

的連続体力学, などの手法の移入が考えられていると思われる。この方面の進歩は必ずしも実用的にどうという事もないし, 場合によっては, 土というものが複雑きわまるものであるゆえに, 危険でもあるが研究者にとっては魅力的な課題である。これらは原理的なものであるからして, 急にそれらのものが実際問題にはっきりはね返ってくるということはいいと思う。ただ, われわれとしては永遠に問題としなければならないという問題,

そういうものを何人が研究する, はっきりと取組んでいる, そうしてその精進によって, 将来土質関係方面にまとめてみようという努力がなされているということを御披露しておきたいと思うわけである。従ってわれわれの方面は, 非常に手前味噌になるようであるが, とにかく健全に発達しているように結論づけてもいいのではないかと思う。

最近の水理学

田 中 清

最近水理学の分野も変わってきており, 中年以上の方々にはあるいはなじみが薄くなったのか, その研究は若い方々の活躍が目立つようになった。ここに新しい水理学のあり方について主観を述べてみたい。

水理学の基底をなす流体力学をみると, この大戦前に粘性流体力学, ことに乱流論にいちじるしい発展をみせていたが, 戦争直前から戦争中にかけてやや行詰りとなり, 第二次大戦後はジェット・ロケット等航空機の変化にともない流体力学の主流は空気力学・高速流体力学に移り, われわれの応用水理学とはやや離れて行きつつある。そのころから流体力学は横に拡がり, まず気象学に入り, 気象学の流体力学的取扱いがさかんになり高度方程式等が導かれるようになった。これを追うようにして水理学の分野にも, 流体力学の成果が取り入れられるようになり, 古典水理学の衣がえの時期がきた。気象学の方ではジェット・ストリーム等により上層気象が問題になり, さらに広い気象の場をエレクトロニクスを使って計算機によって数値解析して行く傾向にあるようである。水理学もまた後を追ってエレクトロニクスや計算機による数値解析の手段に突入することは必須であろうが, それに走り過ぎてことの本質を見失なうことのないように留意せねばならない。

水理学の分野では Bernoulli の定理一本槍の古典水理学から, 素朴な乱流論にもとづく Boussinesq 方程式を解く方向に移り, Forchheimer 一物部流の古典水理学が完成され, それがごく最近まで続いていた。この方法によって解けるような問題は一通り解きつくした感があり, 残された問題は, きわめてむずかしいか, またはこのような方法では解決できない問題であり, そこからは新しい発展はあまり期待できない。しかし日常の応用面では古典的水理学だけでも用が足り, それ以上のものは公認されていないものや試案の域を脱しないものが多い。

物部流水理学の中にも再検討を要するものがあり, それに固執すべき時期ではなく, 実用面でも新しい成果をどんどん取り上げるべきであろう。とくに主導の立場にある官庁などが, 新しい成果を用いて設計しても物部水理学教科書に出ていないという理由で許可にならないことがあるのは困ったものであり, 若い人の研究意欲をそぐことにもなるのでご協力をお願いしたい。

古典水理学の範囲に残された問題として, 時間の関係する非定常の流れがある。流れが時間的に変動する問題を分けてみると, Long wave すなわち長波形式のもの, Surge 形式のものとは洪水波形式のものがあり, 流れ自体が波動体系・振動体系をなすもの, 感潮河川問題のように境界条件が時間変動をする過渡現象的なものがある。外国でも Transient (遷移) 問題として取り上げられている。これら不定流を水理変動が小さいと仮定して線型に直し解く微小変動法で解決できるものは一応解いてしまい, 水理変動の大きな有限変動の非線型問題だけが残されている。この問題を Boussinesq 方程式で解こうとすると, どの道を通っても結局 Massau の方程式 (1889 年) の壁に突き当たる。不定流問題の今後の出発点は Massau の方程式にあるが, これは積分可能条件を満足しておらず数学的困難があり, まわり道を考えねばならない。そういうことを無視して不定流問題を解析的に取り扱っておられる方もあるが, この大きな壁のあることを考えて頂きたい。しかし実用面では非定常問題も多くいろいろな近似解法が試みられ, Transient の問題として, タービン系やポンプ系の Water hammer の問題, Surge tank の問題, Speed regulator や Governor の問題また開水路 Surge, Lock 閘門の問題, Tidal harmonics 河口潮汐・潮汐湖上の問題等が取り扱われ, また今後の問題としても残されている。

