# 土木学会水理委員会密度流研究小委員会活動報告

小委員会委員長　　岩　崎　敏　夫

土木学会水理委員会では研究上問題とされている課題をとり上げて組織的な調査を試みることとなり，昭和46年度より発足した。本年度は「密度流研究小委員会」が設けられ現在作業中なのでその状況についてここに報告する。

この小委員会は昭和47年２月17日に準備会が持たれ，以後今日まで合同委員会，主査会議，分科会などを数次にわたって開催し，また昨年11月15日に「成層密度流の界面現象に関するシンポジウム」を開催し，参加者76名を得て盛会であった。

Dewey の分類によれば密度流は，１．波，安定　２．ジェット・プリューム　３．乱れ，拡散混合　４．地下水密度流　に大別されている。今日，混合，分散，拡散の重要性は否むべくもないが，調査期間が１年に限られていることと，まず手初めということもあり，今回はこれを除外して成層流界面現象に話題を限定し，つぎの４分科会を設けた。

第１分科会　界面安定・不安定　岩佐義朗（主査・京大）・椎見博美（東工大）・玉井信行（東大）板倉忠興（北大）

第２分科会　界面抵抗　岩崎敏夫（主査・東北大）・粟谷陽一（九大）・金子安雄（港研）・須賀堯三（土研）・阿部至雄（東北工大）

第３分科会　界面形状　室田　明（主査・阪大）・柏村正和（北大）・南　勲（京大）・和田　明（電研）

第４分科会　地下水密度流　嶋　祐之（主査・埼玉大）・上田年比古（九大）・崎山正常（九州産業大）

つぎに各分科会ごとに報告する。

**第１分科会**は，成層密度流界面の安定・不安定問題を課題とするが力点を数学的手法におくとともに，水理学的側面からの検討を加えて，現象とその解析の手法との関連を明らかにすることを目標としている。数学的側面においては数字モデルの特性および解法に分類され，水理学的側面においてはモデリングの前提および実験に分類され，これらの組合せによって，表－１に示すように四

表　－　1

| | | 数学的側面 | |
|---|---|---|---|
| | | 数学的モデルの特性 | 解　　法 |
| 水理学的側面 | モデリングの前提 | | |
| | 実験 | | |

つの場合ができるので，まず既往の研究を分類し問題点を抽出することとしている。勿論研究によってはこの4分類で意味づけられないものもある。

各項目についてさらにつぎのような細目が考えられる。

- 数学モデルの特性
  - 考察する流体の特性
    - 非粘性・粘性流れ，非混合・可混合流体，粘性係数の比率
  - 境界条件
    - 速度分布，密度分布，二次元・三次元問題
- 解　法
  - 線形理論
  - 初期値問題としての手法

従来の理論は非粘性，混合しうる流体，二次元問題，線形理論としての取扱いが大部分である。互いに混じらない相接する流体の粘性係数の比が問題となるのは，採油工学で現われるフィンガリングの現象がある。

実験については，現地観測結果を整理することが望ましいが，判定の精度を考慮すると未だ問題点があり，実験条件の明瞭な実験室内の測定結果に焦点を絞り取りまとめる予定である。

安定問題は理想化された状態で議論されてきたが，工学的な要請から提起されてきた問題は混合現象そのものと考えられる。従って安定論との関係で混合の開始までを含めて考察することが必要であり，従って内部波の変位特性（スペクトル形，波高分布），混合の開始に至るまでのクーリガン数，リチャードソン数等の果たす役割について，理論とともに実験的事実が蓄積されつつある成果を，この問題にとり入れて考えてゆく必要があるものといえる。

**第2分科会**の課題である界面抵抗については，従来実験値が散乱しているので，その理由とか今後の研究の方向を考えることが目標である。

まず界面抵抗は界面現象と密接に関連しているという立場より界面を層流状態，内部波の発生と発達の各段階，および拡散，混合を行なっている状態に大別し，上述の理由で前2者に問題を絞った。

層流状態の場合の抵抗係数はレイノルズ数に逆比例するというのがほぼ一致した見解であるが，運動方程式が上層あるいは下層にわたる平均量を取扱っている場合，境界面における剪断抵抗をいかに正しく評価するかという問題の外に，慣性力，圧力勾配，剪断力などの水深方向の分布が平均量に対していかなる影響を持つかという問題があり，従ってジェット・プリュームなどであれば形成領域と発達領域の区別，流れであれば境界層発達の程度を正しく評価する必要がある。上層の厚さが薄いと外部表面波や風の影響を受け易く，また動粘性係数 $\nu_1$，$\nu_2$ の差が小さい場合は内部波を発生し易い。このようなときにはレイノルズ数のみでなく内部フルード数の考慮が必要になってくる。

内部波のエネルギー減衰には粘性損失が評価され，その発達には主流よりのエネルギーの供給が考えられている。しかし主流そのものの剪断抵抗の界面の値，界面附近の境界層発達の機構など関与する要素は多く，極めて複雑である。

