

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 354      Sept., 1980

英国国立水理研究所におけるエスチュアリー  
のシルテーションに関する研究について

小 笹 博 昭

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

1. ま え が き .....	3
2. 英国のエスチュアリー自然环境 .....	4
3. 初期の現地観測, 模型実験による研究(1949~1963年) .....	5
3.1 Inglis および Allen による Thames エスチュアリーの研究 .....	6
3.2 Price および Kendrick による Mersey エスチュアリーの研究 .....	9
4. シルテーションのモデル化(1964~1972年) .....	14
4.1 Owen による泥の物理的な特性に関する研究 .....	14
4.2 Owen および Odd によるシルテーションの数値モデル .....	29
5. 最近における研究の発展(1973~1979年) .....	35
5.1 Wash における貯水池建設計画 .....	35
5.2 Esmeraldas 港におけるシルテーションの研究 .....	45
5.3 航路埋没量の予測 .....	47
5.4 Ackers および White による流砂量公式 .....	49
5.5 Parker と Kirby による fluid mud に関する研究 .....	50
5.6 HRS における現在の業務受託体制 .....	51
6. 将来の研究の展望 .....	52
7. あ と が き .....	52
謝 辞 .....	53
参 考 文 献 .....	53
記 号 一 覧 表 .....	54

## Review of the Estuarine Researches Done at the Hydraulics Research Station, England

Hiroaki OZASA\*

### Synopsis

This is a review of the estuarine researches done at the Hydraulics Research Station, England. The researches have been carried out at three terms.

- (1) Between 1949 and 1963, the techniques relied on physical model experiments and field observations. Inglis and Allen have investigated the Thames Estuary. Price and Kendrick have studied the Mersey Estuary.
- (2) Between 1964 and 1972, the techniques were changed. Owen has carried out basic experiments about settling velocity, consolidation property, and erosion process of muds. Owen and Odd have developed the mathematical model about mud transport and applied their model to the case of the Thames Estuary.
- (3) Between 1973 and 1979, the techniques were sophisticated. Odd has proposed functional formulae about sediment transport rate, mixing length, and bed friction coefficient. He has shown practical methods of modeling the siltation processes. Miles has developed two dimensional and two layer mathematical model. Thorn has shown how to predict siltation rate of a shipping channel.

---

\* Chief of the Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

# 英国国立水理研究所におけるエスチュアリー のシルテーションに関する研究について

小 笹 博 昭\*

## 要 旨

エスチュアリーにおけるシルテーションは、我が国における技術的な蓄積が遅れている課題であるが、海外技術協力を円滑に実施するためにも研究を推進していくことが要望されている。一方、英国国立水理研究所 (Hydraulics Research Station) は、この分野に関して最も高い研究水準にある機関の一つであり、同研究所においてなされたエスチュアリーにおけるシルテーションの研究を紹介することは、将来における研究を展望するに際して意義のあることと考えられる。

同研究所においてなされた研究は、次のような歴史的な流れの中で位置づけられる。

(1) 初期 (1949~1963年) の研究は現象解明に重点がおかれ、現地観測と水理模型実験が行われた。Inglis と Allen は Thames エスチュアリーについて、Price と Kendrick は Mersey エスチュアリーについて研究を行った。

(2) 1964~1972年に研究方法は体系づけられ、変化した。1964年以降 Owen は泥の沈降速度、圧密、輸送特性を調べ、その成果を活用して Owen と Odd はシルテーションの数値モデルを開発し、Thames エスチュアリーに対して適用した。

(3) 1973~1979年に研究内容は洗練され、多様な研究が行われた。Odd らは Wash における貯水池建設計画に関連して、エスチュアリーにおける流砂量、密度流場における混合距離、底面摩擦係数についての経験的な予測式を得、エスチュアリー内部の水理特性を考慮に入れた数値計算法を開発した。Miles は Esmeraldas 港におけるシルテーションの問題に関連して、水平方向二次元、鉛直方向二層の場合に対する数値計算法を示した。また Thorn は航路埋没量の予測法を開発した。Ackers と White は新しい流砂量公式を示した。Parker と Kirby は fluid mud について現地調査を行い、濃度分布について新しい知見を得た。

## 1. まえがき

我が国では、港湾は外海に面した砂浜海岸に防波堤建設、陸地の掘り込み、埋立といった方法で造られることが多い。このため港湾建設に係わる水工技術のうち、波浪や、沖浜に面した砂浜海岸における漂砂による影響をいかに予測し、対応していくかということが極めて重要な問題となる。これに対し、東南アジア、南米、ヨーロッパ等の諸外国では、港湾はエスチュアリー\*\* (estuary) に棧橋形式で造られることが多い。このため潮汐および

潮汐流、河川流が主たる外力となる。エスチュアリーではシルテーション\*\*\* (siltation) が激しく、浚渫に要する経費は多額にのぼる。たとえばインドネシアの Belawan 港における年間の維持浚渫量は 600 万  $m^3$ 、インドの Calcutta 港における浚渫量は 900 万  $m^3$  にも達するといわれている。したがってシルテーションをいかに制御し、それによる影響をいかにして最小限にいとめるかという問題は港湾建設の成否にかかわる重要な問題となってくる。このように港湾を建設する区域の自然、外力の条件がこれらの国と我が国との間で異なるために、エスチュアリーにおけるシルテーションに関する、研究

\* 海洋水理部 海水汚染水理研究室長

\*\* エスチュアリーについては様々な定義があるが、最も一般的な定義は次のようなものである。すなわち、エスチュアリーとは「外海とつながっている、ある程度囲まれた水域であり、その水域内の海水は陸地から流出してきた淡水と混合している。従来はエスチュアリーといえば、海水が侵入してきて陸水と混ざる川の最下流部を指していたが、現在では陸水と海水との混合が起こる、入口の広がっている湾 (bay)、入江 (inlet)、入口の狭い湾 (gulf)、海峡や瀬戸 (sound) までエスチュアリーに含まれるようになってきている。」

\*\*\* 砂や泥、シルト、粘土のような微細な粒子が沈降し、底面に堆積する現象であり、港や航路の埋没をひきおこす。

技術の集積は、我が国においては極めて乏しい。

一方、英国における代表的な港である London 港、Liverpool 港はともに Thames 川、Mersey 川のエスチュアリーに位置し、常時シルテーションによる影響を受けるといった関係から、英国ではこの方面の研究が非常に盛んである。

著者は昭和52年8月より54年8月までの2年間、国際協力事業団の海外長期研修生として英国国立水理研究所 (Hydraulics Research Station, Department of the Environment。以下HRSと略す。)に滞在し、HRSにおけるエスチュアリーでのシルテーションの研究状況を調べる機会に恵まれた。HRSは英国における水理学研究の中心的な機関であり、特にエスチュアリーにおけるシルテーションの研究に関しては、非常に高い研究水準を有している。組織面でみても、河川部 (Rivers-Structures-Drainage Division)、海岸工学部 (Coastal-Port Engineering Division)、海洋開発部 (Offshore Engineering Division)、海外技術協力部 (Overseas Development Unit) とならんで、エスチュアリー部 (Estuaries-Tidal Processes Division)がある。又、初代所長の Sir C. C. Inglis、二代目所長の F. H. Allen はともにエスチュアリーにおけるシルテーションの研究者であり、彼等の他にも多くのこの方面に関する優秀な研究者を輩出している。しかしながらHRSにおいてなされた研究成果は、そのほとんどがHRSの所内報告、英国土木学会誌 (Proc. of the Institution of Civil Engineers) にしか発表されておらず、我が国ではあまり知られていない。我が国におけるエスチュアリーの研究の方向づけをするに際して、HRSにおける研究の歴史、経緯、現在の状況を知ることが参考になると考えられるので、ここに文献調査としてとりまとめた。

なお、本報告中において、泥 (Mud)、シルト (Silt)、粘土 (Clay) という用語をひん繁に用いているが、泥はシルトおよび粘土領域の土の総称である。British Standardによるとシルトは0.06~0.002 mm (60~2 $\mu$ )の粒径範囲の土、粘土は0.002 mm以下の土を示す。一方JIS A 1204-1970によると、シルトは0.074~0.005 mm (74~5 $\mu$ )の粒径範囲の土、粘土は0.005 mm以下の土のことである。

## 2. 英国のエスチュアリーの自然環境

図-1に英国におけるエスチュアリー (延長5 km 以上のもの)の位置図を示す。<sup>1)</sup> また表-1には、図-1に

示すエスチュアリーの名称を示す。図-1、表-1においてエスチュアリーの番号は次のように付されている。たとえば、No.15はHumberエスチュアリーであるがHumber川へ流入する主要な支川で、潮汐の作用を受け、エスチュアリーとしての特性をもつHull、Ouse、Trent川はそれぞれ、15.1、15.2、15.3と番号が付けられている。さらにOuse川に流入する、潮汐の作用を受ける四つの支川に15.2.1~15.2.4の番号が付されている。Scotlandにはネス湖 (Loch Ness)のようにLochと呼ばれる水河期にできた細長い湖があるが、Lochにおける水理的な特性はいわゆるエスチュアリーにおける水理特性と異なるので、ここでは除外してある。以上より英国内におけるエスチュアリーは104水系、エスチュアリーに流入する支流のエスチュアリーは30個、計134個となる。各エスチュアリーの上流側感潮限界より下流側海との境界までの延長をエスチュアリーの長さとする、英国内におけるエスチュアリーの総延長は3170 km、したがって一水系当りの延長は30 kmである。さらに、夏期に各エスチュアリーに流入してくる淡水の量を集計すると、英国内の総量で1110 m<sup>3</sup>/s、したがって一水系当りの平均は11 m<sup>3</sup>/sとなる。

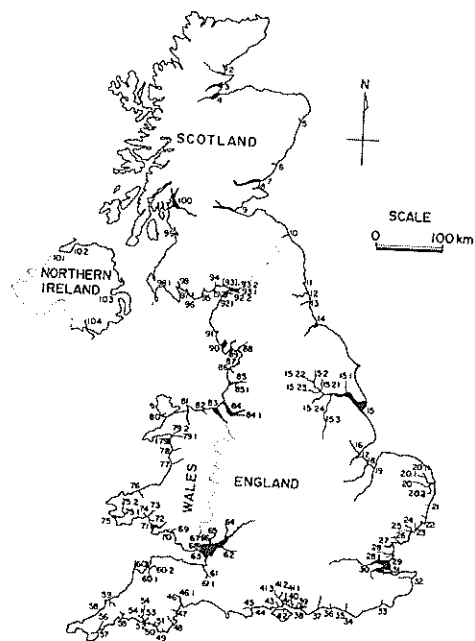


図-1 英国のエスチュアリー位置図

表-1 英国におけるエスチュアリー

<i>Scotland</i>	23 R. Deben	51 R. Erme	80 R. Cefny
1 Loch Fleet	24 R. Orwell	52 R. Yealm	81 R. Conway
2 Dornoch Firth	25 R. Stour	53 R. Plym	82 R. Clwyd
3 Cromarty Firth	26 R. Colne	54 R. Tamar	83 R. Dee
4 Beaully & Inverness Firths	27 R. Blackwater	54.1 R. Lynher	<i>England</i>
5 R. Ythan	28 R. Crouch	55 R. Fowey	84 R. Mersey
6 South Esk	28.1 R. Roach	56 R. Fai	84.1 Manchester Ship Canal
7 Firth of Tay	29 R. Thames	56.1 R. Porthcuel	85 R. Ribble
7.1 R. Earn	30 R. Medway	57 R. Helford	85.1 R. Douglas
8 R. Eden	31 R. Swale	58 R. Gannel	86 R. Wyre
9 R. Forth	32 R. Stour	59 R. Camel	87 R. Lune
9.1 R. Carron	33 R. Rother	60.1 R. Torridge	88 R. Kent
<i>England</i>	34 R. Cuckmer	60.2 R. Taw	89 R. Leven
10 R. Tweed	35 R. Ouse	61 R. Parrett	90 R. Duddon
11 R. Blyth	35.1 Glynde Reach	61.1 R. Tone	91 R. Esk
12 R. Tyne	36 R. Adur	62 R. Avon	92.1 R. Waver
13 R. Wear	37 R. Arun	63 R. Severn	92.1 R. Wampool
14 R. Tees	38 Chichester Harbour	64 R. Wye	93.1 R. Eden
15 R. Humber	39 Langstone Harbour	65 R. Usk	93.2 R. Esk
15.1 R. Hull	40 Portsmouth Harbour	<i>Wales</i>	<i>Scotland</i>
15.2 R. Ouse	41 Southampton Water	66 R. Rhymney	94 R. Nith
15.21 R. Derwent	41.1 R. Hamble	67 R. Taff	95 R. Urr
15.22 R. Wharfe	41.2 R. Itchen	68 R. Ely	96 R. Dee
15.23 R. Aire	41.3 R. Test	69 R. Neath	97 R. Fleet
15.24 R. Don	42 R. Medina	70 R. Tawe	98 R. Cree
15.3 R. Trent	43 R. Beaulieu	71 R. Loughor	98.1 R. Bladnoch
16 R. Witham	44 Christchurch Harbour	72 R. Gwendraeth	99 R. Garnoch
17 R. Welland	45 Poole Harbour	73 R. Towy	100 R. Clyde
18 R. Nene	46 R. Exe	74 R. Taf	<i>Northern Ireland</i>
19 Great Ouse	46.1 R. Clyst	75 Milford Haven	101 R. Foyle
20 R. Yare	47 R. Teign	75.1 E. Cleddau	102 R. Roe
20.1 R. Bure	48 R. Dart	75.2 W. Cleddau	103 R. Lagan
20.11 R. Ant	49 Kingsbridge Estuary	76 R. Teifi	104 R. Newry
20.2 R. Waveney	50 R. Avon	77 R. Dovey	
21 R. Blyth		78 R. Mawddach	
22 R. Alde		79.1 R. Dwyryd	
		79.2 R. Glaslyn	

各地における平均の潮差を図-2<sup>1)</sup>に示す。日本の太平洋岸における平均の潮差が約1.0~1.5m、日本海側における潮差が約0.3m程度であることを考えると、英国の海岸における潮差は非常に大きく、図-2によると最大9.6mに達する。この9.6mの潮差を示すのは Severn エスチュアリーであるが、ここでは局所的に最大の潮差が14m以上にも達し、世界でも有数の潮差が大きい所である。潮差が13.8mをこえるとエスチュアリーの上流部では Tidal Bore ができる。また成層の状況をアンケート調査によって調べた結果<sup>1)</sup>によると、104水系中70水系で答が得られ、そのうち59水系でよく混合し、成層がみられず、8水系で若干成層、1水系で成層し、2水系で塩水くさびが見られるということである。

主要港の位置図を図-3に示す。図-1と対照するとわかるように、London 港、Southampton 港、Liverpool 港、Bristol 港等の主要な港湾はエスチュアリーに位置している。

### 3. 初期の現地観測、模型実験による研究 (1949~1963年)

本章では、HRS におけるシルテーション研究の初期の状況を紹介する。研究は Thames 川や Mersey 川といった代表的なエスチュアリーにおける現地観測、それらのエスチュアリーを対象とした模型実験よりなり、エスチュアリーにおいて起っている基本的な水理現象の

解明に重点がおかれた。なお、以下において説明の際に引用する構造物や水理量の諸元、構造物の配置は、すべて原論文に記されているものであり、現在では基本的な特性は変わっていないにしても、個々の諸量の詳細については変化している可能性がある。

### 3.1 Inglis および Allen による Thames エスチュアリー 一の研究

HRS におけるエスチュアリーでのシルテーションに関する研究の方向性を決定した優れた研究を1957年に Inglis および Allen<sup>2)</sup>が発表した。

Thames 川の平面図を図-4に示す。河岸には、London

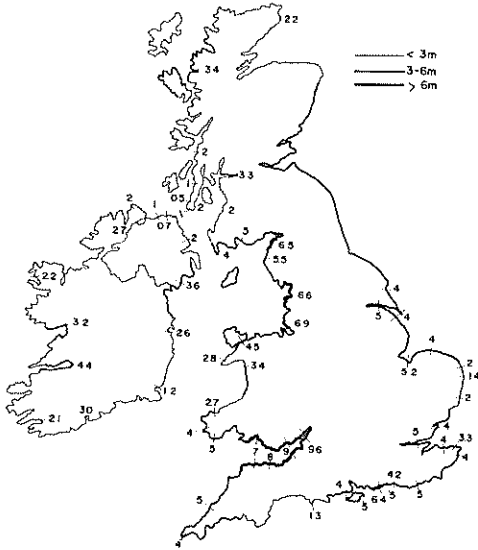


図-2 英国沿岸の潮差



図-3 英国の主要港位置図

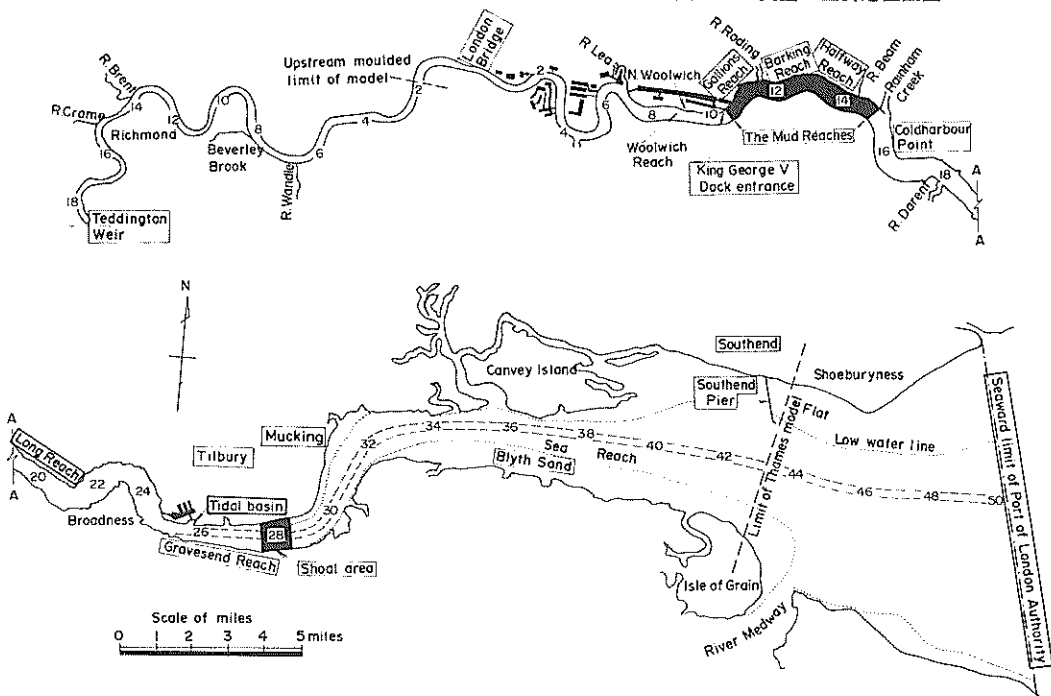


図-4 Thames エスチュアリー-平面図

Bridgeより下流方向にGallions Reachまでの区域、およびTilburyにLondon港の港湾施設(Dock)が造られている。これらの港湾施設や航路では多量の維持浚渫が必要であり、当時総計約207万 $m^3$ /年の維持浚渫量であった。内訳はMud Reaches(図-4上側の図中に黒くぬりつぶした所)およびGravesend Reach(図-4下側の図中に黒くぬりつぶした所)において40%、上記二地点以外の河道部で5%、種々のDock内で40%、Tilbury Tidal Basinにおいて15%である。このためPort of London AuthorityとHRSはThames川内において起っているシルテーションの状況を把握すべく、1949年に共同調査を開始した。

Thames川の一般的な自然条件は、図-4を参照しながら述べると次のとおりである。図の最上流にあるTeddington Weirが感潮限界である。図-4では、海側の限界は、Port of London Authorityの管理区域の限界ととっている。Teddington Weirと河口のSouthendとの間の距離は、約99 kmである。航路は海側限界からColdharbour Pointまでが幅300 m、水深がL. W. L.を基準とすると9 mであり、Coldharbour PointよりKing George V Dockまでが幅180 m、水深8.1 mである。潮汐は半日周潮型である。1951~52年にエスチュアリー内の5地点で潮差を測定した結果を表-2に示す。海側のSouthendよりLondon Bridgeまで潮差は増大していき、その後上流に行くに従って減少する。Southendにおける高潮位を基準とすると、Tilbury, London Bridge, Richmondにおける高潮位はそれぞれSouthendの26, 77, 138分後に起きる。Teddington Weirに流れてくる河川水の流量は、平均して約70  $m^3/s$ である。

エスチュアリーの海側、すなわちSouthendやBlyth Sand付近における底質は、少量の泥がまじった平均粒径約0.15 mmの細砂である。MuckingよりTeddingtonへ至る区域は、おおむね礫、石、粘土、チョークより成る堅い底面である。しかし、図-4で黒くぬりつぶしたGravesend Reachの海側および、Gallions Reach, Barking Reach, Halfway Reachとつらなる区域では、底質は黒色の泥である。後者の区域は特にMud

Reachesと呼ばれる。この泥のうち、重量にして20~35%が湿った有機質である。残りは無機質で、典型的なものでは平均粒径 $D_m = 0.035 mm$ 、 $D_5$ (5%通過粒径) = 0.005 mm、 $D_{95}$ (95%通過粒径) = 0.20 mmである。これらの区域では激しいシルテーションが起り、ひん繁に浚渫をしなければならない。なお、Tilbury Tidal Basinや種々のDock内にも泥が堆積するため維持浚渫を必要とする。

Mud ReachesとGravesend Reach下流部におけるシルテーションの原因は、定性的には次のように考えられる。Mud Reachesは、元来浮遊している泥の濃度が高い所で、水路の水理的な性質から定ってくる水深(このように流量、勾配、底質等の特性から水路の安定な断面形状が自然に決定されるとする考え方をRegime Theoryと呼ぶ)より深く航路水深を維持しようとして浚渫を行ったためにシルテーションが起った。また、Gravesend Reach下流部では、水路幅が急激に広がっていく平面的な河道形状となっているために、流速が急激に変化し、流速の減少した所でシルテーションが起った。

1949年から始まった調査は現地観測と模型実験とよりなる。調査では、Mud ReachesおよびGravesend Reach下流部においてシルテーションが起る機構の解明に重点がおかれた。水理模型としては二種類の模型を用いた。一つはパイロットモデルであり、水平縮尺1/3000、鉛直縮尺1/120である。もう一つが大規模な本格的モデルであり、水平縮尺は1/600、鉛直縮尺は1/60に変化させた。模型に含まれる範囲は図-4に示されているが、模型の長さ122 m、海側端におけるエスチュアリーの幅は13.4 mである。

水平縮尺1/600、鉛直縮尺1/120の模型で行った実験の一つでは、1953年6月26日に起った状況を再現することを試みた。まず予備的に模型全域を淡水で満たして実験を行ったところ、模型と現地との間に何ら相似性が認められなかった。次に模型の海側境界では原型と同じ約3%の塩分を含む塩水とし、Teddington Weirより原型に換算して19.0  $m^3/s$ の淡水を供給したところ、現地観測の値と相似な潮汐および塩分濃度の分布が得ら

表2 Thames エスチュアリーにおける潮差

	潮 差 (m)				
	Southend	Tilbury	North Woolwich	London Bridge	Richmond
平均大潮	5.1	5.8	6.4	6.5	約 4.6
平均潮	4.2	4.8	5.4	5.5	約 4.0
平均小潮	3.3	3.8	4.4	4.5	約 3.3



れた。

模型実験においてプロペラ式流速計を用いて流速の連続測定を行い、水の正味の移動量を④～⑥の5断面内において求めた結果を図-5に示す。④が最上流、⑥が最下流の測線である。図中□で囲んだ数字は内陸方向への正味の移動を意味し、囲んでいない数字は海方向への正味の移動を示す。Mud Reachesの上流側にある④断面では、全点で海方向への移動を示しているが、他の⑤～⑥断面では内陸部への移動が見られる。Mud Reaches中の⑤断面付近において正味の移動量が零となる所が存在する。

現地では放射性アイソトープを吸着させた粘土をトレーサーとしてTilbury Tidal Basin(図-4参照)付近のエスチュアリー河道内に投入し、その移動を追跡した。トレーサーは主として、Mud ReachesおよびGavesend Reach下流部へ移動していった。一方、模型実験では、水よりわずかに重いセルロイド製の小さな球を投入し、その移動を追跡した。球は底面近くの所を移動しながら、Mud Reachesや Gavesend Reach下流部

へ移動した。

London Bridge, Southend 間において水深の60%の深さの所で浮遊物質(S. S.)の濃度分布を現地観測した結果を図-6に示す。縦軸に浮遊物質の濃度をppm単位で示し、横軸にLondon Bridgeよりの距離をとっている。図よりMud Reachesの上流側において濃度が最大となり、さらに上流の方へいくと急激に濃度が減少していくことがわかる。

Long Reach(図-4下側の図面の左端)において流れと浮遊物質濃度の連続観測を行い、両者の積より浮遊物質輸送量の鉛直分布を求めた結果の典型的な例を図-7に示す。図より輸送量の時間的な変化状況を知ることができる。上げ潮時(Flood)と下げ潮時(Ebb)との差より正味の浮遊物質輸送量を求めることができる。

Tilbury Tidal Basinの平面図を図-8に示す。この区域では、7.3mの水深を維持するために31万m<sup>3</sup>/年の浚渫を行う必要があった。図-8中には、水平縮尺1/600、鉛直縮尺1/60のThames川模型において調べた上げ潮時の流れのパターンが示されている<sup>2)</sup>。上げ潮時にTidal Basin入口の西部より多くのシルトを含んだ底層流(図-8中に点線で示す)が流入し(この流れがシ

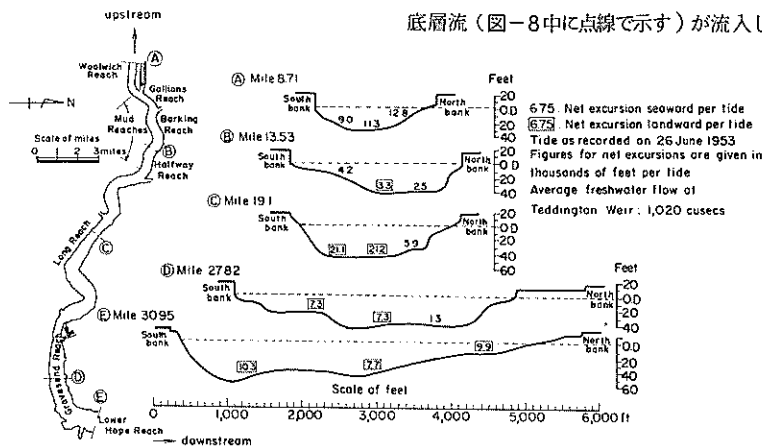


図-5 水粒子の正味の移動量 (Thames エスチュアリー 模型実験)

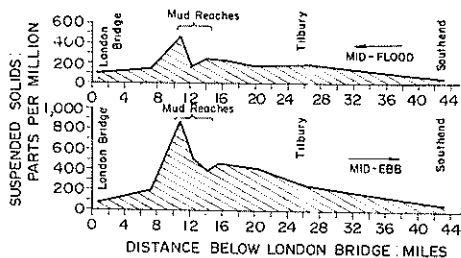


図-6 浮遊物質濃度の水路縦断方向分布 (Thames エスチュアリー)

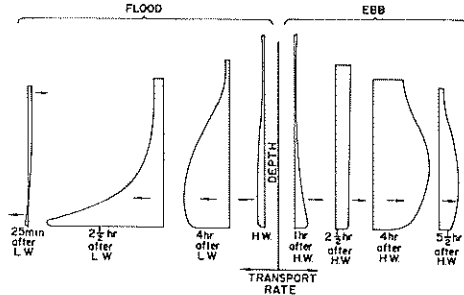


図-7 浮遊物質輸送量の鉛直分布 (Thames エスチュアリー)

ルテーションの主要な原因と考えられる), 入口の東部より表層流(図中に実線で示す)が流出するパターンとなっている。下げ潮時には全水深で外側へ流出していた。潮流の現地観測結果も模型実験の結果とほぼ一致した。なお、浮遊物質の濃度に関する現地観測によると、水表面付近で300 ppm, 底層で1500 ppmであり、底面のごく近傍には約62000 ppmの fluid mud と呼ばれる非常に濃度の高い層があった。このような Tidal Basin 内のシルテーションの状況を改善するための方策として、Tidal Basin 内および入口付近における流れのパターンを変える必要があるとして、Thames 川模型内で色々な構造物の配置を調べた。なお Tilbury Tidal Basin は、現在ではシルトによって埋められ、使用不能の状態となっている。

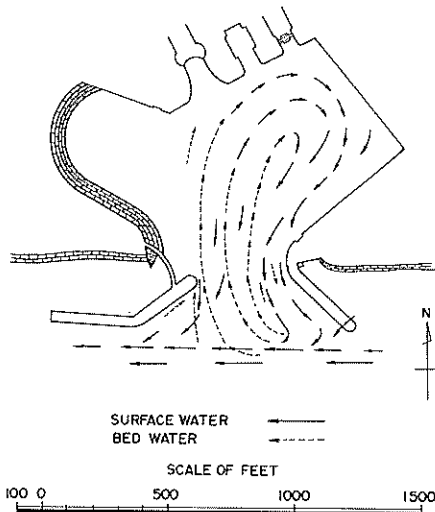


図-8 Tilbury Tidal Basinにおける流況(上げ潮時)

### 3.2 PriceおよびKendrickによるMerseyエスチュアリーの研究

Mersey川におけるシルテーションについては、PriceおよびKendrickによって1963年に発表された報告がある<sup>4)</sup>。3.1に述べたInglisおよびAllenによる研究と類似の手法でエスチュアリーを研究しており、英国土木学会(I. C. E.)のGold Medalを受賞した論文である。

図-9にMersey河口部及びLiverpool湾の平面図、図-10に河口近くの河道部の平面図を示す。図-10の左側端は図-9の右上端へ続いていく。Mersey川はLiverpool湾に流入しており、河口部付近には、英国でも有数の港であるLiverpool港がある。またManchesterへ通じるManchester Ship Canal(運河)の出入口もエスチュアリー内(図-10のEastham付近)に存在している。

