

二眉流中の実験の手法と計測法

稲田, 勝
九州大学応用力学研究所技術室

<https://hdl.handle.net/2324/1958403>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート. 5, pp.55-63, 2004-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

二層流中の実験の手法と計測法

九州大学応用力学研究所技術室 稲田 勝

1. はじめに

今回、応用力学研究所界面動力学分野では、二層流中での浮体の強制動揺実験を初めて実施した。この実験の目的は、密度の異なる流体が層をなしている時、浮体に働く流体力および動揺特性にどのような影響があるのかを実験的に観察し、数値計算との比較を通して、現象をよく理解することである。この研究の背景としては、例えば、河口付近での河川水と海水が混じる場合、湖や北欧フィヨルドなどのように表面付近の水温・密度が極端に違う場合、あるいはヘドロなどの柔らかい液状物質が比較的水深の浅い所に存在する場合などに、浮体の動揺特性や発生する波のパターンが単層の時と異なることが知られているからである。

実験は海洋工学実験棟に設置されている「界面動力学実験水槽」(幅：0.3m、深さ：0.5m、長さ：10m、アクリル製)を使用した。この水槽に密度の違う二つの流体を入れると、密度の違いから上層と下層に分かれた二層流が構成される。この二層流の中で二次元物体を上下方向に強制動揺させて、物体に作用する力や発生する波の計測を行なった。

このレポートは二層流を構成する流体の検討や実験手法という柱、実験によって発生する波の計測法という柱の二つで構成する。

2. 二層流を構成する流体の選定

水槽に二層流を構成する流体の選定にあたって特に次の点を考慮した。第1に人体や環境への負荷が小さいこと。第2に有害物質や消防法等の規制の対象から外れていること。第3に両液体はかき混ぜても交じり合わないこと。第4に両液体の粘性が大きく変わらないこと。第5にコストが極端に高くないこと。

その結果、一方をコストのかからない「水」に決定し、もう一方の流体については上記の点に考慮しつつ、種々検討しテストを重ねた結果「アイソゾール 300」というオイルに決定した。このアイソゾールは環境に対する負荷が小さい製品として開発されたもので、一般には洗浄液等として利用されている。またその種類はアイソゾール 200、300、400 の3種類があるが、これに選定した理由は下記のとおりである。

- ⑥ 非水溶性であり、強制動揺試験による水への溶け込みがない。
- ⑦ 発ガン性物質等の毒性はなく、この方面の安全性は高いと考えられる。
- ⑧ 引火点が灯油と同程度であり、火気に対する配慮を行なえば安全は十分確保できる。
- ⑨ 常温による蒸発がほとんど見られない。
- ⑩ 危険物分類では第2石油類に入るが、実験での使用量は最大 600 リットル(ドラム缶 3本)程度であり、消防法指定数量(1000 リットル)外となり届け出の必要はない。

つぎに各アイソゾールのデータを、比較のために灯油のデータと合わせて表1に示す。このデータからではアイソゾール 400の方がより安全であるが、粘性が水と比べて大きく、二層流を構成した場合その差が大きすぎる。またアイソゾール 200はガソリンと同程度と考えられるので安全性に問題があり、結果としてアイソゾール 300に落ち着いた。コストの面ではドラム缶 1本あたり 5万円程度と妥当な額と考えられる。

項目	単位	アイソゾール 200	アイソゾール 300	アイソゾール 400	灯油
外観		無色透明	無色透明	無色透明	無色透明
密度	g/m	0.717	0.769	0.791	0.795
引火点	°C	常温以下	52	83	40
粘度	CP	0.6(40°C)	1.2(40°C)	2.4(40°C)	
危険物分類		第4類第1石油類	第4類第2石油類	第4類第3石油類	第4類第2石油類
毒性		対象外	対象外	対象外	

表 1. アイソゾール&灯油のデータシート

3. 実験の概要

図 1 に実験状態図を示す。このように密度の違いから下層側が水、上層側がアイソゾールという構成になるが、両方とも無色・透明であり、そのままでは境界層をはっきり見分けることができない。そこでトイレ洗浄液として市販されている「ブルーレット」を水に加えて青色に着色した。この「ブルーレット」は水槽を構成しているアクリル板や、アイソゾールには着色することなく、境界面を見るのに良好な結果を得た。

