海岸工学におけるモデリング

Modelling in Coastal Engineering

西 村 仁 嗣

Hitoshi NISHIMURA

1．何故モデリング？

何かが欲しい、何かをしたいと思うが、物理的に困難である。何か困ったことが生じて、その対策を講じたい。こうしたときに問題を分析し、知恵を働かせて技術を開発し、それを応用して要望に応えるのが工学技術者の仕事であろう。工学の主体は常に problem oriented である。

筆者は、創設の段階から 20 年間筑波大学の工学部門に奉職して、思いがけないさまざまなことを考えさせられた。ここでは次世代の工学教育と研究を目指し、全く新しい枠組みとシステムが模索された。もともと工学部門がなかったために、学外の人や理学系の人々が構想を練り、その実現を図った。こうして、従来の××工学科という壁のない、人種のるつぼのような、不思議な大学組織が出来た。互いに主張し、相手の常識を疑い、紆余曲折を経ながらいつかカリキュラムも定まり、それなりの伝統も創られてきた。この間、我々の教育上の悩みは、ここで育ってくる学生達に何故か技術者の卵らしい雰囲気が不足している、という点にあった。本来、依って立つべき人間の知識の総和について言えば、理学も工学も大差はない。理学では学問的な基盤の類似性から知識を分類し、分野を定めるが、工学においては応用目的別に知識を選択し、分野を再構成する。従って、過度に学際性を重んじ、知識伝達の効率を追究すると、工学が工学でなくなってしまう惧れがある。

というわけで我々技術畑の人間は、日常的に自然現象を分析し、作り出された物や考え出された対策をテストすることになる。効能が不十分でも大して害のないもの、効能が簡単に判定できるものであれば問題はない。しかし、大なり小なり社会的な影響を考慮すべきプロジェクトに携わる者にとって、その責任は重大である。経費も往々にして巨額にのぼる。また、殆どの場合、扱う対象が部屋に入るような規模ではない点が厄介で、結果を評価すると言ってもそう容易ではない。

誰しもまず考えるのは、実物で試してみることであろう。我々の言葉でいう“現地調査”である。これは最も重要な研究・試験手段で、技術者たる者、いかなる場合も現地データの価値を過小評価してはならない。ただ残念なことには、この手段には次のような限界がある。

① 計測の困難さ： 屋外の厳しい環境の下で用いる計測・記録機器には室内とは比較にならぬほどの堅牢さと耐久性が要求される。一般に自然条件下の状況把握には多項目・多点の計測が必要となり、労力・経費の面で制限を受け勝ちである。計測そのものが技術的に困難な場合も多い。荒天時の人力による測定など、危険でどうにもならない。スケールの大きさも難点になるが、逆に小さ過ぎて困ることもある。アトムやクォークを持ち出すまでもなく、砂層内の海水の動きでさえ調べることは困難である。

② 条件設定の困難さ： 波の沿岸挙動といった最も基本的な現象を調べるにも、入射波の周期・波向・波高・スペクトル形状から始まって潮汐・潮流・風の状況、海底地形に至るまで、支配要因は多岐にわたる。限られた期間の調査では、比較的頻度の高い広範囲の条件を待っても、なかなか出現しないものである。設計条件を超える波など、来られても困る。

試してみてうまく行かなかった場合に後始末が大変、あるいは取り返しがつかないということもあろう。

現地データは貴重ではあるが、あくまで限られた条件下の現象を捉えたものであり、また把握の範囲と精度についても贅沢は言えない。我々が自然現象を定量的に計測し、記録するようになってからの歴史的期間も、長期的な現象については十分ではない。これだけではなかなか現象の全体像は掴めないのである。実物で調べることができないとなると、何か他の手段をとるしかない。“モデリング”とは、広い意味では、現地調査以外の研究・調査手法の総称と言える。

2．モデリングの方法

最も簡便、安価、かつ安全な解析手法は、頭の中で考えること、すなわち理論解析である。具体的には、物理学（場合によっては化学・生物学、さらには社会・経済学かもしれない）の知識と方法をフルに活用して現象を数学的に記述し、これを解く。こうした“数理モデル”は、海岸工学の世界では微分方程式と境界条件を主体とする方程式系の形をとることが多い。構成要素は、ニュートンの運動法則のようなかなり信頼の置けるものから、漂砂量公式のような余りあてにならないものまでさまざまであるが、程度の差こそあれ人間の得た経験的な知識と数学的技法の合成体である。これによれば事象の外見（結果）が導出できるのみならず、ある程度その背後にある物事のからくり（プロセス）にまで理解が進められるので、我々にとって極めて有力な武器である。しかし、これまでに得られた物理学的な知識は限られているので、理解が進み、記述可能となった要素事象は必ずしも実際の現象の全体像ではないし、的確さも十分とは限らない。複雑なもの、難解なものは横目で見ながら、単純化によって現象の本質部分を捉えようとしているのが実情である。