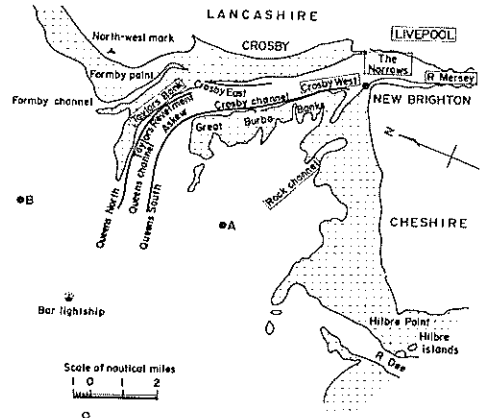


図-9 Merseyエスチュアリー(Liverpool湾)平面図

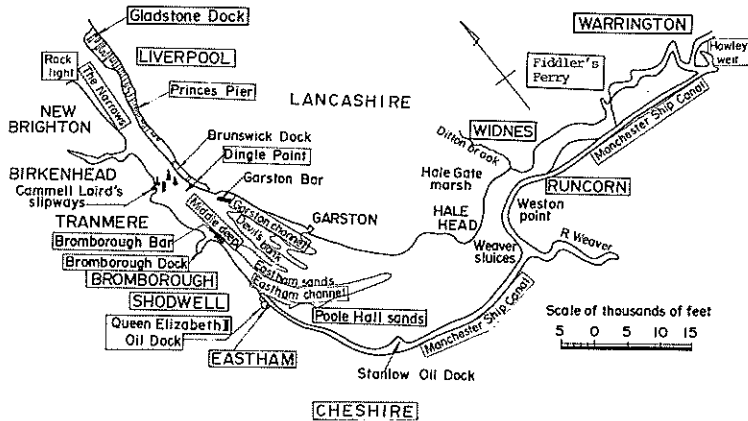


図-10 Merseyエスチュアリー(河道部)平面図

Liverpool 湾内には広大な砂州が広がっており、そのうちの多くの部分が低水位時には水面上に現れる。砂州の中央に石積み堤 (Training Walls と呼ばれる。建設工事は 1909 年に始まり、1911 年に Taylor's Bank の部分、1923 年に West Crosby の部分が完成し、工事は 1936 年に終了した。) が延長 14.4 km にわたって二列に走っており、その中央が航路になっている。河口部付近は The Narrows と呼ばれる航路であり、延長約 9.6 km、狭い所で幅 914 m、大潮低潮時には最も深い所で水深 18.3 m となる。The Narrows および Liverpool 湾内の航路は、上げ潮および下げ潮時にこれらの航路内を通過する潮流流によって維持されている。The Narrows より上流部 (図-10 参照) の Dingle Point より Howley Weir に至る区域は Upper Estuary と呼ばれる。幅は最も広い所で 5486 m であり、延長は 41.6 km である。低潮時には Upper Estuary のほぼ全域が水面上に現れる。Dingle と Eastham の間には、Garston, Middle Deep, Eastham と呼ばれる三本の水路があり、それより上流では、低水位時の河道は一定せず、常に変化している。

表-3 にエスチュアリー内における潮差を示す。平均大潮と平均小潮の間における潮差の差が大きいことが特徴的である。

Mersey エスチュアリーに流入する淡水流量は計 5.2.8 m<sup>3</sup>/s であり、そのうちの 52.1% が Mersey 川より流入する。

図-11 は Rock light (図-10 の左端) と Runcorn

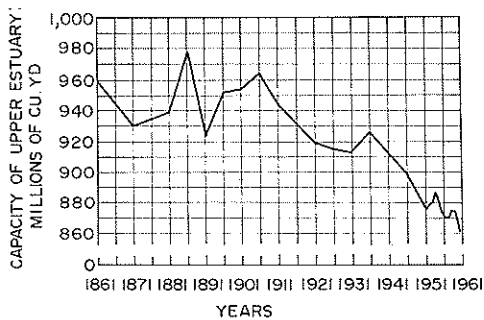


図-11 Mersey エスチュアリー河道部内における水容積の経年変化

表 3 Mersey エスチュアリーにおける潮差

	潮 差 (m)					
	Gladstone Dock	Princes Pier	Eastham	Widnes	Fiddler's Ferry	Warrington
平均大潮	8.2	8.4	8.9	4.5	2.9	2.1
平均中潮	6.4	6.5	6.9	3.6	1.8	1.2
平均小潮	4.6	4.7	5.0	2.7	0.8	0.2

との間 (図-10 の右端付近。すなわち Upper Estuary) における水容積の経年変化を示したものである。図によると 1861~1961 年に水容積は約 1 億立方ヤード (すなわち 7650 万 m<sup>3</sup>) 減少しており、激しい埋没をうかがうことができる。なお、1897 年より 1955 年の間における、この区域での浚渫量は約 3 億 m<sup>3</sup> である。このようなシルテーションの状況により、1956 年に HRS は Mersey Docks and Harbour Board よりシルテーションの原因究明、事態改善のための方策の提案を求められた。以上のような総量としての埋没土量の増加といったシルテーションの問題に加えて、第二の問題は Eastham および Garston 水路の間で水深および砂州の規模が変動するという問題である。1953 年 7 月 Queen Elizabeth II Oil Dock へタンカーを入れるために、Eastham 水路を深くした所、それ以来 Bromborough Bar における浚渫量が激増した。このようなタイプのシルテーションについても、原因究明、対策樹立が望まれた。

調査は現地における観測、従来の海図を用いた検討、模型実験よりなる。現地観測では、流速、塩分、浮遊物質濃度の測定および放射性トレーサーの投入、追跡を行った。Upper Estuary の地形測量は 1906 年より、また Liverpool 湾内の測量は 1833 年より定期的に行われている。これらの測量データを用いて地形変動に関する解析を行った。模型は 2 種類製作した。一つは水平縮尺 1/3200、鉛直縮尺 1/120 の固定床模型であり、Training Walls (導流堤) の建設によって Liverpool 湾における水の循環パターンの変化を調べた。もう一つは水平縮尺 1/550、鉛直縮尺 1/60 の移動床模型であり、Upper Estuary における循環流のパターン、Garston, Eastham 両水路の埋没関係の検討を行った。

図-12(a),(b) は、1833 年、1955 年における Liverpool 湾内の砂州の状況を示している。両図を比較すると次のような変化が起っていることがわかる。

(1) Mersey 川の河口左岸へ通じる Rock Channel は 1833 年には最も深い所で低潮時における水深 9.1 m の広い水路であったが、1955 年には低潮時における水深 0.61~0.91 m の狭い水路に変わってしまった。この部

分における埋没土砂量は1833~1912年に45万 $m^3$ /年、1912~1936年に130万 $m^3$ /年、1936~1955年に54万 $m^3$ /年である。

(2) Training Walls 西側の Great Burbo Banks において1912~1936年に特に激しい埋没が起った。

(3) Liverpool 湾内の水容積を計算して求めた土量の増分は、1833~1912年(79年間)に1億4200万 $m^3$ 、1912~1955年(43年間)に6600万 $m^3$ である。

図-13-(a),(b)には、固定床模型を用いて行った底面近くにおける1潮汐間中での水粒子の正味の移動量の測定結果を示す。図-13(a)は1911年の状態で Training Walls はわずかしかできていない。図-13(b)は、1957年の状態で Training Walls は完成している。両図を比較すると次のことがわかる。

(1) 図-13(b)によると2本の Training Walls によってさまれた区域の流れは全域で沖へ向っているが、図

13(a)では対応する区域において明確に沖へ向う流れの範囲は、図-13(b)におけるほど広くない。

(2) 図-13(b)によると Training Walls 西側の Burbo Banks 上で、正味の流れは上げ潮の方向となっている。このような正味の流れにより、この部分で埋没が起ったと考えられる。

(3) 図-13(a),(b)にAと示した地点は浚渫土砂を投棄した地点であるが、図-13(a)ではこの地点で下げ潮方向の正味の流れ、図-13(b)では上げ潮方向の正味の流れとなっている。1958年7~10月に現地のA地点に放射性トレーサーを投入し、その移動を調べた所、トレーサーの上げ潮方向へ向う移動が確認されたが、模型実験の結果ともあわせて、A地点への土砂の投棄をやめることが勧告された。

以上のような調査の結果、Great Burbo Banks より、

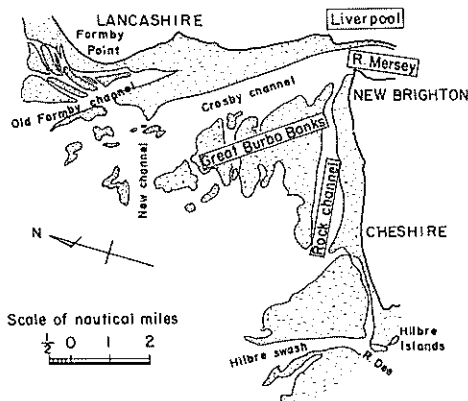


図-12(a) Liverpool湾の地形(1833年)

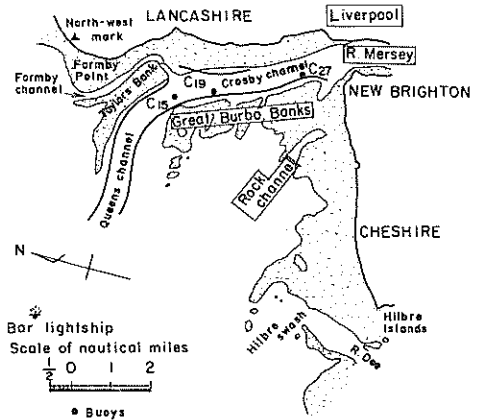


図-12(b) Liverpool湾の地形(1955年)

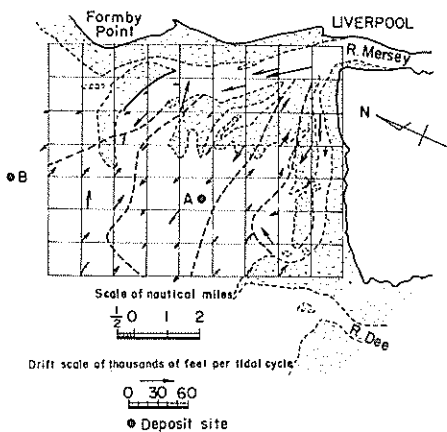


図-13(a) 水粒子の正味の移動量(Mersey エスチュアリ-模型実験, 1911年地形)

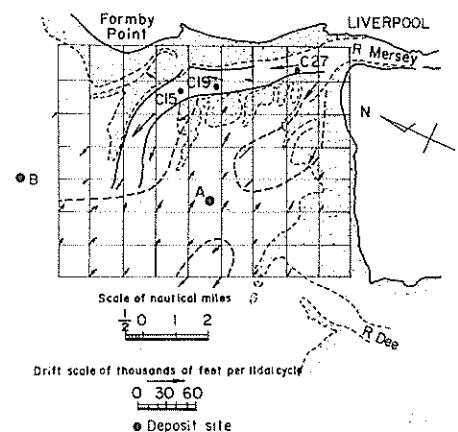


図-13(b) 水粒子の正味の移動量(Mersey エスチュアリ-模型実験, 1957年地形)

Training Walls の元付け付近を越えて、エスチュアリー河口部 (The Narrows) へ運ばれた砂が、先に述べた Thames エスチュアリーの場合と同様な機構で密度流により上流へ運ばれ、Upper Estuary の埋没に寄与したと考えられた。

続いて Upper Estuary 内において低水流路が変動したことが Upper Estuary 内のシルテーションにどのように影響したかが調べられた。図-14 は 1825~1880 年の間における低水流路の大きな変動を示している。その後 1906~1931 年に Upper Estuary におけるシルテーションの状況が悪化した時には、Hale Head より下流の区域で低水流路は以前ほど変動しなかった。

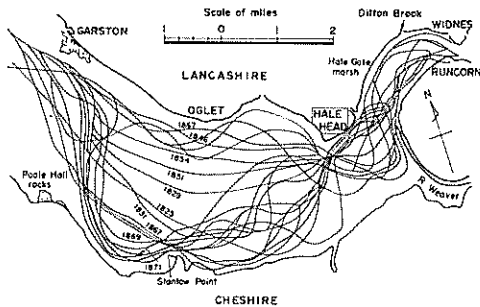


図-14 Mersey エスチュアリー河道部における低水流路の変動 (1825~1880年)

次に Eastham Channel (水路) 内の Bromborough Bar に生じた埋没について検討している。前述のように Upper Estuary には Garston, Middle Deep, Eastham の 3 つの水路が存在している (図-10 参照)。Eastham 水路は Cheshire 側に沿っており、Manchester Ship Canal へ通じる他 Queen Elizabeth II Dock や Bromborough Dock への通路となっている。Middle Deep 水路は他の 2 本の水路にくらべて延長も短く、かつ浅い。測量結果によるとこれら 3 本の水路では顕著な水深変化が起っている。これらの変化は周期的なものとは考えられなかったが、Eastham 水路に着目してシルテーションの状況が調べられた。

1850 年には水深 6.0 m の水路が Manchester Ship Canal の入口まで達していた。しかし 1890 年までに Bromborough Bar の所の水深が 1.2 m と浅くなった。その後 1953 年まで、3.0 m 程度の水深の変動を繰り返した。また水深を少なくとも 3.6 m には維持しようと間々的に浚渫も行われた。1953 年 7 月 Eastham 水路を深くする浚渫工事が行われ、1954 年までは平均水深が 1.2 m 増加して、この試みは成功であった。しかしその後、年々約 229 万  $m^3$  の浚渫を行ったにもかかわらずシルテーションの状況は悪化し、1960 年には浅い所

の水深は 1.5 m にしかすぎなくなった。このようなシルテーションの状況を適確には握するためには、Upper Estuary 全域における水の流動に立ち返って考える必要がある。

このために Upper Estuary の模型は、底面を 1936 年の地形にあわせて造り、Princes Pier の所で現地 6.5 m の潮差となるように潮汐を起した。また塩分分布も再現し、上流の Howley Weir の所から現地スケールで  $51.8 m^3/s$  の淡水を供給した。3 つの水路内の 19 地点で流速の連続測定を行うとともに、底面と水面の位置を測定した。流速測定結果より、潮汐一周期間の正味の水粒子の移動量を求めてみると、Middle Deep では全水深にわたって正味の移動は上流方向であり (すなわち Middle Deep は flood channel である)、Garston 水路、Eastham 水路では下流方向へ (すなわちこれらの水路は ebb channel である) 向っている。また、Eastham 水路下流部の Bromborough Dock と Shodwell (図-10 参照) との間の所では、正味の移動方向が変化する。すなわちその下流側では上流方向への正味の移動、上流側では下流方向への移動となっており、そこは激しいシルテーションが起る区域となっている。

続いて蛍光トレーサーを Upper Estuary 模型内の水路中に投入して、底面近くにおける物質移動の状況を調べた。Princes Pier における潮差は大潮の 9.2 m (現地スケール) とし、塩分分布を再現した。Howley Weir の所からは  $51.8 m^3/s$  (現地スケール) の淡水を供給した。トレーサーは砂に蛍光染料を付着させたものである。図-15 中に白丸で示したのはトレーサーの投入地点であり、矢印でトレーサーの移動方向を示している。本図によるとトレーサーが The Narrows より Middle Deep を通って上流方向へ動き、その後 Garston, Eastham 両水路を通って下流へ動いていくことがわかる。このような経路をたどって砂が運ばれていると考えられるため Bromborough Bar におけるシルテーションの状況は Middle Deep の状況と密接に関係してくる。1953 年以後では Middle Deep が広くかつ深くなり、Poole Hall Sands (図-10 参照) の所が洗掘され、それらの砂が Bromborough Bar へ運ばれてシルテーションが起ったと考えられる。

流速の平面的な分布の面から Bromborough Bar におけるシルテーションを考えてみると、Bar の上流側では下げ潮流の継続時間が長く、また下げ潮流は比較的狭い水路内を流れるために流速が速い。このような流れが高濃度の浮遊物を含んでおり、この流れは Bromborough Bar の所で減速するために、浮遊物質が沈降してシルテ

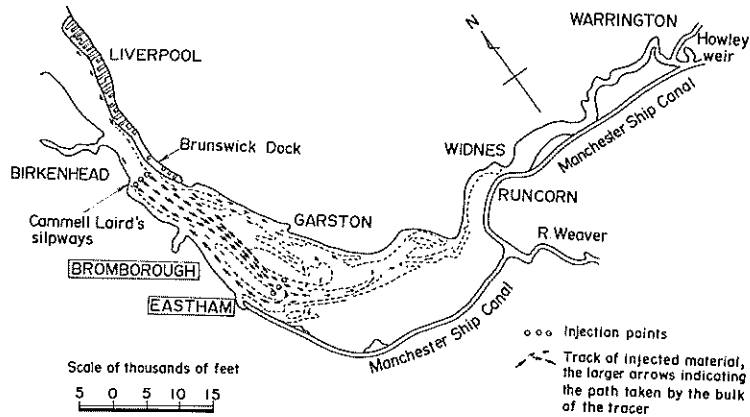


図-15 蛍光トレーサーの移動状況 (Mersey エスチュアリー-模型実験)

ーションが起ると考えられる。

Bromborough Bar における底質の変化は上流よりの河川流量の変化と関連があることが明らかにされた。調査結果によると 1959 年夏に河川流量が少なかった時、Eastham 水路の上流側の塩分濃度が増加し、これが浮遊物質の flocculation (浮遊物質が綿毛状に集まること) を促進し、Bromborough Bar の所に沈降して、底質が泥を多く含むようになった。

Bromborough Bar における上記のようなシルテーションの状況を改善する方策を検討するために、Upper Estuary の模型を用いて実験が行われた。潮差は Princes Pier の所で 8.5 m (現地スケール)、流入する淡水流量は Howley Weir の所で  $5.1.8 \text{ m}^3/\text{s}$  (現地スケール) である。シルテーションの状況を改善するための対策工は、Scheme 1 として図-16 上図に示すように Bromborough Dock 前面を埋立てること、Scheme 2 として図-16 下図のようにそれに加えて延長 1950 m、標高が M. W. L. にほぼ一致する Training Wall を設けることである。Scheme 1 の埋立の目的は Eastham 水路を通過する流れの方向を整え、水深の大きな所を流れるようにし、結果的に Eastham 水路の下流部における流速を増加させることである。一方 Scheme 2 における Training Wall の目的は、その上流部における下げ潮流を Eastham Sands へ向かうものと、Eastham 水路に向かうものに分けることである。埋立を行わず、Training Wall も設けずに潮汐や河川流といった外力を作用させてエスチュアリー内を平衡状態にした後、Scheme 1 続いて Scheme 2 を設けた。この時の Bromborough Bar 上での平均水深の変化を図-17 に示す。これによると Scheme 1 だけでは水深の増加は起らなかったが、Scheme 2 の設定後水深は約 1.2 m 増加した。なお実験中に行われた流

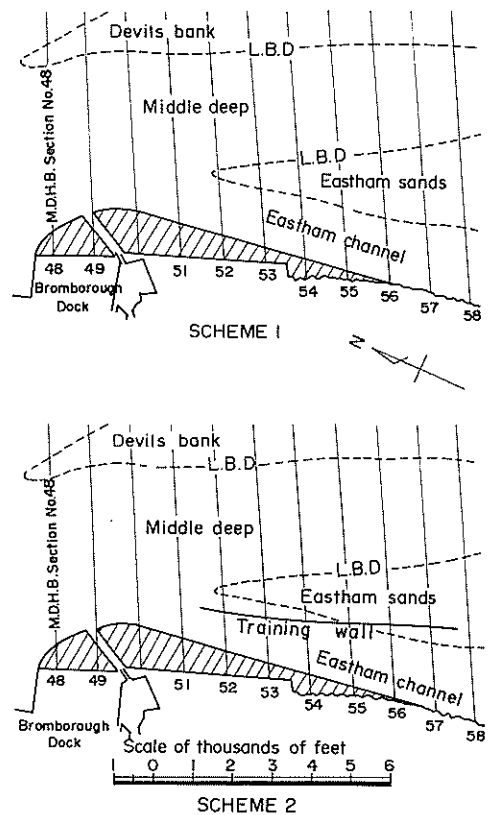


図-16 Bromborough Bar におけるシルテーションの改善策 (Mersey エスチュアリー-模型実験)

速測定において明らかになったのは、Scheme 2 では上げ潮流、下げ潮流とも流れの上手側で流速が減少し、下手側で流速が増加したことである。このことは流速の空間的な変加率が減少したことを意味する。以上のことよ

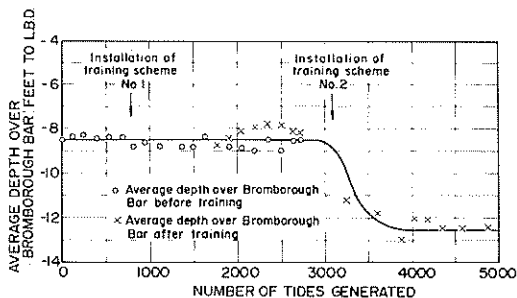


図-17 Bromborough Bar 上での平均水深の変化 (Mersey エスチュアリー-模型実験)

りシルテーションの状況を改善するのに、当該地点における流速を増加させること自体にはあまり効果がなく、流速の空間的な変化を小さくすることが大きな効果をもつという結論が得られている。

Mersey エスチュアリーにおける他のシルテーションに関する問題として、Cheshire 側に位置する Queen Elizabeth II Dock 内に発生する埋没現象があり、Allen および Price<sup>5)</sup> がこの問題を論じている。図-18 に Queen Elizabeth II Dock の平面図を示す。こ

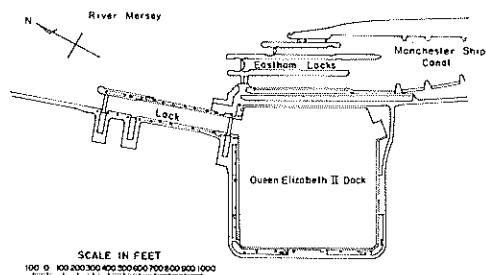


図-18 Queen Elizabeth II Dock 平面図

のドックは Mersey エスチュアリーと水門 (lock) によってつながっており、長さ 198 m のタンカーまで収容可能なように造られている。なお Queen Elizabeth II Dock のすぐ東側では Manchester Ship Canal が Mersey エスチュアリーと Eastham Locks を介して通じている。

Eastham のドック外の地点における大潮時の潮差は 9.1 m であり、大潮高潮時に採取された水の塩分は 26 ‰ である。ドック内の水位は平均大潮の高潮位よりわずかに高く維持されている。ドック内には Manchester Ship Canal より低塩分の水が供給されるために、ドック内の水の塩分は約 21 ‰ であり、エスチュアリー内の塩分より 5 ‰ 低い。シルテーションの問題となるのはド

ック内に 328 ~ 874 m<sup>3</sup>/d のシルトが堆積することである。

ドック内にシルトが入ってくる経路としては二通り考えられる。一つは Manchester Ship Canal より供給される水を通してであるが、この水に含まれるシルトは低濃度であり、シルテーションの主因とは考えられない。もう一つのシルトの侵入経路は水門を通してである。エスチュアリー内 (ドック外) の水門近傍は浮遊しているシルトが沈降しやすい所となっており、高濃度の、圧密をうけていないシルトや泥がみられる。この泥は容易に動かされ、またエスチュアリー内の底面位置はロック内の底面位置よりわずかに高い。エスチュアリー、ロック内、ドック内と順に塩分が減少しており、このような塩分の相違に基づく密度流が外側および内側のゲートの開閉操作に伴って発生する。この密度流では、高塩分で多量の泥を含んだ水が底層にあり、それがエスチュアリーからロック内へ、ロック内からドック内へと入ってくる。また、表層を通過して、低塩分かつ相対的に少量の泥しか含まない水が流出していく。

#### 4. シルテーションのモデル化 (1964 ~ 1972年)

3. に述べた研究は、シルテーションの状況解明に重点がおかれ、現地観測、模型実験を中心としたものであった。一方、シルテーションの過程を数学的なモデルで取り扱っていくためには泥よりなる床面の洗掘、上層の流水からの沈降堆積、泥の床面内での圧密といった物理的現象の機構を明らかにし、定式化していく必要がある。Owen は 1960 年代なかばより物理的な現象面について研究を進め、Odd は数値計算に Owen の研究成果を取り入れていった。

##### 4.1 Owen による泥の物理的な特性に関する研究

###### (1) 従来の研究の調査

Owen は粘着性の泥の沈降および圧密、洗掘および輸送に関する従来の研究の結果を調査し、1966年に調査結果を発表している<sup>6)</sup>。

まず沈降、圧密について次のように従来の研究をまとめた。

a) 砂粒の沈降速度は Stokes 則や Richardson-Zaki 則を用いてかなり正確に見つめることができる。これに対し泥の粒子は非常に細かいために、単粒子ではブラウン運動によって浮遊状態を保つことができる。またある条件の下では粒子が互に結びついてフロックを形成し、フロックの状態で沈降する。

b) フロックの形成は、粒子間の衝突と凝集という二つの要素に支配される。凝集は粒子間のひきあう力と反発しあう力とのバランスによって変化する。引きあう力は泥粒子中の原子の相互作用（ファンデルワールスの力）による。反発しあう力は泥粒子表面にある負の荷電に起因する。負の電荷が粒子のまわりにある陽イオンを雲状にひきつけ、二つの粒子が近づいた時には各々の陽イオンが反発しあう。蒸留水のように陽イオンをあまり含まない場合には粒子のまわりの陽イオンが大きく成長し、これらが反発しあうために泥粒子はフロックを作らない。一方海水のように多くの陽イオンを含む場合には各粒子のまわりの陽イオンの成長が妨げられ、ファンデルワールスの力が卓越して、フロックができる。

c) 粒子の衝突はブラウン運動、水内部のせん断応力、浮遊している粒子の沈降速度に起因する。

d) 前述したような粒子の衝突、凝集により、フロックは無限に大きくなるように思われるが、実際にはその最大の大きさは層流流れの最大せん断応力から次式のように決定される。

$$R = \frac{\tau_{\max} \Delta R}{d u / d z} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに

- R : フロックが最大になる時の半径
- $\tau_{\max}$  : フロックの最大せん断強度
- $\Delta R$  : フロックの表面粗度
- u : 流速

である。

e) フロックの沈降量は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{m} &= p \cdot C \cdot w_f \\ \text{又は} \\ \dot{m} &= p \cdot C \cdot \frac{2gR^2}{9\mu} (\rho_f - \rho_1) \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

ここに

- $\dot{m}$  : フロックの沈降量
- p : 沈降していくフロックが再浮上せずに底面上にとどまる確率
- C : 底面におけるフロックの重量濃度
- g : 重力加速度
- $w_f$  : 底面付近におけるフロックの沈降速度
- R : フロックの半径
- $\rho_f$  : フロックの密度
- $\rho_1$  : 懸濁液の密度

である。

上記の諸量のうち p と  $w_f$  は特に定量化が難しい量である。p は粒子が密度効果や乱れの影響を受けないで静か

に沈降する時 1 となる。乱れの影響を受ける時には 0 ~ 1 の値をとる。 $w_f$  は乱れの強度、流れのせん断応力（せん断応力はフロックの大きさを決める）、粒子の大きさの分布型、フロックが沈降している地点の底面よりの高さの関数である。

f) 泥の静水中での沈降の問題は、Krone, McLoughlin, Pierce and Williams, Gibson, D. S. I. R. によって調べられている。このうち Pierce and Williams は泥の濃度を 20000 ~ 500000 ppm に変化させて実験を行い、沈降速度として次式を得た。

$$w_e = w_0 \left[ 1 - \frac{C}{\rho_f (1 - \epsilon)} \right]^{4.65} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

- $w_e$  : 濃度 C の時の沈降速度
- $w_0$  : フロックの沈降速度を Stokes 則に基づいて計算した値
- $\epsilon$  : フロックの空げき率

である。

指数はフロックが球型の場合に 4.65、立方体の場合に 5.85、円盤状の時 4.15 という値をとる。

Krone は泥の沈降、圧密に関する実験を行い、圧密を受けた底面の比重が 1.2 であり、体積にして 88% が水よりなると報告している。この水は粒子間の間げきに存在したり、粘土粒子やフロックに吸着している。吸着している水は粒子の表面に、粒子そのものより数倍大きな厚さで層をなしている。

Owen は以上のような研究を総括して、静水中での沈降によって形成される底面における底質輸送の問題に関して、いまだ容易に測定される量を用いた予測はできないと論じ、その理由として次の二点をあげている。

(i) フロックの形成現象が、土の化学的な性質、粒径の複雑な関数であること。

(ii) フロックの形成に対して、粒子の沈降距離、したがって沈降速度が与える影響が明らかになっていないこと。

g) 流水中よりの泥の沈降の問題に関しては California 大学で行われた Einstein, Krone, Partheniades による研究がある。

Krone と Einstein によると、濃度が 300 ppm 以下では、沈降によって浮遊泥の濃度 C は次式に従って変化する。

$$\frac{C}{C_0} = \exp \left( - \frac{w_e p t}{d} \right) \dots\dots\dots (4)$$

ここに

- $C_0$  : 実験開始時 (t = 0) における浮遊泥の濃度



$d$  : 水深

である。

彼等は  $p$  が底面におけるせん断応力  $\tau_b$  の関数となり、次式で与えられるとしている。

$$p = 1 - \tau_b / \tau_d \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに  $\tau_d$  は、底面におけるせん断応力がそれ以上になると流水中よりの沈降がないという限界を与えるせん断応力であり、Krone 等の実験では 0.6 dynes/cm<sup>2</sup> であった。

濃度が 300 ppm 以上の時、濃度の時間変化は(4)式のかわりに次式で与えられる。

$$\log C = -k_2 \log t + \text{constant} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに

$t$  : 沈降が始まり出してからの経過時間

$t_0$  : 実験開始時より沈降が始まり出すまでの時間

$k_2$  : 初期濃度が 10000 ppm 以上の時  $k_2 = 0.26 \cdot t_0^2$  で与えられる定数である。初期濃度が 300 ~ 10000 ppm の時  $k_2$  は底面におけるせん断応力  $\tau_b$  の関数となり、 $k_2 = 103 \cdot (1 - \tau_b / \tau_d) / d$  となる。

h) Krone は泥の流水中よりの沈降と、底面よりの洗掘が同時に起りうると論じたが、Partheniades および Delft Hydraulics Laboratory の実験によると、 $\tau_d$  は洗掘を起すことができる最小のせん断応力  $\tau_c$  より小さく、沈降と底面よりの洗掘が同時に起ることはない。

i) 沈降した泥によって造られた底面の強度について Krone が調べ、以下のような結論を得ている。貫入試験器を用いて強度を調べた結果では、底面から深くなるに従って線型に強度が増加する。この強度増加の割合は底面が形成されて以来の経過時間による。また底面の密度について調べた結果によると、一般には底面から深くなるに従って線型に密度が増加する。密度の平均値は 1.16 ~ 1.20 g/cm<sup>3</sup> である。

Owen は次に泥の洗掘、輸送に関して従来の研究をとりまとめた。まず長期にわたる圧密をうけた泥面については以下のとおりである。

a) Smerdon および Beasley によると、底面の泥が移動を始める限界のせん断応力  $\tau_c$  は塑性指数 P.I. と次のような関係がある。

$$\tau_c = 0.0034 (P. I.)^{0.84} \quad \dots\dots\dots (7)$$

b) Carlson および Enger は  $\tau_c$  として次式を与えている。

$$\tau_c = a \cdot P. I. + b \cdot \rho + c (K'_\phi \sigma_\phi M_\phi) + d \cdot V. S. + e \cdot \rho / \rho_p + f \cdot L L \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに

- $\rho$  : 泥の密度
- $K'_\phi$  :  $\phi$  スケールにおける歪度
- $\sigma_\phi$  :  $\phi$  スケールにおける標準偏差
- $M_\phi$  :  $\phi$  スケールにおける平均粒径
- $V. S.$  : ベーンせん断強度
- $\rho_p$  : 最大 Proctor 密度
- $L L$  : 液性限界

である。

c) Dunn は鉛直下方に向う噴流を用いて  $\tau_c$  を測定し、次式を得ている。

$$\tau_c = 0.02 + \frac{(V. S. + 180)}{1000} \cdot \tan (30 + 1.73 P. I.) \quad \dots\dots\dots (9)$$