図中の二次元模型を矢印方向に強制動揺させると、アイソゾールの表面では当然波が発生する。この波を計測する波高計を「自由表面用波高計」と呼ぶ。一方アイソゾールと水との境界面でも波が発生する。この波を計測する波高計を「内部界面用波高計」と呼ぶ。

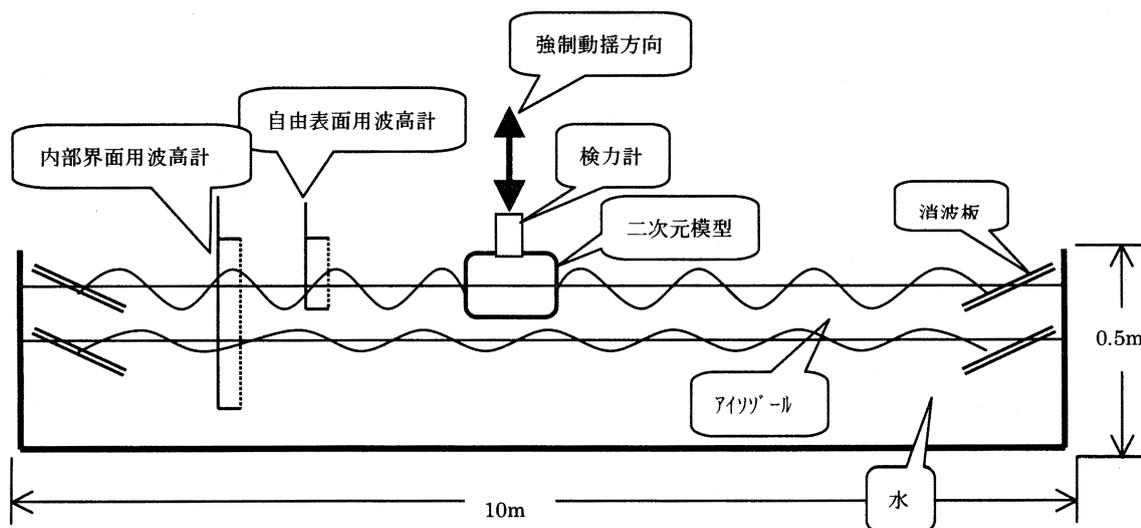


図 1 実験状態図

つぎに模型を上下方向に強制動揺させると、発生した波は水槽の端にあたり反射波が生じ実験結果に悪影響となる。この影響を小さくするために水槽の両端に消波板を置く。本来この水槽はこうした反射波を吸収する装置（吸収式造波装置）が付いている。ところがこの反射波を

検出するセンサーは水のみにはしか反応しないため、今回のオイルを使用する実験では機能しない。そこで新たにビーチ式消波装置を作製した。図1で表している消波装置は紙面の関係で正確に表現されていないので、図2でその詳細を説明する。図2は作製した消波装置の断面図であるが、通常の消波を行なう場合は消波板 A タイプ、もしくは消波板 B タイプのどちらか一方でよい。しかし今回の実験で発生する波は、上下に分かれて二つ存在するために、自由表面波用に消波板 B1、内部界面波用に消波板 B2、そしてこれらの消波板を透過した波の消波のために消波板 A を設けた。なお実験パラメータでは内部界面のレベルが変化するために消波板 B2 の位置を可変できるようにした。図3はこれら消波板を水槽に設置した時の写真であり、図4は二次元物体を長周期（約2秒）で強制動揺させたときに、自由表面ではほとんど波が起こらず、内部界面だけで波が発生している様子である。