現象の記述ができたとして、得られた方程式系が解けるかどうかは別の問題である。数学的に厳密に扱うことができない場合には、さらに寄与の小さい項を省略したり、解き易い形に改めたりして、近似解析を試みることになる。ここでも物理学的な洞察が重要である。どうしても解けない系については、昔は特性曲線法による河川流の計算や、波向線法による波の屈折計算に見られるように、手計算と図解法による解析がなされた。こうして数理モデルから派生した副産物が“数値モデル”である。このモデルの世界は計算機の普及・発達とともに大きく広がり、問題によっては余計なことを考えず空間３次元と時間のフレームの中でNavier-Stokes方程式を丸ごと解いてしまうという時代になった。数値モデルは既にモデリングの世界の代表選手になっているかも知れない。

扱い易い大きさの模型を作って実際の現象を再現して見ようという“物理モデル”は、長きにわたってモデリングの主流であった。英語の physical model を直訳するとこうなるが、日本語の語感では対比上適切としてもいささか紛らわしいので、以下においてはより直截に“模型実験”と呼ぶことにする。極めて素直な発想であって、これであらかた問題が解決しそうな気がする。ところが、実際にやって見ると難しい問題があって、実際の現象をそのまま再現することはなかなかできないのである。制御技術や計測技術の問題もあるが、最大の難点はやはり相似性の維持にある。これについては次節で詳しく述べることにしよう。

数理／数値モデルと模型実験はそれぞれ一長一短、というより合わせても一人前とは言い難い。それぞれの限界を見極め、問題によって使い分けることが肝要である。併用にも意味があるし、部分的に組み合わせて用いるいわば“ハイブリッド・モデル”の工夫もなされるべきである。

3．模型実験

実験を企図するとき、多くの場合計測手法と原型の再現性が頭痛の種となる。過去の海岸工学研究の

進展を見ると、まず課題の設定が出発点になり進み始めるものの、計測の困難さが隘路となって行き詰まる。やがて理論的背景の新たな展開もしくは計測手法の進展とともに再び前進する、といった経緯の繰り返しであったように思う。記録とデータ処理もこれに付随する技術である。一世代前には、現地では勿論、実験室で水位変化を測定することさえ何かと厄介であり、終日ものさしを用いて記録紙から波高を読み取ったものである。概して日本には弱小の計測器メーカーが多数あり、業界がユーザーの分野毎に縦割りになっていることもままある。他分野の実験室を覗くとツールの面でも思わぬ発見をすることがあるので心がけるとよい。計測技術の決定的重要度は現地調査でも同様、もしくは実験室における以上であり、これは必ずしもモデリング固有の課題ではない。以下においては、原型と模型を結びつける相似則の問題に的を絞って解説を試みることとする。

3.1　相似則と縮尺効果

実物大の模型を用いて実験を行うことは、多少のメリットがあるとしても現地調査の問題点は大部分そのまま残るので、非現実的である。最も簡単な問題として、規則波の伝播・変形の状況を調べることを考えよう。現地スケールの現象を 1/9 に縮小し、3.6m の水深を 40cm として通常の実験水槽内で現象を調べるならば、模型の製作も計測もはるかに手軽である。この場合、護岸と被覆ブロックを設置するとすれば、その天端高も天端幅も 1/9 とするので、それぞれの断面積は 1/81 になる。ブロック自体の寸法も 1/9 とするので単体の体積は 1/729、比重の同等な材料で製作すれば重量もまた 1/729 になる。以上はいわゆる“幾何学的相似”である。

さて、造波に際しては波高も 1/9 に設定するとして、周期はどうしたものであろう。ここで初めて時間の縮尺を定める必要が生じる。重力波を対象とすれば、これに伴う水の運動を支配する外力は当然重力であり、この関係を表記するのは Euler の運動方程式である。水平方向には、

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+w\frac{\partial u}{\partial z} = -g-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}$$

ここに、x は水平座標、z は鉛直座標、t は時間、u、w はそれぞれ水平、鉛直方向の流速成分、p は圧力、ρ は水の密度、g は重力加速度である。運動を表わす左辺の各項と重力項（右辺第１項）の比が原型と模型とで一致していなければ、力関係が同等とは言えず、“力学的相似”の状態とは言えないであろう。例えば、左辺第２項は速度の自乗の空間的変化率になっている。これは代表速度を V、代表長さを L とすると、V^2/L で代表されるので、Froude 数 $Fr=V^2/\sqrt{gL}$ を原型と模型とで同等に設定することにより力学的相似が保たれることになる。同じ地表で実験を行う以上、重力加速度 g は共通であり、長さは 1/9 としたので、速度は 1/3 にせよという結論がこうして導かれる。速度が長さと時間の比であることを考えれば、時間縮尺もまた 1/3 としなければならない。これがいわゆる“Froude の相似則”であって、今の場合、実験室の周期 2 s は現地の周期 6 s に相当する。実際、周期を 1/3 とすれば波の位相速度も 1/3、波長は再び 1/9 となって、水深、波高、構造物寸法に対し幾何学的相似が維持される。

支配的外力が重力ではなく、粘性摩擦力であれば、Navier-Stokes 方程式を引用して慣性項と粘性項の比を議論すればよい。結果として、原型と模型とで Reynolds 数 $Re=VL/\nu$ を同等に保つという“Reynolds の相似則”が導かれることはよくご存じであろう。ここに、ν は流体の動粘性係数である。砂層内の海水の動きを調べるために現象を拡大するという前に挙げた例はこれに該当すると考えてよいであろう。砂粒や空隙の寸法を 100 倍に拡大し、動粘性係数の同等な流体を用いた場合、この相似則に従えば流速の縮尺は 1/100、従って時間縮尺は 10000 倍とせねばならない。Froude の相似則を当てはめた場合の流速 10 倍、時間 10 倍とは大きな違いである。逆にこの縮尺を採用するためには、動粘性係

