

－ 報 告 －

気候モデル MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) version 4を 構成するサブモデル間の熱・淡水のやり取り

鈴木 立郎^{1*}, 齋藤 冬樹¹, 西村 照幸¹, 大越智 幸司²

気候モデルは大気モデル、海洋モデルの他に海水モデル、陸面モデル、河川モデルなどの多くのサブモデルから構成されている。気候モデルを用いて地球温暖化等の気候変化をシミュレーションする上で、サブモデル間での熱や淡水の保存は重要な課題の一つである。ここでは東京大学気候システム研究センター、国立環境研究所、海洋研究開発機構で開発を行っている気候モデルMIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) version 4における各サブモデル間のフラックスのやり取りに関して、熱および淡水を中心に記述する。

キーワード：気候モデル，カップラー，熱・淡水フラックス

2008年11月4日受領；2009年2月2日受理

- 1 独立行政法人海洋研究開発機構
- 2 株式会社アイエックスときわテクノロジー

代表執筆者：

鈴木 立郎
独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター
〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25
+81-45-778-5628
tsuzuki@jamstec.go.jp

著作権：独立行政法人海洋研究開発機構

– Report –

Coupling procedures of heat and freshwater fluxes in the MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) version 4

Tatsuo Suzuki^{1*}, Fuyuki Saito¹, Teruyuki Nishimura¹, Koji Ogochi²

The climate model consists of some submodels, such as the atmospheric model, the ocean model, the land model, and the river model. Heat and fresh water conservation among these sub models is one of the important issues in discussing future climate change such as global warming. In this report, we describe the coupling procedure in MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) version 4.

Keywords : climate model, flux coupler, heat and freshwater fluxes

Received 4 November 2008 ; accepted 2 February 2009

1 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

2 IX Tokiwa Technology, Inc.

Corresponding author:

Tatsuro Suzuki

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

3173-25 Showa-machi, kanazawa-ku, Yokohama 236-0001 JAPAN

+81-45-778-5628

tsuzuki@jamstec.go.jp

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに

気候モデルは大気大循環モデル、海洋大循環モデル、陸面モデルなどのサブモデルから構成されている。これらのサブモデルは一般にカップラーと呼ばれるプログラムによって結合されている。カップラーはサブモデル間のデータのやり取りに伴う、グリッド変換、時間平均、サブモデル間の通信などの処理を行っている。気候モデルを用いて地球温暖化等の気候変化をシミュレーションする上で、熱や淡水などの物理量の保存は重要なテーマの一つであり、カップラーを通じた気候モデル内の淡水、熱などの物理量のやり取りがどのように行われているか理解することは気候モデルの出力を解析する上で重要である。また、近年の気候モデルの高度化に伴い、各サブモデルも複雑化しており、これらのサブモデルの気候モデルへの導入においてもカップラーの理解は欠かすことができない。汎用的なカップラーとして通信などの計算手法、データのグリッド変換を記述したいくつかの論文(c.f. Valcke et al. 2004, Yoshimura and Yukimoto 2008, Hill et al. 2004)が存在するが、並列化モデルへの対応や、計算手法などに多くを割いており、これらのカップラーを用いて実際の気候モデルでどのように熱、淡水のやり取りを行っているか十分な記述があるとは言えない。本報告書ではMIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) 4における熱・淡水フラックスを例にあげて気候モデル内でこれらの量がどのように処理されているか記述する。このような記述は気候モデルMIROCの開発、解析だけでなく他の気候モデルに関しても有益であると考えられる。気候モデルMIROC3.2のサブモデル等の仕様はK-1model developers (2004)などでも報告されているが、本報告書では熱・淡水フラックスに着目し、サブモデル間のデータのやり取りの仕様について報告する。

2. モデルの概要

2.1 モデルの基本的な構成

気候モデルMIROCは基本的に大気モデルCCSR/NIES/FRCGC AGCM (Numaguti et al., 1997) と海洋モデル CCSR Ocean Component Model (Hasumi, 2006) から構成される (K-1model developers, 2004)。大気モデルと海洋モデルはそれぞれ独立なプログラムとして、異なる計算ノード上で実行され、MPI通信によってこれらのノード間で情報の交換が行われる。本報告書では、大気モデルが実行されるノードを大気ノード、海洋モデルが実行されるノードを海洋ノードと呼ぶことにする。大気ノードでは大気モデルの他に、サブモデルとして陸面モデル、海面モデル、河川モデルが実行される。大気海洋間の結合 (情報の交換) は大気ノードの海面モデルを通じて行われる。海洋ノード内の海洋モデルの海面水温、海水密度などの情報は、大気ノード内で、モ

デルの境界条件として扱えるように海面モデルのグリッドに変換される。一方、大気ノードの海面モデルのグリッドで計算された熱・淡水・運動量フラックスは海洋モデルのグリッドに変換され、海洋ノードに通信される。この一連のデータの通信、変換はエクステンジャーで行われる。フラックスカップラーは境界条件や海面モデルや陸面モデルで計算した熱・淡水フラックスなどのデータを格納し必要に応じて、各モデルに振り分けている (図1)。一般にフラックスカップラーはエクステンジャーの機能も含むがここでは区別して記述することにする。

