

環境シミュレーター —海岸工学への貢献—

Environment Simulator : Contribution to Coastal Engineering Problems

山下隆男¹・金 庚玉²・李 漢洙³・モハメド ハガグ⁴

Takao YAMASHITA, Kim Keyongok, Han Soo LEE and Mohhamed Haggag

Based on the global meteorological forecasting system starting in 1990's, earth system simulation models, such as earth simulator, have been developed and applied to many kind of environmental assessment. This paper introduces the frame work and applications of the Asian Environment Simulator (AES) which consists of main models for atmosphere, land surface, ocean, hydrology, dynamic vegetation, and coastal, river, estuary models and urban air-water environment model. AES has been developed in IDEC, Hiroshima University for international sustainable development and cooperation. Some examples of its application to the Coastal Engineering problems were shown for future development of coastal engineering studies collaborating with river engineering, hydrology, biology and meteorology.

1. 緒 言

1990 年初めに海洋モデルが気象モデルに導入され全球規模の気候変動予測が可能になって以来, これに関連する科学技術は急速な進歩を遂げ, 今ではエアロゾル, 動的植生モデルを融合した地球環境予測モデルへと進化してきた. この進歩に伴い, 地球科学の分野では各種数値モデルが多く組織により作られ, 公開されるようになってきた. 海岸工学の分野でも, 海洋モデル POM やメソ気象モデル MM5 (PSU/NCAR) は, 一般の研究者の研究ツールとしてのみならず, 今や業務レベルでの活用が頻繁に行われるようになってきている. 特に, 高潮研究においては気象・海洋結合モデルは大きな研究の進展をもたらしているように思われる. 海岸工学の将来展望として, 沿岸域での環境・防災問題に適用することを目的としたシミュレーターを構築することが期待される. 気象学は勿論, 河川工学, 水文学, 森林学, 生態系学との結合により, 流域・海域で一貫した物質輸送, 水循環をシミュレーションできる数値システムの活用が海岸工学の分野においても必要であると思われる. なお, 公開されている数値モデルは 20 世紀後半の世界的な研究成果の結晶であり, これらを結合することで複雑系における相互作用を評価することが本研究の目的で, 数値モデルそのものに関するオリジナリティを追求するものではない. ここでは, 広島大学において国際環境協力学のために構築してきた「アジア環境シミュレーター」を紹介するとともに, この種のシミュレーターが気候変動を含むような海岸工学研究に貢献できる可能性を示す.

2. アジア環境シミュレーター (AES)

「アジア環境シミュレーター (AES)」は図-1 に構成を示すように, 大気・海洋, 大気・陸面および河口・海岸の 3 パートを結合した数値モデルシステムである. 基本となるモデル要素は, 現在既に多くの研究者によって使われてきた数値モデルである. 気象モデルは MM5, 海洋モデルは MITgcm または POM, 波浪モデルは WW3 または SWAN, 陸面モデルは SOLVEG2, 水文流出モデルは HSPF, 河口モデルは ECOMSED + COSINUS, 海岸モデルは広域海浜流・海浜変形モデル, 以上のモジュールが解析対象に応じて結合を変えて使用できる.

ハードウェアは CPU の変更, 追加が可能な PC クラスタで, MPMD モデルカップラーで結合した並列計算システムとなっている. 比較的安価で, 何処の研究室でも構築できるシステムである. なお, AES は途上国の環境管理能力を向上させるため, 現地の研究者が独自に環境影響評価を実施することを目的としている.

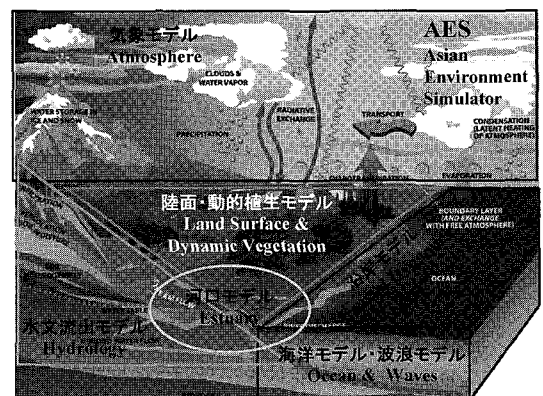


図-1 アジア環境シミュレーター構成の概念図

- 1 正 会 員 工博 広島大学教授大学院国際協力研究科
- 2 正 会 員 工博 広島大学助教大学院国際協力研究科
- 3 学生会員 修(工) 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
- 4 学生会員 修(工) 広島大学大学院国際協力研究科開発科学専攻