数1000倍の流体を用いて実験を行えばよい。

全く同様に表面張力の効果を表現するWeber数、流体の弾性の効果を代表するMach数などが知られているが、これらすべての効果を原型と模型とで同等に保つためには、流体固有の特性を自在に調節する必要があり、現実には不可能である。最も重要と思われる相似則1つを考慮するのが普通であり、縮尺の度合いを高めるとともにスケールの異なる2つの現象の間に差異が生じたとしても不思議ではない。これを“縮尺効果”（scale effect）という。

東京湾内の長波の挙動を調べるために全体模型が必要になったとする。縮尺を1/1000としても長手方向に60m以上の平面模型となり、この縮尺に固執すると20mの水深が2cmになる。当然Froudeの相似則に従うことになろうが、水深がmmのオーダーでは波がまともに伝播するとは思えない。Reynolds数が極端に小さくなって、境界層の効果など全く現実とかけ離れてしまうからである。こうした場合には、仕方なく水平縮尺と鉛直縮尺の異なる“歪み模型”を用いることになり、何を興味の対象とするかによってある種の相似性を重視する一方で他の相似性はあきらめるという困難な配慮をせねばならない。実験データの解釈に際しても特別の注意が必要である。

3.2　特撮に必要な相似則の知識

波を蹴立てて艦船が航行する映画のシーンを思い出して頂きたい。観客は、ああ堂々の戦艦大和などと感激しているが、実際にはせいぜい1mかそれ以下のプラスチック模型を撮影しただけなどということもあろう。この場合、Froudeの相似則に従って模型船の速度を設定しないと、波長や波の蹴立て方が合わず、如何にも模型と一瞬で興をそがれてしまう。こうした経験に基づく人間の直感は意外に鋭いものである。

ところがここに一つ問題がある。船も背景も同じ、例えば1/100のスケールで作ったとして、速度は1/10、時間も1/10に縮むので、観客は背景を横切るスピードがばかに速く、あるいは目標物への到達時間がばかに早いと感じるであろう。人間は空間的にはたちどころに拡大・縮小解釈を行うので、相対的な矛盾がなければ問題ない。しかし、時間的には絶対的な感覚を持っているというか、あるいは自分の体内リズムとの相対性で記憶しているのであろうか。そこで高速度撮影でコマ数を増し、これをゆっくりと映写することによって時間の経過を原型スケールに戻す。現実感を演出するにはかなりの努力が必要なのである。経過しない時間は大丈夫で、瞬間的に10年も跳ぶと器用に頭が切り換わる。

さらに厳密に言うと、この程度の操作では解決しない問題もある。例えば波しぶきである。飛沫の大きさを支配する大きな要因は表面張力であろう。とすれば飛沫の大きさ自体は原型でも模型でもそれほど変わらない可能性がある。しぶきの大きさや数を注意深く観察すれば、インチキを見抜くことができるかもしれない。別段何の得にもならず、映画が詰まらなくなるだけであるが。越波量に関する実験で風による飛沫の吹き入れの効果が無視できないという話を聞いたことがある。その人が言ったように実験で風まで吹かせるとしても、その風速をFroudeの相似則で定めたのではこの問題は解決しないであろう。

［考察課題］

(1)　機動戦士ガンダムの歩行モード速度の限界はFroude数で与えられる。お分かりになりますか。

(2)　微細な土粒子が懸濁状態にある水中では、澄んだ水中におけるよりも浮力が大きいでしょうか。小石が沈降している水中ではどうでしょう。

3.3　相似則が不明確な問題

砕波指標は現地と実験室では違うのではないかと言われる。これも縮尺効果であろうか。波、流れといった流体運動そのものに関する模型実験についてはまだしも、他の要因が加わって来ると、相似則の設定は一層困難になる。例えば底質である。

漂砂現象およびその結果として生じる地形変化を解析し、予測することは、海岸工学上の重要な課題である。これらの現象の解明に向けて幾多の実験が行われて来たが、そこでは相似則が常に大きな問題となる。波にともなう底面近傍の往復流が底質の往復運動を生み、その岸沖方向の微妙なアンバランスが地形変化を引き起こすわけで、局地的、瞬間的な漂砂現象をよほど精確に再現しない限り積分値として生じる地形変化は現実と異なったものとなってしまう。浮遊砂が流れによって運ばれるという要因もある。個々の底質粒子に作用する流体力とそれに起因する粒子の運動を考えると、Froude 数と Reynolds 数の重要度が局面によって異なる。営力が縮小されているのに現地と同じ砂を置いたのでは同じ動きをするわけがない。かといって粒径を縮小するとその挙動は全く異質なものとなる。例えば浮遊した底質の沈降速度は著しく小さくなる。