2.2 モデルの水平グリッド

気候モデルMIROCの水平グリッドは大気ノード内の各モデルにおいて、大気グリッド、陸面グリッド、河川グリッド、海面グリッドとして定義される。大気ノード内の海面グリッドは海洋ノード内の海洋モデルの水平グリッドとは異なる。陸面グリッドおよび海面グリッドは大気モデルの水平グリッドを南北方向・東西方向に等分割したものであり、分割個数はそれぞれのグリッドで任意に設定可能である。ただし海面グリッドの分割個数は陸面モデルの分割個数で割り切れる必要がある。また、河川グリッドは大気グリッドと同じものもしくは等緯度経度間隔のグリッドが使用可能である。海洋モデルの水平グリッドは水平一般曲線直交座標系を採用しており、大気モデルと同じ座標系を使う必要はない。大気モデルと海洋モデルのデータの交換はあらかじめ大気モデルの海面グリッドと重複する海洋グリッドの場所、数、面積、ベクトルの回転などの情報を用意しておき、エクステンジャーを通じて行う。

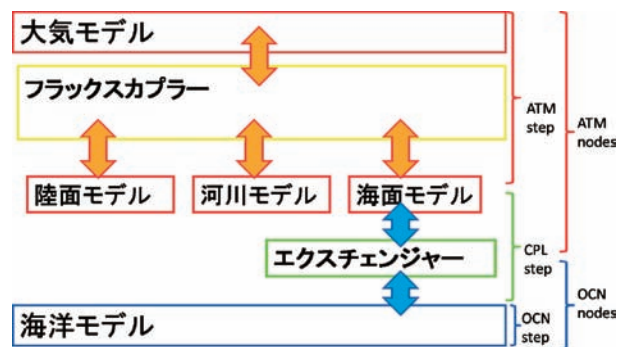


Fig 1 Structure of MIROC4 (ATM step, CPL step and OCN step mean each integration-time step)

図1 モデルの基本的な構造 (ATM step: 大気の時積分ステップ, CPL step: カプラーの時積分ステップ, OCN step: 海洋の時積分ステップを示す)

2.3 海陸分布の定義

気候モデルMIROC内の海陸分布は海洋モデルによって定義された海陸分布が優先される。海洋モデルの1グリッドは陸または海だけで定義されているが、大気モデルの陸面グリッド、海面グリッドは海洋モデルの海陸分布と整合がとれるように陸と海の割合が決定される（図2）。SAを大気グリッドの面積、SL_{ij}を陸面のグリッドの面積、SO_{ij}を海面のグリッドの面積、FLND^{atm}, FLND^{land}, FLND^{oc}をそれぞれのグリッドに陸面の占める割合とすると次式を満たす。

$$SA \times FLND^{atm} = \sum_{j=1}^{jldiv} \sum_{i=1}^{ildiv} (SL_{ij} \times FLND_{ij}^{land}) = \sum_{j=1}^{jodiv} \sum_{i=1}^{iodiv} (SO_{ij} \times FLND_{ij}^{oc})$$

ここで (ildiv, jldiv) は陸面グリッドの東西方向・南北方向の分割個数, (iodiv, jodiv) は海面グリッドの東西方向・南北方向の分割個数である。陸面グリッドにおいて、少しでも陸が存在すると定義された場合、陸面被覆などの境界値が必要になる。このため、海洋モデルの海岸線などの地形を変更した場合、陸面被覆などの境界値ファイルの修正が必要になる場合がある。

2.4 モデルの実行の流れ

大気ノード内におけるモデルの実行の流れは、まず、エクステンジャーの初期化、カプラーの初期化、大気モデルの初期化、陸面モデルの初期化、海面データの初期化（大気海洋間のフラックスデータの準備）、河川モデルの初期化を行い、次に海面データの取得、大気モデル、陸面モデル、河川モデルの順に時間ループの計算を行う（図3）。大気と陸面、海面間の熱・淡水フラックスは大気モデル内の物理過程のなかで陸面、海面の順に見積もっている。海洋ノード内では、海洋モデルの初期化後、大気ノードからフラックスデータを取得し、海洋モデルの計算を行う。

3. 大気モデルへのフラックス

3.1 大気海洋間のフラックス

海面から大気へのフラックス（FLXO）は大気モデルの海面グリッドで計算する。境界条件としての海面水温、海水密度、海水厚さ、海水上の積雪深、海水内部温度、海洋表層流速は海洋モデルからエクステンジャーを通して取得する（海水面温度は海水内部温度と海水の厚さおよび海水上の大気の状態から決定される。現在のところMIROCでは海水速度はフラックス計算には用いていない）。大気の境界条件としての海上での風速、気温、比湿等は大気のグリッドから、線形もしくは3次スプライン補完を用いて、海面のグリッドに変換する。海面からのフラックスは海水面と海水面でそれぞれ別々に計算され、面積の重みで平均し大気に渡される。（海水厚さでカテゴリー分けされた海水モデルを使用する場合はそれぞれの海水厚のカテゴリーでフ