つぎに周知の界面抵抗係数と $\Psi=(F_i')^2\cdot R_i$ との関係に関し，データ散乱の原因を検討し，従

来の実験，実測値の再検討を行なっている。主な要因をあげると，

1） 実験水路に関するもの…… Dimension， 導入部分の流れ，主流の流速分布，2次流，脈流水路内セイシュ

2） 境界面の定義に関するもの……密度の変曲点，目視可能の判別面，着色濃度急変面，流速±0の面等

3） 現地観測に関するもの……速度，密度分布の測定誤差，実河川の地形等

4） 局所的抵抗係数と平均的抵抗係数の差等

**第3分科会**の課題はかなり広範囲のため，気象学，海洋学に関連する問題を除外し，課題を水理学に限定してつぎのように分類した。

(1) 漸変する成層密度流の界面形状（塩水くさび，河口流出を含む）

河道をprismatic，界面を塩水楔全長にわたって一定，界面からの混入を考えない等，条件を単純化した場合の解は，ほとんど問題点はないけれども，実際河川の塩水楔の場合にはたとえば河床にかなり顕著な凸部があると界面はその上でもり上り，限界を超えると界面凸部の頂から混合が始まるし，あるいはリチャードソン数が限界以上であれば流下する混合層は衰退して再び明確な成層界面状態に復帰するし，また，変曲部においては界面は静水圧平衡で予想されるような横断形状になるが，流速が凸岸側において最大値を与える等，予想外の現象がしばしば現われることが指摘された。

従って，本課題については塩水楔の形態論的研究に主体をおき，数学モデルの適用限界を明らかにする方向の整理を進めている。

(2) 急変する成層密度流の界面形状（内部ジャンプ，内部段波，断面急変部の界面形状）及び非定常密度流

この場合も前項同様第一近似としては（有効重力の概念を用いさえすれば）開水路流れの類推が可能である。ただし急変流であるので界面混合の効果が卓越する。従って混合を考慮した形状特性について集中的に研究を推進している。

(3) 温度密度流（ジェット・プリューム，躍層の形成，選択取水の水理）

ジェット・プリュームにおいては水束内部の細部機構（たとえば横断方向流速分布など）については精緻な議論は必要とされず，むしろ水束拡散のパターンといった巨視的かつ可視的な認識が問題となっている。この場合拡散水束の通常の定義による境界から連行される連行量の評価が重要であるにかかわらず，実験的に種々提案されている連行係数・$\alpha$についてそのオーダーさえ異るような現段階ではまだ実用的な式は得られていないと考えられる。そこで境界における連行現象を大規模乱れ（ macro-turbulence）と関連させつつ，研究成果の整理を進めつつある。

選択取水については，たとえば側方取水の選択取水の可能性等の話題があり，これらの水理的基礎に限定して，研究成果の蒐集をはかりつつある。

**第4分科会**は地下に生ずる密度流現象のうち，主として成層密度流を対象とし，従来までに得られた基礎理論や解析手法の整理検討をまづ行なった。またそれと併行して近年特に土木工学上重要視されて来た諸問題，すなわち河口湖の開発や海岸地下水による塩害防止等の応用的諸問題に焦点

を合わせ，それらの設計上に役立つ実用諸公式の比較検討や新らしい解析手法の提示等を試みた。つぎに個々の問題について述べる。

(1) 研究対象　淡塩密度流は地下密度流のごく一部分に過ぎず他に熱対流，不飽和浸透流，油層内の流れ，化学反応槽内の流れ等がある。これらについてその基礎概念や解析手法についての先導的な研究が「多孔媒質中の流れ」のテーマで国際シンポジウム（Haifa，Calgary，Guelph）で活潑に討議されているので，これらの知見を取入れて行くことが今後の課題となろう。

(2) 準一様流的解析手法　地下密度流の基礎方程式から具体的な境界条件，初期条件を満足する厳密解が導びかれる場合は極めて稀である。方程式の非線型性，従属変数の増加，境界面条件の複雑さ等が解の誘導を困難にしている。そこで鉛直流速を水平流速に比し無視する準一様流的な解析手法が良く用いられ，塩水楔の性状，鉛直流速効果の補正，定常二層流や選択取水，降雨による塩水楔の遮断効果等の具体的問題を解く有力な手段となった。一方，非定常現象では，逆転流や塩水楔の侵入過程等のうちごく簡単な場合が取扱われ得るに過ぎないけれども，この手法による更に広汎な応用が期待される。

(3) 二次元定常流　定常流で鉛直流速を無視し得ない場合には，ホドグラフ法やZhukovsky関数の応用など複素関数を用いる手法が有効である。これによって海岸地下水の特性や河口湖開発上の問題として注入溝や暗渠による海水遮断，淡塩境界面の低下等，いくつかの重要な問題が解析されている。ただ問題点として自由表面，浸出面，内部境界面の設定が複雑なことの為に解析解が実際に導かれる為には多くの制約が存在し，たとえば，一方の流体が静止していなければならず，これは実用上問題である。

(4) 新らしい解析手法その他　二次元定常流の解析上の制約から解放するひとつの試みとして，物理面を規定する$x$および$y$を，複素ポテンシャルを規定する$\varphi$および$\Psi$の関数として解く方法が提示された。この手法では電算機の利用によって最終的な解をうることとなる。

電子計算機の利用によってRelaxation法やF．E．M．法を用いた解法が逐次進められ単純な自由表面を持つ地下水の流れに対し非定常現象も精度良く解くことが可能となった。やがて，地下密度流の非定常現象までも解かれることは日時の問題と考えられる現在，これに比較して，地下水の流れる媒質そのものの性状，すなわち透水機構や，粒子構成上必然的に生ずる境界面の不安定性流体分子の分散，吸着あるいは不飽和時の特性や熱力学的平衡条件などが不明確なまま残されているのが現状における問題点である。従って今後媒質の物理的特性や，現場における実際現象の究明に多くの努力が払われねばならない。

以上各分科会ごとに討議の内容と今後の問題点を述べた。今後これらをもとにした報文をまとめることになっているが，多くの方々の御意見，御叱正を戴だければ幸いである。

なお，原稿をまとめるにあたって小委員会の委員諸氏に多くのご助言を得た，ここに謝意を表したい。また，文中瑕瑾あればすべて本委員の責であることを記しておきたい。