あらゆる漂砂現象が単一の簡潔な定量公式で表現されない限り、この問題は解決しない。これは望むべくもないので、実際には波を当てて見て結果として生じる地形が現地の知見と一致していれば良いとする。代表的な現象が結果的に再現できたから他の条件でも大丈夫であろうという考え方である。比重の異なる模型底質としてプラスチック砂を用い、あるいは河川の流砂実験にならって石炭粉を用いるなど、さまざまな工夫がなされて来たがなかなかうまく行かない。前者は球形であまりにも形が揃っているために安息角が小さく、ちょっとした攪乱で平坦になり易い。後者は扁平な形をしていて、水中挙動が砂粒とはかなり違うと言われる。わずかなことで堆積型になったり、決潰型になったり、条件によっては定性的な再現性さえも怪しいというのであるから、難しいものである。

教科書にない相似則追究の例として、もう一つ筆者の経験を述べて見る。海岸工学を構成する別の柱である海岸構造物関連の題材をとろう。20 年ほども前のことになるが、ポルトガルのシネス港で暴風時に完成後間もない傾斜堤被覆ブロックのドロスが被災崩壊したことがあった。ドロスというのはおおざっぱに言うとH形の片側の脚を 90 度回転させた形状のブロックであり、噛み合いが非常によいため比較的小さくても波に対して安定であるということで、一時世界の関係技術者の注目を集めたものである。一連の被災の後は例外的に鉄筋補強をして使われる程度と聞く。被災原因の追究に当たって、某社で被覆ブロックの崩壊を実験的に再現する試みがなされた。この相談をうけたとき、筆者も初めて外力によるブロックの破壊という問題を考えた次第である。

そもそも個々のブロックはどういう外力で破壊に至ったのであろう。ドロスは自身がねじれた形をしているので噛み合いがよい半面ねじりを受け勝ちと思われる。当時は無筋、もしくはそれに近い形で用いられていたので、胴の両端の脚の付け根の部分に応力が集中し、剪断破壊を生じたか。事実、その部分で壊れたものが多いという。少なくとも積んだ段階では壊れなかったのであるから、自重といった静的な力のせいではあるまい。波によるブロックの動きが相互、あるいは堤体との衝突を生み、その衝撃で壊れたのではないか。一撃で壊れないまでも、ひび割れが発生すると有効断面積が減少し、衝撃の繰り返しで加速度的にそれが拡大するであろう。曲げ引っ張りで破断したのか、剪断応力によるものか。

まず、波力によるブロックの動きを考えよう。3.1 節の議論を延長するため、長さの縮尺を 1/9、Froude の相似則を適用して速度の縮尺を 1/3 とする。単位面積当りの形状抵抗が ρu^2 に比例するとすれば、基本的な作用波力は 1/9 で、長さの縮尺と一致する。これに乗ずるべきブロックの断面積は長さの自乗、対する質量力は体積、すなわち長さの 3 乗に比例するので、結局うまく釣り合っていることが確認され

る。前出の運動方程式から明らかなように、Froude 相似の枠組みの中では加速度は縮尺の影響を受けないのである。ただし、ブロックの比重は原型と同じという前提に立っている。流体摩擦力は無視できるであろうか。いずれにしても周辺の流れは乱流状態と考えられるので、上記と類似の相似則が成立し、Reynolds 数の寄与は小さいであろう。

次に、ブロックの強度を考える。発生した応力が破断（弾性限界）応力を超えたときに壊れると単純に考えるならば、模型ブロックの材料強度は 1/9 に設定すればよいことになる。しかし、衝撃力による破壊がそれで再現できるであろうか。この場合、部材の変形に伴って内部に蓄積されるエネルギー量が指標となる、あるいは変形量と変形速度に着目するべきだと専門家の意見はまとまらない。いずれにしてもそうなるとブロック材料のヤング率が問題になる。ブロック被覆層全体を複雑な構造体として見ると、要素ブロックの変形は原理的には重要な解析要素かもしれないが、実際には単に積み上げた個別のブロックが極めて微小な変形を呈するわけで、大して問題になるまいというのが素人考えである。ところが材料内部の状況を問題にするとなるとそうも行かないようである。鉄筋が入ると問題はますます複雑になる。これは構造力学よりむしろ材料強度学のカテゴリーに属する課題で、筆者としても材料特性の正しい縮尺について結論に達したわけではない。仮に理解を進めたとしても、比重、ヤング率、剛性（ポアソン比）、弾性限界、終局強度等々すべての要因を制御するのは大変である。厳密に考えると実験も容易ではないということである。この実験では現地と酷似した崩壊の状況が再現できたそうであるが、置くと壊れるようなブロックの強度試験がまた一仕事であった。

この問題に関連して何度か構造工学・コンクリート工学分野の先生方と議論したが、彼等は消波ブロックにはすべて鉄筋が入っているものと思っていたようである。あのようなものを無筋で作るなど狂気の沙汰と一様に言われる。しかし、鉄筋を配置すれば当然工費が倍増する。実際問題として片っ端から壊れているという状況ではないので、何一つ壊れてはならないという彼等の常識の方がどちらかというとおかしいのではないか。

3.4　無次元数の効用

相似則の議論には必ず無次元量が登場する。一般に長さ、時間、質量といった次元量は一定の割合で縮小し、あるいは拡大することができるが、縦横の比といった無次元量を縮尺するとその世界が歪んでしまう。いくつかの物理量を組み合わせると無数の無次元量が作れるが、それらのうち互いに独立なものは物理量の数から基本次元数を差し引いた個数しか存在しない、とは Buckingham のΠ定理の教えるところである。これらすべてを原型と模型とで一致させることが実験の理想であり、それを阻むのは実験環境と入手可能な材料の特性から来る制限である。

