

アジア環境シミュレーター

山下 隆男

教授

広島大学大学院国際協力研究科

〒739-8529 東広島市鏡山1-5-1

E-mail: tkoyamashita@hiroshima-u.ac.jp

1. はじめに

21世紀は地球上での人類の存続をかけた環境の時代である。世界の人口の半数以上が住み、急速な経済成長を遂げているアジア圏、ここの健全な開発に人類生存の鍵が託されていると言っても過言では無い。

広島大学大学院国際協力研究科は、グローバル時代の大学院として発展途上国の貧困、環境、食糧、紛争など地球規模の複雑で困難な課題に解決策を見出すため、地域固有の文化や環境を考慮した開発の方向や国際協力の在り方を総合的に判断できる専門家を養成するため、従来の学問の枠を超えた学際的かつ国際的教育研究を行っている。平成16年度に採択された文部科学省の21世紀 COE プログラム「社会的環境管理能力の形成と国際協力拠点」では、政府（行政）、企業（市場）、市民3つの社会的アクターの連携により、社会的環境管理能力を向上させることで総合的な環境管理を実現するための方法論を見出す研究を展開している。

一方、自然科学の多くの分野で急速な進歩を遂げている環境科学に関する研究成果を、国際協力に反映させるニーズは日々高まってきているが、これまでは単一の技術移転で終わってしまうケースが多く、国際協力として結実しないようである。国際環境協力としての機能を発揮するためには、環境科学の研究成果を総合化し、社会・経済的な研究成果と連携させて総合的環境管理を行う方法論を確立する必要

があると考えられる。

このような観点から、広島大学大学院国際協力研究科の教育研究機能を活用し、21世紀 COE プログラムに環境科学の応用研究（環境モニタリング、環境シミュレーション）を連動させ、国際環境協力研究をさらに発展させ、アジアにおける総合的環境管理能力の形成を実現させることの必要性が認識されるようになった。その結果、環境シミュレーション、環境分析化学、環境経済学の研究者が共同して、アジアからの留学生の研究指導を通して、その成果を総合化する形で、「アジアシミュレーター」のようなものを構築し、アジア諸国の行政、企業、市民（研究者、留学生）と協働してこれを運用し、得られた情報を基盤とした社会的環境管理能力形成を実現しようとする構想が浮かび出ることとなった。

アジアシミュレーターに関する研究は、環境科学と環境経済学の連携により、アジア圏の環境問題の解決方法を創造する研究として位置付けられる。最近の環境に関する研究は、多岐の分野に渡り、高度な専門性を有する環境科学技術としてのパラダイムが形成されているが、これらの成果を環境管理に活用するためには、目的に適応した研究成果の総合化が必須である。環境破壊は企業、市場が引き金になることが大半で、それに対して政府（行政）、市民が環境科学技術を活用し、如何に社会的環境管理能力を向上させるかが求められており、このような方法論を発展途上国に適用する研究は、今後、国際環境協

力学として定着するものと考えられる。環境シミュレーター、地球シミュレーター、衛星リモートセンシング、地球観測、環境モニタリングに関する研究は、国内外で急速な進展を遂げており、これらの研究成果を総合化し、社会経済研究との融合において、国際環境協力を推進することは、地球環境問題上、焦眉の研究課題である。

2. アジアシミュレーター構想

ここでは、主として環境シミュレーターについて、現在の構築状況を概説するが、私が構想している「アジアシミュレーター」は、図1に示すように、環境シミュレーター、社会・経済シミュレーター、および情報バンクにより構成されることが望ましい。各々の研究内容は以下の様なものと考えている。

(1) 環境シミュレーター

数値モデルの開発：大気（大気圏）・陸面（生物圏）・海洋（水圏）の結合数値モデルによる環境予測（気候、植物相、海洋環境、流域環境）手法によるメソスケールの環境シミュレーションモデルによる環境影響評価を行う。モデルを開発途上国に適用させるためのデータセットの作成。今後独自で作成しなければならないデータセットは土壌データ、高解像度のNPPデータ（PAR, LAI）、DEM等である。

環境モニタリング手法の開発：大気質計測、イオン排除型イオンクロマトグラフィーによる水質モニタリング。オンサイトでの簡便、迅速、多成分同時計測が可能なモニタリング手法を確立する。