沈降後あまり時間のたっていない泥の洗掘、輸送については、次のような研究がある。

a) Krone によると、洗掘が始まってから時間  $t$  が経過した時点における浮遊泥の濃度  $C_t$  と、初期濃度  $C_0$  との間には次のような式が成立する。

$$C_t = C_0 e^{\lambda t} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに

$\lambda$  : 1 以下の定数

である。

実験結果によると、濃度が 300 ppm 以下の時、 $\lambda$  は底面に作用するせん断応力に関係なく、0.058 および 0.152 であった。濃度が 300 ppm 以上になると、0.02, 0.014, 0.212 となった。

b) Krone は流水より沈降した泥によって作られた底面に対する洗掘限界の方が、静水から沈降した泥によって作られた底面に対する洗掘限界より大きいことを見出した。また、洗掘が進むにつれ、底面の洗掘に対する抵抗が増大することを見いだした。

c) Partheniades は、天然の粘土床と、浮遊していた泥が沈降してできた底面との間で強度および洗掘の状況がどのように異なるかを調べた。それによると、ベーンせん断強度は 100 : 1 の割合であったが、前者の洗掘限界応力に対する後者の洗掘限界応力の比は 0.84 ~ 1.04 の範囲で変化し、同程度であった。またあるせん断応力によって洗掘された泥の量はほとんど同じであった。

d) Partheniades は実験により次のような結果を得た。底面から洗掘により浮上した泥を多量に含んだ水を泥をまったく含まない水に代えたところ、洗掘量は同じであった。すなわち洗掘量は上層水の濃度に関係しない。これに対し Krone の実験によると濃度が増加すると洗

掘量が減少し、Partheniades と異なる結論を得た。また Partheniades は次のような結論を得た。洗掘に対して乱れが重要な役割を果す。泥面を砂面で被覆すると洗掘に対する抵抗が増加する。

e) 異なった組成の泥が異なった洗掘特性を示すか否かについては不明である。

(2) 泥の沈降速度

Owen はその後、泥の沈降速度について研究を行った。まず詳細な研究の成果が1970年に発表された<sup>7)</sup>。泥の沈降速度は綿毛化 (Flocculation) に大きく影響される。Flocculation は前述したように粒子相互間の衝突と凝集という要素に支配され、粒子同士の衝突は溶液の濃度の影響を受ける。また溶液の塩分濃度は凝集力を変化させることにより、Flocculation に影響を及ぼす。また同一溶液内の粒子がさまざまな沈降速度を有している時、粒子相互間の衝突の機会が増加する。粒子の沈降していく距離が長いほど、衝突が起りやすいと考えられる。粒子がどれくらい沈降した所で一定の沈降速度になるかも重要な課題である。以上のような観点から、Owen は沈降速度に、溶液の濃度、塩分、沈降する距離が及ぼす影響を調べた。

実験に使用された泥は、Severn エスチュアリー (図-1 に 63 で示す) の Avonmouth で浚渫によって得られた。試料採取時の塩分は 18 g/l である。試料のうち 75 μ のふるいを通じた成分 (通常採取試料の 95 ~ 100 % にあたる) を用いて実験を行った。分散剤を加えてフロックを壊した試料について、沈降分析および遠心分離によって沈降速度の分布を調べた結果を図-19 に示す。また泥の鉱物分析を行った結果によると、カオリ

ナイトが 20 %, イライトが 52 %, モンモリロナイトが 15 %, クロライトが 12 % であった。

沈降速度の標準的な試験法は次のとおりである<sup>8),9)</sup>。図-20 に長さ 2 m の標準的な沈降管を示す。泥の試料

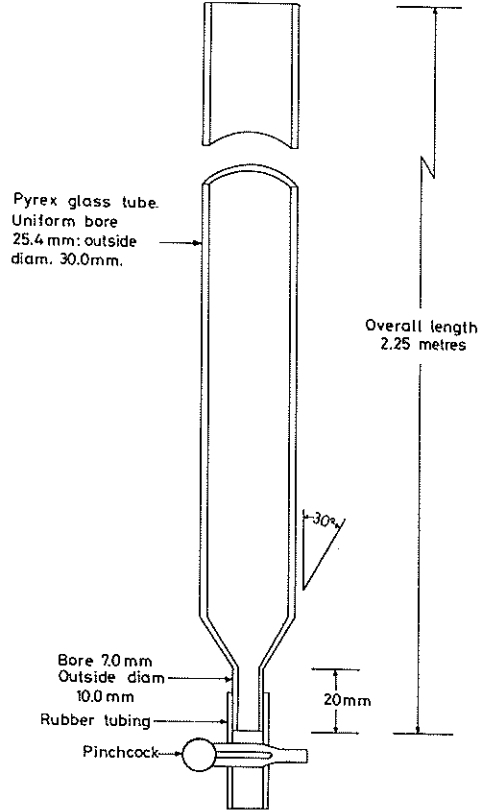


図-20 沈降管の概要

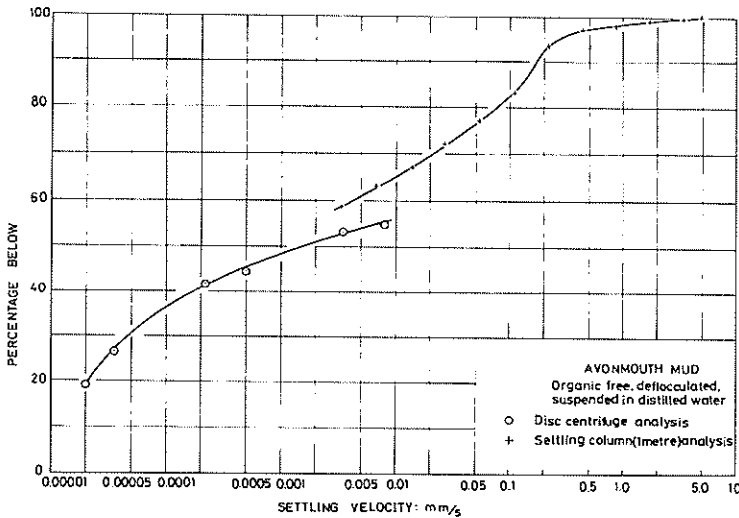


図-19 分散剤を加えた泥粒子の沈降速度の分布

を最初所定の濃度の溶液ができるように秤量し、蒸留水とまぜあわせる。次に所定の塩分濃度の水を加える。その後溶液を沈降管に入れ、振動を与えて完全に混合させ、沈降実験を始める。種々の経過時間の時に沈降管の底部より所定の量の水をぬきとり、乾燥後その中に含まれている泥分の質量を測定する。この質量、経過時間、底部よりぬきとった溶液の量より沈降速度の分布を計算することができる。水温変化に伴う水の粘性の変化を考慮して、得られた沈降速度を水温 20°C の時の沈降速度に変換する。

実験は溶液の塩分濃度を 2.0, 8.0, 16.0, 32.0, 48.0 g/l に、泥の含有量を 0.25, 1.0, 4.0, 16.0, 32.0 g/l に変化させて行った。また得られた沈降速度の分布より  $w_{50}$  (中央沈降速度),  $w_{16}$  ( $w_{16}$  以下の沈降速度を有する泥が重量にして 16% であることを示す。以下同様。),  $w_{84}$  を求めた。また沈降管の長さは、0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 9.0 m と変化させた。

沈降速度を計算するための原理となるのは、McLaughlin が与えた次式である。

$$\bar{w}_H \cdot C_H = - \frac{\partial}{\partial t} \int_0^H C dz \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに

- C : 標高  $z$  の所での溶液中の泥分の濃度
- $\bar{w}_H$  : 高さ  $H$  の所の平均沈降速度

$C_H$  : 高さ  $H$  の所の溶液中の泥分の濃度

$t$  : 時間

である。

図-21 は横軸に溶液中の泥分の濃度、縦軸に塩分をとり、等沈降速度線 (沈降速度の単位は mm/s である) を描いたものである。図より、泥分濃度や塩分を増加させると沈降速度も増加することがわかる。本図を図-19 と比較すると、Floculation の起っている図-21 の場合の方が、Floculation の起っていない図-19 の場合より沈降速度がはるかに大きくなっていることがわかる。また図-22 は  $w_{50}$  におよぼす泥分濃度の効果を明らかにするために、横軸に泥分濃度、縦軸に  $w_{50}$ 、パラメーターに塩分を取って描いてある。図-23 は塩分の効果を明らかにするために、横軸に塩分、縦軸に  $w_{50}$ 、パラメーターに泥分濃度をとってある。図-22 において、 $w_{50}$  が極大値をとった後、泥分濃度が増加しても  $w_{50}$  が減少していくのは hindered settling (溶液中の泥の粒子が増加したために、泥の沈降速度が他の粒子による妨害を受けて遅くなる現象) の領域に入ったためである。これに対し、図-23 において  $w_{50}$  が極大値をとった後減少していくのは、Floculation に対して塩分が及ぼす効果は塩分が約 30~40 g/l になった所で飽和に達し、これ以上塩分を増加させても、フロックは粘性のない粒子の沈降の場合と同様に、浮力の増大による  $w_{50}$  の

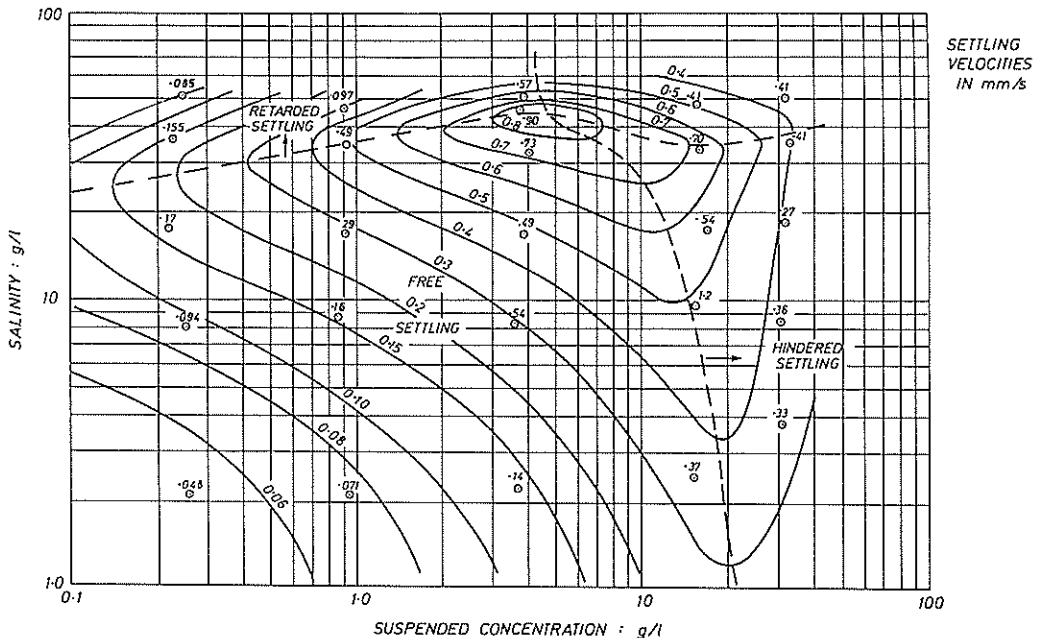


図-21 等沈降速度線

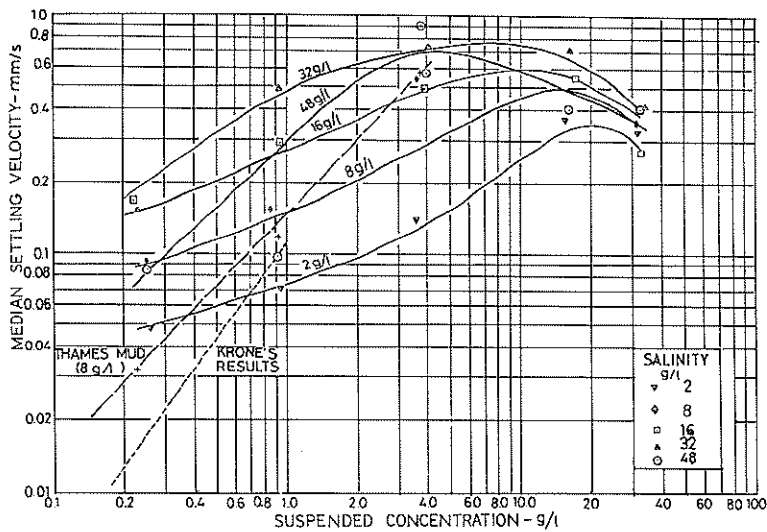


図-22 沈降速度に及ぼす泥分濃度の効果

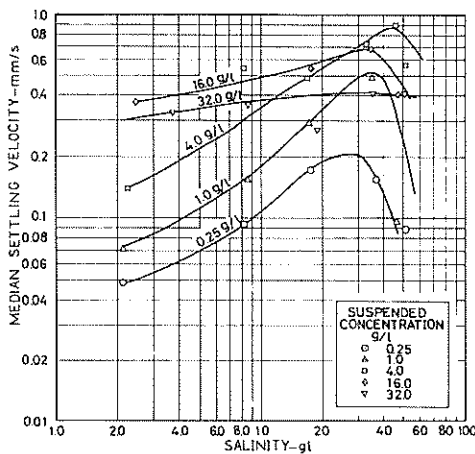


図-23 沈降速度に及ぼす塩分の効果

減少、またはフロックが壊れるための  $w_{50}$  の減少といった作用を受けることを示している。

0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m と変化させた沈降管の長さ(すなわち泥が沈降する距離)を横軸にとり、縦軸に  $w_{50}$  をとって両者の関係を示したものが図-24である。泥分濃度と塩分については9通りの組合せについて実験を行った。実験前には、沈降距離の増大に伴って  $w_{50}$  も増加するであろうと考えられていたが、本図によると異なる結果が得られた。すなわち、沈降距離が0.5 mから1.0 mに増加した時  $w_{50}$  は減少し、1.0 mから1.5 mに増加した時  $w_{50}$  は増加する。1.5 mから2.0 mに増加した時

は  $w_{50}$  が減少するものと増加するものがある。これより  $w_{50}$  が一定になるのに必要な沈降距離は1.5~2.0 mであると結論された。

以上のように沈降速度は、土の粒径、鉱物組成、含有有機物、泥分の濃度、塩分、水温、沈降する距離に支配されるが、この他に流れの乱れがフロックのサイズの決定に大きな影響を与えることを通じて沈降速度に影響を

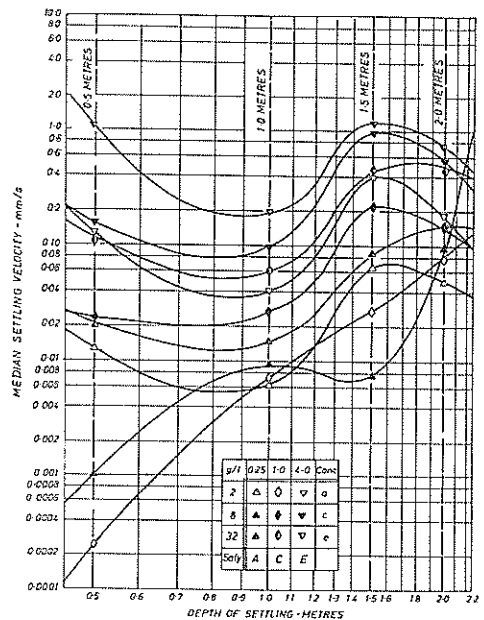


図-24 沈降速度に及ぼす沈降距離の効果

及ぼす。流れの乱れの影響を評価するには現地で採水した水を用いて、できるだけ自然に近い状態で採水した直後に沈降速度の測定を実施する必要がある。Owenはこのことを可能にする測器を開発した<sup>9-11)</sup>。この測器は現在Owen Tubeと呼ばれている。図-25にOwen Tubeを示す。内側のプラスチック製円筒の内径は51mm、延長が1mである。ほぼ中央の所が回転の中心になっているために、水中では流れに従って水平になり、空中では鉛直になる。装置を船上から水中の所定の深さまでおろしておき、円筒の両端を開くと、流水が円筒内を自由に通過する。外部からの信号により円筒の両端を閉じた後、装置を船上に引き上げる。装置が空中に出ると円筒は鉛直になり、この後実験室における同じ手法によって船上において沈降速度を測定することができる。円筒の底面から採取した泥分を含む溶液は実験室に持ち帰り、ろ過乾燥、秤量を行う。

Thames川のWoolwich Ferry Terminalにおいて、Owen Tubeを用いて沈降速度を測定した結果を図-26に示す。図中には、通常の方法によって実験室において沈降速度を測定した結果もあわせて示されている。Owen Tubeを用いて測定した結果は大潮時、小潮時に分けて示されている。通常の方法とは二種類あり、一つが川の底面から採取した泥を実験室に持ち帰って現場の水と同一塩分濃度(6~10 g/l)に設定した後、長

さ1mの沈降筒において沈降速度を測っている。もう一つは、小潮時に泥分を含んだ水を採水し、実験室に持ち帰って、まず振とうして含有物質を再浮遊させた後、同じく長さ1mの沈降筒を用いて沈降速度を測っている。図-26は両対数スケールであり、横軸が泥分の濃度、縦軸が $w_{50}$ である。図によると、Owen Tubeを用いた結果では、大潮時の試料について濃度と $w_{50}$ がほぼ線型の関係を有し、小潮時の試料について $w_{50}$ が濃度の二乗に比例する。底質を用いて測定した結果によると濃度と $w_{50}$ との間の関係は線型であるが、Owen Tubeによる測定結果と比較すると $w_{50}$ は一桁小さい。小潮時に採取した水を用いて、実験室において沈降速度を測定した結果では、濃度と $w_{50}$ はやはり線型な関係を有するが、 $w_{50}$ はOwen Tubeによる測定結果よりも小さくなっている。図-26中には、Woolwichより下流にあるTilburyにおいて、大潮時にOwen Tubeを用いて沈降速度を測定した結果もあわせて示してある。この時塩分は21~26 g/lとWoolwichにおける塩分より多かったが、得られた $w_{50}$ はWoolwichで大潮時にOwen Tubeを用いて測定した結果とほぼ一致した。

Owenは沈降速度に対する温度の影響について1972年に報告している<sup>12)</sup>。水温が変化すると粒子のブラウン運動による衝突の機会が変化し、また水の粘性が変化する。この結果一般には水温が増加すると沈降速度も大き

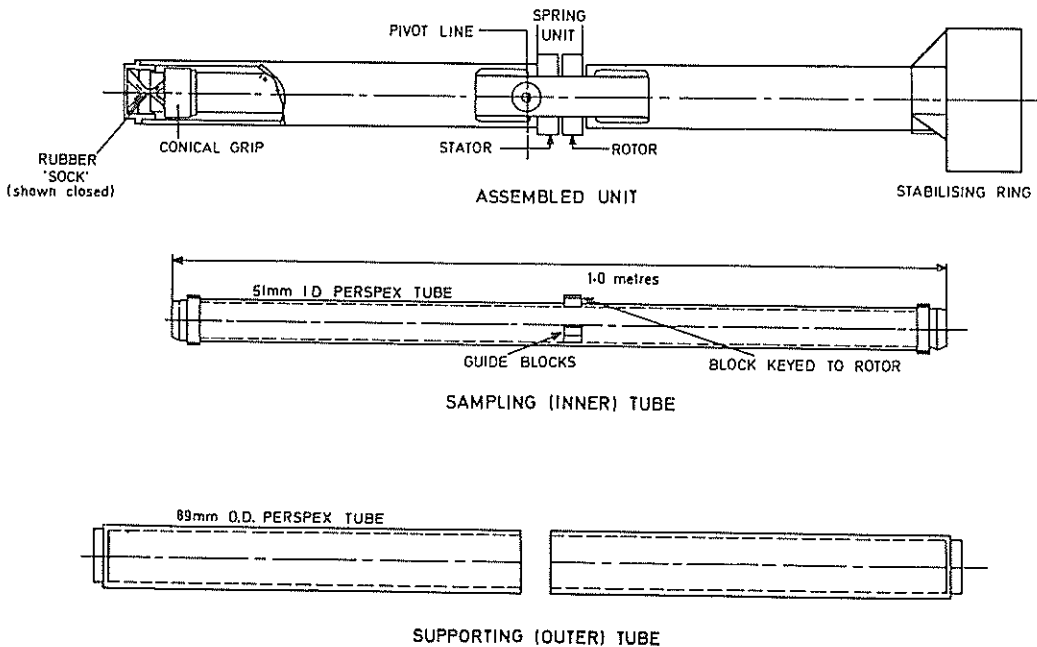


図-25 Owen Tubeの概要

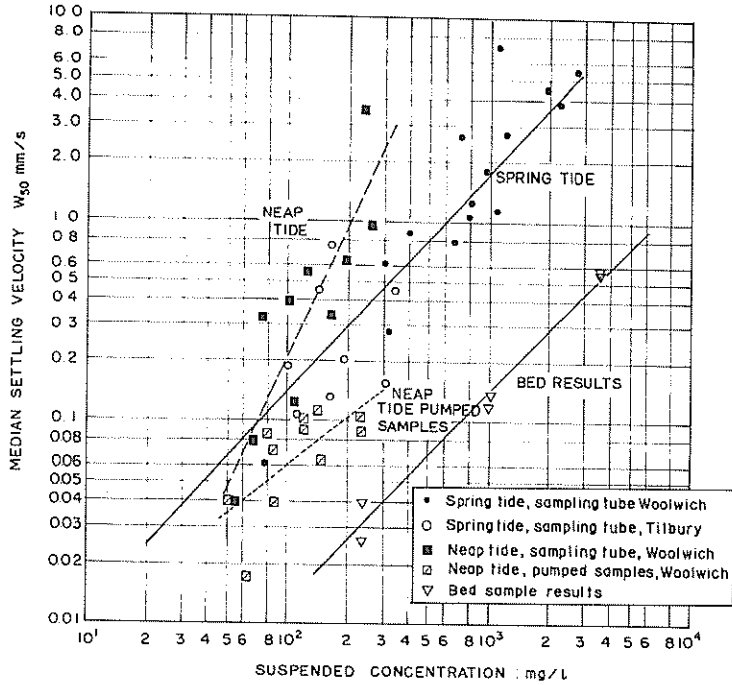


図-26 種々の方法による沈降速度の測定結果

くなると考えられる。泥の試料は1970年の報告<sup>7)</sup>と同様に Severn エスチュアリー の Avonmouth で採取した。実験にあたっては、水温を 5, 15, 25°C に変化させ、塩分は 2, 8, 32 g/l, 泥分の濃度は 0.25, 1.0, 4.0 g/l と設定した。長さ 2 m の沈降筒をプラスチック製の筒(外筒)の中に入れ、外筒中には所定の温度の水を循環させた。この点を除くと、沈降速度の測定方法は1970年の報告<sup>7)</sup>と全く同様である。

粘性に対する水温の影響を除去するために、測定された沈降速度に実験時の水温に対する粘性係数と 20°C の時の粘性係数との比を乗じることによって、粘性係数に関しては補正された沈降速度を求めた。図-27 は上記が横軸に水温、縦軸に沈降速度の標準偏差をとった図であり、下図が横軸に水温、縦軸に  $w_{50}$  をとった図である。図によると、水温が変化しても  $w_{50}$  はあまり変化しない。したがって水温の上昇は粘性の変化を通じて沈降速度に影響を与えるだけであると考えられる。しかし標準偏差は水温の上昇に伴って減少しており、Flocculation が水温の上昇に伴って促進されることを示している。

(3) 泥の圧密特性

Owen は高さ 10 m の沈降筒を用いて静水中を沈降した泥が底面を形成する現象を調べ、溶液の泥分濃度、塩分、沈降距離の効果を検討し、その結果を1970年に

報告した<sup>13)</sup>。形成された底面について圧密特性、密度、表層の沈降量、せん断強度を測定した。

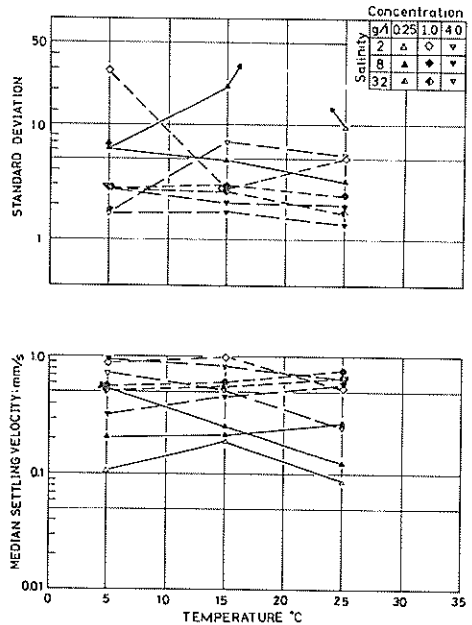


図-27 沈降速度に及ぼす温度の効果

実験に用いられた泥は沈降速度の測定に際して用いられたもの<sup>7)</sup>と同じであり、Avonmouthで採取された。採取された水の泥の濃度は170 g/l、塩分は18 g/lであった。沈降速度の実験と異なり、泥のうち75 μのふるいを通過したものだけを実験に用いるといったことは行わなかったが、75 μ以上の成分は5%未満であり、このことによる違いは小さいと考えられた。鉱物組成はカオリナイト20%、イライト52%、モンモリロナイト15%、クロライト12%である。陽イオン交換容量(cation exchange capacity)を測定した結果は、17 meq/100 gであり、比較的不活発で、塩分の変化にあまり敏感でない泥であることを示している。液性指数および塑性指数は、それぞれ91%、57%であった。

図-28は沈降筒の概要を示している。高さ10 m、内径92 mmである。1.525 mおきに沈降筒内から少量の水を採取できるようになっており、泥分濃度および塩分を測定することができる。底より0.9 mの部分は0.1 mの長さの筒が9本つながっており、分解して圧密の状況を調べるための試験に用いることができる。泥を含んだ

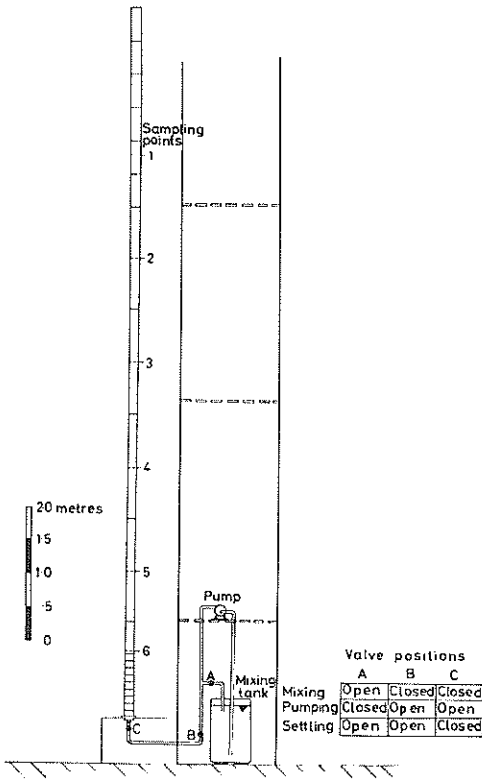


図-28 圧密実験用沈降筒の概要

試料はタンク内で混合された後、沈降筒最下部より沈降筒内に入れられ、その直後より沈降実験が始まる。底面のせん断強度はBrookfield viscometerを用いて調べた。この機械は床面に内円盤(直径18.72 mm、厚さ6.86 mm)の部分を入れ、種々の速度で回転させ、その時に受ける抗力が測定できるようになっている。

浮遊している泥の沈降によって形成される底面の平均密度 $\bar{\rho}$ は以下のようにして求めることができる。底面厚 $H$ と底面内の泥の乾燥後の質量 $m_c$ との間には次式がなりたつ。

$$\frac{dH}{dt} = \frac{dm_c}{dt} \cdot \frac{1}{A_c \bar{\rho}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

なお、 $A_c$ は沈降筒の断面積である。

(12)式中の $dm_c/dt$ は、浮遊泥を含んでいる水と、その上ずみとなっている水との境界の位置 $z_c$ を用いて、次式のように表わすことができる。

$$\frac{dm_c}{dt} = A_c C \left( -\frac{dz_c}{dt} + \frac{dH}{dt} \right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

なお、 $C$ は浮遊泥を含んでいる水の平均濃度である。

(12)、(13)式より $\bar{\rho}$ は、 $z_c$ 、 $H$ 、 $C$ の関数として次のように求まる。

$$\bar{\rho} = C \left( 1 - \frac{dz_c/dt}{dH/dt} \right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

一方、沈降筒の長さを $h$ とすると $\bar{\rho}$ は次のようにも書くことができる。

$$\bar{\rho} = C \cdot \frac{h}{H} \quad \dots\dots\dots (15)$$

以上の方法によると底面内の平均密度しか求められないが、Kynchは底面内の密度分布を次のようにして計算できることを示した。底面内における泥の局所的な沈降速度 $w_d$ が、局所的な底面の密度 $\rho$ だけの関数であるとする、ある面を通過する下向きの泥の輸送量(単位面積、単位時間当りの質量) $S$ は次式で示される。

$$S = \rho \cdot w_d(\rho) \quad \dots\dots\dots (16)$$

底面内の標高 $h_c$ の所にある微小要素(厚さ $\delta h_c$ )を考えると、 $S$ に対する連続方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial h_c} \quad \dots\dots\dots (17)$$

(16)式によると $S$ は $\rho$ だけの関数であるから(17)式は次のように書くことができる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + V(\rho) \frac{\partial \rho}{\partial h_c} = 0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

なお、 $V(\rho) = -dS/d\rho$ である。

床面内で密度が時間的に変化しない所は次式によって決定される。

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{dh_c}{dt} \cdot \frac{\partial\rho}{\partial h_c} = 0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

(18), (19)両式より

$$\frac{dh_c}{dt} = V(\rho) \quad \dots\dots\dots (20)$$

したがって(20)式の関係満足する点を結んでいくと、時間が経過しても密度が変化しない等密度線を求めることができる。等密度線上では $\rho$ が一定であるから $V(\rho)$ も一定となり、種々の密度に対する等密度線は次式で示される直線となる。

$$h_c = V(\rho) \cdot t \quad \dots\dots\dots (21)$$

図-29には横軸に時間、縦軸に底面厚をとって、典型的な底面厚の時間変化曲線が示されている。また図中には等密度線もあわせて記入されている。等密度線は最初に泥が堆積し始める時点を示す点(Origin of Settlingと示してある)を通る。

等密度線が底面表層を切る時間は次式によって求めることができる。

$$t = \frac{m_c}{\rho A_c \{ V(\rho) + w_d(\rho) \}} \quad \dots\dots\dots (22)$$

また等密度線と底面表層との交点では、 $w_d(\rho)$ は底面厚の変化率と等しくなり、次式が成立する。

$$w_d(\rho) = -dH/dt \quad \dots\dots\dots (23)$$

(20), (22), (23)式より、 $V(\rho)$ 、 $w_d(\rho)$ を消去し、また $H$ は $t$ と $dh_c/dt$ との積であるから、次式が得られる。

$$\rho = \frac{m_c}{A_c (H - t \cdot \frac{dH}{dt})} \quad \dots\dots\dots (24)$$

