットの概況の把握 	感潮区間内、縦断方向 1km ピッチ程度。合わせて河口海域の範囲で分布のわかる程度のメッシュを組む。横断方向には、低水路内の中央及び左右岸1点ずつの計3地点程度、低水路幅が広い場合等横断方向の河床材料が大きく変わる場合はさらに追加。鉛直方向は表層。ただし、河床表層に出水時にフラッシュされる層のある場合には、下層についても調査する。	数年に1回程度、及び河床が大きく変化するような大規模な洪水の後。	河川砂防技術基準第9章河口調査 2.6 底質材料調査参照
河口水位	<ul style="list-style-type: none"> 出水による土砂移動 	河口部、代表1点。感潮区域内の縦断的水位が観測出来ればベター（最低限大規模出水時の痕跡水位）既設観測所があればそれを活用する。	連続観測を行う。	河川砂防技術基準第9章河口調査参照 縦断的に水位を観測するためには多数の観測地点が必要であり、コストも考慮して簡易な水位計を用いても良い。（現地調査手法の「セパレート型の圧力計による水位の測定」(p調査-4)参照)
流量（水位観測とH-Q関係作成のための流量観測）	<ul style="list-style-type: none"> 出水、潮汐による土砂移動 	感潮区間の上流側地点。（なお、汽水域流量に大きく関与する途中流入地点があればそれも含む）既設観測所があればそれを活用する。	従来通りの水位流量観測	河川砂防技術基準第2章水位調査、第3章流量調査参照
潮位	<ul style="list-style-type: none"> 波浪による土砂移動（海岸、河道内） 潮間帯の把握 	河口海域、代表1点。近傍に既設の観測所があれば代用可。	平均潮位、朔望平均干満潮位、気象偏差を求める。	河川砂防技術基準第9章河口調査参照
波浪（波高、波向、周期）	波浪による土砂移動（海岸、河道内）	河口海域、及び感潮区間内で波浪の影響を受けやすい代表1点づつ。近傍に既設の波浪観測があれば省略可だが、地形により波浪は大きく異なることから、河口部の波浪を代表出来ること。	連続観測を行い、有義波高、波向、周期の頻度分布を求める。 1度求めれば毎年行う必要はなく、波浪に大きく影響するような地形の改変が生じた場合に行う。	河川砂防技術基準第9章河口調査参照 水位、波高・波向を同一地点で観測する（波高は水位計の電氣的平滑化をしないことで観測可能）などコスト削減に留意
風向風速	波浪による土砂移動（海岸、河道内）	河口域、代表1点。近傍に既設の観測所があれば代用可。	1時間毎。最低限1年間の特性を見る。	
塩分濃度分布*1	塩水遡上、貧酸素水塊の形成、土砂移動（凝集沈殿）	感潮区域内、縦断的には塩分濃度分布形状がわかる程度で少なくとも5~15断面程度、濃度変化の大きい河口付近や塩水遡上先端は密に測定。横断的には主流線上1地点。横断的に濃度変化が大きい場合は複数地点。鉛直方向は濃度変化の大きい河口付近や塩水遡上先端は密に測定。	大潮時、中潮時、小潮時の1潮時2時間おき程度。1度求めれば毎年行う必要はなく、入退潮に大きく影響するような地形等の改変が生じた場合に行う。 また、湧水により塩水くさびが深く侵入するような場合は、連続的な観測を行う。 風の特に強い日は避ける。	河川砂防技術基準第9章河口調査 2.7 水質調査参照。 右図に例示するように月齢・潮差による塩分分布型の変化があることから、半月周期（約15日間）の塩水挙動を捉えるのが望ましい。 短時間に詳細な塩分濃度を測定する必要がある。（現地調査手法の「塩分濃度の計測」(p調査-5)参照)
水温、溶存酸素濃度分布*1,*2	貧酸素水塊の形成	塩分濃度分布と同様。	塩分濃度分布と同様。	弱混合で塩水くさびが生じやすく、感潮区間の長い河川で行う。 塩分濃度と同時に水温や溶存酸素濃度の分布を測定するため、多項目水質計の利用が考えられる。（現地調査手法の「多項目水質計による計測」(p調査-7)参照)
濁度分布*1,*2	波浪、潮汐流、凝集沈殿による土砂移動	感潮区域内、縦断的には濁度分布形状がわかる程度で少なくとも5~15断面程度、濃度変化の大きい河口付近や塩水遡上先端は密に測定。横断的には主流線上1地点。横断的に濃度変化が大きい場合は複数地点。鉛直方向は濃度変化の大きい河口付近や塩水遡上先端は密に測定。	塩分濃度分布と同様。	塩分濃度と同時に濁度の分布を測定するため、多項目水質計の利用が考えられる。（現地調査手法の「多項目水質計による計測」(p調査-7)参照)
底質（酸素消費に係る有機汚濁、硫化物等）*2	貧酸素水塊の形成	感潮区間内、縦断方向 1km 間隔程度。	数年に1回春夏秋冬各1回	弱混合で塩水くさびが生じやすく、感潮区間の長い河川で行う。 底質調査を行う時は必ず溶存酸素濃度分布の調査も同時に行うこと
ハビタットの状況*3	ハビタットの把握（植生、地形、河床材料等）	地形、河床材料や植生について細かく調査することが望ましく、浅場に広がるアマモ場、砂嘴の背後に発達する湿地、小水路の合流点やその澁などの特徴的な場などを調査対象とする。	数年に1回程度、及び河床が大きく変化するような大規模な洪水の後。	水辺の国勢調査等生物調査と同時に行う。 ハビタットは生物によって非常に小さなスケールの場合がある。このため、当該区域の着目種などを考慮し、地形、河床材料や植生についても細かく調査することが望ましい。
生物（動植物）*3	生物生息状況	感潮区域内、河口海域及びその周辺 河床材料の変化を目安に選定する。	春夏秋冬	河川水辺の国勢調査等
生物（底生生物）*3	生物生息状況	感潮区域内、河口海域及びその周辺 河床材料の変化を目安に選定する。 横断方向左右岸（有れば中州も）について、潮上帯、潮間帯の上端付近、中間付近、下端付近、垂潮間帯の中央、河床最深部	春夏秋冬	汽水域は環境傾度が大きいことから、通常の河川区間よりも密に行う必要がある。



* 1 塩分、水温、溶存酸素、濁度を同時に測定するなど効率的な調査を行う。

* 2 貧酸素水塊や濁質の凝集沈殿現象を生じやすい泥・砂河川で行う。

* 3 アミカケはこの手引き作成における環境に関する保全対象を把握するための調査

表 3.4 - 2 汽水域の現象と一次判定のための現地調査項目との関係

現況把握のための調査														
現象	調査項目													
	河道縦横断面形状	河床材料	河口水位	流量	潮位	波浪	風向・風速	塩分濃度分布	溶存酸素濃度分布	濁度分布	底質	ハビタットの状況	生物(動植物)	生物(底生生物)
塩水遡上														
貧酸素水塊の形成														
河床・河岸・河岸干潟の形成														
河口地形・河口干潟の形成														

一次判定のための調査														
現象 (レスポンス)	分析手法													
	河道縦横断面形状	河床材料	河口水位	流量	潮位	波浪	風向・風速	塩分濃度分布	溶存酸素濃度分布	濁度分布	底質	ハビタットの状況	生物(動植物)	生物(底生生物)
4.3.1 河道の掘削によるレスポンスの調査・分析														
4.3.1.1 塩分上昇														
4.3.1.2 河道底層の貧酸素化														
4.3.1.3 河床表層の細粒化														
4.3.1.4 河岸粗粒化、河岸侵食、河岸干潟の侵食														
4.3.1.5 河床構成材料の細粒化														
4.3.1.6 周辺汀線の後退、河口砂州(テラス)の縮小・後退														
4.3.2 河口導流堤の建設によるレスポンスの調査・分析														
4.3.2.1 河岸粗粒化、河岸侵食、河岸干潟の侵食、周辺汀線の変化														
4.3.3 河口部の埋め立てによるレスポンスの調査・分析														
4.3.3.1 河岸干潟の細粒化、河岸干潟の侵食														
4.3.3.2 塩水くさびの下流側への移動														
4.3.3.3 埋め立て区間の河床上昇														
4.3.4 河口域での海砂採取によるレスポンスの調査・分析														
4.3.4.1 河口砂州の縮小・後退、砂州高の変化														
4.3.4.2 河口干潟の減少														
4.3.4.3 貧酸素水塊の湧昇・河道への移動														
4.3.5 橋梁の建設によるレスポンスの調査・分析														
4.3.5.1 橋梁上流の河岸干潟の細粒化、粗粒化・侵食														

注1)「底質」の調査は河床の材料調査に加えて必要に応じて、溶存酸素の調査と同様の測定位置について行う。

(2) 基礎データのとりまとめ

汽水域の物理・化学的環境とその周辺の動植物の生息・生育状況等については、現況の人為的改変による生物への影響を把握する上で重要な情報である。従って取得された情報を理解しやすくするため、図 3.4 - 1 ~ 図 3.4 - 6 に例示するようなまとめ方を参考として、とりまとめておくことが重要である。

<例1：風向、波浪の状況と河口部の地形の状況を整理した例>

河岸・河岸干潟、河口砂州の形成において波向と河口地形の関係を知ることは重要である。年間或いは季節別に波向分布図を描き河口地形と比較することで、汀線の形成過程や人為的改変を加えた場合のレスポンス発生の可能性を推察することができる。

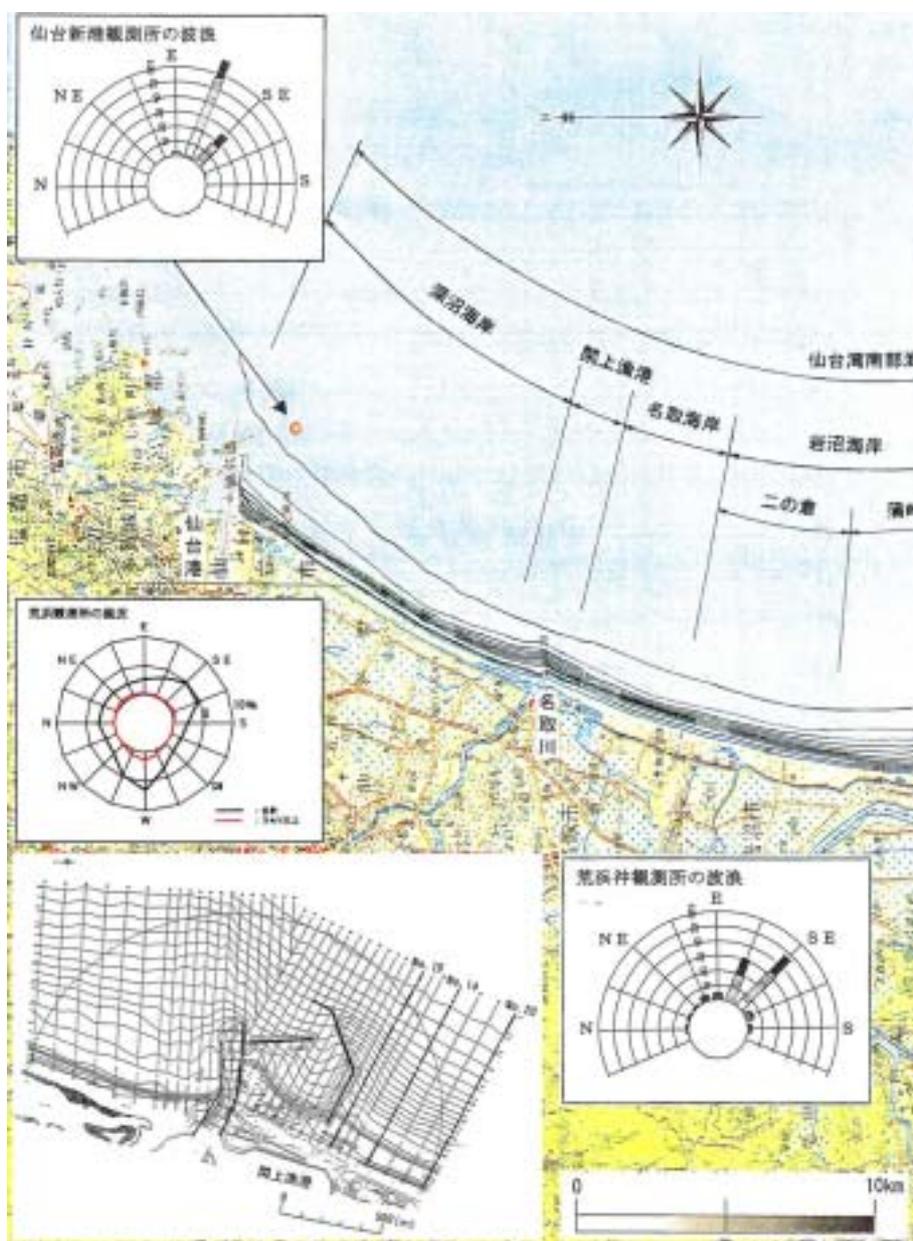


図 3.4 - 1 風向、波浪の状況と河口部の地形の状況を整理した例

出典：仙台湾沿岸技術調査委員会報告書（平成 12 年 10 月、建設省東北地方建設局 宮城県土木部）

<例2：塩素イオン濃度、溶存酸素濃度の縦断分布図を作成した例>

塩水くさびの侵入により淡塩界面における酸素の交換が少なくなると底層で溶存酸素が不足し、貧酸素水塊を形成しやすくなる。

塩水くさびは潮汐や河道の流量により変動するため、潮位変動と汽水域における塩素イオン濃度、溶存酸素(DO)濃度の状況を時系列的に整理しておくことで貧酸素水塊の発生を予察することもできる。

図3.4-2は時間毎の塩素イオン濃度および溶存酸素(DO)濃度の縦断分布をアニメーション表示したもののうち、8月19日4時(下段図内の赤点)の状況を示したものである。

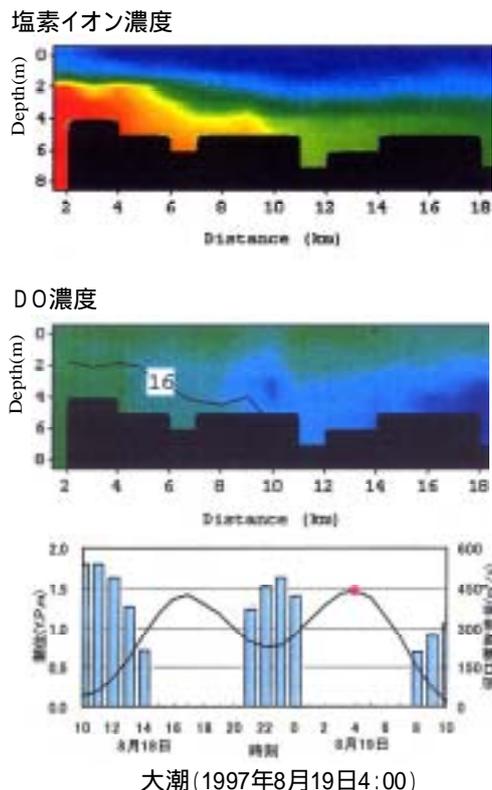


図 3.4 - 2 塩素イオン濃度、溶存酸素濃度の縦断分布図を作成した例
出典：利根下流河川事務所提供資料

<例3：水位、塩化物濃度、浮遊性物質濃度の経時的变化図を作成した例>

潮汐による塩水遡上によって河床の細粒分がまき上げられ高濁度水塊を形成する。例えば潮位、塩分濃度、濁度の変化を時系列に比較することで大潮の時に高濁度水塊が発生している状況を把握できる。

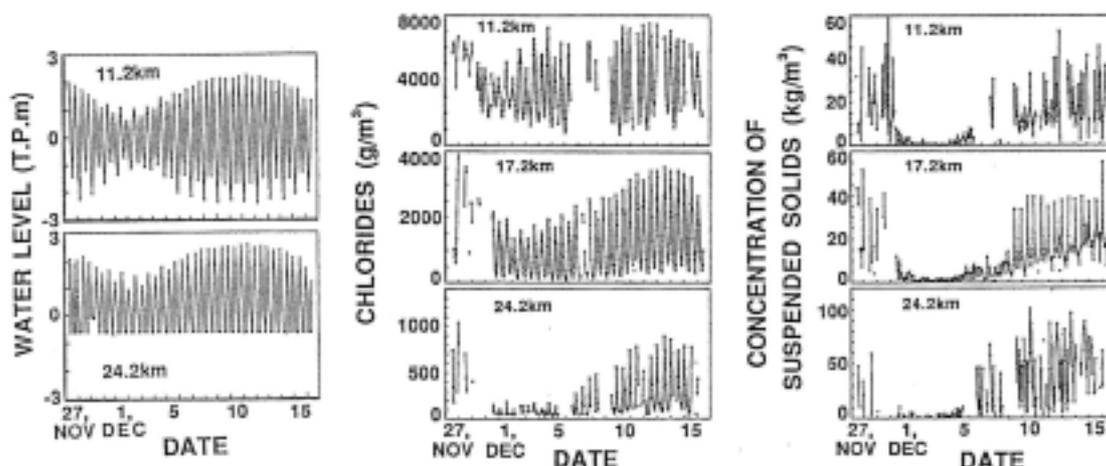


図 3.4 - 3 水位、塩化物濃度、浮遊性物質濃度の経時的变化図を作成した例
出典：強混合河川六角川感潮部における懸濁物質濃度の変動特性(土木学会論文集 452 二渡了 他)

<例4：生物の生息・生育環境と生物の分布を重ね合わせた例>

生物の生息・生育範囲や必要な環境を推察するために、汽水域の浅場に広がる植生帯、砂嘴の背後に発達する湿地、小水路の合流点やその滯などの生物の生息・生育環境と生物の分布を縦・横断的、平面的に重ね合わせることで有効である。図 3.4 - 4 は汽水域における横断的・平面的なハビタットと生物の分布を重ね合わせた例である。河川管理区域に限定せず、図 3.4 - 5 に示すように河口周辺や堤内地における状況を合わせて把握しておくが良い。

また図 3.4 - 6 は河床勾配や河床材料などの基盤環境や水生生物・陸域生物などの分布を並列してとりまとめることにより、汽水域の生物の生育・生息環境の縦断的な類型区分を行った例である。

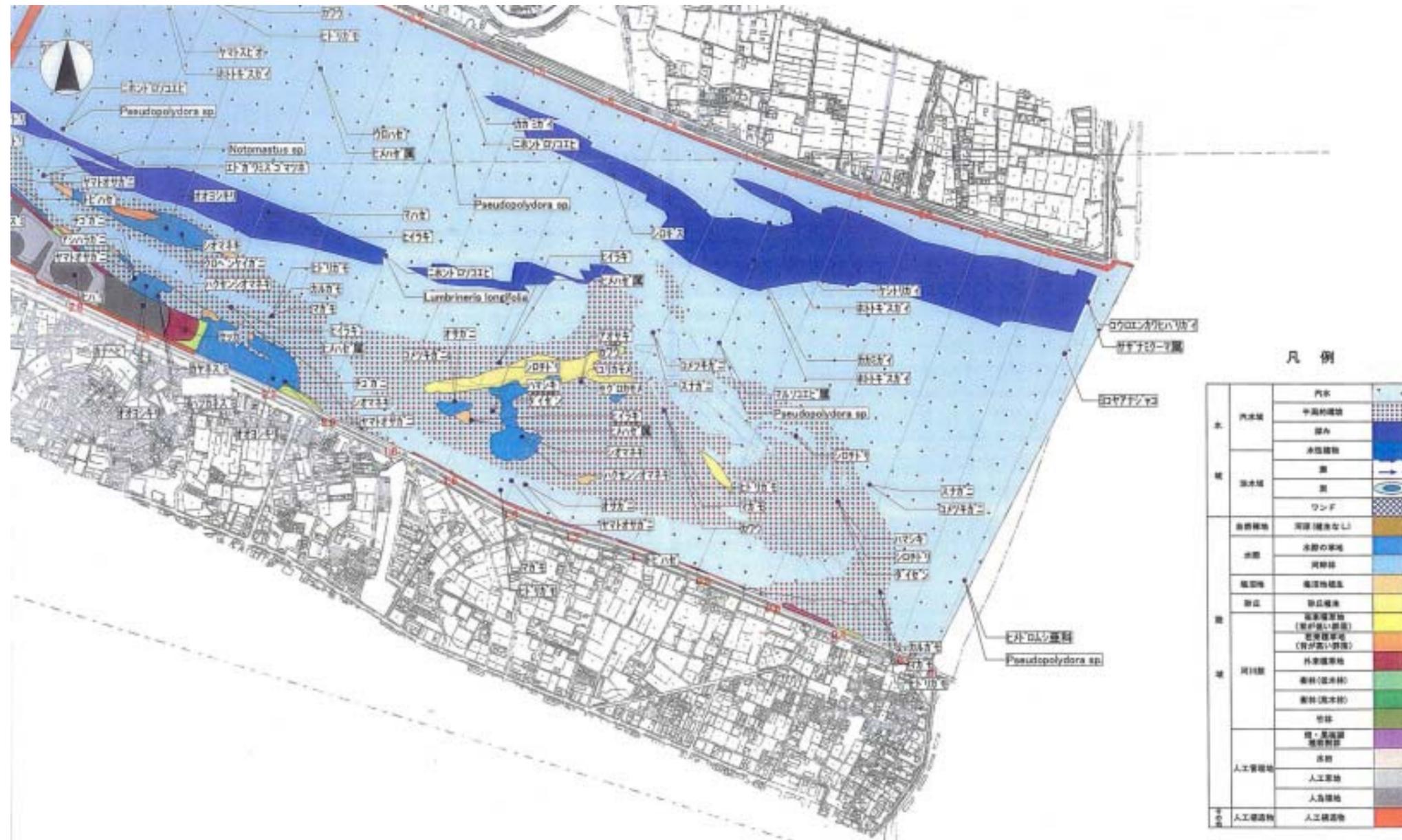
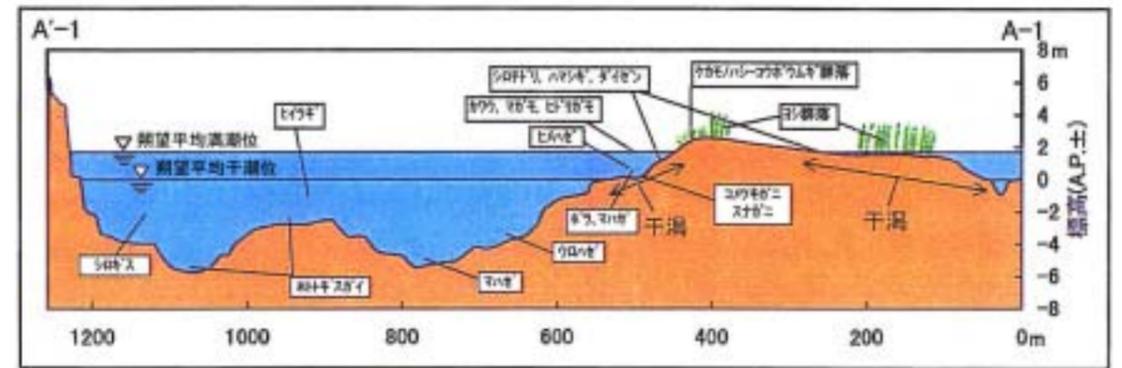


図 3.4 - 4 詳細な地形や河床材料と生物の生息・生育分布を重ね合わせた例（吉野川の例）
出典：平成 12 年度吉野川下流域環境影響調査検討業務委託報告書（H13.3）

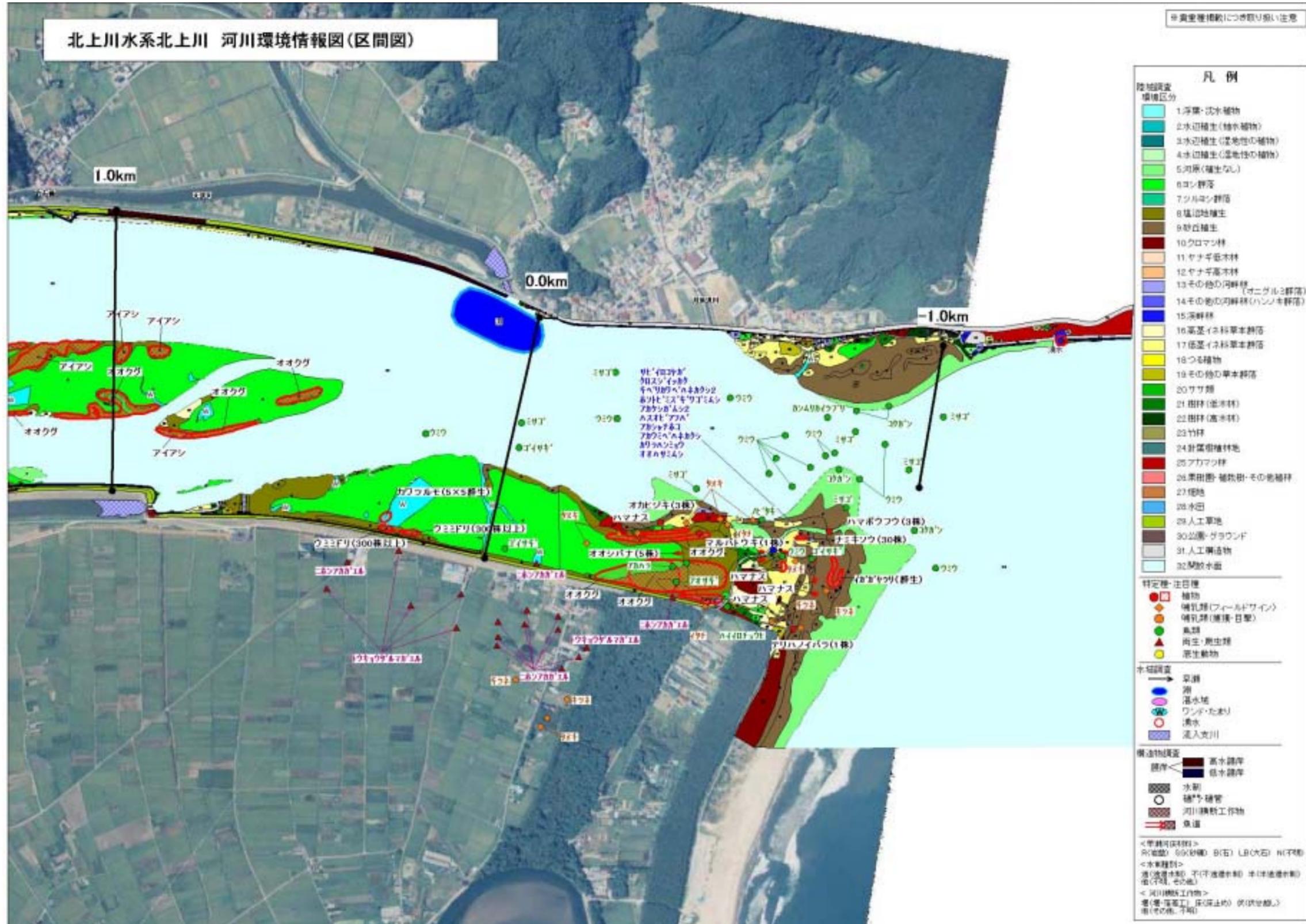


図 3.4 - 5 詳細な地形や河床材料と生物の生息・生育分布を重ね合わせた例(北上川の例)

出典：平成 14 年度北上川水系河川水辺総括資料作成業務報告書

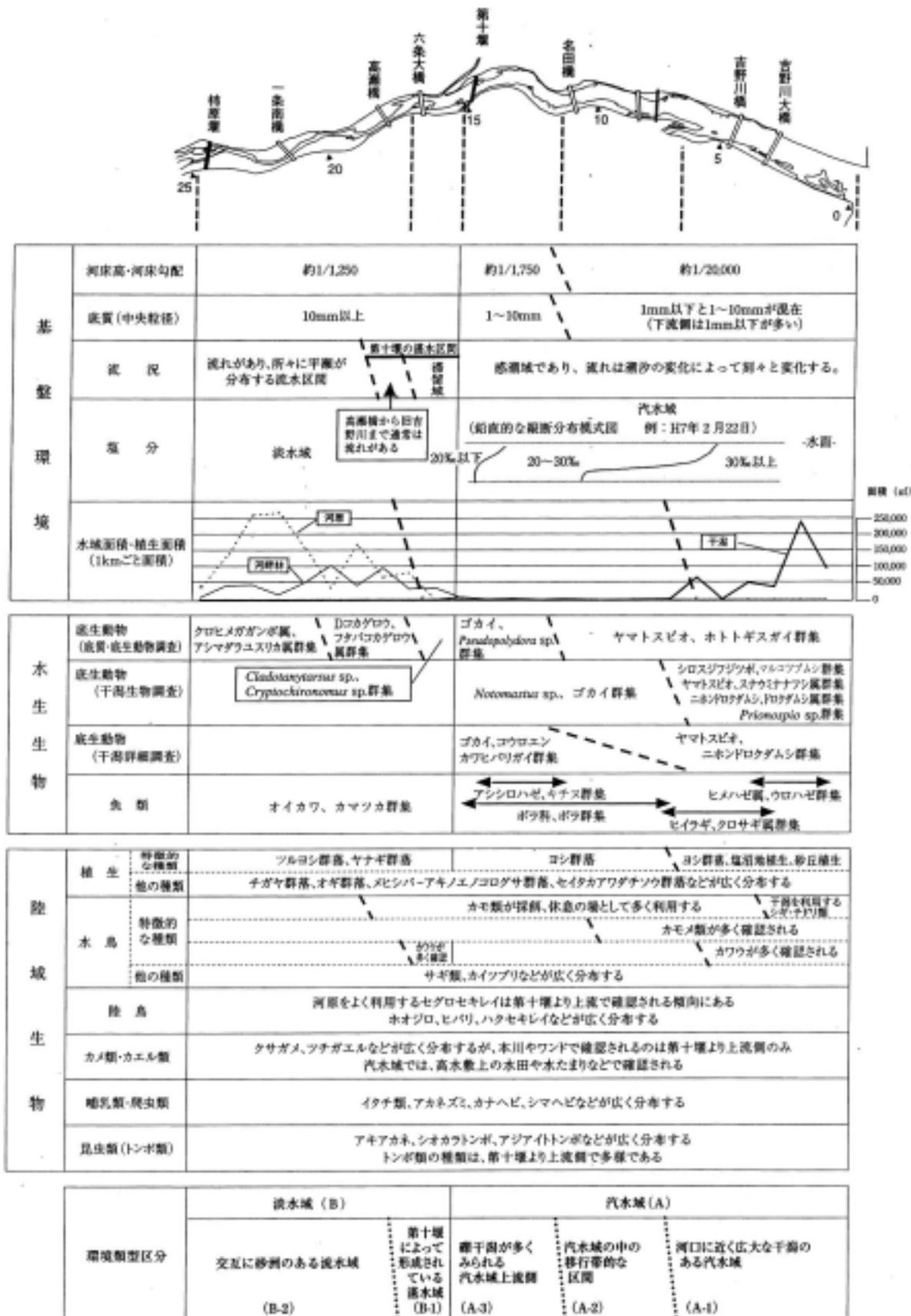


図 3.4 - 6 生息・生息基盤環境と生物群集による環境類型を区分して表した例(吉野川)
出典：平成12年度吉野川下流域環境影響調査検討業務委託報告書(H13.3)

第4章 調査・分析手法

4.1 調査・分析手順

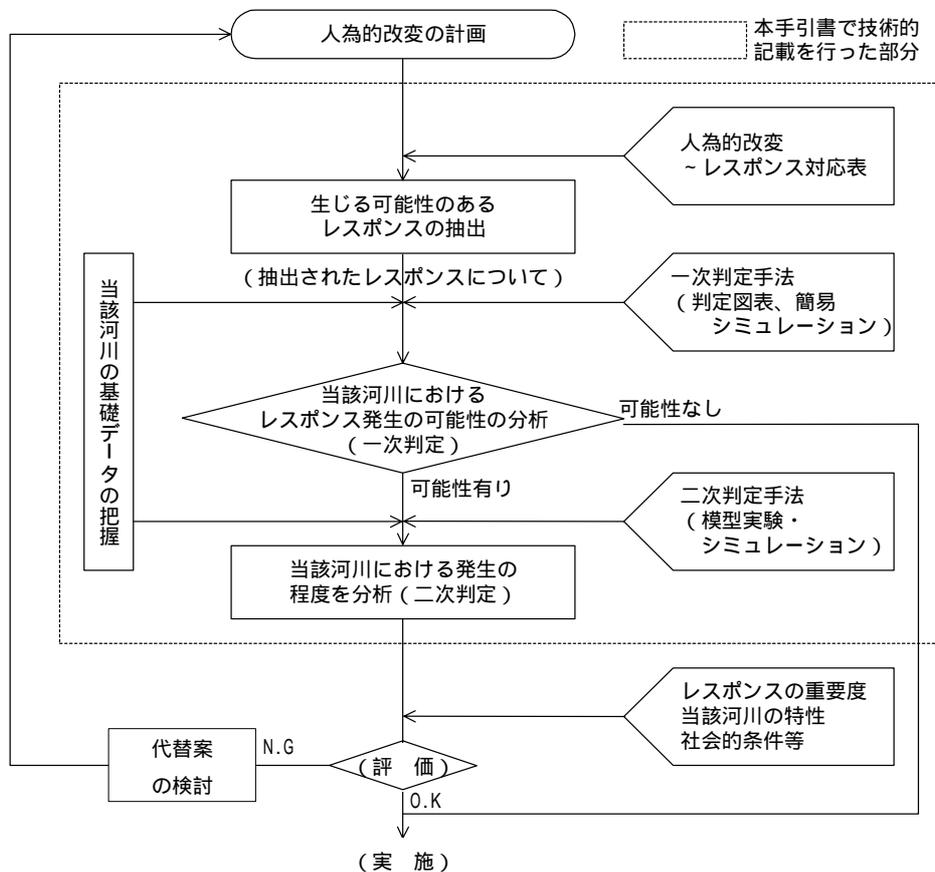
人為的改変による物理・化学的現象の調査・分析は、次の手順で行う。

- 1) 人為的改変によって生じる可能性のあるレスポンスを抽出する。
- 2) 抽出されたレスポンスについて、当該河川での発生の可能性を、定性的に判定する（一次判定）。
- 3) レスポンスを発生する可能性がある場合にはシミュレーション等により定量的に予測する（二次判定）。