流体力学的ではあるが流れの安定性の問題がある。乱

流における乱れの安定性や境界層の安定性、そのはく離等が論じられている。従来流れの水面は安定なものとしていたが、測定技術が進むと流れの水面は常に変動しており水面とは何ぞやという問題も生れてくるし、ことに高ダムができて流速が大きくなると流れの水面の安定性についていろいろの問題が生れてくる。また流出孔からの噴流、沈砂池等の池に流れが入ったとき、その入口付近で流れが左右に変動を起こす問題、河口から海に流れが入るときその先が右左に頭を振る問題等がある。

状態移行の問題として、層流と乱流との間の移行の問題があるが土木関係の流れはほとんどすべて乱流状態にあるのでこれはあまり問題にならないが、層流沈砂池では乱流から層流への移行が問題になる。また Froude 数が 1 を越えて常流から射流、超限界流に移行し、さら Froude 数が 1.5~2 を越えて高速流になり表面に波を生ずることや斜面の薄層流の研究も進んできている。これにはソ連で Vedernikoff の研究がある。高速流では表面の安定性や空気連行等も付随してくる。従来古典的水理学の中心をなしていた不等流問題、Backwater (背水) の計算は今日ではもはや問題にするまでもなく、わずかに Control section (支配断面) の決定に問題が残されているに過ぎないようである。

従来の 1 次元的水理学から拡がりをもった 2 次元的水理学に入るといろいろの問題が未解決のまま沢山残されている。主流に対する横方向の 2 次流、副流はまだ手が着けられたばかりである。上層流と下層流とのくい違い、水路断面の変化にともなう 2 次流、分合流点の流れ、それらにおける局所的な常流と射流との移行、Hydraulic jump (跳水)、水制付近の流れなど残されている問題はあまりにも多い。せき・水門や弁についても実験公式の定数を求めるといった古い水理学的手法を脱して、それにとりも現象を追求して、新しい立場から研究されてきている。

一つの新しい分野として熱流体力学とか熱水理学とも称すべきものがある。熱と流れとが結びついた問題である。トンネル等の換気、ダム コンクリートの強制冷却、工場等における冷却水の循環、冷却塔、貯水池内の対流や氷結等がある。原子力開発とともに、原子炉の強制冷却にも乗り出したい。また身近な問題ではダムによる冷害問題が発生してきている。ダム取水による水温低下が農作物に冷害を与え、ばく大な補償問題を起こしたり、表面取水装置が問題になっている。貯水池の水の対流や循環はどうなっているのだろうか。取水口にはどのように流れ込んでいるのだろうか。長い水路の流れでは気温・地温と蒸発熱との熱交換はどうなっているのだろうか。これと逆の問題では工場等の冷却水の引水問題がある。この熱水理学においては流体の運動方程式、連続方程式、状態方程式のほかに、熱方程

式が加わり、境界条件にも熱の出入りが加わって複雑になるので正面から解けないものが多く、その簡略化に要領かいる。

新しい水理学の中心は Sedimentation のような二相間の水理学であろう。密度の異なる二相の水、土砂のような粉体と水、空気や水蒸気のような気体と水との間の水理学である。この中で比較的取り組みやすいのは密度の異なる二相間の流れで、これを一般に密度流 (Density current) と呼んでいる。河川に海水が潮上する河口潮汐問題は塩水と淡水との間の密度流であって、海水の Front がクサビ状になる場合と拡散移行型とがみられる。河川合流点で土砂を多くふくんだ比重の大きな河水が比較的土砂の少ない河水に合流したり、土砂を多くふくんだ河水が貯水池に流れ込んで混合したり下にもぐり込んで行ったりする濁水と清水との間の密度流があり、貯水池の中で水温の差によって循環流が起こったりする温水と冷水との問題もある。海水中に汚水、工場廃水や放射性廃水を放出することにも関係がある。海洋学の海流論の密度流とか、気象学における Baroclinic (傾圧) 大気の理論等では相当研究が進んでおり、等圧面または等密度面と等圧面とが交差してオレノイド場をなしていることからソレノイド理論が利用されよう。