(24)式の右辺分母は、図-29に示す底面厚の時間変化曲線に対する接線が縦軸となす交点の座標 $H_1$ に等しい。 $m_c$ は沈降筒の長さ $h$ に比例するから、24式より次式が得られる。

$$\rho = C \frac{h}{H_1} \quad \dots\dots\dots (25)$$

Kynchの理論を検証するために、Thames川より採取した泥を用いて実験を行なった。泥粒子が沈降して底面の形成が始まると、上澄みの水を静かに排水した。その後内径2mmの細い管を底面中にさしこんで底面のコアサンプルを得た。このコアサンプルより密度分布を測定した。図-30に測定結果をKynchの理論に基づく計算結果と共に示すが、よく一致している。

図-31に底面内の平均密度と、Kynchの理論を用いて図-29より求めた底面表層の密度との時間変化を示す。図-29に示すように、底面厚は100~300分時間が経過した所で最大値をとるが、平均密度、表層密度は底面厚が最大値をとるまでの間は一定である。その後急速に圧密が進んで密度が増加するが、やがて圧密が徐々にしか進行しないようになり、密度も最終的な値へ漸近的に近づいていく。

種々の浮遊泥濃度に対する底面内の密度分布を、Kynchの理論によって計算した結果を図-32に示す。底面の

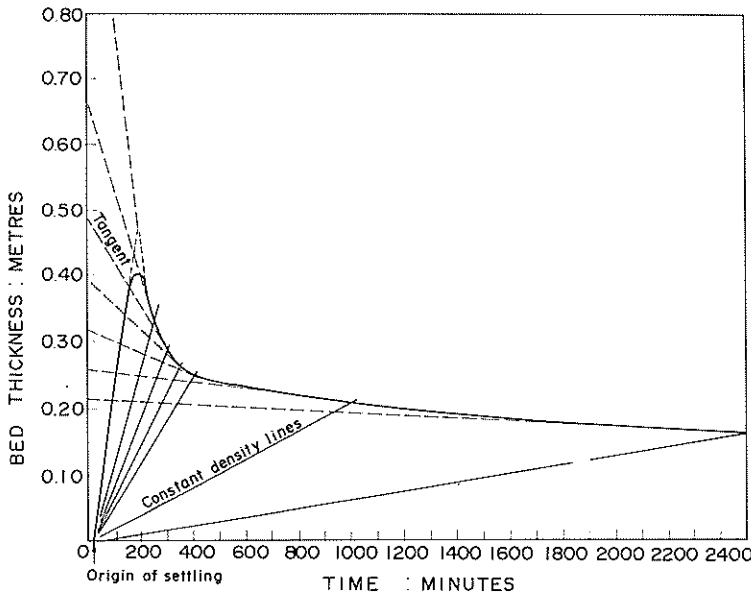


図-29 底面厚の時間変化曲線



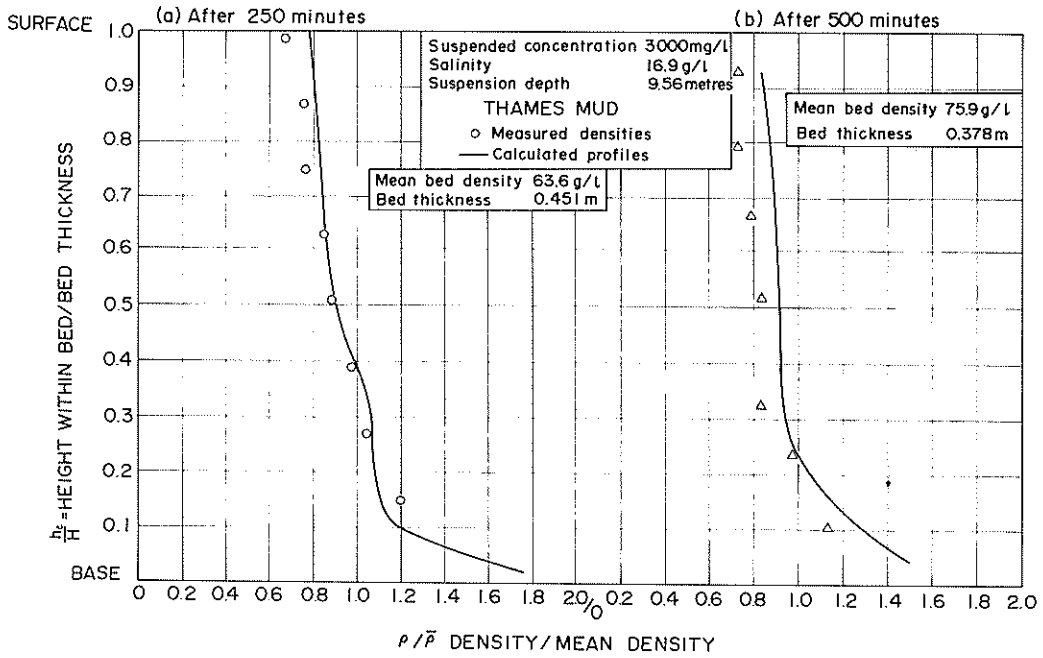


図-30 底面内における密度の変化

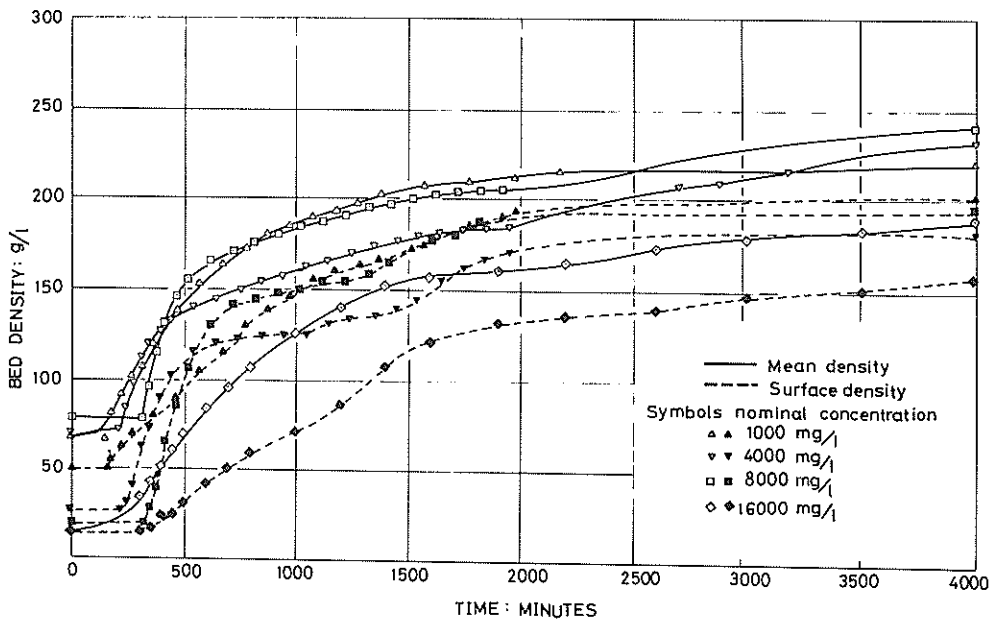


図-31 底面内の平均密度、表層密度の経時変化

形成期間中 (during formation と表示) では、溶液濃度が 1000 mg/l の場合に密度分布は比較的一様であるが、濃度の大きい場合には、密度は幅広く変化している。500 分経過後には、濃度 4000 mg/l の場合の密度分布における変動幅が狭くなり、濃度 1000 mg/l の場合とはほぼ同じ密度分布を示すようになる。2000 分経過後には圧密が進行し、いずれの濃度の場合も、変動幅の

狭い、ほぼ同じ型の密度分布となっている。

4000 分経過後に底面内の密度分布を測定した結果を図-33 に示す。塩分と溶液濃度といった実験条件が相違するにもかかわらず、無次元表示した底面内の密度分布は相似の形となっている。底面表層において  $0.6 \bar{\rho}$ 、底面底層において  $3 \bar{\rho}$  であり、 $h_c/H = 0.28$  の所で  $\rho$  は  $\bar{\rho}$  に等しくなる。

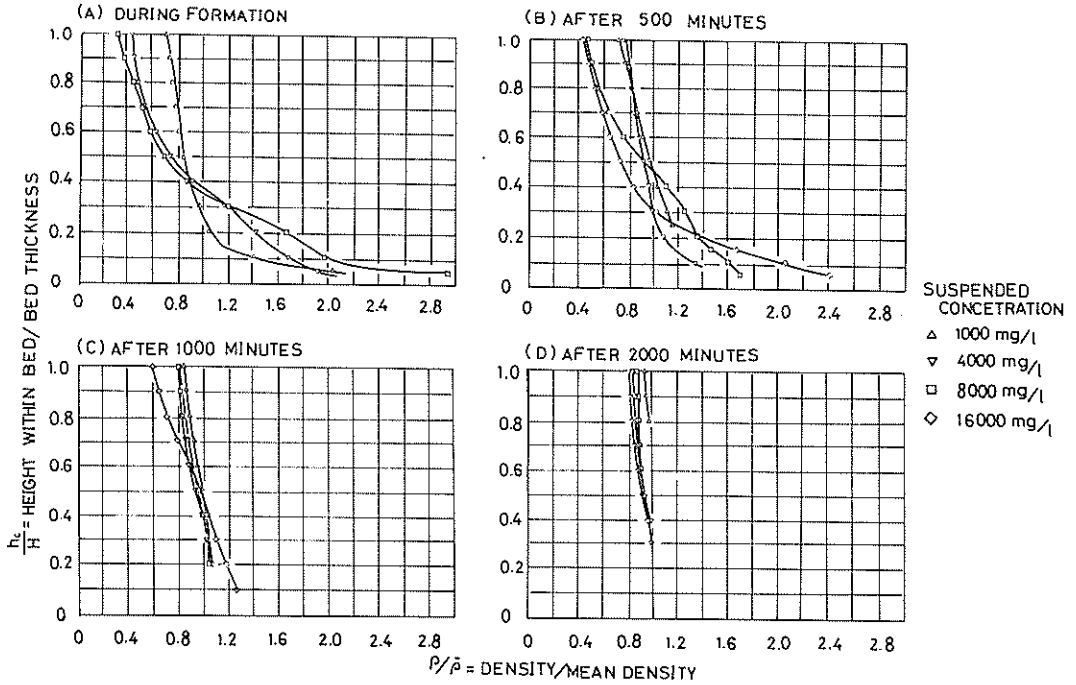


図-32 底面内の密度分布の経時変化

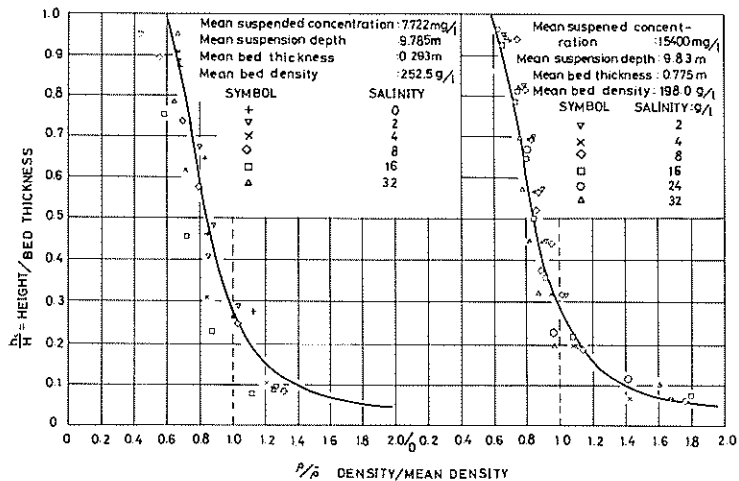


図-33 底面内の密度分布 (4000 分経過後)

泥によって Viscometer の回転する円盤に及ぼされるせん断応力は次式のように表わされる。

$$\tau = \tau_p + \mu_d \cdot \frac{du}{dy} \quad \dots\dots\dots (26)$$

ここに

- $\tau$  : せん断応力
- $\tau_p$  : 泥のビンガムせん断強度であり、円盤に作用するトルクと関係づけられる。
- $\mu_d$  : differential viscosity
- $du/dy$ : 速度こう配

である。4000 分の圧密を経た後に、Viscometer を用いて表面せん断強度および表面における differential viscosity を測定した結果を、図-34 に示す。横軸に浮遊泥分の濃度、縦軸に表面せん断強度および differential viscosity がとられている。表面せん断強度は、溶液濃度が 1000 mg/l より 4000 mg/l に増加すると急激に減少し、それ以上に溶液濃度が増加してもほぼ一定である。differential viscosity は溶液濃度が 1000 mg/l から 4000 mg/l に増加すると急激に増加し、その後ほぼ一定値をとる。以上の結果より溶液濃度 1000 mg/l の時沈澱したフロックは強くまた緊密であり、溶液濃度が増加した場合に形成される底面の表層は圧密によって表層密度が増加したにもかかわらず、弱く、ゆるやかにしか結合していないと結論づけられた。

横軸に塩分をとって底面の密度や表層のせん断強度におよぼす塩分の効果を調べた結果によると、塩分の変化はそれらの諸量の変化にほとんど影響を及ぼさなかった。さらに溶液濃度および塩分を一定にし、沈降筒の高さを変化させて実験を行い、沈降距離の効果を調べた。その結果、溶液濃度を一定にして沈降距離を変化させる

(たとえば沈降距離を短かくする)ことは、沈降距離を一定にして溶液濃度を変化させる(たとえば溶液濃度を減少させる)ことと、形成される底面の厚さが同じであれば、全体として同じ効果を持つことがわかった。

溶液濃度 8000 mg/l の時に形成された底面の内部におけるせん断強度の分布を図-35 に示す。せん断強度は表層において 0.9 N/m<sup>2</sup> 程度であるが、底面内部では急激に増加していく。なお differential viscosity の分布についてはデータの散らばりが大きく、有意な結論は得られなかった。

底面内で深くなると密度が増加するという現象と、深くなるとせん断強度が増大するという現象との相似性から、密度とせん断強度との間には相関があると考えられる。横軸に密度を、縦軸にせん断強度をとって両者の関

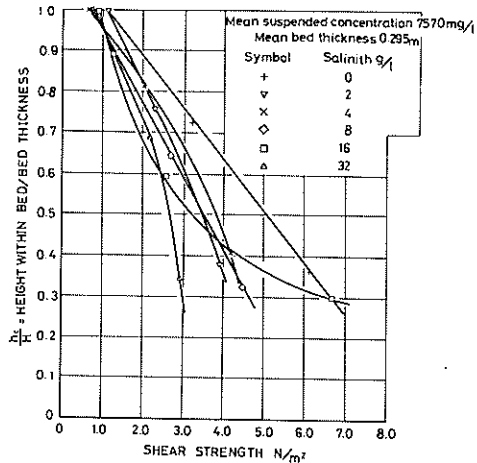


図-35 底面内におけるせん断強度の分布

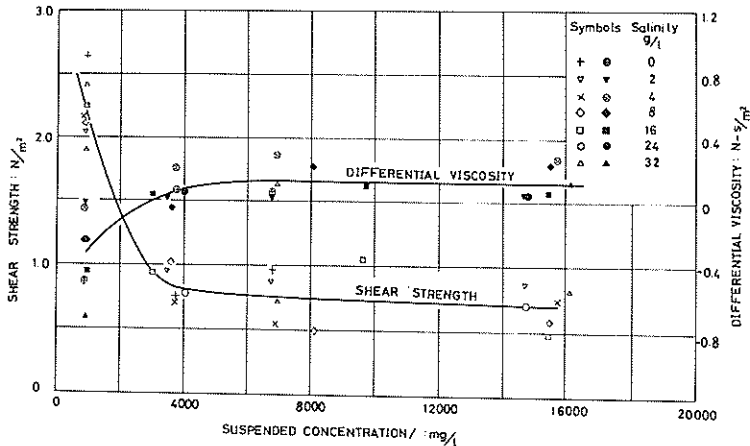


図-34 泥分濃度が表面せん断強度および differential viscosity に及ぼす影響

係を調べた結果を図-36に示す。図より密度とせん断強度との間には強い相関のあることがわかった。

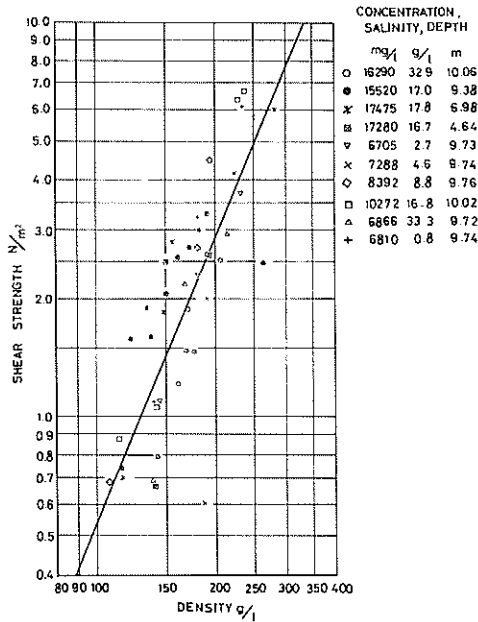


図-36 底面内におけるせん断強度と密度との相関

(4) 泥の輸送特性

Owen は静水中を沈降した泥によって形成された底面の洗掘、輸送特性について研究した結果を1975年に発表した<sup>14)</sup>。この研究の目的は次のようなものであった。

- a) 洗掘、輸送過程を詳細に調べること。

- b) 洗掘、輸送現象における限界せん断応力の概念を樹立すること。

- c) 洗掘、輸送特性を泥の物理的な特性に関連づけること。

実験は図-37に示す双子型水路 (Twin Flumes) と呼ばれる循環式的水路で行った。この水路はまったく同一形状の水路が二つ並んだものである。測定が行われる部分は幅30 cm、深さ20 cm、延長7.3 mであり、この部分の上流側に延長8.5 m、下流側に延長1.8 mの整流部分がある。水路の天井部は取りはずし可能であり、天井部をとりはずした後に、深さ2 m、幅30 cm、長さ7.3 mの底があいた沈降タンクを測定部分の上に置くことができるようになっている。実験手順としては泥を含んだ水を沈降タンクの中に入れ、沈降 (通常6時間程度を要する)、圧密 (通常2~4日を要する) を経てタンクの下の水路内に泥よりなる底面をつくる。その後沈降タンクを取りはずし、水路に天井部を置いて管水路とし実験を行う。同一形状の水路が2本あるため、一方の水路で実験を行っている期間中にも、他方の水路では底面の形成作業を行うことができる。水路の両端は直径20 cmの円管路で結ばれており、円管路の断面積は水路本体の断面積より小さいため、円管路中に泥が堆積することはない。流量は円管路内に設けられたオリフィスを用いて測定する。水路本体中の測定部分における損失水頭は、1.83 mおきに水頭を測定して求める。また円管路中から20 cc程度の少量の採水ができるようになっている。実験に用いた泥は沈降速度や圧密の実験に用いたも

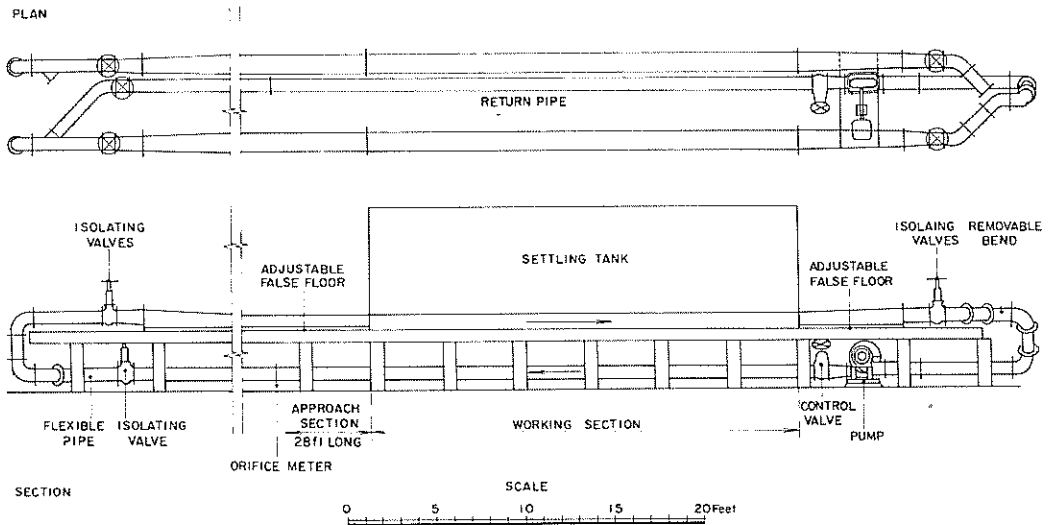


図-37 洗掘実験に用いた双子型水路の概要

のと同じく Avonmouth において採取したものであるが  $d_{50}$  は  $5 \mu$  と少し粗い。

三種類のせん断応力について、浮遊している泥の濃度の時間変化を測定した結果を図-38 に示す。最初約40

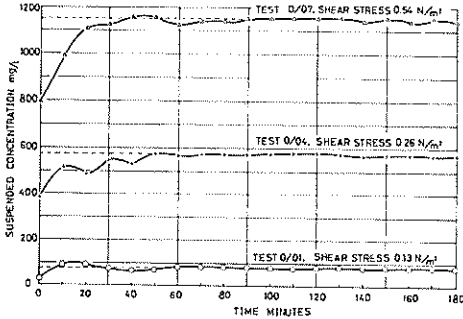


図-38 浮遊泥濃度の経時変化

分間濃度は増加するが、その後平衡状態になり、以後ほぼ一定値を保つ。当然のことながら、せん断応力の増加に伴って平衡状態での濃度も増加する。このように平衡状態が形成されるのは、第一に 4.1.(3) で述べたように底面内で深くなるほど密度が増加し、したがって洗掘に耐えることができるようになることに伴い、作用するせん断応力に対して平衡状態を形成する所まで洗掘が進むからであると考えられる。第二に洗掘によって底面から浮遊する泥の量と、流水中より底面に沈降していく泥の量とが等しくなるからである。

以上のような実験に対して、さらに流速が上がってせん断応力を増加させたところで同様の実験を行うと、浮遊している泥の濃度は徐々に増加していき、ついには底面から泥がなくなってしまう。この過程において水路を流れる水の流量は一定であるから、底面が洗掘されるにつれ、流れの通過する断面積は増加し、せん断応力は徐々に減少していく。したがって実験の過程を細かくわけると(たとえば15分間隔にせん断応力、洗掘量を調べると)、せん断応力と洗掘量との間にある関係を調べることができる。

図-39 では横軸に底面せん断応力、縦軸に洗掘量をとっている。図より底面せん断応力と洗掘量との間に次式で示されるような関数関係を設定することができる。

$$\dot{m}_e = M_e (\tau_b - \tau_c) \quad \dots \dots \dots (27)$$

上式において

$\dot{m}_e$  : 洗掘量 (g/m<sup>2</sup>/s)

$M_e$  : 定数

$\tau_b$  : 底面せん断応力 (N/m<sup>2</sup>)

$\tau_c$  : 洗掘限界における底面せん断応力 (N/m<sup>2</sup>)

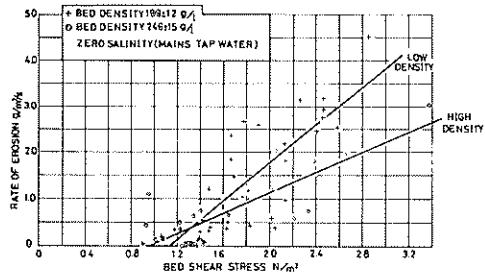


図-39 洗掘量と底面せん断応力との関係(底面密度の効果)

である。

図-39 に(27)式をあてはめると、底面の平均密度が  $199 \pm 12 \text{ g/l}$  の場合(28)式、 $246 \pm 15 \text{ g/l}$  の場合(29)式の関係が成立する。

$$\dot{m}_e = 2.04 (\tau_b - 1.14) \quad \dots \dots \dots (28)$$

$$\dot{m}_e = 1.07 (\tau_b - 0.96) \quad \dots \dots \dots (29)$$

以上に述べた底面の洗掘に関する実験はすべて淡水を用いて行われたが、塩分の効果を検討するために  $32 \text{ g/l}$  の塩分を含む水を用いて同様の実験を行った。せん断応力が小さい時の実験において、塩分を加えることは次のような効果を及ぼす。

a) 図-40 に示すように平衡状態における流水中の泥分濃度が塩分を含まない水の場合にくらべて減少する。

b) 図-41 に示すように平衡状態における泥面表層

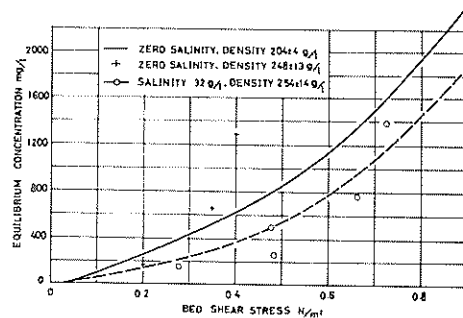


図-40 平衡状態における泥分濃度と底面せん断応力との関係(塩分の効果)

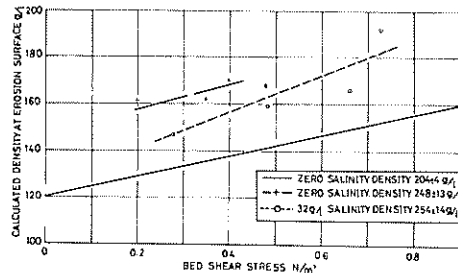


図-41 平衡状態における底面表層の密度と底面せん断応力との関係(塩分の効果)

の密度が、塩分を含まない水の場合にくらべて減少する。言い換えれば、塩分を加えることにより底面は洗掘に対する抵抗を増し、洗掘される層の厚さが薄くなる。図-39に示した底面せん断応力を大きくした時の実験において、塩分を加え、底面せん断応力と洗掘量との関係に及ぼす塩分の効果を調べた結果を図-42に示す。(29)式(淡水を用いた実験において得られた式)に対応する塩水を用いた場合の実験式は次式ようになる。

$$\dot{m}_e = 0.31 (\tau_b - 0.93) \quad \dots\dots\dots (30)$$

(29)式と(30)式を比較すると洗掘限界における底面せん断応力 $\tau_c$ はほぼ同じであるが、定数 $M_e$ が(30)式において小さくなっており、塩分の添加により洗掘量が大幅に減少したことを示している。

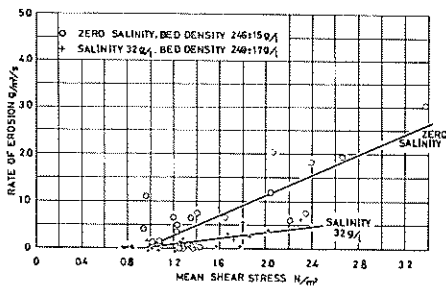


図-42 洗掘量と底面せん断応力との関係(塩分の効果)

泥面の洗掘および流水中よりの泥の沈降の両現象を统一的に調べてみるために、Partheniadesが行った泥の沈降に関する実験の結果を、本実験の結果と合わせて示したものが図-43である。横軸にはせん断応力、縦軸には浮遊している泥の量と水路中に存在している泥の全

量との比をとってある。Partheniadesが実験に用いた泥と、本実験に用いられた泥とは異なるが、図によるとせん断応力を徐々に増加させていき、その後徐々に減少させると、流水中の泥の濃度は図に示すようなヒステリシスを描くと予想される。また、せん断応力が $1.14 \text{ N/m}^2$  ((28)式における $\tau_c$ )より大きくなると連続的な洗掘が起り、 $0.07 \text{ N/m}^2$  (沈降限界におけるせん断応力 $\tau_d$ )より小さくなると連続的な沈降が起ると考えられる。せん断応力が $0.07 \sim 1.14 \text{ N/m}^2$ の範囲にある時には、連続的な洗掘や沈降は起らず、平衡状態が維持される。

#### 4.2 OwenおよびOddによるシルテーションの数値モデル

OwenおよびOddはThames川における高潮対策用の堰の建設に関連するシルテーションの問題を、数値計算によって検討し、その成果を1970年に発表した<sup>15)</sup>。本研究は、シルテーションについて現象をモデル化し、数値計算を適用した最初のものである。ここでは彼等が英国土木学会論文集に発表した論文<sup>16)</sup>に従って研究の概要を示す。

エスチュアリーにおける水の運動、塩分や泥の量の間には、図-44に示されるような複雑な関係がある。図中には種々の要素間の相互作用の大きさおよび速さも示してある。数値計算には図中実線で示される強い作用のみが取り入れられた。例えば泥が堆積することによる水深の変化が水の運動に与える影響は小さいとして数値モデル中には取り入れられていない。

InglisおよびAllenの論文<sup>2)</sup>でも示されたように、上層と下層が異なった運動をすることは、シルテーションに大きな影響を及ぼす。したがって流れおよび浮遊泥の分布について図-45に示したような二層モデルを採