なお、汽水域の現状把握や一次判定に資する上で、当該河川の基礎的なデータを把握しておく必要がある。

< 解説 >

汽水域の物理・化学的環境は、川と海の微妙な釣り合いのもとに多様なものとなっている。そこで、人為的改変が与えられた場合の物理・化学的現象を把握する上で、データの収集が極めて重要になる。先ずその人為的改変によって生じる可能性のあるレスポンスを抽出する。次に抽出されたレスポンスについて、当該河川で発生する可能性の有無を判定図表や簡易シミュレーションなどを用いて判断する。この時、過去の事例を参考にすることも重要である。レスポンスを生じる可能性有り判断された場合には、シミュレーションモデル等による変化の予測を行い、結果を評価する。そして評価の結果、必要に応じて代替案等の検討を行う。



4.2 生じる可能性のあるレスポンスの抽出

汽水域に人為的改変が与えられた場合のレスポンスを、表 4.2 - 1 などを参考として抽出する。

< 解説 >

人為的改変により考えられるレスポンスを、表 4.2 - 1 の で示す。

表 4.2 - 1 人為的改変とレスポンスの関連度の状況

関連があると考えられるもの

レスポンス 人為的改変	塩分上昇	河道底層の貧酸素化	河床表層の細粒化	河岸粗粒化	河床構成材料の細粒化	周辺汀線の後退	周辺汀線の変化	河口砂州（テラス）の縮小・後退	河岸干潟の細粒化	河岸侵食	河岸干潟の侵食	河口干潟の減少	塩水くさびの下流側への移動	埋め立て区間の河床上昇	砂州高の変化	貧酸素水塊の湧昇・河道への移動	橋梁上流の河岸干潟の細粒化	橋梁上流の河岸干潟の粗粒化・侵食
河道の掘削																		
泥・砂河川																		
砂利河川																		
河口導流堤の建設																		
河口部の埋め立て																		
河口域での海砂採取																		
橋梁の建設																		

4.3 抽出された人為的改変～レスポンスの調査・分析手法

4.2 に抽出されたレスポンスを対象に、4.3.1～4.3.5 に示す個別の調査・分析手法を参考とし、現象の把握を行う。

なお、人為的改変による地形の改変等直接の影響は、対象外とした。

< 解説 >

以下、4.3.1～4.3.5 には、本手引書で取り扱う人為的改変～レスポンス毎に以下のものを示した。

(1) 人為的改変によるレスポンス

人為的改変によるレスポンスの連関

(2) 一次判定手法

当該河川におけるレスポンスの発生の可能性をおおまかに推定する方法

(3) 二次判定手法

レスポンスによる問題発生が懸念される場合の定量的な分析手法

(4) 二次判定のための調査手法

分析・評価のために、後述する基礎データの調査に加えて行う必要のある調査

4.3.1～4.3.5 は人為的改変とそのレスポンスの連関毎に個別の手法等を記しており、次のように構成している。

4.3.1 河道の掘削によるレスポンスの調査・分析

4.3.1.1 塩分上昇

4.3.1.2 河道底層の貧酸素化

4.3.1.3 河床表層の細粒化

4.3.1.4 河岸粗粒化、河岸侵食、河岸干潟の侵食

4.3.1.5 河床構成材料の細粒化

4.3.1.6 周辺汀線の後退、河口砂州（テラス）の縮小・後退

4.3.2 河口導流堤の建設によるレスポンスの調査・分析

4.3.2.1 河岸粗粒化、河岸侵食、河岸干潟の侵食、周辺汀線の変化

4.3.3 河口部の埋め立てによるレスポンスの調査・分析

4.3.3.1 河岸干潟の細粒化、河岸干潟の侵食

4.3.3.2 塩水くさびの下流側への移動

4.3.3.3 埋め立て区間の河床上昇

4.3.4 河口域での海砂採取によるレスポンスの調査・分析

4.3.4.1 河口砂州の縮小・後退、砂州高の変化

4.3.4.2 河口干潟の減少

4.3.4.3 貧酸素水塊の湧昇・河道への移動

4.3.5 橋梁の建設によるレスポンスの調査・分析

4.3.5.1 橋梁上流の河岸干潟の細粒化、粗粒化・侵食

4.3.1 河道の掘削によるレスポンスの調査・分析

4.3.1.1 塩分上昇

基礎データの塩分濃度分布を用いて混合形態を判断し、各混合形態に応じた簡易な手法により塩水くさびの長さや塩分濃度縦断分布を予測する。そして次のような事象が予想される場合は、二次判定により塩分濃度分布を予測し、予測結果と取水口位置或いは淡水性生物の生息・生育域を重ね合わせることで塩分上昇による問題発生の有無を判断する。

- ・ 塩分遡上区間長が大幅に伸びる可能性がある場合
- ・ 塩分遡上区間の延伸部分に取水口がある場合
- ・ 塩分遡上区間の延伸部分に淡水性生物の重要な生息・生育環境がある場合

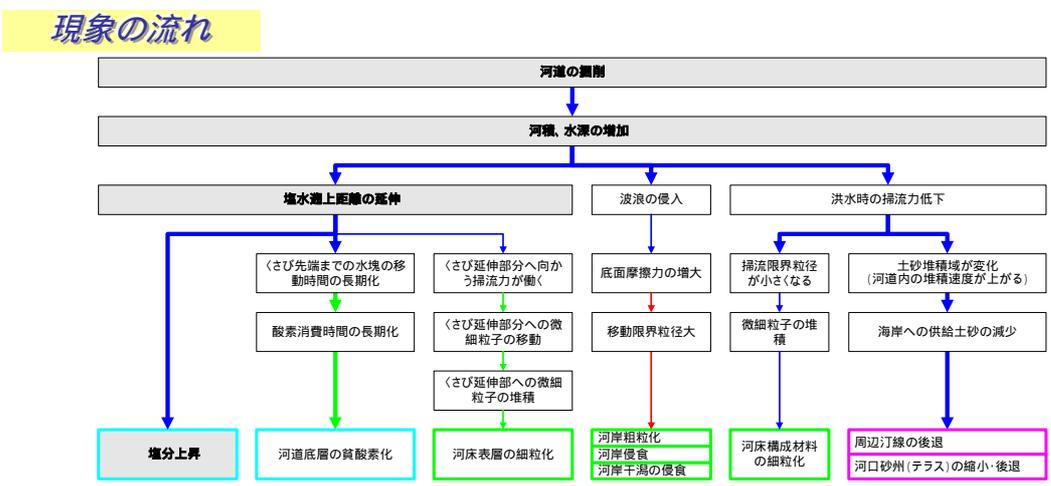
(1) 人為的改変によるレスポンス

汽水域において、河道掘削を行うと、河積や水深が増し、海水が侵入しやすくなる。特に河床掘削を行う場合に、河口砂州や河床の盛り上がり（マウンド）を取り払うと、塩水遡上距離が大きく伸びることがあるので注意が必要である。砂利河川では、河口砂州により上流側は淡水域となっている場合もあり、河口砂州をとり除くと海水が侵入して塩水化する可能性がある。

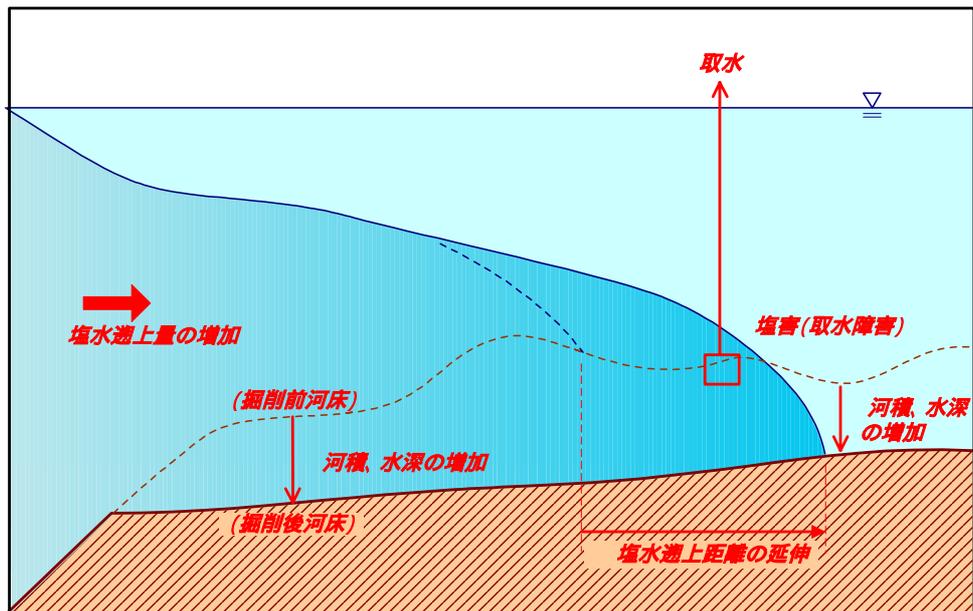
人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

- 河口部の河道掘削により河積および水深が増加する
- 塩水遡上量が増加するとともに、塩水遡上距離が伸びる
- 河道掘削によるタイダルプリズム（河口における平均満潮時と平均干潮時の河積（河水の全容積）の差）の増加により河道内への塩水侵入量が増加する。このため、弱混合、緩混合の河川では塩水くさびが上流に向かって伸びることとなる。
- 塩分が上昇する
- 塩水遡上距離が伸びると淡水の量に対する海水の量が増え、塩分が上昇する。なお、塩害（取水障害）は、塩水の遡上する区間に取水口が設けられている場合や、淡水性生物の重要な生息・生育環境がある場合に生じる問題であり、河口部や汽水域に取水口が設置されていたり、周辺に田畑がひろがっている河川での河道掘削には注意が必要である。

図 4.3.1.1 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。



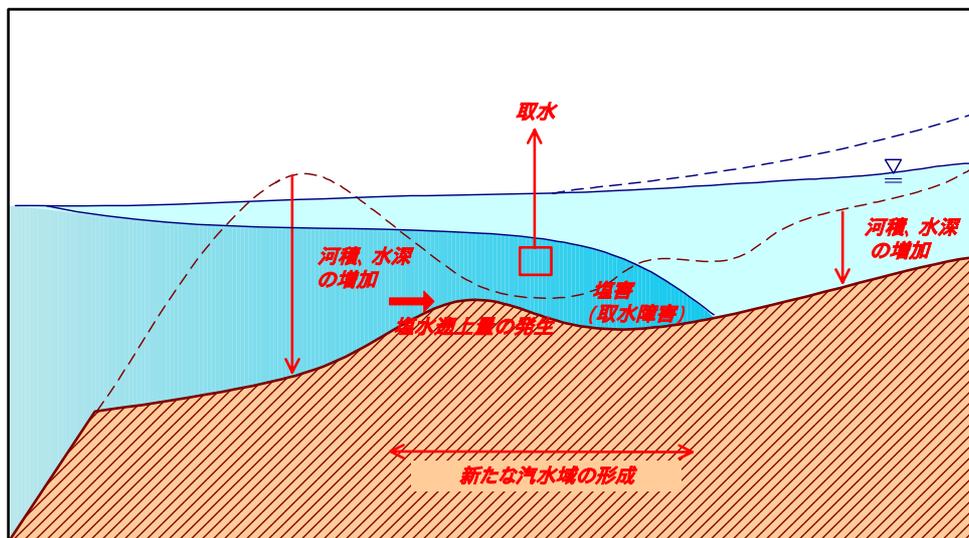
現象のイメージ図 (泥・砂河川の場合)



【備考】

- ・上図は弱～緩混合のイメージ図である。
- ・強混合の場合もタイダルプリズムが増大し、塩水遡上距離は伸びるが、その程度は小さい。

現象のイメージ図 (砂利河川の場合)



【備考】

- ・上図は弱～緩混合のイメージ図である。
- ・強混合の場合もタイダルプリズムが増大し、塩水遡上距離は伸びる。

図 4.3.1.1 - 1 現象の流れとイメージ

(2) 一次判定手法

基礎データの塩分濃度分布を用いて当該河川における混合形態を判断し、各混合形態に応じた以下に示す簡易な手法により塩水くさびの長さや塩分濃度縦断分布を予測する。そして次のような事象が予想される場合は、二次判定を行う。

- 塩分遡上区間長が大幅に伸びる可能性がある場合
- 塩分遡上区間の延伸部分に取水口がある場合
- 塩分遡上区間の延伸部分に淡水性生物の重要な生息・生育環境がある場合

1) 混合形態の判断

汽水域の混合形態は、大きく弱、緩、強混合の3つに分けることができる。

- 弱混合型の河川では、塩水が河川中にくさび状に長く侵入することが多い。取水や生物への影響を分析する場合、塩水くさびの長さや形状を求めることが重要である。
- 強混合型の場合は、上下層の混合が強いため、鉛直方向の塩分濃度勾配は小さく、縦断方向の勾配が顕著である。このような河川では縦断方向の塩分濃度分布を求めることが重要である。
- 緩混合は、これらの中間的な混合形態であり、縦断方向と鉛直方向の塩分濃度分布を求めることが重要である。

混合形態は図 4.3.1.1 - 2 のような方法で判断することができる。

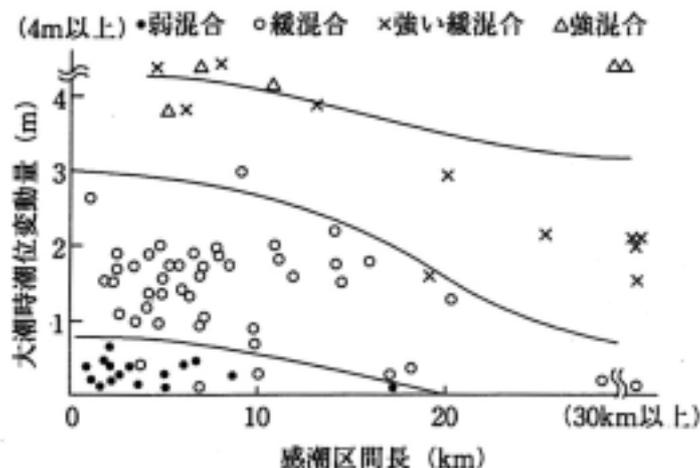


図 4.3.1.1 - 2 混合形態の区分(例)

出典:水理公式集 平成 11 年版 土木学会

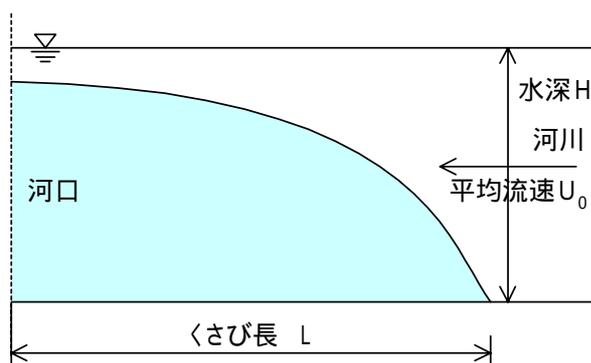
2) 塩水くさびの長さ、塩分濃度の簡易予測

弱混合型の河川の場合（淡塩二層流計算）

弱混合型の河川でみられる塩水くさびの長さを推定する方法として、次式がある。

$$\text{くさびの長さ} : L = \frac{H}{2\bar{f}_i} \left(\frac{1}{5} F_{d0}^{-2} - 2 + 3F_{d0}^{2/3} - \frac{6}{5} F_{d0}^{4/3} \right)$$

ここに、 $F_{d0} = U_0 / \sqrt{\varepsilon g H}$ 、 $\varepsilon = (\rho_1 - \rho_0) / \rho_1$: 相対密度差、 ρ_0 : 淡水密度、 ρ_1 : 海水密度、 H : くさび先端の全水深、 \bar{f}_i : くさびに沿う平均の界面抵抗係数、 U_0 : くさび先端の平均流速である。



上式は、幅、水深ともに一樣な長方形水路の場合の定常なくさび長を与える解であり、実現象に適合しない場合が多いが、河床掘削や河道拡幅により H や U_0 が変化することによるくさび長の変化を概略把握することが可能である。

強混合型の河川の場合（一次元分散方程式）

（水理公式集〔平成 11 年版〕土木学会 P.558 参照）

強混合型の河川の塩分濃度縦断分布を簡易に推定する方法として、一次元移流分散方程式に基づく次式の解析解がある。

$$S/S_0 = \exp\{F(1 - 1/X)\}$$

ここに、 S : X の位置における塩分、 S_0 : 河口部の塩分、 $F = Uh^2 / 2\beta\eta_0^2 L\sigma$: フラッシング数、 U : 平均流速、 h : 水深、 η_0 : 潮位振幅、 L : 混合域の距離、 σ : 潮位の角周波数、 $\beta = K_x / 2\xi_0 u_0$: 定数、 K_x : 水平渦動拡散係数、 $2\xi_0$: 潮位変動による流程、 u_0 : 潮流の最大流速、 $X = x/L$ 、 x : 混合開始上流端から下流向きに取った座標。

緩混合型の河川の場合（鉛直二次元密度流拡散計算）

緩混合型の塩分濃度分布を簡易に求めるのは難しいが、ある濃度の等値線（濃度勾配が急変する値）を塩水くさびと仮定して、と同様の方法で、その形状を推定することが考えられる。

(3) 二次判定手法

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.1.1 - 1 に示す変化を表 4.3.1.1 - 1 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

現況河道及び掘削河道を設定し、その断面特性(水位(H)～流積(A)～径深(R)～水面幅(B))を求める。これを混合形態に基づき選択したシミュレーションモデルに与えて塩水くさびの形状や塩分濃度分布を予測する。

予測結果と取水口位置或いは、淡水性生物の生息・生育域を重ね合わせることで塩分上昇による問題発生の有無を判断する。

2) 予測条件

流況条件は、平均的な流況及び塩水遡上を生じやすい濁水時の流況を含むことを基本とする。また、当該河川の維持流量の条件での塩水遡上の変化を把握することも重要である。

潮位条件は、年間のうち、平均潮位が高い夏期の半月周潮の潮位を与えることが基本であるが、塩害の対象が農業用水である場合など、季節的条件を考慮することも考えられる。

コラム 8 : 塩分上昇の生じやすい河川

塩分上昇の問題を生じやすい河川は、塩水くさびが形成されやすい弱混合～緩混合で感潮区間の長い河川と考えられる。下図は平成15年度に行った一級水系へのアンケート結果により塩分上昇による問題発生の有無を図 4.3.1.1 - 2 を参考に散布図に示したものである。同図に見られるように潮位差が 2.5m 程度以下と比較的小さく感潮区間が 2km 程度以上と長い河川で塩分上昇による問題を生じている。

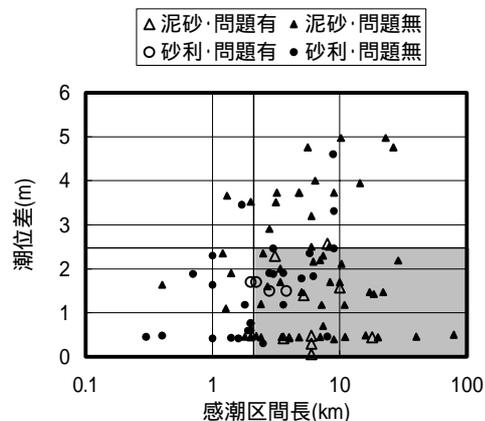


表 4.3.1.1 - 1 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
河口部の河道掘削により河積および水深が増加する	・河川縦横断形状	【断面特性の算定】 各河道横断面の H-A-R-B の算定	
塩水遡上量が増加するとともに、塩水遡上距離が延伸する	・流量 ・潮位 ・水位 ・流速鉛直縦断分布 ・塩分鉛直縦断分布	【塩水遡上量、遡上距離】 塩分くさび形状、塩分濃度分布の予測 (弱混合)淡塩二層流計算 (弱～緩混合)鉛直二次元密度流拡散計算*1 (強混合)一次元分散方程式	(弱混合)淡塩二層流計算：計算手法は概ね確立されている。 (弱～緩混合)鉛直二次元密度流拡散計算：塩淡界面付近の混合の表現に技術的課題がある。 (強混合)一次元分散方程式：計算手法は概ね確立されている。
塩水が取水位置や淡水性生物の生息・生育域まで達すると、塩分上昇による問題を生じる	・取水位置の塩分濃度	-	淡塩二層流計算は塩水くさび形状は求められるが、塩分濃度は計算しないため、くさび位置から問題発生の有無を判定する必要がある。

*1 干潟における生物の生息・生育環境に着目する場合など、河道横断方向の塩分濃度分布を求めたい場合に、三次元モデルによる予測も試みられている。(例えば、「3次元塩水遡上解析モデルの開発と紀の川汽水域環境への適用」水工学論文集第47巻 北山和典 他)

(4) 二次判定のための調査手法

1) 流速鉛直縦断分布*

目的：シミュレーションモデルの検証

調査地点：縦断方向は、塩水遡上距離及びその変動状況に応じて設定(5～15点程度)

水深方向は、1～2m 程度の間隔とし、濃度変化の大きい河口付近、遡上先端では密にする。

調査時期：半月周期(約15日間)の塩水挙動を捉えるのが望ましい。

*汽水域においては潮汐により流向流速が時々刻々変化している。また上層と下層で流向が異なる場合もある。ADCP を用いることで短時間に多数の測点で流速を測定することが可能である。調査分析手法の「流向流速分布の計測」(p調査-8)

参照

4.3.1.2 河道底層の貧酸素化

基礎データの塩分濃度分布を用いて、混合形態を判断し、弱混合もしくは緩混合の河川である場合は、さらに溶存酸素濃度分布を確認する。塩水遡上端付近における溶存酸素濃度が低い場合には、二次判定として溶存酸素濃度分布を予測し、問題発生の有無を判断する。

(1) 人為的改変によるレスポンス

汽水域において、河道掘削を行うと、河積や水深が増し、海水が侵入しやすくなる。この時、弱混合～緩混合の混合形態では、塩水くさびが形成されて塩水層と淡水層との酸素の交換が少なくなり、底層や河床での酸素消費によって、貧酸素水塊が形成される場合がある。

なお、特に河床のマウンドを取り払うと、塩水遡上距離が大きく伸びることがあるので注意が必要である。

人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

河口部の河道掘削により河積および水深が増加する

塩水遡上量が増加するとともに、塩水遡上距離が伸びる

河道掘削によるタイダルプリズムの増加により河道内への塩水侵入量が増加する。このため、弱混合、緩混合の河川では塩水くさびが上流に向かって伸びることとなる。

塩水くさび先端までの水塊の移動時間が長期化する

塩水くさび境界付近では、海水の侵入と河川流による連行によって緩やかな循環流（エスチャーリー循環流）が形成され、塩水くさび先端の底層付近では上流に向かう流れが生じている。塩水遡上距離が伸びると塩水くさび先端までの水塊の移動時間が長くなる。

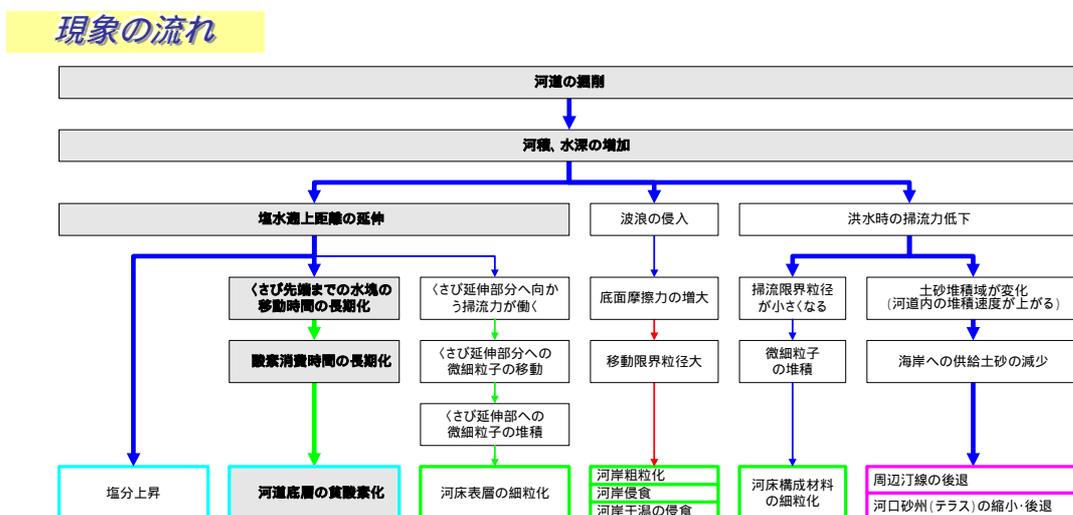
底層での酸素消費時間が長期化する

水塊中の溶存酸素は底層や河床の有機物の分解により消費される。底層に水塊が滞留することにより、酸素消費の行われる時間が長くなることになる。

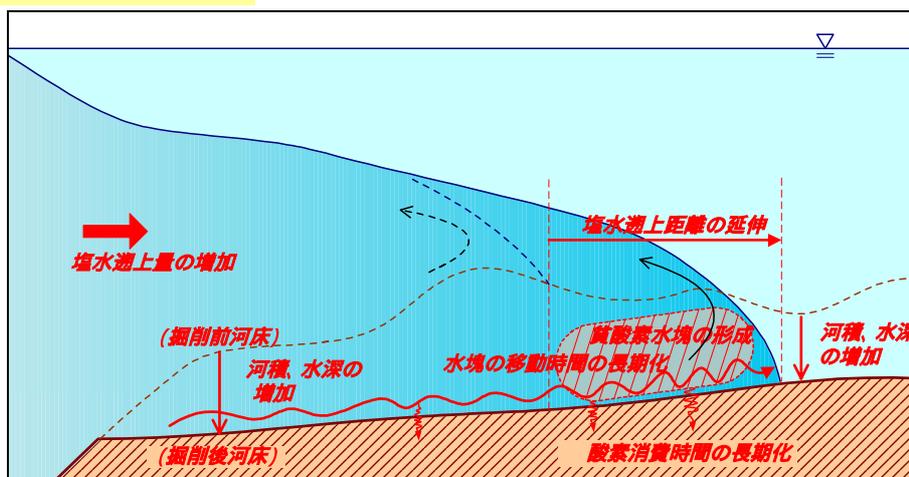
底層で貧酸素水塊が形成される

底層で水塊が滞留し、酸素消費が進むと、底層の溶存酸素が減少し、貧酸素水塊が形成される。

図 4.3.1.2 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。



現象のイメージ図



【備考】

- ・ 上図は平常時の弱混合型のイメージ図である。
- ・ 強混合の場合も微細粒子の堆積がある場合は、その堆積域が上流へ移動する可能性がある。
- ・ 懸濁態有機物等は微細粒子に吸着され移動、堆積する。

図 4.3.1.2 - 1 現象の流れ

(2) 一次判定手法

弱混合や緩混合の混合形態を有する（鉛直混合が比較的弱い）河川では、塩水くさびが形成されると底泥や水中に浮遊する有機物などが分解されることによって貧酸素水塊が形成される場合がある。貧酸素水塊は、塩水くさびの遡上距離が長く酸素消費の影響を受ける時間が長い河川や、都市河川等酸素消費物質である有機汚濁が多い河川等で形成されやすいと考えられる。そこで、基礎データの塩分濃度分布の観測値を用いて、当該河川における混合形態を判断する。弱混合ないしは緩混合の河川である場合は、さらに溶存酸素濃度分布を確認し、塩水遡上端付近における溶存酸素濃度の低下が見られるような場合は二次判定を行う。表 4.3.1.2 - 1 に魚類に関連する溶存酸素濃度を示す。

表 4.3.1.2 - 1 漁場の溶存酸素量臨界濃度

1. 魚類を死に至らしめる酸素濃度	
底生魚類の致死濃度	1.5 ml/l
甲殻類の致死濃度	2.5 ml/l
魚類・甲殻類に生理的变化を引き起こす臨界濃度	3.0 ml/l
貝類に生理的变化を引き起こす臨界濃度	2.5 ml/l
2. 貧酸素と底生生物の生理、生態的变化	
底生生物の生存可能な最低濃度	2.0 ml/l
底生生物の生息状況に変化を引き起こす臨界濃度	3.0 ml/l
3. 漁場形成と底層の酸素の濃度	
底生魚類の漁獲に悪影響を及ぼさない底層の貧酸素濃度	3.0 ml/l

* 出典：水産用水基準（1995年版）

(ml/l × 1.429 = mg/l)

図 4.3.1.2 - 2、図 4.3.1.2 - 3 には、塩分濃度と溶存酸素の分布を観測した事例を示した。このように塩水くさびが長い区間にわたって形成されると貧酸素化しやすくなる。

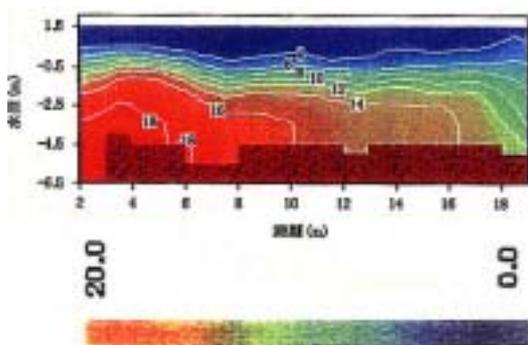


図 4.3.1.2 - 2 塩素イオン濃度
鉛直二次元分布の実測例 (単位 (%))

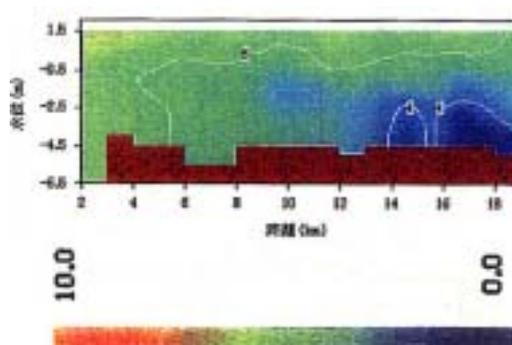


図 4.3.1.2 - 3 溶存酸素濃度
鉛直二次元分布の実測例 (単位 (mg/l))

(3) 二次判定手法

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.1.2 - 1 に示す変化を表 4.3.1.2 - 2 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

現況河道及び掘削河道を設定し、その断面特性 (水位 (H) ~ 流積 (A) ~ 径深 (R) ~ 水面幅 (B)) を求める。これを混合形態を基に選択したシミュレーションモデルに与えて塩水くさびの形状や塩分濃度分布を予測する。その際、くさび先端までの水塊の移動時間も求める。

溶存酸素の計算は、塩分濃度分布の計算と同様のシミュレーションモデルに水中や底泥による酸素消費項を加えて行う。

2) 予測条件

流況条件は、塩水くさびの攪拌が弱い渇水時の条件を基本とする。

潮位条件は、貧酸素水塊が形成されやすい夏期の半月周潮の潮位を与えることを基本とする。

また、水温に関わる条件も酸素消費が活発な高水温の条件 (夏期) を与える。

コラム 9 : 貧酸素水塊の生じやすい河川

貧酸素化による問題を生じやすい河川は、塩水くさびを生じやすい弱混合から緩混合で滞留時間の長くなる感潮区間の長い河川で、汚濁度合いの高い河川と考えられる。右図は平成 15 年度に行った一級水系へのアンケート結果により作成したものである。塩分上昇と同様に、潮位差が 2.5m 程度以下、感潮区間が 2km 程度以上の河川で貧酸素化による問題が生じている。

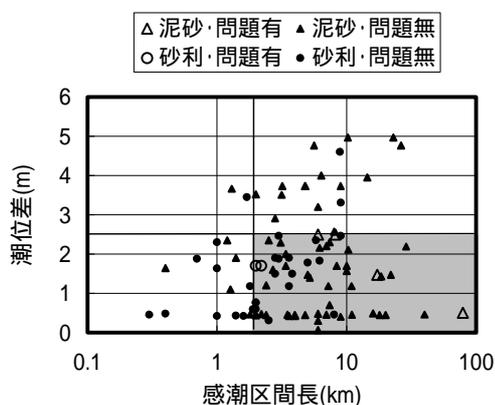


表 4.3.1.2 - 2 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
河口部の河道掘削により河積および水深が増加する	・河川縦横断形状	【断面特性の算定】 各河道横断面の H-A-R-B の算定	
塩水遡上量が増加するとともに、塩水遡上距離が延伸する	・流量 ・潮位 ・水位 ・塩分濃度の鉛直縦断分布	【塩水遡上量、遡上距離】 塩分くさび形状、塩分濃度分布の予測 (弱混合)淡塩二層流計算 (弱～緩混合)鉛直二次元密度流拡散計算	(弱混合)淡塩二層流計算：計算手法は概ね確立されている (弱～緩混合)鉛直二次元密度流拡散計算：塩淡界面付近の混合の表現に技術的課題がある。
河口の水がくさび先端に到達する時間が長くなる	・流速鉛直縦断分布	【水塊の移動時間】 上記、淡塩二層流計算、鉛直二次元密度流拡散計算の底層流速により予測	
底層での酸素消費時間が長期化する	・水中酸素消費速度 ・底泥酸素消費速度 ・溶存酸素鉛直縦断分布	【酸素消費時間】 鉛直二次元密度流拡散計算に溶存酸素収支項を付加して予測	酸素収支項：水中の有機物濃度の変化が顕著な場合は、有機物濃度の拡散計算も行い、これに応じた酸素消費速度を設定する必要がある。
底層で貧酸素水塊が形成される	・水中酸素消費速度 ・底泥酸素消費速度 ・溶存酸素鉛直縦断分布	【溶存酸素濃度分布】 同上	

(4) 二次判定のための調査手法

1) 流速鉛直縦断分布*

目的：シミュレーションモデルの検証

調査地点：縦断方向は、塩水遡上距離及びその変動状況に応じて設定(5～15点程度)

水深方向は、1～2m 程度の間隔とし、濃度変化の大きい河口付近、遡上先端では密にする。

調査時期：半月周期(約15日間)の塩水挙動を捉えるのが望ましい。

* 調査分析手法の「流向流速分布の計測」(p 調査 - 4) 参照

2) 底泥及び水中の酸素消費速度

目的：シミュレーションモデルの検証及び予測

調査地点：汽水域の中間地点及び塩水遡上端地点

4.3.1.3 河床表層の細粒化

基礎データの河床構成材料から判断して細砂ないし中砂が卓越する河川で、塩分濃度分布からみた混合形態が弱～緩混合の河川では、二次判定により微細粒子の移動・堆積状況を予測し、問題発生の有無を判断する。

(1) 人為的改変によるレスポンス

汽水域において、河道掘削を行うと、河積や水深が増し、海水が侵入しやすくなる。弱混合～緩混合の混合形態では塩水くさびが形成され、その周辺で緩やかな循環流（エスチャリー循環流）が生じている。この循環流により、河床表層においてくさび先端部へ向かう流れが発生し、微細粒子がくさび先端に向かって輸送されている。海水が侵入しやすくなると土粒子の輸送が増え、くさび先端付近での微細粒子の堆積すなわち河床表層の細粒化が生じやすくなる。また、くさびの先端が上流に移動しているため微細粒子の堆積域も移動する。

