

波による底泥の移動現象についての実験

Experiments on Mud Transport by Waves

徳島大学工学部 中野 晋 S. Nakano
 運輸省港湾技術研究所 鶴谷 広一 H. Tsuruya
 運輸省港湾技術研究所 鷹濱 潤 J. Takahama

1. はじめに

東京湾などの閉鎖性の内湾や都市河川の河口付近では有害物質を含んだ底泥が厚く堆積しているところが多い。底泥は含水比が高く、軟弱であり流れや波の作用により容易に浮上したり、流動したりする。したがってこれらの場所では底泥が水環境に与える影響は大きい。また中国、タイ、インドネシアなどのアジア諸国では港が河川部や河口周辺に造られることが多いが、河川上流部や浅海部からシルトや粘土が流入し港湾や航路が埋没して大きな問題となっている。このためシルトや粘土を多く含む底泥や浮泥の移動現象は環境及び港湾や航路の埋没の両面から注目される問題であり、わが国でも近年多くの研究^{1)~4)}がなされている。しかし今のところ底泥の外力に対する変形特性などの基本的特性にも不明の点が多く、底泥の移動機構はほとんどわかっていない。とくに波浪場では波と底泥の相互干渉の結果、波高減衰とともに底泥の流動化や底泥運動が生じ、これまで砂粒子を対象として築かれてきた底面せん断力と流砂量の関係などからのアプローチだけでは底泥の移動現象を明らかにすることは困難であると考えられる。

本研究では波による底泥の移動現象を調べる第1歩として実験により底泥の主要な移動形態を把握し、さらに波と底泥の相互干渉による底泥運動や底泥の流動化と底泥の移動形態との関係について検討する。

2. 実験装置と実験方法

2. 1 実験装置

実験は図-1に示す長さ11m、幅0.4m、高さ0.5mの廻流装置付きの2次元造波水槽で実施した。水槽中央部4mの部分の床は上下に移動可能となっている。底泥としては所定の含水比になるように水道水を混合したカオリナイト(ASP600、乾燥比重2.67)と熊本港で採取した現地泥を可動床部に敷きつめて用いた。流れを用いた実験では図に示すように4つのバルブの開閉操作により、波に対して順流及び逆流を起こし、流量はポンプの下流側に設置したベンチュリー管の差圧をマンオメータで測定して調整した。

2. 2 実験ケースと実験方法

(1) 底泥の移動についての実験

波浪による底泥の移動現象で最も問題になっているのは浅海部での港湾や航路の埋没現象である。そこで航路に直角に波が入ってくるような場合(航路埋没が起こりやすい状況)を想定して底泥の移動現象を調べた。底泥の厚さは20cm、水深は30cmとし、底泥床4mのうち岸側あるいは沖側の約2mの区間を図に示すように5~11cm掘り下げてトレンチとしてその埋没状況を測定した。

波の周期は1.05秒とし、流れは順流(波の進行方向と同方向、 $U=20\text{cm/s}$)、流れなし及び

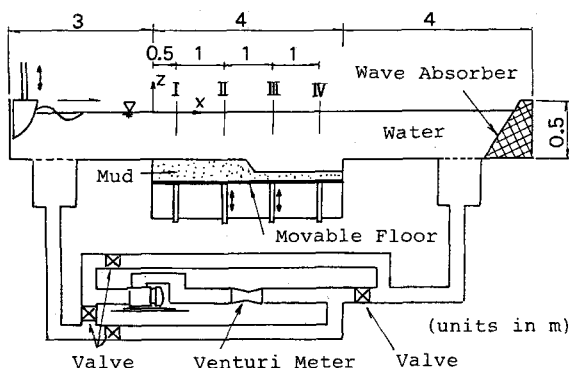


図-1 実験装置の概略図

逆流 ($U = -20\text{cm/s}$) について行った。底泥床面形状の変化を時間ごとに水路側壁のガラス面からフェルトペンでトレースし、実験終了後にトレーシング紙に写し取った後タブレットでデジタル化してフロッピーディスクに取り込み、解析を行った。これと同時に測点Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳの4カ所で容量式波高計による波高測定を行い、波高の変化についても調べている。底泥の種類としてはカオリナイト泥及び熊本泥を用いているが、上層水はカオリナイト泥の時は水道水、熊本泥の時は久里浜湾の海水 ($\rho_w = 1.026\text{g/cm}^3$) を用いた。