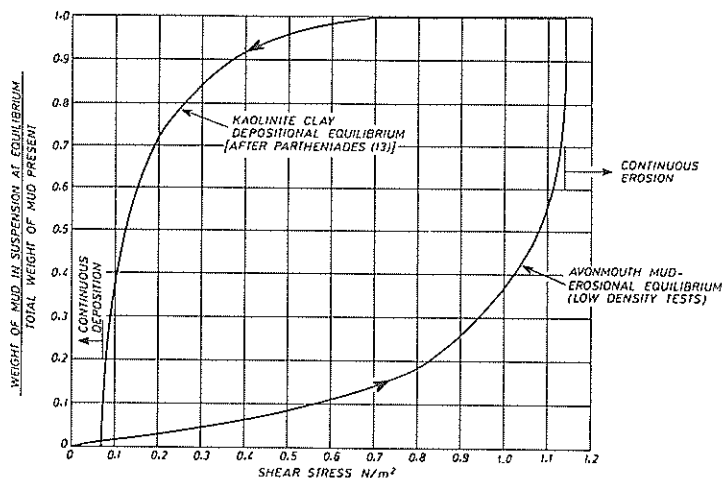


図-43 平衡状態における洗掘特性と沈澱特性

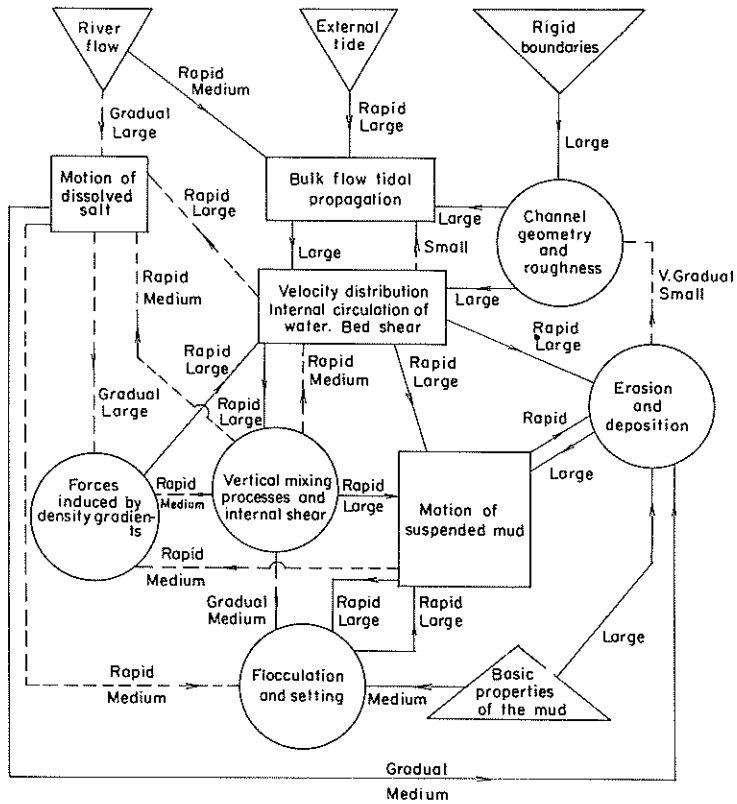


図-44 水の運動、塩分、泥の間における相互関係

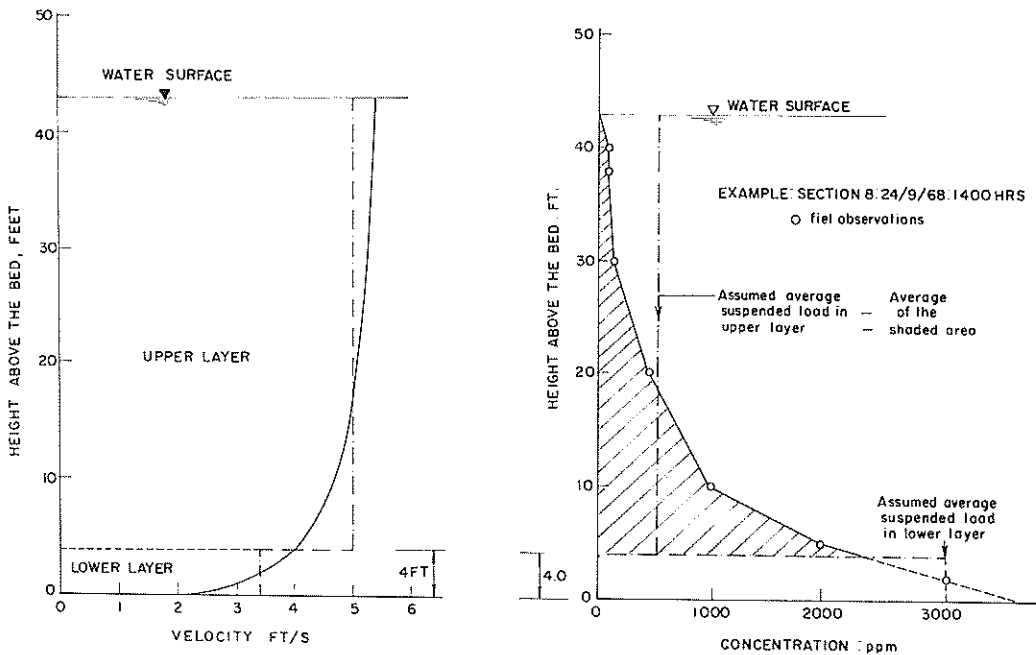


図-45 流速および浮遊泥の分布に関する二層モデル

用する必要がある。図において、各層内での速度および浮遊泥の濃度は一定とされている。

最初に水の運動に関するモデルの概要を示す。水路は長方形断面を持つと考え、 $x$  軸を水路の中央を通過して上流へ向う方向を正にとりて設定する。この時、潮汐に伴う水の運動方程式および連続式は次のようになる。

$$\frac{1}{g} \frac{Du}{Dt} + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{(\eta - z)}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \dots \dots \dots (31)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ b(x) \int_{z_b}^{\eta} u dz \right\} + b(x) \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \dots (32)$$

ここに、

- $u$  : 水路方向の流速
- $\eta$  : 水表面の位置
- $\rho_w$  : 水の密度
- $\tau_{zx}$  : せん断応力
- $b(x)$  :  $x$  の位置における水路幅
- $z_b$  : 水路底面の位置

である。

流速  $u$  を水深方向に積分したものを  $U_B$  とすると、

$$U_B = \frac{1}{\eta - z_b} \int_{z_b}^{\eta} u dz \dots \dots \dots (33)$$

となり、この  $U_B$  および水深  $d$  ( $\eta$  と  $z_b$  との差) を用いて、(31)式は次のように水深方向に積分した型で書ける。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial U_B}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{d}{2\rho_w} \frac{\partial \bar{\rho}_w}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w g d} \int_{z_b}^{\eta} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz = 0 \dots \dots \dots (34)$$

(34)式の左辺第四項は次のように  $U_B$  および Darcy - Weisbachの摩擦係数  $f_B$  を使って書ける。

$$\frac{1}{\rho_w g d} \int_{z_b}^{\eta} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz = \frac{f_B |U_B| U_B}{8 g d} \dots \dots \dots (35)$$

なお  $f_B$  は水路の相当粗度  $k_s$  およびレイノルズ数  $U_B d / \nu$  と次の Colebrooke - White 式によって関係づけられる。

$$\frac{1}{\sqrt{f_B}} = -2 \log \left( \frac{k_s}{14.8 d} + \frac{2.51 \nu}{U_B d \sqrt{f_B}} \right) \dots \dots (36)$$

また(34)式の左辺第三項は他の項にくらべて小さいから省略すると、(35)式もあわせて(34)式は次式のようになる。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial U_B}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{f_B |U_B| U_B}{8 g d} = 0 \dots \dots (37)$$

一方、水の連続式((32)式)は次式のように書ける。

$$\frac{\partial \{ b(x) U_B \}}{\partial x} + b(x) \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \dots \dots \dots (38)$$

(37),(38)式における未知数は  $U_B$  および  $\eta$  であるから、これ

らを差分法によって解くと、潮汐現象に伴う水表面の位置、平均流速が求まる。この流れに定常流である河川流を重ね合わせると、河川流も考慮した流速が得られる。

次に下層の流れに対する連続方程式は次のようになる。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial U_L}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w d_L} \int_{z_b}^{z_b + d_L} (\eta - z) \frac{\partial \rho_w}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho_w g d_L} \int_{z_b}^{z_b + d_L} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz = 0 \dots \dots \dots (39)$$

ここに、

$d_L$  : 下層の厚さであり、流路方向に一定とする。

$U_L$  : 下層の平均流速であり、次式で与えられる。

$$U_L = \frac{1}{d_L} \int_{z_b}^{z_b + d_L} u dz \dots \dots \dots (40)$$

(39)式において、左辺第三項の密度の流路方向の変化項は(34)式の場合と異なり無視できない。 $d_L$  が  $d$  にくらべて小さい時この項は次のように近似できる。

$$\frac{1}{\rho_w d_L} \int_{z_b}^{z_b + d_L} (\eta - z) \frac{\partial \rho_w}{\partial x} dz = \frac{d}{\rho_w} \left( \frac{\partial \rho_w}{\partial x} \right)_b \dots \dots \dots (41)$$

また左辺第四項は(35)式にならって次のように書ける。

$$\frac{1}{\rho_w g d_L} \int_{z_b}^{z_b + d_L} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz = \frac{f_L |U_L| U_L}{8 g d} \dots (42)$$

(42)式中の  $f_L$  は Colebrooke - White 式によって求められる。

(41)(42)式を(39)式に代入すると、下層における水の運動方程式として次式が得られる。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial U_L}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{d}{\rho_w} \left( \frac{\partial \rho_w}{\partial x} \right)_b + \frac{f_L |U_L| U_L}{8 g d} = 0 \dots \dots \dots (43)$$

また、下層における水の連続方程式は次のようになる。

$$d_L \cdot \frac{\partial}{\partial x} [ U_L b(x) ] + b(x) V_i = 0 \dots \dots \dots (44)$$

上式において

$V_i$  : 上、下層間の鉛直方向流速

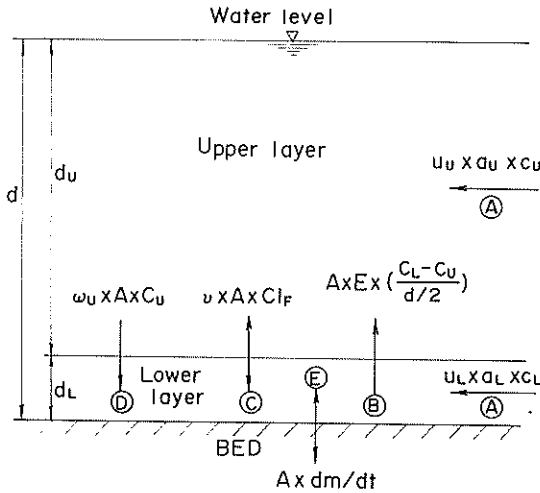
である。

(37),(38)式を解いて得られる、 $\partial \eta / \partial x$  および  $d$  を(43)式に代入し、左辺第三項には観測値を入れると差分法を用いて、 $U_L$  が求まる。求まった  $U_L$  を(44)式に代入して  $V_i$  を得ることができる。また上層の平均流速  $U_U$  は次式より求めることができる。

$$U_U = \frac{U_B d - U_L d_L}{d - d_L} \dots \dots \dots (45)$$

次に泥の輸送に対しては次のように数値計算を行った。数値計算にあたっては泥の移動を図-46のように模式化し、順次各要素を定式化していった。まず泥の沈





- KEY
- (A) Horizontal silt transport in suspension.
  - (B) Diffusion of silt from high concentration (lower) layer to low concentration (upper) layer.
  - (C) Vertical silt transport in suspension by water exchange between layers.
  - (D) Silt settling out of upper layer
  - (E) Possible silt exchange with bed. e.g. during erosion or deposition

図-46 泥の移動の模式図

降速度に関しては、第一次近似として次に示す Stokes の式が成立するとした。

$$w_f = \frac{1}{18\nu} \frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_w} g D_f^2 \quad \dots\dots\dots(46)$$

ここに、

- $w_f$ : 沈降速度
- $\rho_f$ : フロックを作っている泥の密度
- $D_f$ : フロックの径

である。

また 4.1(2)において述べた、Owen Tubeを用いた沈降速度の測定結果(図-26 参照)より得られた次の関係も用いた。すなわち、小潮時に泥分の濃度が 50 ~ 300 ppm の範囲にある時には、沈降速度は次式で与えられる。

$$w_f = 2 \times 10^{-5} C^2 \quad \dots\dots\dots(47)$$

大潮時に泥分の濃度が 50 ~ 3000 ppm の時、沈降速度は次式で与えられる。

$$w_f = 2 \times 10^{-3} C \quad \dots\dots\dots(48)$$

ただし(47),(48)両式において  $w_f$  の単位は mm/s であり、C の単位は ppm である。

次に底面せん断応力が沈降(堆積)限界におけるせん断応力より小さい時泥は沈降し、沈降量は次式で与えられるとする。定式化にあたっては沈降していく泥のフロックが底面上にとどまる確率を与える(5)式を参考にした。

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_d = C w_f \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d}\right) \quad \dots\dots\dots(49)$$

ここに

$m$ : 底面単位面積当りの泥の質量

$\left(\frac{dm}{dt}\right)_d$ : 泥の沈降量

$\tau_b$ : 底面せん断応力

$\tau_d$ : 沈降限界におけるせん断応力であり、HRS で実験を行なった結果、 $\tau_d = 0.06 \text{ N/m}^2$  とした。(図-43 参照)

$w_f$  が一般に次の(50)式で表わされるとすると、(49)式は(51)式のようなになる。

$$w_f = K C^n \quad \dots\dots\dots(50)$$

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_d = K C^{n+1} \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d}\right) \quad \dots\dots\dots(51)$$

沈降した泥は底面付近で fluid mud と呼ばれる濃度が 15000 ppm 以上の非常に軟弱な層を形成する。この層はビンガム流体としての特性を示し、この層を形成する泥の移動は底面せん断応力が次の(52)式で与えられる限界以上になった所で始まる。

$$\tau_f = 4.3 \times 10^{-5} C_f \quad \dots\dots\dots(52)$$

ただし、 $\tau_f$  の単位は dynes/cm<sup>2</sup> (1 dynes/cm<sup>2</sup> は 0.1 N/m<sup>2</sup> に相当する) である。また  $C_f$  (fluid mud の濃度) は 15000 ~ 120000 ppm の範囲にあり、(52)式中の単位は kg/m<sup>3</sup> (1 kg/m<sup>3</sup> は 1000 ppm に相当する) である。

次に底面よりの洗掘については、Thames 川より採取した泥を用いて 4.1(4) に示した実験を行った結果、洗掘が連続して起る限界のせん断応力  $\tau_e$  が 0.2 ~ 0.5 N/m<sup>2</sup> の範囲にあることがわかった。洗掘量は(27)式にならって、次式のように表わされた。

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_e = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1\right) \quad \dots\dots\dots(53)$$

なお  $M$  は  $\tau_b = 2\tau_e$  の時の洗掘量に等しい定数である。

次に上、下層間の泥の輸送量は一般には次式で与えられる。

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_i = V_i C_i - w(C_i) C_i + \varepsilon_i \left(\frac{\partial C}{\partial z}\right)_i \quad \dots(54)$$

ここに右辺第一項は上、下層間の鉛直方向流速  $V_i$  に関する移流項、右辺第二項は下層への沈降速度  $w$  に関する項、右辺第三項は鉛直混合に関する、上方への輸送項である。ただし、 $\varepsilon_i$  は鉛直拡散係数であり、添字  $i$  は上、下層間の境界を意味する。二層モデルの場合には、(54)式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{dm}{dt}\right)_i &= V_i \{ H[-V_i] C_U + H[V_i] C_L \} - w(C_U) C_U \\ &+ \frac{2\varepsilon_i}{d} (C_L - C_U) \quad \dots\dots\dots(55) \end{aligned}$$

ただし、 $H[X]$  は  $X$  が正の時 1、負の時 0 となる。鉛直拡散係数は密度成層ができた場合には鉛直混合が抑えられるために小さくなるが、その程度が明らかでないため、ここでは次式のようにおいた。

$$\varepsilon_i = E u_{*x} d \quad \dots\dots\dots(56)$$

なお、

$E$  : 定数

$u_{*x}$  : 全水深にわたる平均的な流れに対する摩擦速度である。

以上に述べた種々の要素を考慮して、図-46 に基づき次のような考えのもとに泥の質量保存則をたてた。

a) 底面せん断応力  $\tau_b$  が  $\tau_d$  よりも大きく、 $\tau_b$  よりも小さい範囲にある時には、底面の存在は泥の輸送に対して直接的な影響を及ぼさない。

b) 底面の圧密は無視する。

c) 底面から洗掘された泥は瞬時に下層内にひろがり、下層における平均流速  $U_L$  によって運ばれ、徐々に上層へ拡散していく。

まず下層における泥の質量保存則は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (b d_L C_L) + \alpha_L \frac{\partial}{\partial x} (U_L b d_L C_L) &= b \left\{ \left(\frac{dm}{dt}\right)_e \right. \\ &\left. - \left(\frac{dm}{dt}\right)_d - \left(\frac{dm}{dt}\right)_i \right\} \quad \dots\dots\dots(57) \end{aligned}$$

一方、上層における泥の質量保存式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (b d_U C_U) + \alpha_U \frac{\partial}{\partial x} (U_U b d_U C_U) = b \left(\frac{dm}{dt}\right)_i \quad \dots\dots\dots(58)$$

(57), (58)式において  $\alpha_L$ ,  $\alpha_U$  は流速と濃度の積の鉛直方向積分値のかわりに、流速および濃度の各層内での平均値の積を使うことに対する補正係数であり、例えば  $\alpha_U$  は次式で与えられる。

$$\alpha_U = \frac{1}{d_U U_U C_U} \int_{z_b+d_L}^{\eta} u C dz \quad \dots\dots\dots(59)$$

一方、上、下層における水の連続式は、それぞれ次式によって与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x} (U_U b d_U) = -b \left(\frac{\partial d_U}{\partial t} - V_i\right) \quad \dots\dots\dots(60)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (U_L b d_L) = -b V_i \quad \dots\dots\dots(61)$$

(57), (58), (60), (61)式より  $b$  を消去して、最終的に次のような泥の連続式が下層、上層に対して得られた。

$$\begin{aligned} d_L \frac{\partial C_L}{\partial t} + \alpha_L U_L d_L \frac{\partial C_L}{\partial x} &= \alpha_L C_L V_i + \left(\frac{dm}{dt}\right)_e \\ &- \left(\frac{dm}{dt}\right)_d - \left(\frac{dm}{dt}\right)_i \quad \dots\dots\dots(62) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_U \frac{\partial C_U}{\partial t} + \alpha_U U_U d_U \frac{\partial C_U}{\partial x} &= -\alpha_U C_U V_i + \left(\frac{dm}{dt}\right)_i \\ &+ (\alpha_U - 1) \frac{\partial d_U}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(63) \end{aligned}$$

(62), (63)式を特性曲線法により常微分方程式に変換し、それらの式を解いて  $C_L$ ,  $C_U$  の値を求めることができる。

なお計算において種々の定数の値は次のようにおいた。

a) 流れの計算は差分法によって行ったが、 $\Delta x = 3.66$  km,  $\Delta t = 300$  秒とした。

b) 相当粗度  $k_s$  は 60 mm とした。

c)  $d_L$  は 1.22 m としたが、この場合  $\alpha_U = 0.84$ ,  $\alpha_L = 0.94$  となる。しかし計算にあたっては  $\alpha_U$ ,  $\alpha_L$  とともに 1 とした。

d) 鉛直拡散係数を与える (56)式の定数  $E$  は、大潮時には 0.0067 とした。

e) 大潮時にはエスチュアリー内には、乾燥重量にして 233000 トンの泥が一樣な厚さでひろがっているという状態を初期条件として計算を行った。潮汐を 5 周期間繰り返して作用させた後の濃度分布を求めた。河川流量は大潮時に 170 m<sup>3</sup>/s とした。

f) 図-47 は横軸に Southend Pier(図-4参照。Thames 川河口部に位置する。) までの距離、縦軸に時間平均した泥分の濃度をとって、大潮時における数値計算と現地観測の結果を示している。Mud Reaches は横軸が 46 ~ 54 km の値となる所に位置するが、そこで濃度が高くなる点や、エスチュアリーに沿った方向の浮遊泥の濃度分布の型など、数値計算の結果と現地観測の値とはよく一致している。

図-48 は Halfway Reach(図-47 において横軸が 48.5 km となる地点であり、Mud Reaches 内にあ

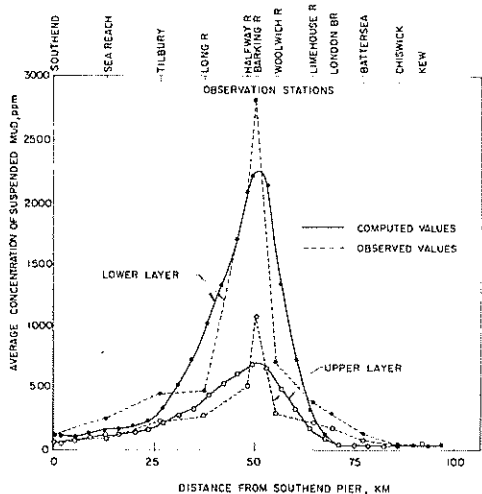


図-47 Thames エスチュアリーにおける泥分濃度の縦断方向変化(現地観測結果と数値計算結果との比較)

たる)における泥分濃度の経時変化を示す。濃度の極大値の値および極大値の発生時刻とも、計算値と現地観測値との間で比較的良好一致を示している。

Price は Owen および Odd が発表した二層モデルを発展させた三層モデルについて 1975 年に発表している<sup>17) 18)</sup>。このモデルは Avon エスチュアリー(図-1の62に示すもの)に存在する高濃度の fluid mud による影響を考慮にいたれたものである。モデルの模式図を図-49に示す。bottom layer では底質は移動しない。また濃度は 15 万 ppm で一定である。intermediate layer では速度および濃度は線形に変化する。例えば intermediate layer の最下部で濃度 75000 ppm, 最上部で 10000 ppm となる。top layer では濃度、速度ともに一定である。三層すべてで層厚は変化

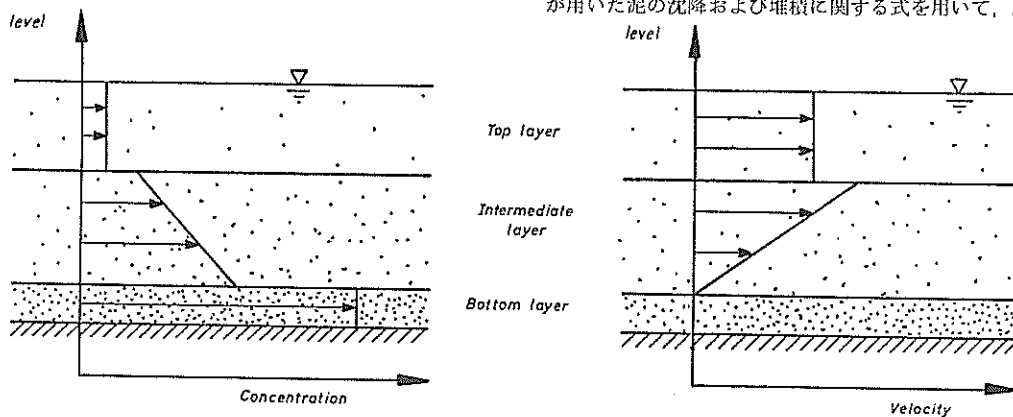


図-49 流速および泥の分布に関する三層モデル

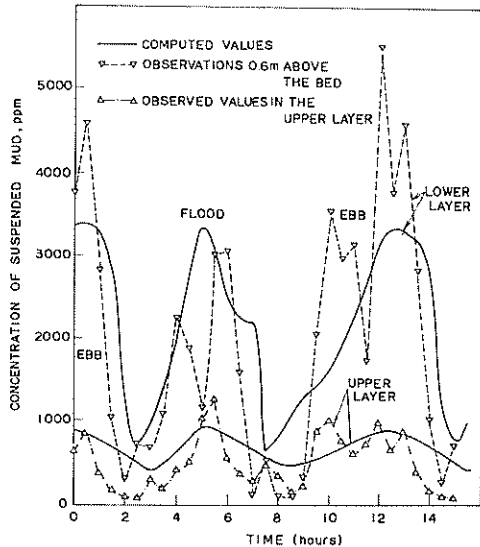


図-48 泥分濃度の経時変化(Thames エスチュアリー Halfway Reach, 現地観測結果と数値計算結果との比較)

しうる。大潮時にはせん断応力が大きいため、底質は intermediate layer から bottom layer に落ちることなく、したがって bottom layer は存在しない。intermediate layer と top layer では泥が動かされ、層間での泥の移動もある。小潮時には intermediate layer から bottom layer へ泥が沈降し、bottom layer は場所によって存在する所としない所がある。以上のような考えのもとに三層各々について Owen および Odd の手法と同様にして泥についての質量保存式をたて、それらを解くことにより、泥の濃度分布およびその変化を計算している。

Harrison および Owen<sup>18) 19)</sup> は、Owen および Odd が用いた泥の沈降および堆積に関する式を用いて、底質

が泥よりなる所に、潮流の方向と交差する方向に航路が掘られた時の航路埋没量を計算する方法を提案した。

底面よりの洗掘に関する(53)式を、摩擦速度を用いて書き換えると次式が得られる。

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_e = M \left\{ \left(\frac{u_*}{u_{*e}}\right)^2 - 1 \right\} \quad \dots\dots\dots(64)$$

また、泥の底面への沈降に関する(49)式は、次のように書き換えられる。

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_d = C w_s \left\{ 1 - \left(\frac{u_*}{u_{*d}}\right)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots(65)$$

なお、Cは底面近くにおける泥分の濃度である。航路埋没は掘削により、沈降が起る時間が長くなり、洗掘の起る時間が短くなるために起ると考えられる。したがって埋没量は(64)および(65)式を時間に関して積分し、それらの差をとることによって求められる。

摩擦速度の変化は次式によって与えられるとする。

$$u_* = u_{*0} \sin \frac{2\pi t}{T} \quad \dots\dots\dots(66)$$

ここに

t : 時間

T : 潮汐の周期

$u_{*0}$  : 摩擦速度の最大値

である。

また、次のような仮定を設ける。

- a) 底面近くの泥の濃度は一定である。
- b) 洗掘されていく泥の特性は、変化しない。
- c) 洗掘の終了後も底面にとどまっている泥は、一定の密度 $\rho_b$ をもつ。

以上のような仮定のもとに、一周期間における埋没量 $S_T$ (単位面積当りの質量)は次式によって与えられる。

$$S_T = 4 \int_0^{u_{*d}} \frac{C w_s T \left\{ 1 - \left(\frac{u_*}{u_{*d}}\right)^2 \right\}}{2\pi u_{*0} \sqrt{1 - \left(\frac{u_*}{u_{*0}}\right)^2}} du_* - 4 \int_{u_{*e}}^{u_{*0}} \frac{M T}{2\pi u_{*0}} \frac{\left\{ \left(\frac{u_*}{u_{*e}}\right)^2 - 1 \right\}}{\sqrt{1 - \left(\frac{u_*}{u_{*0}}\right)^2}} du_* \quad \dots\dots\dots(67)$$

上式の積分を実行した結果は次のようになる。

$$\frac{S_D \rho_b}{C w_s} = \frac{2}{\pi} (D - E) \quad \dots\dots\dots(68)$$

なお

$$D = \sin^{-1} \frac{u_{*d}}{u_{*0}} \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{u_{*0}}{u_{*d}}\right)^2 \right\}$$

$$+ \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{u_{*0}}{u_{*d}}\right)^2 - 1}$$

$$E = \frac{M}{C w_s} \left[ \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{u_{*0}}{u_{*e}}\right)^2 - 1} - \left\{ \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \frac{u_{*e}}{u_{*0}} \right\} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{u_{*0}}{u_{*e}}\right)^2 \right\} \right]$$

$S_D$  : 単位時間当りの埋没高さであり、 $\frac{S_T}{T \rho_b}$  で与えられる。埋没の場合には正、洗掘の場合には負となる

(68)式は次式のような形に変換される。

$$\frac{S_D \rho_b}{C w_s} = f \left( \frac{u_{*d}}{u_{*e}}, \frac{u_{*0}}{u_{*e}}, \frac{M}{C w_s} \right) \quad \dots\dots\dots(69)$$

横軸に $u_{*0}/u_{*e}$ 、縦軸に $S_D \rho_b / C w_s$ 、パラメーターとして $u_{*d}/u_{*e}$ および $M/C w_s$ をとって(69)式の関係を示したのが図-50である。

HarrisonおよびOwenは上記の計算結果を、アルゼンチンのRiver Plate(ラブラタ川)のエスチュアリーにある航路の埋没量と比較し、両者が良く一致するという結果を得た。

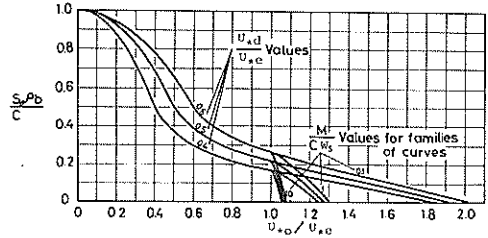


図-50 航路埋没量算定図

## 5. 最近における研究の発展 (1973~1979年)

HRSにおけるシルテーションの研究のおおよその枠組みは、3および4.に述べた研究によって完成したが、それ以後も種々のプロジェクトに関連して研究が実施され、幾つかの新しい知見も得られ、研究内容自身も洗練されたものになってきている。特にWashにおける貯水池建設計画に関連して行われた研究では、現地観測の結果よりエスチュアリーにおける流砂量公式、密度流場における混合距離、摩擦係数といった問題について、現地へ適用できるような成果が得られた。

### 5.1 Washにおける貯水池建設計画

Wash(図-1において16~19の各河川が流入している長方形の海域)の南東部に貯水池を建設しよう

とするプロジェクトに関連して、潮流および底質移動を調べるために Odd が中心になって現地観測、模型実験および数値計算が行われた。プロジェクトに関連して発表されたレポートは、HRS レポートとして発表されたものだけでも、20 編に及ぶ。

(1) プロジェクトの概要<sup>20)</sup>

Wash は 35 km × 20 km の、おおそ長方形の形をした、面積約 700 km<sup>2</sup> の浅い湾である。潮汐は半日周潮が卓越し、大潮時の平均潮差は約 6.4 m である。低水時には約半分の区域が干上がる。砂州の間をぬって狭い水路が走っており、底質は砂又は泥である。プロジェクトの主たる内容は、Wash の南東部のいくつかの区域を貯

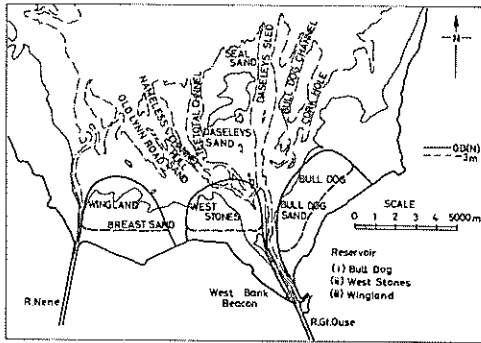


図-51 Washにおける貯水池建設計画

水池にすること、および Wash に流れこんでいる河川（例えば図-1に19で示す Great Ouse エスチュアリー）から淡水を採取し、その水を貯水池へ送ることである。これらの建設工事に伴って潮流および海底地形が変化を受けることが予想されたので調査が行われた。

まず詳細な現地調査の後、建設工事の効果を予測するために模型実験、数値計算が行われた。模型実験の目的は工事に伴う潮流の変化を調べることであり、数値計算の目的は、潮流および底質移動の変化を調べることであった。水理模型の縮尺は水平方向 1/1250、鉛直方向 1/100 である。数値計算は Outer, Middle, Inner という三種類の格子について行われた。Outer から Inner へと、計算領域が狭くなり、計算の格子も小さくなっていく。

(2) エスチュアリーにおける流砂量公式<sup>21)</sup>

河川における流砂量公式としては周知のようにさまざまな式がある。河川とエスチュアリーの環境を砂移動という面から比較してみると、河川では砂が自動的に上流から供給されてくるので、河川は豊富な砂の供給源を持

つ場合と考えられる。これに対しエスチュアリーでは、一般に底質が周期的に向きを変える主として潮流を中心とした流れに従って、行きつ戻りつしていることが多く、外部よりの砂の供給が少ない、河川とは異なった環境であると考えられる。このような事情のために、河川流による土砂移動を対象として開発された流砂量公式を無条件にエスチュアリーの場合にも適用していくことには疑問がある。Odd はこのような点を解決するために、Bagnold の『底質を浮遊状態に保っておくためになされる仕事の量は、流れによって乱れという形でエネルギーが失われていく量（底面単位面積当りの量）に関係する』という概念に基づいた、エスチュアリーの場合に適する流砂量公式を導いた。なお、彼の公式は Great Ouse エスチュアリーにおける浮遊砂量の現地観測結果を整理して得られたものである。

Great Ouse エスチュアリーでは、大部分の底質は細砂であり、平均粒径は 0.09 ~ 0.20 mm である。ふるい分け係数  $S_0$  ( $S_0 = \sqrt{D_{25}/D_{75}}$ ) は約 0.90 と、比較的一様な粒度構成となっている。