なお、河床掘削を行う場合に、マウンドを取り払うと、塩水遡上距離が大きく伸びることがあるので注意が必要である。

人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

河口部の河道掘削により河積および水深が増加する

塩水遡上量が増大するとともに、塩水遡上距離が伸びる

河道掘削によるタイダルリズムの増加により河道内への塩水侵入量が増加する。このため、弱混合、緩混合の河川では塩水くさびが上流に向かって伸びることとなる。

塩水くさびの先端に向かう掃流力が働く

塩水くさび周辺では、海水の侵入と河川流による連行によって緩やかな循環流（エスチャリー循環流）が形成されている。このため、塩水くさび内部の底層付近では上流に向かう流れが生じており、河床面には塩水くさび先端に向かう掃流力が作用している。

塩水くさびの延伸部分へ微細粒子が移動する

塩水くさび先端に向かう掃流力により微細粒子が塩水くさびの先端に向かって輸送される。微細粒子は、海水とともに海域から供給されるもの、河川から供給された微細な土粒子や有機物が汽水区間での塩分の作用により凝集沈殿したもの等がある。

延伸部分に微細粒子が堆積する

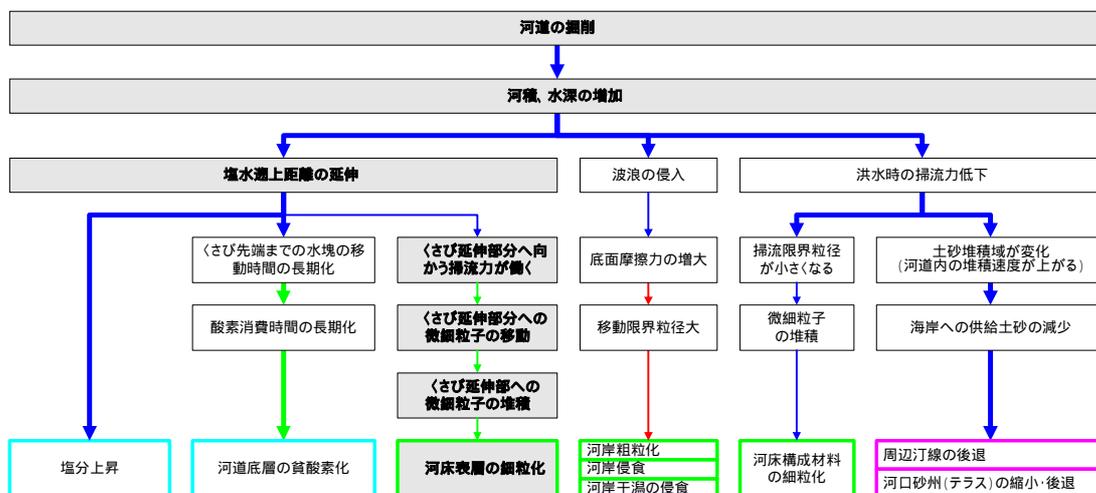
塩水くさびの先端は流れが最も停滞する空間であるため、塩水くさび内部を輸送されてきた微細粒子は、この空間に最も堆積しやすくなる。

河床表層が細粒化する

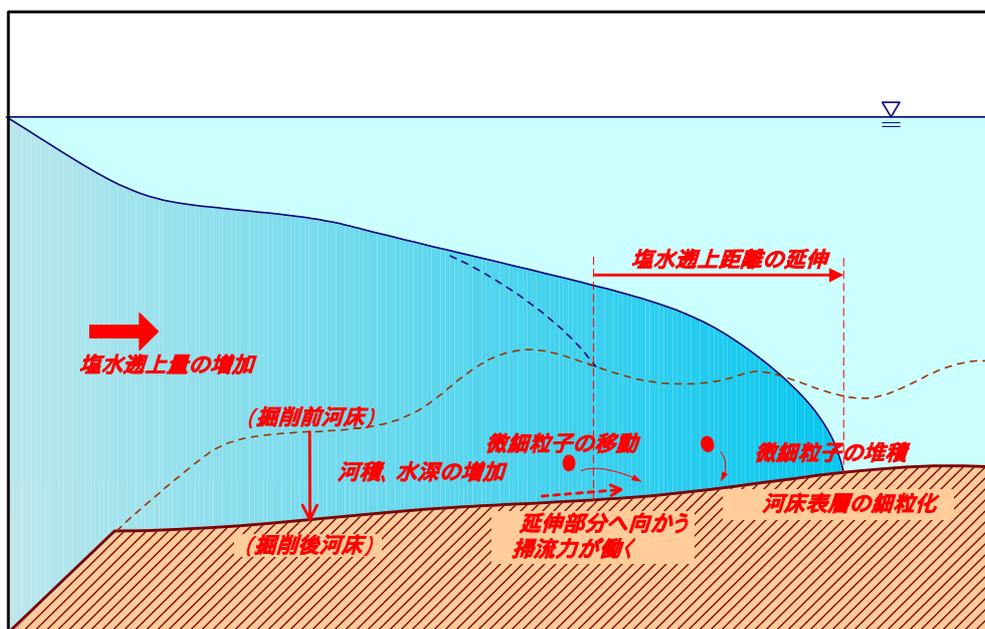
以上より、河道掘削によって、塩水くさびが延伸した区間は新たな微細粒子の堆積空間となり、河床表層の細粒化が見られるようになる。

図 4.3.1.3 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。

現象の流れ



現象のイメージ図



【備考】

- ・ 上図は平常時の弱混合型のイメージ図である。
- ・ 強混合の場合も微細粒子の堆積がある場合は、その堆積域が上流へ移動する可能性がある。
- ・ 懸濁態の有機物等は、微細粒子に吸着され移動し、堆積する。

図 4.3.1.3 - 1 現象の流れ

(2) 一次判定手法

一般に汽水域では、流速が小さく上流から運ばれた微細な土粒子が沈降堆積しやすい。また、微細粒子(土粒子、有機物)が塩水に触れることでフロック化し沈降しやすい。沈降した微細粒子は、エスチャリー循環による塩水くさび先端への流れにより、上流へ向けて輸送される。その結果、汽水域の上流端付近に微細粒子が集積しやすい。

河道の掘削により、上述の機構により塩水遡上端が上流に移動するとそれに伴って細粒分の堆積域も上流に移動する。図 4.3.1.3 - 2 は河道掘削により河床表層の細粒化が生じた例である。

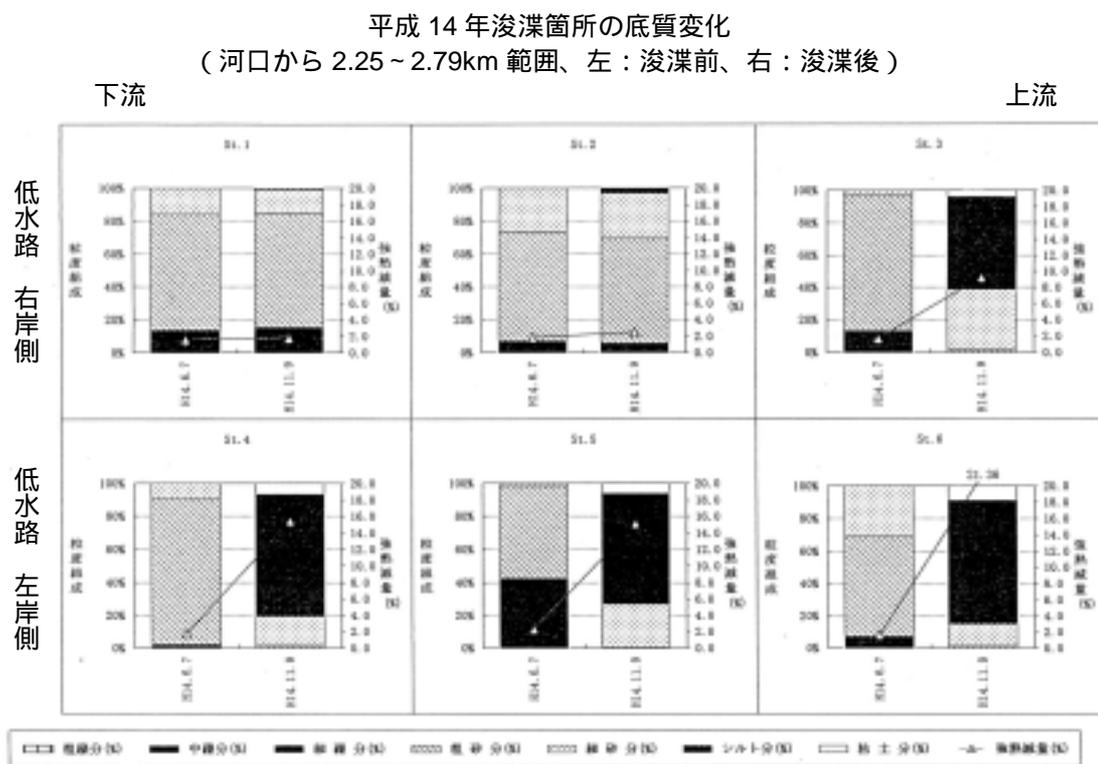


図 4.3.1.3 - 2 河床材料の細粒化調査事例(尻別川)

出典:平成 14 年度尻別川河川性状調査業務報告書(平成 15 年 3 月、(社)北海道栽培漁業振興公社)

一次判定は次のように行う。まず、基礎データの河床材料より細粒化の生じやすい細砂ないし中砂の卓越した河川であるか否かを判断する。さらに、塩分濃度分布より塩水くさびを生じやすい弱～緩混合の河川であるか否かを判断する。細砂ないし中砂の卓越する弱～緩混合の河川では二次判定を行う。

なお、そのような河川で実際に河口や海域に細粒分が堆積している河川、汚濁した河川や濁度の高い河川は、細粒化による問題を生じる可能性が高い。

(3) 二次判定手法

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.1.3 - 1 に示す変化を表 4.3.1.3 - 1 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

現況河道及び掘削河道を設定し、その断面特性(水位(H)～流積(A)～径深(R)～水面幅(B))を求める。これを選択したシミュレーションモデルに与えて塩水くさびの形状や塩分濃度分布を予測する。その際、河床に働く掃流力も求めておく。

微細粒子の移動・堆積は、粒子の巻き上げ、沈降、移流・拡散の計算により、各コントロールボリューム内の堆積量を求める。

2) 予測条件

流況条件は、平常時及び濁水時の流況を選ぶことが基本である。

潮位条件は、年間のうち、平均潮位が高い夏期の半月周潮の潮位を与える。

粒径の条件は、底質の粒径が一様に近ければ単一粒径として扱い、粒度分布に幅がある場合は、粒径帯別に代表粒径を設定し、それぞれの移動・堆積を計算する。また、河床表層の微細粒子堆積量等の初期条件については、平常時の安定な条件とする。

なお、微細粒子の移動・堆積現象の時間スケールを予め見積もるのは難しいため、シミュレーションによりこれらの現象がある程度動的な平衡状態に達するまでの計算時間を確保する。

表 4.3.1.3 - 1 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
河口部の河道掘削により河積および水深が増加する	・河川縦横断形状	【断面特性の算定】 各河道横断面の H-A-R-B の算定	
塩水遡上量が増加するとともに、塩水遡上距離が延伸する	・流量 ・潮位 ・水位 ・塩分鉛直縦断分布	【塩水遡上量、遡上距離】 塩分くさび形状、塩分濃度分布の予測 (弱混合)淡塩二層流計算 (弱～緩混合)鉛直二次元密度流拡散計算	(弱混合)淡塩二層流計算：計算手法は概ね確立されている (弱～緩混合)鉛直二次元密度流拡散計算：塩淡界面付近の混合の表現に技術的課題がある。
塩水くさびの延伸部分へ向かう掃流力が働く	・流量 ・潮位 ・水位 ・塩分鉛直縦断分布 ・流速鉛直縦断分布	【流速、掃流力】 (弱混合)淡塩二層流計算 (緩混合)鉛直二次元密度流拡散計算	(弱混合)淡塩二層流計算：計算手法は概ね確立されている (弱～緩混合)鉛直二次元密度流拡散計算：塩淡界面付近の混合の表現に技術的課題がある。
延伸部分へ微細粒子が移動する	・流量 ・河床材料の粒度組成 ・詳細な土質分析	【流砂量】 流砂量式により予測	流砂量式：各種流砂量式が提案されている。微細粒子の限界掃流力等の評価に技術的課題がある。
延伸部分に微細粒子が堆積する	・流量 ・河床材料の粒度組成 ・詳細な土質分析	【流砂量】 同上の方法で区間流砂量収支を求め、堆積量を予測	流砂量式：各種流砂量式が提案されている。微細粒子の限界掃流力等の評価に技術的課題がある。
河床表層が細粒化する	・流量 ・潮位 ・供給土砂量 ・河床材料の粒度組成 ・詳細な土質分析	【河床材料の粒度組成】 混合粒径の河床変動計算により予測	混合粒径河床変動計算：一次元の計算手法は概ね確立されているが、微細粒子の凝集・沈降過程の定式化、限界掃流力の評価等の課題がある。平面2次元の場合は、混合粒径計算が研究段階にある。

(4) 二次判定のための調査手法

1) 流速鉛直縦断分布*

目的：シミュレーションモデルの検証

調査地点：縦断方向は、塩水遡上距離及びその変動状況に応じて設定（5～15点程度）

水深方向は、1～2m程度の間隔とし、濃度変化の大きい河口付近、遡上先端では密にする。

調査時期：半月周期（約15日間）の塩水挙動を捉えるのが望ましい。

* 調査分析手法の「流向流速分布の計測」(p調査-4)参照

2) 詳細な土質分析（沈降特性、限界掃流力等を把握するため、沈降試験、粘度測定、フロック試験により、詳細な粒度組成や土質の特性を把握する。）

目的：シミュレーションの境界条件、検証

調査地点：縦横断方向に適当な間隔で設定（横断データは平面二次元の計算を行う場合に用いる）

調査時期・頻度：濁質量の増加する小出水後や上げ潮と下げ潮の違いが把握できる時期が望ましい。

3) 供給土砂量

目的：シミュレーションの境界条件

調査地点：汽水域の上流

調査時期：平常時、及び濁質量の増加する小出水時

4.3.1.4 河岸粗粒化、河岸侵食、河岸干潟の侵食

外海に面した河川、波浪の向きから考えて侵食されるおそれのある河岸や河岸干潟が存在する内湾の河川、および現況において波浪による河岸の侵食、河岸干潟の位置、規模、形状の変化が大きい河川では、二次判定により汀線の変化や河床の粒度を予測し、問題発生の有無を判断する。

(1) 人為的改変によるレスポンス

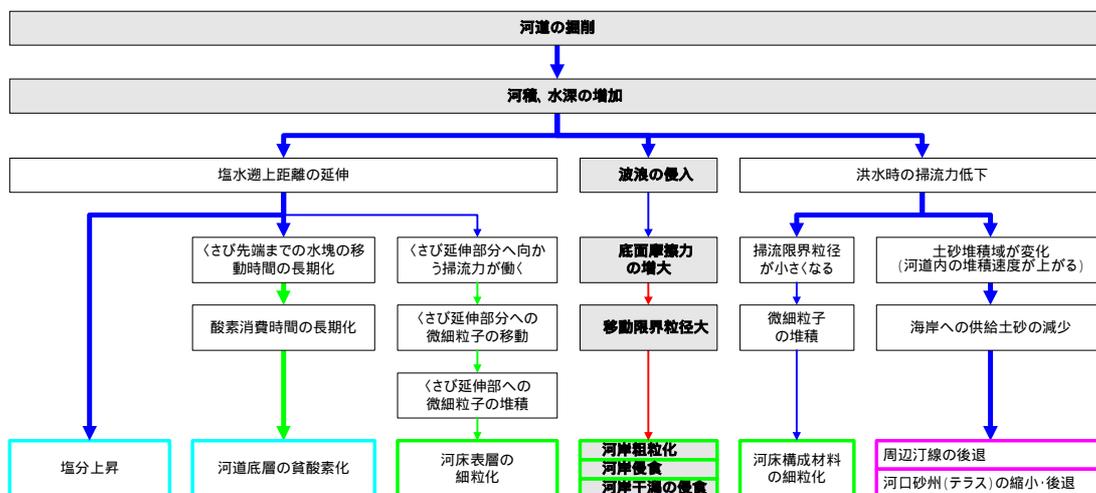
河道掘削を行うと、河口部の水深が増大することにより砕波点が上流に移動し、波浪の進入が促進される。この結果、波浪による土砂輸送が増大し、河岸の侵食や粗粒化を生じる可能性がある。

人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

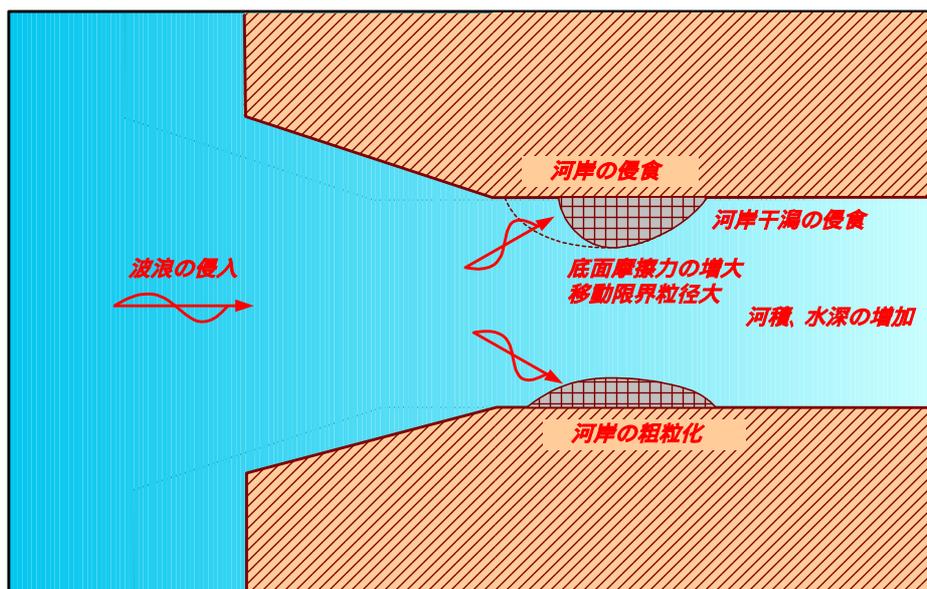
- 河口部の河道掘削により河積および水深が増加する
- 波浪の進入が促進される
- 河口の水深が増加することにより、掘削以前は砕波等により低減されていた波浪が河道内へと侵入しやすくなる。
- 河岸付近の底面摩擦力が大きくなる
- 掘削以前は波浪遡上域ではなかった河岸周辺まで波が達するようになると、河岸周辺でも波浪による底面摩擦が生じ、土砂移動が生じるようになる。また、波高が増大した場合には底面摩擦も増大し、より粗粒径の土砂が移動するようになる。
- 波による移動限界粒径が大きくなる
- 底面摩擦力が大きくなるため、波により輸送され得る粒径(移動限界粒径)が大きくなる。
- 河岸等が粗粒化或いは侵食される
- 底面摩擦の増大により、微細粒子が流出しやすくなる。この結果として、河岸等が粗粒化する場合がある。また、波高が極端に増大するような箇所では、河岸侵食や河岸前面の干潟(河岸干潟)の侵食を生じる可能性がある。

図 4.3.1.4 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。

現象の流れ



現象のイメージ図



【備考】

・主に外海型では、高波浪時には、河川舟運、河口港等に影響が生じやすい。

図 4.3.1.4 - 1 現象の流れ

(2) 一次判定手法

河口部では波浪が河道内へ侵入することにより砂州や河岸が侵食される場合がある。波浪の侵入形態は、河口沖合からの波高・波向・周期、河口地形、水深分布等に支配される。外海に面した河川では波浪が強いため河道掘削により河口砂州をとると必ず河岸等の侵食を生じるので、二次判定を行う。一方、内湾の場合には河道の掘削状況によって波浪の侵入の度合いが異なるため、侵食されるおそれのある河岸や河岸干潟が存在する場合に二次判定を行う。なお、現況において波浪による河岸の侵食、河岸干潟の位置、規模、形状の変化が大きい場合は二次判定を行う。

(3) 二次判定手法

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.1.4 - 1 に示す変化を表 4.3.1.4 - 1 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

現況河道及び掘削河道を設定し、河道及び河口海域の平面的な地形メッシュ(格子点位置、標高)を設定する。この地形条件に沖波及び入射波の条件を与えて波浪変形計算を行い、波高、波向等から漂砂量を求め、汀線変化を予測する。

2) 予測条件

波浪変形計算を行う際の沖波条件(波高・波向・周期)は、河岸干潟・砂州の地形変化に寄与すると考えられる波向の年最大規模程度の波あるいは、エネルギー平均波を設定することを基本とする。

また、入射波向は、海底地形に応じて、屈折、回折、浅水変形の影響度を考慮して設定する。

表 4.3.1.4 - 1 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
河口部の河道掘削により河積および水深が増加する	・河川縦横断形状	河床高の平面分布の作成	
波浪の侵入が促進される	・海底地形 ・沖波波高、波向、周期 ・潮位 ・波高分布	【波高分布】 波浪変形計算により予測	波浪変形モデルは種々提案されており、状況に応じて選択する必要がある。非定常緩勾配方程式による解析がよく用いられる。 また、砕波を考慮する場合は砕波モデルを組み込む必要がある。
河岸の付近の底面摩擦力が大きくなる	・底面流速	【底面摩擦力】 底面摩擦速度の算定式により予測	底面摩擦速度の算定式は種々提案されている。 汀線変化モデルでの検討には用いない
波による移動限界粒径が大きくなる	・流量（流速） ・河床材料の粒度組成	【移動限界粒径】 限界掃流力の式等による移動限界粒径の判定	波・流れ供存場における移動限界摩擦速度の評価に技術的課題がある。 また、混合粒径での評価は現状では困難である。
河岸等が侵食される	・供給土砂量 ・沖波波高、波向、周期 ・潮位 ・河川縦横断形状	【河岸形状】 汀線変化モデル*の応用が考えられる	波浪による河岸侵食への適用例はない 汀線変化モデルでは、河川流量を取り込むことは困難である。 波浪変形計算、海浜流計算に基づく海浜地形変化モデルでは、河岸（汀線）変化を予測することができない。
河岸等が粗粒化する	・河床材料	【河床材料】 混合粒径の汀線変化モデル*により概略検討できる可能性がある	同上 干満等の非定常性、粗粒化等の分級過程を評価することは困難 混合粒径の汀線変化モデルは、学会、委員会等の場では用いられているが、実際の計画への適用例はない

*汀線変化モデルは砂（非粘着性）が前提であることから、泥河川での河岸の侵食への適用は難しく適用事例もない。ただし、粘着性土砂の侵食・堆積の実態を調査し、漂砂量係数を同定して与えることで擬似的に表現できる可能性はある。

(4) 二次判定のための調査手法

1) 供給土砂量（掃流砂、浮遊砂）

目的：シミュレーションモデルの境界条件

調査地点：汽水域の上流

調査時期・頻度：出水時

備考：上下流2点以上の観測により土砂収支を把握することが望ましい。

4.3.1.5 河床構成材料の細粒化

河道掘削による河床構成材料の代表粒径の変化の程度を、平均年最大流量時の u_* （摩擦速度）と d_R （代表粒径）の関係から判断し、河床材料の大幅な変化やセグメントの変化が予想される場合には、二次判定により河床材料の変化を予測し、問題発生の有無を判断する。

(1) 人為的改変によるレスポンス

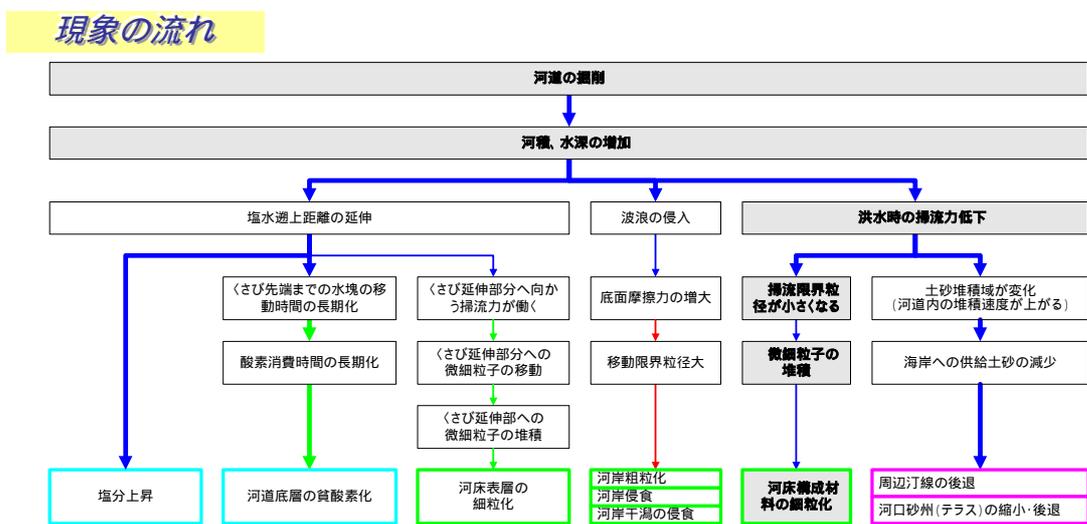
河道掘削を行うと、河積や水深が増大するため、洪水時の流速および掃流力が低下し、土砂移動が抑制される。この結果、小粒径の土砂の堆積が促進され、河床構成材料が細粒化する。

特に、堆積環境である汽水域での河床掘削はこの傾向が顕著に現れることから注意が必要である。

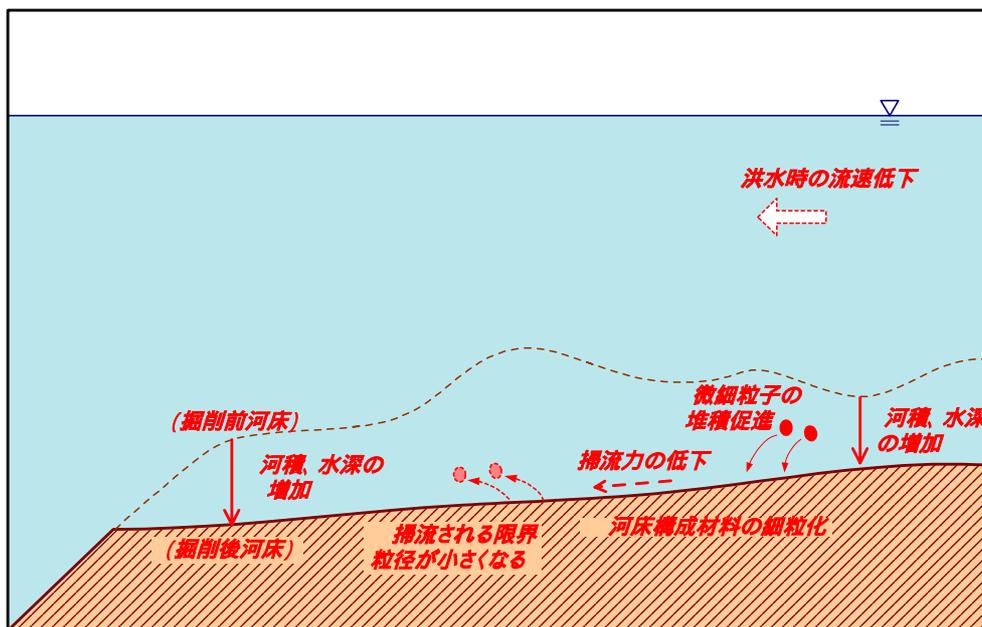
人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

- 河口部の河道掘削により河積および水深が増加する
- 洪水時の流速が減少し、河床面での掃流力が低下する
- 河積、水深が増加するため洪水時の流速が低下し、河床面に作用する掃流力も低下する。
- 掃流される限界粒径が小さくなる
- 掃流力が低下することにより、移動限界粒径が小さくなる。すなわち、掘削以前は移動可能であった粒径の移動に必要な掃流力が作用しなくなり、掘削以前より小さい粒径のみの輸送が生じることになる。
- 小粒径の土粒子の堆積が促進される
- 掃流力が低下するため、掘削以前は堆積せずに掃流されていた小粒径土砂の堆積が促進される。
- 河床構成材料が細粒化する
- 小粒径土砂の堆積増により、河床構成材料が細粒化する。

図 4.3.1.5 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。



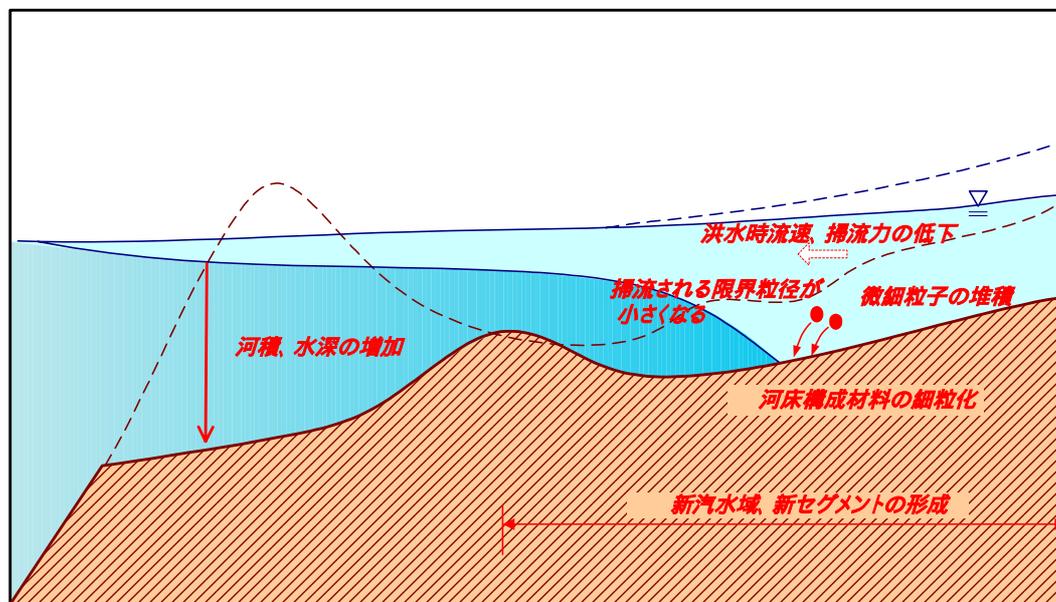
現象のイメージ図 (泥・砂河川の場合)



【備考】

- ・河床構成材料の粒度組成は、概ね平均年最大流量規模程度の水理条件に支配される。
- ・洪水の規模によって細粒化の程度が変わることがある。

現象のイメージ図 (砂利河川の場合)



【備考】

- ・河床材料の粒度組成は概ね平均年最大流量規模程度の水理条件に支配される。
- ・洪水の規模によって細粒化の程度が変わることがある。

図 4.3.1.5 - 1 現象の流れ

(2) 一次判定手法

河道掘削により河床勾配に変化を生じた区間では河床材料が変化する可能性がある。河道掘削による河床構成材料の代表粒径の変化の程度は、図 4.3.1.5 - 2 のような平均年最大流量時 u_* (摩擦速度) と d_R (代表粒径) の関係が一つの目安となる。例えば図 4.3.1.5 - 3 に見られるように、河道掘削により u_*^2 が小さくなるとともに d_R も小さくなっており、この関係を用いて掘削前と掘削後の u_*^2 から d_R を予測し、河床材料の大幅な変化やセグメントの変化が予想される場合には二次判定を行う。

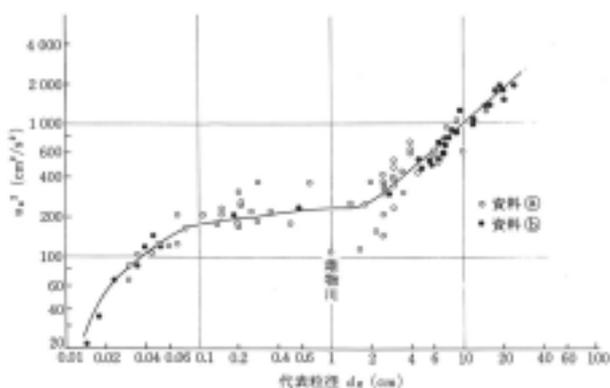


図 4.3.1.5 - 2

日本の沖積地河川の u_*^2 と d_R の関係

* 出典：「沖積河川学 堆積環境の視点から」
山本晃一著 山海堂 P.36

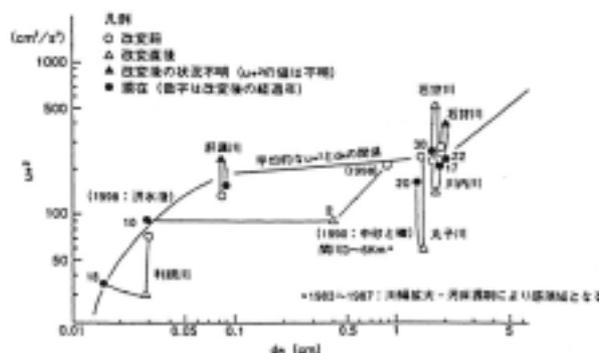


図 4.3.1.5 - 3

人工的河道改变後の河道の応答

* 出典：「自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系の関係に関する研究」(財) 河川環境管理財団

(3) 二次判定手法

河床を構成する材料の粒度組成は、主に上流からの供給土砂の量・質と河道の土砂輸送能力とのバランスにより生じる。このバランスは、洪水の規模等により変化するため、各種規模の洪水を対象として、河道の土砂輸送能力(掃流力)に対する各粒径の掃流量と堆積量の関係を把握し、当該汽水域の河床構成材料の粒度組成を評価することが重要である。一般に平均的な河床構成材料の粒度組成は、平均年最大流量規模の洪水の水理条件に支配される。

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.1.5 - 1 に示す変化を表 4.3.1.5 - 1 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

現況河道及び掘削河道を設定し、一次元河床変動計算を行う場合は断面特性(水位(H)~流積(A)~径深(R)~水面幅(B))、平面二次元計算を行う場合は河道地形メッシュ(格子点位置、標高)を設定する。次に、洪水時の各コントロールボリュームの掃流力を計算し、粒径帯別の土砂収支を求め、河床構成材料の構成比を予測する。