(2) 波と底泥の相互干渉に及ぼす流れの影響についての実験

波と底泥の相互干渉の結果生じる底泥運動や底泥の流動化が底泥の移動現象にどのような影響を及ぼすのかを知るために、流れの作用下での波と底泥の相互干渉を調べる実験を行った。この実験で用いた底泥はカオリナイト泥のみである。水深、底泥厚さは底泥の移動実験と同じく30cmと20cmとし、掘削部は設けていない。流れの条件は断面平均流速 $U = 20, 10, 0, -10, -20\text{cm/s}$ の5種類とし、各流速条件について波高 H_w を3段階ずつ変化させた。含水比は $W = 200\%$ 、波の周期は $T = 1.05$ 秒である。測定項目は波高、底泥波高、底泥内圧力変動などである。波高測定は測点Ⅰ～Ⅳの4カ所で行い、底泥波及び底泥内圧力の測定は測点Ⅲの位置で行った。底泥波の測定は超音波測深器 (正豊工学製) を用いた。底泥内圧力は直径10mmの間隙水圧計 (ST研究所製) を底泥表面から2cmと5cmの深さに計2台設置して測定した。

3. 実験結果とその考察

3.1 底泥の移動についての実験

(1) 底泥床面形状の時間変化

a. 流れなしの場合

図-2は岸側に掘削部を設けた時の底泥床面形状の時間変化を示している。7.5cm程度の深さがあった掘削部はわずか4分程度で埋まってしまう。そして最終的には岸側がやや高いほぼ一様勾配の底泥床が形成されている。このケースでは掘削部の斜面が波動運動しながら掘削部内にせり出してくるとともに底泥床全体が波動運動しながら沖側が低下し、掘削部が上昇する状況が観察された。また波の作用開始直後から深部の底泥粒子も岸側にかなり速く移動していた。なおこの波高では底泥の巻き上げはほとんど生じていない。

図-3は図-2のケースに比べて含水比が少し低く、波高も小さいケースでの底泥床面形状の変化を示したものである。この場合には掘削深さが深いこともあり、掘削部の底泥の波動運動はほとんど生じていない。底泥の移動としては掘削部の端の斜面の底泥が小規模な底泥運動にともない、少しずつせり出して掘削部が埋まっていく形態が大半であるが、掘削部の斜面に沿って流れ落ちる底泥粒子があることも観察された。

図-4は沖側を掘削部とした時の実験結果である。このケースは図-3のケースに比べると波高が3.9cmと少し大きくなっているが、その他の水理条件はほぼ同じである。底泥移動の状況は初期のうちは岸側の底泥だけが波動運動して、掘削部の斜面が波に逆行して進み、埋没が進行する。ところが掘削部内に底泥が堆積してある程度底泥厚さが大きくなると、掘削部の底泥も波動運動を始め、図-2のケースで見られた全体的な流動が生じるようになる。その結果、最終的には岸側がやや高いほぼ一様な勾配を持つ底泥床が形成されるに至る。

b. 順流の場合

図-5は $U = 20\text{cm/s}$ の順流の中で波を作用させた時の底泥床面形状の時間変化を示している。この実験では流速の調整後、まず10分間流れだけを作用させて、流れのみで底泥がどの程度移動するかを調べたが、底泥床面形状に変化があらわれるような底泥移動は見られなかった。このケースは流れの条件を除けば図-4の流れなしのケースとほぼ同一条件である。両方のケースを比較すると順流のある場合は流れなしに比べ、埋没速度は大きく、一様勾配の底泥床の形成に要する時間は約1/2である。

