

河川・海洋を中心とした地球規模の物質循環モデルの開発

A submodel of global material transport via surface water circulation

松岡 譲[†]・辻本 渉^{††}

Yuzuru MATSUOKA[†], Wataru TSUJIMOTO^{††}

Abstract – We are now developing a comprehensive global environmental model, and this is one of the submodules focused on material transport via surface water runoff and ocean circulation. The model is composed with basin-scale watershed runoff part and global scale ocean circulation part. Both are supported by a global scale geographical information system and organically connected with other modules. Though the submodules written here are in preliminary stage and expected to be refined by fine tuning effort, global environmental crisis of these day requires strongly such a detailed but comprehensive approach.

Keywords: Global Environment, mathematical model, ocean circulation, surface runoff

1. 研究の目的・概容と地球環境研究としての特徴

現在、地球温暖化、オゾン層の破壊、酸性雨等の地球環境問題が大きくクローズアップされ、政治・経済上の大きな課題となっている。これらの事象は、自然のみならず社会・経済的な要素に起因がありそれらを総合した取り扱いが必要となる。こうした観点から、著者らは地球環境モデルのサブモジュールとしてのエネルギー経済モデル、温室効果ガス排出モデル及びそれらの大気反応・海洋取り込みモデル(松岡, 1990, 松岡・森田・甲斐沼, 1992), 人口推計モデル(松岡・森田, 1993), 大気物質循環モデル(松岡・辻本, 1992, 松岡, 1992)などの開発努力を行ってきた。ここに報告するものも、その一環であり、陸上から河川を経て海洋循環にいたる人為起源物質の輸送を扱うモデルについて、その概容と主要な出力例を述べる。本論文で対象とするモデルは、大きく二つの部分に分かれる。その一つは、地表における物質の輸送過程をとらえる河川流域モデルである。その二は、海洋での移動を扱う海洋大循環モデルである。また、排出量の算定には対象物質ごとの排出量算定モデルを用いるが、ここでは、紙幅の都合上、対象外とする。以上のモデルを組み合わせることによって、地表面、海洋における物質の輸送過程を連続して追跡することが可能となる。当面の間、対象とする空間スケールは地球規模とし、時間スケールとしては、数十年以上と想定しよう。この仮定により、表面流出の時間的なラグはそれほど問題とならなくなる。対象物質に関しては、水系経由の表面流出による人為起源物質を仮定する。ただし、ほとんどの物質についてこうした割り切りは不可能であり、対象によって大気循環などと他相の移動循環モデルとカップリングしなければならないことに注意しなければならない。

さて、両サブモデルとも現段階においては、不十分な点はいくつかある。ここで示したような事象に対する接近法としては、まず、対象場を特定し一つ一つ問題となる点を解明していく積み上げ型のアプローチが通常であろう。しかし、本研究では、まず、トップダウン的に総合モデルを構築し、直面する問題と必要に応じて逐次、改良するとの方向をとる。地球環境問題に対応するには、それが必須であると考えからである。その意味において、本研究は、部分部分においては改良すべき点を多く残すが、標記題目の出発点としては大変意味あるものと考えている。

2. 水系ルートによる流出プロセスをどう取り扱うか

河川などの表面流出を主体とした移動事象を取り扱うためには、流域を解析の基本単位としなければならない。その上で、河道位置、地表の傾斜、地勢を考慮して、流域からの流出点を定め流出負荷の集積を必要がある。この作業を、本研究では、以下のような方法で、世界全域にわたり行っている。まず、流域区分・流向算定根拠となる数値地形モデル(DTM)としては、Edwards(1986)が整理したものをベースとする。このデータは、米国NOAAのDigital Bathymetric Data base 5を中心に、北米、ヨーロッパについてはNGDC/NOAA(地球物理データセンター)の5分メッシュ平均標高データを、オーストラリア周辺については、ニュージーランド資源局の5分メッシュ平均標高データを合成し、アフリカなどの分解度が低くデータの得られない点については、適宜、100フィート等高線で補間を行ったものである。主として、4種の異なるデータが合成されており、分解度は東西方向5分、南北方向5分である。最低標高は-10,376m、最高標高は7833mである。ハワイ、日本、アフリカにおいては、海岸を除き5分から10分ずれているほか、細部については多くのエ