(2) 社会・経済シミュレーター

アジア諸国の資源、エネルギー、人口、経済活動動向のシミュレーターを構築する。特に、石油の需要供給予測、社会的アクター・ファクター解析、企業業種別の環境・経済パフォーマンス評価法を確立する。これにより社会、経済活動のシナリオを作成する。

(3) 情報バンク

衛星リモートセンシング、環境データベース、社会・経済、歴史・文化情報の作成とデータセット化をおこなう。さらに、グローバルデータセット、大気・海洋グローバル予測システムとのリンク。環境モニ

タリングデータベースを作成する。特に、国際協力研究科にとって、ALSO, TRMM, IKONOS等の衛星データとそれを使える環境を構築することは、早急に実現させる必要があると考えられる。

このアジアシミュレーターを援用して、政府（行政）、企業（市場）、市民の3つの社会的アクターが連携して社会的環境管理能力を向上させるための方法論を発展させ、国際環境協力研究、研究ネットワーク、環境教育を充実させることが、持続可能な地球社会を構築するために強く求められていると考える。

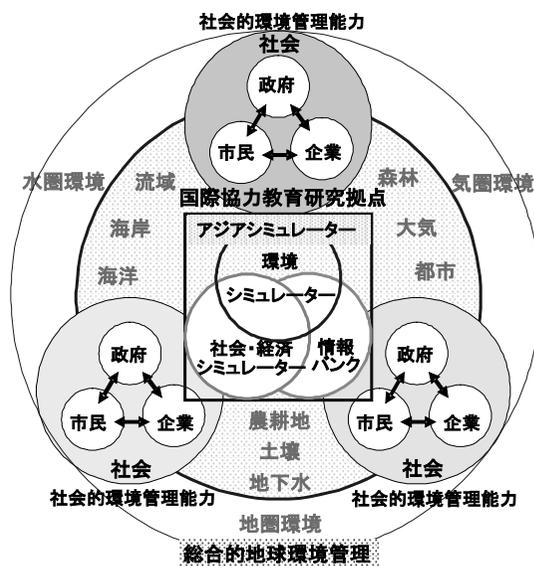


図1 アジアシミュレーター構想

3. 環境シミュレーターの概要

3.1 モデルの概念

図2に示すようなLand-River-Coast System (大気・陸面・海洋連結系)における災害や環境要因となる自然現象を解析するためには、メソスケールでの大気、陸面、流出、海洋間の相互作用を反映した現象のモデル化が必須であり、流域・海域システム統合モデルを構築するためには、気象、砂防、水文、河川、河口、海岸、海洋における個別過程についての研究成果を集約し、大気・陸地・海洋の結合した目標としたモデル統合化研究が必須であると考えられる。残念

ながら、流体災害を研究しているわが国の大学の研究において、個々の研究成果を統合化し、システムとしてモデルを構築する研究活動は、必ずしも活発ではなく、欧米の研究組織に大きな遅れを取っているのが現状であると認めざるを得ない。

河川・海岸系の防災や環境保全研究のためのベースとなるのは気象モデルである。今日、全球の気象予報とリンクしたメソスケールでの気象モデルが普及し、幅広い分野での研究や気象予報に関する実務面で利用され、その精度、適用性、問題点が、一般的に評価できるようになってきている。その代表的なモデルのひとつが米国大気研究所 (NCAR) とペンシルバニア州立大学 (PSU) で開発したメソスケール気象モデル NCAR/PSU Fifth-Generation Mesoscale Model (MM5) であり、本環境シミュレーターではこれを気象モデルとして用いる。