無次元量の話をしたついでに、相似則とは直接に関係のないデータ処理技術の視点からその効用を見ておこう。大学の実験教科で水面波の位相速度測定を指導した経験者は少なくないであろう。何でもないようであるが、界面波は分散性を有する点で物理学の波動論中でも面白い存在である。音の波に分散性があったとしたら、オーケストラの演奏会では席毎に異なる音楽を聞くことになる。さて、波の周期と水深を変化させながら波速を測定し、グラフにプロットする。微小振幅波理論の帰結

$$c=\sqrt{(g/k)\tanh kh}$$

に対応する曲線を同じグラフに描いて、実験結果と比較する。ここに、c は波速、k は波数、h は水深である。位相速度は測り易いマクロ特性量であり、上式は実質的に２次の精度を有するので大抵はそこそこの一致が得られる。このとき、大学生がどういうグラフを作るかというと、横軸に周期、縦軸に波速をとり、水深をパラメータとして数本の理論曲線を描き、その上下に実験データを落として来る。学

生によっては水深毎に数枚のグラフを作成する。これは、測定値をそのまま描くという、小学生時代に気温変化を折れ線グラフにしたのと同じ素朴な反応である。

上式を少し変形して

$$c/\sqrt{gh}=\sqrt{(1/kh)\tanh kh}$$

と書くと、これが２つの無次元量 $c/\sqrt{gh}$ と kh を結びつける関係式であることがわかる。これらを縦横軸にとって結果を描けばグラフは１枚、曲線は１本で済み、計算と作図の労力はかなり軽減される。関係パラメータの数が減るのみならず、水深毎のデータを別の印で表現しておけば隠れていた水深の寄与が検出できるかもしれない。無次元パラメータの空間では現地データも同じ領域内に描いて直接比較することが可能である。与えられたデータからどれだけの知見が引き出せるかはデータ処理技術の問題であるが、この議論は小学生には難解であろう。

４．数値解析

モデリングのもう１つの柱、数値解析については、その基盤となる数理表記と数値解法という２つの観点から考えて見よう。数理的には統計処理という話題もあるが、これはむしろ現地調査や模型実験で得られたデータの解釈に関わるものであるから、ここでは議論に含めない。もっとも、モンテカルロ法のように、統計的な手法から決定論的な結論を導く手法もないわけではないが。

４.１　方程式系

純然たる理論解析と同様、数値解析もまた現象を記述する方程式と境界条件の系から出発する。この系の適合性・信頼性・精度が爾後の解析全般を規定することは言をまたない。

この段階では、モデルを提起する側では現象に対する的確な洞察、それを用いる側では系の意味の十分な理解がまず重要である。方程式の適合性とは何か。例えば、潮流と海浜流では起流力も異質であるし、解析の対象となる領域も異なる。いずれ運動方程式と連続式の連立系とはいえ、これらのモデルに互換性を求めるのは尋常ではない。にもかかわらず、入手した海浜流の数理モデルを用いて潮流計算を行った結果の報告書が存在するのである。エネルギー平衡方程式を用いて回折の計算をする、一様水深の仮定のもとに導かれた方程式を任意水深の場に適用する、この種のとんでもない誤解は決して珍しいことではないので、お互いに注意しよう。問題を不必要に複雑にしてしまうこともある。河口密度流の解析に際して、流体の密度が一様でないからとわざわざ非圧縮性流体の連続式を持ち出した論文を見たことがある。

大小の誤解は理論解析の結果にも、またその適用段階でも見られる。完全流体の定形波理論から導かれた質量輸送速度という意味不明の公式が水理公式集に堂々と掲載されていた時代もあるし、原論文に含まれた Stokes 波や cnoid 波の高次近似解の誤りがそのまま引用されていたこともあるので要注意である。これは一概に誤りとは言えないが、摂動解の誤差と残差の問題にも留意されたい。誤差とは厳密解との差異、残差とは方程式の不満足度である。理学系の議論では残差を基準に１次近似、２次近似と称することが多いが、工学分野で問題となるのはむしろ誤差であろうと筆者はかねがね考えている。その意味では、多くの教科書に現われる線形長波理論なる解は工学的に無価値である。収束範囲を超えて級数解を適用するとなるとこれは明確な誤りで、そもそも数学的な根拠がない。

方程式系の信頼性・精度についても、なかなか褒め言葉が出て来ない。基本となる波の場の解析に関しては、緩勾配方程式という有力な基本式を得たこともあって、かなりモデルが整備されてきた。最近では方向スペクトルを有する波や、非線形の変形までとり扱われている。一方、砕波現象の組み込み、

砕波後打ち上げに至るまでの波の変形計算といった面ではそれほど進展していないようである。海浜流モデルになると、流体運動の記述の骨組みや、外力項・粘性項・拡散項といった諸項の形態はともかく、後者に含まれる係数値はかなり怪しい。漂砂量公式の場合、ミクロスケール、マクロスケールでそれぞれ活発に研究されてきたし、ある程度実用にも供されてもいるが、とりわけ前者の確立は困難で到底十分とは言えない。使っておいてこき下ろすのも気がひけるし、研究者は何をしていると言われそうなので深入りは避けておこう。