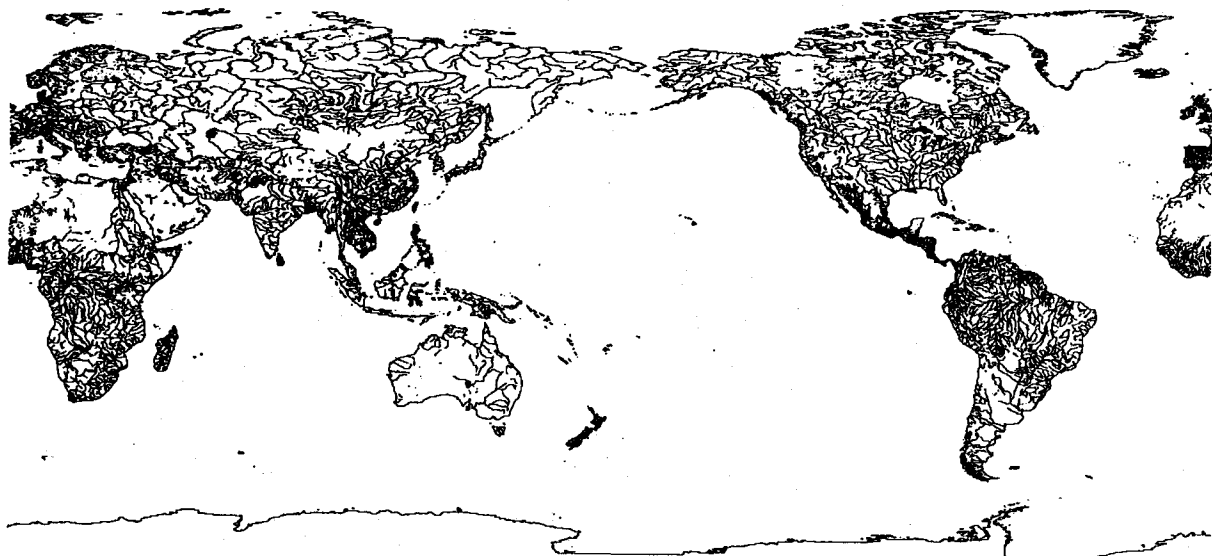


図-1 河道・内水面の配置
Distribution of inland water rasters

ラーが見受けられる。また、5分DTM(平均7.4kmメッシュ)を、流出解析作業のベースとすることには問題も多いが、他に適切なデータが無いこと、メッシュ数(約933万メッシュ)が妥当であり著者らの計算能力で取り扱い可能であることなどの理由から、これを採用した。なお、このデータは、現在、NGDC/NOAAが修正作業中であり、本研究で使用したものは、1992年時点にてNGDCから入手したものである。河、湖沼位置については、主に、二つのデータベースを参照した。その一は、米国CIA (U.S.CIA, 1991)が作成中であるRWDB2 (Relational World Data Bank II)である。このデータベースには、1992年時点の配布データには、22,278の単位流路ベクトル及び河川水面エリアベクトル、8,213の湖沼エリアベクトルが含まれており、全世界をほぼカバーしたと報告されている。また、その名前付けも、ほぼ半分程度終了している。なお、本研究作業で使用了ものは、1992年秋配布のものである。その二は、米国Defense Mapping Agency (U.S. DMA)が開発したDCW (Digital Chart of the World) である(U.S. DMA, 1992)。これはONC(Operational Navigation Charts)をデジタル化したものであり、RWDB2と同じく河、湖沼のベクトルデータが採録されている。本研究では、両データベースの河道ベクトル、湖面域エリアを5分メッシュにラスタ化し、表面流出経路として蓋然性の高いメッシュ(以下、内水面メッシュと称する)と想定することにした。その位置を図-1に示す。

さて、地表流の方向は、普通、周囲の標高によって決まるが、河川に流入すれば、その河川に沿って流下し、海洋や湖沼に到達する。本研究で使用するDTMは、赤道上で9.3kmもの幅があること、また、標高単位は1mであること、その正確度は上にも述べ

たように疑問な点が多いことなどの問題がある。したがって、DTMのみから流出解析を行うことは困難であろう。これらのことを勘案し、以下のような作業ステップにより、流出事象を取り扱うプログラムを作成した。まず、河道、湖水面位置情報を解析に取り入れるため、内水面メッシュ及び海域メッシュの標高を、一定値だけ減じ、河道周囲からの流出が、優先的に水面メッシュに流入するように修正する。次に、凹地のfill操作を行う。その際、面積がある一定値より大きい場合には、海洋への流出が無い流域の候補として記憶し

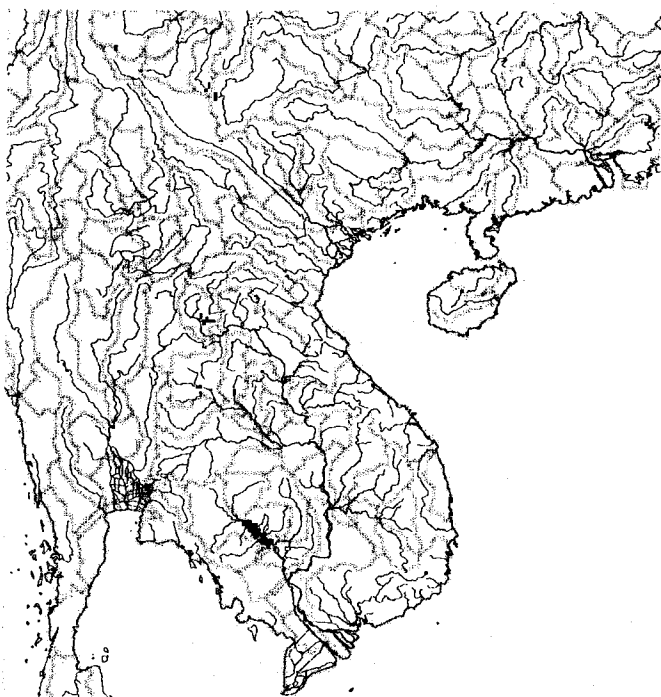


図-2 流域分割の計算経過、インドシナ半島
An example of drainage division

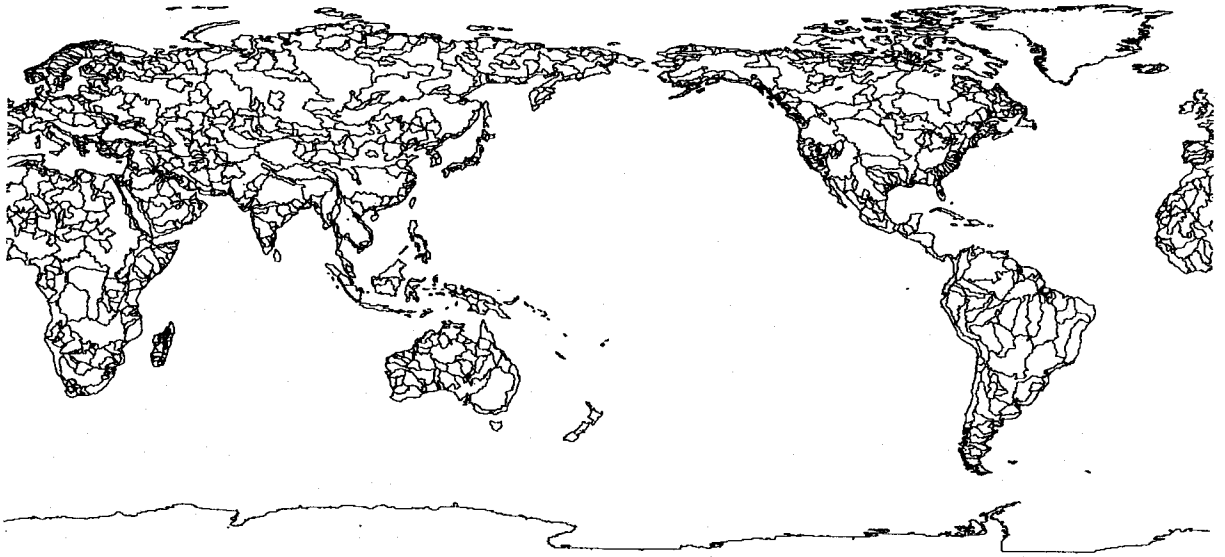


図-3 流域分割図
Watersheds of Global land Area

ておき、別途、他の情報を参照しその取り扱いを定めるプロセスを設ける。第三に、同一標高が連坦する場合には、1メッシュ上流にさかのぼる毎に、流出元となるメッシュ標高に標高単位に比べて極めて微小な値だけ増加させ、それを流出元の作業標高と想定することにする。この地盤高修正作業は、最下流端である海岸メッシュから出発し、順次、上流の可能性のある隣接メッシュについて候補修正地盤高の算出及びその確定を行う。第四に、各メッシュの上流面積を算定する。また、その値と流下先メッシュの上流面積との差である面積増加値を算出しておく。その上で上流面積及び上流面積増加値が一定値より大きいメッシュを探しだし、一意的な番号を付ける。但し、河口以外の海岸に位置する単位流域流出メッシュについては、単連結毎に同一の番号を与える。これらを、単位流域流出メッシュと称することにしよう。最後に、全メッシュについて、そこからの流出水が通過する初めての単位流域流出メッシュの番号を算定し、その番号をそのメッシュが所属する単位流域の番号とする。以上の操作を全陸域について行った。海岸位置は、RWDB2データを使用した。図-2は、計算経過の一部分をインドシナ半島付近について、図示したものである。実線は河道ベクトルデータを、■は湖水面メッシュを示す。ぼかし太線が流域界を示したものである。おおよそ妥当であるものの、おかしくぐりも見られないではない。これはもっぱら基礎とするDTMが粗いこと、河道位置情報とDTMが整合していないことなどに原因するものと考えられる。しかし、現段階にて、われわれには、これを全地域についてチェック・修正する能力はなく、以下の作業にて、問題となった場合を除いては、特に修正を行っていない。こうした作業により単位流域の決定を行ったあと、流出入関係を考慮し、上記の、メ