2) 予測条件

対象とする洪水流量として可能な限り多くの年の洪水ハイドロを与え、動的にみてどのような平衡状態(粒径分布、河床高等)となるかを予測することが望ましい。ただし、これを判断するのは難しい場合もあることから、例えば、確率規模別に一定流量で与え、それぞれの規模の洪水に対して、どのような粒径分布や河床形状が期待されるかをみるのも有効である。

表 4.3.1.5 - 1 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
河口部の河道掘削により河積および水深が増加する	・河川縦横断形状	【断面特性の算定】 各河道横断面の H-A-R-B の算定	
洪水時の流速が減少し、河床面での掃流力が低下する	・流量 ・潮位 ・水位 ・流速鉛直縦断分布	【流速、掃流力】 不等流計算あるいは不定流計算により予測	不等流計算、不定流計算：一次元、二次元の計算手法は概ね確立されている。
掃流される限界粒径が小さくなる	・流量（流速） ・河床材料の粒度組成	【移動限界粒径】 限界掃流力の式等による移動限界粒径の判定	限界掃流力の式：各種限界掃流力の式が提案されている。
微細粒子の堆積が促進される	・流量（流速） ・河床材料の粒度組成	【流砂量】 流砂量式により区間土砂収支を求め、堆積量を予測	流砂量式：各種流砂量式が提案されている。微細粒子の限界掃流力等の評価に技術的課題がある。
河床構成材料が細粒化する	・流量 ・潮位 ・供給土砂量 ・河床材料の粒度組成	【河床材料の粒度組成】 混合粒径の河床変動計算により予測	混合粒径河床変動計算：一次元の計算手法は概ね確立されているが、微細粒子の凝集・沈降過程の定式化、限界掃流力の評価等の課題がある。平面2次元の場合は、混合粒径計算が研究段階にある。

(4) 二次判定のための調査手法

1) 流速鉛直縦断分布*

目的：シミュレーションモデルの検証

調査地点：必要に応じ、汽水域内で数地点

* 調査分析手法の「流向流速分布の計測」(p 調査 - 4) 参照

2) 供給土砂量（掃流砂、浮遊砂）

目的：シミュレーションの境界条件、モデル検証

調査地点：汽水域の上流

調査時期・頻度：洪水の立ち上がりから低減期にかけて1～2時間間隔程度

備考：流砂形態（掃流砂・浮遊砂等）に応じて適当な手法を選択する

4.3.1.6 周辺汀線の後退、河口砂州（テラス）の縮小・後退

河口砂州や河口テラスが形成されている河川では、河道掘削により海岸への土砂供給量が減少し、砂州やテラスが縮小するとともに周辺汀線が後退する可能性がある。大河川周辺の海岸や波浪の強い外海に面した海岸ではレスポンスを生じやすいため、河道掘削を行う場合には、二次判定により土砂の供給量や汀線の変化を予測し、問題発生の有無を判断する。

(1) 人為的改変によるレスポンス

河道掘削を行うと、河積や水深が増大するため、洪水時の流速および掃流力が低下し、土砂移動が抑制される。この結果、河口、海岸への土砂供給量が減少し、河口テラスの縮小、河口砂州の縮小や後退、周辺汀線の後退といった土砂管理や海岸保全上の問題を生じる可能性がある。

特に、汽水域や河口付近での河道掘削は、もともと堆積環境であること、海域に近いことなどからその応答速度が早くなることが想定されるため、注意が必要である。

人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

河口部の河道掘削により河積および水深が増加する

掘削区間の掃流力が低下する

河積、水深が増加するため洪水時の流速が低下し、河床面に作用する掃流力も低下する。

掘削区間の土砂堆積速度が増加する

河床面に作用する掃流力が低下した結果、河道掘削区間の土砂輸送能力が低下し、上流から供給される土砂も掘削区間に堆積するようになる。

河口から海岸への土砂供給量が減少する

上流からの供給土砂が河道掘削区間に堆積するため、河口から海岸まで到達、供給される土砂量が減少する。

河口周辺の汀線が後退する

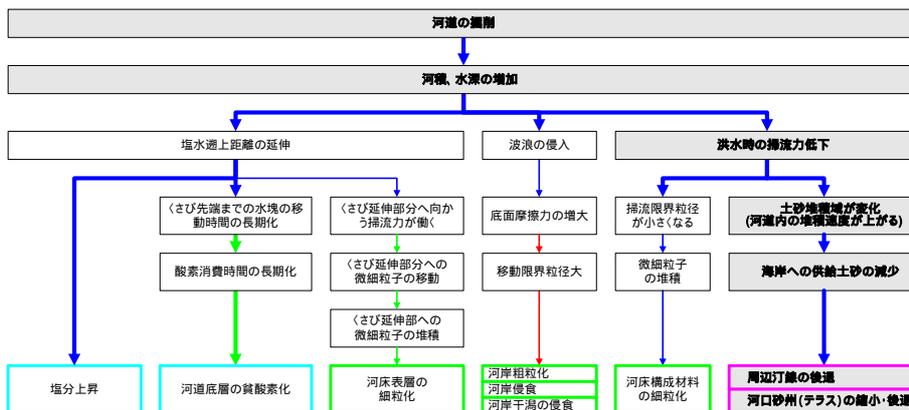
一時、河口テラスに堆積した河川からの供給土砂は、波浪の作用を受け沿岸漂砂となって周辺の海浜を形成する。従って、河川からの供給土砂の減少は河口テラスでの土砂堆積量の減少を招き、さらには周辺汀線の後退を生じ、最終的には海岸侵食の原因となる可能性がある。

河口砂州（テラス）が縮小、河道内へ後退する

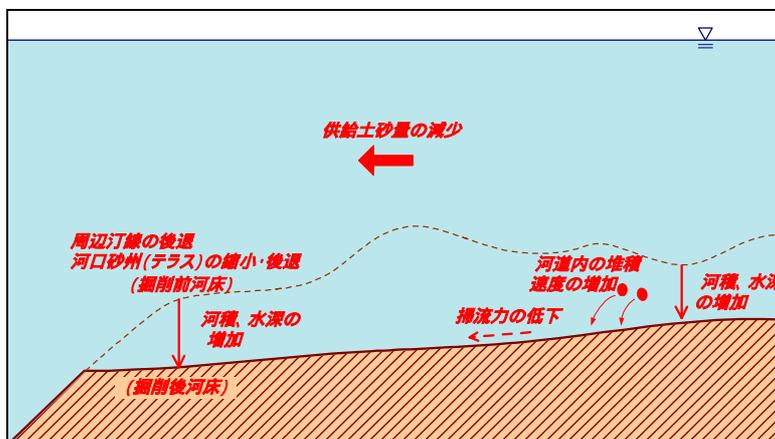
河川からの供給土砂の堆積空間である河口テラスは、河川からの供給土砂量が減少することにより縮小する。また、河口砂州は、河口テラスでの堆積土砂を波浪が河口に打ち上げることにより形成されるが、河口テラスでの土砂堆積量が減少していることから、河口砂州も縮小し、縮小規模が激しい場合は河道の中へと後退していく。

図 4.3.1.6 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。

現象の流れ



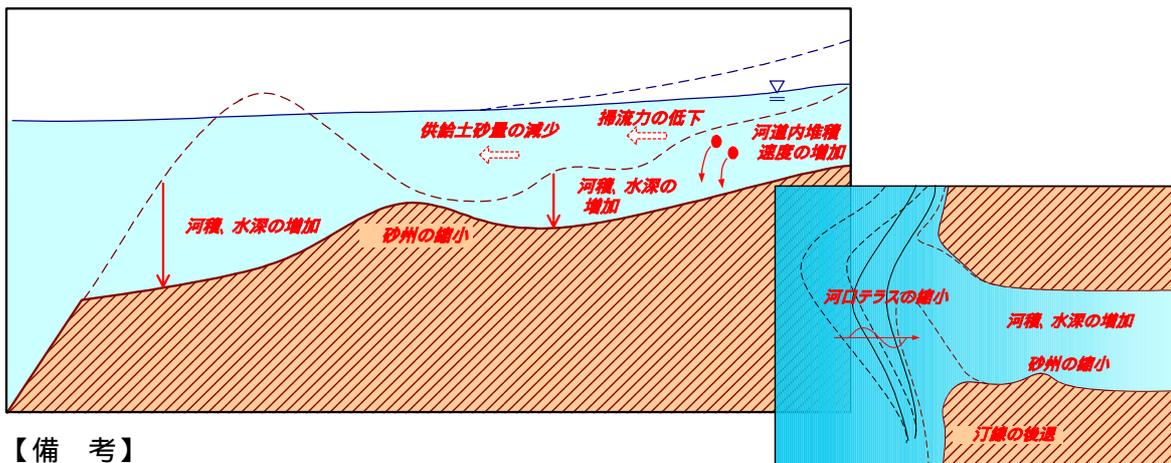
現象のイメージ図 (泥・砂河川の場合)



【備考】

- ・河床構成材料の粒度組成は、概ね平均年最大流量規模程度の水理条件に支配される。
- ・洪水の規模によって細粒化の程度が変わることがある。

現象のイメージ図 (砂利河川の場合)



【備考】

- ・河口テラスの縮小により海底勾配が急になった場合は、波の打ち上げ高が高くなるとともに、砂州高も上昇する。

図 4.3.1.6 - 1 現象の流れ

(3) 二次判定手法

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.1.6 - 1 に示す変化を表 4.3.1.6 - 1 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

現況河道及び掘削河道の断面特性(水位(H)～流積(A)～径深(R)～水面幅(B))を設定し、洪水時の各コントロールボリュームの掃流力を計算した後、土砂収支(供給土砂量)を算定する。

次に、現況海浜断面の汀線位置、海底勾配を設定し、上記供給土砂量を境界条件とし、入射波の条件を与えて汀線変化を予測する。

2) 予測条件

洪水流量は、長期間のハイドロを与え、長期的な変動条件を予測することが望ましい。

波浪条件は、地形変動に寄与するエネルギー平均波等を繰り返し与えて評価する方法が効果的である。

表 4.3.1.6 - 1 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
河口部の河道掘削により河積および水深が増加する	・河川縦横断形状	-	
掘削区間の掃流力が低下する。	・流量 ・潮位 ・水位 ・流速鉛直縦断分布	【流速、掃流力】 不等流計算あるいは不定流計算により予測	不等流計算、不定流計算：一次元、二次元の計算手法は概ね確立されている。
掘削区間の土砂堆積速度が増加する	・流量 ・供給土砂量	【河床高】 河床変動計算により予測	河床変動計算：一次元の計算手法は、混合粒径、一様粒径共に概ね確立されている。平面2次元の場合は、混合粒径計算が研究段階にある。
河口から海岸への土砂供給量が減少する		【土砂供給量】 河床変動計算により予測	河床変動計算：一次元の計算手法は、混合粒径、一様粒径共に概ね確立されている。平面2次元の場合は、混合粒径計算が研究段階にある。
河口前面に形成される河口テラスが縮小する	・供給土砂量 ・沖波波高、波向、周期 ・海浜・海底地形（汀線位置） ・潮位 ・漂砂量	【河口テラスの形状】 汀線変化モデル、等深線モデルにより予測	汀線変化を予測するモデルとしては概ね確立されている。テラスの勾配等を評価するためには等深線モデルを用いる必要がある。
河口砂州が縮小、河道内へ後退する	・供給土砂量 ・沖波波高、波向、周期 ・海浜・海底地形（汀線位置） ・潮位 ・漂砂量	【河口砂州の形状】 汀線変化モデル、等深線モデルにより予測	汀線変化を予測するモデルとしては概ね確立されている。いずれも汀線を評価するため、砂州位置等の予測は不可能
河口周辺の汀線が後退する	・供給土砂量 ・沖波波高、波向、周期 ・海浜・海底地形（汀線位置） ・潮位 ・漂砂量	【汀線位置】 汀線変化モデル、等深線モデルにより予測	汀線変化を予測するモデルとしては概ね確立されている。

(4) 二次判定のための調査手法

1) 流速鉛直縦断分布*

目的：シミュレーションモデルの検証

調査地点：必要に応じ、汽水域内で数地点

* 調査分析手法の「流向流速分布の計測」(p 調査 - 4) 参照

2) 供給土砂量（掃流砂、浮遊砂）

目的：シミュレーションモデルの境界条件、検証

調査地点：汽水域の上流

調査時期：出水時

備考：上下流2点以上の観測により土砂収支を把握することが望ましい。

3) 漂砂量

目的：シミュレーションの境界条件

調査地点：河口含む沿岸で数地点

調査時期：洪水前後、高波浪前後等、土砂移動の活発な時期

備考：長期的な土砂収支の把握も重要である。

4.3.2 河口導流堤の建設によるレスポンスの調査・分析

4.3.2.1 河岸粗粒化、河岸侵食、河岸干潟の侵食、周辺汀線の変化

河口導流堤の建設により、河口みお筋が固定され漂砂が遮断される。これにより、汀線は場所によって前進・後退するとともに、河道内へ侵入する波浪が増加し河口砂州等が上流側へ後退する可能性がある。

周辺海岸等での同様の構造物による海浜変形状況、深淺測量や海浜測量による侵食・堆積状況から漂砂の卓越する方向を推察するとともに、波砕水深と導流堤建設前後の河口水深から波浪遡上の状況を予測する。周辺海岸に砂浜が広がり沿岸漂砂が一年を通して一方に卓越している場合および、波浪の侵入状況の変化により波高が増大する場合、ならびに現況において波浪による河岸干潟・砂州の位置、規模形状の変化が大きい場合には二次判定により汀線変化や砂州の変化を予測することで問題発生の有無を判断する。

(1) 人為的改変によるレスポンス

導流堤を建設することにより、砂州・みお筋が固定化し、開口部河積、河口水深が増大する。これにより、河道内への波浪の遡上が生じ、河口砂州が河道内へ後退する可能性がある。

また、沿岸漂砂の遮断、波の変形等が生じるため、周辺汀線が変化する。特に沿岸漂砂の遮断による汀線変化は、漂砂の下手で海岸侵食となって現れるため注意が必要である。

人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

< 河岸粗粒化、河岸侵食、河岸干潟の侵食 >

砂州およびみお筋が固定化される

河口導流堤により、砂州やみお筋が固定される。

河口部の河積が増大する

砂州・みお筋の固定化、漂砂の遮断により、河口砂州が縮小し、河口部の河積は増加する。

河道内への波浪の進入が促進される

河口の水深が増加することにより、掘削以前は砕波等により低減されていた波浪が河道内へと侵入しやすくなる。

底面摩擦力の増大

波が侵入しやすくなることで波による底面摩擦力が増大する。

波による移動限界粒径が大きくなる

底面摩擦力が大きくなるため、波により輸送され得る粒径（移動限界粒径）が大きくなる。

河岸粗粒化、河岸侵食、河岸干潟の侵食

底面摩擦力の増大により、微細粒子が流出しやすくなる。この結果として、河岸等が粗粒化する場合がある。また、波浪の侵入により、河岸、河岸干潟が洗われ、侵食される。

< 周辺汀線の変化 >

漂砂が遮断される

導流堤の建設により沿岸方向の漂砂が遮断される。遮断による影響は特に流出土砂に対して沿岸漂砂が卓越する河川において顕著である。

波高・波向分布が変化する

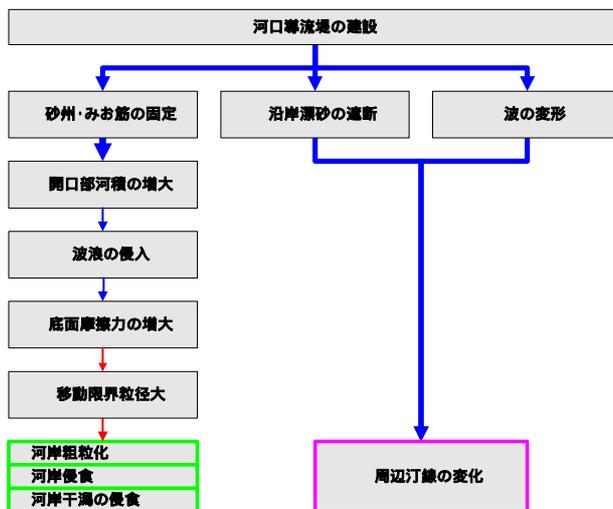
導流堤による反射・回折や、海底地形の変化による屈折や浅水変形の変化に伴い河口付近での波高、波向分布が変化する。

汀線が前進、または後退する

漂砂が一方向に卓越している場合、導流堤が漂砂を捕捉する形となり、漂砂の上手では汀線の前進、下手では汀線の後退を生じる。

図 4.3.2.1 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。

現象の流れ



現象のイメージ図



【備考】

- ・ 両岸に導流堤を建設した場合は土砂が沖へと誘導され、河口テラス、河口砂州の縮小が生じる。
- ・ 沿岸漂砂が卓越する河川の河口をイメージしている。
- ・ 導流堤を設けると、導流堤に沿う流れが生じ、局所的に洗掘を生じることがある。

図 4.3.2.1 - 1 現象の流れ

(2) 一次判定手法

河口導流堤の建設により、河口みお筋が固定され漂砂が遮断される。これにより、汀線は場所によって前進・後退するとともに、河道内へ侵入する波浪が増加し河口砂州等が上流側へ後退する可能性がある。

周辺の海岸に砂浜が広がり沿岸漂砂が一年を通して一方向に卓越している場合は、導流堤を汀線より沖に出せば必ず汀線の移動が生じると考えられるため二次判定を行う。

また、導流堤は一般に外海に面した河川に設けられ、波浪の影響を強く受けており、導流堤の設置によって波が侵入しやすくなると河岸等の侵食を生じるため、波浪の侵入状況の変化を推察し、波高が増大する場合には二次判定を行う。また、現況において波浪による河岸干潟・砂州の位置、規模、形状の変化が大きい場合にも二次判定を行う。

1) 漂砂の推察

周辺海岸等での同様の構造物(突堤、防波堤等)による海浜変形状況、深浅測量や海浜測量による侵食・堆積状況から沿岸漂砂の卓越する方向を推察する。

2) 波浪の侵入の推察

導流堤が片側のみの場合は、河口開口幅や砂州高はあまり変化しない。一方、両側に導流堤を設けた場合には、それらが大きく変化し波の侵入状況が大幅に変わる可能性がある。この場合、沖波の条件を基に、図 4.3.2.1 - 2 から碎波水深を推定する。この碎波水深と導流堤建設後の河口水深から、波浪遡上の状況を推察する。

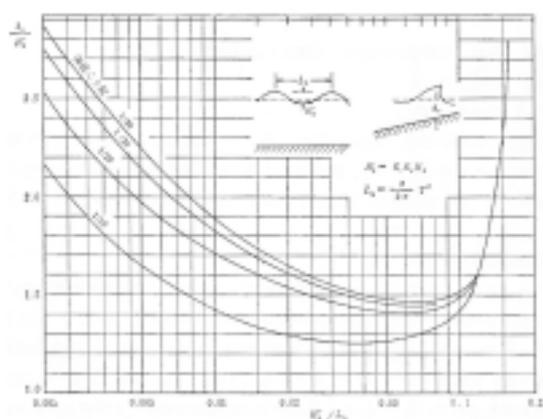


図 4.3.2.1 - 2

波形勾配と碎波水深との関係

出典：「改訂 海岸保全施設築造基準解説」

(3) 二次判定手法

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.2.1 - 1 に示す変化を表 4.3.2.1 - 1 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

河道及び河口海域の平面的な地形メッシュ(格子点位置、標高)を設定する。この地形に波浪条件を与えて、波浪変形計算を行い、波高、波向等から漂砂量・土砂移動量を求め、汀線変化・砂州の移動を予測する。

2) 予測条件

波浪変形計算を行う際の沖波条件(波高、周期、波向)は、河岸干潟・砂州の地形変化に寄与すると考えられる波向の年最大規模程度の波あるいは、エネルギー平均波を設定することを基本とする。

また、入射波向は、海底地形に応じて、屈折、回折、浅水変形の影響度を考慮して設定する。

表 4.3.2.1 - 1 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
砂州およびみお筋が固定される	<ul style="list-style-type: none"> 河川縦横断形状 海浜・海底地形 	河床高、海底高平面分布の作成	
開口部の河積が増大する	<ul style="list-style-type: none"> 供給土砂量 漂砂量 潮位 河川縦横断形状 	【河口形状】 河口幅予測モデルによる予測が考えられる。	断面変形予測モデル、河口位置変化予測モデルに拡張されている。 砂州越流を考慮する場合は、平面2次元計算によることとなるが、波による砂州形成過程、砂州形状の解析は困難
河道内への 波浪の侵入 が促進される	<ul style="list-style-type: none"> 海浜・海底地形 沖波波高、波向、周期 潮位 波高分布 	【波高分布】 波浪変形計算 により予測	波浪変形モデルは種々提案されており、状況に応じて選択する必要がある。非定常緩勾配方程式による解析がよく用いられる。 また、碎波を考慮する場合は碎波モデルを組み込む必要がある。ただし、河道内波高分布の予測は可能であるが、汀線変化モデルに反映することは困難。
底面摩擦力が増大する		【底面摩擦速度】 底面摩擦速度の算定式 により予測	底面摩擦速度の式は種々提案されている。
波による 移動限界粒径が大きくなる	<ul style="list-style-type: none"> 流量（流速） 河床材料の粒度組成 	【移動限界粒径粒径】 限界掃流力の式 等による移動限界粒径の判定	波・流れ供存場における移動限界摩擦速度の評価に技術的課題がある。 また、混合粒径での評価は現状では困難である。
河口砂州が河道内へ後退する	<ul style="list-style-type: none"> 供給土砂量 沖波波高、波向、周期 海浜・海底地形（汀線位置） 潮位 漂砂量 河川縦横断形状 	【河口砂州の形状】 汀線変化モデル により予測できる。	汀線変化を予測するモデルとしては概ね確立されている。ただし、汀線を評価するため河口位置等の予測は不可能。
漂砂が遮断される	<ul style="list-style-type: none"> 供給土砂量 沖波波高、波向、周期 海浜・海底地形（汀線位置） 潮位 漂砂量 	【漂砂量】 汀線変化モデル により予測できる。	汀線変化を予測するモデルとしては概ね確立されている。
波高・波向分布が 変化する	<ul style="list-style-type: none"> 海浜・海底地形 沖波波高、波向、周期 潮位 波高分布 	【波高分布】 波浪変形計算 により予測	波浪変形モデルは種々提案されており、状況に応じて選択する必要がある。非定常緩勾配方程式による解析がよく用いられる。 また、碎波を考慮する場合は碎波モデルを組み込む必要がある。
漂砂の遮断により、上手では 汀線前進 、下手では 後退 を生じる	<ul style="list-style-type: none"> 供給土砂量 沖波波高、波向、周期 海浜・海底地形（汀線位置） 潮位 漂砂量 	【汀線変化】 汀線変化モデル により予測できる。	汀線変化を予測するモデルとしては概ね確立されている。

(4) 二次判定のための調査手法

1) 供給土砂量(掃流砂、浮遊砂)

目的：シミュレーションの境界条件

調査地点：汽水域の上流

調査時期・頻度：出水時

備考：上下流2点以上の観測により土砂収支を把握することが望ましい。

2) 漂砂量

目的：シミュレーションの境界条件

調査地点：河口含む沿岸で数地点

調査時期：洪水前後、高波浪前後等、土砂移動の活発な時期

備考：長期的な土砂収支の把握も重要である。

4.3.3 河口部の埋め立てによるレスポンスの調査・分析

4.3.3.1 河岸干潟の細粒化、河岸干潟の侵食

河口部に干潟が存在する場合、波向からみて遮蔽域にあたる領域では波浪が弱く底面摩擦力が小さいために粒径が小さくなりやすく、波当たりが強い領域では粒径が大きくなったり侵食されやすい傾向にある。

埋め立ての平面形状、波高、波向などから波浪の侵入により侵食されるおそれがある河岸干潟がある内湾の河川および干潟を持つ外海に面した河川、ならびに現況において波浪による河岸干潟・砂州の位置、規模、形状に大きな変化が生じている河川で埋め立てを行う場合は、二次判定により河床の粒度や汀線の変化を予測することで問題の有無を判断する。

(1) 人為的改変によるレスポンス

河口部の埋め立てにより、波向等の波浪特性が変化して新たな遮蔽域や反射域を形成する可能性がある。遮蔽域では波高が減少するため、波浪による土砂輸送が抑制され、干潟等の細粒化が生じることがある。逆に反射波が形成される領域では波高が高くなり、干潟の侵食や粗粒化を生じる可能性がある。

人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

< 干潟等の細粒化 >

埋め立て地により波の遮蔽域が形成され波高が減少する

河口部で埋め立てを行うと、新たな遮蔽域が形成され、波高が埋め立て前に比べて低下する。

波高低下により底面摩擦力が低下する

遮蔽域では波高が減少することにより、河床に作用する底面摩擦力が低下する。

波による移動限界粒径が小さくなる

底面摩擦力が小さくなるため、波により輸送され得る粒径（移動限界粒径）が小さくなる。

波浪による土砂輸送量が減少し、河岸干潟が細粒化する

輸送可能な粒径が小さくなり、微細粒子が堆積しやすくなるため、遮蔽域の干潟等では細粒化することがある。

< 干潟の侵食や粗粒化 >

埋め立て地により波の反射域が形成され、反射波や沿い波が発生する

河口部で埋め立てを行うと、波浪の変形状況が変化することにより新たな反射域が形成され、波高が埋め立て前に比べて増大することになる。

反射波、沿い波の発生箇所で底面摩擦力が増大する

反射波、沿い波により波高が増大すると、河床に作用する底面摩擦力が増加する。

波による移動限界粒径が大きくなる

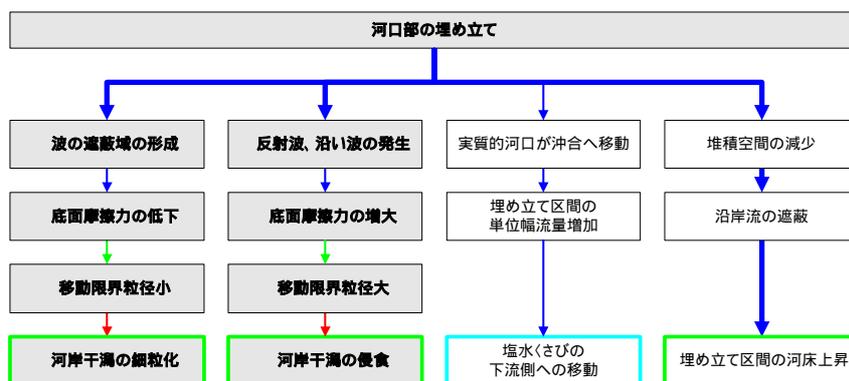
底面摩擦力が大きくなるため、波により輸送され得る粒径（移動限界粒径）が大きくなる。

河岸干潟が侵食される

輸送可能な粒径が大きくなり、土砂が移動しやすくなるため、反射域の河岸干潟が侵食されることがある。特に、波の入射角が小さい場合は、沿い波が発生することがあり注意を要する。

図 4.3.3.1 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。

現象の流れ



現象のイメージ図

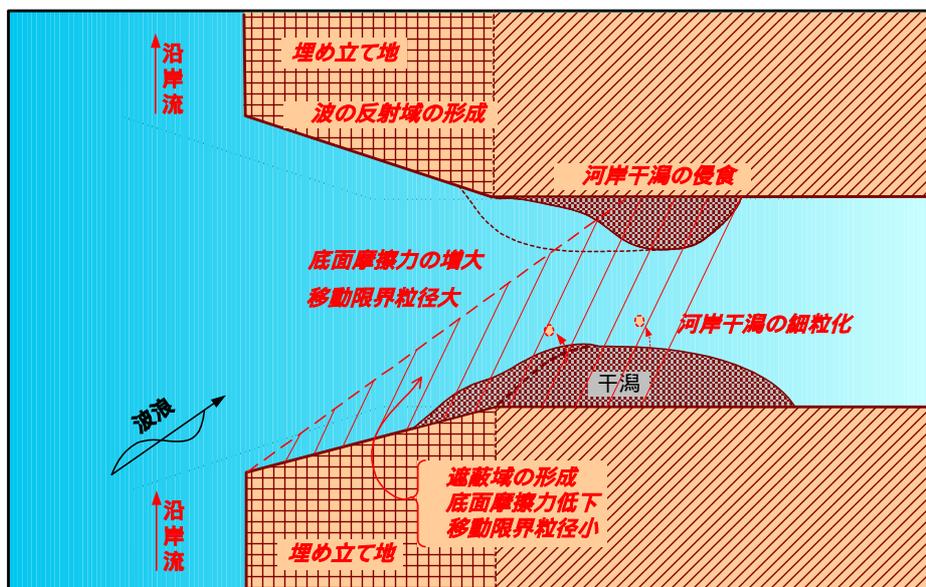


図 4.3.3.1 - 1 現象の流れ

(2) 一次判定手法

河口部に干潟が存在する場合、波向からみて遮蔽域にあたる領域では波浪が弱く底面摩擦力が小さいために粒径が小さくなりやすく、波当たりが強い領域では粒径が大きくなり侵食されやすい傾向にある。

一般に埋め立ては内湾で行われ、波浪の影響は比較的小さいため、埋め立ての平面形状、波高、波向などより波浪の侵入により侵食されるおそれがある河岸干潟があるか否かを判断し、ある場合には二次判定を行う。一方、外海で埋め立てを行う場合は影響が出る可能性が高まると考えられるので原則として二次判定を行う。なお、現況において波浪による河岸干潟・砂州の位置、規模、形状に大きな変化が生じている場合は二次判定を行う。

(3) 二次判定手法

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.3.1 - 1 に示す変化を表 4.3.3.1 - 1 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

現況河道及び埋め立て後の河道を設定し、河道及び河口海域の平面的な地形メッシュ（格子点位置、標高）を設定する。この地形条件に沖波及び入射波の条件を与えて波浪変形計算を行い、波高、波向等から漂砂量を求め、汀線変化を予測する。

2) 予測条件

波浪変形計算を行う際の沖波条件（波高、周期、波向）は、河岸干潟・砂州の地形変化に寄与すると考えられる波向で年最大規模程度の波あるいは、エネルギー平均波を設定することを基本とする。

また、入射波向は、海底地形に応じて、屈折、回折、浅水変形の影響度を考慮して設定する。

表 4.3.3.1 - 1 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
埋め立て地により波の遮蔽域が形成され、波高が減少する	・海浜・海底地形 ・沖波波高、波向、周期 ・潮位 ・波高分布	【波高分布】 波浪変形計算により予測	波浪変形モデルは種々提案されており、状況に応じて選択する必要がある。非定常緩勾配方程式による解析がよく用いられる。また、砕波を考慮する場合は砕波モデルを組み込む必要がある。
波高低下により底面摩擦力が低下する		【底面摩擦速度】 底面摩擦速度の算定式により予測	底面摩擦速度の算定式は種々提案されている。汀線変化モデルでの検討には用いない。
波による移動限界粒径が小さくなる	・流量（流速） ・河床材料の粒度組成	【移動限界粒径粒径】 限界掃流力の式等による移動限界粒径の判定	波・流れ供存場における移動限界摩擦速度の評価に技術的課題がある。また、混合粒径での評価は現状では困難である。
波浪による土砂輸送量が減少し、河岸干潟が細粒化する	・供給土砂量 ・波高、周期 ・河川縦横断形状 ・潮位（水位） ・河床材料	【土砂輸送量（漂砂量） 河床材料】 混合粒径の汀線変化モデル*により概略検討できる可能性がある	汀線変化モデルでは、河川流量を取り込むことは困難である。混合粒径の汀線変化モデルは、学会、委員会等の場では用いられているが、実際の計画への適用例はない。
埋め立て地により波の反射域が形成され、反射波や沿い波が発生する	・海浜・海底地形 ・沖波波高、波向、周期 ・潮位 ・波高分布	【波高分布】 波浪変形計算により予測	波浪変形モデルは種々提案されており、状況に応じて選択する必要がある。非定常緩勾配方程式による解析がよく用いられる。また、砕波を考慮する場合は砕波モデルを組み込む必要がある。
反射波、沿い波の発生箇所で、底面摩擦力が増大する		【底面摩擦速度】 底面摩擦速度の算定式により予測	底面摩擦速度の算定式は種々提案されている。汀線変化モデルでの検討には用いない
波による移動限界粒径が大きくなる	・流量（流速） ・河床材料の粒度組成	【移動限界粒径粒径】 限界掃流力の式等による移動限界粒径の判定	波・流れ供存場における移動限界摩擦速度の評価に技術的課題がある。また、混合粒径での評価は現状では困難である。
河岸干潟が侵食される	・供給土砂量 ・沖波波高、波向、周期 ・河川縦横断形状 ・潮位（水位） ・河床材料	【河岸形状】 汀線変化モデル*の応用が考えられる。	波浪による河岸侵食への適用例はない 汀線変化モデルでは、河川流量を取り込むことは困難である。

*汀線変化モデルは砂（非粘着性）が前提であることから、泥河川での河岸の侵食への適用は難しく適用事例もない。ただし、粘着性土砂の侵食・堆積の実態を調査し、漂砂量係数を同定して与えることで擬似的に表現できる可能性はある。

(4) 二次判定のための調査手法

1) 供給土砂量（掃流砂、浮遊砂）

目的：シミュレーションの境界条件

調査地点：汽水域の上流

調査時期・頻度：出水時

備考：上下流2点以上の観測により土砂収支を把握することが望ましい。

4.3.3.2 塩水くさびの下流側への移動

4.3.1.1 と同様に一次判定手法を用いて塩水くさびの移動範囲等を推定し、次のような事象が予想される場合は二次判定により塩分濃度を予測し問題の有無を判断する。

- ・塩分くさびの移動範囲が大きく変化する場合
- ・塩水くさびの移動する範囲に汽水性の生物の重要な生息・生育場所がある場合

(1) 人為的改変によるレスポンス

河口部の両岸を埋め立てた場合、実質的に河道が延伸された形状となる。このため、埋め立て区域では河川からの外力が増加するため、塩水くさびが下流側へと移動する。

特に、埋め立て部の開口幅（実質的な川幅）が狭い場合はこの影響が強くなる。

人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

河口両岸を埋め立てた場合、実質的な河口が沖合へ移動する

河口の両河岸を埋め立てた場合、埋め立て地間の水理特性は河川と同様になり、実質的に河口が沖合へ移動した形となる。

埋め立て区間の単位幅流量が増加する

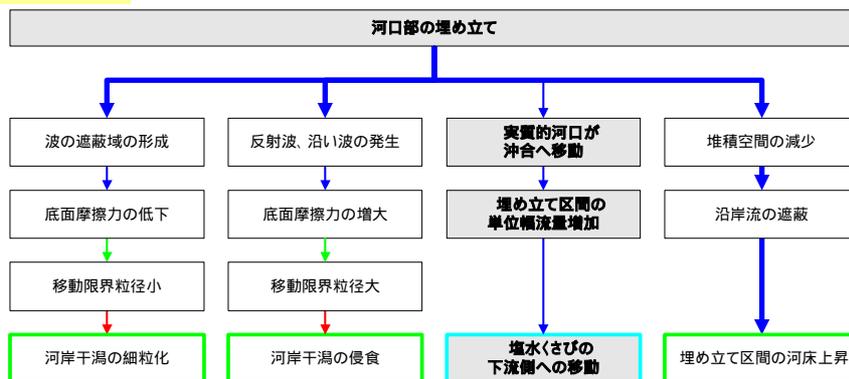
埋め立て区間では、両岸を埋め立て地によって拘束され、河道としての挙動を示すようになるため、単位幅当たりの流量は埋め立て前に比べて増加する。