Yalin によると、非粘着性の砂の移動は次の4つの無次元量によって支配される。

$$\text{砂粒レイノルズ数 } X_s = \frac{u_* D}{\nu} \dots\dots\dots(70)$$

$$\text{Mobility Number } Y = \frac{u_*^2}{gD(s-1)} \dots\dots\dots(71)$$

$$\text{Depth Number } Z = \frac{d}{D} \dots\dots\dots(72)$$

$$\text{Inertia Number } W = \frac{\rho_s}{\rho} \dots\dots\dots(73)$$

ここに

- $u_*$ : 摩擦速度
- $D$ : 砂の粒径
- $d$ : 水深
- $\nu$ : 水の動粘性係数
- $s$ : 砂の比重
- $g$ : 重力加速度
- $\rho_s$ : 砂の密度
- $\rho$ : 水の密度

である。

(70), (71) 式は特に重要な無次元量であるが、共に  $u_*$  を含む。このため Ackers は  $X_s$ ,  $Y$  より  $u_*$  を消去し、次のような新しい無次元量  $D_{gr}$  (Dimensionless grain size number) を用いることを考えた。

$$D_{gr} = X_s^{2/3} Y^{-1/3}$$

$$= D \left\{ \frac{g(s-1)}{\nu^2} \right\}^{1/3} \dots\dots\dots (74)$$

Shieldsの研究によると、砂の初期移動はYおよびD<sub>gr</sub>を用いて次のような関数で表現できる。

$$Y_{crit} = F_1(D_{gr}) \dots\dots\dots (75)$$

またBagnoldによると、砂が浮遊し始める限界は、同じくYおよびD<sub>gr</sub>を用いて、次のような関数で表わせる。

$$Y_{crit} = F_2(D_{gr}) \dots\dots\dots (76)$$

図-52は、(75),(76)式で示される関係を図にしたものである。Shieldsの限界曲線の下領域では砂は移

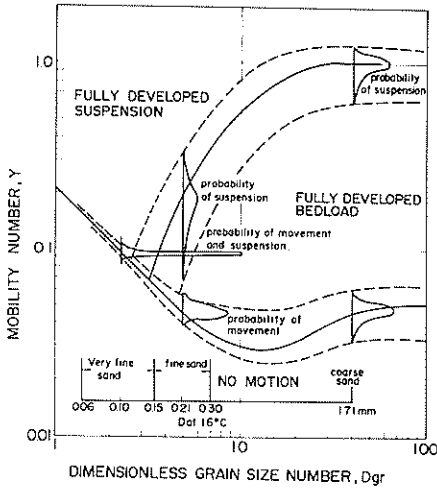


図-52 底質の掃流、浮遊運動の発生域

動しない。Shieldsの曲線とBagnoldによる曲線とによってはさまれた領域では、砂は掃流形式でのみ動かされる。Bagnoldによる曲線の上の領域では、砂は浮遊形式および掃流形式の双方によって動く。当然のことながら砂移動形態のこのような遷移は突然に起るわけではなく、徐々にある確率をもっておきる。図中には、水温を16℃とした場合に、粒径の変化に伴ってD<sub>gr</sub>がどの程度の値となるかも、あわせて示してある。

一方、移動床底面に発達するRipples(砂連)やDunes(砂堆)といった海底地形の発生領域が図-53に示されている。RipplesはD<sub>gr</sub><26の領域にでき、DunesはD<sub>gr</sub>>13の領域にできる。Yが大きくなると、このような波状の底面形状はなくなり、平坦な底面(flat bed)となる。

一方、移動床底面における摩擦係数fは、断面平均流速Uおよび摩擦速度u<sub>x</sub>を用いて、次式のように示される。

$$f = 8 \left( \frac{u_x}{U} \right)^2 \dots\dots\dots (77)$$

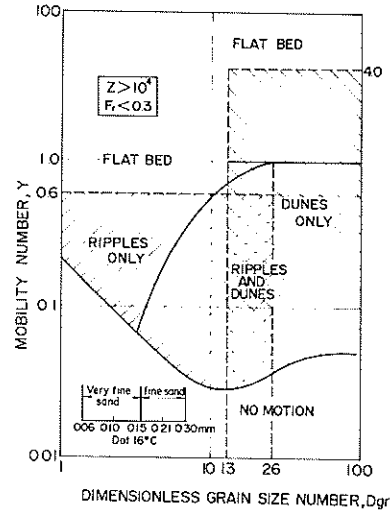


図-53 底面地形の発生領域区分

D<sub>gr</sub>が13より小さく、フルード数が0.3以下であり、Z(72式参照)が10<sup>4</sup>より大きい時には、次式のようにfは断面平均流速を用いたMobility Number Y<sub>v</sub>のみの関数となると考えられる。

$$f = F(Y_v) \dots\dots\dots (78)$$

ここに、

$$Y_v = U^2 / \{ g(s-1) D_{Av} \}$$

D<sub>Av</sub>: 底質の平均粒径

である。1968年にGreat Ouseエスチュアリーで現地観測を行った結果によると、(78)式の関係は図-54で示すようになる。

BagnoldやAckersは、砂を浮遊させておくために費やされる単位床面積当りの仕事量W<sub>s</sub>が、単位床面積当りのエネルギー逸散量W<sub>p</sub>と関係があると考えて、次式のようにおいた。

$$W_s = e_s W_p \dots\dots\dots (79)$$

ここに

e<sub>s</sub>: エネルギーが砂を浮遊させる仕事に使われる際の効率

である。

定常流ではレイノルズ応力にもとづくせん断応力が鉛直方向に直線状に分布するという事実と、水平流速の対数分布則を用いると、W<sub>p</sub>は次式のようになる。

$$W_p = \rho U u_x^2 \dots\dots\dots (80)$$

いま、ある粒径範囲の砂を浮遊させておくために利用されるエネルギーの量W<sub>pn</sub>が、その粒径範囲の砂によって被覆された底面の面積の割合i<sub>bn</sub>に比例すると考えると、W<sub>pn</sub>は次のようになる。

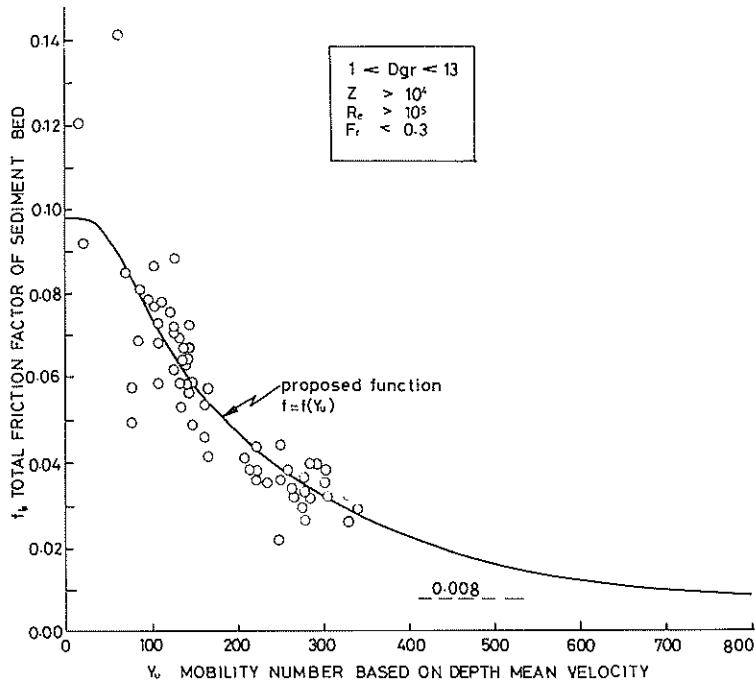


図-54 海底摩擦係数の経験的算定図

$$\left. \begin{aligned} W_{pn} &= \rho i_{bsn} U u_x^2 \\ i_{bsn} &= \frac{i_{bn}^{2/3}}{\sum_{n=1}^N i_{bn}^{2/3}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (81)$$

なお  $i_{bn}$  はある粒径範囲の砂が底面内に存在する容積の割合である。

一方、ある粒径範囲の砂を浮遊させておくのに使われる仕事量  $W_{sn}$  は次式によって表わされる。

$$W_{sn} = \xi_n i_{sn} q_{ss} g \cdot \frac{s-1}{s} \frac{w}{U} \dots\dots\dots (82)$$

$$\xi_n = \frac{\int_{z_0}^d C(y) dy \cdot \int_{z_0}^d u(y) dy}{d \cdot \int_{z_0}^d C(y) u(y) dy}$$

$i_{sn}$ : ある粒径範囲の砂が浮遊砂量の中で占める割合

$q_{ss}$ : 単位幅当りの浮遊砂輸送量

である。

(82) 式の  $w$  (砂の沈降速度) に Stokes 則を代入すると、(83) 式が得られる。

$$W_{sn} = \xi_n i_{sn} q_{ss} \frac{g^2 D_n^2 (s-1)^2}{18 U \nu s} \dots\dots\dots (83)$$

ここに、

$D_n$ : ある粒径範囲の砂の代表粒径

である。

(81), (83) 式を(79)式に代入すると次式が得られる。

$$\frac{i_{sn} q_{ss}}{i_{bsn} \nu \rho_s} = 18 E_{fg} \left\{ \frac{U u_x}{g D_n (s-1)} \right\}^2 \dots\dots (84)$$

なお、

$$E_{fg} = e_s / \xi_n$$

である。

(84) 式に(77)式を代入すると、流砂量公式が得られる。

$$i_{sn} q_{ss} = 2.25 E_{fgn} \frac{i_{bsn} \rho_s \nu f U^4}{g^2 D_n^2 (s-1)^2} \dots (85)$$

流砂量公式は(85)式のように得られたが、(85)式を用いるには  $E_{fg}$  の値を定めてやる必要がある。そこで1972年に行われた浮遊砂輸送量の現地観測結果を用いて  $E_{fg}$  の値が評価された。 $E_{fgn}$  は  $X_s$ ,  $Y$ ,  $Z$  の関数であると考えられるが、水深が大きい場合には  $Z$  の効果を見捨てることができ、 $X_s$ ,  $Y$  だけの関数となる。 $Y X_s^{-1}$  によって新しい無次元量を作ると、 $u_x/w_{AV}$  となる。(なお、 $w_{AV}$  は底面表層にある砂のうち、平均の大きさを与えるものに対する沈降速度である。) このように考えて、 $E_{fg}$  と  $u_x/w_{AV}$  との関連を見い出そうとしたが、有意な関連はなかった。しかし、 $E_{fg}$  と  $U/w_{AV}$  との間には 0.06 ~ 0.15 mm の成分の砂および 0.15 ~ 0.30 mm の成分の

砂の双方に対して相関を見つけることができた。後者に対する関係を図-55に示す。したがって浮遊砂輸送量を計算するには、図-54より $f$ を、図-55より $E_{f\beta}$ を求め、それらの値を(85)式に代入するとよい。

(3) 密度流場における混合距離

Prandtl によって提案された混合距離は、流体内部でのせん断応力や鉛直混合を計算するための重要な量である。Odd は Wash におけるプロジェクトに関連して、密度流場における混合距離について研究した。新しく提案された混合距離は Great Ouse エスチュアリーにおける乱れの現地観測より得たものである。

流れの流下方向に  $x$  軸、底面より鉛直上向に  $z$  軸をとると、 $z$  が一定値をとる平面上に、 $x$  軸方向に作用するせん断応力  $\tau_{xz}$  は Prandtl によると次式によって与えられる。

$$\tau_{xz} = -\bar{\rho} l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(86)$$

ここに

$l_m$  : 運動量輸送に関する混合距離

$\bar{\rho}$  : 溶液の密度

である。

一方、溶質の鉛直方向輸送量  $F_z$  は次式によって表わされる。

$$F_z = -l_c l_m \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right| \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(87)$$

ここに

$\bar{C}$  : 溶質の濃度

$l_c$  : 溶質輸送に関する混合距離

である。

中立状態の開水路における  $l_m$  および  $l_c$  をそれぞれ  $l_{m0}$  および  $l_{c0}$  と書くと、 $l_{m0}$  および  $l_{c0}$  は一般に次のようにおかれる。

$$l_{m0} = l_{c0} = 0.4 z \left( 1 - \frac{z}{d} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(88)$$

いま、流れが密度成層をなしている場合を考える。この時単位体積当りの、レイノルズ応力による乱れエネルギーの生成量は次式で与えられる。

$$\tau_{xz} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\bar{\rho} l_m^2 \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^3 \quad \dots\dots\dots(89)$$

一方、重力にさからってなされる仕事の単位体積当りの量は次式のようになる。

$$g M_z = g l_c l_m \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right| \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(90)$$

ここに

$M_z$  : 単位面積当りの溶質輸送量

である。

(89)式と(90)式の比は Flux Richardson Number  $R_f$  と呼ばれる。

$$R_f = \frac{l_c}{l_m} \cdot \frac{g \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z}}{\bar{\rho} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2} \quad \dots\dots\dots(91)$$

(91)式のうち、 $l_c/l_m$  は Turbulent Schmidt Number と呼ばれる。また、 $(g \partial \bar{\rho} / \partial z) / \{ \bar{\rho} (\partial \bar{u} / \partial z)^2 \}$  は Gradient Richardson Number (勾配型のリチャードソン数) と呼ばれ、密度流の安定性に関する指標とし

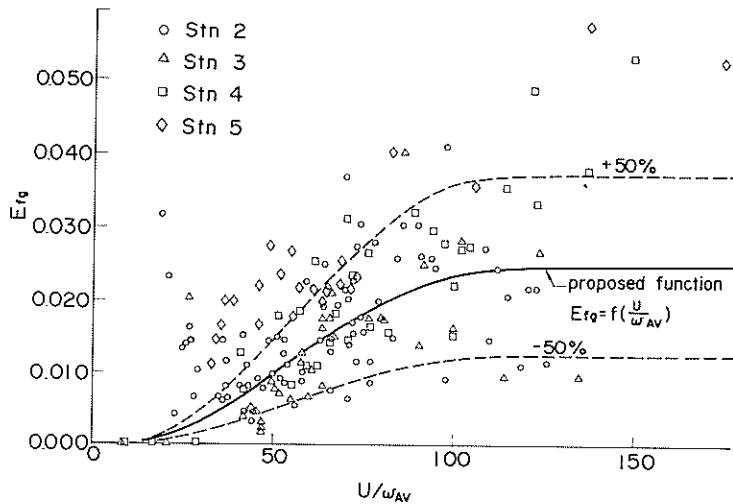


図-55 Oddの流砂量公式における $E_{f\beta}$ の算定図



て用いられる。以後 Gradient Richardson Number を  $R_i$  とおく。

成層した密度流場では、混合距離  $l_m$  は中立状態での  $l_{m0}$  と異なったものになる。 $l_m$  の表現については種々の提案があるが、それらは次式のような型になる。

$$l_m = \frac{l_{m0}}{(1 + \beta R_i)^n} \quad \dots\dots\dots(92)$$

ここに  $\beta$  および  $n$  は無次元の定数である。

一方 Ellison は Turbulent Schmidt Number に及ぼす  $R_i$  の効果を調べ、次式を得た。

$$\frac{l_c}{l_m} = \frac{1 - \frac{l_c}{l_m} \cdot \frac{R_i}{R_{fc}}}{\left(1 - \frac{l_c}{l_m} R_i\right)^2} \quad \dots\dots\dots(93)$$

ここに  $R_{fc}$  は Critical Flux Richardson Number と呼ばれ、約 0.15 となる。

1972年HRSはGreat Ouse エスチュアリーにおいて、流速と塩分の同時測定を行い、その結果を用いて混合距離を計算した。図-56には、図の左側に観測された流速分布、密度分布等が示され、図の右側に混合距離、リチャードソン数の分布が示されている。図によると実測された混合距離は底面および表層近くを除いてはほぼ一定の値であることがわかる。さらにHRSは1976年に電磁流速計および塩分計を用いて、流れ方向の流速、鉛直方向の流速、塩分の変動の連続測定を行なった。図-57には密度境界面（密度勾配が最大になる所）における  $l_m/l_{m0}$  が横軸に  $R_i$  をとって示されている。図中に

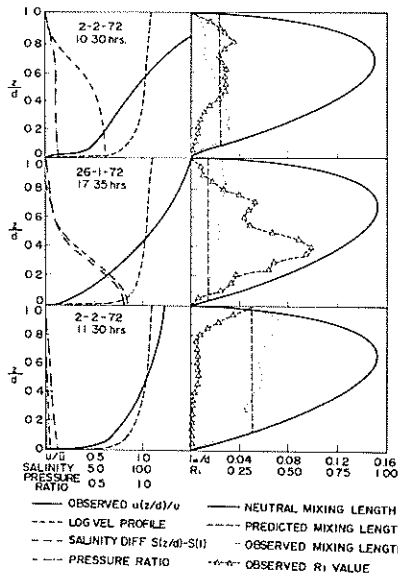


図-56 密度流場における混合距離、リチャードソン数と水理量

は1972年および1976年における現地観測データとともに Kent および Pritchard が提案した曲線、Rossby および Montgomery が提案した曲線も示されている。図によると提案された曲線のうちどれが観測値と一致するかは決し難い。図-58には Turbulent Schmidt Number の観測値が、横軸に  $R_i$  をとって示されている。図中には Ellison が与えた (93)式も示されているが、 $R_{fc} = 0.08$  の時に Ellison の与えた曲線と観測値とは最も良く一致した。

以上の結果より、Odd および Rodger<sup>23)</sup> は次の方式に基づいて混合距離を計算することを提案している。

a)  $R_i$  が底面から上方へ向けて連続的に増加し、底面からの距離が全水深の 75 % 以下の所で  $R_i$  が極大値を示さない時には、 $R_i(z) \leq 1.0$  の時(94)式、 $R_i(z) > 1.0$  の時(95)式に基づいて混合距離を計算する。

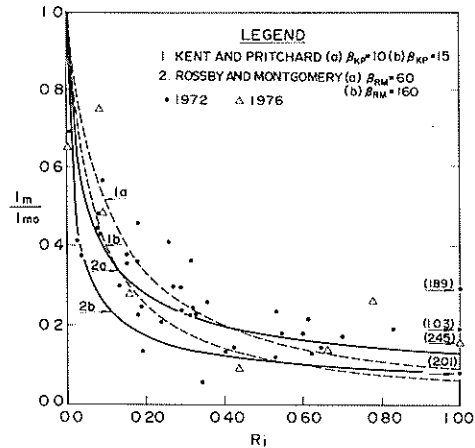


図-57 密度境界面における混合距離とリチャードソン数との関係

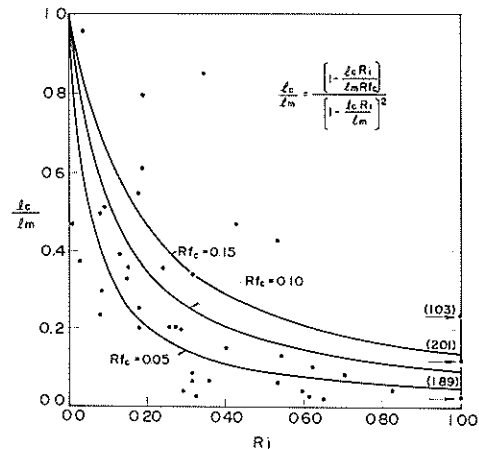


図-58 Turbulent Schmidt Number とリチャードソン数との関係

$$l_m(z) = 0.4 z \left(1 - \frac{z}{d}\right)^{1/2} \left[1 + \beta R_i(z)\right]^{-n} \quad \dots\dots\dots(94)$$

$$l_m(z) = 0.4 z \left(1 - \frac{z}{d}\right)^{1/2} (1 + \beta)^{-n} \quad \dots\dots\dots(95)$$

b)  $R_i$  が底面から全水深の 75% 以下の所  $z_i$  で極大値を持つ時には、 $l_m(z)$  は一定値をとる。 $R_i(z_i) \leq 1.0$  の時(96)式、 $R_i(z_i) > 1.0$  の時(97)式に基づいて  $l_m$  を求める。

$$l_m(z) = 0.4 z_i \left(1 - \frac{z_i}{d}\right)^{1/2} \left[1 + \beta R_i(z_i)\right]^{-n} \quad \dots\dots\dots(96)$$

$$l_m(z) = 0.4 z_i \left(1 - \frac{z_i}{d}\right)^{1/2} (1 + \beta)^{-n} \quad \dots\dots\dots(97)$$

ただし、底面や表層近くで  $l_m(z_i) \geq l_{m0}(z)$  となる所では、(98)式を用いる。

$$l_m(z) = l_{m0}(z) = 0.4 z \left(1 - \frac{z}{d}\right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(98)$$

c) 溶質の輸送に関する混合距離  $l_c$  は次式で計算する。

$$l_c(z) = l_m(z) \frac{1 - \frac{l_c(z)}{l_m(z)} \frac{R_i(z)}{R_{fc}}}{\left\{1 - \frac{l_c(z)}{l_m(z)} R_i(z)\right\}^2} \quad (99)$$

d)  $\beta$  および  $n$  の値は Rossy および Montgomery の提案した式を用いる時には、 $\beta = 160$ 、 $n = 1/2$  であり、Kent および Pritchard の提案した式を用いる時には、 $\beta = 13$ 、 $n = 1$  となる。図-56 には  $\beta = 160$ 、 $n = 1/2$  を用い、上記の方式に基づいて計算した  $l_m(z)$  の値も示されている。 $R_{fc}$  として 0.08 の値を用いている。

(4) エスチュアリーにおける底面摩擦係数<sup>24)</sup>

Washbrook は Odd の指導のもとに Great Ouse エスチュアリーにおいて底面摩擦係数の現地観測を行った。現地観測を行った所は直線状の水路であり、水路幅約 20 m、底質は細砂で、粒径は 0.076 ~ 0.081 mm、潮差約 3 m である。

観測にあたっては延長 2.39 km の間に 3 つの測点を設け、中央の測点では流速を 12 点（水路横断方向に 3 断面、1 断面につき鉛直方向に 4 点）で測定して流量を求めた。また 3 つの測点すべてにおいて、サイホンを利用して水位変化を求めた。中央の測点における流量より連続の式である(100)式を用いて他測点における流量を計算することができる。

$$W(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots(100)$$

ここに

$\eta$  : 水面の位置

$W(\eta)$  : 水面の幅

である。

さらに次の運動量式 ((101)式) を差分表示した式より、底面に作用するせん断応力  $\tau_b$  を求めた。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{U^2}{2} + g\eta \right) + \frac{1}{A} (\tau_b \cdot W_{bed} + \tau_{bank} \cdot W_{bank}) = 0 \quad \dots\dots\dots(101)$$

ここに

$W_{bed}$  : 水路底面の幅

$W_{bank}$  : 水路側壁の幅

$\tau_{bank}$  : 水路側壁に作用するせん断応力

である。

次に  $\tau_b$  より次の Colebrook - White 式を变形した(102)式を用いて底面の相当粗度  $k_s$  を求めた。

$$k_s = 14.8 d \left\{ 10^{-\frac{U_*'}{25}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2\tau_b}} - \frac{2.51\nu}{8d} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2\tau_b}} \right\} \quad \dots\dots\dots(102)$$

図-59 は  $k_s$  を縦軸に、平均流速を用いた Mobility Number  $Y_U$  ( $Y_U = U^2 / \{g(s-1)D_{av}\}$ ) を横軸にとった図である。 $k_s$  は Colebrook - White 式 ((36)式) を用いて底面摩擦係数  $f$  に変換することができる。

(5) 数値計算の構成<sup>25)</sup>

Odd および Snell は Wash Project に関連する数値計算の全体像についての報告を 1974 年に発表している。5.1(2) ~ 5.1(3) に述べられた成果はこれらの数値計算に取り入れられている。なお Odd は水深が小さくて、潮差の大きいエスチュアリーにおける潮流計算について別の論文<sup>26)</sup>でも報告している。

エスチュアリー内部における水理的な機能に従って、エスチュアリーは図-60 に示すように区分される。すなわち深い主たる水路(みお筋)は、密度の異なる上、下の 2 層に分けられる。みお筋に接する浅い部分は 2 種類ある。

一つは Berm と呼ばれる、流速がみお筋における流速よりも小さい区域である。もう一つは、Tidal Flat と呼ばれる、流速が無視でき、単に水の貯留のみに関与する区域である。このように区分するとエスチュアリーは、種々の管をたばねたものと考えることができる。

図-60 に示すように 1 ~ 4 の添字で、1 が上層、2

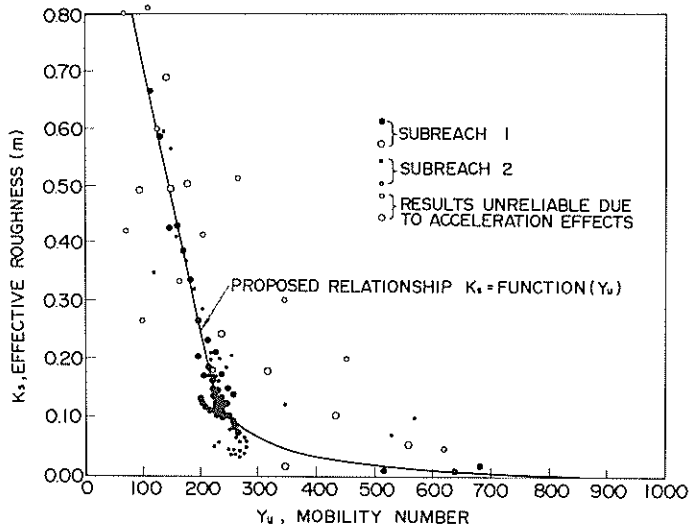


図-59 相当粗度の算定図

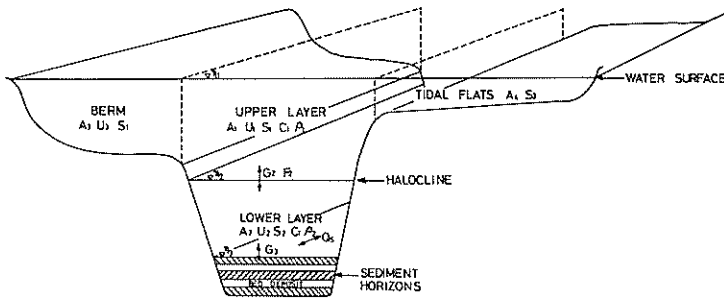


図-60 水理的な機能によるエスチュアリーへの区分図

が下層，3が Berm，4が Tidal Flatを示すとす。するとエスチュアリー断面全域についての水の連続方程式は次式で与えられる。

$$\sum_{n=1,4} \frac{\partial A_n}{\partial t} + \sum_{n=1,3} \frac{\partial (U_n A_n)}{\partial x} = 0 \quad \dots(103)$$

ここに

$A_n$  :  $n$  番目の管の断面積

$U_n$  :  $n$  番目の管の平均流速

である。主水路の下層部分に対する連続方程式は、次のようになる。

$$\frac{\partial A_2}{\partial t} + V_i W(\eta_2) + \frac{\partial}{\partial x} (U_2 A_2) = 0 \quad \dots(104)$$

ここに、

$V_i$  : 上、下層の境界面 (halocline) を通過する鉛直流速

$W(\eta_2)$  : 上、下層の境界面の幅

である。なお  $\eta_1$  は上層表面の位置、 $\eta_2$  は上、下層の境界面の位置、 $\eta_3$  は底面の位置を示す。

$\eta_n$  の変化に伴う  $W(\eta_n)$  の変化が緩やかである場合には、(103)および(104)式は次のようになる。

$$W(\eta_1) \frac{\partial \eta_1}{\partial t} + \sum_{n=1,3} \frac{\partial}{\partial x} (U_n A_n) = 0 \quad \dots(105)$$

$$W(\eta_2) \left\{ \frac{\partial \eta_2}{\partial t} + V_i \right\} + \frac{\partial}{\partial x} (U_2 A_2) = 0 \quad \dots(106)$$

なお、

$W(\eta_1)$  : エスチュアリー断面全体の幅

である。

次に1~3の各管についての運動量方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{U_1^2}{2} + g\eta_1 \right) + \frac{d_1}{2} \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} + \frac{1}{A_1} \left\{ \tau_{b1} \chi_1 + \tau_2 W(\eta_2) - \tau_1 W(\eta_1) \right\} = 0 \quad (107)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{U_2^2}{2} + g\eta_1 \right) + \frac{g}{\rho_0} \left( d_1 \frac{\partial \rho_1}{\partial x} + 0.5 d_2 \frac{\partial \rho_2}{\partial x} \right) + \frac{g(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_0} \left( \frac{\partial \eta_2}{\partial x} - \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \right) \\ + \frac{1}{A_2} \left\{ \tau_{b2} \chi_2 + \tau_3 W(\eta_3) - \tau_2 W(\eta_2) \right\} = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (108)$$

$$\frac{\partial U_3}{\partial t} + g \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \frac{1}{A_3} \left\{ \tau_{b3} \chi_3 - \tau_1 W_3(\eta_1) \right\} = 0 \quad \dots\dots\dots (109)$$

- ここに、
- $\rho_n$  : 各管における平均の密度
  - $d_n$  : 各管における平均水深又は平均の厚さ
  - $\tau_n$  : 水平な境界面におけるせん断応力
  - $\tau_{bn}$  : 変化を受けない面におけるせん断応力
  - $\chi_n$  : 変化を受けない面における潤辺
  - $W_3$  : Bermの区域の水面幅

である。なお、各せん断応力の作用する場所が図-61に模式的に示されている。

風によって水面に作用する応力 $\tau_1$ は、Rance が提案した次式によって評価した。

$$\tau_1 = \rho_a u_{*a}^2 \quad \dots\dots\dots (110)$$

- ここに
- $\rho_a$  : 空気の密度
  - $u_{*a}$  : 摩擦速度であり、高さ $z$ の点における風速 $u_a(z)$ と次式で示す関係にある。

$$u_{*a} = \left\{ 64 z g e^{-\left( \frac{u_a(z)}{2.5 u_{*a}} \right)} \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (111)$$

である。  
上下層の境界面に作用する応力 $\tau_2$ は5.1.(3)に示した方法に従って、次式によって求めた。

$$\tau_2 = \bar{\rho} \left[ \frac{l_{m0}}{d} \right]^2 \frac{|U_1 - U_2| (U_1 - U_2)}{(1 + \beta_m R_{ix2})^2} \quad \dots\dots\dots (112)$$

ここに

$$\frac{l_{m0}}{d} = \frac{\kappa \left( 1 - \frac{d_2}{d} \right)^{3/2}}{\ln(d/d_2)}$$

- $\kappa$  : カルマン定数
- $d_2$  : 下層の厚さ
- $R_{ix2}$  : 下層の厚さに基づくリチャードソン数であり、次式で与えられる。

$$R_{ix2} = \frac{d_2 g (\rho_2 - \rho_1)}{\bar{\rho} (U_1 - U_2)^2}$$

$\beta_m$  : 経験的な定数であり、16.0となる。  
底面に作用するせん断応力 $\tau_3$ は、下層における平均流速 $U_2$ を用いて次式で与えられる。

$$\tau_3 = \frac{\bar{\rho}}{8} |U_2| U_2 f_b \quad (113)$$

$f_b$ は底面が泥の場合、0.008となる。一方、砂の場合には $f_b$ は図-54によって与えられる。なお、図-54では $f_b$ は $Y_v$ の関数として与えられているが、主水路内の流れは二層流であるので、 $Y_v$ における $U$ のかわりに $\alpha U'$ を用いる。 $U'$ は次式で与えられる。

$$U' = U_2 \left\{ 1 + 0.885 f_b^{1/2} \ln \left( \frac{d}{d_2} \right) \right\} \quad \dots (114)$$