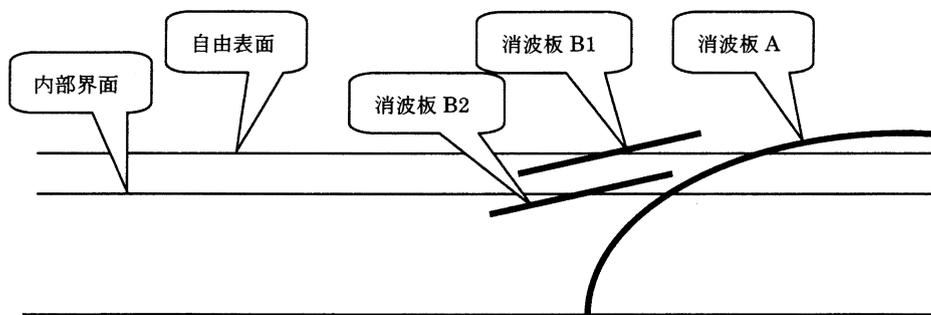


図2 消波装置の断面図

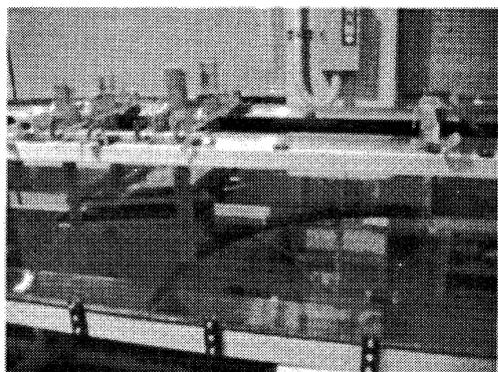


図3 消波装置全景

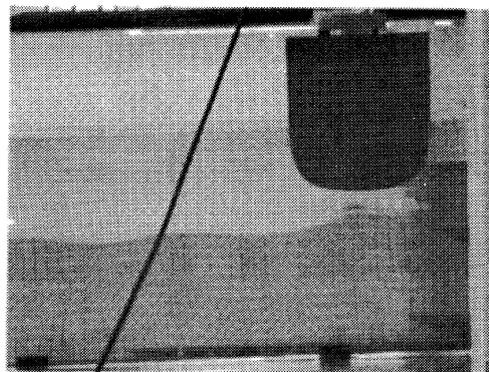


図4 実験風景

4. 計測項目とその問題点

この実験で計測する項目は大きく分けて二つある。一つは二次元模型を強制動揺させた時に生じる上下方向の「力」の計測である。これには分力計という測器を用いることで容易に計測できる。もう一つは「波」の計測である。前述したように、波にはアイソゾールの表面で起こ

る自由表面波と、アイソゾールと水との境界面で起こる内部界面波の二つが生じる。当研究室ではこれまで波の計測には「容量式波高計」（原理等は「技術レポート Vol.1」を参照。）を使用してきたが、今回の実験も可能ならばこの波高計を使用したい。「可能ならば」ということは一般に市販されている容量式波高計は、水または海水を対象にしたものであり、アイソゾール等のオイルを対象にしたものではない。（容量式波高計以外でもオイルを対象にした波高計は私の知る限り市販されていない。もっとも鏡面的なレベル計測を目的にした水位計ではその限りではない。）一方、内部界面波を計測する波高計に用いるとして、容量式波高計が通常大気中の水面（または海面）変化を計測する、つまり「水（または海水）と空気」という関係に対して、「水とオイル」という関係になった場合、オイルが波高計のセンサーにどのように影響するのか不明である。このようにどちらの波高計もこれまで経験したことのない対象物なので、計測が可能かどうかわからないということである。

これらの問題点に対して次の性能試験を各波高計について行った。①時間の経過とともに起こるドリフト量つまり安定性試験、②波高の大きさと出力信号の大きさの関係である直線性試験、③高い周波数（短い周期）をどの程度まで減衰することなく計れるかという周波数特性試験の3点を行なった。もしこれらの試験に良好な結果が得られれば波高計として使用できると判断できる。以下、それぞれの波高計について説明する。