遡上塩水の上流端が下流に移動する

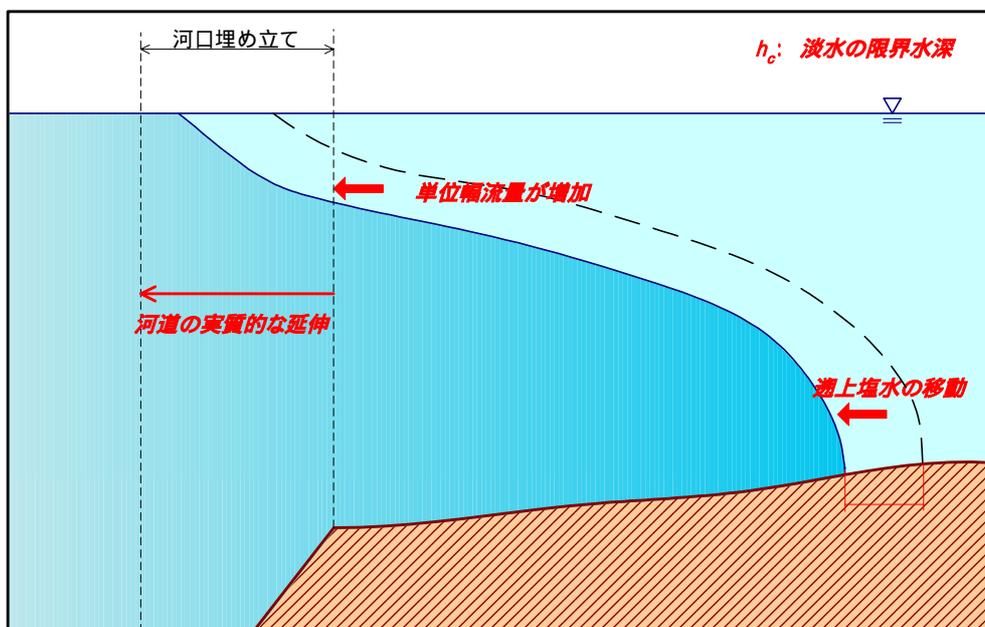
河口の移動とともに塩水くさびの淡塩界面が下流へと移動し、遡上塩水の上流端が下流へ移動する。

図 4.3.3.2 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。

現象の流れ



現象のイメージ図



【備考】

- ・ 上図は弱混合のイメージ図である。
- ・ 強混合の場合も実質的な河口が沖合へ移動し、現河口の塩分濃度が低下するため遡上塩水の上流端は下流へ移動する。

図 4.3.3.2 - 1 現象の流れ

(2) 一次判定手法

埋め立てによる河口位置の下流側への移動は掘削により河道の水深や汽水域の長さが変わる場合と類似している。埋め立てを行う場合には、4.3.1.1 に示す一次判定手法を用いて塩水くさびの移動範囲等を推定し、次のような事象が予想される場合は二次判定を行う。

- 塩水くさびの移動範囲が大きく変化する場合
- 塩水くさびの移動する範囲に汽水性の生物の重要な生息・生育場所がある場合

(3) 二次判定手法

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.3.2 - 1 に示す変化を表 4.3.3.2 - 1 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

現況河道及び埋め立て後の河道を設定し、その断面特性(水位(H)～流積(A)～径深(R)～水面幅(B))を求める。これを選択したシミュレーションモデルに与えて塩水くさびの形状や塩分濃度分布を予測する。現況河道と埋め立て後の河道の塩分濃度を比較し、塩水くさびの移動を判断する。

2) 予測条件

流況条件は、平均的な流況及び渇水時の流況の条件を選ぶことが基本である。また、維持流量の条件での塩水遡上の変化を把握することも重要である。

潮位条件は、年間のうち、平均潮位が高い夏期の半月周潮の潮位を与えることが基本である。

表 4.3.3.2 - 1 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
河口兩岸を埋め立てた場合、実質的な 河口が沖合へ移動する	・河川縦横断形状	埋め立て区間の横断面 H-A-R-B の算定	
埋め立て区間の淡水の 単位幅流量が増加する	・流量 ・潮位 ・水位 ・流速鉛直縦断分布 ・塩分鉛直縦断分布	【塩水遡上量、遡上距離】 塩分くさび形状、塩分濃度分布の予測 (弱混合) 淡塩二層流計算 (弱～緩混合) 鉛直二次元密度流拡散計算	(弱混合)淡塩二層流計算：計算手法は概ね確立されている (弱～緩混合)鉛直二次元密度流拡散計算：塩淡界面付近の混合の表現に技術的課題がある。
淡水層の 内部跳水位置が下流へ移動する	・流速鉛直縦断分布		
遡上塩水の上流端が 下流に移動する。	・塩分鉛直縦断分布		

(4) 二次判定のための調査手法

1) 流速鉛直縦断分布*

目的：シミュレーションモデルの検証

調査地点：縦断方向は、塩水遡上距離及びその変動状況に応じて設定(5～15点程度)
水深方向は、1～2m程度の間隔とし、濃度変化の大きい河口付近、遡上先端では密にする。

調査時期：半月周期(約15日間)の塩水挙動を捉えるのが望ましい。

* 調査分析手法の「流向流速分布の計測」(p調査-4)参照

4.3.3.3 埋め立て区間の河床上昇

河口で埋め立てを行う場合、二次判定により河床の変動を予測し、問題の有無を判断することを原則とする。

(1) 人為的改変によるレスポンス

河口部での埋め立てが従来の堆積空間を制限することから、河川からの供給土砂量が埋め立て区間に堆積しやすくなる。さらに、沿岸流を遮断するような場合には、沿岸方向の土砂移動を制限することになり、埋め立て区間の土砂堆積はより顕著になる可能性がある。

人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

埋め立て地により土砂の堆積空間が減少する

河川からの供給土砂は、海域に流出した後、沿岸方向にある程度の幅を持って堆積する。これが、埋め立て地ができることにより沿岸方向への堆積が制限され、堆積空間は埋め立て区間内に限定されることになる。

沿岸流等による沿岸方向の土砂移動がなくなる

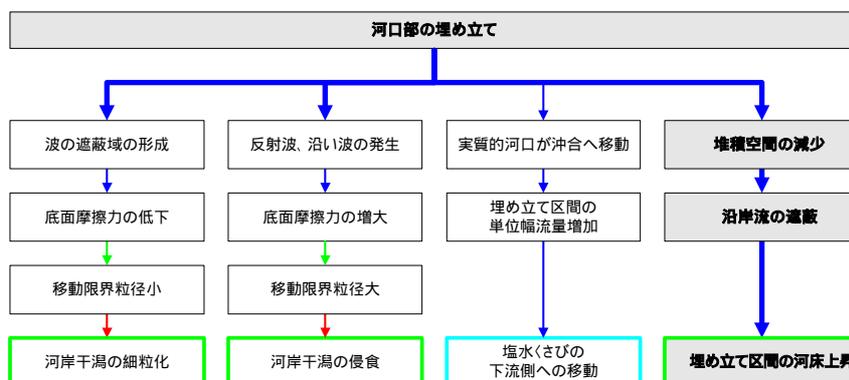
沿岸流あるいは沿岸漂砂が卓越している沿岸では、沿岸方向の土砂移動が生じているが、埋め立て地により、この土砂移動が制限される。

埋め立て区間の土砂堆積が促進される

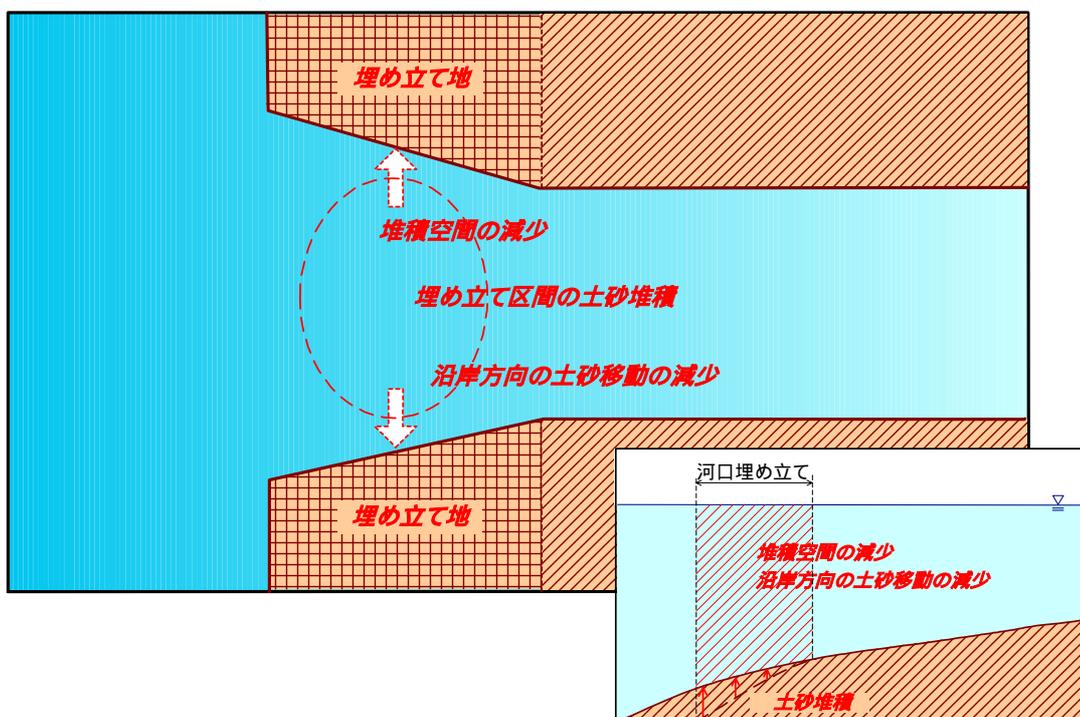
以上の結果、埋め立て区間は河川からの供給土砂の堆積が促進される結果となり、前置斜面すなわちデルタフロントが前進する。

図 4.3.3.3 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。

現象の流れ



現象のイメージ図



【備考】

- ・ 実質的に河口が沖に前進するのに伴い、デルタフロントが前進する。
- ・ 埋め立て区間の河床上昇により上流区間の河床上昇の可能性もある。

図 4.3.3.3 - 1 現象の流れ

(2) 一次判定手法

河口で埋め立てを行った場合、河川からの流出土砂の堆積領域が狭まるとともに、沿岸流等が遮断されることにより、河口土砂が沿岸方向に移動しにくくなる。従って、埋め立て区間の河床が上昇する可能性が高く、二次判定を行うことを原則とする。

(3) 二次判定手法

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.3.3 - 1 に示す変化を表 4.3.3.3 - 1 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

河道及び河口海域の平面的な地形メッシュ(格子点位置、標高)を設定する。この地形に波浪条件を与えて、波浪変形計算、海浜流計算を実施する。

一方、埋め立て区間を含む河道の断面特性(水位(H)～流積(A)～径深(R)～水面幅(B))を設定し、河床変動計算を行うことにより土砂収支を求める。必要に応じて、この土砂収支を考慮した地形データでの波・流れによる海底変形を評価する。

2) 予測条件

波浪変形計算を行う際の沖波条件(波高・波向・周期)は、河岸干潟・砂州の地形変化に寄与すると考えられる波向で年最大規模程度の波あるいは、エネルギー平均波を設定することを基本とする。

また、入射波向は、海底地形に応じて、屈折、回折、浅水変形の影響度を考慮して設定する。

また、流況条件は主に地形変動に寄与すると考えられる平均年最大流量程度を想定する。

表 4.3.3.3 - 1 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
埋め立て地により、 土砂の堆積空間が減少する	<ul style="list-style-type: none"> 河川縦横断形状 海浜・海底地形^{*1} 	河床高、海底高平面分布の作成	
沿岸流等による 沿岸方向の土砂移動がなくなる	<ul style="list-style-type: none"> 沖波波高、波向、周期^{*1} 沿岸流速^{*1} 漂砂量^{*1} 	【沿岸流速】 波浪変形計算と二次元海浜流計算 により予測	波浪変形モデルは種々提案されており、状況に応じて選択する必要がある。非定常緩勾配方程式による解析がよく用いられる。また、砕波を考慮する場合は砕波モデルを組み込む必要がある。 2次元海浜流計算は、一般的な手法である。
埋め立て区間の土砂堆積が促進される	<ul style="list-style-type: none"> 流量、潮位 供給土砂量（海浜地形変動量） 流速鉛直縦断分布 	【供給土砂量・地形変化】 流砂量式、河床変動計算 により予測できる。 （波・流れ共存場における海浜地形変形モデルでも評価できる可能性あり）	

*1 河道内の河床変動計算のみ行う場合は必要ない

(4) 二次判定のための調査手法

1) 流速鉛直縦断分布*

目的：シミュレーションモデルの検証

調査地点：必要に応じ、汽水域内で数地点

* 調査分析手法の「流向流速分布の計測」(p 調査 - 4) 参照

2) 供給土砂量（掃流砂、浮遊砂）

目的：シミュレーションの境界条件（同定）

調査地点：汽水域の上流

調査時期・頻度：洪水の立ち上がりから低減期にかけて1～2時間間隔程度

備考：流砂形態（掃流砂・浮遊砂等）に応じて適当な手法を選択する

3) 漂砂量

目的：シミュレーションの境界条件

調査地点：河口含む沿岸で数地点

調査時期：洪水前後、高波浪前後等、土砂移動の活発な時期

備考：長期的な土砂収支の把握も重要である。

4) 沿岸流速

目的：シミュレーションの検証

調査地点：河口を含む沿岸

調査時期・頻度：ある程度の長期にわたる連続観測

4.3.4 河口域での海砂採取によるレスポンスの調査・分析

4.3.4.1 河口砂州の縮小・後退、砂州高の変化

移動限界水深よりも浅い場所で海砂採取を行う場合には、二次判定により河口砂州や汀線の変化を予測し問題の有無を判断する。

(1) 人為的改変によるレスポンス

砂～砂利河川の河口に形成された、河口テラスでの海砂採取により、掘削穴が形成されると、掘削穴での土砂捕捉が生じる。この結果、河口テラスの縮小や海底勾配が急になるなどの変化が生じ、波浪の変形、打ち上げ高の上昇などから河口砂州形状が大きく変化することがある。

また、土砂捕捉により漂砂が減少すると周辺汀線の後退等が生じることになる。

人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

河口テラスに掘削穴が形成される

河口テラスでの海砂採取は、一箇所でも継続的に実施されることがあり、大規模な掘削穴を形成することがある。

河川からの供給土砂が掘削穴に捕捉される

掘削穴が移動限界水深より深く形成されている場合、掘削穴に落ち込んだ河川からの供給土砂や漂砂は、波浪の影響を受けることがなくなり、捕捉されたままになる。

河口テラスが縮小する

掘削穴が供給土砂や周辺の土砂を捕捉していくので、河口テラスも掘削穴周辺から変形し、縮小していく。

砕波点の移動、水深の変化

河口テラスの縮小に伴い、掘削穴周辺の海底は急勾配になって砕波点が河口に近づき、或いは水深が深くなる等の変化を生じる。

河口砂州、汀線が後退する

河口砂州は、河口テラスでの堆積土砂を波浪が河口に打ち上げることにより形成されるが、河口テラスが縮小し、移動可能な土砂量が減少していることから、河口砂州も縮小し、縮小規模が著しい場合は、河道の中へと後退していく。また、河口テラスに堆積した河川からの供給土砂は、波浪の作用を受け沿岸漂砂となって周辺の海浜を形成する。従って、河口テラスでの移動可能な土砂量の減少は周辺汀線の後退を生じる可能性が高い。

波の打ち上げ高が増す

砕波点の河口側への移動や水深の変化により、テラス周辺の波の変形状況が変化し、砂州への波の打ち上げ高（遡上高）が増す。

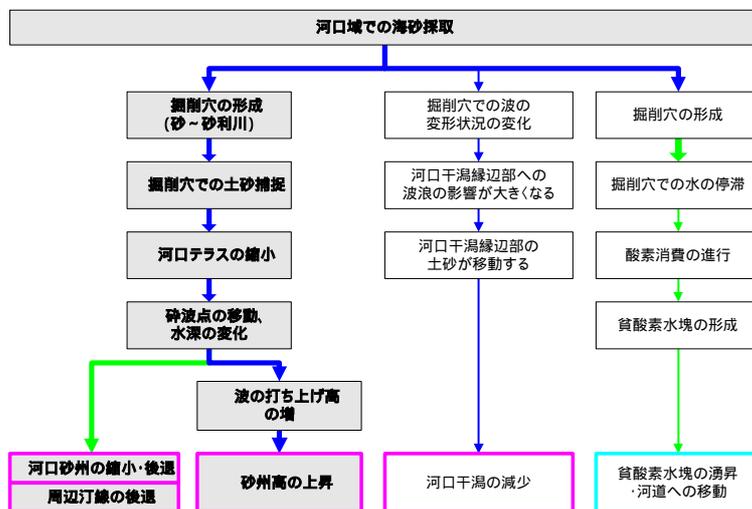
砂州高が上昇する

砂州や砂浜は、波によって打ち上げられた土砂によって形成され、その高さは概ね波の打ち上げ高と同程度となる。従って、波の打ち上げ高が上昇すると砂州高や砂浜高も同様に変化することとなる。なお、このような砂州高の上昇は、砂利採取の規模

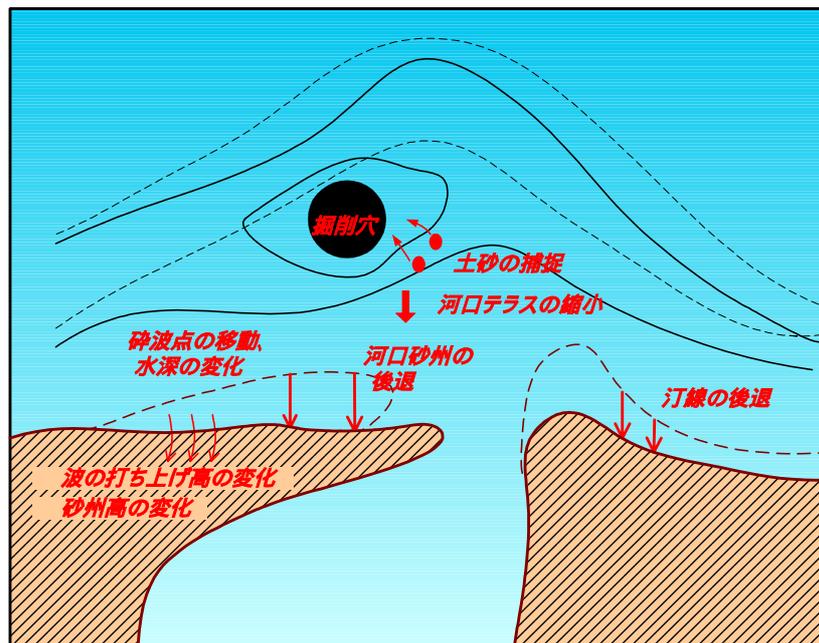
と土砂供給のバランスによっては長期的に砂州高が低下していく可能性もある。

図 4.3.4.1 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。

現象の流れ



現象のイメージ図



【備考】

- ・ 河口テラスを持つような、比較的勾配が急な砂利河川、砂河川に生じやすい。
- ・ 河口テラスの地形が変化することから、波の変形状況が変化し河口砂州の形状が変形することがある。
- ・ 砂州の形状変化は、航路がある場合等は特に問題となることがある。

図 4.3.4.1 - 1 現象の流れ

(2) 一次判定手法

河口砂州や河口テラスの主な構成材料の移動限界水深よりも浅い場所で海砂採取を行った場合には、影響が大きくなる可能性が高いため二次判定を行う。特に外海に面した波の強い河川で生じやすいので注意が必要である。移動限界水深は次のように求める。

1) 移動限界水深

河口砂州や河口テラスの主な構成材料の移動限界水深より浅いところでは、波浪により河口砂州や河口テラスが変形し、水深変動が顕著に生じる。従って、過去の海浜断面から水深変動の標準偏差を求めることにより、移動限界水深を把握することができる。

(図 4.3.4.1 - 2 参照)

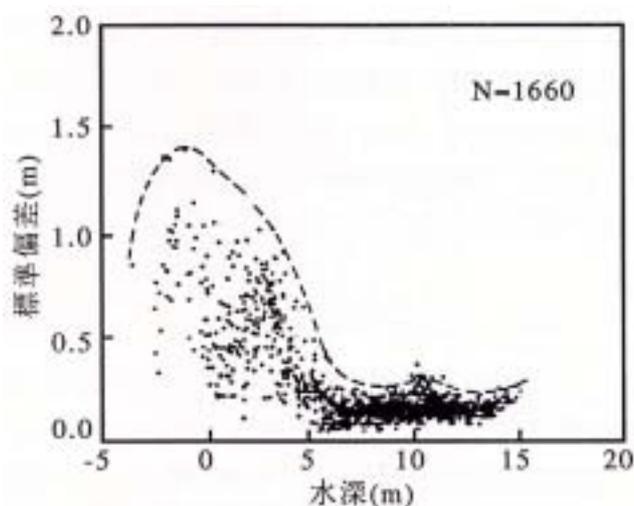


図 4.3.4.1 - 2 平均水深と水深の時系列的変動を調査した事例
出典:漂砂環境の創造に向けて 土木学会

2) 移動限界水深の事例

全国の海岸の移動限界水深が、表 4.3.4.1-1 に整理されており、これより概略把握することが可能である。

表 4.3.4.1 - 1 波による地形変化の限界水深の一覧

図番号	名 称	波による地形変化の 限界水深: A_L (m)	判断の基礎 となる図	図番号	名 称	波による地形変化の 限界水深: A_L (m)	判断の基礎 となる図
3.1.1	北海道野付崎津海岸	4	図3.1.9	3.5.5	静岡県駿河海岸	8	図3.5.75
3.1.2	北海道甘高海岸	6	図3.1.17	3.5.6	静岡県相良五浜海岸	3	図3.5.85
3.2.1	青森県青森海岸	2	図3.2.3	3.5.7	静岡県電津海岸	10	図3.5.101
3.2.2	青森県三沢海岸	8	図3.2.12	3.5.8	静岡県浜名湖今切川河口部	13	図3.5.118, 112
3.2.3	宮城県石巻沿岸	8	図3.2.17	3.5.10	三重県鈴鹿川河口部	2.5	図3.5.125
3.2.4	福島県北部～宮城県南部沿岸	9	図3.2.28	3.5.11	三重県御座海岸	1.7	図3.5.132
3.2.5	宮城県仙台湾沿岸	8	図3.2.36	3.5.12	三重県七尾湖浜海岸	10	図3.5.141
3.2.6	秋田県能代沿岸	14↑	図3.2.47	3.6.1	京都府浅茂川海岸	5	図3.6.9
3.2.7	山形県沿岸	15↑	図3.2.58, 59	3.6.3	兵庫県東播海岸	1.5 (江岸→島) 1.5 (谷→木)	図3.6.24 図3.6.29
3.3.2	茨城県神岡上海岸	9	図3.3.14	3.6.4	兵庫県淡路島内田海岸	4.5	図3.6.44
3.3.4	茨城県龍島灘沿岸	8	図3.3.40	3.7.1	鳥取県岩美海岸	10	図3.7.4～9
3.3.6	千葉県富津岬	2～3	筆定値	3.7.2	鳥取県鳥取海岸	14	図3.7.22
3.3.7	神奈川県湘南・西湘海岸	7	図3.3.73	3.7.3	鳥取県若生海岸	8	図3.7.27
3.4.1	新潟県神林海岸	7	図3.4.7	3.7.4	島根県若海川河口部	6	図3.7.39
3.4.2	新潟県新潟海岸	8	図3.4.11, 16	3.7.6	山口県八幡海岸	5.5	図3.7.90
3.4.4	新潟県柏崎港～荒浜海岸	11	図3.4.35	3.8.1	徳島県高松(古野川河口～築港部)	7	図3.8.4
3.4.5	新潟県直江津海岸	8	図3.4.39～45	3.8.2	徳島県今津町野海岸	7	図3.8.6
3.4.6	新潟県直江川・青海海岸	8		3.8.3	高知県高知海岸 (物部川河口～浦戸湾)	11	図3.8.11
3.4.7	新潟県根知海岸	9	図3.4.63	3.8.4	高知県高知海岸 (仁淀川河口～桂浜)	10	図3.8.22
3.4.8	新潟県市振海岸	9	図3.4.71	3.9.1	大分県黒島海岸	2	図3.9.3
3.4.9	富山県境海岸	8	図3.4.79	3.9.2	宮崎県宮崎海岸	10	図3.9.11, 12
3.4.10	富山県下新川海岸	9	図3.4.89	4.1	茨城県瀧戸川河口部	0.7	図4.1.6
3.5.1	静岡県藤原海岸	10	図3.5.7	4.2	茨城県茨+浦戸島地区	0.5 (浮島1号) 0.5 (浮島2号)	図4.2.4 図4.2.9
3.5.2	静岡県富士川河口部	8	図3.5.16	4.3	滋賀県琵琶湖川野瀬川河口部	1.2	図4.3.5
3.5.3	静岡県富士海岸	12	図3.5.24	4.4	島根県宍道湖島+崎砂州	0.5	図4.4.4
3.5.4	静岡県静岡・清水海岸	7 (静岡) 7 (清水)	図3.5.39～41 図3.5.53～54				

出典:「日本の海岸侵食」 宇多高明

(3) 二次判定手法

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.4.1 - 1 に示す変化を表 4.3.4.1 - 2 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

現況海浜断面の汀線位置と海底勾配を設定する。この地形条件に入射波の条件、供給土砂量等を与えて汀線変化を予測する。

また、予測された断面形状をもとに打ち上げ高を算定する。

2) 予測条件

波浪変形計算を行う際の沖波条件(波高、周期、波向)は、河岸干潟・砂州の地形変化に寄与すると考えられる波向の年最大規模程度の波あるいは、エネルギー平均波を設定することを基本とする。

また、入射波向は、海底地形に応じて、屈折、回折、浅水変形の影響度を考慮して設定する。

表 4.3.4.1 - 2 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
河口テラスに掘削穴が形成される	・海浜・海底地形	-	
河川からの供給土砂が掘削穴に捕捉される	・供給土砂量 ・沖波波高、波向、周期 ・海浜・海底地形（汀線位置） ・潮位 ・漂砂量	【海浜地形】 汀線変化モデル、等深線モデルから強制的に土砂を系外に排出するような疑似解析が考えられる。	汀線変化モデル、等深線モデルは概ね確立された手法である。 掘削穴の挙動、形状を反映することは困難 2次元海浜変形計算が考えられるが、砕波帯内の解析は研究レベルである。
河口テラスが縮小する 砕波点が移動、水深が変化する 河口砂州、汀線が後退する	・供給土砂量 ・沖波波高、波向、周期 ・海浜・海底地形 ・潮位 ・漂砂量	【河口砂州の形状・汀線位置】 汀線変化モデル、等深線モデルから強制的に土砂を系外に排出するような疑似解析が考えられる。	汀線変化モデル、等深線モデルは概ね確立された手法である。 掘削穴の挙動、形状を反映することは困難 2次元海浜変形計算が考えられるが、砕波帯内の解析は研究レベルである。
波の打ち上げ高が増す	・海浜・海底地形 ・沖波波高、波向、周期	【波の打ち上げ高】 改良仮想勾配法などにより予測できる	打ち上げ高の算定方法としては、一般的である。
砂州高が上昇する	・砂州高	【砂州高】	定量的な予測は困難。波の打ち上げ高と同程度になる。

(4) 二次判定のための調査手法

1) 供給土砂量(掃流砂、浮遊砂)

目的: シミュレーションの境界条件

調査地点: 汽水域の上流

調査時期・頻度: 出水時

備考: 上下流2点以上の観測により土砂収支を把握することが望ましい。

2) 漂砂量

目的: シミュレーションの境界条件

調査地点: 河口含む沿岸で数地点

調査時期: 洪水前後、高波浪前後等、土砂移動の活発な時期

備考: 長期的な土砂収支の把握も重要である。

4.3.4.2 河口干潟の減少

河口干潟を有する河口域の浅いところで海砂採取を行う場合や、現況において波浪による河口干潟の位置、規模、形状の変化が大きい場合は、二次判定により汀線や河口地形の変化を予測し問題の有無を判断する。

(1) 人為的改変によるレスポンス

砂河川の河口付近で海砂採取を行うと、地形変化により波向が変わり河口干潟の変化が、また河口干潟の前面で海砂採取を行うと掘削穴部分への土砂移動が生じ、河口干潟の減少となる可能性がある。

人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

掘削穴での波の変形状況の変化

水深の深い掘削穴付近を通過することで波の変形状況が変化する。

河口干潟縁辺部への波浪の影響が大きくなる

波向の変化が生じ、また波の碎波点が干潟縁辺部に近くなり、波浪による影響が大きくなる。

河口干潟縁辺部の土砂が移動する

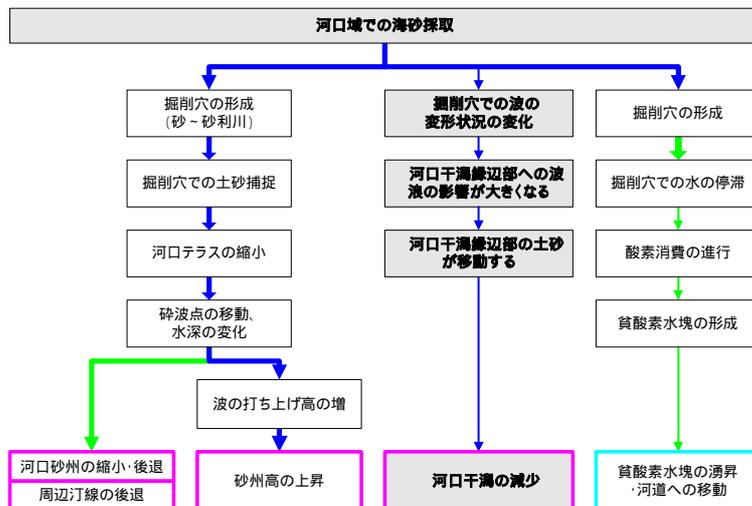
波浪の影響が大きくなることで、河口干潟縁辺部の土砂が移動されやすくなり、特に引き潮時に沖合方向移動する。

河口干潟の減少

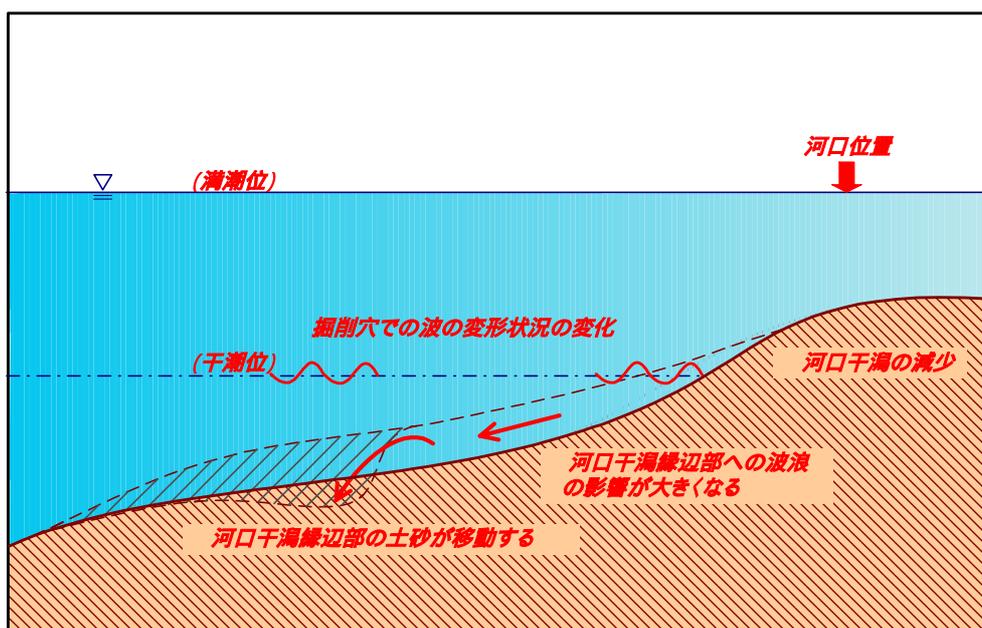
この繰り返しで河口干潟が侵食され縮小する。

図 4.3.4.2 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。

現象の流れ



現象のイメージ図



【備考】

- ・ 河口干潟を形成するような、細粒径で遠浅の海浜に生じやすい。
- ・ 掘削後、もとの海浜勾配を維持する方向の地形変化によって河床低下を生じる。

図 4.3.4.2 - 1 現象の流れ

(2) 一次判定手法

河口干潟を有する河口域では、河川からの土砂（浮遊砂の場合が多い）の供給と河口域での潮汐流や波浪等の作用により地形が成り立っている。このような河口域の浅いところで海砂採取を行う場合は原則として二次判定を行う。なお、現況において波浪による河口干潟の位置、規模、形状の変化が大きい場合は二次判定を行う。

(3) 二次判定手法

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.4.2 - 1 に示す変化を表 4.3.4.2 - 1 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

現況海浜断面の汀線位置と海底勾配を設定する。この地形条件に入射波の条件、供給土砂量等を与えて汀線変化を予測する。

2) 予測条件

波浪変形計算を行う際の沖波条件（波高、周期、波向）は、河岸干潟・砂州の地形変化に寄与すると考えられる波向で年最大規模程度の波あるいは、エネルギー平均波を設定することを基本とする。