なお、 $\alpha$ は横方向の流速分布に関する定数である。  
変化を受けない面(例えば水路側面)に作用するせん断応力 $\tau_{bm}$ は、次式によって表わされる。

$$\tau_{bm} = \frac{\bar{\rho}}{8} |U_n| U_n f_n \quad \dots\dots\dots (115)$$

ここに、

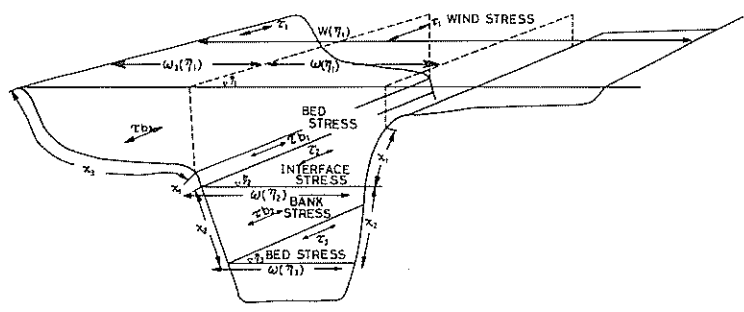


図-61 エスチュアリー境界面におけるせん断応力の作用状況概要

$U_n$  : 該当する面を含む管の平均流速

$f_n$  : 該当する面の相当粗度と, Colebrook-White 式で関連づけられる摩擦係数

である。

次に塩分の保存式をたてるにあたっては, 次のように仮定した。なお  $S_n$  は各管における平均の塩分を示す。

(1) 上層と Berm の区域は完全に混合しており,  $S_1 = S_3$  である。

(2) Berm の区域と Tidal Flat の区域の間では移流のみによって分散する。

(3) 下層と Tidal Flat との間では移流も混合も起らない。

以上のように考えると, 上層および Berm の区域について (116) 式, 下層について (117) 式, Tidal Flat について (118) 式がそれぞれ塩分の保存則として得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (S_1 [A_1 + A_3]) + \frac{\partial}{\partial x} (S_1 [U_1 A_1 \\ & + U_3 A_3]) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial S_1}{\partial x} [A_1 K_1 + A_3 K_3] \right) \\ & - W(\eta_2) F_2 + \frac{\partial A_1}{\partial t} \left( S_1 H \left[ \frac{\partial A_1}{\partial t} \right] \right. \\ & \left. + S_4 H \left[ -\frac{\partial A_1}{\partial t} \right] \right) = 0 \quad \dots\dots\dots(116) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (S_2 A_2) + \frac{\partial}{\partial x} (S_2 U_2 A_2) \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial S_2}{\partial x} A_2 K_2 \right) + W(\eta_2) F_2 = 0 \quad \dots\dots\dots(117) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (S_4 A_4) - \frac{\partial A_4}{\partial t} \left( S_1 H \left[ \frac{\partial A_4}{\partial t} \right] \right. \\ & \left. + S_4 H \left[ -\frac{\partial A_4}{\partial t} \right] \right) = 0 \quad \dots\dots\dots(118) \end{aligned}$$

なお,  $H[X]$  は  $X$  が正の時 1, 負の時 0 の値をとる。 $F_2$  は上, 下層の境界面を通過する鉛直方向の塩分輸送量であり, 次式で与えられる (5.1.3) 参照)。

$$F_2 = V_i S_2 + \left[ \frac{L_{mo}}{d} \right]^2 \frac{|U_1 - U_2| (S_2 - S_1)}{(1 + \beta_{mc} R_{i*2})^2} \quad \dots\dots\dots(119)$$

なお,

$\beta_{mc}$  : 経験的な定数であり, 33.0 となる。

また  $K_n$  は, 各管内の縦方向の分散係数であり, ここでは Sooky に従って次式によって与えた。

$$K_n = 0.0084 U_n A_n^2 d_n^{-3} \quad \dots\dots\dots(120)$$

Great Ouse エスチュアリーにおける底質は大きく分けて, 粘着性の泥 (底質粒径  $D \leq 0.06$  mm), 非常に細

かい砂 ( $0.06 < D \leq 0.15$  mm), 細砂 ( $0.15 < D \leq 0.30$  mm) の三種類である。これらはいずれも浮遊によって運ばれる。

まず泥の保存則については, 泥分が上, 下層のみに存在すると考えて, 上層について (121) 式, 下層について (122) 式を得た。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (C_1 A_1) + \frac{\partial}{\partial x} (C_1 U_1 A_1) - \frac{\partial}{\partial x} \left( A_1 K_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} \right) \\ & - W(\eta_2) G_2 = 0 \quad \dots\dots\dots(121) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (C_2 A_2) + \frac{\partial}{\partial x} (C_2 U_2 A_2) - \frac{\partial}{\partial x} \left( A_2 K_2 \frac{\partial C_2}{\partial x} \right) \\ & + W(\eta_2) G_2 - W(\eta_3) G_3 = 0 \quad \dots\dots\dots(122) \end{aligned}$$

ここに,

$C_n$  : 各管において浮遊している泥の濃度

$G_2$  : 上, 下層の境界面を通過する鉛直方向の泥分輸送量であり, (123) 式によって与えられる。

$$G_2 = V_i C_2 - w_{s1} C_1 + \left[ \frac{L_{mo}}{d} \right]^2 \frac{|U_1 - U_2| (C_2 - C_1)}{(1 + \beta_{mc} R_{i*2})^2} \quad \dots\dots\dots(123)$$

$w_{sn}$  : 各管における, 浮遊している泥の沈降速度であり, ここでは Owen Tube (4.1.2) 参照) を用いた現地観測の結果に従って, 沈降速度を泥の濃度の関数として与えた。

$G_3$  : 底面と下層の間を通じた泥輸送量であり, 4.2 に示した Owen および Odd の研究に従って, 次式によって与えた。

$$\begin{aligned} G_3 &= H[|\tau_3| - \tau_e] M (|\tau_3| - \tau_e) \tau_3 \\ & - H[\tau_d - |\tau_3|] w_{s2} C_2 \left( 1 - \frac{|\tau_3|}{\tau_d} \right) \quad \dots\dots\dots(124) \end{aligned}$$

$\tau_e$  : 洗掘限界の時の底面せん断応力

$\tau_d$  : 沈降 (堆積) 限界の時の底面せん断応力

なお,  $\tau_e, \tau_d$  は共に塩分の関数として与えた。

$M$  : 経験的な定数であり, ここでは  $0.0025 \text{ kg/s} \cdot \text{N}$  とおいた。

$\tau_3$  : 底面が泥によって被われている割合である。

砂の輸送については, 5.1.2) に示した流砂量公式 (85) 式) を Great Ouse エスチュアリーにおける環境に適合するように若干変えた次式を基礎式として用いた。

$$q_{sl} = 2.25 E_{fs} \frac{\rho_s \nu f_s (\alpha U')^4 \tau_l W(\eta_3)}{g^2 (s-1)^2 D_l^2} \dots\dots\dots (125)$$

ここに

$\tau_l$  :  $l$  というサイズの砂が底面を被っている割合

$D_l$  :  $l$  というサイズの砂の代表粒径

$\alpha$  : 主水路の断面形状が台形であるとする、底質輸送は台形底面上の平均流速に支配される。しかし台形底面上の平均流速は主水路全体の平均流速  $U'$  とは異なる。数値計算では  $U'$  しか用いないので、底面移動を計算する際には  $U'$  に  $\alpha$  を乗じて、台形底面上の流速に変換してやる必要がある。 $\alpha$  はこのような目的に用いる換算係数であり、次式によって与えられる。

$$\alpha = \frac{3}{2} \cdot \frac{1 + \frac{W(\eta_1)}{W(\eta_3)}}{2 + \frac{W(\eta_1)}{W(\eta_3)}} \dots\dots\dots (126)$$

である。なお  $U'$  は (114) 式で与えられる。

洗掘を受ける海底面の性質については次のように考えた。変化を受ける海底断面は、図一60に示すように堆積層表面とこれ以上洗掘が進まないという限界の面との間の断面である。この断面は「horizon」と呼ばれる幾つかの一定厚さの圧密を受けない層に分けられ、各層内では泥、非常に細かい砂が種々の割合でまざっていると考える。(125)式中の  $\tau_l$  は露出している horizon 中に含まれている砂や泥といった底質の体積に比例する。表層の horizon に含まれているすべての底質が洗掘されるまで、その下の horizon は洗掘を受けない。以上のように海底面の性質を考えると、表層の horizon における、底質の保存則は次式で与えられる。

$$W(\eta_3) \left\{ -\frac{\partial \eta_3}{\partial t} - \frac{G_3}{\sigma_1} \right\} + \sum_{l=1,2} \frac{1}{\sigma_l} \cdot \frac{\partial q_{sl}}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (127)$$

ここに、

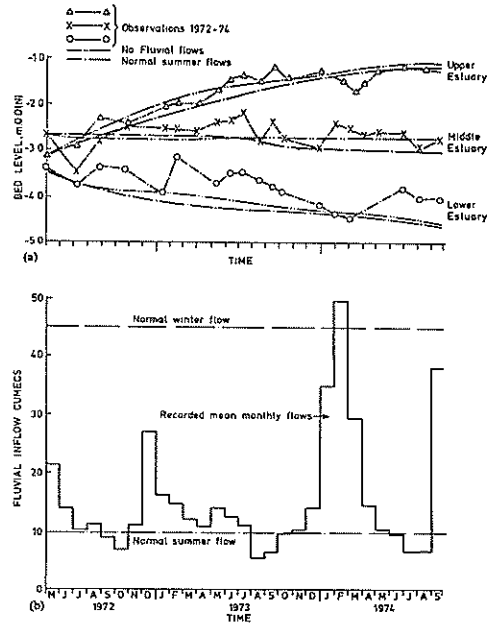
$\sigma_l$  : 底質の乾燥密度

である。なお  $l=1$  は非常に細かい砂、 $l=2$  は細砂、 $l=3$  は泥分を示す。砂の乾燥密度  $\sigma_1$  および  $\sigma_2$  は  $1.7 \text{ t/m}^3$  とおいた。又、泥分の乾燥密度  $\sigma_3$  は塩分の影響を受けて変化する。

ふわふわした密度の小さな浮遊泥は憩流時には底面に沈降していくが、これらの泥は流速が増加すると、一度に浮上する。このような機構をモデル中で再現するために、 $10 \text{ kg/m}^2$  の泥が底面に沈降すると、それらの泥は

horizon 中に取り入れられていくが、底面に沈降した泥が  $10 \text{ kg/m}^2$  未満だと流速の増加に伴って、底面に沈殿、堆積した泥は一度に浮上させられると考えた。

以上の方程式、すなわち水の運動に関する(105)~(109)式、塩分の保存則である(116)~(118)式、泥分の保存則である(121),(122)式、底面表層における底質の保存則(127)式を差分法によって解き、1972年5月より1974年10月に至る期間に現地で起った現象を再現できるか否かを調べた<sup>27)</sup>。図一62には現地の上流部、中間部、下流部に起った河床変動を数値計算によって計算された値とともに示している。図の下部には、エスチュアリーに流入してくる河川流量の経時変化を示しているが、数値計算は河川流量をゼロとした場合と、 $10 \text{ m}^3/\text{s}$  の一定とした場合の2ケースについて行った。上流部において堆



図一62 河床変動経時変化の現地観測値と数値計算結果

積、下流部において洗掘という現地における傾向は数値計算でもよく再現されている。また河川流量の相異は結果にほとんど影響を及ぼしていない。図一63には当初細砂と粗砂によって構成されていた底面が、30か月のひびり、1か月の通常の冬期河川流、2週間の洪水といった様々な条件によってどのように変化するかが示されている。

### 5.2 Esmeraldas 港におけるシルテーションの研究<sup>28), 29)</sup>

エクアドルの Esmeraldas 港は、図一64に示すように太平洋に面した Esmeraldas 川河口にある港である。

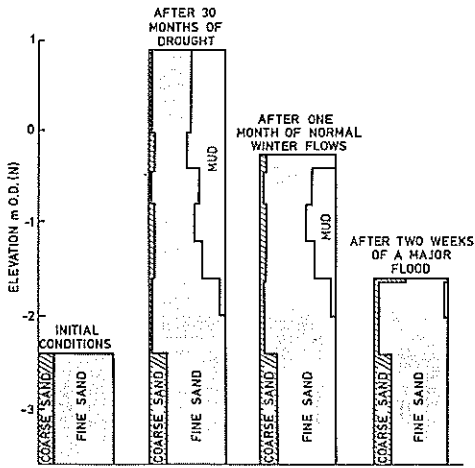


図-63 底質構成の変化

沖からは港口部の所まで海谷がせまってきている。Esmeraldas 川は、幅の広い、浅い川であり、流量は少ない時で  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 、多い時で  $4000 \text{ m}^3/\text{s}$  に達する。潮差は大潮時に約  $3.3 \text{ m}$ 、小潮時に約  $2 \text{ m}$  である。河道部の底質は粒径約  $0.5 \text{ mm}$  程度の砂であるが、港口部や港のすぐ南側の陰になった所には泥が堆積している。港口部における泥の堆積量は、1976年に  $12 \text{ 万 m}^3$ 、1977年に  $3.5 \text{ 万 m}^3$  であった。流れは顕著に成層しており、上層では流速大で、多くの浮遊物質を含む。これに対して下層では流れもゆるやかで、あまり浮遊物質を含まない。

河川よりの排出土砂量は、実測によると、河川流量が  $3700 \text{ m}^3/\text{s}$  の時に約  $20 \text{ 万 t/d}$  であり、河川流量が  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  以下の時は排出土砂量は無視できる程度である。現在の港の北側に漁港の建設が計画され、予想されるシルテーションに対して最も良好な結果を与える港の形状を探るために研究が行われた。

Miles は水平二次元、鉛直二層の場合における塩分および泥の輸送モデルを開発し、港口付近における泥分の平面分布を計算した。まず上層における水の連続式および運動方程式として (128)~(130) 式が得られる。

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial t} - \frac{\partial \eta_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (d_1 u_1) + \frac{\partial}{\partial y} (d_1 v_1) = w_u \dots \dots \dots (128)$$

$$\frac{\partial w_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial w_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial w_1}{\partial y} + g \frac{\partial \eta_1}{\partial x} = - \frac{f u_1 q_1}{8 d_1} \dots \dots \dots (129)$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} + g \frac{\partial \eta_1}{\partial y} = - \frac{f v_1 q_1}{8 d_1} \dots \dots \dots (130)$$

ここに

- ( $u, v$ ) : 平均流速の水平成分
- $\eta$  : 層の表面の位置
- $d$  : 層の厚さ
- $f$  : 流れが一層になった時は、底面における摩擦係数  $f_b$  に等しくなり、流れが二層である時には、上、下層の境界面における摩擦係数  $f_i$  に等しく

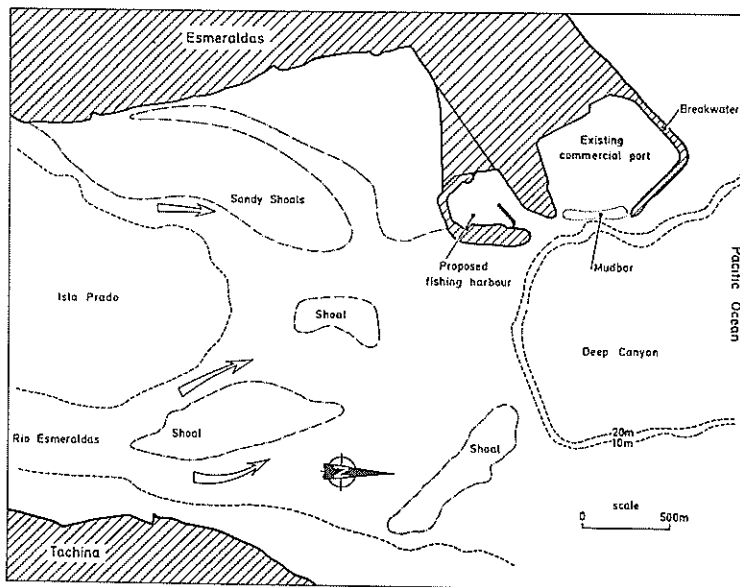


図-64 Esmeraldas 港平面図

なる。

$w_s$  : 進行(entrainment)による湧界流の流速であり、次式のようにおかれた。

$$w_s = 0.0025 u_1 F_{r1}^2 \quad \dots\dots\dots(131)$$

なお、

$$F_{r1} = u_1 / \sqrt{g' d_1}$$

$$g' = g(\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$$

であり、 $F_{r1}$ は0.4と0.75の間の値をとる。

添字1は上層、添字2は下層であることを示し、 $q$ は $u$ 、 $v$ と次式に示す関係にある。

$$q^2 = u^2 + v^2 \quad \dots\dots\dots(132)$$

次に下層(塩水くさび内)における水の連続式および運動方程式は、(133)~(135)式のようになる。

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (d_2 u_2) + \frac{\partial}{\partial y} (d_2 v_2) = -w_s \quad \dots\dots\dots(133)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + g' \frac{\partial \eta_2}{\partial x} + g'' \frac{\partial \eta_1}{\partial x} = \frac{f_i u_1 q_1}{8 d_2} - \frac{f_b u_2 q_2}{8 d_2} \quad \dots\dots\dots(134)$$

$$\frac{\partial v_2}{\partial t} + g' \frac{\partial \eta_2}{\partial y} + g'' \frac{\partial \eta_1}{\partial y} = \frac{f_i v_1 q_1}{8 d_2} - \frac{f_b v_2 q_2}{8 d_2} \quad \dots\dots\dots(135)$$

なお、

$$g'' = g \rho_1 / \rho_2$$

である。

(128)~(130)式および(133)~(135)式によって水平流速が求まると、次式によって上層における泥分濃度 $C_1$ を求めることができる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (d_1 C_1) + \frac{\partial}{\partial x} (u_1 d_1 C_1) + \frac{\partial}{\partial y} (v_1 d_1 C_1) = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xx} \frac{\partial}{\partial x} (d_1 C_1) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{yy} \frac{\partial}{\partial y} (d_1 C_1) \right) - F_z - (w_s - w_u) C_1 \quad \dots\dots\dots(136)$$

ここに、

$D_{xx}$ 、 $D_{yy}$  : 水平拡散係数

$F_z$  : 乱流混合による鉛直方向の泥輸送量であり、次式によって与えられる。

$$F_z = k u_1 C_1$$

なお $k$ は0.0001とした。

$w_s$  : 泥の沈降速度であり、観測によると上、下層の境界面で0.8 mm/sである。

一方下層では流速が小さいので、泥分の濃度は、下層内へ入ってくる泥の鉛直方向輸送量を、フロックを形成している泥の平均沈降速度(2.0 mm/s)で除して求めた。

底面における抵抗係数 $f_b$ はColebrook-White式((36)式)によって求めた。なお底面の相当粗度 $k_s$ はリップルの波長が底面砂の粒径の1000倍であることから0.4 mとおかれた。上、下層の境界面における摩擦係数 $f_i$ は0.015とした。

以上のように、現象が定式化されるが、Milesは流れに関する式および泥輸送の拡散式をImplicitな差分法によって解いた。図-65には、現在のEsmeraldas港の南側に新しく漁港を建設した時における、下層の泥分の濃度と河川内の泥分の濃度との比が示されている。港口部付近で濃度が高くなっており、その付近で埋没が起ると予想される。

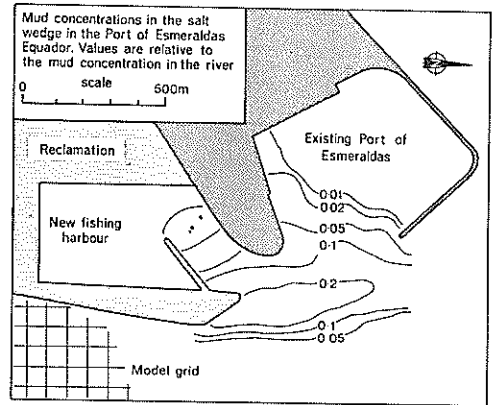


図-65 Esmeraldas港周辺における泥分濃度の分布

### 5.3 航路埋没量の予測

浅いエスチュアリーに航路を掘った場合に、航路埋没量を予測することは、難しい問題である。O'ConnorとLean<sup>30)</sup>は種々の予測法を紹介しており、また4.2では底質が泥の場合についてHarrisonおよびOwen<sup>19)</sup>が示した埋没量の予測方法を紹介した。ここでは底質が細砂であるコロンビアのTumaco港に航路を掘った場合について、埋没量を予測するためにThornが用いた方法<sup>31)</sup>を紹介する。

Tumaco港はコロンビアの太平洋岸に位置する。流れは潮汐によって起され、最大流速は1.5 m/sである。大潮時の潮差は3.8 m、小潮時の潮差は2.1 mである。Tumacoに石油精製所を建設するにあたり、外洋と石油精製所を結ぶ新航路の埋没量を予測する必要が生じた。航路の底面幅は170~200 mである。現在の水深は低潮面下0~20 m(平均して7~8 m)であるのに対し、航路水深は13~13.5 mであり、若干の箇所を除いて、現在の水深は航路水深より浅く、浚渫する必要がある。航路側面の法勾配は1:3である。Thornは現在の状



態における潮流流速と浮遊砂濃度の現地観測を行って、予態される航路埋没量を求めた。

潮流流速の鉛直分布は、次の対数則で与えられる。

$$\frac{u_y}{u_x} = 5.75 \log_{10} \frac{y}{k_s} + 8.5 \quad \dots\dots\dots (138)$$

ここに、

$u_y$  : 底面上高さ  $y$  の位置における水平方向流速である。

(138)式を水深方向に積分し、(138)式と積分によって得られた式とより  $k_s$  を消去すると次式が得られる。

$$u_y = C_1 + C_2 \log_{10} y \quad \dots\dots\dots (139)$$

ここに

$$C_1 = \bar{u} + \frac{u_x}{\kappa} - \frac{2.3 u_x}{\kappa} \log_{10} d \quad \dots\dots\dots (140)$$

$$C_2 = \frac{2.3 u_x}{\kappa} \quad \dots\dots\dots (141)$$

$\kappa$  : カルマン定数

$d$  : 水深

である。

一方断面平均流速  $\bar{u}$  と底面摩擦速度  $u_x$  との関係として次式が得られる。

$$\frac{\bar{u}}{u_x} = \frac{1}{\kappa} (2.3 \frac{C_1}{C_2} + 2.3 \log_{10} d - 1) \dots\dots\dots (142)$$

上式で与えられる  $\bar{u}$  と  $u_x$  との比は、水深が深い時、ある特定の位置では一定であることが経験的に確かめられている。

浮遊砂の水深方向の濃度分布は、次に示すラウス型の式となる。

$$\frac{C_y}{C_a} = \left[ \frac{a(d-y)}{y(d-a)} \right]^z \quad \dots\dots\dots (143)$$

ここに、

$C_y$  : 底面上  $y$  の位置における浮遊砂濃度

$C_a$  : 底面上  $a$  の位置における浮遊砂濃度

$$Z = \frac{w}{\kappa u_x}$$

$w$  : 浮遊砂粒子の沈降速度

である。

(143)式は次の(144)式のように書きかえられる。

$$\log_{10} C_y = D_1 + D_2 \log_{10} \frac{d-y}{y} \quad \dots\dots\dots (144)$$

ここに、

$$D_1 = \log_{10} C_{1/2d}$$

$C_{1/2d}$  : 底面よりの高さが全水深の半分となる所での浮遊砂濃度

$$D_2 = \frac{w}{\kappa u_x}$$

である。

従来経験によると、(143)式における  $C_a$  と  $u_x$  との間には、次式が成り立つ。

$$C_a = A \cdot u_x^n \quad \dots\dots\dots (145)$$

ここに

$A$  : 定数

$n$  : 底質粒径の関数であり、現地観測の結果より決定される。

現状における底質輸送量は、航路完成後には流れが航路に接近していき、沈澱が起る前の底質輸送量となり、ある一定の粒径の底質輸送量  $T_x$  は次式で与えられる。

$$T_x = \int_{\text{bed}}^{\text{surface}} C_y \cdot u_y dy \quad \dots\dots\dots (146)$$

底質が粒径に従って  $N$  通りに区分できるとすると、全底質輸送量  $T_M$  は次式のようなになる。

$$T_M = \sum_{x=1}^N T_x \quad \dots\dots\dots (147)$$

流速、浮遊砂濃度分布の現地観測より、一潮汐内のある特定の時点における  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $\bar{u}/u_x$  が求まる。

航路上の水量を、' をつけて示すと、航路掘削後も航路の位置における流量が変化しないことから次式が得られる。

$$\bar{u}' \cdot d' = \bar{u} \cdot d \quad \dots\dots\dots (148)$$

上式より  $\bar{u}'$  が求められる。

(142)式で与えられる  $\bar{u}/u_x$  も、航路掘削によって変化しないとして、次式が得られる。

$$u_x' = \frac{\bar{u}'}{\bar{u}} \cdot \frac{u_x}{u} = \frac{d}{d'} \cdot u_x \quad \dots\dots\dots (149)$$

$C_2$  は  $u_x$  に比例するから、 $C_2'$  は次式のようなになる。

$$C_2' = \frac{d}{d'} \cdot C_2 \quad \dots\dots\dots (150)$$

一方、 $C_1'$  は(140)式より次のように求まる。

$$C_1' = \bar{u}' + C_2' \left( \frac{1}{2.3} - \log_{10} d' \right) \dots\dots\dots (151)$$

したがって、航路上での流速の鉛直方向分布は次式によって与えられる。

$$u_y' = C_1' + C_2' \log_{10} y \quad \dots\dots\dots (152)$$

一方、航路上における、浮遊砂の濃度分布は次のようにして計算することができる。

海底面上  $a$  の位置における基準濃度  $C_a'$  は(145)式より次式のようなになる。

$$C_a' = \left( \frac{u_x'}{u_x} \right)^n \cdot C_a$$

$$= \left( \frac{d}{d'} \right)^n C_a \quad \dots\dots(153)$$

浮遊砂濃度分布式における係数  $Z'$  は、 $\kappa$  および  $w$  が変化しないから、次式のように求められる。

$$Z' = \frac{u_x'}{u_x} \cdot Z$$

$$= \frac{d'}{d} \cdot Z \quad \dots\dots(154)$$

したがって、航路上における浮遊砂濃度分布が、(143)式より次式のように求まる。

$$C_y' = C_a' \cdot \left[ \frac{a(d'-y)}{y(d'-a)} \right]^{Z'} \quad \dots\dots(155)$$

(152)、(155) 両式より航路上における浮遊砂輸送量は、次式のようになる。

$$T_M' = \sum_{n=1}^N \int_{bcd}^{\text{surface}} C_y' \cdot u_y' dy \quad \dots\dots(156)$$

流れの変化に伴う浮遊砂輸送量の変化が、時間的な遅れなしに起るとすると、航路埋没量は(147)、(156)式より、 $T_M$  と  $T_M'$  との差として求まる。1 潮汐周期間での航路埋没量を求めるには、1 周期間を適当に区分して、各々の時期について航路埋没量を求めた後、それらをたしあわせるとよい。

Tumaco 港における現地調査に際しては、海底面より 0.05 ~ 0.60 m の範囲における浮遊砂濃度を、図-66 に示す HRS で開発した計器（流速、流向の測定および採水をこの計器を用いて行うことができる）を用いて測定した。さらに 0.60 m 以上の所ではワイヤで流速計および採水用のノズルをつり上げ、測定を実施した。粒径に応じて浮遊砂を 6 種類に区分し、 $a$  は水深の 1/10 として計算を行った。(145) 式の  $n$  は粒径が大きくなるにつれて増

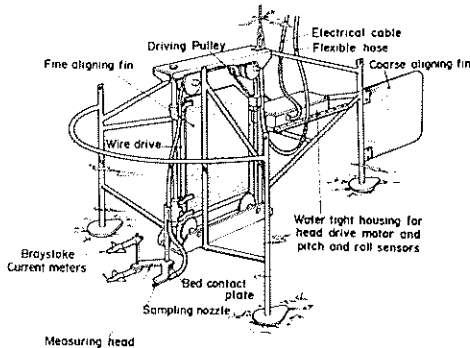


図-66 HRS 型の浮遊物質輸送量測定器

加する傾向を示したが、0 ~ 7.99 の範囲で変化した。

#### 5.4 Ackers と White による流砂量公式<sup>32)~34)</sup>

Ackers および White が 1972 年に発表した流砂量公式は、掃流砂および浮遊砂の双方を含んだ全流砂量を与える式として、最も精度が高く、かつ使いやすい公式の一つであり、底質粒径が 0.04 mm より大きい時に適用可能な式である。5.1(2)に述べた Odd の流砂量公式がエスチュアリーにおける流砂量公式であるのに対し、Ackers と White による公式は豊富に砂が供給される環境（例えば河川）における流砂量公式である。もっとも Ackers と White は公式による計算結果を Thames エスチュアリーにおける現地観測結果と比較して、潮汐の影響で方向の変わる流れに対してはなお検討の余地があるとしているものの、オーダー的には一致する値を得ており、Thames エスチュアリーのように土砂供給が豊富な場合には、エスチュアリーにおいても流砂量を予測する式として使用できるものである。ここでは流砂量式が得られた理論的背景は省略し、公式のみを示す。

流砂量式は次式で与えられる。

$$G_{gr} = c \left( \frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^{m_{AW}} \quad \dots\dots(157)$$

ここに、

$G_{gr}$  : 無次元化された流砂量であり、次式で与えられる。

$$G_{gr} = [ (Xd) / (sD) ] (u_x/U)^n \quad \dots\dots(158)$$

$X$  : 砂の輸送量と水の輸送量との比である。単位幅、単位時間当りの流砂量を求めるには、 $X$  に  $U \cdot d \cdot \rho$  ( $U$  は平均流速、 $d$  は平均水深、 $\rho$  は水の密度である。) を乗じる。

$s$  : 底質の密度と水の密度との比

$D$  : 底質粒径。種々の粒径の砂がまざっている混合砂の場合には  $D$  として  $D_{35}$  をとる。

$u_x$  : 摩擦速度であり、 $\sqrt{gd_i}$  によって求められる。水平流速の鉛直方向分布を測って、対数分布則より求めてもよい。

$g$  : 重力加速度

$i$  : 水路の勾配

$n$  : 底質粒径に関する無次元量  $D_{gr}$  ((74)式参照) の関数である無次元量であり、図-67(a)のように与えられる。この関数は次式のようになる。

$$n = 1.00 - 0.56 \log D_{gr} \quad (1.0 < D_{gr} \leq 60)$$

$$n = 0.00 \quad (D_{gr} > 60)$$

.....(159)