境界条件の把握も困難な課題である。岸側・沖側の条件は何とか記述することができても、構造物等の存在しない側方の開境界の情報はしばしば不明である。とりわけ流れや沿岸漂砂を扱う場合には、ある領域内の現象が側方境界外の状況に大きく依存する可能性がある。これぱかりは実際に行って調べる以外、如何ともし難い。

海岸工学からは少し離れるが、地球環境のような複雑系のモデリングでは、ミクロの知見を積み重ねてマクロモデルを作るという発想そのものに限界を感じる。大河川の流出モデルも、ずっと規模は小さいがやはり複雑系のモデリングである。マクロモデルとして何十年も前から存在するタンクモデルが今だに命脈を保っているようであるが、逆にこれから出発してより緻密なモデルへと進む道筋はないものであろうか。海浜地形変化の 1-line theory にしてもそうであるが、マクロ・モデルというものはミクロ化に向かわず、そこで停止してしまう宿命にあるかのようである。

［余談］ プログラムの進化は計算機上にゴキブリを生み出せるか？ “遺伝的アルゴリズム”は従来の演繹的なモデル作成の枠からはみ出した発想である。

4.2 数値解法

信頼性の点で大小の問題を残しつつ、解析の基本となる方程式系が定まったとしよう。次の課題はこれをどのように解くかである。解が得られなければ仕方がないのでまずは計算の収束性と安定性、次に計算精度、欲を言えば計算の容易さ、楽さといった点も考慮して解法を選択する。

計算機が普及したこの 30 年の間に、数値解析法は著しく進歩した。差分法、有限要素法、境界要素法等の基本的な考え方はごく初期からあったが、さまざまな工夫を加えて variation を生み、細分化し、使用する座標系も離散化の手法も多様である。特性曲線法など方程式の特質を活かした解析法よりも、複雑な方程式をそのまま受け入れ、離散化によって直接数値積分するといった腕ずくの計算が昨今の主流になっている。計算結果のとりまとめや爾後の利用の便宜を考えると、整然とした計算格子にはそれなりの利がある。

差分法を用いる人は常に差分法、有限要素法を用いる人は常に有限要素法と、人によって手法の選択に偏向が生じるようである。いずれにしても同じ方程式を離散化して解いているので、差分法と有限要素法とで本質的に異なる作業をしているわけではない。数値計算においては、微妙な差分表記や計算点配置の差異がどうかすると収束効率・安定性に大きく影響し得るので、手法毎の利点と欠点、どのような問題にどれが適するか、それぞれの安定性と精度といった各点についてより総合的、普遍的な議論が欲しいものである。

情報科学分野では数値解析技術の専門家達が手法そのものの研究をしているが、彼等もやはり特定の手法に固執する傾向がある。行列計算の解説書を見ても、SOR、CG と見事に分業している。計算機言語に関しても好みが閥を形成する傾向があるという。何と言っても学問・技術分野としてまだ若いのであろう。ちなみに、離散化による直接数値積分というテーマは当節流行らないそうである。そのかわり

に関数系による解の表現、方程式を解き易くする前処理と得られた解を元の方程式の解に引き戻す方法論などは盛んに研究されている。それなりに興味を覚えるが、これも方程式毎のケーススタディになることが難点である。

数値モデルの不十分さは、実験を含む経験的な知見で補う必要がある。単なる経費の節約や簡便さのために数値解析に走り、出て来た結果を盲信するのは危険である。数値モデルの信頼性が向上しないうちに、現象に馴染んだ技術者が減少するという事態は避けなければならない。何よりもまず波の場の解析に関して数値モデルの現状を的確に把握しよう、ということで土木学会海岸工学委員会では研究レビュー小委員会を設定した。その成果は学会の刊行した「海岸波動」に詳述されている。最新のモデリング技術を網羅した中身の割りに安価なものであるから、手元に置いて活用されるようお勧めする。

4.3　離散化の諸問題

ある種の簡単な差分方程式に対しては特殊関数を用いて厳密解を表現することが可能であるが、これらは概して微分方程式系の解とは異なる種族の特殊関数である。独立変数の刻みを微小化して行った極限では、両者は一致するのであろうか。この操作によって方程式同志が合流することは確かである。少なくとも連続な関数については肯定的な回答が期待できそうである。Runge-Kutta 法の誤差解析等は我々を大いに元気づける。しかし、特異点を含む問題となると筆者には歯が立ちそうもなく、確信が持てない。

一様な単一正弦波の入射に対して適当な hump 地形を与えると、屈折によって波向線が内側に曲がり、収斂して焦点ができる。hump がレンズの働きをするのである。ここでは有限幅の水域の波のエネルギーが一点に集中するため、線形理論では波高は無限大になる。実現象としてはそれ以前に砕波が生じるので、大したことにはなるまい。この現象を差分解析すると、hump の背後に比較的なだらかな波の場ができる。従って差分解析が現実的であると考えてはいけない。これはあくまで差分計算の精度の悪さを物語るものであって、離散化に伴う計算上の誤差がもたらした波のエネルギーの分散・逸散が実現象のそれに合致すると考える根拠はないからである。