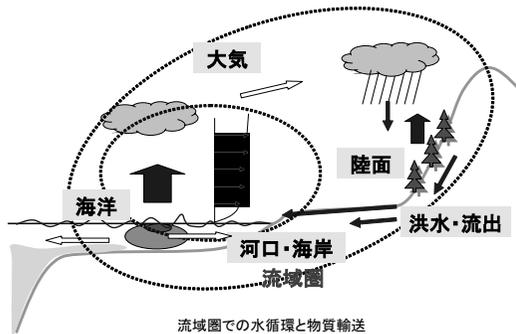


図2 Land-River-Coast System

大気・陸面過程に関しても、1980年代から植生による光合成機構をフルに入れたモデルが開発され、降雨量の過半数を分担する蒸発散過程が、CO₂、熱循環とともにモデル化され、気候変動予測の研究に大きな貢献をしていることは周知のようであり、これらを代表するモデルとして SiB, SiB2, SiB3が挙げられる。このモデルでは、大気・植生間の熱・水、乱流エネルギーの授受も考慮され、気象モデルとも良いマッチングが可能である。

雨水流出モデルも1980年代に河川流域管理の実務面で急速に普及し、線形・非線形、集中型・分布型、概念型・解析型等の組み合わせで多くのモデルが発

表されている。当然、これらには水質や土砂輸送のモデルが組み込まれ、利用者の多いモデルは、実用面での使用を通して、幾多のバージョンアップが繰り返されている。HEC, HSPF, MIKE-11, MIKE-SHEはその代表的なものである(Singh&Woolhiser,2002)。本環境シミュレーターでは、栄養塩、底質等の物質輸送に関する成熟した研究成果を総合化しているHSPFを用いる。

物質輸送における河口部での問題は、河川水・海水のイオン濃度の相違による微細粒子の凝集と堆積、圧密過程であり、1990年代に欧州連合で行われたMASTプログラム, COSINUSの研究結果(Berlamont&Toorman, 2000)に最先端研究がある。しかしながら、大陸棚への物質輸送モデル(COHERENS)以外は、これらの成果のソフトウェアとしての公開は行われていない。本環境シミュレーターでは粘性底泥の凝集と堆積、圧密過程を河口流モデル(海浜流モデルの一部)に導入する。底泥の挙動は栄養塩輸送に密接に関係しているため、淡水・塩水混合や生物活動と合わせて、流域での防災・環境において必要になってくる。さらに河口部は、河川からの流送土砂の一時貯蔵場であり、分級分配の場でもあるため、粒径の効果を考慮した海岸土砂への分配則、海浜変形予測といった困難な研究テーマが残されている。

河口部を含む沿岸域での土砂輸送(非粘着性底質)には洪水流、海浜流および波浪場の相互作用(砕波、屈折、海面せん断応力)を考慮したモデルを導入する必要がある。この様な場の解析ソフトは公開されていないが、京都大学防災研究所(大渦波浪観測所)で開発した広域海浜流モデル(Kato & Yamashita,2001)を用いる。このモデルには、強風による吹送流と波浪、流れの相互作用が導入されており、上越・大潟海岸での現地検証が多く実施されている。海浜変形機構に関しても多くのモデルが提案されているが、浮遊・掃流、波浪・海浜流の機構を考慮できる漂砂モデル(Bailard, 1981)を広域海浜流モデルに適用する。

外洋、沿岸域での波浪推算も、海洋モデル、気象モデルの進歩に並行して、ここ数十年間に急速に進展し、現在、第三世代のモデルとして、波浪の非線形

相互作用と大気乱流場との相互作用がフル装備されたモデルが公開されている。本研究では、外洋での適用性が最も良い Wave Watch III(WW3)を用い、沿岸域での波浪計算へ接続させる。波浪や、海面せん断応力を介しての海流、広域海浜流の再現には、POM (Princeton Ocean Model) を基盤とした改良型海洋モデルと、広域海浜流モデルを用いる。これらの外力は、気象モデル MM5 の地上風、降雨量と、海面での運動量輸送、波浪を介しての運動量輸送、熱、水蒸気と大気乱流エネルギーの界面輸送を介して気象モデルと結合している。

以上のように、生存圏における流体運動を再現するモデルは、各分野で独自に開発され、高いレベルで実用に供されている。これらのソフトウェア資源を結合させ、メソスケールでの「水系一貫」した水循環、物質輸送を数値的に再現することが可能となっている状況である。本環境シミュレーターは、これらのコード公開モデル、開発した数値モデル、漂砂・流砂モデル、粘性底泥モデル、生態系モデル等のモデルを、相互作用を考慮した形で結合し、「大気・陸面・海洋結合モデル」を完成させようとするものである。モデルの適用例として、これまで実施された河川・海岸系の防災・環境保全研究を紹介する。さらに、地球観測システムや詳細な地域観測により、モデルを検証するとともに、観測データを同化した4次元モニタリングを行い、気象・海洋の全球モデルとリンクさせた熱、水循環および物質輸送のメソスケールでの再現・予測を行うための大気・流域・海洋結合モデルの開発の可能性を検討する。