ッシュから単位流域にアグリゲートするのとはほぼ同様の方法で、単位流域間の結合を行い、大陸及び主要な島をほぼ4500の流域に分割した。図-3にその境界を示す。さて、この方法は、細部に多くの誤りがあるのは当然であるが、全体として使用に耐えうる情報は抽出されているのであろうか。その検討例として、例えば各メッシュ点にて算定した上流面積値を既往の報告値と比較したものを図-4に示す。報告値としては、McMahonら(1988)が整理した全世界の1185の流量観測点に関するデータを使用した。図-4の適合統計量は、自然対数変換後で、回帰の傾き0.98、切辺-0.021、相関係数0.967であり、標準誤差は0.71であった。すなわち、2倍程度の誤りとなるが、その程度は、上流域が広くな

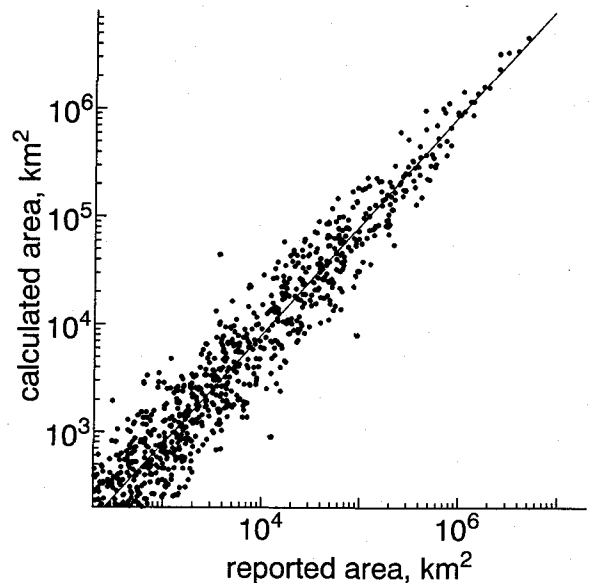


図-4 計算した流域面積と報告値の比較
Calculated and reported drainage areas

るにつれ急速に減少する。従って、改善の余地を残すものの、本論文に示す程度の用途には耐えうるものと判断した。

さて、これらの流域からの排出負荷は、流出メッシュを通過し下流の流域に伝搬され、ついには海洋に流出する。しかし、その追跡作業を行うにあたっては、いくつかの問題点がある。その第一は、カスピ海、アラル海、バルハシ湖、ロブノール、チャド湖流域など海洋に最終流出端をもたない流域の存在である。これらについては、Unesco(1978)などを参照しながら、海洋流出流域から排除する。第二は、流出流量が小さく、表面流出事象による物質運搬作用を、実際上無視する流域である。流出による運搬メカニズムは、対象物質、流域広さ、流域性状により大きく異なるが、例えば、流出高さなどは主要なパラメータとなり得るであろう。実際、流域合計が世界陸地の85%を占める主要河川についての流出負荷報告値 (Dengensら,1991)を用いて、流出高と単位面積あたりの流出負荷量の相関を図示してみると図-5となる。このように、流出高は、研究の進展に伴い、主要なパラメータとして内生化しなければならないであろうが、とりあえず、本論文では、Cogley (1991)が作成したデータベースGGHYDROから単位流域別の流出高(図-6)を求め、それを基に流出率を決定することにしよう。

3. 海洋循環プロセスをどう取り扱うか

河川などから流出した負荷は、大半が沿岸部でトラップされるが、一部は沖合いに流出する。この過程の流達率は、物質及び流出口の状況により異なる。浮遊性物質の場合、5%程度(Martinら, 1991)と想像され

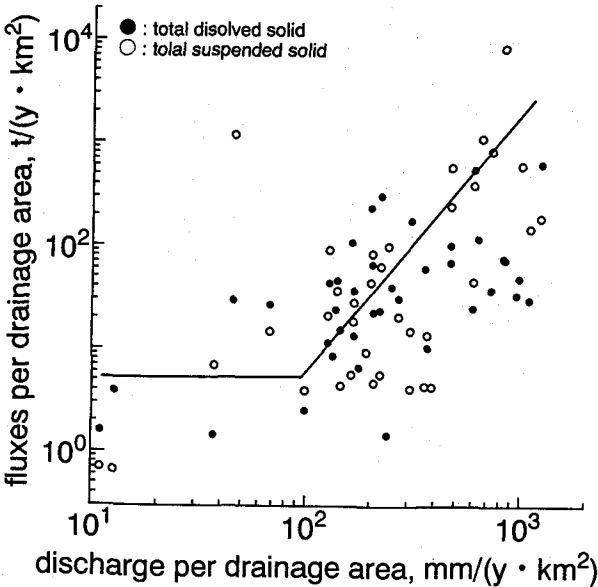


図-5 世界の主要河川の流出高と流出負荷強度
Runoff of water quality and materials

ているが、ミシシッピー、ニジェール川あるいはガンジス、ブラマプトラ川のように、陸棚端に近かったり海峡谷の影響が大きい場合には、より高い値と推定される (Eisma,1987)。N、PあるいはSiなどの栄養塩は、河川、沿岸部の状況及び負荷量によって0~90%と大きく変化する(Billenら, 1991)。その他、金属イオンなどは種々の生物・化学的プロセスの影響を受け50%程度を中心とし、広範囲の流達率値を取る (Martinら, 1991)。このように、沿岸部分のプロセスは極めて重要である。しかし、これらの地球規模の影響効果を検討するには、現段階では、現象の時空間スケール、複雑度の整合など多くの困難な問題に直面する。したがって、ここでは、とりあえず、全沿岸部に一律の流達率