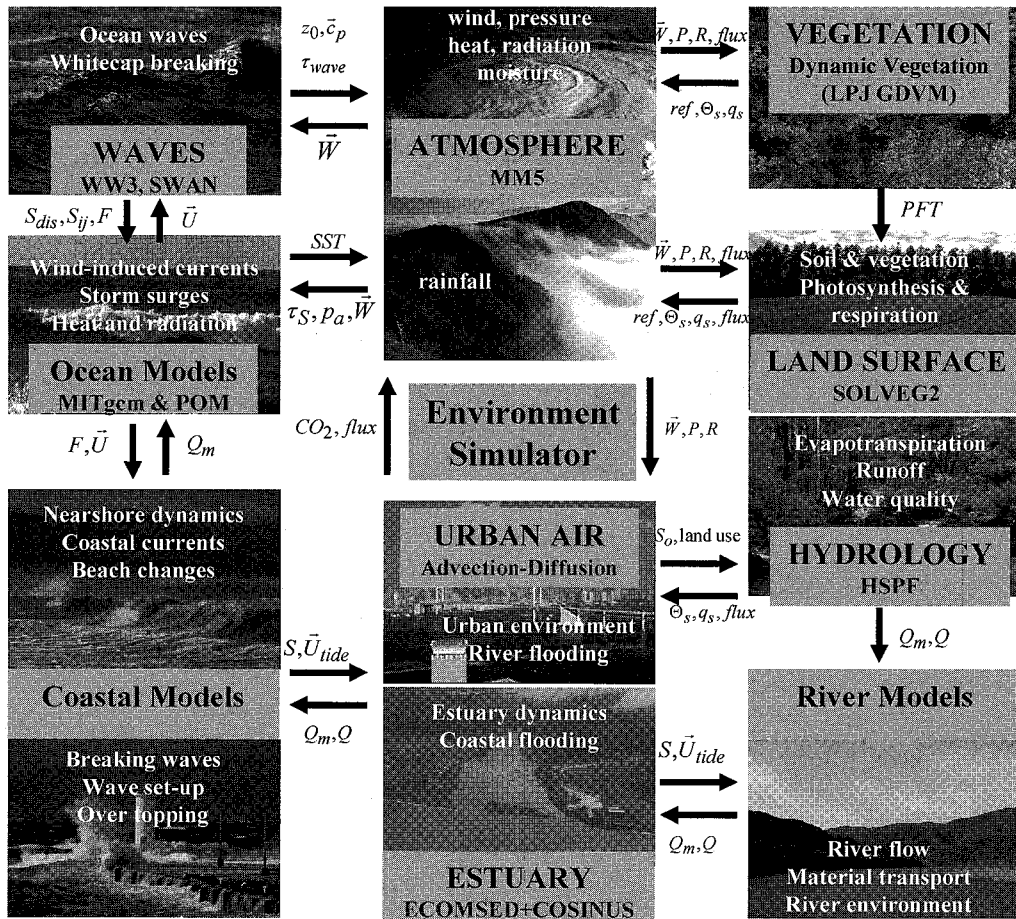


図-2 アジア環境シミュレーターの構成と主な変数の授受。
気象、波浪、海洋、海岸工学モデルと動的植生、陸面、
水文、河川工学モデルが河口、都市大気・水質モデル
と結合している。

図-2に、現在、広島大学で稼動しているアジア環境シミュレーターの構成を示す。ただし、Dynamic Vegetationは現在導入中で、使用実績は未だ無い。図中の主な受け渡し変数の記号は、以下のような定義である。 $z_0, \bar{c}_p, \tau_{wave}$: 海面の粗度高さ、ピーク周期の波速、波動せん断応力、 S_{dis}, S_{ij}, F : 白波波エネルギー減衰率、radiation 応力、波浪エネルギーフラックス、 $\tau_s, p_a, \bar{W}$: 海面乱流せん断応力、海面気圧、風速ベクトル、 $\bar{U}$: 海流の流速、 Q, Q_m : 流量、物質輸送量、 $S, \bar{U}_{tide}$: 塩分濃度、潮流流速ベクトル、 $S_o, land\ use$: 物質の発生、消滅量、土地利用、 P, R : 降雨量および放射量、 $\Theta_s, q_s, flux$: 地表面温度、地表面比湿、運動、熱、水蒸気等のフラックス全般、 ref : アルベド、 co_2 : 二酸化炭素等のトレーサガス濃度、 PFT : Plant Functional Typeを示している。これ以外にも、モデル間での変数の受け渡しは多く存在するが、ここでは代表的なもののみを表示してある。