放物型波動方程式はときとして便利な方程式であるが、これを差分法で解くとなると入射波の不連続性に注意せねばならない。例えば、進行の途次に防波堤があったとしよう。反射波は計算できないので、堤前の重複波の場は度外視することになるが、防波堤背後の回折波はどうであろう。防波堤背後から見ると、開口部のみから波が進入し、遮蔽部分で突然それがなくなる。防波堤先端の特異性は局所的に大きな2階微分値を生み、marching scheme の計算の過程でこれが拡大して発散に至る。ところが計算格子を粗くすると発散は避けられ、それらしい解が得られる。差分表記の方法にもよろうが、計算の刻みを小さくすることにより、かえって解がおかしくなるという点で問題は前の例より一層本質的である。もともとこのような問題に放物型波動方程式と直交格子の組み合わせを用いること自体極めて不合理であるが、一つの典型的な事例としてここに挙げた。与えられた問題に対して適切な計算モデルを選択するにはそれなりの知識が必要であり、再び研究レビュー小委員会の成果に学ぶことをお勧めするしかない。

計算格子の組み方、計算点の配置といった scheme も目移りするほど多種多様である。最近海岸工学の世界で筆者の目につく限りでは、水位計算点に対して流速成分の計算点をそれぞれの方向に半格子だけずらした leap flog scheme を採用するケースが多いように思う。これには満足している。かねがね最も合理的な格子だと考え、自分でもなるべく用いるようにしているからである。いずれ連続体を離散化表現するのだから格子などどうでもよいとも思えるが、技術的な問題はさておき、実現象とモデルの間

にしっかりした脈絡があった方が気持ちがよい。これらを結びつける通常の道筋は、実現象 → 連続体数理モデル(微分方程式) → 離散化数理モデル(差分方程式)というものである。これだと２種の数理モデル間の数学的飛躍が問題になる。

上記とは別に、実現象 → 単純化物理モデル(類似の現象) → 数理モデル という道筋をつけ、現象間の類似性を考える方向も考えられるのではないか。多数のドラム罐を格子状に配列し、横腹に孔をあけて隣り合う罐を互いにパイプで連結する。そうしておいて端の１列の罐内水位を上下させると、この変動は否応なくパイプを介して次々に伝播する。この現象は連続水域を波が伝播する状況と類似しているであろうか。もしそうだとすれば、この単純化物理系を解析すればよいわけで、上記以外の scheme は殆ど考えられない。２つの罐の水位がこれらを結ぶパイプ内の流量を規定し（運動方程式）、４方向のパイプからの流入・流出が罐内の水位を決する（連続式）。逆に、leap flog scheme の数値計算ではこの問題を解析しているのだ、とも言える。

４.４　境界条件の組み込み

境界条件はそれを与えること自体大仕事であることは既に述べた。これとは別に、数値計算技術の視点から取り扱いの困難な境界条件というものも存在する。例えば、自由透過境界である。ここから外側は広い海域で、来た波はすべてそちらに抜けてしまうという条件。理論解析では反射を考えなければよい、つまり何もしなければよいので、最も簡単な境界条件である。ところが、数値解析では何もせず、成り行きに任せるということができないので、このような境界でもすべての変量に具体的な値を与えねばならない。しかもよほどうまく与えない限り反射が生じて、何らかの影響が計算領域内に戻って来るのである。自由透過を現出するためにスポンジ層と称する消波帯を設けるなど、苦しい工夫が提案されている。

さらに厄介なのは入射境界である。入射波と反射波がそれぞれ逆方向に自由透過するという条件は、両者を分離することなく和の形でのみ表現する計算法では大変扱いにくい。後者は計算して見なければ分からない未知量なのである。反射波が境界に届くまでに計算を打ちきってしまうという方策が最も現実的かもしれない。同じ数値解析でも、各方向からの波を個別に扱うタイプの境界要素法系の解法を適用すると、この問題は嘘のように解消する。ところが一方で別の問題が生じるので、いずれにしても悪銭苦闘することになる。

もともと微分を差分で近似するという操作は、数学的には Taylor 展開の２次項以下を省略したことになる。高次項を無視したということは、原方程式にこれとキャンセルするべき項を追加したのと同等であり、これが意図しない数値粘性や数値拡散といった現象を引き起こす。他の分野で散見されるように、差分表示に高次項をとり込めばそれだけ精度が向上するが、その結果１列の境界値で済んでいた計算が、２列、３列の境界情報を要求することになる。同じ方程式を解くのに何故必要な境界条件の数が増えるのか。それは２階の微分方程式を離散化とともに無限階の問題に高めてしまったからで、とくに不思議なことではない。大気中をロケットが飛ぶ、風が山頂を吹き抜ける、大洋を船が航行する、といったいわゆる内境界値問題では、十分遠方で静穏もしくは一様という条件が適用できるので、外境界値はいくらでも供給できる。領域外縁の境界条件が現象を決める種類の問題を扱う場合には、適用可能な格子配列や離散化の手法が限られる。

５．「海岸工学論文集」に見るモデリングの推移

本稿では、日頃感じていた技術的な不満を書き並べてきた。結局、難しいものだ、という以外の結論

は殆ど書かなかったような気がする。しかし、考えて見ればこれらの不満は我々の大先輩諸氏も感じておられたことであろう。当時に比べれば随分前進した部分も多い。さんざん文句を挙げてもこの程度で、逆にこれが分かったということは、年々山のように発表される論文の数だけあるわけだから、悲観するには当たらない。海岸工学分野の技術者諸兄におかれては、列記された問題にチャレンジし、逐次解決する方向で引き続き努力して頂きたい。