つぎに空気または水蒸気をふくむ流れの水理学がある。その古典的な問題は Cavitation であって、流速が大きくなって水圧が降ると水の中の溶存空気や水蒸気が遊離して Cavity (気泡) を生じ、流量が減少したり、高圧部に入ってピッチングを起こして管壁を傷めたりする。ベンチュリー管やタービンの Cavitation は衆知であるが、ダム越流においては開水路でも Cavitation が起こることがあり、流速が非常に大きくなると壁面の凹凸によって境界層はく離し、そこに Cavitation が起こることがある。また勾配が大きくなり水面に不安定性を帯びてくると表面から空気が吸い込まれて空気連行の起こることもある。タービンから放水路に入るときや水槽に補給水が流入するときなどには空気混入や空気連行の問題があり、ふくまれている空気によって流量が減少したり、表面から空気が逃げて行く問題がある。ことに水槽と水圧管との接続点やトンネルと開水路との接続点などでは、週期的に水を噴き上げる Self-priming の原因となることがある。またダムの越流や余水路に強制的に空気を混入させて流速を殺す減勢法も出てきている。管の Air-vent の研究もある。この空気混入・空気連行は水理の最も新しい問題であろう。

水理学の中で昔からあってしかもつねに新しい問題は Sedimentation であろう。Sedimentation は土砂と水との間の洗掘・運搬・沈殿堆積のような流水作用を総括しており、広い意味を持ちまだ適当な訳語が見当たらない。流れに土砂がふくまれている浮流の問題では、流速や濁

度と土砂含有率の関係が問題になる。移動河床において河床から流れに土砂が出入りし、また Traction (掃流) する問題はまだ解決されてはいない。移動河床において砂漣が発生・成長したり消失したりして粗度係数が変化することが研究されている。この Sedimentation, 河床変動の問題は特にアメリカでさかんなようである。河川の蛇行現象もこの Sedimentation に属している。Sedimentation には流れの加速度が重大な関係を持っているものと思われる。

水路の粗度係数は水理学における大きな穴であり無知係数でもあり、その本質的な研究が望まれる。

固体と水との水理学の一つに浮水・流水の問題があり 1959 年の IAHR (カナダ) では特別課題になった。また地下水の問題では含水率が変化してゆく非定常地下水問題や浸透過程の問題などが取り上げられている。

しかしこれらの新しい水理学の問題の多くの数式による解析的方法がきわめてむずかしく、実験的方法が用いられるようになった。模型実験は 1 種のアナログ・コンピュータのような役目を持っており、模型から実物への換算における相似則や Scale effect の研究が進められ、ひずみ模型の研究もみられる。最近は測定方法が進歩し電氣的測定装置に切りかえられつつある。

一方複雑な現象に基本方程式をそのまま用いて、電子計算機、アナログ・コンピュータや IBM を使って数値計算して行こうという傾向も見られるようになった。今後は水理計算におけるプログラミングの研究も必要となるであろう。このように水理学にもエレクトロニクスが導入されようとしている。