3.2 現在使用できる数値モジュールの概要

(1) メソ気象モデル：MM5

MM5 は、米国の NCAR (National Center for Atmospheric Research) で開発されたオープンドメインのメソスケール気象モデルで、非静力学方程式系に基づいた、鉛直座標系には、等圧面座標 ($p-\sigma$ 系) を用いている。このモデルでは、パラメータ化した雲物理過程を用いており、使用する水平スケールや目的によって積雲パラメータを幾通りかに設定する。また、地表面境界スキーム等の物理過程もオプション設定する。解像度の異なる複数の計算領域を

同時に計算する。multiple-nesting、観測データ同化はナッジングによる四次元データ同化が可能である。また、台風のシミュレーションを行う際には、インプットデータの台風の中心気圧や最大風速などを置き換え、強化するボーガス台風(Davis&Low-Nam,2001)がサポートされている。

(2) 外洋波浪モデル：WW3 および SWAN

米国環境予測センター NOAA の Wave Watch III (WW3) を用いている。これは、波浪のエネルギー平衡方程式を基礎式としているモデルで、水深、平均流の変化に伴う波浪の屈折、変形特性を考慮している。ソース項はそれぞれ、風からのエネルギー供給項、非線形エネルギー輸送項、白波砕波によるエネルギー消散項および海底摩擦項で構成されている。これらのソース項は全て波浪の方向スペクトル密度に依存し、移流項とのバランスで方向スペクトル密度が決定される。ソース項に非線形干渉等の非線形性を考慮した第 III 世代の波浪モデルである。また、基礎方程式は完全非線形相互作用の計算も可能である。風からのエネルギー供給項は Tolman and Chalikov(1999)の数値計算公式が用いられており、実波浪の発達への適用性が高いことが示されている。

SWAN は海洋波浪の浅海での挙動を取り入れたもので、3波共鳴、回折効果、水深に規定される砕波効果が導入されている。

(3) 海洋モデル：POM および MITgcm

プリンストン大学の Princeton Ocean Model (POM) は、静水圧分布、Boussinesq 近似を仮定した σ 座標系の準3次元数値モデルであり、オープンソースコードであることから近年世界中で多くの分野の研究に使用されて、コード面での信頼性、適用性と問題点が明確にされている。乱流場には Mellor & Yamada (1982) の 2.5 次モーメント乱流クロージャーモデルが使用されている。POM の問題点としては、 σ 座標系でのスカラー量輸送計算における数値分散の介入がある。直交座標系における密度の定義位置と σ 座標系における密度の定義位置が異なることによる計算上の誤差である。

MITgcm (Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model) はマサチューセッツ工科大学が開

発した大気・海洋循環モデルで、2002年に公開された。このモデルの特徴は、大気、海洋、それぞれの流体を支配する方程式の間の同形性 (isomorphism) を利用し、一つの流体力学のカーネルで両方のモデルを解く点にあり、非静力学的方程式の計算が可能で、対流のような小さなスケールから、地球大循環のような大きなスケールまで、幅広いスケールの現象に用いることができる。また、直交曲線格子を用いているが、lopped cell (切取セル) により地形の不規則さの問題に対応している。このモデルは気象学、海洋物理学だけでなく、海岸工学の方面でも今後の利用が期待されるモデルである。

(4) 流域水文モデル : HSPF

HSPF (HYDROLOGIC SIMULATION PROGRAM - FORTRAN)は、運動学的または定常的な水文事象、水理学事象の連続的なシミュレーションモデルで、固定した空間における時間発展計算を行う。さらに、混合土地使用下での栄養塩、有害物質、バクテリア、底質の負荷を予測するための機能が多く付加されている。HSPFの主なModuleは、透水性ランドセグメントを対象とした「PERLND」、不透水性のランドセグメントを対象とした「IMPLND」、および完全混合状態を仮定した貯水池・水路(Reach and Reservoir)を対象とした「RCHRES」である。