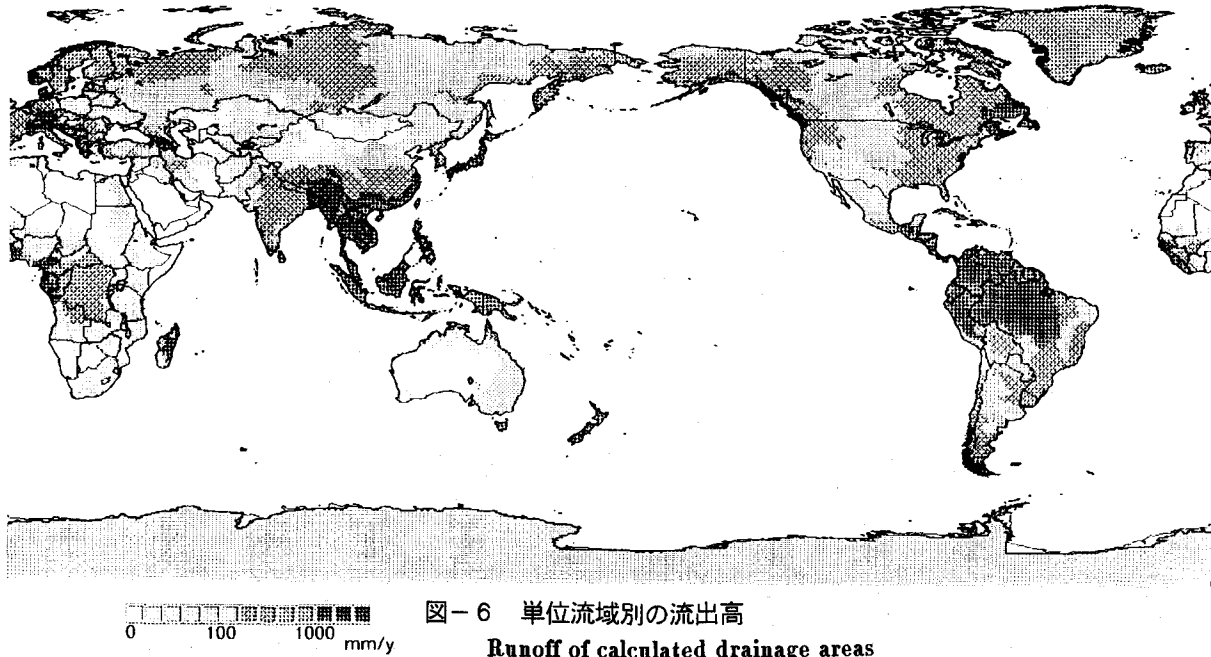


図-6 単位流域別の流出高
Runoff of calculated drainage areas

を想定することにし、研究の進展に応じて精密化することにしておこう。

さて、地球規模の海洋の循環・混合モデルに関しては、以前よりいくつかのグループが精力的に研究を行ってきた。本研究では、その一つであるBryan(1969), Cox(1984)のモデルを基礎とする。このモデルでは大循環の成因として、海面での加熱・冷却、風の接線応力、降水・蒸発などによる塩分変化を考慮し、三次元運動方程式、連続式、エネルギー、塩分及び対象物質の収支式を差分法で時間積分している。

3.1. 基礎方程式

いま、 a を地球半径、 ϕ を緯度、 λ を経度として、 $m = \sec\phi, n = \sin\phi, u = a\lambda m^{-1}, v = a\phi$ などと表現しよう。 u と v に関する運動方程式は、

$$u_t - 2\Omega nv = -\frac{m}{a}(p/\rho_0)_\lambda + G^\lambda \quad (1)$$

$$v_t + 2\Omega nu = -\frac{1}{a}(p/\rho_0)_\phi + G^\phi \quad (2)$$

となる。ここに、 Ω は地球の角速度、 p は圧力、 ρ_0 は基準密度である。また、 G 及び Δ は、

$$G^\lambda = -\frac{m}{a}[(u^2)_\lambda + (uv/m)_\phi] - (wu)_z + mn uv/a \quad (3)$$

$$+ A_{MV}u_{zz} + A_{MH}a^{-2}[\Delta u + (1 - m^2 n^2)u - 2nm^2 v_\lambda]$$

$$G^\phi = -\frac{m}{a}[(uv)_\lambda + (v^2/m)_\phi] - (wv)_z + mn u^2/a \quad (4)$$

$$+ A_{MV}v_{zz} + A_{MH}a^{-2}[\Delta v + (1 - m^2 n^2)v + 2nm^2 v_\lambda]$$

$$\Delta = m^2(\)_{\lambda\lambda} + m(\)_{\phi\phi} m^{-1} \quad (5)$$

である。 A_{MV} 、 A_{MH} は、垂直、水平方向の渦動粘性係数を表す。

静水圧仮定を使用すれば、鉛直方向運動方程式は、

$$\rho g = -p_z \quad (6)$$

となり、連続式は、

$$w_z + \frac{m}{a}[u_\lambda + (v/m)_\phi] = 0 \quad (7)$$

となる。状態方程式 $\rho = \rho(T, S, z)$ は、Knudsen表を用い、温位、塩分、圧力から算定する。

温位 T 、塩分 S 及び物質トレーサー C に関する収支式は、次のように記述される。

$$T_t = -\frac{m}{a}[(uT)_\lambda + (vT/m)_\phi] - (wT)_z \quad (8)$$

$$+ [(A_{HV}\delta^{-1})T_z]_z + (A_{HH}a^{-2})\Delta T + \gamma(T^* - T)$$

$$S_t = -\frac{m}{a}[(uS)_\lambda + (vS/m)_\phi] - (wS)_z \quad (9)$$

$$+ [(A_{HV}\delta^{-1})S_z]_z + (A_{HH}a^{-2})\Delta S + \gamma(S^* - S)$$

$$C_t = -\frac{m}{a}[(uC)_\lambda + (vC/m)_\phi] - (wC)_z \quad (10)$$

$$+ [(A_{HV}\delta^{-1})C_z]_z + (A_{HH}a^{-2})\Delta C + L$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{statically stable} \\ 0 & \text{statically unstable} \end{cases} \quad (11)$$

A_{HV} 、 A_{HH} は、それぞれ垂直、水平方向の熱、塩分、トレーサーに関する渦動拡散係数を表す。また、 T^* 、 S^* は温位、塩分の観測値を、 γ は定数であり、以下に示す例では、表層のみに非負の値を与え、下層では0としている。 L は、負荷項である。海面 $z=0$ での境界条件は、rigid-lid近似などを行い、

$$w = T_z = S_z = C_z = 0 \quad (12)$$

$$\rho_0 A_{MV}(u_z, v_z) = \tau^\lambda, \tau^\phi \quad (13)$$

とする。ここに、 τ は海面での風応力である。海底($z = -H$)では、

$$w(-H) = -ua^{-1}mH_\lambda - va^{-1}H_\phi \quad (14)$$

及び

$$T_z = S_z = C_z = 0 \quad (15)$$

としておく。

陸岸等の壁の流速成分および熱、塩分のフラックスは0とする。上に述べた境界条件などは暫定的なものである。これらを、プログラム上にて精密化することは容易であり、必要に応じて変更するものとしておこう。