純粋な水理学ではないが、最近では水理学の中で水文学の分野をも取り扱うようになり、しかも大きな分野を占めるようになってきた。一昨日の水理研究会講演会でも流出機構の問題が課題に取り上げられたが、水文学のうち雨の降り方すなわち水文気象と Run-off 流出、地下水への浸透とその流出等が研究の中心となり、その統計的取り扱いが進み、新しい推計学が取り入れられて研究の方法論にも再検討が加えられようとしている。流出では Unit Hydrograph の方法が検討され、流出の内部機構に立ち入った研究もみられるようになった。またいろいろな洪水追跡の方法も提案され、洪水追跡機も試作されるようになり、洪水予知も進んできている。洪水理論では洪水波を 1 階偏微分方程式の特性帯として誘導することによって、一断面水路における洪水波の伝播はやや明らかとなってきたが、水路断面の変化する Backwater (背水) 領域、ことに貯水池を通過するときの洪水波の伝播はまだ未解決のまま残されている。

水理学と密接な関係のある海岸工学の分野では海の波そのものの研究と海の波の作用とが研究の対称になり水理学の中の表面波はここで取り扱われている。わが国で

も毎年海岸工学講演会が開かれ大きな発展をとげてきている。ここに残された大きな問題は波力ことに砕波の波力であろう。波力の解明こそ海の波の根本的な問題ではなからうか。波力も実験的にはやや研究が進んできたが理論的にはまだ手も足も出せない状態である。海の波の作用として海岸侵食や漂砂の問題があり、これに関連して砕波の機構や沿岸流の研究も進められている。これらは複雑な海の波とむずかしい Sedimentation とが組み合わせられた問題だけに今後に残された問題が多い。海の波の発生理論では無限海域における Sverdrup-Munk 等の理論があるが風と海との間のエネルギー交換にはまだ問題が残っており、有限水深の有限海域における波の発生については今後の研究に待つほかはない。また切れ波や波のスペクトルの研究も、わが国では立ち遅れている。これら海の波の研究の第一歩は実際の波の観測をすることであり、その測定装置の研究も大切で、ようやく試作品が実際に設置されるようになってきている。

河川工学との関連においても、洪水調節や洪水予知だけでなく、河口処理や河口の干拓・埋立、ダムの埋没やダム下流の河床低下等いろいろの問題が山積している。

従来水理学は独自に発達してきたが、これからは水理学はもっと他の分野にもサービスしなければならない。水に関係のある土木構造物の破壊の原因はその 90% までが水学的または水文学的原因による破壊であって、それ自体の強度不足によって破壊することはきわめて少ない。橋梁の落ちたものは上部構造の強度不足によるものは少なく、その大部分は洪水時に冠水したり、流れた家や流木をせき止めて流失するか、移動河床に根入れの浅い橋脚が洗掘で転倒したりして落ちている。路面排水や飛行場の排水、工場の敷地排水、さらに家屋の雨仕舞等いろいろの排水問題がある。道路や鉄道の長時間におよぶ不通の原因は、その大部分が出水による路盤流出か、雨水の浸透による崖崩れに起因しており、衝突等の事故による閉そくは短時間に過ぎない。干拓や埋立にも水の問題は多い。これらに対する水理学のサービスをどのようにするかは今後に残された問題ではなからうか。

最後に水理学の研究の現況をみてみよう。表一は最近 5 年間におけるアメリカの Proc. A.S.C.E. Hydraulic division のおよびわが国の土木学会論文集・年次学術講演会・水理学研究現況における水理学関係の研究題目を分類集計したものであって、日米ともに水文学の流出・洪水に対する研究と Sedimentation 河床変動の研究とが圧倒的に多く、それぞれ 20% 程度を示し、そのつぎはアメリカでは余水吐や減勢工の問題、乱流・境界層や 2 次流の問題の順となっているが、わが国では他の題目数は一様に分布している。これからみると密度流・空気連行・高速流 Rapid flow 等の新しい問題は研究者がまだ少ないことがわかる。