このアジア環境シミュレーターの最大の目的は、地球環境を量的に把握し、開発のインパクトを量的に予測することで、社会的な環境管理能力を向上させ、政策立案の意思決定に援用することにある。国際協力研究科での環境協力学や環境保全研究の基本ツールとして活用されており、進行中の21世紀COE研究「社会的環境管理能力の形成と国際協力拠点」の基盤を形成している。周知のように、海岸工学の問題においては、海岸だけでは解決できない部分が重要な検討課題であり、研究テーマになっていることから、森林、里山、流域、河口、海岸、海洋を統合した環境シミュレーションが重要になっている。これらの問題に対する研究ツールとして、ここで紹介する環境シミュレーターが有効に利用されるようになる日はそう遠くないものと思われる。多くの大学、研究機関やコンサルタントにおいて、このようなシステムが導入され、環境、防災研究が進展するよう、PCクラスターの構成に関するハード面の情報を以下に示しておく。

CPU: 最近マルチコア CPU が発売され高い計算能力の構成が容易になっている。現在、著者らが使用しているものは、Intel Xeon 3.0 GHz (2 CPUs), 4 GB メモリーを 12 ノードとグラフィックス、コンパイル、CPU 間通信、制御用のメインノードで構成されている。DAS (Direct Attached Storage) 10,000 回転 300 GB SCSI HDD5 台, Gigabit Ethernet Switch, KVM (keyborad, video, mouse) Switch とモニター、ラックのハード構成である。

OS: PC クラスター用には多くの種類の OS があるが、ブート可能 CD を使用して、オペレーティング・システムおよび必要なグリッド・ミドルウェア・セキュリティ・ソフトウェア・パッケージを全てインストールしている ROCKS クラスター・パッケージング・システムを用いている CentOS (Community Enterprise OS) を使用すればグリッド管理が楽である。

ライブラリー: 並列計算用ライブラリー MPICH, LamMPI etc. (CentOS にインストール済), Compiler: GNU, Intel compiler etc. (CentOS にインストール済), Graphic: GMT, FERRET, GrADS, OpenDX 等。

3. 海岸工学問題への適用

これまでに海岸工学の対象範囲で、環境シミュレーターによって実施されてきた研究例と、そこから出てきた新しい知見と問題点を以下にまとめて示す。

3.1 高潮シミュレーション

(1) 瀬戸内海の高潮

高潮の数値解析には、藤田や光田の台風モデルのように、同心円型の気圧分布を仮定し傾度風をベースとした簡易な台風モデル、いわゆる「傾度風台風モデル」が気象場の再現計算に多用されてきた。しかしながら、わが国の主要湾沿岸部の風域場には、周囲の陸上地形の影響が強く反映され、高潮や高波の数値シミュレーションを困難なものにしていた (山下ら, 1996)。1990 年代になってメソ気象モデルが使用されるようになり、更に 90 年代後半には米国海洋大気局から MM5 が公開以降、わが国では、気象場における陸上地形の影響を考慮するために、MM5 が使用されるようになり、高潮、高波の再現精度が格段に向上した。環境シミュレーターを使った研究例を以下に示す。

図-3 は瀬戸内海の高潮の再現計算に、MM5 による気象解析を適用した最初の例であるが、現在では同様の解析手法を適用し精度の高い高潮・高波シミュレーションが可能になっている (金・山下, 2004)。