5. 自由表面波用波高計

オイルの波を計測しようとするのは初めての経験である。これまで使用してきた容量式波高計システムを使い、センサーを図5のようにアイソゾールの中にセットした。まず電源を入れて出力電圧のゼロ調整を行ったが、調整器の範囲内で調節できることが確認できた。つぎにセンサーを上下方向に移動したが出力電圧の変化は零に等しかった。しかし微かな反応がうかがえたので信号を直流増幅器で増幅してみた。しかし倍率を極端に上げればそれらしい現象が確認できるが、同時にドリフトやノイズの量も増幅されるので、単純に増幅しただけではデータにはならないことが判明した。残された方法としてセンサーの改良である。

従来のセンサーは図5のように治具に付いているセンサーは1本である。これに代わって図6のように1本のセンサーを上から下へ、下から上へと4回まわして張った。こうすることで4本のセンサーで同時計測している状態と考えられる。この方式はあくまでも二次元的な波が、図の手前から奥（またはその逆）に進行する時、同じ高さの波を同時に4本のセンサーで計測していると仮定したものである。図7はこのセンサーの写真である。

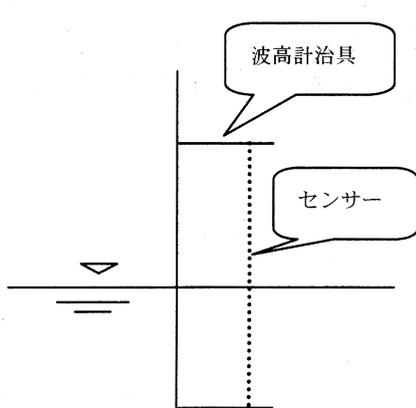


図5 従来のセンサー

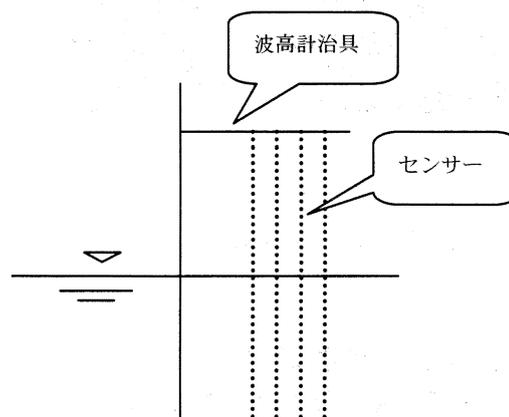


図6 改良型のセンサー

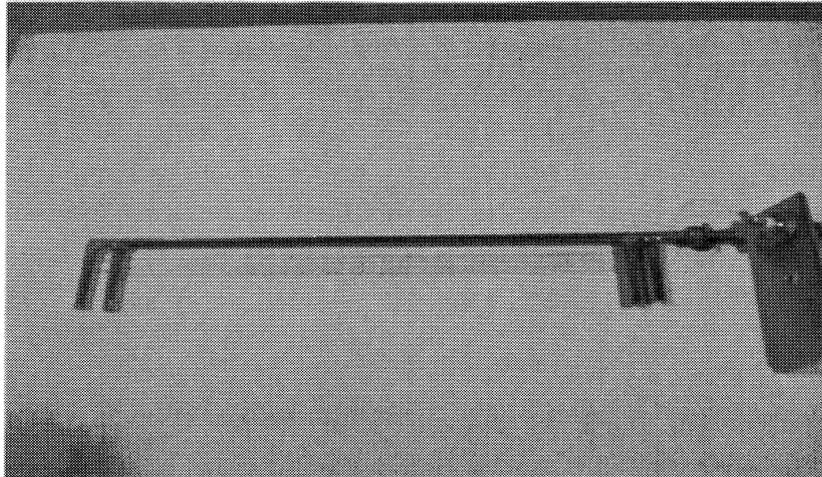


図 7 自由表面波用波高計センサー

6. 内部界面用波高計

内部界面用波高計の目的は、自由表面波の影響を受けずに、内部界面である水とアイソゾールが接する液面変化だけを計測することである。上記「自由表面波用波高計」の項で述べているように、従来の容量式波高計センサーはアイソゾールの液面変化に対する反応はほとんど無い。今度はこれを逆に利用する考え方である。それはアイソゾールの液面変化があっても波高計アンプの出力電圧に対して無視できる程度であればよいということである。では具体的にどの程度影響するのであろうか。その検証のために行なった実験は、容器に水とアイソゾールの二層流を作り、その中に従来の波高計センサーを取り付ける。次にその容器の中にアイソゾールだけを注ぎ足し、アイソゾールの層の変化に対する波高計の出力レベルの変化を見る。その結果アイソゾールの層を 50mm 増した時の波高計の出力変化は 0.6mm であり、約 1.2%の誤差が生じるということが判明した。この程度であれば誤差の許容範囲内と考えられるので、この問題は解決できると判断した。