また、入射波向は、海底地形に応じて、屈折、回折、浅水変形の影響度を考慮して設定する。

表 4.3.4.2 - 1 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
掘削穴での波の変形状況の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・沖波波高、波向、周期 ・海浜・海底地形 ・潮位 	【波高・波向分布】 波浪変形計算 により予測	波浪変形モデルは種々提案されており、状況に応じて選択する必要がある。非定常緩勾配方程式による解析がよく用いられる。 また、砕波を考慮する場合は砕波モデルを組み込む必要がある。
河口干潟縁辺部への波浪の影響が大きくなる	<ul style="list-style-type: none"> ・沖波波高、波向、周期 ・海浜・海底地形（汀線位置） ・潮位 		
河口干潟縁辺部の土砂が移動する	<ul style="list-style-type: none"> ・供給土砂量 ・沖波波高、波向、周期 ・海浜・海底地形 ・潮位 ・漂砂量 	【河口干潟の形状・汀線位置】 汀線変化モデル、等深線モデル から強制的に土砂を系外に排出するような疑似解析が考えられる。	汀線変化モデル、等深線モデルは概ね確立された手法である。 掘削穴の挙動、形状を反映することは困難 2次元海浜変形計算が考えられるが、砕波帯内の解析は研究レベルである。
河口干潟が減少する	<ul style="list-style-type: none"> ・供給土砂量 ・沖波波高、波向、周期 ・海浜・海底地形 ・潮位 ・漂砂量 		

(4) 二次判定のための調査手法

1) 供給土砂量(掃流砂、浮遊砂)

目的：シミュレーションの境界条件

調査地点：河口

調査時期・頻度：出水時

備考：流砂形態(掃流砂・浮遊砂等)に応じて適当な手法を選択する。

2) 漂砂量

目的：シミュレーションの境界条件

調査地点：河口含む沿岸で数地点

調査時期：洪水前後、高波浪前後等、土砂移動の活発な時期

備考：長期的な土砂収支の把握も重要である。

4.3.4.3 貧酸素水塊の湧昇・河道への移動

海砂採取後の掘削穴では、水が停滞し酸素消費の影響により貧酸素水塊が形成される可能性があるため、一定以上の深さの掘削となる場合には、二次判定により溶存酸素濃度を予測し問題発生の有無を判断する。

(1) 人為的改変によるレスポンス

海砂採取により形成された掘削穴では、水が滞留しやすく光が届きにくいことから貧酸素化しやすい。これらの貧酸素水塊が波浪や風の影響によって湧昇すると底生生物等のへい死や青潮の原因となることがあるので注意が必要である。

人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

河口テラスに掘削穴が形成される

河口テラスでの海砂採取は、一箇所で継続的に実施されることがあり、大規模な掘削穴を形成することがある。

掘削穴の水が停滞する

掘削穴の内部は、波浪や流れの影響を受けにくく、内部の水は停滞するようになる。

掘削穴で酸素消費が進む

掘削穴内部では底泥等による酸素消費が進む。

掘削穴で貧酸素水塊が形成される

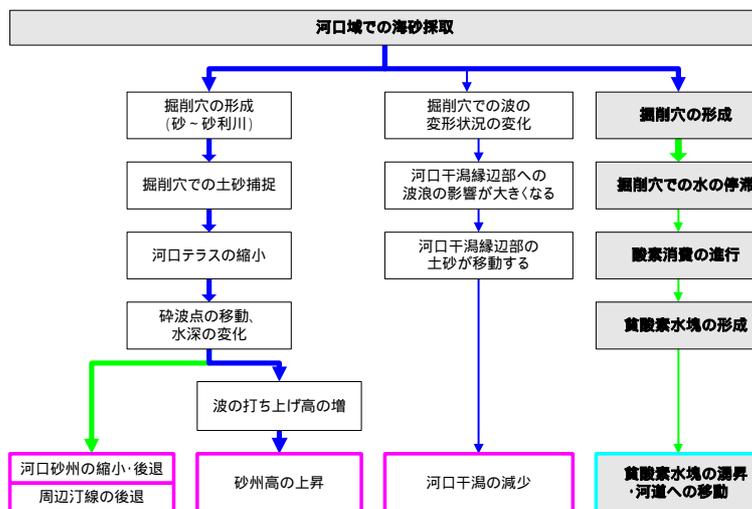
水の交換が少なく、さらに酸素消費が進むと掘削穴内部では貧酸素水塊が形成されるようになる。

風・波等の影響により、貧酸素水塊が湧昇され河道内へ移動する

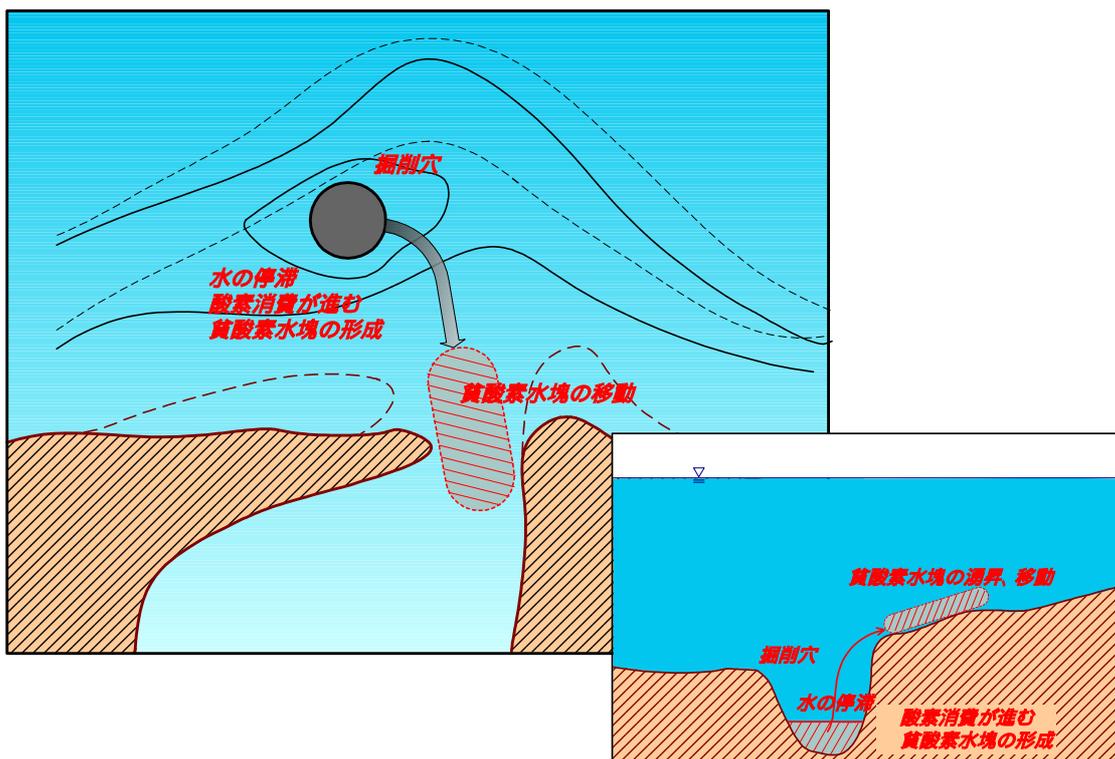
強風や高波浪等の外力が大きくなると、掘削穴内部の貧酸素水塊が押し出されるような形で湧昇することがある。貧酸素水塊の湧昇は、底生生物等のへい死等の原因となることがあるので注意が必要である。

図 4.3.4.3 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。

現象の流れ



現象のイメージ図



【備考】

- ・掘削穴では水が滞留しやすいことと、光が届きにくいことから貧酸素化しやすい。
- ・貧酸素水塊が湧昇すると、底生生物等のへい死などの原因となる。

図 4.3.4.3 - 1 現象の流れ

(2) 一次判定手法

海砂採取後の掘削穴では、水が停滞し酸素消費の影響により貧酸素水塊が形成されるとともに硫酸イオンが還元される可能性がある。内湾など閉鎖的な海域では密度成層やセイシュによる影響があり、水の動きが複雑であるため、掘削穴での水の停滞を判断するのは難しいが、東京湾では掘削範囲 800m 幅に対して深さ 6~8m 程度で貧酸素水塊が見られた事例もあり、この程度以上の深さの掘削となる場合には二次分析を行う。

(3) 二次判定手法

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.4.3 - 1 に示す変化を表 4.3.4.3 - 1 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

現況及び海砂採取後の海底地形データを作成する。これを選択したシミュレーションモデルに与えて、溶存酸素濃度分布を予測する。

溶存酸素計算は、水中や底泥による酸素消費項を加えて行う。

2) 予測条件

流況条件は、塩水くさびの攪拌が弱い渇水時の条件を基本とする。

潮位条件は、貧酸素水塊が形成されやすい夏期の半月周潮の潮位を与えることが基本となる。

また、水温に関わる条件も酸素消費が活発な高水温の条件を与える。

貧酸素水塊の湧昇や移動については、波や風、潮流の条件と適切に与える必要がある。

表 4.3.4.3 - 1 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
河口テラスに掘削穴が形成される	・海浜・海底地形	-	
掘削穴の水が停滞する	・流量 ・潮位 ・水位 ・塩分鉛直縦断分布 ・流速鉛直平面分布	【流速分布】 三次元密度流拡散計算により予測	三次元密度流拡散計算：各種三次元計算手法は提案されているが、掘削穴等の地形を考慮する計算には技術的課題がある。
掘削穴で酸素消費が進む	・流量 ・潮位 ・水中酸素消費速度 ・底泥酸素消費速度 ・溶存酸素鉛直平面分布	【酸素消費】 三次元密度流拡散計算に溶存酸素収支項を付加して予測	三次元密度流拡散計算：各種三次元計算手法は提案されているが、掘削穴等の地形を考慮する計算には技術的課題がある。
掘削穴で貧酸素水塊が形成される	・溶存酸素鉛直平面分布	【溶存酸素濃度】 三次元密度流拡散計算に溶存酸素収支項を付加して予測	酸素収支項：水中の有機物濃度の変化が顕著な場合は、有機物濃度の拡散計算も行い、これに応じた酸素消費速度を設定する必要がある。
風・波等の影響により、貧酸素水塊が湧昇され河道内へ移動する	・溶存酸素鉛直平面分布	【貧酸素水塊の移動】 同上の手法で風等の条件を与え、水塊の移動を予測	貧酸素水塊の湧昇等の定量化は、研究段階にある。

(4) 二次判定のための調査手法

1) 底泥及び水中の酸素消費速度

調査地点：河口から有光層より深いところまで(周辺に深み等があれば適宜追加する)

調査時期・頻度：酸素消費が活発な夏期

備考：風速等の条件を考慮することが望ましい

2) 流速鉛直平面分布*

目的：シミュレーションの検証

調査地点：河口から有光層より深いところまで(周辺に深み等があれば適宜追加する)

調査時期・頻度：酸素消費が活発な夏期

備考：風速等の条件を考慮することが望ましい

* 調査分析手法の「流向流速分布の計測」(p 調査 - 4) 参照

4.3.5 橋梁の建設によるレスポンスの調査・分析

4.3.5.1 橋梁上流の河岸干潟の細粒化、粗粒化・侵食

橋梁建設予定地上流に干潟がある河川で、外海に面した河川や、内湾でも橋梁建設予定地まで波浪侵入が見込まれる河川では、二次判定により河床の粒度や河岸の変化を予測し問題発生の有無を判断する。

(1) 人為的改変によるレスポンス

河口部での橋梁建設により波の変形状況が変化し、主に橋梁上流で新たな遮蔽域を形成する可能性がある。遮蔽域では波高が減少するため、波浪による土砂輸送が抑制され、干潟等の細粒化が生じることがある。逆に反射域では波高が増し、干潟等の粗粒化が生じることがある。

人為的改変とレスポンスの連関は次の変化で説明できる。

< 河岸干潟の細粒化 >

橋脚背後（上流）に波の遮蔽域が形成され、波高が減衰する

河口部で橋梁を建設すると、波の変形状況が変化し、橋梁の上流に新たな遮蔽域が形成され、回折波となって波向が変化し、波高が減少する。

波の遮蔽域の底面摩擦力が減少する

遮蔽域では波向が変化し波高が減少することにより、新たな堆積域が形成されるとともに河床に作用する底面摩擦力が減少するとともに、橋脚の背後に循環流が形成される。

波による移動限界粒径が小さくなる

底面摩擦力が小さくなるため、波により輸送され得る粒径（移動限界粒径）が小さくなる。

波浪による微細粒子の流出が抑制される

輸送可能な粒径が小さくなるとともに、循環流により細粒分が運ばれ、微細粒子が堆積しやすくなる。

橋脚上流の河岸干潟が細粒化する

橋脚の上流側に干潟等が存在する場合、これらが細粒化することがある。

< 河岸干潟の粗粒化・侵食 >

橋脚により波の反射域が形成され、波高が増す

河口部で橋梁を建設すると、橋梁に波が当たって反射し上流で波が強くなる。

波の反射域の底面摩擦力が増す

反射域では波が強くなることにより、河床に作用する底面摩擦力が増す。

波による移動限界粒径が大きくなる

底面摩擦力が大きくなるため、波により輸送され得る粒径（移動限界粒径）が大きくなる。

波浪による微細粒子の流出が生じる

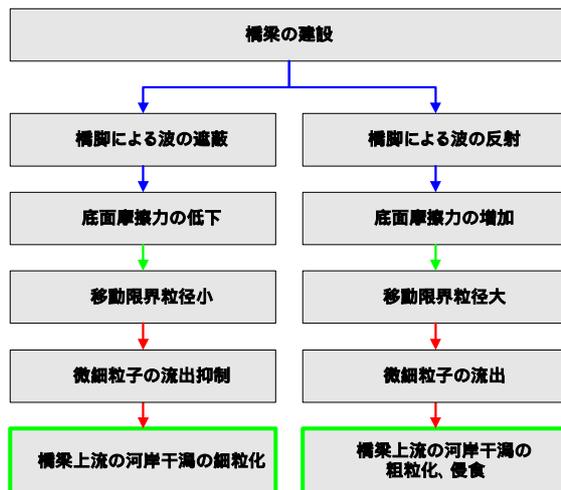
輸送可能な粒径が大きくなり、微細粒子が流出しやすくなる。

橋脚上流の河岸干潟が粗粒化・侵食

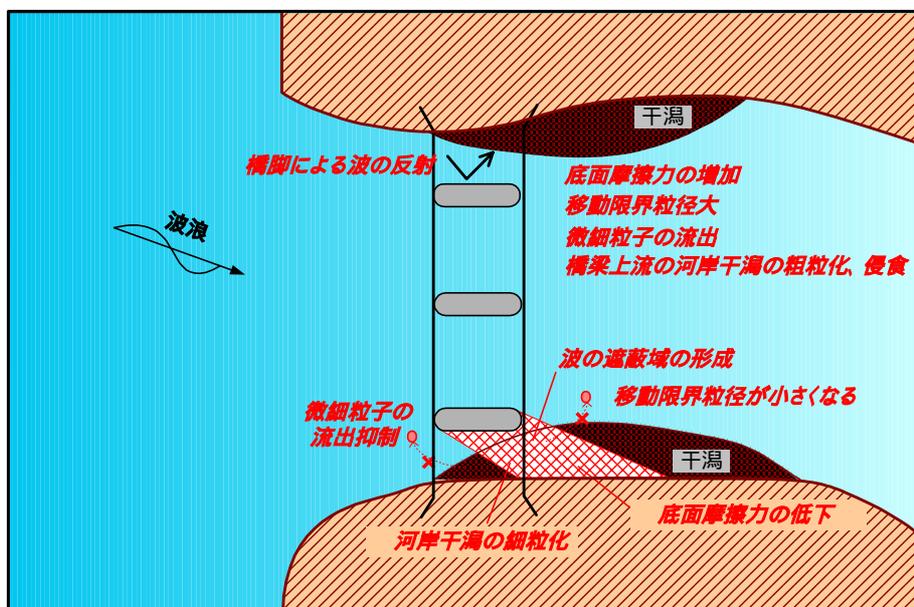
橋脚の上流側に干潟等が存在する場合、これらが粗粒化或いは侵食されることがある。

図 4.3.5.1 - 1 には人為的改変から生じるレスポンスの流れの模式図を示す。

現象の流れ



現象のイメージ図



【備考】

- ・ 橋脚回りに局所的な洗掘を生じる。

図 4.3.5.1 - 1 現象の流れ

(2) 一次判定手法

波浪による影響の大きい外海に面した河川で橋梁予定地上流に干潟を持つ河川では、二次判定を行うことを原則とする。内湾に面する河川については、以下に示す波浪侵入の推定を行い、干潟のある橋梁建設予定地まで波浪侵入が見込まれる場合に二次判定を行う。

1) 波浪の侵入状況の推定

近傍の波浪観測結果より、波高、波向の出現状況を整理して、波浪の侵入状況を推定する。適当な観測地点が存在しない場合には、高波浪時の航空写真、または現地での目視により推定する。また、複数の写真を比較することにより、河岸干潟・砂州の形状変化や移動の傾向をみることができ、この傾向から逆に波浪侵入形態を推察することができる。

(3) 二次判定手法

シミュレーションを用いた予測は図 4.3.5.1 - 1 に示す変化を表 4.3.5.1 - 1 に示す手法で分析することで行われる。

1) 手順

橋脚の形状を考慮し、河道地形メッシュ(格子点位置、標高)を設定する。この地形条件に沖波及び入射波の条件を与えて波浪変形計算を行い、波高、波向等から土砂移動量(漂砂量)を求め、汀線変化を予測する。

2) 予測条件

波浪変形計算を行う際の沖波条件(波高、周期、波向)は、河岸干潟・砂州の地形変化に寄与すると考えられる波向で年最大規模程度の波あるいはエネルギー平均波を設定することを基本とする。

また、入射波向は、海底地形に応じて、屈折、回折、浅水変形の影響度を考慮して設定する。

表 4.3.5.1 - 1 シミュレーションを用いた現象の分析

対象とする現象	調査項目	分析手法	技術水準等
橋脚の背後（上流）に波の遮蔽域が形成され、波高が減衰する	<ul style="list-style-type: none"> ・海浜・海底地形 ・沖波波高、波向、周期 ・潮位（水位） ・波高分布 	【波高分布】 波浪変形計算 により予測	波浪変形モデルは種々提案されており、状況に応じて選択する必要がある。非定常緩勾配方程式による解析がよく用いられる。 また、砕波を考慮する場合は砕波モデルを組み込む必要がある。
橋脚の前面（上流）に波の反射域が形成され、波高が増す			
波の遮蔽域の底面摩擦力が低下する	<ul style="list-style-type: none"> ・流速 	【底面摩擦速度】 底面摩擦速度の算定式 により予測	底面摩擦速度の算定式は種々提案されている。 汀線変化モデルでの検討には用いない。
波の反射域の底面摩擦力が増加する			
波による移動限界粒径が小さくなる	<ul style="list-style-type: none"> ・流量 ・流速 ・河床材料の粒度組成 	【移動限界粒径】 限界掃流力の式等 による移動限界粒径の判定	波・流れ供存場における移動限界摩擦速度の評価に技術的課題がある。 また、混合粒径での評価は現状では困難である。
波による移動限界粒径が大きくなる			
波浪による微細粒子の流出が抑制される	<ul style="list-style-type: none"> ・流砂量 ・沖波波高、波向、周期 ・潮位（水位） ・供給土砂量 ・河川縦横断形状 ・河床材料の粒度組成 	【河岸形状】 汀線変化モデル* の応用が考えられる	波浪による河岸侵食への適用例はない。 汀線変化モデルでは、河川流量を取り込むことは困難である。 波浪変形計算、海浜流計算に基づく海浜地形変化モデルでは、河岸（汀線）変化を予測することができない。
波浪による微細粒子の流出が増す			
橋脚上流の河岸干潟が細粒化する	<ul style="list-style-type: none"> ・河床材料 	【河床材料】 混合粒径の汀線変化モデル* により概略検討できる可能性がある	波浪による河岸侵食への適用例はない。 汀線変化モデルでは、河川流量を取り込むことは困難である。 波浪変形計算、海浜流計算に基づく海浜地形変化モデルでは、河岸（汀線）変化を予測することができない。 干潟等の非定常性、粗粒化等の分級過程を評価することは困難。 混合粒径の汀線変化モデルは、学会、委員会等の場では用いられているが、実際の計画への適用例はない。
橋脚上流の河岸干潟が粗粒化、侵食される			

*汀線変化モデルは砂（非粘着性）が前提であることから、泥河川での河岸の侵食への適用は難しく適用事例もない。ただし、粘着性土砂の侵食・堆積の実態を調査し、漂砂量係数を同定して与えることで擬似的に表現できる可能性はある。

(4) 二次判定のための調査手法

1) 供給土砂量（掃流砂、浮遊砂）

目的：シミュレーションの境界条件

調査地点：汽水域の上流

調査時期・頻度：出水時

備考：上下流2点以上の観測により土砂収支を把握することが望ましい。

4.3.6 汽水域の現象と二次判定のための調査・分析手法との関係

4.3.1 から 4.3.5 に示す二次判定を行うに際しては、表 4.3.6 - 1 及び表 4.3.6 - 2 に示すような調査・分析手法を適宜組み合わせ用いれば良い。

表 4.3.6 - 1 汽水域の現象と二次判定のための現地調査項目との関係

現象 (レスポンス)	調査項目	流速鉛直縦断分布	酸素消費速度(底泥・水中)	詳細な土質分析	供給土砂量	流速鉛直平面分布(海域)	漂砂量	沿岸流速
4.3.1 河道の掘削によるレスポンスの調査・分析								
4.3.1.1	塩分上昇							
4.3.1.2	河道底層の貧酸素化							
4.3.1.3	河床表層の細粒化							
4.3.1.4	河岸粗粒化、河岸侵食、河岸干潟の侵食							
4.3.1.5	河床構成材料の細粒化							
4.3.1.6	周辺汀線の後退、河口砂州(テラス)の縮小・後退							
4.3.2 河口導流堤の建設によるレスポンスの調査・分析								
4.3.2.1	河岸粗粒化、河岸侵食、河岸干潟の侵食、周辺汀線の変化							
4.3.3 河口部の埋め立てによるレスポンスの調査・分析								
4.3.3.1	河岸干潟の細粒化、河岸干潟の侵食							
4.3.3.2	塩水くさびの下流側への移動							
4.3.3.3	埋め立て区間の河床上昇							
4.3.4 河口域での海砂採取によるレスポンスの調査・分析								
4.3.4.1	河口砂州の縮小・後退、砂州高の変化							
4.3.4.2	河口干潟の減少							
4.3.4.3	貧酸素水塊の湧昇・河道への移動							
4.3.5 橋梁の建設によるレスポンスの調査・分析								
4.3.5.1	橋梁上流の河岸干潟の細粒化、粗粒化・侵食							

表 4.3.6 - 2 汽水域の現象と二次判定のための分析手法との関係

現象の把握のための分析手法		淡塩二層流計算	密度流拡散計算	一次元分散方程式	溶存酸素収支計算	不等流計算・不定流計算	河床変動計算	河口幅予測モデル	波浪変形計算	汀線変化モデル	等深線変化モデル	二次元海浜流計算	海浜地形変形モデル
現象	分析手法												
塩水遡上													
貧酸素化水塊の形成													
河床・河岸・河岸干潟の形成													
河口地形・河口干潟の形成													

二次判定のための分析手法		淡塩二層流計算	密度流拡散計算	一次元分散方程式	溶存酸素収支計算	不等流計算・不定流計算	河床変動計算	河口幅予測モデル	波浪変形計算	汀線変化モデル	等深線変化モデル	二次元海浜流計算	海浜地形変形モデル
現象 (レスポンス)	分析手法												
4.3.1 河道の掘削によるレスポンスの調査・分析													
4.3.1.1 塩分上昇													
4.3.1.2 河道底層の貧酸素化													
4.3.1.3 河床表層の細粒化													
4.3.1.4 河岸粗粒化、河岸侵食、河岸干潟の侵食													
4.3.1.5 河床構成材料の細粒化													
4.3.1.6 周辺汀線の後退、河口砂州(テラス)の縮小・後退													
4.3.2 河口導流堤の建設によるレスポンスの調査・分析													
4.3.2.1 河岸粗粒化、河岸侵食、河岸干潟の侵食、周辺汀線の変化													
4.3.3 河口部の埋め立てによるレスポンスの調査・分析													
4.3.3.1 河岸干潟の細粒化、河岸干潟の侵食													
4.3.3.2 塩水くさびの下流側への移動													
4.3.3.3 埋め立て区間の河床上昇													
4.3.4 河口域での海砂採取によるレスポンスの調査・分析													
4.3.4.1 河口砂州の縮小・後退、砂州高の変化													
4.3.4.2 河口干潟の減少													
4.3.4.3 貧酸素水塊の湧昇・河道への移動													
4.3.5 橋梁の建設によるレスポンスの調査・分析													
4.3.5.1 橋梁上流の河岸干潟の細粒化、粗粒化・侵食													

* 底質は河床材料調査に加え、必要に応じて先端付近で溶存酸素の測定位置について底質を調べる。

おわりに

本手引書では、我が国の汽水域の河川環境における特徴や物理・化学的現象および人為的改変とレスポンスとの連関等を、既往文献、一級河川におけるアンケート調査、事例などを踏まえながら示した。また、汽水域における河川環境の状況およびそれを形成する物理・化学的現象を把握し、人為的改変によるレスポンスを予測するための調査・分析手法を示した。

本手引書により、中小河川も含めた現場における河川環境の適切な把握と管理がより充実するものと期待されるところであるが、汽水域における現象は複雑・多様なものであり、また土地利用の変化など流域の影響を常に受けることや、人為的改変による生態系への影響は長い時間を経て現れる場合があることを踏まえると、現況把握のための現地調査は継続していく必要があり、さらに人為的改変を行った場合にはそれによる河川環境の変化をモニタリングしていくことが重要である。モニタリングを行うに際しては、課題や地域性を念頭に置き、目的を明確にした上で項目、場所、期間、および頻度等を適切に設定する必要がある。

本手引書のとりまとめに際し、生物の取り扱いが課題となった。汽水域の環境を保全していく上で、どのような生物が生息・生育しているかは環境の状況を知る上で重要であるとともに、多様な生物が生息・生育していること自体が環境保全の目的そのものでもある。しかしながら、汽水域における生物とその生息・生育環境との連関については未解明な部分が少なくないことや生物の活動によっても物理・化学的現象が変化する場合もあり、現象の理解が一層困難になる恐れがあったことなどから、本手引書では、まず物理・化学的現象を中心にとりまとめ、生物へ与える影響については扱わないこととした。この点については、今後さらに現地における調査・研究を進め、知見を集積していく必要があると考えている。

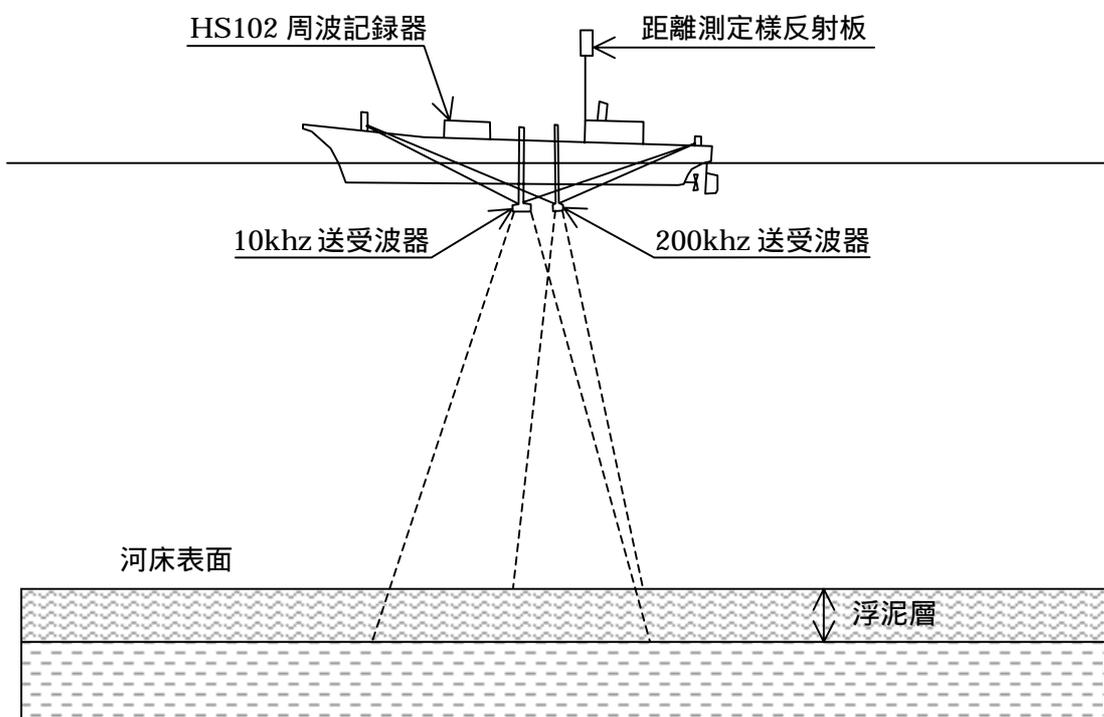
< 現地調査手法 >

目 次

ソナーを利用した河道横断形状の測定	調査 - 1
ビデオ撮影による砂州動態観測（尻別川の例）	調査 - 2
セパレート型の圧力計による水位の測定	調査 - 4
塩分濃度の計測（塩分計、魚群探知機の利用）	調査 - 5
多項目水質計による計測	調査 - 7
流向流速分布の計測	調査 - 8

ソナーを利用した河道横断形状の測定

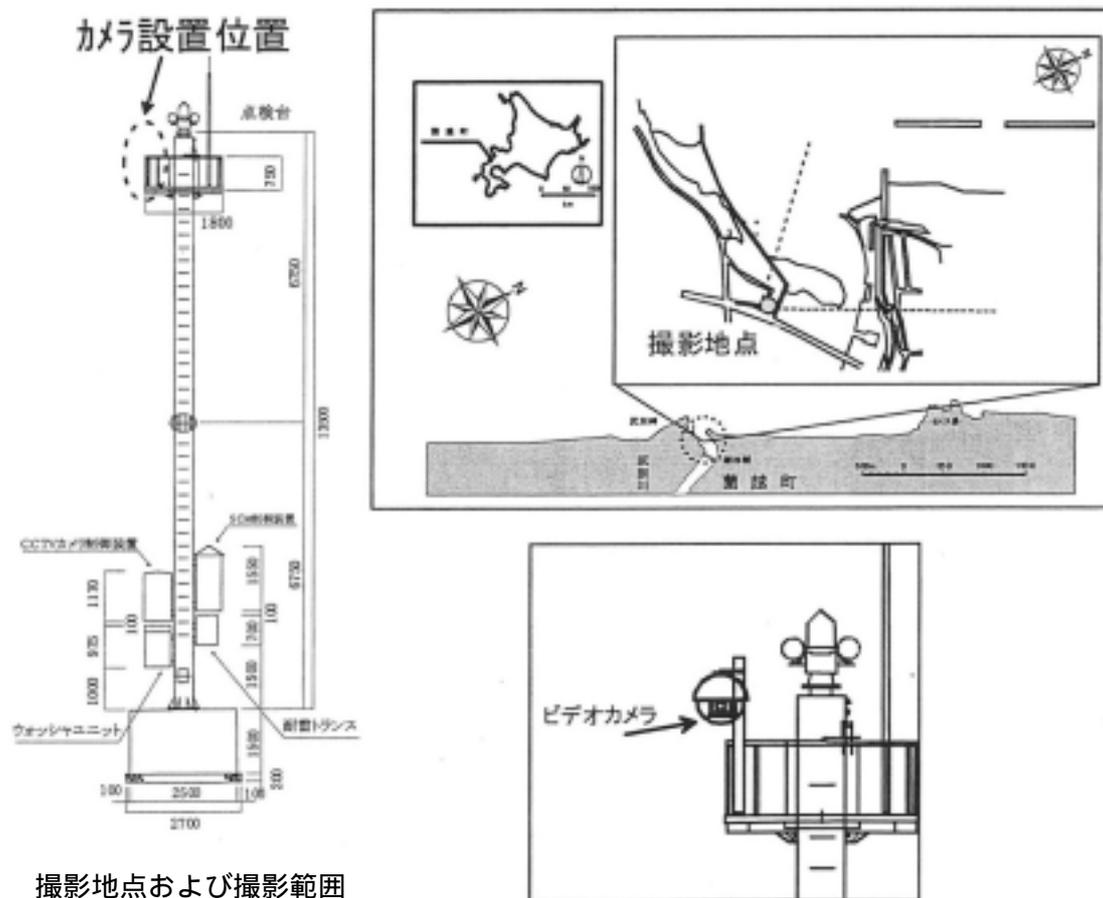
- ハビタットとしての汽水域の地形を把握するためには、河道形状を詳細に測定することが望ましいが、測線を増すには時間と費用を要する。
- 近年は、ソナーを用いた水深測定により、短時間に地形を測定することが可能になっている。
- 船にソナーを装備し、予定測線を陸上からのトランシットおよびレーザー測距儀を使用して誘導し河床面からの反射波により水深を測定する。
- 水位が時々刻々に変化するため、水位測定等による換算が必要となる。
- 河床にヘドロが堆積している場合には、2周波のソナーを用いることによりヘドロの厚さを測定することも出来る。ただし、各周波数がどの層で反射しているかは現地における底質調査により対応づけを行う必要がある。



河道縦横断形状の測定イメージ
(A川において河床と浮泥層表面を測定した例)

ビデオ撮影による砂州動態観測（尻別川の例）

- 河口砂州の状況は、変化が急であることから横断測量の他、影像によって追跡する方法が考えられる。
- 定点にビデオカメラを設置し、砂州のフラッシュ現象を撮影（通常時：1回/日、出水時：1回/30分毎に撮影し、連続的に観測）する。
- 撮影した現地映像は現場から離れた場所にて受信できるシステムを付加し、パソコン等でデータを蓄積することも可能である。