最後に、我が国の海岸技術者・研究者達のそうしたチャレンジの経緯と現状を概観して見よう。通常この種のレビューは骨の折れる仕事であるが、幸いにして我が国の海岸工学研究の主要な成果の殆どが年１回の講演会に合わせて刊行される海岸工学論文集に報告されている。ただし、第 27 巻以降は現在刊行準備中の第 45 巻に至るまで査読による選抜制が敷かれているので、登載論文数が応募論文数に比例しているとは限らないし、まして研究の件数に比例しているわけでもない。あくまで概略の傾向を見るのみである。

(1)　論文総数

登載論文数は 30 数編程度から漸増して 1966 年には 100 編を超え、その後の急増傾向は査読制度によってある程度抑制されたものの 1981 年には 200 編に達した。ここ数年は論文集と講演会の容量の制約から採択論文数を 260 編以下とする方針をとっているが、投稿は依然として増えており、採択率は査読制施行当時の 70%前後から本年度はついに 60%を割り込んでしまった。編集に責任を持つ立場からは頭の痛いことであるが、これは当該分野の研究者層が厚みを増したこと、また研究活動の活発さを示すもので、嬉しい悲鳴と言うべきであろう。

(2)　研究テーマ

海岸工学研究の基本となる海の波と流れに関する論文は、変動しながらも一貫して全体の 1/3 程度を占めている。内訳としては波の研究が圧倒的に多い。一口に波と言っても、変形の基礎理論から始まって不規則波、津波・高潮・副振動・潮汐等の長波等バラエティに富んでおり、各領域の研究に消長があって面白い。不規則波の研究成果は 1955 年頃から報告されるようになったが、本格的に論文数が増えるまでには約 10 年かかっている。長波の研究は一時期沈滞していたが、このところまた盛んである。

ごく初期には漂砂・海浜地形変化に関する論文が上記に匹敵していたが、その後の 30 年間は概して構造物関連の研究に押されていた。さまざまな構造物の出現とともにその研究も多様化し、対象水域も海岸から大水深の海洋構造物まで広がった。砂と構造物、海底地盤、構造物と流れ相互の問題も数多く扱われるようになり、研究テーマの分類が年々難しくなっている。全体に占める比率から言うと近年は両者ともやや低下気味で、環境問題を扱う論文がこれらの伝統的な研究領域を凌駕する勢いである。この関係では、もともと物質や温排水の拡散現象等純粋に物理学的な現象が多く扱われていたが、最近では興味の対象が水質・生態系・景観・音・地球環境とまことに多岐にわたっている。ご時世というものであろう。その他、防災・計画論・計測技術に関する論文が増えている点も特筆に値する。

これらの研究がどこで行われているかと言うと、初期は別として、平均的に 60%弱は大学発である。残りの半分強が官公庁・研究所関係から、半分弱が企業の研究部門から出ており、この比率はこれまでのところは比較的安定している。この後は経済停滞の影響が徐々に顕在化して来るかもしれない。

(3)　モデリング

５巻おきに１冊の海岸工学論文集を抜き出し、それぞれの研究にどのような手法が使われているかを

調べると、驚くほど明確な傾向が表れる。

まず、模型実験について見よう。実験を含む研究は 1960 年頃までは全体の 2/3 を占めていたが、この比率は漸次的に低下し、1980 年頃には約 1/2、昨今は 40%に近づいている。この間、我が国の経済は発展を続けていたのでこれは研究資金の問題ではなく、むしろ研究手段としての模型実験の地位の相対的低下を示していると思われる。勿論絶対数としてはここ数年を除けばそれほど低下しているわけではない。単なる試験、あるいは調査のための実験は各方面で実施されているので、むしろ必要な実験の手法が確立され、一般化してきたということであろうか。

これに対して、現地調査結果の発表件数はうなぎ登りに増加し、昔は 1/3 に満たなかったその比率が現在は 2/3 に達する勢いである。数値解析の件数も調査件数と類似の歩調で増加したが、これを骨子とする研究論文は現地調査の半数そこそこといったところである。これも実務面では大いに活用されつつある解析手段なので、模型実験におけると同様、本稿で述べてきたさまざまな問題が研究発展の隘路になっているのであろう。

総論文数は 1980 年代以降倍増したが、理論解析を主体とする研究は微増程度で常に 30 ないし 40 件台である。いずれにしてもこれらの手段、およびその組み合わせが殆どの研究・開発を支えていることは事実である。ただし、ここで挙げたのは、すべてその手段を含むということで重複カウントした数字であることを付記する。

さまざまな意味でのモデル開発は、今後技術者・研究者の仕事の一層重要な部分となろう。多忙な中で目前の目標にかかりきるのは当然のことではあるが、とりわけ研究者が心がけるべきことは信頼性と普遍性である。そこから説得力が生まれる。誰がやってもこうなる、どういうやり方でもそうなる、というところまで行かないと本当の信頼は得られない。この特定の場合、たまたまこうやればうまく行ったかに見える、といったところで満足したくないものである。