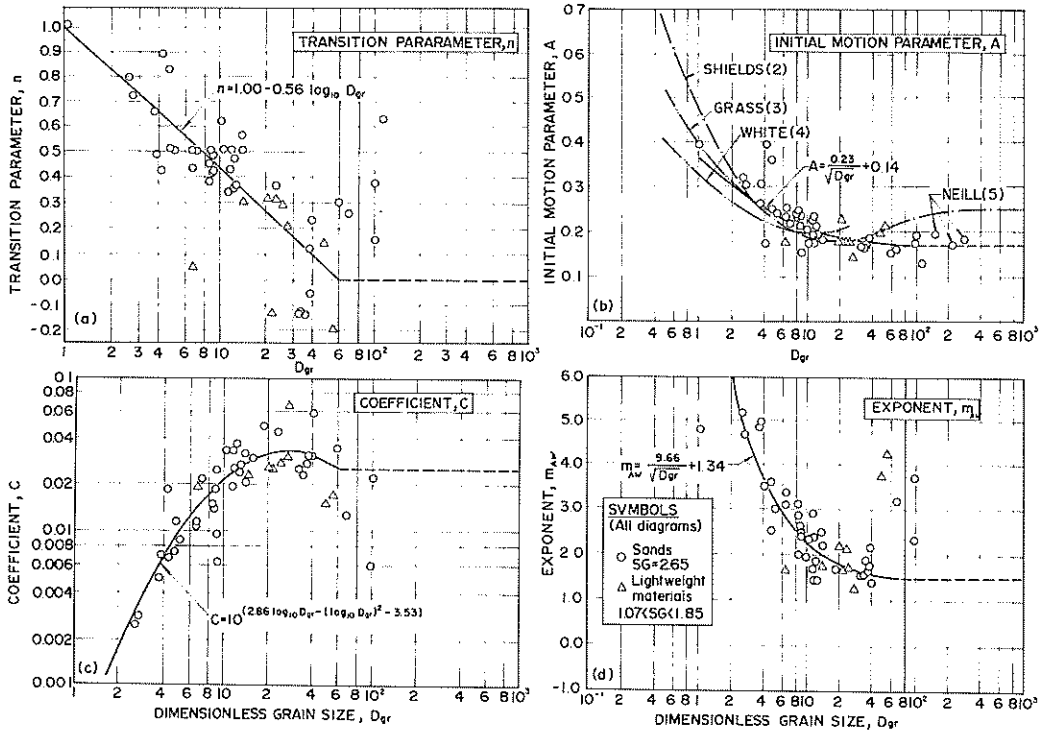


図-67 AckersとWhiteによる流砂量公式における諸定数算定図

$c$  :  $D_{gr}$  の関数である無次元量であり、図-67(c)のように与えられる。この関係は次式のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} \log c &= 2.86 \log D_{gr} - (\log D_{gr})^2 - 3.53 && (1.0 < D_{gr} \leq 60) \\ c &= 0.025 && (D_{gr} > 60) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (160)$$

$F_{gr}$  : 底質の移動しやすさに関する量であり、Sediment Mobility Number と呼ばれる。次式で表わされる。

$$F_{gr} = \frac{u_*^n}{\sqrt{gD(s-1)}} \left[ \frac{U}{\sqrt{32} \log\left(\frac{\alpha d}{D}\right)} \right]^{1-n} \dots\dots\dots (161)$$

$\alpha$  : 定数であり、通常は 1.0 とおく。

$A$  : 定質が移動し始める時の  $F_{gr}$  の値である。 $F_{gr}$  が  $A$  より小さい時には、 $G_{gr} = 0$  となる。図-67(b)に示すように  $D_{gr}$  の関数である。この関係は次式のように書ける。

$$A = \frac{0.23}{\sqrt{D_{gr}}} + 0.14 \quad (1.0 < D_{gr} \leq 60) \quad \left\{ \right.$$

$$A = 0.17 \quad (D_{gr} > 60) \quad \left. \right\} \dots\dots\dots (162)$$

$m_{AW}$  : 図-67(d)に示すように  $D_{gr}$  の関数であり、この関係は次式のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} m_{AW} &= \frac{9.66}{D_{gr}} + 1.34 && (1.0 < D_{gr} \leq 60) \\ m_{AW} &= 1.50 && (D_{gr} > 60) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (163)$$

流砂量を求める場合には次の順序で計算を行う。

- (1)  $D, g, s, \nu$  の値を(74)式に代入して  $D_{gr}$  を求める。
- (2)  $D_{gr}$  の値を、(159), (160), (162), (163) 式に代入して  $n, c, A, m_{AW}$  を求める。
- (3) (161) 式により  $F_{gr}$  を計算する。
- (4) (157) 式により  $G_{gr}$  を求める。
- (5) (158) 式により  $G_{gr}$  を  $X$  に変換し、さらに  $X$  に  $V \cdot d \cdot \rho$  を乗じて、単位幅、単位時間当りに輸送される砂の質量を求める。

5.5 Parker と Kirby による fluid mud に関する研究<sup>35),36)</sup>  
 エスチュアリー-の底面付近には高濃度の泥を含んだ流

動層が存在していることがある。この層は fluid mud と呼ばれ、音響測深の際には反射面となる。したがって測深に際して、どの反射面を基準となる海底面と取ればよいのかといった問題や、船舶の航行に際してどの面を船底と接触してはいけない海底とすればいいのかといった問題が生じてくる。Parker と Kirby は英国海洋研究所 (Institute of Oceanographic Sciences, 略称 I. O. S.) の科学者であるが、fluid mud の問題はエスチュアリーにおけるシルテーションに密接に関連する問題であるので、ここに紹介する。

IOS は 1970 年に初めて泥のような微細物質の現地における連続した鉛直分布を測定しようと試みた。測定は、潮差が大きく、強混合型のエスチュアリーである英国の Severn エスチュアリー (図-1 に 63 で示す) と、潮差が小さく、弱混合型のエスチュアリーであるオランダの Maas エスチュアリー (Europort のあるライン川河口) で行った。測器としては  $^{133}\text{Ba}$  より出るガンマ線を利用した密度測定器を用いた。

図-68 の左側は Severn エスチュアリーにおける 30 kHz の音響測深記録である。幾つもの反射面がみられ、海底面上に fluid mud が層をなして存在していることがわかる。厚さ約 1 m の fluid mud の部分の密度変化の連続記録が同図の右側に示されている。音響測深で見つかった層の所で急激な密度変化が起っていることがわかる。

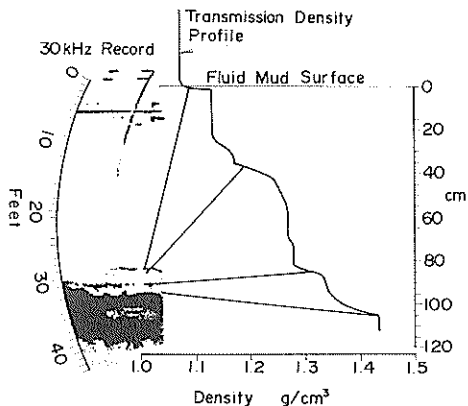


図-68 fluid mudの音響測深記録と密度分布

Parker と Kirby はさらに Severn エスチュアリーにおいては、大潮から小潮へ、小潮から大潮へと時間が経過するにつれ泥の鉛直方向濃度分布がどのように変化するかを調べた。その結果を模式的に示したのが図-69 である。それによると泥の濃度分布は指数分布型でなく、一様か、階段式に急変する形状となる。大潮から小潮へと

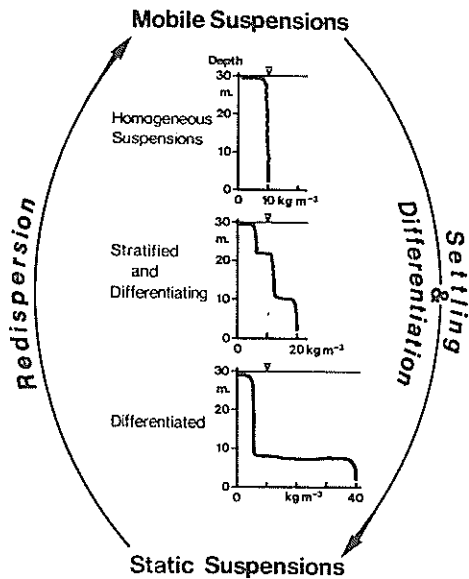


図-69 泥の鉛直方向濃度分布の経時変化模式図

移るにつれ、上層の濃度が減少し、下層の濃度が増加し、小潮時には下層に高濃度の fluid mud が発達する。この fluid mud は小潮から大潮へ移ると再浮遊させられる。

一方、約 1.4 m と潮差の小さい Maas エスチュアリーでも、底面近くでは 40000 ppm 以上の高濃度の層が存在することがわかった。この層は 200 kHz の音響測深器では検出されないものであった。

### 5.6 HRS における現在の業務受託体制

HRS にはエスチュアリーのシルテーションに関して多数の業務が持ち込まれるが、それらは通常次のような過程で処理される。

- (1) 業務の受託に伴う、研究プロジェクト全体の編成、企画。
- (2) 現地調査の実施。現地における地形測量や、流速測定、底質移動に関する調査。Owen Tube を用いた、泥の現地における沈降速度の測定。底質が泥であれば、試料を採取し、HRSへ送る。
- (3) 現地データの解析。底質の粒度分析、実験室における沈降速度の測定等の試験を行う。底質が泥の場合、現地から送られてきた試料を用いて、4.1において述べた方法に従って、泥の圧密、輸送の特性を調べる。
- (4) 数値計算の実施。幅の狭いエスチュアリーの場合 4.2 や 5.1.(5) に述べた方法で、幅の広いエスチュアリーの場合 5.2 に述べた方法で数値計算を行い、建設工事が及ぼす影響を把握する。

(5) 密度流場における複雑な流れ、渦（通常の場合泥は渦の中心部に運ばれ、沈殿する）によってシルテーションがひきおこされており、このような流れの場の説明が数値計算だけでは難しい時は模型実験を実施する。著者のHRS滞在期間中にも、平面縮尺 1/350、鉛直縮尺 1/50 の塩水、淡水を用いた固定床模型を使って、インドネシアの Belawan 港の模型実験を実施中であった。

## 6. 将来の研究の展望

エスチュアリーにおけるシルテーションは、海外において技術協力を携わる際にしばしば直面する問題であり、近年ますます重要になっている海外技術協力を円滑に進めていくためにも、研究を実施する必要性が指摘されている。国内においても各地の湾の海底に沈殿しているヘドロが浚渫工事に際してどのように輸送されるかといった問題や、浚渫工事中に発生するにごりの分散の問題、底質がシルトである有明海における熊本新港の建設問題に関連して、泥のような微細粒子の移動を調べることが技術的な課題となってきている。このような国内の問題も、本報告で示したものと同様な手法によって検討していくことが可能である。

日本においてなされた河口港の埋没に関する従来の研究としては、新潟港技術調査委員会によって昭和 23 年に報告された新潟港の埋没調査がある<sup>37)</sup>。そこでは、河川より流下してくる微細な泥の沈殿機構が密度流との関連で、泥の質量保存則に基づいて調べられている。しかし、その後河口港の埋没問題は十分に調べられないまま、今日に至っている。一方、衛生工学の分野では、底泥の輸送に関する研究、特に限界掃流力について実験が行われている。又、浄水処理の過程において固液分離を行う必要があり、この操作に関する研究の中でフロック形成の機構や底泥が沈降し圧密を受ける機構が最近活発に調べられている。底泥の沈降圧密過程については 4. 1.(3) に示した Kynch の理論の適合性についても検討が進められている。さらに物質輸送については拡散方程式を数値計算によって解くことが多方面で行われている。

本報告中に示したHRSの研究は、シルテーションの問題の解決ということを目的としているために、数値計算の際に必要な諸量について、調査対象地点において泥の沈降速度を調べ、泥の圧密、輸送といった点については実験を行って諸量の値を定めてやり、その結果を数値計算に用いるという応用的な研究方法をとっていることに特徴がある。また 5. 1 に示した Wash におけるプロジェクトに関連した研究の中でも、現地観測に基づいて

流砂量や、密度流場における混合距離、底面摩擦係数の値が経験的に定められている。その後、従来の知識は系統的に組み立てられ、工学的に問題が解決されている。今後日本でシルテーションの研究を進めていくには、海外や国内の問題に関して積極的にとり組み、従来衛生工学分野で行われた成果も活用しながら、移動床水理学や拡散方程式の数値計算をもとにして、系統的に各分野における知識を組み立てていくことが望まれる。

一方、エスチュアリーにおけるシルテーションの研究を、世界的な視野でみると、HRSの他にアメリカにおいて Krone や Partheniades によっても研究されており<sup>38)</sup>、彼等による研究についても調査を行う必要がある。この他に各地におけるエスチュアリーの事例を紹介した本も最近出版されている<sup>39)~41)</sup>ので、それらによってエスチュアリーにおける水理現象について理解を深めることができよう。

## 7. あとがき

HRSからは本論文で紹介した他にも、エスチュアリーのシルテーションに関する論文が多数発表されている。しかし、HRSより発表された諸論文には歴史的な流れがあると考え、その流れに直接関係すると著者が判断した論文だけを紹介した。重要な論文でありながら、文献調査の対象となっていない論文があれば、それはひとえに著者の浅学に起因する。

本論文の内容をまとめると、HRSでなされたエスチュアリーにおけるシルテーションの研究は、次のような歴史的な流れの中で位置づけられる。

(1) 初期(1949~1963年)の研究は、現象を解明するために主として現地観測と水理模型実験によって行われた。Inglis と Allen は Thames エスチュアリーについて、Price と Kendrick は Mersey エスチュアリーについて研究を行った。

(2) 1964~1972年の時期に、研究方法は体系づけられ、変化した。1964年以降 Owen は泥の沈降速度、圧密特性、輸送特性といった物理的な特性に関する研究を行い、その成果を活用して Owen と Odd はシルテーションの数値モデルを開発し、Thames エスチュアリーに対して適用した。

(3) 1973~1979年は、それ以前の研究が内容的に深められ、かつ多様な研究がなされた時期である。Odd 等は Wash Project に関連して、エスチュアリーにおける流砂量公式、密度流場における混合距離、底面摩擦係数といった点について新しい知見を得、エスチュアリー

一内部の水理特性を考慮にいれた新しい数値計算法を発表した。また Miles は Esmeraldas 港におけるシルテーションの問題に関連して、水平方向二次元、鉛直方向二層の場合における数値計算法を示した。また Thorn は航路埋没の予測法を開発し、Ackers および White は新しい流砂量公式を示した。IOS の Parker と Kirby は fluid mud について現地調査を行って、濃度分布について新しい知見を得た。

## 謝 辞

本研究が実施できたのは、著者が国際協力事業団の海外長期研修生として、HRS に滞在の機会を与えられたからである。この場をかりて、そういった機会を与えて下さった、国際協力事業団、運輸本省、港湾技術研究所の各位に心よりの謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Gameson, A. L. H.: Estuaries of the United Kingdom, A Symposium on Mathematical and Hydraulic Modeling of Estuarine Pollution, Water Pollution Research Technical Paper No.13, Her Majesty's Stationery Office, 1972
- 2) Sir Inglis, C.C. and Allen, F.H.: The regimen of the Thames Estuary as affected by currents, salinities, and river flow, Proc. Institution of Civil Engineers, 1957
- 3) Wilson, G. A., Allen, F. H., and Stephens, N.D.E. The conservancy of the river Thames, 19th International Navigation Congress S.II -C. 3, P. I. A. N. C., 1957
- 4) Price, W. A. and Kendrick, M. P.: Field and model investigation into the reasons for siltation in the Mersey Estuary, Proc. Institution of Civil Engineers, 1963
- 5) Allen F. H. and Price W. A.: Density current and siltation in docks and tidal basins, Dock and Harbour Authority, 40, pp.72~76 1959
- 6) Owen M. W.: A study of the properties and behaviour of muds. Literature review, H. R. S. Report INT 61, 1966
- 7) Owen M. W.: A detailed study of settling velocities of an estuary mud, H. R. S. Report INT 78, 1970
- 8) Kiff P. R.: Sedimentation methods manual, H. R. S. Report
- 9) Owen M. W.: Determination of the settling velocities of cohesive muds, H. R. S. Report IT 161, 1976
- 10) Woolwich Ferry Terminals, Field study of the effect of turbulence on silt floc settling velocities, H. R. S. Report EX 467, 1969
- 11) Owen M. W.: The effect of turbulence on the settling velocities of silt flocs, Proceedings of the fourteenth congress of the International Association for Hydraulic Research, 1971, pp.27~32
- 12) Owen M. W.: The effect of temperature on the settling velocities of an estuary mud, H. R. S. Report INT 106, 1972
- 13) Owen M. W.: Properties of a consolidating mud, H. R. S. Report INT 83, 1970
- 14) Owen M. W.: Erosion of Avonmouth mud, H. R. S. Report INT 150, 1975
- 15) Owen M. W. and Odd N. V. M.: A mathematical model of the effect of a tidal barrier on siltation in an estuary, International Conference on the Utilization of Tidal Power, Halifax, Nova Scotia, 1970
- 16) Odd N. V. M. and Owen M. W.: A two-layer model of mud transport in the Thames Estuary, Paper 7517s, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1972, pp. 175~205
- 17) Price R. K.: River Avon, Bristol, Tidal Barrage at Ashton, Part II, Sediment Study, H. R. S. Report EX 703, 1975  
文献17の内容については次の文献18にも解説されている。
- 18) Owen M. W.: Problems in modeling of transport, erosion, and deposition of cohesive sediments, The Sea Vol 6, Recent advances in marine modeling, Wiley Interscience, pp.515~537, 1977
- 19) Harrison A. J. M. and M. W.: Siltation of fine sediments in estuaries, Paper D1, Proc. of 14th Congress of International Association for Hydraulic Research, 1971  
文献19の内容については、文献18にも解説されている。
- 20) The Wash Water Storage Scheme, General description of model studies with summary of results, HRS Report DE32, 1975
- 21) The Wash Water Storage Scheme, Numerical model studies of the Great Ouse Estuary, A transport function for fine sand in the estuary, HRS Report DE9, 1973
- 22) The Wash Water Storage Scheme, Numerical model studies of the Great Ouse Estuary, A mixing length function for vertical exchange in turbulent stratified two-layer flow, HRS Report DE 11, 1974
- 23) Odd N. V. M. and Rodger J. G.: Vertical mixing in stratified tidal flows, Proc. of A.S.C.E., HY 3, 1978
- 24) Washbrook J. D.: Frictional resistance of a sandy tidal channel, A field study, HRS Report INT 125, 1974

- 25) Wash Water Storage Scheme, Numerical model studies of the Great Ouse Estuary, Concepts, schematic representation, theory and numerical methods, HRS Report DE 13, 1974
- 26) Odd N. V. M.: Practical application of mathematical model techniques to predict effects of engineering works on tidal flow in estuaries with a large tidal range, Proceedings of Institution of Civil Engineers, 50, 1971, pp. 507~519
- 27) Numerical simulation of long-term changes in bed levels in estuaries, Hydraulics Research 1975 p. 19~25, Department of the Environment
- 28) Port of Esmeraldas, Ecuador, Siltation study: HRS Report EX 788, 1977
- 29) Miles G. V.: Two-dimensional two layer salt and mud transport model, HRS Report IT 182, 1978
- 30) O'Connor B. A. and Lean G. H.: Estimation of siltation in dredged channels in open situations, 24th International Navigation Congress S. II-2, P. I. A. N. C., 1977
- 31) Tumaco Marine Facilities, Colombia, siltation in proposed dredged channel, HRS Report EX 774, 1977
- 32) Ackers P. and White W. R.: Sediment transport: New approach and analysis, A. S. C. E. HY 11, 1973
- 33) Ackers P.: Sediment transport in channels, An alternative approach, HRS Report INT 102, 1972
- 34) White W. R.: Sediment transport in channels, A general function, HRS Report INT 104, 1972
- 35) Parker W. R. and Kirby R.: Fine sediment studies relevant to dredging practice and control, Proceedings of the Second International Symposium on Dredging Technology, 1977
- 36) Kirby R. and Parker W. R.: The physical characteristics and environmental significance of fine-sediment, suspensions in estuaries, Symposium on Estuaries, Geophysics and the Environment, National Academy of Sciences, 1977
- 37) 新潟港技術調査委員会: 新潟港技術調査報告第1報, 新潟港の埋没並びに海岸欠陥について, 1948
- 38) 例えば, Partheniades E.: A summary of the present knowledge of the behavior of fine sediments in estuaries, MIT Hydrodynamics Laboratory Technical Note No. 8, 1964
- 39) McDowell D. M. and O'Connor B. A.: Hydraulic behavior of estuaries, Macmillan Press, 1977
- 40) Officer C. B.: Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters), John

Wiley & Sons, 1976

- 41) Cronin L. E.: Estuarine Research, Volume II Geology and Engineering, Academic Press, 1975

### 記号一覧表

- $A$  : Ackers と White の流砂量公式における定数  
 $A_n$  :  $n$  番目の管の断面積  
 $A_c$  : 泥の圧密実験における沈降筒の断面積  
 $b$  : 水路幅  
 $C_y$  : 底面上  $y$  の位置における浮遊砂濃度  
 $C_a$  : 底面上  $a$  の位置における浮遊砂濃度  
 $C_{1/2d}$  : 底面上  $d/2$  の位置における浮遊砂濃度  
 $C_n$  :  $n$  番目の管における浮遊泥の濃度  
 $C_f$  : fluid mud の濃度  
 $C_H$  : 高さ  $H$  の所における泥分の濃度  
 $C_0$  : 実験開始時における浮遊泥の濃度  
 $C_t$  : 経過時間  $t$  における浮遊泥の濃度  
 $C$  : 泥や砂の濃度  
 $c$  : Ackers と White の流砂量公式における定数  
 $D_m$  : 平均粒径  
 $D_5$  : 5% 通過粒径  
 $D_f$  : フロックの径  
 $D$  : 砂の粒径  
 $D_{gr}$  : Dimensionless grain size number  
 $D_{AV}$  : 底質の平均粒径  
 $D_l$  :  $l$  というサイズの砂の代表粒径  
 $D_{xx}$  : 水平拡散係数  
 $D_{yy}$  : 水平拡散係数  
 $D_n$  : ある粒径範囲の砂の代表粒径  
 $d$  : 水深又は層の厚さ  
 $d_L$  : 二層モデルにおける下層の厚さ  
 $d_n$  :  $n$  番目の管における平均水深又は平均の厚さ  
 $E$  : 鉛直拡散係数を与える式における定数  
 $e_s$  : エネルギーが砂を浮遊させる仕事に使われる際の効率  
 $E_{fg}$  : Odd の流砂量公式中の係数  
 $E_{fgn}$  :  $n$  という粒径範囲の砂に対する  $E_{fg}$   
 $F_z$  : 溶質の鉛直方向輸送量  
 $F_2$  : 上, 下層間の境界面を通過する鉛直方向の塩分輸送量  
 $F_{gr}$  : Sediment Mobility Number  
 $f$  : 底面摩擦係数  
 $f_L$  : Darcy-Weisbach の摩擦係数  
 $f_B$  : Darcy-Weisbach の摩擦係数  
 $f_b$  : 底面摩擦係数  
 $f_i$  : 上, 下層の境界面における摩擦係数  
 $G_{gr}$  : 無次元化された流砂量  
 $G_3$  : 底面と下層の間を通過する泥輸送量  
 $G_2$  : 上, 下層の境界面を通過する泥輸送量  
 $g$  : 重力加速度  
 $H$  : 泥の圧密実験における底面厚  
 $H[X]$  :  $X$  が正の時 1 となり, 負の時 0 となる記号  
 $h$  : 泥の圧密実験における沈降筒の長さ  
 $h_c$  : 泥の圧密実験における底面内の標高  
 $i$  : 水路の勾配  
 $i_{bn}$  : ある粒径範囲の砂が底面内に存在する容積の割合

- $i_{ban}$  : ある粒径範囲の砂によって被覆された底面の面積の割合  
 $i_{sn}$  : ある粒径範囲の砂が浮遊砂量の中で占める割合  
 $K_{\phi}$  :  $\phi$ スケールにおける歪度  
 $K_n$  :  $n$ という管内の縦方向分散係数  
 $k_s$  : 相当粗度  
 $LL$  : 液性限界  
 $L_n$  : 運動量輸送に関する混合距離  
 $l_{m0}$  : 中立状態における運動量輸送に関する混合距離  
 $l_c$  : 溶質輸送に関する混合距離  
 $l_{co}$  : 中立状態における溶質輸送に関する混合距離  
 $M$  : 泥の輸送量を与える式における定数であり、 $\tau_b = 2\tau_c$ の時の洗掘量に等しい。  
 $M_e$  : 泥の洗掘輸送実験における定数  
 $M_{\phi}$  :  $\phi$ スケールにおける平均粒径  
 $M_c$  : 単位面積当たりの溶質輸送量  
 $\dot{m}$  : フロックの沈降量  
 $m_c$  : 泥の圧密実験における泥の乾燥後の質量  
 $\dot{m}_e$  : 泥の洗掘輸送実験における底面洗掘量  
 $m$  : 底面単位面積当たりの泥の質量  
 $m_{AW}$  : AckersとWhiteの流砂量公式における定数  
 $n$  : AckersとWhiteの流砂量公式における定数  
 $P.I.$  : 塑性指数  
 $p$  : 沈降していくフロックが再浮上せず、底面にとどまる確率  
 $q_{ss}$  : 単位幅当たりの浮遊砂輸送量  
 $R$  : フロックの半径  
 $R_i$  : Gradient Richardson Number (勾配型のリチャードソン数)  
 $R_{fc}$  : Critical Flux Richardson Number  
 $R_f$  : Flux Richardson Number  
 $R_{i*2}$  : 下層の厚さに基づくリチャードソン数  
 $r_3$  : 底面が泥によって被われている割合  
 $r_l$  :  $l$ というサイズの砂が底面を被っている割合  
 $S$  : 泥の圧密実験において、ある面を通過する泥の輸送量  
 $S_T$  : 底質が泥の時、一潮汐周期間における埋没量  
 $S_D$  : 底質が泥の時、単位時間当たりの航路の埋没高さ  
 $S_o$  : ふるい分け係数  
 $S_n$  :  $n$ という管における平均の塩分  
 $s$  : 砂の比重  
 $T_M$  : 全底質輸送量  
 $T_x$  : ある粒径の底質の輸送量  
 $T$  : 潮汐の周期  
 $t$  : 経過時間  
 $U$  : 水路方向の断面平均流速  
 $U'$  : 主水路全体の平均流速  
 $U_n$  :  $n$ 番目の管の平均流速  
 $U_B$  : 二層モデルにおける全断面平均流速  
 $U_L$  : 二層モデルにおける下層の平均流速  
 $U_U$  : 二層モデルにおける上層の平均流速  
 $u_y$  : 底面上高さ $y$ の位置における流速  
 $u$  : 流速  
 $u_a(z)$  : 高さ $z$ の点における風速  
 $u_*$  : 摩擦速度  
 $u_{*d}$  : 泥の堆積限界における摩擦速度  
 $u_{*c}$  : 泥の洗掘限界における摩擦速度  
 $u_{*a}$  : 流体が風である場合の摩擦速度  
 $u_{*o}$  : 潮汐一周期間内における摩擦速度の最大値  
 $V_i$  : 上, 下層の境界面を通過する鉛直流速  
 $V.S.$  : ベーンせん断強度  
 $W$  : Inertia Number  
 $W(\eta_2)$  : 上, 下層の境界面の幅  
 $W(\eta_1)$  : エスチュアリー断面全体の幅  
 $W_B$  : Bermの区域の水面幅  
 $W(\eta)$  : 水面の幅  
 $W_{bed}$  : 水路底面の幅  
 $W_{bank}$  : 水路側壁の幅  
 $W_s$  : 砂を浮遊させておくために費やされる単位床面積当たりの仕事量  
 $W_p$  : 単位床面積当たりのエネルギー逸散量  
 $W_{pn}$  :  $n$ という粒径範囲の砂を浮遊させておくために利用されるエネルギーの量  
 $W_{sn}$  : ある粒径範囲の砂を浮遊させておくのに使われる仕事量  
 $w_u$  : 運行による湧昇流の流速  
 $w_f$  : フロックの沈降速度  
 $w_c$  : 濃度 $C$ の時の沈降速度  
 $w_o$  : フロックの沈降速度をStokes則に基づいて計算した値  
 $w_{50}$  : 中央沈降速度  
 $w_{16}$  : 重量にして16%の泥が、この値以下の沈降速度を有するという限界  
 $\bar{w}_H$  : 高さ $H$ の所の平均沈降速度  
 $w_s$  : 泥の沈降速度  
 $w_{AV}$  : 底面表層の砂のうち平均の大きさを与えるものに対する沈降速度  
 $w_{sn}$  :  $n$ という管における泥の沈降速度  
 $w$  : 浮遊砂粒子の沈降速度  
 $w_d$  : 泥の圧密実験において、底面内における泥の局所的な沈降速度  
 $X$  : 砂の輸送量と水の輸送量との比  
 $X_a$  : 砂粒レイノルズ数  
 $Y$  : Mobility Number  
 $Y_u$  : 平均流速を用いたMobility Number  
 $Z$  : Depth Number  
 $Z$  : 浮遊砂濃度分布式における係数  
 $z_b$  : 二層モデルにおける水路底面の位置  
 $z_c$  : 泥の圧密実験において浮遊泥を含んでいる水と、上ずみの水との境界の位置  
 $\alpha_L \alpha_U$  : 二層モデルにおいて、流速と濃度の積の鉛直方向積分値のかわりに、流速および濃度の各層内での平均値の積を用いることに対する補正項  
 $\Delta R$  : フロックの表面粗度  
 $\epsilon_i$  : 鉛直拡散係数  
 $\epsilon$  : フロックの空きき率  
 $\eta_1$  : 上層表面の位置  
 $\eta_2$  : 上, 下層の境界面の位置  
 $\eta_3$  : 底面の位置  
 $\eta$  : 水面の位置  
 $\kappa$  : カルマン定数  
 $\mu_d$  : differential viscosity  
 $\mu$  : 粘性係数  
 $\nu$  : 動粘性係数  
 $\xi_n$  : Oddの流砂量公式中の係数  
 $\rho_n$  :  $n$ 番目の管における平均の密度



$\bar{\rho}$  : 溶液の密度  
 $\rho_s$  : 砂の密度  
 $\rho_b$  : 底質が泥の時、航路底質の密度  
 $\rho_f$  : フロックの密度  
 $\rho_w$  : 水の密度  
 $\rho_l$  : 懸濁液の密度  
 $\rho$  : 泥の密度  
 $\rho_a$  : 空気の密度  
 $\rho_p$  : 最大 Proctor 密度  
 $\sigma_l$  : 底質の乾燥密度  
 $\sigma_\phi$  :  $\phi$  スケールにおける標準偏差  
 $\tau$  : せん断応力  
 $\tau_{\max}$  : フロックの最大せん断強度  
 $\tau_b$  : 底面せん断応力  
 $\tau_d$  : 堆積（沈降）限界を示すせん断応力  
 $\tau_e$  : 底面の移動限界を与えるせん断応力  
 $\tau_\beta$  : 泥のビンガムせん断強度  
 $\tau_e$  : 洗掘限界における底面せん断応力  
 $\tau_{zz}$  : 底面より  $z$  の距離にある平面上において、流れの  
 流下する  $x$  方向に作用するせん断応力  
 $\tau_f$  : fluid mud の層が移動を始める限界における底面  
 せん断応力  
 $\tau_{\text{bank}}$  : 水路側壁に作用するせん断応力  
 $\tau_n$  : 水平な境界面におけるせん断応力  
 $\tau_{\text{in}}$  : 変化を受けない面におけるせん断応力  
 $\tau_1$  : 風によって水面に作用する応力  
 $\chi_n$  : 変化を受けない面における潤辺

港湾技研資料 No.354

1980・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 日青工業株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.