c. 逆流の場合

逆流の場合の実験結果を図-6に示す。逆流の場合には底泥運動が小さく、そのため埋没速度は小さい。

特に掘削部では底泥運動は全く生じず、掘削部の斜面が局所的な底泥運動にともなわずかつ掘削部側へ移動することにより生じており、流れなしの場合の波高の小さいケース（図-3）と同じ移動形態を示した。

d. 熊本泥の場合

熊本泥を用いた実験では図-7のような底泥床面形状の時間変化が得られた。この底泥の場合には $x < 2$ mの区間で底泥が大きく波動運動したため、この区間の波高減衰はかなり大きかった。このため掘削部の端の斜面に近いところでの波高は小さく、これにともない底泥運動も小さくなっていた。またこの底泥は含水比が150%と低いこともあり、カオリナイト泥に比べると降伏値、塑性粘度が大きい。これらの諸原因により底泥の移動速度は他のRunよりも小さくなっている。この実験の中で特徴的であったのは波作用後60分程度経過すると底泥表面の上に数mm程度の厚さで高濃度の浮泥層が形成され、これが掘削部の斜面を流下して、掘削部に堆積する現象が生じ始めたことである。図の中で $t = 180$ 分以降では $x > 3$ mにおいても堆積が見

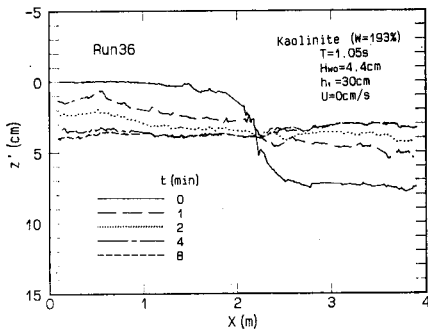


図-2 底泥床面形状の時間変化（流れなし）

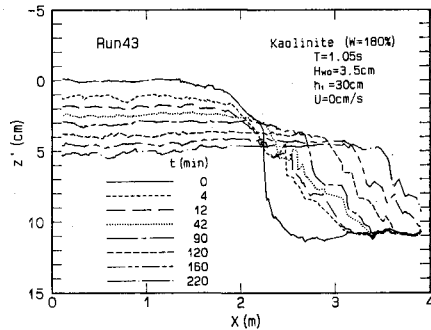


図-3 底泥床面形状の時間変化（流れなし）

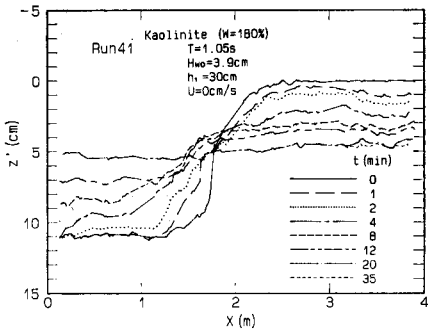


図-4 底泥床面形状の時間変化（流れなし）

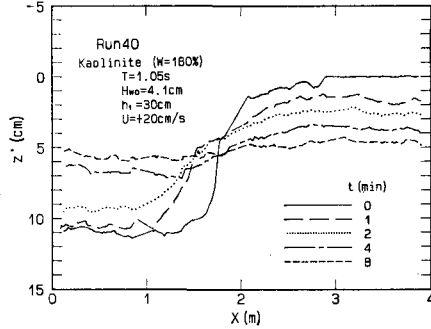


図-5 底泥床面形状の時間変化（順流）

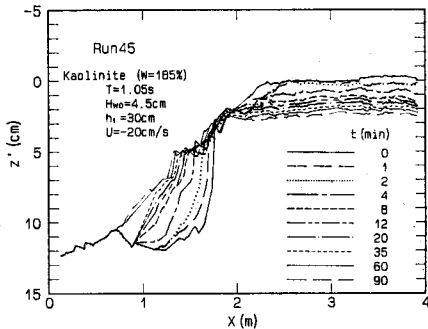


図-6 底泥床面形状の時間変化（逆流）

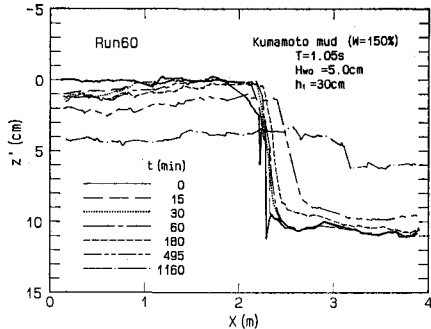


図-7 底泥床面形状の時間変化（熊本泥）

られるが、これはおもに浮泥の流入によるものである。しかし底泥運動にともない、掘削部の斜面が前進して埋没する底泥の移動形態も無視できず、 $t = 1160$ 分では $x = 3.1$ m 付近までが、この形態で埋没しており、それより岸側では浮泥が堆積していた。