次にこのセンサーにはもう一つの問題がある。それはセンサーが内部界面の液面変化に伴い水とアイソゾールの交互に触れることで、もしアイソゾールがセンサーに付着したままでは正確な波高は計測できない。この問題を検証するには前述した周波数応答特性試験を行ない、その結果で判断する。

7. 各センサーの性能試験について

自由表面用波高計や内部界面用波高計が、波高計に成り得るかどうかを確認するための性能試験について具体的な方法を述べる。

①安定性試験

波高計アンプの電源を投入して、計測器が十分温まった後に約 1 時間程度出力信号をモニタレコーダで記録し、出力変化を液面変化に換算してグラフに表した。

②直線性試験

自由表面用波高計センサーはアイソゾールの中、内部界面用波高計センサーは二層流の中に設置し、トラバース装置を使ってセンサーを上下方向に移動し、その移動量と波高計アンプの出力電圧をグラフで表す。

③周波数応答特性試験

各波高計センサーを強制動揺装置に設置し、上下方向に動揺させたときの波高計出力信号を記録する。このとき動揺させる振幅を一定とし、周期だけを変化させる。そして長い周期の時の出力電圧を 100%とし、各周期の出力電圧がどの程度減衰するかをグラフで表す。またセンサーを動揺させる強制動揺装置自身が、指令値どおりに動揺していることを確認するために、強制動揺振幅値のデータも同時に記録し、指令値に対する減衰率をグラフに表した。なおこの強制動揺装置は性能上 3Hz 以上動揺させることはできない。

以上これらの試験結果については、自由表面波用波高計センサーは図 9～図 11 で示し、内部界面用波高計センサーは図 12～図 14 で示す。

8. 評価

自由表面波用波高計は、センサーの改造と信号増幅（直流アンプ+波高計アンプ内臓ゲイン調整で約 80 倍に増幅）を行なった。その結果、安定性には若干問題は残るが、実際の計測記録時間が一回の実験あたり数十秒であることを考えると、その間の安定性には支障はない。

一方内部界面用波高計は、図 14 の周波数応答試験の結果等から、当研究室が従来使用してきた容量式波高計センサーを用いても、アイソゾールの影響をほとんど受けることなく内部界面の波だけを計測できると考えられる。

以上、今回の二層流実験では自由表面波計測も内部界面波計測も可能であると判断できる。

9. 計測フロチャート

計測全体のフロチャートを図 8 に示す。図中の「強制動揺振幅値検出ポテンシオメータ」は動揺させる治具の位置検出用のものである。また分力計の出力信号にはローパスフィルタが必要なため、位相を合わせる目的で、すべてのチャンネルにローパスフィルタを同じ値のカットオフ周波数で挿入している。