3.2. どのような計算格子と境界条件を使用したか

本論文に示すケースではもっぱら粗格子とし、サブモデルとしてのフィジビリティを検討している。水平方向の格子間距離は経度4度、緯度方向3度とし、90個の経度帯、60個の緯度帯とする。鉛直方向には15層とし、最大深度を5700mとする。第1層の厚さは30mで、最下層は870mとなる漸増する格子配置である。従属変数の格子への配置位置はBryan(1969)によった。計算に用いる海底地形は、Scripps研究所による1度メッシュデータ(Gatesら, 1975)から補間する。この際、3方向を陸に囲まれた湾や、1格子のみの島は、除去する。海面での水温と塩分の境界条件は、実質的には式(8),(9)右辺の γ 項の観測値から与えられる。これについては、Levitus(1982)により整理された観測値を内挿し与える。風応力値は、Hellerman and Rosen-

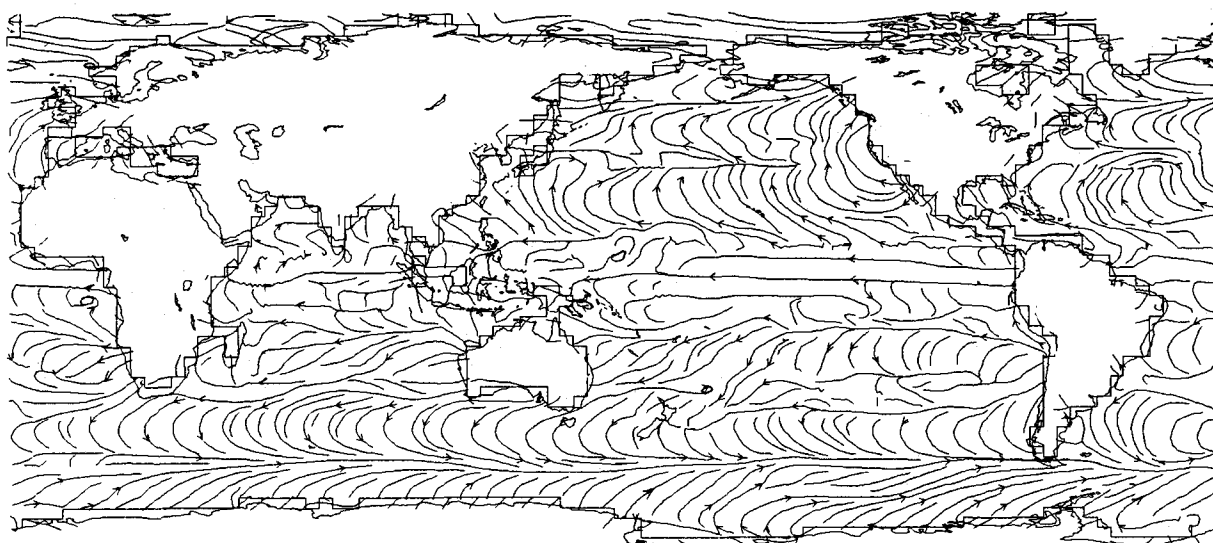


図-7(1) 計算した海流の流線, 水深15m (第1層), 99年10月17日
stream line of surface flow, depth 15m, October 17, year 99.

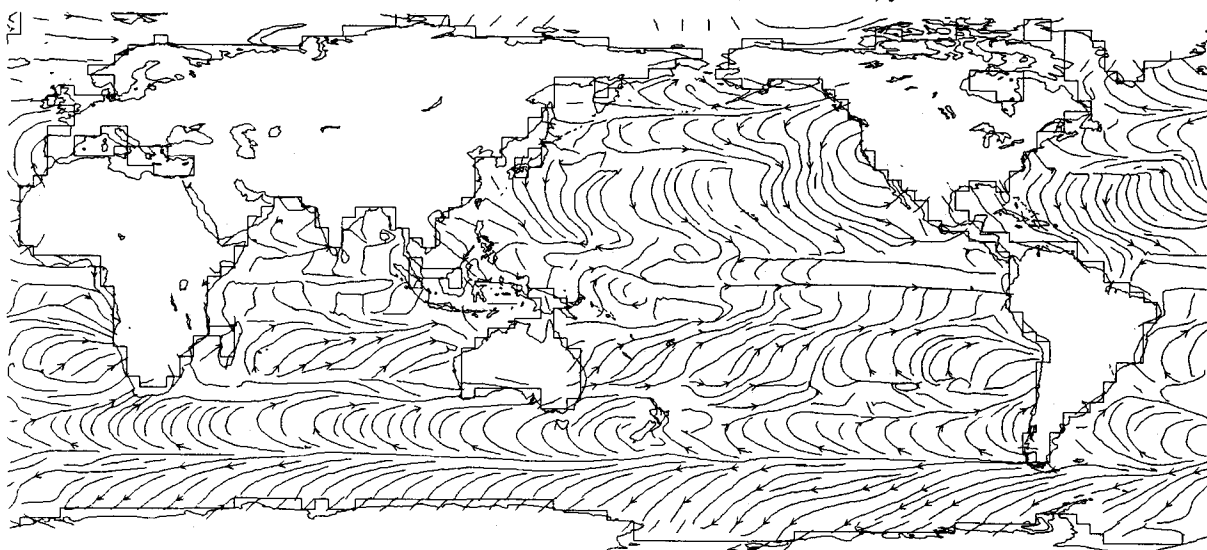


図-7(2) 計算した海流の流線, 水深1818.8m (第10層), 99年10月17日
stream line of subsurface flow, depth 1818.8m, October 17 year 99.