図-8は1160分経過後の最終状態での含水比の鉛直分布を示しているが、 $x = 2.5$ mでは表面付近まではほぼ初期含水比 ($W = 150\%$) と同じ含水比の底泥が堆積しているのに対し、 $x = 3.5$ mでは表面で600%を越える高含水比の浮泥が堆積しているのがわかる。

(2) 底泥の平均移動速度

波による底泥の移動速度を定量的に把握するため、次のような平均移動速度 U_m を各ケースについて求めることにする。

図-9に示すように掘削深さが Δh で表される理想的な掘削部のモデルを考える。順流などでの実験で一様勾配底泥床が形成された後は、底泥の移動が生じなくなることを考慮して、掘削部の底面より下の底泥は平衡状態に達して移動しないと考える。そして掘削部の埋没は一点鎖線で示す掘削部の底面と同じ高さの底泥が平均移動速度 U_m で移動して生ずると考える。この時、時刻 t の掘削深さを $\Delta h(t)$ とすると

$$\Delta h(t) = \Delta h_0 \exp \left(- \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2} U_m t \right) \quad (1)$$

で表される。ただし、 Δh_0 は初期状態の掘削深さである。これより Δh の時間変化がわかると平均移動速度 U_m を求めることができる。しかし実測された底泥床面形状はモデルの形状とは異なっているため、 Δh を求めるための換算が必要である。ここではまず基準底泥床部と掘削部の境界の位置を初期形状から決め、 L_1 、 L_2 を求める。時刻 t における基準底泥床部と掘削部の底泥の体積を各部分の長さで除すことにより、各部分の底泥厚さとする。こうして求めた底泥厚さの差をその時刻での掘削深さ Δh とする。表-1に式(1)を用いて求めた各Runごとの平均移動速度を示す。含水比が約180%のカオリナイト泥についてみると順流、流れなし、逆流の順で底泥の移動速度は小さく

なることがわかる。流れなしの場合のRun38, Run41, Run43は波高 H_{we} ($x = 0$ mでの波高) が4.7, 3.9, 3.5 cmと変化しているが他の条件はほとんど同一である。これらのデータから波高が変化すると底泥の平均移動速度がかなり大きく変化することがわかる。特に H_{we} が3.5 cmから3.9 cmまで変化すると U_m は約7倍も大きくなっている。実験時の観察から両者の移動形態は明らかに異なっており、底泥運動の程度が移動速度に大きく影響することは明らかである。また今回の実験では掘削部の位置(岸側あるいは沖側)の影響はあまりみられないようである。