表-1 最近5年間の研究題目

題 目 分 類	米 国		日 本	
	題 数	百分率	題 数	百分率
		%		%
降雨特性・降雨強度	2	1.5	19	4.4
流出・洪水予知・洪水追跡	29	22.0	94	21.7
Sedimentation・法面浸食	24	18.0	100	23.0
密度流・Cavitation・空気連行流	10	7.6	16	3.7
せき・水門・弁・ダム越流	11	8.3	22	5.1
余水吐・跳水・減勢工	20	15.1	17	3.9
Water hammer, 調圧水槽, Surge	1	0.8	39	9.0
水質・水温・河川汚染	0	0	9	2.1
管流・管網	2	1.5	16	3.7
分合流	2	1.5	22	5.1
乱流・境界層・2次流	14	10.6	13	3.0
粗度・相似律・Scale effect	9	6.8	20	4.6
高速流 (Rapid flow)	2	1.5	14	3.2
背水曲線・Control section	3	2.3	11	2.5
計測	3	2.3	22	5.1
計	132	100	434	100

注：米国においては調圧水槽は Water power division に水質等は Sanitary division に出るので Hydraulic division では少なくなっているが、実際は多い。

毎年の水理研究会の課題は表-2のように、IAHRの動向、水理学の最近の傾向に合わせて研究テーマが決められており、1961年のユーゴにおけるIAHRでは、

表-2 水理研究会の課題一覧

第1回 (昭31)	1. 水文学 (流出と洪水) 2. 地下水
第2回 (昭32)	1. Sedimentation, 河床変動
第3回 (昭33)	1. 遷移流 2. Cavitation, Air entrainment (空気連行), Self-priming 3. 水文測定 (計器と方法)
第4回 (昭34)	1. せき・水門・弁 (それらの横動・Cavitation・空気混合流をふくむ) 2. 密度流
第5回 (昭35)	1. 流出 2. Surging (開水路 Surge をふくむ)
第6回 (予定) (昭36)	1. Sedimentation 2. 計測

(1) 流出, 洪水, (2) 地下水, (3) Hydraulic machinery (その範囲が決めたがたい), (4) 水理実験に関するエレクトロニクスやモデルの Scale effect 等の課題が提起されているので、水理研究会でも今年は流出を、来年は研究者の多い Sedimentation と実験・計測関係を課題に取り上げることになっている。

(本文は講演草稿を訂正加筆したものである。)

日本におけるPC使用の現状

猪 股 俊 司

現在日本のプレストレストコンクリートがどんな状況になっているかを概略紹介しよう。一般の土木技術者として知っておいてもらいたいと考えている程度のことしか述べない。すでにPCに興味をもって勉強されている方には、まことにつまらない話となるので、その点は御諒承願いたいと思う。したがって私の講演の表題は“PCへの御招待”といった程度のものである。

日本で昨年度どの程度にPCが用いられたかということから始めよう。工事費とか、コンクリート容積とかで表わすのも一方法であるが、ここでは使用されたPC用鋼の重量を述べることにする。昨年度に用いられたPC用鋼の全重量は約5500tである。一見相当な数量に見えるが、日本から輸出されるPC用鋼重量に比較すると、国内使用量は輸出量の約10%程度にすぎない状態にある。輸出先は主として米国であるが、この数値からみても諸外国でのPC使用量と日本の使用量とを比較することができるであろう。さて国内使用量5500tの

うち、プレテンションに用いられている直径2.9mmのPC鋼線が約2500tであって、約1/2がこのプレテンションによるPCであるといえる。

PCの設計上の諸問題、特に土木学会の設計施工指針がふるくなったので、ただいま改訂作業中であって、今年11月ころまでには終了すると考えられる。新しい指針によれば、ストランド、PC鋼棒、なども使用される規定になり、より一そう現状に合ったものとなるであろう。

次に設計計算にあたって、パーシャルプレストレッシングを採用する気運がさかんにになっていることは注目してよい。日本道路公団、首都高速、ではすでにパーシャルプレストレッシングによってPC橋を設計している。現行の学会指針でも、すべての橋がフルプレストレッシングで設計しなければならないとは規定されていないが、現実には橋はすべてフルプレストレッシングとして設計され、場合によっては相当不経済と考えられる設計