(2) 高潮・波浪・潮流相互作用

ベンガル湾 (Kim & Yamashita, 2005), メキシコ湾

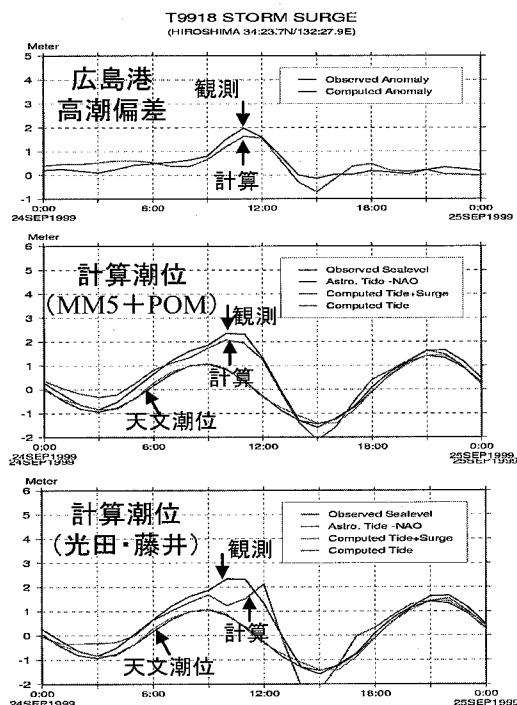


図-3 瀬戸内海の高潮計算に MM5 を適用した例

(金ら, 2006), 有明・八代海, 黄海の高潮においては、波浪と高潮および潮流の相互作用が問題となる。すなわち、波浪 (風波) は大気エネルギーを海洋の流れに伝達する役割を負っており、海洋の流れは波浪の伝播や変形を発生させる。潮汐も、高潮によって発生する吹送流に足しあわされる形で海洋の流れの一部として波浪変形に寄与する。このような相互作用場では風波の白波砕波がエネルギー形態の変換過程に寄与するため、この効果を導入したモデル連携が重要である (山下・中川, 2001)。金・山下 (2005) は、八代海での高潮・波浪・潮汐の相互作用を検討し、極浅海域では白波砕波せん断応力の効果が重要で、これを考慮すれば、松合地区の観測高潮が再現できること、極浅海域での流れによる波浪変形効果も同時に考慮すると、これにより高潮が若干減衰することを示した。なお、ベンガル湾においては、高潮・波浪・潮汐の相互作用は極めて大きくなるが、観測データが無いので、数値実験の域は出ない。

(3) 高潮・高波による越波, 浸水解析

沿岸域での実際の高潮災害外力の解析には、高潮・高波による越波, 浸水量を解析することが求められる。このため、以上に示してきた高潮と波浪の計算結果を沖波条件として与え、(財) 沿岸海洋センターの提供している CADMAS-SURF を用いた沿岸域での砕波, 波浪による海面上昇, 越波を考慮した詳細解析を実施し、災害外力を解析する方法が、沖縄県の高潮災害ハザードマッ

プ作りにおいて実務に適用されている。今後、このような、(高潮経験式、傾度風型台風モデル高潮解析に次ぐ)第三世代とも呼べる高潮・波浪解析の手法が、実務レベルで積極的に使用されるものと考えられる。

3.2 周辺海域の海水温に影響される降雨量解析

海岸工学と気象学、河川工学、水文学の連携研究、調査は極めて重要な分野で、今後、環境シミュレーターを通して活発に研究、調査が進展することが期待される。ここでは、周辺海域の海水温に影響される降雨量解析を例に取って、黒潮の海面水温を高解像度で考慮した場合、WINDAS データを同化して風域場の再現性を高めた場合について、海洋・気象・水文の連携シミュレーションの研究例を紹介する。

(1) 紀伊半島・四国の降雨量解析 (JCOPE データの適用)

図-4 に、黒潮の海面水温を高解像度で考慮した場合に再現性が向上した紀伊半島、四国の降雨量シミュレーションの結果の一例を示す。1/12 度の解像度の海面水温分布を JCOPE データで与え、これと MM5 とを連携させた単純な数値実験であるが、1 度解像度の海面水温を与えた場合に比べ、陸上降雨量の時空間分布推定制度が格段に改善されることが示された (山口ら 2005)。

Simulation results

Distribution of total amount of precipitation

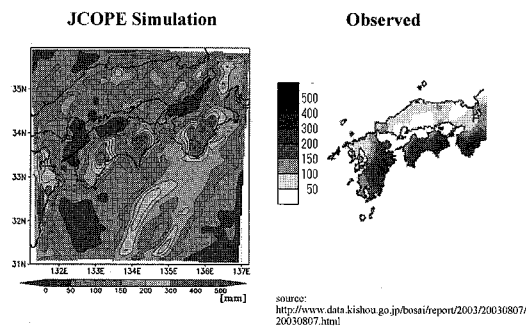


図-4 黒潮の海面水温を JCOPE データで考慮した場合の紀伊半島、四国の降雨量シミュレーション

(2) 南九州の豪雨解析 (WINDAS データの同化)

2006 年の梅雨末期は、西日本では稀に見る多雨であり、豪雨災害も発生した。これはエルニーニョによる地球規模での異常気象の一端であるが、海洋、陸面、気象モデルの結合により、この現象の再現が可能になってきた。