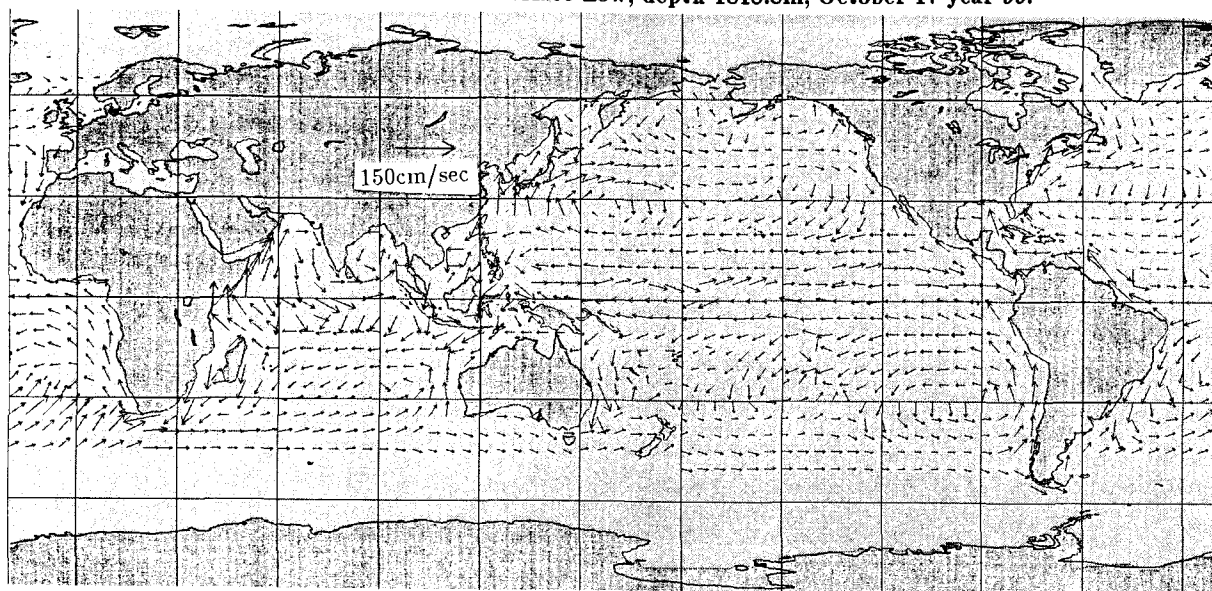


図-8 表層海流の観測値, 10月
observed surface flow

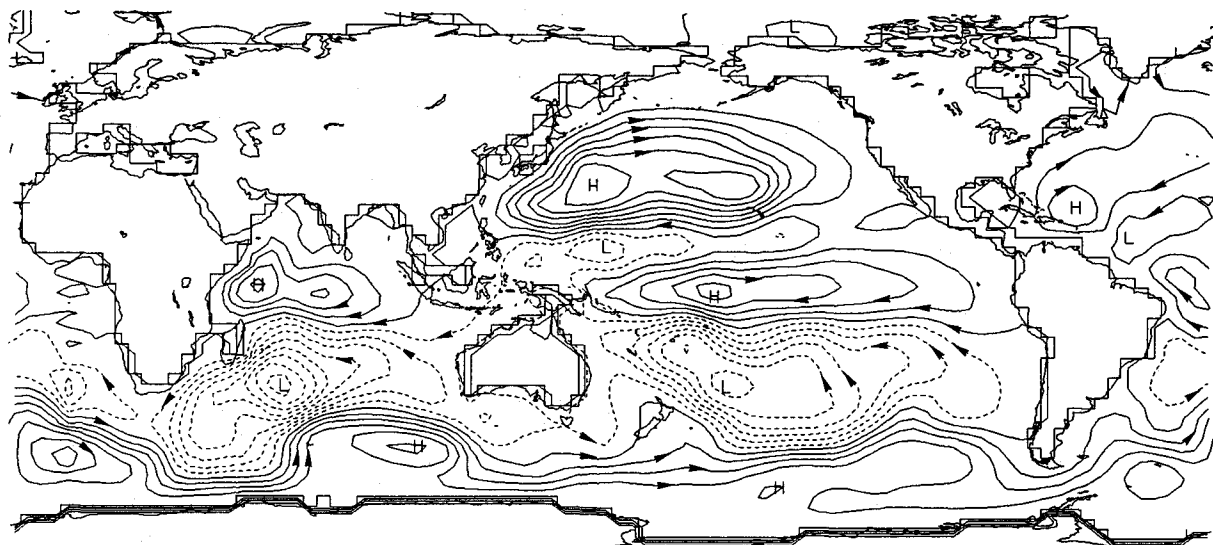


図-9 体積輸送の流線関数, 99年10月17日
calculated stream function, October 17, year 99.

stein(1983)による整理観測値を内挿する。これらの変量は、月毎に与える。

3.3. このモデルで計算された流動パターン

本論文に示す例では、 $A_{MH} = 1.0 \times 10^9 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$, $A_{HH} = 2.0 \times 10^7 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ とし、 $A_{MV} = 20.0 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$, $A_{HV} = 1.0 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$, $\Delta t = 24 \text{ h}$ としている。また、 γ は1/50 (1/days)などとする。高緯度におけるCFL条件を緩和するために経度方向にフーリエ型フィルタリングを行い、ポアソン方程式のソルバーは過緩和係数を1.6とするhypergrid法を用いた。共役勾配法では、積分途中で収束しないことが発生した。

計算開始時点をお年1月1日午前0時とし、Levitusによる温位、塩分の初期値を与えたときの約100年後(99年10月17日)の表面海流(計算水深15m)の流線図を図-7(1)に示す。また、図-8は、Meehl(1981)による10月の表面海流観測データである。図-7にて、北半球太平洋で見られる時計回りの循環は、北大西洋あるいはインド洋にも見受けられるが、赤道逆流、親潮などはこの粗格子計算では表れていない。南緯50度付近に収斂線が見られるが、これに関しては実際にも報告されている。南緯60度以南はわきだし地域となっているが、他の月には吸い込みも見られており一定しない。下層を示す図-7(2)では、表層とほぼ逆の傾向が見られている。図-9は、体積輸送の流線関数を等間隔で描いたものである。わが国西側の黒潮・北太平洋海流・カリフォルニア海流、北アメリカ西側の湾流・カナリヤ海流、南太平洋のフンボルト海流・東オーストラリア海流、インド洋のアグリアス海流、季節風海流あるいは南極まわりの極流などの主要な海洋大循環は再現されている。

4. このモデルで排出物伝搬を追跡してみると...

4.1. 人為化学物質の例

人間活動により陸上に排出された物質のうち、変化の時間スケールが長く揮発性の低いものは水系経由で海洋に流出し、沿岸部から沖合いに、また表層から深海へと伝搬していく。その例として、人為化学物質の代表的なものであるDDTは、1939年に殺虫作用が発見されて以降、農地への散布などが行われ、1962年の41,900 t/yの消費をピークとして、以後、開発途上国に使用が推移している。図-10の黒い箇所は、世界食糧農業機構に報告されている各国のDDT消費量及びOlson(1992)による10分メッシュ世界植生図の耕作地位置データを用いて推定した1980年のDDT散布箇所である。この負荷量計算を1960年から毎年行い、第2節に述べた手法により、海洋への流出を追跡した。流出率については、流出高が10cm/y以上のメッシュについては1%、それ以下の場合は0とし、5年にわたって指數的な減衰特性で流出するものと仮定した。これらは、もっぱら本モデルのテストケースを作成するための作業仮定であり、その妥当性を問うことは、意味をもたない。海洋流れについては、100年の助走計算を行い、1960年始めからDDT投入を開始した。図-11は、1980年の海洋表層での濃度を示したものである。図のトーン1段階は1オーダーに相当しており、もっとも濃いベンガル湾奥にて100ng/lオーダーである。東南アジア近海での測定値は0.1~1.0ng/l程度であるが、これらの値との対応は今後の検討課題である。計算では、従来から消費が多かったインド洋沿岸部、最近まで多量に使用していた中南米大西洋側が高濃度に算出されており、太平洋には、極流及びインドネシア付近から