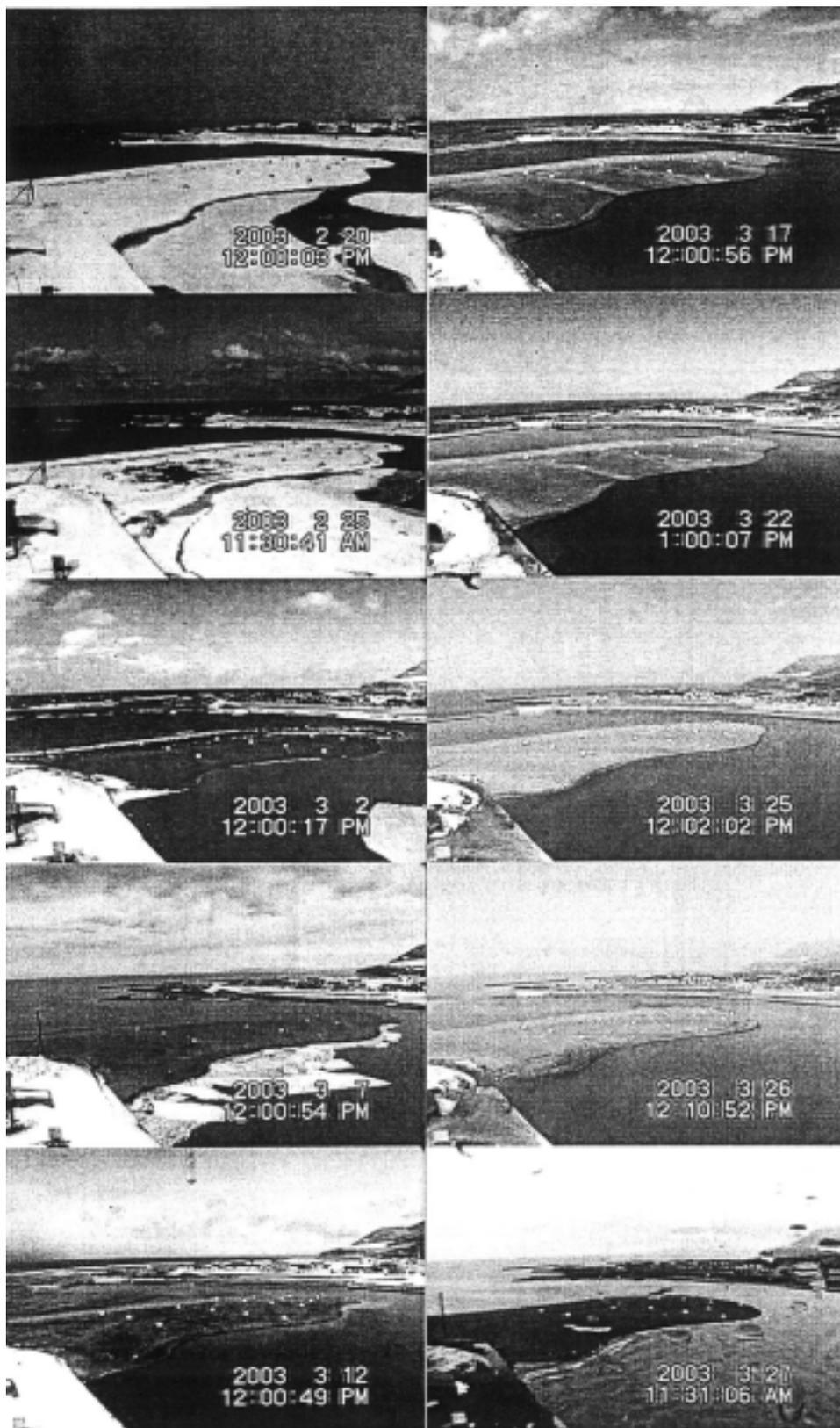
撮影地点および撮影範囲



基準標識の設置状況写真

（出典：平成14年度 尻別川河口部水理特性調査業務 報告書 平成15年3月 北海道開発局 小樽開発建設部）

撮影結果（砂州の変化）の例

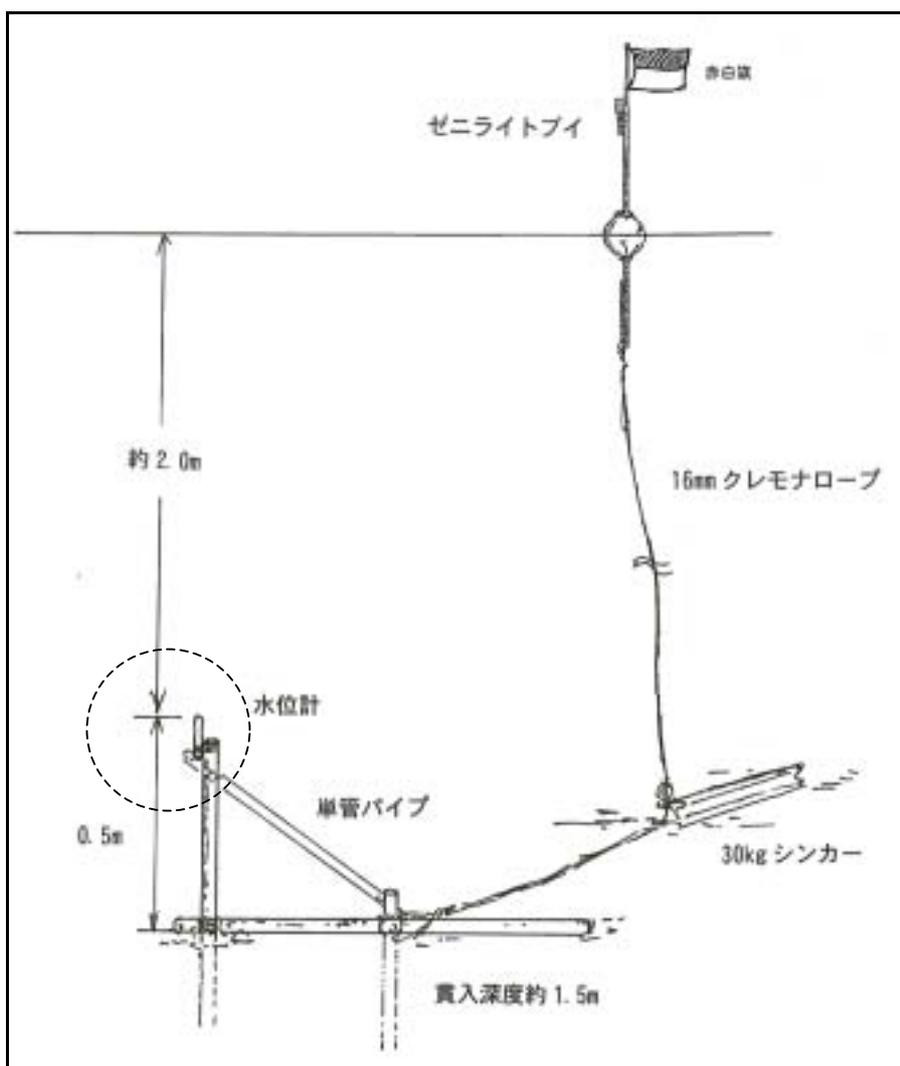


河口砂州の変化写真

(出典:平成 14 年度 尻別川河口部水理特性調査業務 報告書 平成 15 年 3 月 北海道開発局 小樽開発建設部)

セパレート型の圧力計による水位の測定

- 汽水域において縦断的な水位を把握する場合には、水位計を多数設置する必要がある。配線を要しないセパレート型の圧力計による水位の測定は設置が容易で安価に計測が可能である。
- 自記メモリーを組み込んだ圧力センサーを水中に設置し、水位を観測する。
- 配線を必要とせず小型で設置が容易である反面、故障した場合にもメンテナンス時点まではわからない欠点もある。
- 干潮時に露出したり船舶の航行に支障を及ぼさないように設置する。



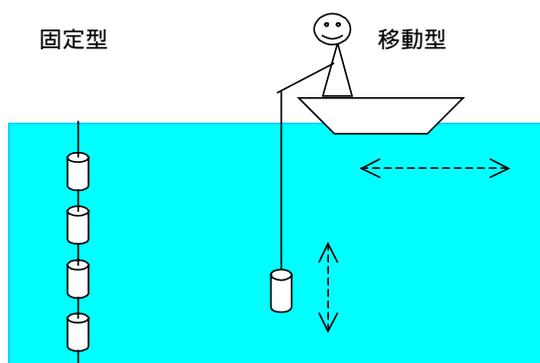
水位計設置例 (A 川の例)

塩分濃度の計測（塩分計、魚群探知機の利用）

- 汽水域における塩分の侵入状況は潮汐によって変化するため、短時間に濃度分布を把握する必要がある。
- 近年の機器の発達により、塩分濃度を連続的に測定することが可能となっている。

1) 塩分計を利用する方法

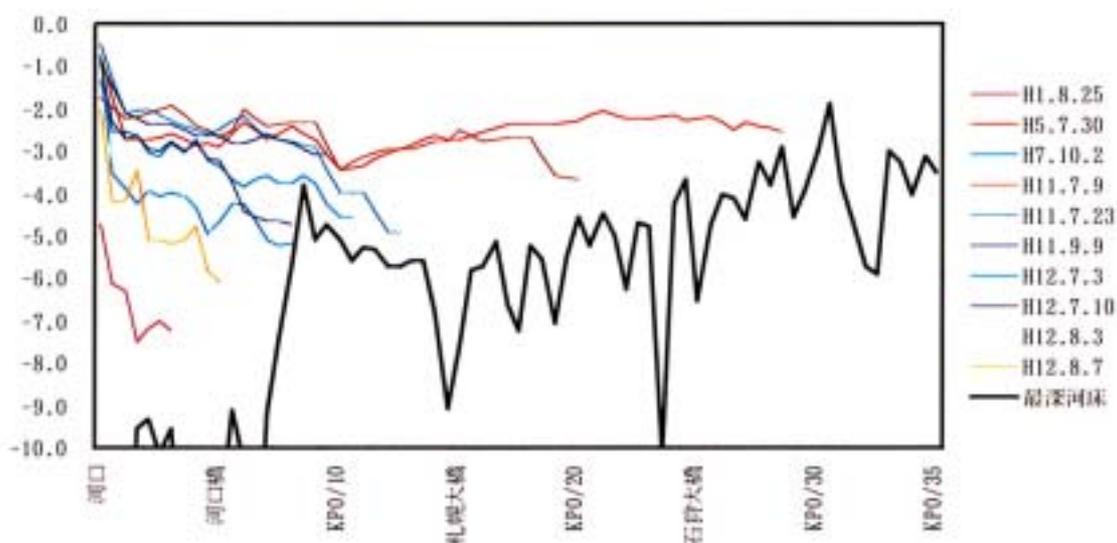
- 塩分計を利用して船上から任意の深度の塩分を計測する方法で、船を移動させながら塩分の空間分布を計測したり、ある水域の詳細な淡塩水界面の挙動を把握することができる。
- 水圧計を備えて自由落下により 20cm ピッチ程度の水深間隔で測定可能なものもある。
- 自記（自動記録）式塩分計を水面付近から河床付近までの任意の間隔で設置し、塩分変化を長期間連続計測する方法もある。
- 自記式塩分計は、任意の計測時間間隔を設定でき、電池の寿命やメモリー容量にも左右されるが、1時間の計測時間間隔の場合でも約1年間の連続計測が可能な機器もある。



塩分成層の計測方法のイメージ図

2) 魚群探知機を利用する方法

- 塩分や濃度の密度差が大きくなると反射強度が大きくなる魚群探知機（超音波探査機）の性質を利用し、汽水域の変密度境界面（淡塩水境界面）の挙動を映像で把握する方法で、周波数 107kHz が最も鮮明な映像を映し出すことができる。
- 観測船の船舷に魚群探知機のセンサー部を水中に 50cm 程度沈めて固定し、微速移動（5ノット前後）しながら計測する。
- 計測データはノートパソコン等に取り込み、反射強度毎に色指定に変換し、逐次パソコン画面に映像化して表示するように制御プログラムを作成する。
- D G P S 測位機能を内蔵した魚群探知機を利用することにより、計測位置と水深のデータが同時に得られるため、汽水域全域の状況、海水の入退状況や混合形態を把握するのに有効である。
- 適宜、塩分の鉛直分布や水深の実測結果と対比して映像の妥当性を検証することや、水面や河床からの強い反射強度のみを抽出し、雑音を除去することに留意する必要がある。

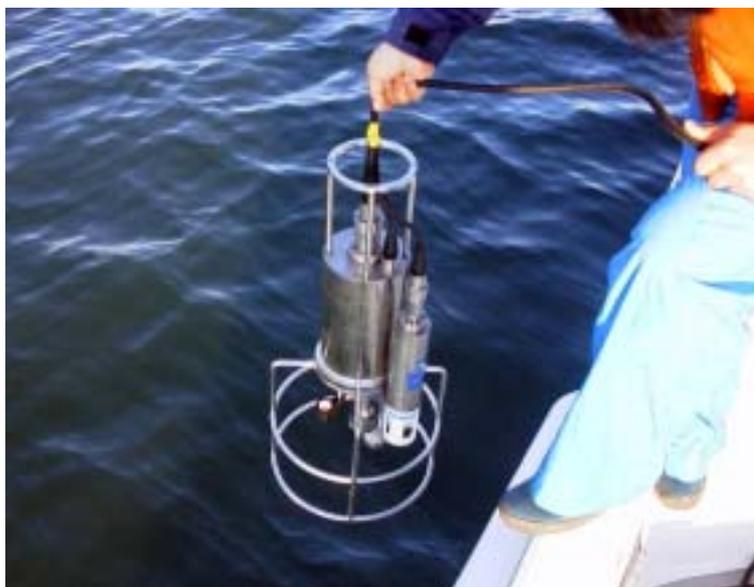


超音波による塩分濃度の鉛直分布測定事例

出典：山崎郁子等 石狩川における塩水遡上について 北海道開発局技術研究発表会 発表概要集

多項目水質計による計測

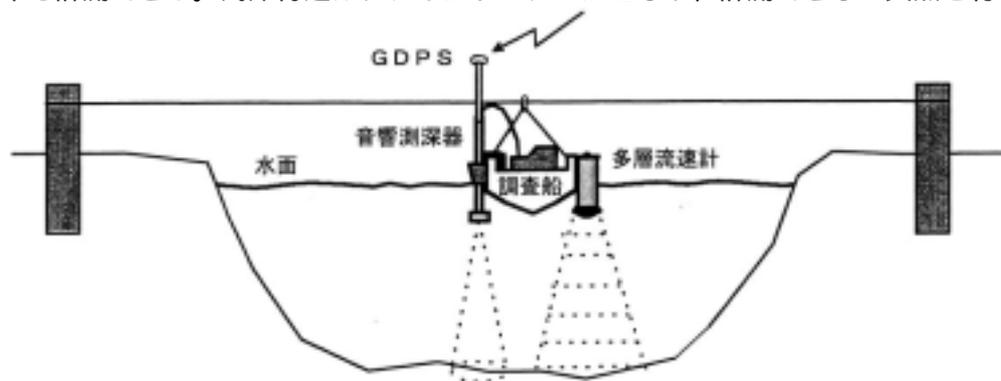
- 塩分濃度、水温、溶存酸素濃度、濁度を測定する際に、近年それらを同時に測定することができる多項目水質計が実用に供されるようになってきている。
- 多項目水質計による計測によって、複数の項目を同一測点で同時に測定することが可能となり、さらに作業効率が向上することで短時間に汽水域全体のデータを取得することができ、時間的な変化の大きい汽水域において水質の実態をより正確に把握することが可能となる。
- さらに多項目水質計による計測経費については、個々に計測するよりもコストの面でも有利である。
- 多項目水質計ではセンサーを付け替えるなどにより、上記の項目以外にも pH、クロロフィル a なども計測することが可能である。
- 多項目水質計の場合、たとえば溶存酸素や pH は応答速度が遅いため、より正確な計測を行うためには各計測点における静止時間を長く取るなどの対応が必要となる。



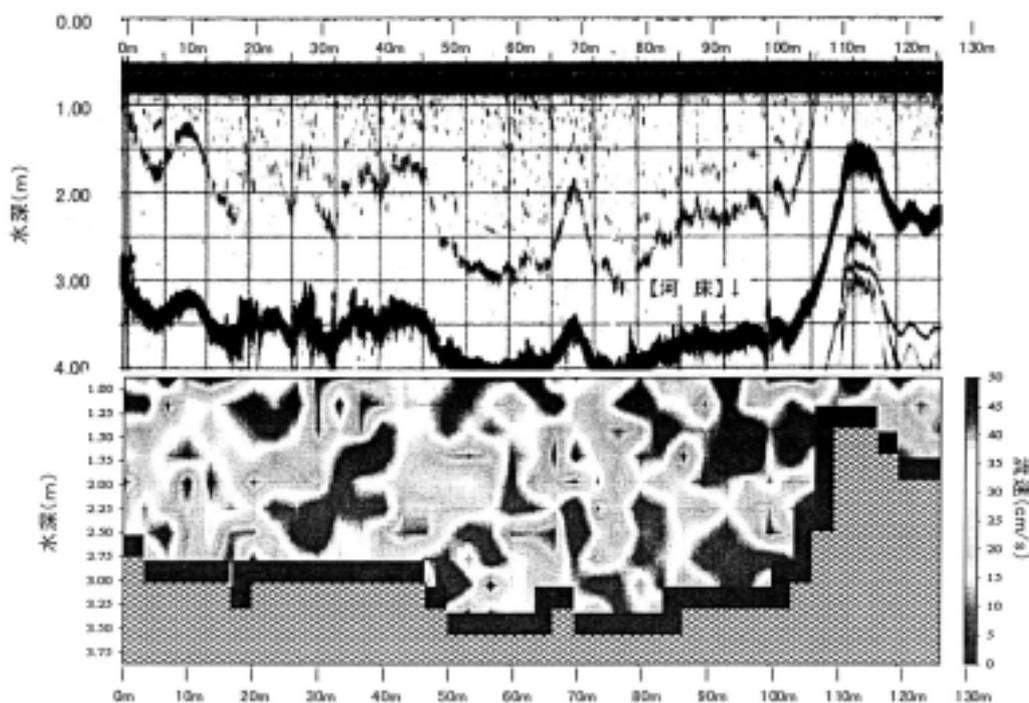
多項目水質計による計測状況

流向流速分布の計測

- 汽水域においては潮汐により流向流速が時々刻々変化している。また、上層と下層で流向が異なる場合もある。
- 汽水域における複雑な流れは、A D C P (Acoustic Doppler Current Profilers) を用いて、流向流速分布を計測することで把握できる。目的に応じてA D C Pを使い分けるとよい。
- A D C Pを船舷に固定し、川の横断方向に船を移動させながら横断方向の流向流速分布を計測する方法である。計測する横断(測線)を変えることで、縦断方向の流向流速分布も計測できる。河床付近はブラインド・ゾーンとなり、計測できない欠点を有する。



航行観測装置の設置方法



ADCPによる結果の一例

(出典:平成14年度 尻別川河口部水理特性調査業務 報告書 平成15年3月 北海道開発局 小樽開発建設部)

- A D C Pを、計測する測線の流心付近の河床に設置し、ビームを上向きに発射することによって流心付近の流向流速分布を計測する河床設置型、A D C Pを護岸や護岸付近に設置した杭(H鋼など)に横向きに(ビームを横断方向に発射するように)固定し、河川横断方向の流向流速分布を計測する(H - A D C P (Horizontal type of Acoustic Doppler Current Profilers)) 河岸設置型もある。

< 分析手法 >

目 次

淡塩二層流計算	分析 - 1
密度流拡散計算	分析 - 3
溶存酸素収支	分析 - 5
一次元分散方程式	分析 - 6
不等流計算、不定流計算	分析 - 7
河床変動計算	分析 - 9
河口幅予測モデル	分析 - 12
波浪変形計算	分析 - 13
汀線変化モデル	分析 - 15
等深線変化モデル	分析 - 17
二次元海浜流計算	分析 - 18
海底地形変形モデル	分析 - 20

淡塩二層流計算

(1) 基礎方程式

$$\frac{\partial h_1}{\partial x} = \frac{1}{\Phi} \left[-i_{f1} + i_{f2} - \varepsilon F_{d1}^2 i_0 + \varepsilon \left(1 - F_{d1}^2 - \frac{U_1}{U_2} F_{d1}^2 \right) E + \frac{U_1^2 - U_2^2}{gB} \frac{\partial B}{\partial x} - \frac{h_1}{U_1 \rho_2} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} - \frac{\rho_1 h_1}{\rho_2^2} \frac{\partial \rho_2}{\partial x} + \frac{2U_1}{gh_1} \frac{\partial h_1}{\partial t} - \frac{2U_2}{gh_2} \frac{\partial h_2}{\partial t} - \frac{1}{gh_1 B} \frac{\partial Q_1}{\partial t} + \frac{1}{gh_2 B} \frac{\partial Q_2}{\partial t} \right] \dots\dots\dots \text{式 1}$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial x} = \frac{1}{\Phi} \left[+i_{f1} + i_{f2} - \varepsilon (1 - F_{d1}^2) i_0 - \varepsilon \left(1 - F_{d1}^2 - \frac{U_1}{U_2} F_{d1}^2 \right) E - \frac{U_1^2 - U_2^2}{gB} \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{h_1}{U_1 \rho_2} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\rho_1 h_1}{\rho_2^2} \frac{\partial \rho_2}{\partial x} - \frac{2U_1}{gh_1} \frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{2U_2}{gh_2} \frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{1}{gh_1 B} \frac{\partial Q_1}{\partial t} - \frac{1}{gh_2 B} \frac{\partial Q_2}{\partial t} \right] \dots\dots\dots \text{式 2}$$

ここに、 Q ：断面内の流量、 h ：層厚、 U ：層平均流速、 ρ ：層平均密度、添字1と2は上層および下層の水理量を表わし、 B ：水路幅、 x ：流れの方向の座標軸、 t ：時間、 i ：河床勾配、 $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$ ：相対密度差、 g ：重力加速度、 $F_{di} = U_i / \sqrt{\varepsilon g h_i}$ ($i=1, 2$) は密度 Froude 数 (かつて内部 Froude 数とも呼ばれていた)、 E は進行係数を表わす、また、 $\Phi = \varepsilon (1 - F_{d1}^2 - F_{d2}^2)$ であり、 $\varepsilon \ll 1$ を考慮し高次の項は省略されている。上層と下層の摩擦勾配は、 f_i ：界面抵抗係数、 f_b ：底面の抵抗係数を用いて以下のように与える。

$$i_{f1} = \frac{\tau_1}{\rho_1 g h_1} = \frac{f_i}{2gh_1} (U_1 - U_2) |U_1 - U_2| \dots\dots\dots \text{式 3}$$

$$i_{f2} = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\rho_2 g h_2} = \frac{f_b}{2gh_2} |U_2| U_2 - \frac{f_i}{2gh_2} (1 - \varepsilon) (U_1 - U_2) |U_1 - U_2| \dots\dots\dots \text{式 4}$$

(2) 解説

式 1, 式 2 は矩形断面河口部における微小密度差の淡塩二層流場に対して、上層への連行を考慮して導かれた基礎式である。その他、河口海域への適用を考えた水平二次元の二層流基礎方程式など種々提案されているが、前提条件の相違により、方程式の細部が異なるため適用には注意を要する。

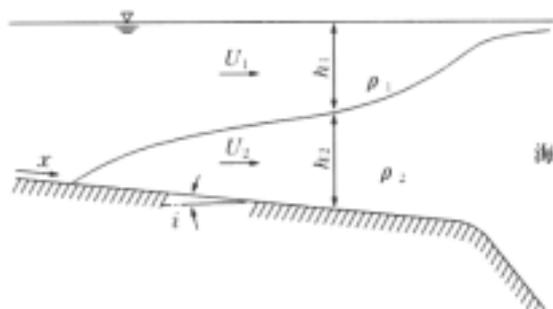


図-1 二層流場

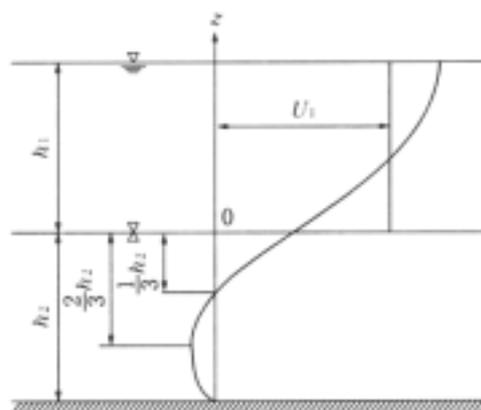


図-2 層流の流速分布

流速や密度の鉛直構造に関する研究もなされており、例えば上層流動の場合には二次元平行流の仮定の下、図-2 に示すような二次関数で与えられる層流解が示され、同様に下層流動の解も求められている。また、Monin-Obukhov 理論を適用した乱流場の流速分布や密度分布が求められている。

出典：水理公式集 [平成 11 年版] p551

密度流拡散計算

(1) 基礎方程式

1) 水の連続式

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 1}$$

2) 密度偏差の式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\Delta\rho) + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x}(\Delta\rho) + \bar{v} \frac{\partial}{\partial y}(\Delta\rho) + \bar{w} \frac{\partial}{\partial z}(\Delta\rho) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial}{\partial x}(\Delta\rho) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial}{\partial y}(\Delta\rho) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial}{\partial z}(\Delta\rho) \right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots \text{式 2}$$

3) 水温収支の式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial T}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial T}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial T}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{H}{\rho C_w} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots \text{式 3}$$

4) (生産性/非生産性) 物質収支の式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial C}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial C}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial C}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \left(\frac{O}{S} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots \text{式 4}$$

5) 運動量保存則の x - 方向分値

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{u}\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{u}\bar{w}) = f\bar{v} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Omega + \frac{p}{\rho_0} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots \text{式 5}$$

ここに τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{zx} の粘性応力はレイノルズ応力に比べて小さいため省略している。

6) 運動量保存則の y - 方向分値

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{v}\bar{w}) = -f\bar{u} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\Omega + \frac{p}{\rho_0} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots \text{式 6}$$

同様に粘性応力の項を省略して、表示している。

7) 運動量保存則の z - 方向分値

$$0 = - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \Omega + \frac{p}{\rho_0} \right) \quad \dots\dots\dots \text{式 7}$$

8) 機械的エネルギー保存則

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\bar{q}^2}{2} \right) + \left(\bar{u} \frac{\partial}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{\bar{q}^2}{2} + \Omega + \frac{p}{\rho_0} \right) \\
 &= \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + A_y \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + A_z \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \\
 & \quad + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + A_z \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + A_x \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \\
 & \quad + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + A_x \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + A_y \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) \dots\dots\dots \text{式 8}
 \end{aligned}$$

(2) 解説

基礎方程式に基づき、分析・解析の対象とする現象、範囲により、鉛直二次元（一次元・多層）、三次元（平面・多層）等にモデル化する。

一次元・多層流れ（鉛直二次元流れ）

一次元・多層流れは鉛直二次元流れともいいうるものであって、流れ方向と水深方向の流れの変化を対象とするものである。特に、水深方向の水の物理的性質の変化が解析の対象となる水理現象、すなわち、河川型貯水池の水理や水質、河口付近の河道内の淡・塩水混合などはこの分類に含まれる。しかし、これらの現象もより細分化された状況では、解析に用いる水理モデルはいろいろに分けられる。

平面・一層流れ（二次元流れ）

氾濫原や破堤による洪水の氾濫、河口域での河川水の拡がりなどのように、水深の浅い流れの平面的な挙動を支配する数値モデルである。このため、水の物理的性質の水深方向での変化を取り入れる必要はなく、 $\rho = \rho_0$ とおいてよい。平面的な拡がりによって異なるので、問題の性質、解の必要な精度などから、対象領域で大、小のコントロール・ボリュームが用いられることがある。實際上、これは格子の大きさになるから、粗格子（coarse grid）細格子（fine grid）といわれることが多い。

平面・多層流れ（三次元流れ）

平面・多層流れ（三次元流れ）の数値モデルは一次元・多層流れのそれと同時に、水表面、中間層、底面の3要素の要素から構成されている。また、積分に当たっての境界条件も平面的（x-およびy-方向）と深さ方向（z-方向）とのものの組み合わせである。

出典：岩佐義朗 編著 「数値水理学」 p29

溶存酸素収支

(1) 基礎方程式

$$\frac{\partial L}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - U \frac{\partial L}{\partial x} - (K_1 + K_3)L + L_a \quad \dots\dots\dots \text{式 1}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U \frac{\partial C}{\partial x} - K_1 L + K_2(C_s - C) + \sum_i R_i \quad \dots\dots\dots \text{式 2}$$

ここに、C：溶存酸素 (mg/l)、L：BOD 濃度 (mg/l)、 D_x ：拡散係数 (m^2/d)、U：平均流速 (m/d)、 K_1 ：脱酸素係数 (d^{-1})、 K_2 ：再曝気係数 (d^{-1})、 L_a ：流入や河床からの BOD 負荷 (mg/l/d)、 K_3 ：沈殿や吸着による BOD 除去係数 (d^{-1})、 C_s ：飽和溶存酸素 (mg/l)、 R_i ：その他の酸素消費や生成に関わる速度 (mg/l/d)。

(2) 解説

上式は、流水中の酸素分布について、流速一定と仮定した場合の一次元の収支式である。この種の理論的な取り扱いとしては、脱酸素と再曝気のみを考慮し、拡散を無視した定常状態での酸素分布を議論している Streeter と Phelps 式が代表的である。さらに懸濁性有機物の沈殿による除去や底泥からの BOD 成分の溶出負荷や光合成による酸素生成の影響も考慮した Camp の修正式もある。これらの式では、溶存酸素の代わりに飽和溶存酸素濃度との差である不足量 D で表現し直されている。また、日本のような浅い河川における付着藻類の影響を考慮した式も提案されてきている。参考として、横軸を流下時間 ($t = x/U$) で置き換えた場合の Streeter と Phelps 式による溶存酸素濃度変化を図-1 に模式的に示す。図のように、溶存酸素濃度の途中に最小値が存在する流下方向分布が、一般に溶存酸素垂下曲線 (DO Sag Curve) とよばれるものである。

また、 R_i には、以下の項で述べるような植物プランクトンや底生生物などによる呼吸、底泥による酸素消費、光合成などが含まれる。特に、湖沼や内湾での酸素収支を検討する場合には、河川などでの流水とは異なり水深方向の分布が重要である。また、収支式において有機物分解による脱酸素や再曝気以外に、光合成による供給、植物および動物プランクトンによる呼吸による消費、底泥による酸素消費の重要性が増してくる。

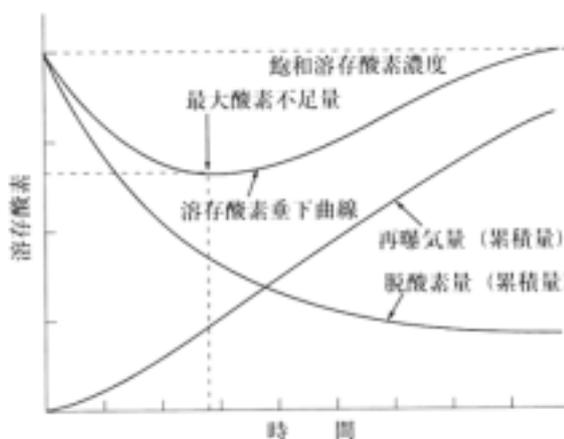


図-1 河川における酸素収支模式図

出典：水理公式集 [平成 11 年版] p604

一次元分散方程式

(1) 基礎方程式

河川や管路、また細長い湾のように、断面平均した流速や濃度で拡散現象を近似的に表現し得る場合に、一次元の分散方程式、

$$\frac{\partial A\bar{\Phi}}{\partial t} + \frac{\partial A\bar{U}\bar{\Phi}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A\bar{D}_x \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x} \right) + A\bar{L}_i(\bar{\Phi}) \quad \dots\dots\dots \text{式 1}$$

を用いて記述することも可能である。ここに、 A : 断面積、 $\bar{U}(x)$: 断面平均流速、 $\bar{\Phi}(x)$: 断面平均濃度、 $\bar{L}_i(\bar{\Phi})$: 単位断面積当たりの物質の発生や消滅、 \bar{D}_x : 流速や濃度の断面非一様の影響による分散係数

出典：水理公式集 [平成 11 年版] p616

(2) 解説

強混合型河川は国内では少ないが、潮位差の大きい西日本の河川でしばしば観測される。図-1 は有明海に注ぐ六角川で観測された塩分の縦断構造である。密度構造が水深方向に一樣で流下方向にのみ変化している。このような場合には、一次元の分散方程式でほぼ塩分構造を記述することができる。ただし、分散係数は平均の取り方によって、それぞれ種々異なったものとなる。強混合の拡散係数の算定に向けての拡散フラックスに関する実験的研究も行われている。

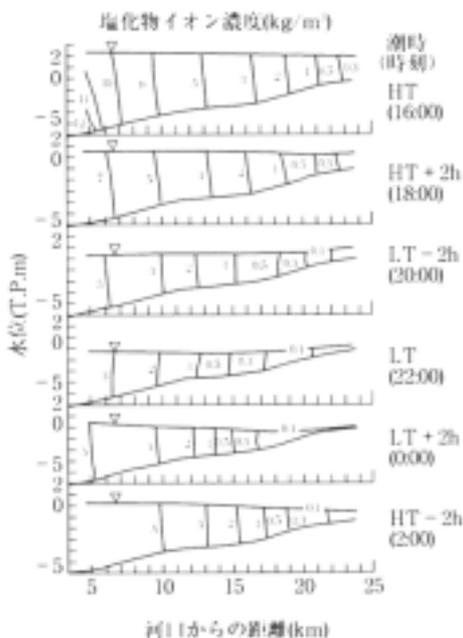


図-1 強混合河川の塩分の観測例

出典：水理公式集 [平成 11 年版] p558

不等流計算、不定流計算

(1) 基礎方程式(漸変開水路流れを記述する基礎方程式)

一次元解析法は、流れを縦断方向に一次的にとらえ、水路横断面内の水理量の分布は当該横断面を代表する少数の水理量から推定できると仮定して、水理量の縦断方向変化を計算するものである。

1) 連続の式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 1}$$

ここに、A：流れの断面積、Q：流量、x：流下方向にとった座標、t：時間

2) 運動方程式¹⁸⁾

① 運動量の法則に基づく：

$$Q^2 \frac{\partial \beta}{\partial x} + A \frac{\partial Q}{\partial t} - 2\beta Q \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\beta Q^2}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + gA^2 \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{A}{\rho} T_r = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 2}$$

運動量補正係数 $\beta = \frac{1}{A} \int \frac{u^2}{U^2} dA \quad \dots\dots\dots \text{式 3}$

ここに、H：水位、T_r：単位長さの河道の河床に作用する力(=濡辺内の平均せん断力τ_b×濡辺長S)、u：ある点の流速、U：断面平均流速

② エネルギーの法則に基づく：

$$\frac{QA}{2} \frac{\partial \beta}{\partial t} + \frac{Q^2}{2} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \beta A \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\beta + 3\alpha}{2} Q \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\alpha Q^2}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + gA^2 \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{A^2}{\rho Q} E_d = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 4}$$

エネルギー補正係数 $\alpha = \frac{1}{A} \int \frac{u^3}{U^3} dA \quad \dots\dots\dots \text{式 5}$