気象場の解析には MM5、ポテンシャル蒸発散量の推定には FAO-PENMAN-MONTEITH 方程式を用いた。陸面モデルには SOLVEG2 を使い、CO₂ は一定として計算した。海面水温には海洋モデルの代わりに、0.5 度解像度でバイ、船舶、衛星 (MODIS) の海面水温の 24 時間

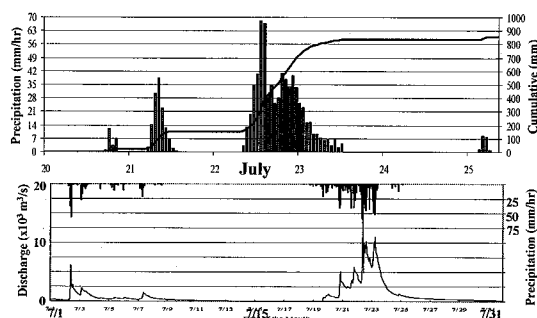


図-5 2006 年 7 月 20-25 日の阿久根における降水量の再現 (上). および 7 月の観測降雨量と川内川のハイドログラフ計算 (下)

データが変分内挿されている NCEP の RTG_SST データを用いた。

海面水温と同様、風域場の再現性も降雨予測に大きく影響する。このため、気象モデルの精度を向上させる手法として、Wind Profiler の観測データを同化することが考えられる。ここでは、気象庁の WINDAS データを MM5 に同化した。陸域植生および土壌による CO₂、熱、水蒸気の収支も、海洋と同様に気象モデルに影響を及ぼす。メソ気象モデルで用いられている接地境界層モデルがそれに対応するが、精度、解像度の面で地域規模の気象解析に適用するには改良する余地が多いに有る。このため、本研究では、陸面モデルとして、大気、植生、土壌の 3 層鉛直 1 次元モデルである SOLVEG2 を用いた。このモデルは、植生、土壌を介しての CO₂、放射、熱、運動量、大気乱流、水分フラックスの収支をキャノピー内で厳密に解くモデルで、MM5 とキャノピー頂部で相互作用する。また、水文流出には米国 EPA の HSPF を用いた。気象モデルの計算領域は 4 回のネスティング (D1 ~ D4) を行い、最小領域では気象モデルと陸面、水文流出モデルとの相互作用を考慮した計算を行った。対象期間は 2006 年 7 月の 1ヶ月で、水文流出は川内川流域のみを対象とした。図-5 に阿久根における降水量の再現結果 (上)、観測降雨量と川内川のハイドログラフ計算結果 (下) を示す。

これらの結果を総合して以下の主要な結論が得られた。

- 1) 2006 年は九州南海上の水温が高かったため、発達した梅雨前線が九州南部に豪雨を発生させた現象が再現できた。
- 2) WINDAS データの同化により降雨時系列予測の結果は改善されたが、RTG_SST データによる海面水温の効果はさほど大きくはなかった。
- 3) 阿久根における風速ベクトルの観測値と計算値の対応は極めて良く、WINDAS データの同化の効果が確認できた。
- 4) 川内川流域からの河川流量は豪雨時の 7 月 22, 23 日に 10,000 m³/s を超える結果を得た。
- 5) 人吉盆地から鹿児島県にかけて豪雨地帯が発生していたことが再現できた。7 月

20～25 日間の総降水量の再現値は 860 mm を超えていた。

3.3 その他の例

(1) 都市大気質変動シミュレーション

AES をインドネシアのジャカルタ都市圏の気象場の再現とそれによる大気汚染シミュレーション（交通網から排出される NO_x の拡散、吸着）の解析に適用した。図-6 に大気（MM5）・陸面（SOLVEG2）結合モデルの概念図を示す。交通網から排出される大気汚染物質質量は、1 時間毎の交通量観測結果に車種（10 車種）毎の排出係数とトリップ長を推算して算出した。土地利用図には 1990 年および 2000 年（JICA の調査結果）、と陸域観測衛星 ALOS の画像から作成した 2006 年の物を用いた。NO_x の緑地による吸着力は光合成・呼吸による CO₂ と比例させた。図-7 に 2003 年 2 月 1 ヶ月のジャカルタ西観測所での陸面 CO₂ 濃度の解析結果、NO_x の観測・解析値の比較および降水量（雨季）の解析結果を示す。