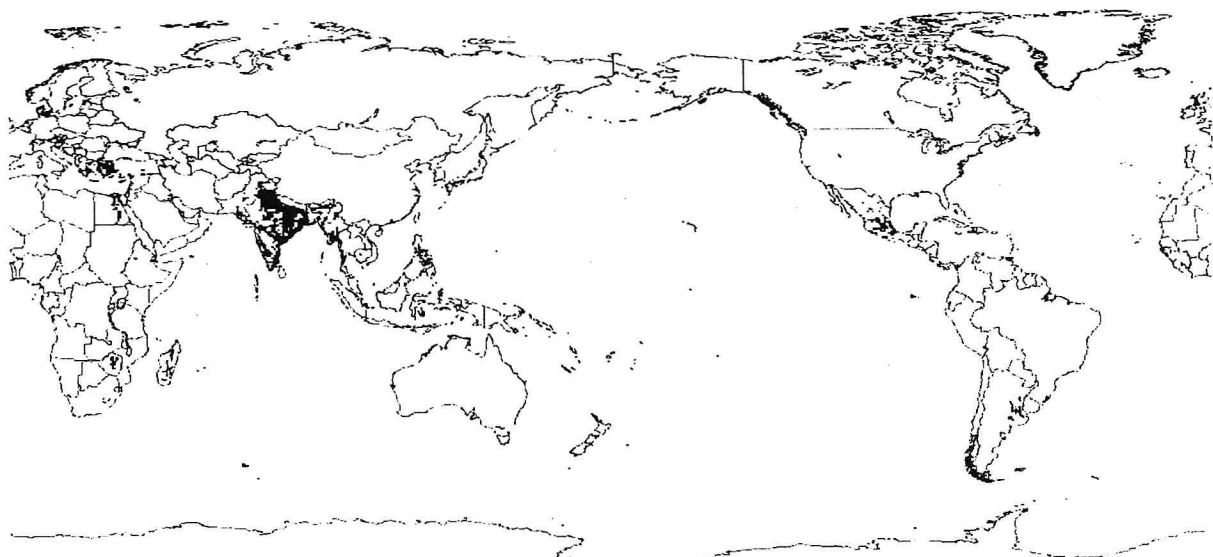


図-10 DDT散布の推定地域, 1980年
Consumed area of DDT, estimated, 1980

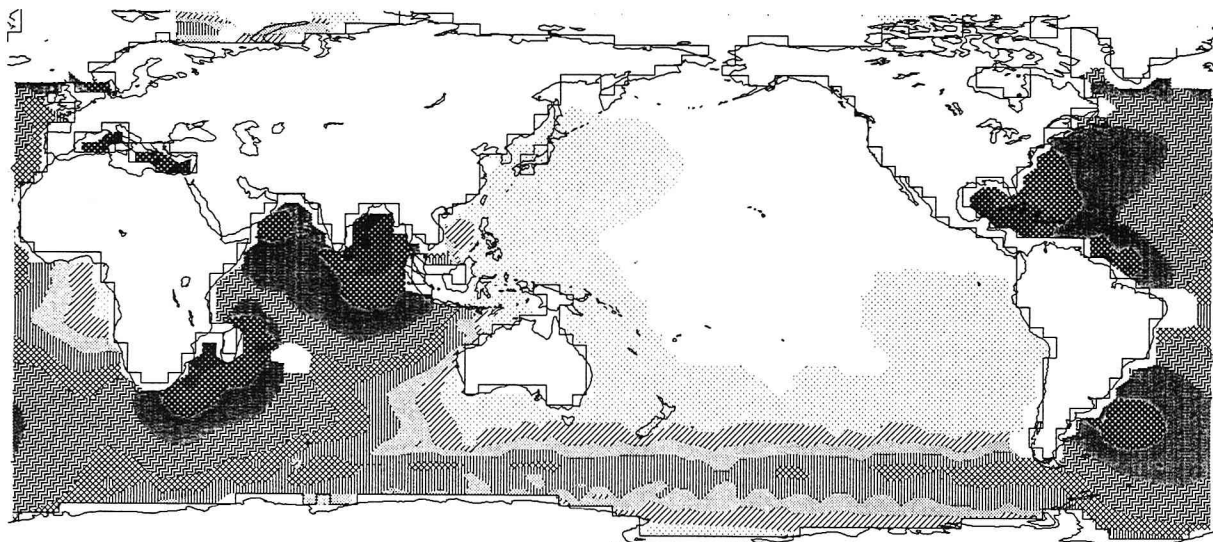


図-11 DDTの海洋汚染, 水深15m, 1980年
Calculated DDT concentration, 15m depth, 1980

侵入している。

4.2. 海洋汚染のポテンシャル

流域の汚染は、人間の居住と深い係わりがある。このことは、人為起源物質による海洋汚染が問題となる場合、流域内の居住人口と負荷量に強い関係があることを意味し、将来問題視される水域、沿岸海域の汚染においても、この状況は変化しないと予想される。そこで、人為起源の排出物として、人口に比例して排出される物質を想定し、その排出物の循環に関するシミュレーションを行い、人間活動と地球規模海洋汚染の係わりに関する検討を試みよう。人口分布に関し、各国内の人口張り付き状況については現在のまま変わらず1度メッシュで作成した人口分布データ（松岡、1992）を使用することとし、国・地域内の総人口につ

いては人口推計モデル（松岡・森田、1993）により182地域について推計した5年毎の中位推計値を用いてみる。DDTと同様のステップにより毎年の排出量を求め、1985年から115年間の計算を行った。図-12は表層の水質濃度であるが、北アメリカ東岸、バルト海・北海などの他、人口増加が予想される東・南アジア沿岸部からそれぞれ大循環に添って高濃度帯が張り出していくすがわかる。また、ペルー沖合いはもっとも低濃度海域となっているが、これは湧昇流に原因するものであり深海の未汚染水の効果を示していると推定できる。