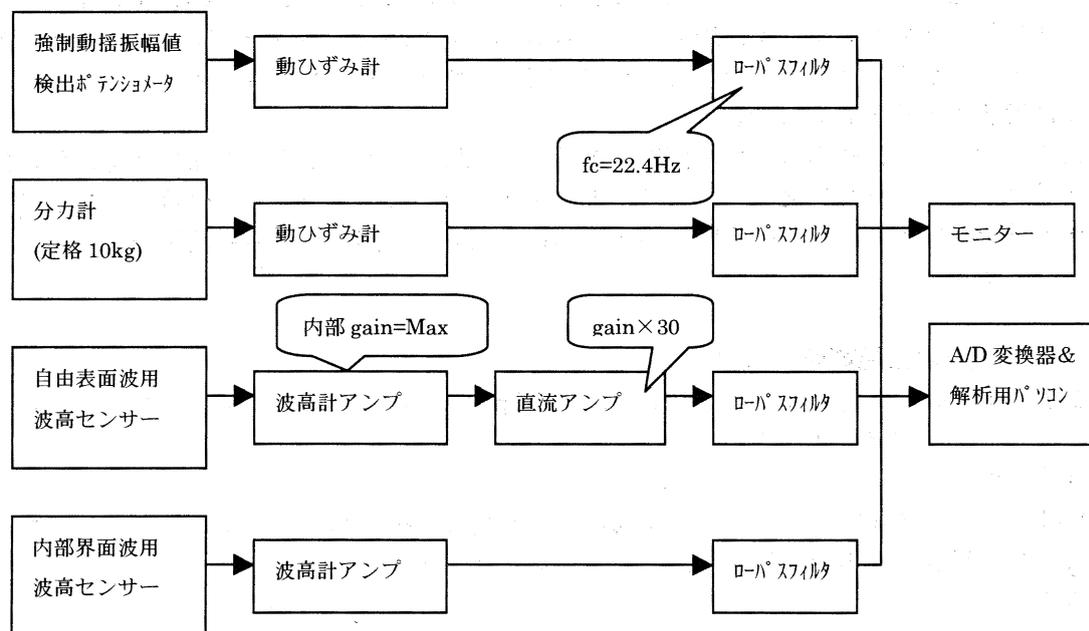


図 8 計測システム

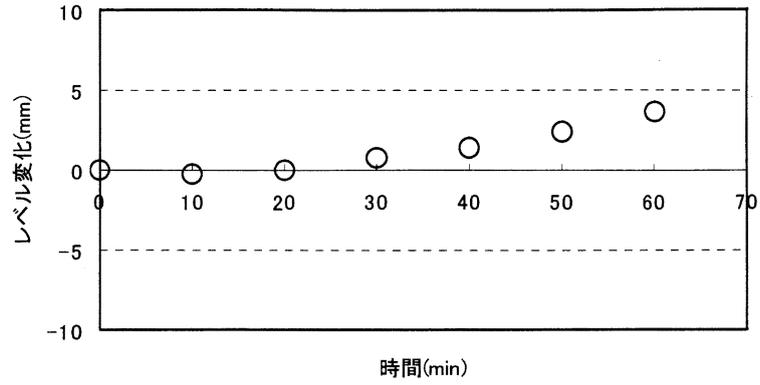


図 9 自由表面波用センサーの安定性

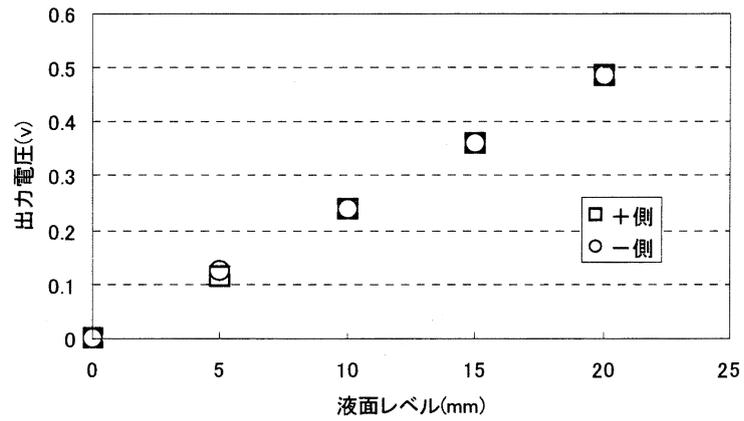


図 10 自由表面波用センサーの直線性

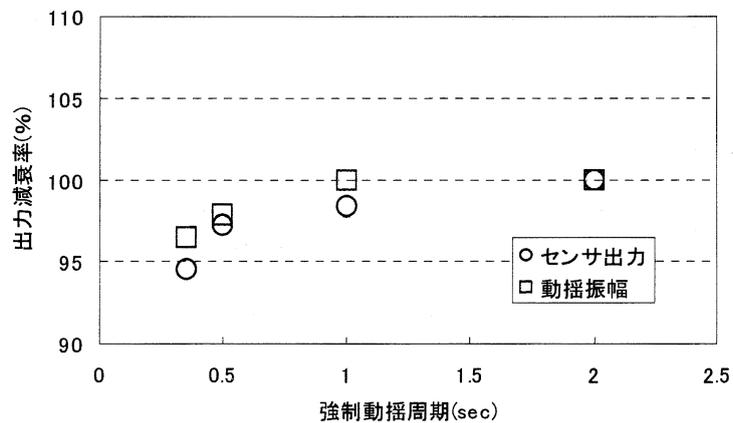


図 11 自由表面波用センサーの周波数応答特性

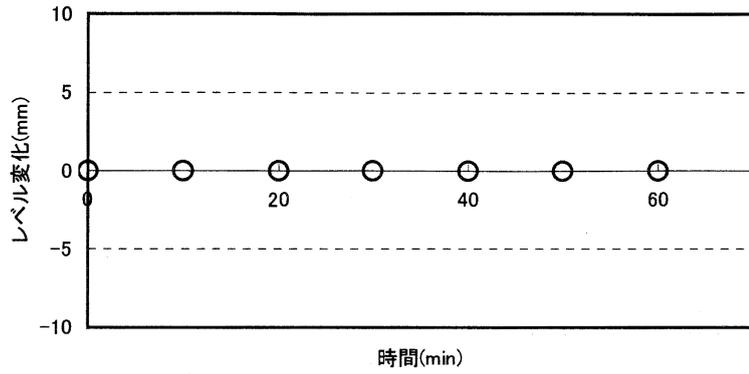


図 12 内部界面用センサーの安定性

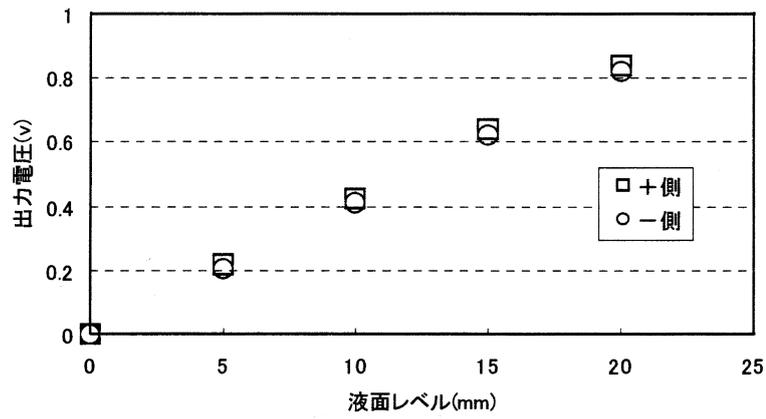


図 13 内部界面用センサーの直線性

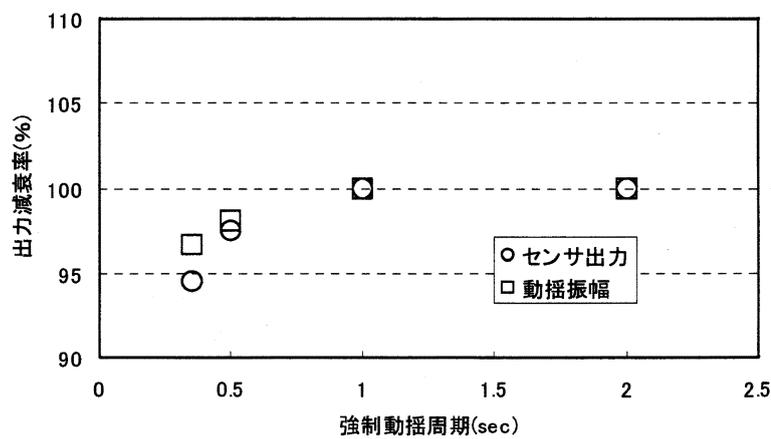