3. 2 波と底泥の相互干渉に及ぼす流れの影響についての実験

波による底泥の移動現象において底泥運動がかなり重要な役割を果たしていることが明らかとなった。図

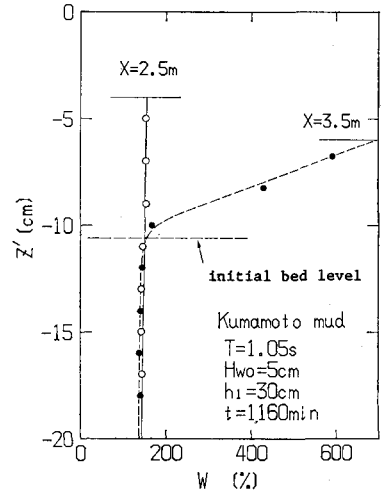


図-8 掘削部の実験終了時の含水比の鉛直分布

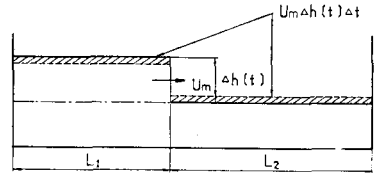


図-9 平均移動速度の説明図

表-1 底泥の移動実験結果

Run	底泥	U (cm/s)	W (%)	H _{wo} (cm)	T (s)	掘削 部	Δh ₀ (cm)	U _m (cm/s)
36	カオリナイト	0	193	4.4	1.05	沖側	6.3	0.954
38	〃	0	177	4.7	〃	岸側	10.4	0.394
41	〃	0	180	3.9	〃	岸側	10.0	0.131
43	〃	0	180	3.5	〃	沖側	9.8	0.0187
40	〃	20	180	4.1	〃	岸側	9.9	0.473
42	〃	20	180	4.6	〃	沖側	8.6	0.482
37	〃	-20	213	3.1	〃	岸側	5.6	0.0843
44	〃	-20	183	3.6	〃	沖側	10.6	0.0078
45	〃	-20	185	4.5	〃	岸側	9.6	0.0109
60	熊本泥	0	150	5.0	〃	岸側	10.0	0.0023

-10 は $x = 2.5\text{m}$ における底泥波高の表面波高 H_{w0} に対する変化を平均流速 U ごとにプロットしたものである。流れなしで $H_{w0} = 4.1\text{cm}$ の時の底泥波高が大きくなっているが、これを除けば流れが順方向に速くなるほど底泥波高が大きくなる傾向がうかがえる。図中に示した曲線は流れのない場合について相当粘度を用いた粘性流体多層モデル⁴⁾により計算した結果である。底泥は一般に非ニュートン流体であり、運動状態により空間的、時間的に粘性が異なる。そこでこの計算では多層に分割された各層内での一周平均量から運動状態に応じた平均的な粘度(相当粘度)を推定してこれを基に波と底泥の相互干渉について求めている。ここでは底泥層を3層に分割し、 x 方向には40分割($\Delta x = 10\text{cm}$)して計算した。また波高減衰を計算する際には水槽側壁近くでの粘性逸散によるものも考慮している。底泥波高について計算結果と流れなし(黒丸)の実測値を比較すると、計算値が少し大きくなっている。

図-11は底泥表面から5cm下($z' = -5\text{cm}$)の底泥内圧力の全振幅について波高に対してプロットしたものである。底泥内圧力は底泥の内部の運動状況を間接的に表していると考えられる。図より底泥内の圧力変動は順流ほど大きくなっており、底泥内の運動も順流ほど大きいことがわかる。なおこの測定では $U = 10\text{cm/s}$ については計測ミスでデータが得られていない。またこれについての流れなしに対する計算値は実測値とよく一致しているが、底泥波高の推定値が実測値と一致していないこともあり、定量的な評価という点ではさらに検討する必要があると考えられる。

流れと波が共存する場合には流れのない場合と同じ波の周期でも波長は順流では長くなり、逆流では短くなる。このため同じ波の周期と水深では底泥床に作用する応力は流れなしの場合より順流では大きく、逆流では小さくなる。その結果、図-11、12に示したように底泥運動の程度が異なり、さらには3、1で示したように流れの状態により埋没速度が大きく変化すると考えられる。