5. 残された課題と今後の方向について

本論文では、人為起源汚染物質の、水系ルートによる地球内循環を追跡するモデルの開発状況を紹介し

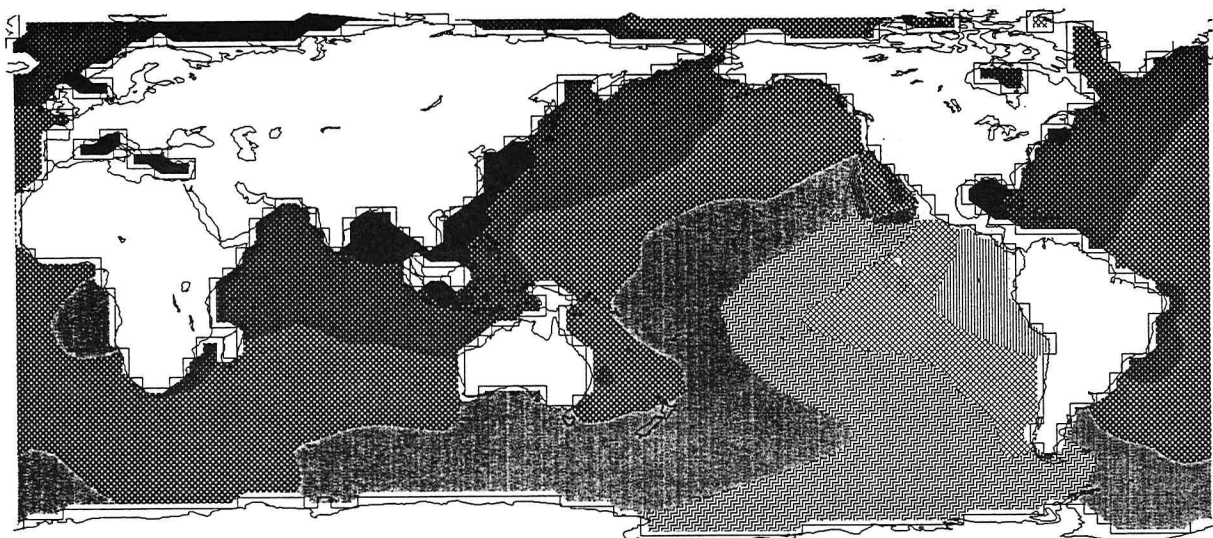


図-12 海洋の人為汚染ポテンシャル, 水深15m, 2100年
Calculated pollution potential, 15m depth, 2100

た。モデルの個々の部分は、必ずしも新規性に富むものではなく、それぞれの分野である程度定着したモデル技法を採用した。しかし、それらを総合化しさらにそれを支援するデータ・情報と連結することによって、今後の地球環境に対する見通しと対策策定に大きく寄与できる可能性が高い研究であると自負している。ただし、整備・改良すべき点を多々残していることも確かであり、特に以下の四点に関しては、鋭意、検討・改良作業中である。

まずその一は、流域区分の検証である。特に、東・南アジア地域に関しては、GRID/Bangkokなどでも同様の作業を行っており、これらとの比較及び各国の個別情報による検討を行わなければならない。

その二は、流出プロセスの精密化である。これに関しては、別途、グローバル規模にて、気候変動及び地域開発などの要因とその地域単位情報の体系化作業及びそれを基礎とした流域貯留の因子を組み込んだ簡易モデルの適用作業を行っており、それとの連結を考えている。

その三は、排出量推計モデルとの組織的な結合である。これに関しては、現在、東・南アジア地域を対象に約5000程度のサブリージョンについての社会・経済データベースを構築中である。それを基礎とし地域レベルでの社会状況進展シナリオとその地球レベルでの影響度推計が、中心課題となる。

その四は、大循環モデルの各種トレーサー観測値による検証である。同様の努力が、海洋モデルに関する先達たちにより多くなされており、それらの追試が当面の作業の中心となる。

その他、沿岸プロセス、種々の反応・変化プロセスなどの組み込みも本研究の実用化にあたっては必須であり、これらに関しては、準備と余裕ができた時点で、おいおい行っていくつもりである。

最後に、本研究に使用したデータ収集にあたっては、米国商務省大気海洋局／プリンストン大学地球流体力学研究所（GFDL/NOAA）のPacanowski博士及び国立環境研究所地球環境研究センターの原沢英夫研究管理官のご助力を得た。また、海洋循環モデルの実行にあたっては、その一部を国立環境研究所地球環境センターの計算機システム（NEC, SX-3）を使用した。ここに記して感謝の意を表す。

引用文献

- Billen, G., Lancelot, C. and Meybeck, M., 1991, N, P, and Si retention along the aquatic continuum from land to ocean, (in) *Ocean Margin Processes in Global Change*, eds. Mantoura, R.F.C. et al., 45-67, Wiley.
- Cogley, J.G., 1991, GGHYDRO-Global Hydrographic Data, Release 2.0, Trent Climate Note 91-1, Department of Geography, Trent University.
- Cox, M.D., 1984, A primitive equation, three-dimensional model of the ocean, GFDL Ocean Group, Tech. Rept. No.1., Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA, Princeton University, Princeton, New Jersey.
- Degens, E.T., Stephan, K. and Richey, J.E., 1991, Summary: Biogeochemistry of major world rivers, (in) *Biogeochemistry of major world rivers*, eds. Degens, E.T., Stephan, K. and Richey, J.E., 323-347, SCOPE 42, Wiley.
- Edwards, M. H., 1986, Digital Image Processing and Interpretation of Local and Global Bathymetric Data, Master's Thesis, Washington University, Department of Earth and Planetary Sciences, St. Louis.
- Eisma, D., 1987, Processes of nearshore accumulation of suspended material, *Mitt. Geol. Paleontol. Inst. Univ. Hamburg*, 64, 57-69.
- Gates, W.L. and Nelson, A.B., 1975, A new (revised) tabulation of Scripps topography on a 1° global grid. Part II: Ocean depths, R-1277-1-ARPH, The Rand Corporation, Santa Monica.

Hellerman, S, and Rosenstein, M., 1983, Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates, *J. Phys., Oceanogr.*, 13, 1093-1104.

Levitus, S., 1982, Climatological Atlas of the World Ocean, NOAA Professional Paper No.13, Dept. of Commerce, Rockville, Md.

Martin, J.M., and Windom, H.L., 1991, Present and future roles of ocean margins in regulating marine biogeochemical cycles of trace elements, (in) *Ocean Margin Processes in Global Change*, eds. Mantoura, R.F.C. et al., 45-67, Wiley.

松岡 譲, 1990, 温暖化現象の総合化モデルとそれによる温室効果ガス濃度と上昇温度の将来推定について, *環境システム研究*, 18, 82-87.

松岡 譲, 1992, 人為起源の硫黄酸化物による地球規模的な環境影響について, *環境システム研究*, 20, 142-151.

松岡 譲・辻本 渉, 1991, 地球規模の大気汚染物質循環のシミュレーション, 京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム論文集, 13, 341-346.

松岡 譲・森田恒幸・甲斐沼美紀子, 1992, 地球温暖化に関するシナリオとモデル解析, *土木学会論文集*, 449/IV-17, 1-17.

松岡 譲・森田恒幸, 1993, 地球環境と人口変化の係わりに関する二, 三の検討, *環境システム研究*, 投稿中.

McMahon, T.A. and B.L. Finlayson, 1988, Global stream records, Dept. of Civil and Agric. Engineering, Univ. of Melbourne-Australia.

Meehl, J., 1981, Observed world ocean seasonal surface currents, National Center for Atmospheric Research, Boulder.

Olson, J.S., 1992, World Ecosystems (WE1.4). Digital Raster Data on a 10-minute Geographic 1080x2160 grid, NOAA National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado.

Unesco, 1972, World water balance and water resources of the earth, Chief Administration of the Hydrometeorological Service under the Council of Ministers of USSR, English translation: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

U.S. CIA, 1991, RWDB2 Users Guide, edition 1.5, August 1991, U.S. Central Intelligence Agency, Washington, D.C.

U.S. DMA, 1992, Development of the Digital Chart of the World, available from the U.S. NTIS.