(5) 陸面モデル : SOLVEG

日本原子力研究所で開発されたこのモデルは、大気、土壌、植生それぞれについての1次元多層サブモデル及び植生層内の日射及び長波放射伝達を計算するルーチンにより構成されている。また、CO₂ 交換過程は各サブモデルに含まれている。モデルは、地上気象データを上部境界条件として用いて、大気接地層(地上10m程度)、表層土壌(深さ2m程度)及び植生層(大気層内で可変)における熱、水、運動量、放射、CO₂ 等の変数及び交換量の日変化と季節変化を再現している(永井, 2005)。

(6) 河口モデル : ECOMSED(COSINUS)

河口海岸、エスチャリー管理において粘着性の微細粒子で構成される底質(底泥)の移動特性を知ることが重要である。例えば、湿地帯の保全、航路維持、浚渫土砂の移動、シルテーション、汚染物質問題に

おいて底泥の挙動を予測できるモデルが必要である。米国では海洋モデルPOMのエスチャリー版としてECOMSED (HydroQual,2002)が公表されているが、底泥の挙動は極めてシンプルな形でしか考慮されていない。AESでは、EUのMASTIIIのCOSINUSプロジェクトの成果(Winterwerp,1999)を参考にし、1)浮遊底質と乱流との相互作用、2)フロック(凝集)の成長に及ぼす流れのせん断応力と濃度の関係式、3)圧密による堆積層の強度増加機構、4)沈降抑制効果(hindered settling: 隠蔽沈降)による高密度界面(lutocline)の形成等の底泥の特異な挙動をECOMSEDに導入し、底泥の数値モデル(3次元モデル)を構築した。

(7) 海岸モデル(広域海浜流モデル)

京都大学防災研究所で開発されたモデルで、平均流場、波浪場、乱流場の各モジュールから構成される。京都大学防災研究所大渦波浪観測所での観測(例えば山下ら1998)で明らかにされた平均流に及ぼす風応力と波浪応力との影響を導入することで、波浪、乱れ、風の影響を考慮した海浜流、すなわち広域海浜流場の再現計算を行うためのモデルである。水平方向には直交座標系、鉛直方向には σ 座標系(曲線座標系)を用いた差分法計算コードである。平均流場の計算には、静水圧近似とBoussinesq近似を仮定し、 σ 座標系に変換した運動方程式と連続式および鉛直方向に積分した連続式を基礎方程式系としている。乱流場にはMellor & Yamadaの2.5次モーメント乱流クロージャーモデルを使用している。波浪モデルでは、時間平均波浪場に対するエネルギー保存式(Battjes & Janssen,1978)と砕波surface roller内に対するエネルギー保存式(Nairn et al., 1990)の2式を用いて、砕波による海面せん断応力を算定するとともに、これを生成項として乱流モデルに接続させる構成を取っている。さらに、乱流モデルから求められた鉛直方向渦動粘性係数は、平均流モデルでの鉛直渦動粘性係数として用いられ、波浪モデルから求められた砕波による海面せん断応力は平均流モデルと乱流モデルでの海面境界条件として考慮される。したがって、平均流場は鉛直渦動粘性係数を通して乱流場と、砕波による海面せん断応力を通して波浪場と関係付けられる。また、乱流場は平均流モデルで求められた流速成分と水位変動を通して平均流場と、砕波によ