ここに、E_d：単位河道長・単位時間当たりの流れのエネルギー総損失量=ρg∫u・I_f・dA。ここで、I_f：各流線のエネルギー勾配

③ 単純な流れ場を想定した場合の運動方程式：

$$\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{n^2 U^2}{R^{4/3}} = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 6}$$

(2) 解説

式 2、4、6 の運動方程式は、流れの状態の時間的な変化と流下方向の変化がゆるやかであり、流れの中の圧力分布を静水圧分布に等しいとおくことのできる開水路流れを対象にしている。流れの状態の変化がゆるやかな場合には、等流を対象につくられた平均流速公式におけるせん断力やエネルギー勾配と他の水理量との関係式をそのまま適用できるとして、一般に式 2 中の T_r 、式 4 中の E_d には平均流速公式の関係をそのまま導入される。単純な断面を想定し T_r や E_d の算定に Manning の平均流速公式を用い、さらに $\alpha = 1$ 、 $\beta = 1$ とおいた場合に、式 2 あるいは式 4 から導かれるのが式 6 であり、Bernoulli (ベルヌーイ) の定理に摩擦損失を加えた式に一致する。式 2、式 4 いずれの適用も、流れの一次元的な取り扱いが必要な精度を満足することが前提となる。その上で運動量の法則に基づく一次元の運動方程式 2 については流体に作用する力についての取り扱いが、エネルギーの法則に基づく運動方程式 4 については流れのエネルギー損失についての取り扱いが容易かつ力学的に明確なことが適用条件となる。

流れの状態の変化が時間的あるいは空間的に急で、静水圧分布の仮定あるいは平均流速公式の適用、一次元解析の適用が適切でない流れについては、上記の基礎方程式とは別の取り扱いが必要である。

不等流、不定流等については、独立変数 t および x の偏微分係数が存在するかしないかによって、

- (1) $\frac{\partial}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial x} = 0 \rightarrow$ 定常等流
- (2) $\frac{\partial}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial x} \neq 0 \rightarrow$ 定常不等流 (不等流)
- (3) $\frac{\partial}{\partial t} \neq 0, \quad \frac{\partial}{\partial x} \neq 0 \rightarrow$ 非定常不等流 (不定流)
- (4) $\frac{\partial}{\partial t} \neq 0, \quad \frac{\partial}{\partial x} = 0 \rightarrow$ 非定常等流

に分類される。

出典：水理公式集 [平成 11 年版] p92
岩佐義朗 編著 「数値水理学」

河床変動計算

(1) 基礎方程式

1) 流砂の連続式

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) + (q_{sw} - c_0 w_0) \right\} = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 1}$$

ここに、 z_B ：河床高、 q_{Bx} ： x 方向掃流砂量、 q_{By} ： y 方向掃流砂量、 q_{sw} ：河床面における浮遊砂の巻き上げ量、 c_0 ：浮遊砂の底度濃度、 w_0 ：浮遊砂の沈降速度、 t ：時間、 x ：縦断方向座標軸、 y ：横断方向座標軸、 λ ：間隙率、

式 1 は、掃流砂の出入りと浮遊砂の巻き上げ・沈降による河床面での流砂の連続条件を示す。浮遊砂の濃度変化や底面における濃度は次式に記述され、

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_0)c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots \text{式 2}$$

巻き上げ量は、底面における境界条件として与えられる。

2) 次元の場合における基礎式

掃流砂による次元河床変動計算に用いる流砂の連続式

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial Bq_{Bx}}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 3}$$

流れの運動方程式と連続式

$$\frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_B}{\partial x} + \frac{u_*^2}{gR} = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 4}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (Bhu) = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 5}$$

ここに、 B ：水路幅、 h ：水深、 g ：重力加速度、 u_* ：摩擦速度。

3) 粒径別の基礎式

砂礫の粒径別の連続式

$$\frac{\partial i_b}{\partial t} - \frac{1}{a} (i_B - i_b) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{q_{Bx}}{a(1-\lambda)} \frac{\partial i_B}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 6}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial z_B}{\partial t} \geq 0 \text{ (河床上昇)}: \hat{i}_b = i_b \\ \frac{\partial z_B}{\partial t} < 0 \text{ (河床低下)}: \hat{i}_b = i_{b0} \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{式 7}$$

ここに、 i_B 、 i_b 、 i_{b0} はそれぞれ粒径 d_i の砂礫が流砂、交換層、交換層直下の元河床に占める割合、 a ：交換層の厚さ。

4) 二次元の場合における基礎式

掃流砂による二次元河床変動計算に用いる流砂の連続式

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left[\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right] = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 8}$$

横断方向の流砂量 q_{By} は、流下方向の流砂に作用する力のつり合いによって横断方向の流砂量成分を求める長谷川の式がある。

$$q_{By} = \left\{ \frac{v}{u} - \frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_k}} \left(\frac{u_{*c}}{u_*} \right) \frac{\partial z_B}{\partial y} \right\} q_{Bx} \quad \dots\dots\dots \text{式 9}$$

ここに、 u : x 方向流速、 v : y 方向流速、 u_{*c} : 限界摩擦速度、 μ_s : 静止摩擦係数、 μ_k : 動摩擦係数。

(2) 解説

これらの中で用いられる掃流砂量・浮遊砂の巻き上げ量は、流砂量式に基づいて計算される。流砂量を求めるための流速は、流れの次元運動方程式、流れの連続式から求められる。平面内での河床変動や流れの状況を求める場合には二次元河床変動計算を行う。縦断的な河床高の変動を求める場合や横断的な河床の変化が小さい場合には次元化して河床変動計算を行う。河床変動計算とともに流れ場の計算が必要となるが、流砂量や流砂の向きを求めるためには、底面付近の流れを精度良く与える必要がある。また、流れの状態や河床の状態が局所的に大きく変化している場合には、流砂の非平衡性を考慮しなければならない場合もある。

式 3~5 を整理すると、

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_{i_s} = \frac{-1}{(1-\lambda)(1-F_r^2)} \frac{\partial q_{Bx}}{\partial h} \quad \dots\dots\dots \text{式 10}$$

$$\left(\frac{\partial z_B}{\partial t} \right)_s = \frac{1}{(1-\lambda)(1-F_r^2)} \left[\frac{\partial q_{Bx}}{\partial h} \frac{u_*^2}{gR} - \left\{ F_r^2 \frac{\partial q_{Bx}}{\partial h} h + (1-F_r^2) q_{Bx} \right\} \frac{1}{B} \frac{\partial B}{\partial x} \right] \quad \dots\dots\dots \text{式 11}$$

となる。河床高は式 10 で表される波速で移動しながら、式 11 に従って変形する。式 10 において $\partial q_B / \partial h < 0$ なので、河床波の擾乱は、常流の場合には下流へ、射流の場合には上流へ進む。

式 6、7 は、河床材料が混合粒径からなるときの粒度分布の変化を予測する基礎式であり、各粒径に対する流砂量は、それぞれ個別に求められる。式 3~7、10~11 より、河床砂の粒径分布の波速は、

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_{i_s} = \frac{f_i}{(1-\lambda) a} \quad \dots\dots\dots \text{式 12}$$

$$f_i = q_{Bx} \cdot \frac{i_B}{i_b}$$

であって、河床粒度の分布は上流から下流へ伝播する。

二次元の場合は、以下に留意する。

掃流砂の運動の向きは、砂粒子に作用する流れによるせん断力・水中での重力およびその反力・底面との摩擦力の向きと大きさ，ならびに砂粒子の慣性力によって決まる．斜面の勾配の影響や粒子の運動に伴う底面摩擦の取り扱いの違いによって，種々の表現式が提案されている．例えば，池田の式は，基本的な考えは平野や長谷川と同じであり，遮蔽係数等の取り扱いの違いにより結果として横断勾配にかかる部分の係数の表現が異なっている．平野の式は，直線部の拡幅の計算に用いられたものであり，横断方向流速が 0 の場合がこれに相当する．福岡・山坂の式は，粒子にかかる力として底面せん断力と重力の斜面方向成分を考慮しているが，粒子の運動について考慮されていない．これらの中では，先にあげた成分を考慮している長谷川の式が使いやすい．ただし，この式は横断斜面勾配のみを考慮し，基本的に流下方向の流砂量が卓越しているという近似を行っている．解析に用いる式の形式やパラメーターの値が異なると洗掘深等は異なってくる．長谷川式形で縦横断の斜面勾配を考慮したものとしては，西本・清水ら，福岡・渡邊らの研究がある。

出典：水理公式集 [平成 11 年版] p174

河口幅予測モデル

(1) 基礎式

河口断面を矩形に近似し、さらに砂州幅 L 、河口水深 h を一定とすれば、河口幅予測モデルの基礎式として次式が得られる。

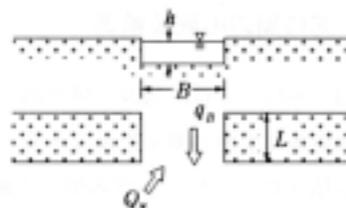


図-1 河口幅予測モデルの説明

$$(1-\lambda)Lh \frac{dB}{dt} = q_B B - Q_s \quad \dots\dots\dots \text{式 1}$$

ここで、 λ ：砂の空隙率、 q_B ：単位幅当たりの河川流・潮汐流による流送土砂量、 Q_s ：河口内に流入する漂砂量。

(2) 解説

潮汐流量の評価の際、河口河積が十分大きいときには潮位 η_0 と河口内水位 η_B が等しいとして、推算潮位や実測潮位を利用できる。そうでない場合は、狭窄部でのエネルギー損失により、潮位に比べて河口内の水位変動幅が低減するので、実測値を用いるか、あるいは次の一次元解析手法により評価しなければならない。

$$A_B \frac{d\eta_B}{dt} = Au + Q_f \quad \dots\dots\dots \text{式 3}$$

$$\eta_0 - \eta_B = \frac{L_c}{g} \frac{du}{dt} + \left(\zeta_m + \zeta_n + \frac{2gL_c}{n^2 R^{4/3}} \right) \frac{u|u|}{2g} \quad \dots\dots\dots \text{式 4}$$

ここで、 L_c ：最狭部水路長、 u ：水路内流速、 ζ_m 、 ζ_n ：入口、出口での損失係数、 n ：マンニングの粗度係数、 R ：径深、 A_B ：感潮面積、 Q_f ：河川自己流量。

外力条件が一定の場合は、式 1 の解析解を得ることができるが、一般の場合には数値計算により解を得る。式 1 による河口幅変化予測モデルは、断面変化予測モデルや開口位置変化予測モデルへと拡張されている。

以上のモデルは砂州越流の機構を含まないため、大規模な洪水時への適用は困難である。砂州越流時を含め、洪水時の土砂移動による河口近辺での洗掘、堆積の詳細を知るためには、平面二次元計算によらなければならない。数値計算は差分法や有限要素法により行われる。洪水流のみならず、波浪や潮汐変動の効果を含むものや、湾曲河道での二次元流の影響を考慮した計算も行われている。

波浪変形計算

(1) モデル方程式の仮定と理論的適用範囲

現在までに提案されている主要な平面波浪場のモデル方程式について、誘導に用いる仮定によって特徴をとりまとめると、表 1 のようになる。表中、有限振幅性の欄は波形勾配 H/L または波高水深比 H/h の有限性を取り入れているかどうかを示す。相対水深の欄は相対水深の自乗 $(h/L)^2$ の大きさ、また、海底勾配の欄は 1 波長間の水深変化の割合 $L|dh|/h$ の大きさに関する仮定を示す。局所的進行波性とは、局所的に波浪場がほぼ進行波のもの $(a \exp[i(kx - \sigma t)])$ で表されるものと仮定するかどうかを示している。

以上の仮定に基づき、平面波浪場のモデル方程式の理論的な適用範囲をとりまとめると表 2 のようになる。表には、各計算手法に対し波浪変形の諸要素および波浪の不規則性と有限振幅性に対する適用性が大まかに示されている。また、計算領域の広、中、および狭とはそれぞれ沖から浅海部を含む領域、防波堤や離岸堤などの構造物を取り囲む周辺海域、および港内海域程度を表している。

表-1 平面波浪場のモデル方程式における仮定

計算手法 (参考文献例)	海底勾配 $L \nabla h /h$	局所的進行波性 $a \exp[i(kx - \sigma t)]$	有限振幅性 $H/L, H/h$	相対水深 $(h/L)^2$
波向線法 (屈折図法) (Keller, 1958)	1次	仮定する	微小 ²⁾	任意
エネルギー平衡方程式 (Karlsson, 1969)	1次	仮定する	微小	任意
ヘルムホルツ方程式 (Galliard, 1984)	0	仮定せず	微小	任意
高山の方法 (高山, 1981)	0	仮定せず	微小	任意
緩勾配方程式 (Berkhoff, 1972)	1次	仮定せず	微小 ³⁾	任意
非定常緩勾配方程式 (波辺・丸山, 1984)	1次	仮定せず	微小	任意
数値波動解析法 (伊藤・谷本, 1971)	1次 ³⁾	仮定せず	微小	任意
非定常緩勾配不規則波動方程式(窪ら, 1991)	1次	仮定せず	微小	任意
放物型波動方程式 (Radder, 1978)	1次	仮定する ³⁾	微小 ⁵⁾	任意
非線形長波方程式 (Kojima, 1960)	任意 ²⁾	仮定せず	任意	微小(0次)
ブシネスク方程式 (Peregrine, 1967)	任意 ²⁾	仮定せず	2次	1次

- 1) 浅水係数の補正が必要
- 2) 水深そのものが小さいと仮定されている
- 3) 回折効果は入る
- 4) 波速の計算に有限振幅性を取り入れることは可能
- 5) 有限振幅性を取り入れた方程式も導かれている

表-2 平面波浪場のモデル方程式の理論的適用範囲

計算手法 (参考文献例)	浅水変形	屈折	回折	反射	幹波モデル	任意水深	流れの影響	不規則性	有限振幅性	計算領域			備考
										広	中	狭	
波向線法(屈折回法) (Keller, 1958)	○	○	×			○	○	○	△	○	○	○	波速に有限振幅性を含める
エネルギー平衡方程式 (Karlsson, 1959)	○	○	▽	△	○	○	○	○	×	○	○	○	
ヘルムホルツ方程式 (Galliard, 1984)	○	○	○	○	×	○	×	○	×			○	領域ごとに一様水深のみ
高山の方法 (高山, 1981)			○	○	×	○	×	○	×		○	○	一様水深のみ
緩勾配方程式 (Berkhoff, 1972)	○	○	○	○	○	○	○	○	△			○	
非定常緩勾配方程式 (渡辺・丸山, 1984)	○	○	○	○	○	○	○		×			○	砕波モデル・境界条件処理が容易
数値波動解析法 (伊藤・谷本, 1971)	○	○	○	○		○			×			○	
非定常緩勾配不規則波動方程式(高ら, 1992)	○	○	○	○	○	○		○	×			○	
放物型波動方程式 (Badder, 1978)	○	○	○	△	○	○	○	○	△		○	○	
非線形長波方程式 (Keller, 1959)	○	○	○	○	○	×		○	○			○	鉛直加速度が無視される 浅海域に限定される
ブシネス方程式 (Peregrine, 1967)	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	原方程式は浅海域に限定される
ガラーキン法 (潮岡・中川, 1992a)	○	○	○	○		○		○	○			○	
非線形緩勾配波動方程式 (磯部, 1984)	○	○	○	○		○		○	○			○	

○：基本形で適用可能， ○：応用形で一般的適用可能， △：応用形で部分的適用可能
 ▽：基本理論では考慮されていないが実用上適用可能， 空白：研究により適用できる可能性あり， ×：適用不可能，
 計算領域＝広：深海から浅海を含む程度， 中：構造物周辺の海域程度， 狭：港内程度。

出典：海岸波動 [波・構造物・地盤の相互作用の解析法] 土木学会

汀線変化モデル

(1) 基礎方程式

基礎方程式は以下に示す砂の連続式で表せる。

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} + \frac{1}{D_s} \left(\frac{\partial Q}{\partial y} - q \right) = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 1}$$

ここに、 x_s は汀線位置の岸沖変化量、 Q は空隙を含む沿岸漂砂量、 D_s は漂砂移動高さ、 q は岸沖方向の土砂移動量で、河川からの土砂供給量や沖方向への土砂流出量等として入力可能である。

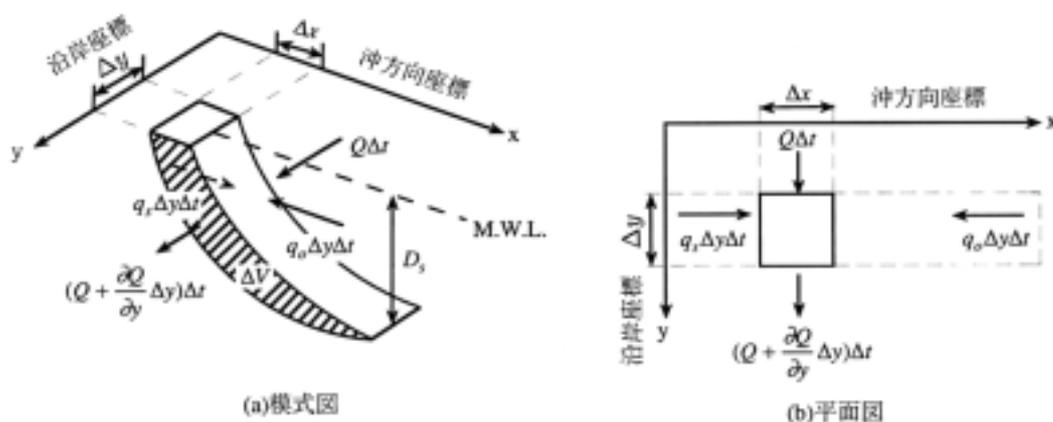


図-1 汀線変化量と土砂収支の関係

(2) 解説

汀線変化の計算は、波の場の計算、その結果から求まるところの沿岸漂砂量を用いて、以下の仮定の基に計算される。

- 1) 基本的に沿岸漂砂量の収支により汀線が変化する。
- 2) 沿岸漂砂は漂砂活動が活発な上縁と沖側限界水深で定義される漂砂帯内(移動高さ D_s) でのみ生じる。
- 3) 海底断面は漂砂帯内では汀線の前進・後退に合わせて初期断面地形に対し岸沖方向平行に変化する。

沿岸漂砂量の算定式には表-1 に示すような方法が提案されている。

表-1 沿岸漂砂量の算定式

漂砂量式	提案者	式
波換エネルギーフラックスモデル	CERC(1977)	$I = K(EC_g)_b \sin \alpha_{bs} \cos \alpha_{bs} \quad (2.3.2)$
沿岸波モデル	Kormar・Inman(1970)	$I = K'(EC_g)_b V/u_{ms} \quad (2.3.3)$
混合モデル (小笹・Brampton式)	小笹・Brampton(1979)	$I = (EC_g)_b \left(K_1 \sin \alpha_{bs} \cos \alpha_{bs} - \frac{K_2}{\tan \beta} \cos \alpha_{bs} \frac{\partial H_b}{\partial y} \right) \quad (2.3.4)$

I : 沿岸漂砂の水中重量。
 $(EC_g)_b$: 砕波点における波換エネルギーフラックス。
 H_b : 砕波波高。
 α_{bs} : 砕波点における汀線と波向のなす角度。
 K, K', K_1, K_2 : 漂砂量係数。
 $\tan \beta$: 海底勾配。
 V : 沿岸の流速を代表する値。
 u_{ms} : 砕波点における底面軌道流速振幅

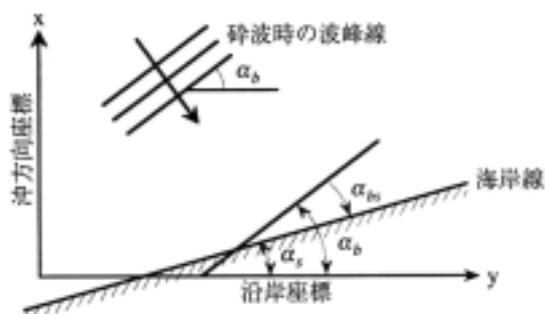


図-2 波向の定義

出典:「漂砂環境の創造に向けて」 土木学会

等深線変化モデル

(1) 基礎方程式

1-line モデルと同様に、各等深線毎の砂の連続式と沿岸漂砂量式により構成される。各等深線毎の砂の連続式は次のとおりである。

$$\frac{\partial x_k}{\partial t} + \frac{1}{h_k} \cdot \frac{\partial Q_k}{\partial y} = 0, \quad k = 1 \dots n$$

ここに、 x_k : k 番目の等深線位置 (m), h_k : k 番目の等深線の漂砂の移動高さ (m), Q_k : k 番目の等深線の沿岸漂砂量 (m^3/s), k : 等深線番号, n : 等深線の本数である。座標系は沿岸方向を y , 岸沖方向を x , 時間を t とする (図 1)。

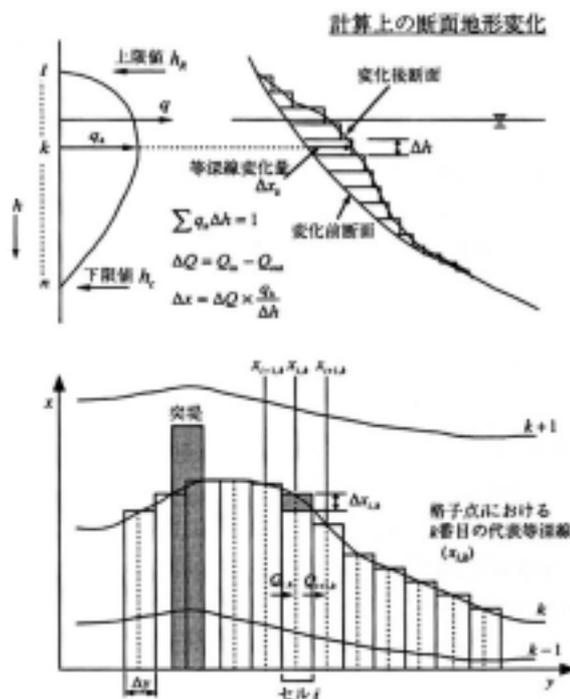


図 1 等深線モデルの概要

(2) 解説

このモデルは、汀線変化モデルが汀線を代表とする一本の等深線の変化を計算するのに対し、設定した複数の代表等深線の変化を各等深線毎に沿岸漂砂量の収支を計算することでその前進あるいは後退量を求めることができる。各等深線毎に沿岸漂砂量を設定することが可能なことから、水深方向の沿岸漂砂量分布が考慮できる点が特徴である。

水深方向の漂砂量分布の与え方は、宇多ら¹⁾、合田ら²⁾などにより提案されている。

1) 宇多高明, 河野茂樹 (1996): 海浜変形予測のための等深線モデルの開発, 土木学会論文集, 539/II-35, pp.121-139

2) 合田良實・渡辺則行 (1990): 沿岸流速公式への不規則波モデルの導入について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp.210-214

出典: 「漂砂環境の創造に向けて」 土木学会

二次元海浜流計算

(1) 基礎方程式

水平面内に直角座標系 (x, y) をとり、海浜流速の各方向成分を U 、 V 、平均水位の上昇量 (wave setup) を $\bar{\zeta}$ とするとき、平均流に関する連続式は次のようになる。

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} + \frac{\partial U(h + \bar{\zeta})}{\partial x} + \frac{\partial V(h + \bar{\zeta})}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 1}$$

また、運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + F_x - M_x + R_x + g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + F_y - M_y + R_y + g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{式 2}$$

と書かれる。ここに、 h は静水深である。 t は時間であるが、定常状態の流れを記述する場合には、各式の時間微分項は不必要となる。

運動方程式 2 の第 2 項および第 3 項は移流項、第 4 項は摩擦項、第 5 項は水平拡散項、第 6 項は radiation stress 項である。

(2) 解説

まず与えられた条件の下で波の場を計算し、これに伴う radiation stress を外力として引き続き海浜流の場を求める。こうして生じた流れは当然波の場を変化させ、したがってまた流れの場も変化する。この相互干渉を正しくとらえるためには反復計算が必要である。一方、得られた波と流れを漂砂量ならびに海浜地形変化の計算における営力として利用する場合には、これが再び波と流れの分布に影響するので、この間にさらに大きな計算のループが構成される。

流れの計算はそれ自体独立したものとはかぎらず、しばしばその前段にある波の計算および後続する地形変化の計算などとの連関において考えねばならない。したがって、この計算にはかなり複雑な波と地形条件に対しても安定であること、および計算所要時間が過大でないこと、という 2 つの要件が課されることになる。

摩擦項

定常流における底面摩擦力の表示式をそのまま用いるならば、波と流れの共存場における摩擦力の平均値は

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \frac{C_f}{h+\xi} (U+u_b) \sqrt{(U+u_b)^2 + (V+v_b)^2} \\ F_y &= \frac{C_f}{h+\xi} (V+v_b) \sqrt{(U+u_b)^2 + (V+v_b)^2} \end{aligned} \right\} \dots \text{式 3}$$

ここに、 C_f は摩擦係数で通常 0.01 程度の値を与える。波に伴う底面近傍の水粒子速度の x 、 y 方向成分 u_b 、 v_b は時間の関数であり、上式中の U 、 V は時間平均値を示している。

水平拡散項

海水の流動中に含まれる乱れ成分の等方性、およびこれに起因する見かけ上のせん断力が平均流速勾配によって記述されるという粘性とのアナロジーを仮定すれば、水平拡散項は

$$\left. \begin{aligned} M_x &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) \\ M_y &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \dots \text{式 4}$$

と書かれる。

radiation stress 項

非一様な波の場では、radiation stress の勾配に比例する平均的な外力が海水に作用し、これが平均水位の勾配と海浜流を引き起こす。運動方程式 2 はその間の力のつり合いを記述したものにほかならない。

$$\left. \begin{aligned} R_x &= \frac{1}{\rho(h+\xi)} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\ R_y &= \frac{1}{\rho(h+\xi)} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \dots \text{式 5}$$

ここに、 ρ は海水の密度、 S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} は波に伴う radiation stress である。

出典：海岸環境工学 - 海岸過程の理論・観測・予測方法 - 本間仁監修 / 堀川清司編

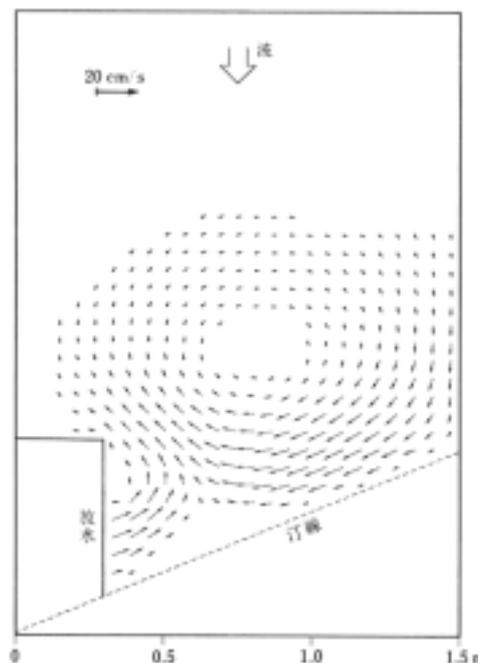


図-1 海浜流の解析例
(流入のある場合の循環流)

海底地形変形モデル

(1) 基礎方程式

地形変化の計算に用いられる底質量の保存式は、それ自身はきわめて簡単で、次式により与えられる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = - \frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} \dots\dots\dots \text{式 1}$$

図-1 に示すように、 z_b は任意の高さを基準にした局所的底面高、 h は静水深であり、 t は時間を表す。ただし当然ながら上式の h には潮位変化の影響は含まれていない。 x と y は水平面上にとられた直角座標で、 q_x と q_y は各点ごとの漂砂フラックスの x, y 方向成分である。

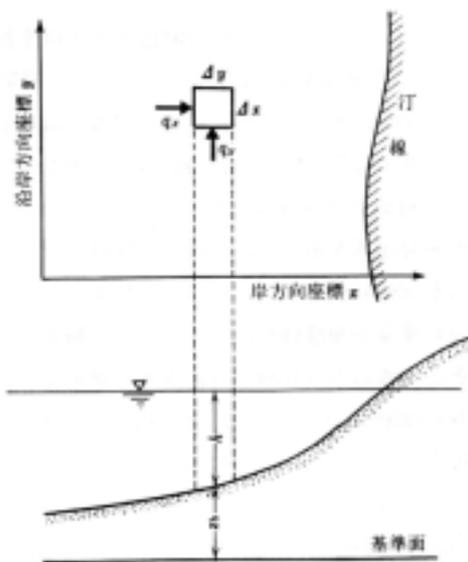


図-1 座標系と諸量

(2) 解説

ここで扱っている海浜地形変化の予測モデルはいわゆる 3 次元モデルである。このモデルにおいては、波浪変形計算と海浜流計算の 2 つのサブモデルにより計算される各地点での局所的な波と流れの条件から、地点ごとの漂砂の方向や量を算定し、漂砂量の平面分布からさらに底質量の保存式に基づいて各位置の底面高の時間変化量を推算することにより、最終的に空間的な海浜変形を予測する。

漂砂すなわち底質の移動現象は一般に波や流れなどの流体運動以上に複雑でわかりにくく、われわれの知識もまだ十分とはいえない。簡単にいうならば、波や流れの計算では基本式の主要部分は与えられていて、それをいかに効率的にしかも精度よく解くかということが問題であるのに対し、地形変化の計算では底質量保存式は別にして、それに含まれる漂砂量を評価するための算定式自身がまだ確立されていないという段階にある。

q_x, q_y について

一般に沿岸域では波と流れが共存しており、底質砂粒子はそれらによる力を同時に受けながら移動している。しかしながら過去の大部分の研究においては、波によるいわゆる岸沖漂砂か、沿岸流により輸送される沿岸漂砂のいずれか一方のみが扱われる。そこで渡辺ら [1984] は、現象を単純化し、従来研究成果の取込みを容易にするために、局所的漂砂フラックス (q_x, q_y) を、平均流の寄与分と波の作用に直接起因する漂砂とに分離して扱うことにした。すなわち、

$$(q_x, q_y) = (q_{cx}, q_{cy}) + (q_{wx}, q_{wy})$$

ここで、 (q_{cx}, q_{cy}) は流れによる漂砂フラックス、 (q_{wx}, q_{wy}) は波による漂砂フラックスである。

流れによる漂砂フラックス、波による漂砂フラックスは、それぞれ次のようなものが提案されている。

流れによる漂砂フラックス

$$q_{cx} = Q_c U, \quad q_{cy} = Q_c V$$

$$Q_c = A_c (u_*^2 - u_{*c}^2) / g$$

ただし、 U, V は平均流流速の x, y 方向成分であり、 u_* は波と流れの共存場の底面摩擦速度、 u_{*c} は底質の移動限界摩擦速度、 A_c は無次元の係数、 g は重力加速度である。

波による漂砂フラックス

$$q_{wx} = Q \hat{u}_b \cos \alpha, \quad q_{wy} = Q \hat{u}_b \sin \alpha$$

$$Q_w = A_w (u_*^2 - u_{*c}^2) / g$$

ここで、 \hat{u}_b は底面起動流速の振幅で、 α は波向が x 軸となす角である。この式中の摩擦速度 u_* としては波と流れ共存下の合成摩擦応力に対応するもの、 A_w は無次元係数である。

出典：海岸環境工学 - 海岸過程の理論・観測・予測方法 - 本間仁監修 / 堀川清司編

<参考文献集>

目 次

季節風および地形変動が吉野川河口域での塩分環境に及ぼす影響…………… 参考 - 1

(出典：環境システム研究論文集第 30 巻)

汽水域における塩分濃度の鉛直・縦断分布を現地調査により把握し、準 3 次元のシミュレーションモデルによる再現と予測を行って、季節風や河道形状の変化が出水後の塩分回復過程など塩分濃度分布に与える影響を詳しく検討している。論文自体は塩水遡上による影響を扱ったものではないが、調査・分析手法の参考になるものと考えられる。なお、手引書においては、分析手法として準 3 次元モデルは取り扱っていないが、今後汽水域の環境を把握していく上では、3 次元的なモデル化も考えていくべきであり、その参考ともなると考えられる。

利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発生と流動…………… 参考 - 8

(出典：水環境学会誌第 23 巻)

貧酸素水塊の発達現象を捉えるために、現地において塩分、溶存酸素、流速等の鉛直、縦断分布を詳細に調査し、鉛直 2 次元モデルを用いて再現を行ったものである。現地調査における計測手法の工夫や底泥の酸素消費速度の定量化、さらにはシミュレーションモデルにおける $k-\varepsilon$ モデル方程式の導入などの分析手法の工夫とともに、貧酸素化現象の機構の詳しい記述やビジュアルな表現などが、調査・分析を行う上での参考になるものと考えられる。

河川感潮域における高濁度水塊の挙動…………… 参考 - 22

(出典：海岸工学論文集第 48 巻)

汽水域における高濁度水塊の発生は、流れや塩分等の影響を受ける複雑な現象である。本論文は濁度、塩分の詳細な現地調査を行うとともに、懸濁態粒子の物性を分析し、この現象の実態を把握したものであり、分析を行う上での参考になると考えられる。

海底掘削に伴う河口砂州の変形 (出典：海岸工学論文集第 41 巻) …………… 参考 - 27

海底掘削に伴う海浜変形 (出典：第 32 回海岸工学講演会論文集) …………… 参考 - 32

海砂採取等海底の掘削による河口砂州の後退や汀線の後退等の実態を、実験やシミュレーションでなく現地において調査・考察したものであり、調査手法やそれを用いた現象の分析・把握方法の参考になると考えられる。

底泥の降伏値・移動限界に及ぼす粒度分布の影響…………… 参考 - 37

(出典：水工学論文集第 41 巻)

汽水域における干潟や河岸の侵食を把握する上で、底泥の移動限界や降伏値を評価する必要がある。本論文では、現地底泥への適用を考えて、粒度分布と粒子間距離や粒子相互作用力の関係からそれらを推定する方法を検討したものである。圧密の進んだ底泥への適用には充分ではないが、干潟や河岸侵食の調査・分析を進める上で参考になると考えられる。

東京湾における青潮の発生規模に関する考察…………… 参考 - 43

(出典：海岸工学論文集第 43 巻)

海砂採取による浚渫窪地が青潮発生に与える影響を把握するために現地における水質の連続観測を行い、また準 3 次元モデルによる再現を行ったものである。現地調査の方法やその表現における工夫、数値シミュレーションにおける工夫等が調査・分析を行う上での参考になると考えられる。