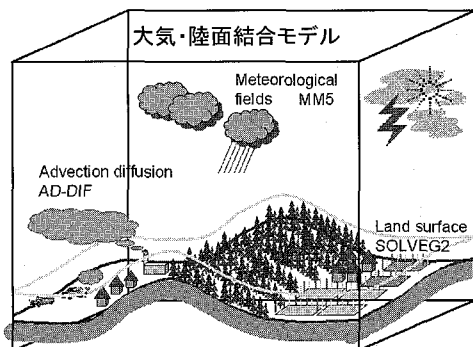


図-6 大気・陸面結合モデルの概念図

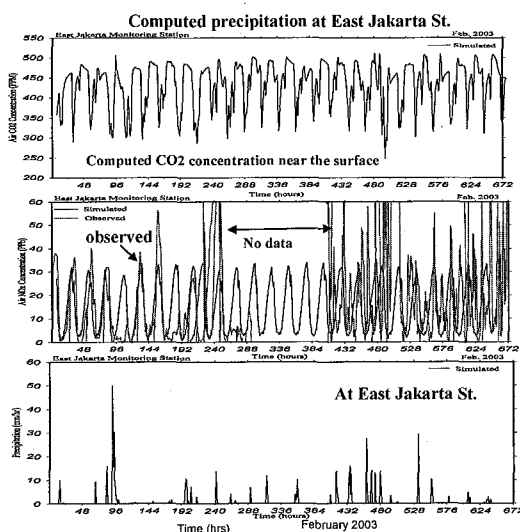


図-7 ジャカルタ西観測所での陸面 CO₂ 濃度の解析結果、NO_x の観測・解析値の比較および降水量の解析結果

(2) LES-MM5-SOLVEG 結合モデルによる局所風域場解析

MM5 で解析できる最小気象場は 1 km 程度までであり、それより細かい気象条件が必要な現象には、Large Eddy Simulation (LES) との接続が有効な方法であると考えられる。AES では、MM5 に接続する局所風域場解析手法として、図-8 に示すように、陸面モデル SOLVEG2 と LES の結合モデルを導入している。

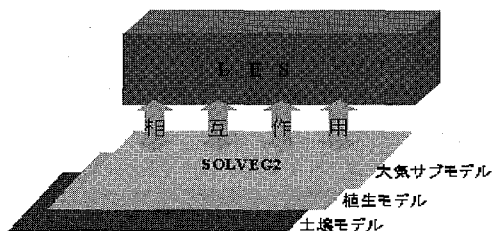


図-8 陸面モデル (SOLVEG2) と LES の結合モデル

4. 結 語

以上、国際環境協力学のために構築してきた「アジア環境シミュレーター (AES)」を紹介し、これが海岸工学に貢献できる方向を示した。多くの海岸工学の研究者が解析ツールとして独自の数値シミュレーターを作成、活用し、これまで見えなかった新たな知見を発見し、沿岸域環境、水環境研究が進展することを期待している。

なお、本研究は、科学研究費基盤研究(B) (No.183101128, および No.18404003) の研究成果の一

参 考 文 献

- 金 庚玉・山下隆男(2004): 大気・波浪・海洋結合モデルによる台風 9918 号の高潮・高波の追算, 海岸工学論文集, 第 51 巻, 236-240.
- 金 庚玉・山下隆男・李 漢洙(2005): 1991 年のサイクロンによるベンガル湾の高潮場の再解析—波浪・高潮結合モデルによる白波砕波の影響評価—, 海岸工学論文集, 第 52 巻, 211-215.
- 金 庚玉・李 漢洙・Mohammed Haggag・山下隆男(2006): 大気・波浪・海洋結合モデルによるハリケーンカトリナの高潮場のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第 53 巻, 416-420.
- 山口弘誠・山下隆男・金 庚玉(2005): メソ気象モデルによる降雨・地上風シミュレーションに及ぼす黒潮海域 SST の影響, 海岸工学論文集, 第 52 巻, 366-370.
- 山下隆男・中川勇樹(2001): 白波砕波せん断応力を考慮した波浪・高潮結合モデルによる台風 9918 号による八代海の高潮の再現, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 291-295.
- 山下隆男・別宮 功・ギャリーワトソン(1996): 陸上地形および表面粗度を考慮した高潮の数値計算, 海岸工学論文集, 第 43 巻, 266-270.
- Kim Kyeongok and T.Yamashita (2005): Wind-wave-surge coupled model: application to storm surge simulation in the Bay of Bengal, Asian and Pacific Coasts 2005, 1590-1604.