3. 3 粘性流体多層モデルを用いた底泥の移動形態についての考察

図-10、図-11からどの流速に対しても底泥運動は波高が大きくなるほどほぼ直線的に増大することがわかる。底泥の運動が大きくなると底泥の見かけの粘度が減少し、流動し易くなる。図-12は流れのない場合について底泥の相当粘度($\bar{\mu}_s$)と底泥波高が波高や底泥の含水比にともなってどのように変化するかを調べたものである。計算の条件は実験条件に準じて $T = 1.05\text{s}$ 、 $h_1 = 30\text{cm}$ 、 $h_2 = 20\text{cm}$ であり、 $x = 2\text{m}$ での計算値である。また相当粘度は底泥層を3分割した時の表面に最も近い部分についての値である。なお均質底泥の場合深部ほど相当粘度は小さくなる傾向がある。計算結果より次のようなことがわかる。波高がある程度以下になると底泥運動は微小となり、それにともない相当粘度は急激に大きくなる。さらに波高が小さくなると底泥運動は生じなくなる。底泥の移動実験で流れなしの場合、波高が3.9cm(Run41)の時には全体的な底泥運動をとまなう流動が見られたのに対し波高が3.5cm(Run43)の時には底泥運動が小さく、斜面の掘削部へのせり出しによる底泥移動が主として観察されており、両者の間には底泥移動形態に大きな違いがみられた。図-12で含水比180%について見てみると波高が4cm以下になると相当粘度が急に大きくなり底泥運動がかなり小さくなることが示されており、実験結果の移動形態の遷移をよく説明できる。

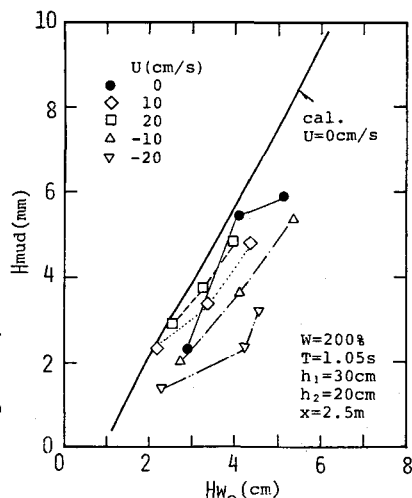


図-10 波高と底泥波高の関係

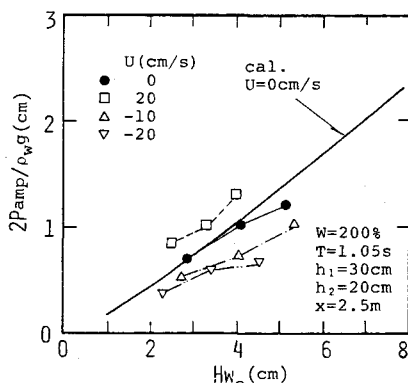


図-11 波高と底泥内圧力の関係

図-13、14はx方向に底泥の厚さが変化する底泥移動実験の際の初期底泥床に対し、波作用時の底泥内の相当粘度の空間分布を計算したものである。粘性流体多層モデルは各層が水平で、水平方向に粘性や密度が変化しないことを前提としている。しかし波高の減衰にともないx方向に相当粘度が変化するため、実際には底泥の物性がほぼ均一と考えられる程度の短区間ごとに分けて逐次計算する方が合理的である。しかもこの場合には底泥厚さも変化するため各 Δx 区間ごとに水深、底泥厚さを与えて逐次計算をしている。図-13 (Run36) は全体流動の生じたケースであり図-14 (Run43) は主として掘削部斜面が部分的に移動したケースである。Run36では全体的に相当粘度は小さく、掘削部においても $40 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 程度である。これに対しRun43では波高が小さいこと、掘削部が深いこともあり、掘削部では $50\sim 90 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ と相当粘度は大きくなっており、底泥運動が小さかったことがわかる。