図 14 内部界面用センサーの周波数応答特性

10. アイソゾールの回収法

実験が終了すれば水槽本体からアイソゾールだけを回収しなければならない。アイソゾールが規制された物質ではないとはいえ相手はオイルである。100%回収を目指して図15のような回収法を考案した。まず水槽本体のボトムに設けられた排水バルブを開き、大方の水を污水溝へ流す。次に大方のアイソゾールをエアポンプによってドラム缶へ回収する。これらの方法で処理できない部分を図15のように排水バルブから一旦バケツで回収し、それを円柱アクリル製の回収装置（直径33cm、深さ100cm）に移す。そして時間が経過するとともに水とアイソゾールが分離するので、分離した後にコックAからアイソゾールを回収する。もし水のレベルがコックAより上になれば、コックBより水を排出する。この作業を繰り返すことでアイソゾールを目標に近い回収が出来た。

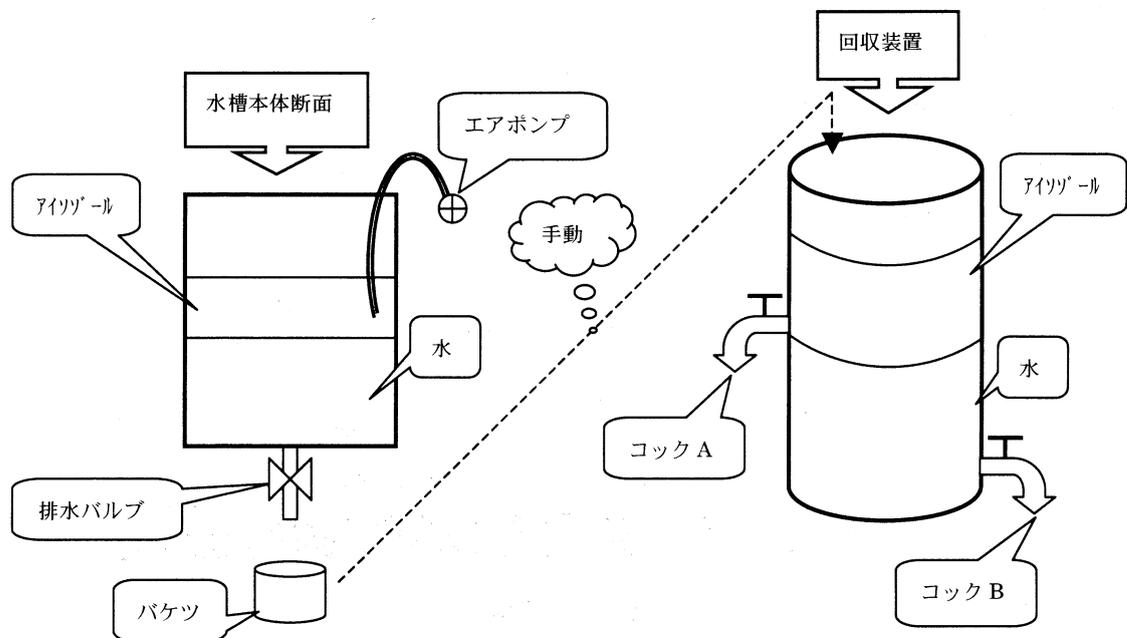


図15 アイソゾールの回収法

11. まとめ

今回の実験は初めての経験が多く、新たな問題点や改良すべき点がいくつか出てきた。しかし新しいテーマの実験としてはまずまずの内容になった。特にアイソゾールの存在を知り得たこと。またこのオイルの波を完全ではないが計測できるようになったことは大きな収穫である。

次回のレポートで内部界面用波高計の詳細な報告を行なう予定である。

謝 辞

二層流を構成する流体を選定するのに、当初はまったくの手探り状態であった。しかし静岡県清水市にある東海大学博物館に赴き、砂原俊之助教授ならびに佐藤猛学芸員の両氏からアイソゾールをはじめいくつかの流体について、その存在を知り得たことで大きく道が開けた。またブルーレットで水を着色する時の裏技など貴重なアドバイスも頂いた。一方、原稿作成するにあたっては同分野の柏木教授のご指導を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。