る海面せん断応力を通して波浪場と関係付けられる。さらに、平均流場と乱流場には風による海面せん断応力を通して風域場も考慮される。

2006年4月現在、AES で使用できる数値モジュールを図3に示しておく。今後、モジュール追加変更が頻繁に行われることが予想されるが、構築概念は継続される。

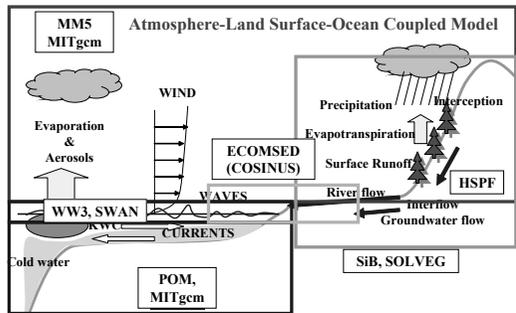


図3 2006年4月現在、AES で使用できる数値モジュール

4. アジア環境シミュレーターの国際環境協力への活用

アジアシミュレーターの構築とアジアの途上国を対象としたケーススタディを通して社会的環境管理能力の形成方法を検討する。この研究過程で、個別の要素として留学生に研究テーマを与え、個々の研究成果を総合化することで、アジアシミュレーターの更新（データベース、手法のバージョンアップ）を行う。留学生は帰国後もアジアシミュレーターを基盤とした環境管理能力の形成に関する研究、行政、市民活動を実施し、広島大学大学院国際協力研究科はこれを継続的に支援することで、人的資源を開発するとともに、人的ネットワークを形成する（国際協力研究拠点形成）。以上により、持続可能な国際環境協力に関する教育、研究体制を構築する。

ここで示したアジア環境シミュレーターは、インドネシアのバンドン工科大学（ITB）地球物理学教室にも設置する計画がある。これにより、現地主体型の環境アセスメントや環境教育に貢献できるようにするとともに、AES を通しての人的ネットワークの維持、拡大を期待している。

参考文献

- 永井晴康, 2005, 交換過程を含む大気—土壌—植生モデル: SOLVEG2 の開発, RIST ニュース No.39, 10-22.
- 山下隆男・加藤 茂・路 明・安田孝志・飯野智彦, 1998, ADCP により長期連続観測した海浜流の鉛直分布とその風, 波浪応答, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.201-205.
- Bailard, J. A., 1981, "An energetics total load sediment transport model for a plane slope beach", Jour. Geophys. Res., Vol. 86, No.C11, pp.10,938-10,954.
- Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen, 1978, Energy loss and set-up due to breaking in random waves, Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp.569-587.
- Davis, C. and Low-Nam, S., 2001, The NCAR-AFWA Tropical Cyclone Bogussing Scheme, Report for Air Force Weather Agency.
- HydroQual, 2002, A Primer for ECOMSED Version 1.3; User Manual, HydroQual Inc., New Jersey.
- Kato, S., and T. Yamashita, 2001, Three-Dimensional Simulation and Its Verification by ADCP Observations for Coastal Currents, Recent Advances in Marine Science and Technology 2000, PACON International, pp.89-98.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., 20, pp.851-875.
- Nairn, R.B., J.A. Roelvink and H.N. Southgate, 1990, Transition zone width and implications for modeling surfzone hydrodynamics, Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp.68-82.
- Singh, Vijay P. F. and David A. Woolhiser, 2002, Mathematical Modeling of Watershed Hydrology, Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 270-292.
- Tolman, H.L., and D.V. Chalikov, 1996, Source terms in a third-generation wind-wave model, J. Phys. Oceanogr., 26, pp.2497-2518.
- Winterwerp, H., 1999, On the dynamics of high-concentrated mud suspension, Report 99-3 Communication on Hydraulic Engineering, Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.

(2007.2.23 受理)

Asian Environment Simulator (AES)

Takao YAMASHITA

Professor

Graduate School for International Development and Cooperation,

Hiroshima University

1-5-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8529, Japan

E-mail: tkoyamashita@hiroshima-u.ac.jp

Abstract

The mathematical principle and numerical codes for geo-fluid dynamics in the meso-scale region, have been uniquely developed in the different fields. Nowadays it seems to be possible to combine these software resources to reproduce numerically a water circulation and material transportation in the land-river-coast system. With this situation, an environmental simulator in the humanosphere has been constructed by linking developed numerical models as an Atmosphere-Land Surface-Ocean Coupled Model. This paper proposes the development of Asian Environment Simulator (AES) in the Graduate School for International Development and Cooperation (IDEC), Hiroshima University, which is based on the developed Atmosphere-Land Surface-Ocean Coupled Model and the related database, such as DEM, land-use, soil, satellite data of TRMM, ALOS, IKONOS. Application of AES to environmental assessment and prediction in the developing Asian countries, may provide us scientific information for interdisciplinary studies on the development of social capacity for environmental management that is the 21st Century COE program at IDEC.