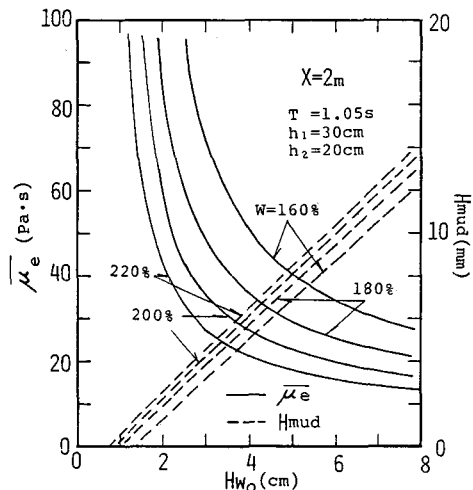


図-12 相当粘度と底泥波高の波高による変化

4. まとめ

波による底泥の移動形態として、次のようなものが観察された。

- ①底泥層全体が波動運動し、流動しやすくなった底泥が斜面での重力や圧力勾配で移動するもの
- ②掘削部の端の斜面付近の局所的な波動運動により底泥が少しずつ掘削部へ移動するもの
- ③波による波動運動により表面付近の底泥の含水比が増大し、濃度の高い浮泥層が形成され、それが斜面に沿って掘削部へ流れ込むもの
- ④波により底泥粒子が巻き上げられ、流れや水の質量輸送で運ばれるもの

底泥強度に対し、波動量が大きいほど④から①へ遷移し、底泥移動量が急激に大きくなることがわかった。この研究で得られた知見は実験室内での現象についてであるが、今後実海域での底泥移動の実態についても検討していきたいと考えている。

謝辞：最後に本研究を行うにあたり、港湾技術研究所の前海洋水理部長田中則男博士をはじめ、入江功海洋水理部長及び港湾技術研究所のシルテーション研究メンバーからは終始温かい御援助と御指導を受けたことを付記し、感謝致します。

【参考文献】

- 1) 大坪国順(1982): 国立公害研報告, No.42. 2) 五明美智男ほか(1986): 33回海講論文集, pp.322-326.
- 3) 柴山知也ほか(1987): 34回海講論文集, pp.271-275. 4) 中野晋ほか(1987): 港研報告, No.26-2, pp.171-212
- 5) Dalrymple & Liu(1978): J.Phys.Oceanogr., Vol.8, pp.1121-1131

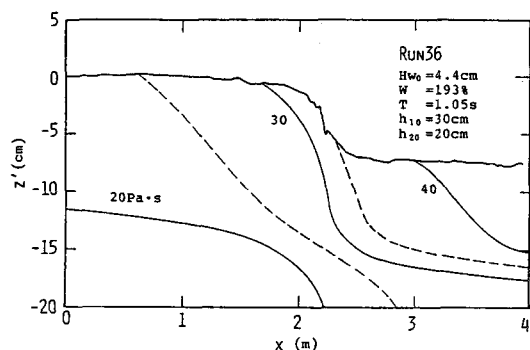


図-13 相当粘度の空間分布 (Run36)

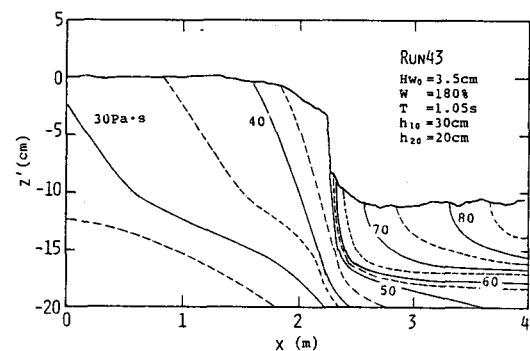


図-14 相当粘度の空間分布 (Run43)