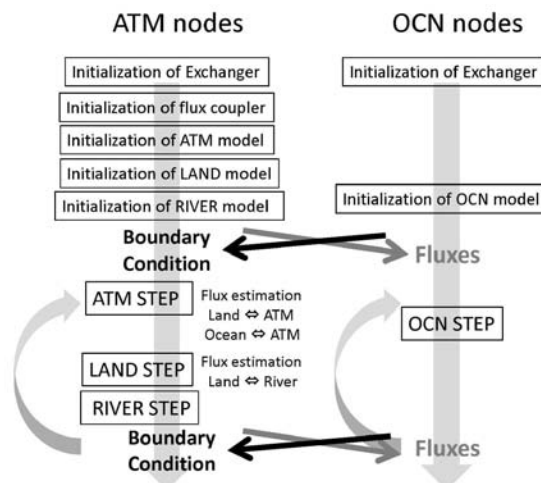


Fig 3 Schematic diagram of model flow
図3 計算の流れの模式図

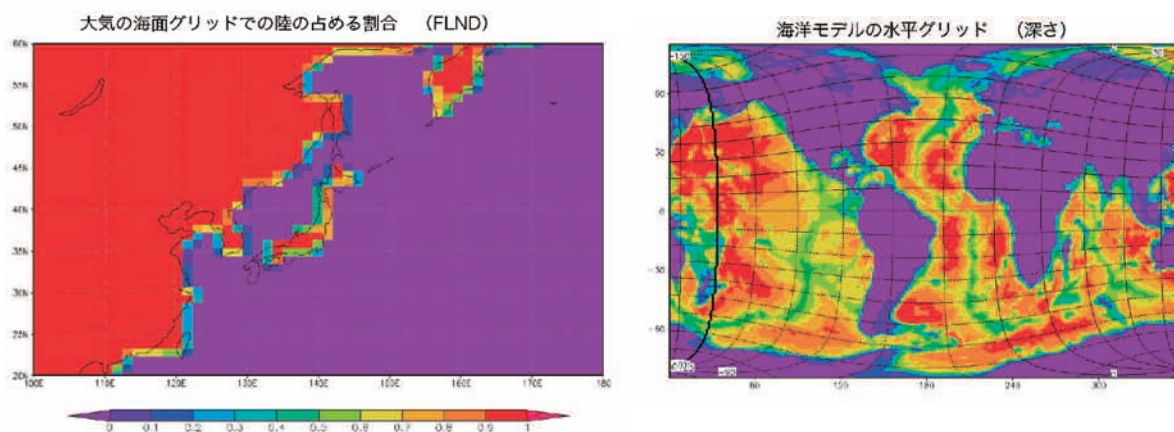


Fig 2 Land area ratio on ocean grid in atmospheric model (around Japan, left) and ocean topography (depth in m) in ocean model (right)
図2 大気モデル内の海面グリッドにおける陸面の占める割合（日本付近の拡大図、左）と海洋グリッドにおける地形（深さ、unit:m、右）

ラックスを計算する必要があるかも知れないが、現在のモデルの仕様では平均の海水厚さでフラックスを計算している。) エクステンジャーによる大気海洋間のフラックス、境界条件の変換に関しては後で詳しく記述する。

3.2 大気陸面間のフラックス

陸面から大気へのフラックス (FLXL) は陸面グリッドで計算する。1つの陸面グリッドは複数の土壌被覆と湖から構成される。湖の凍結・融解および積雪は鉛直1次元の水モデル (0-layer model) によって考慮されている。ここで陸面グリッドの面積をSLとすると湖とそれぞれの土壌被覆の占める面積はそれぞれ

$$SL^{\text{lake}} = SL \times LKFRC \times FLND$$

$$SL_k^{\text{grd}} = SL \times GRFRC_k \times (1 - LKRR) \times FLND$$

となる。ここでLKFRCは陸に占める湖の割合、kは土壌被覆の種類、GRFRC_kは湖を除く陸に占める土壌被覆kの割合を示す。陸面からのフラックスはこれらの土壌被覆、湖の上でそれぞれ別々に計算され、面積の重さで平均し、大気に渡される。

$$FLXL = LKFRC \times FLXL^{\text{lake}} + (1 - LKFRC) \times \sum_{k=1}^{km} (GRFRC_k \times FLXL_k^{\text{grd}})$$

ここで、FLXL^{lake}は湖面でのフラックス、FLXL_k^{grd}は土壌被覆kでのフラックス、kmは土壌被覆の種類の数。

3.3 大気へのフラックスの合計

河川モデルは面積を持たないので、大気へのフラックス (FLXA) は、陸面グリッドのフラックス (FLXL) ・海面グリッドでのフラックス (FLXO) の海陸分布の重みつきの平均として次式のように求まる。

$$FLXA = \frac{1}{SA} \times \left[\sum_{j=1}^{jdiv} \sum_{i=1}^{idiv} (SL_{ij} \times FLND_{ij}^{\text{land}} \times FLXL_{ij}) + \sum_{j=1}^{jodiv} \sum_{i=1}^{iodiv} (SO_{ij} \times (1 - FLND_{ij}^{\text{oc}}) \times FLXO_{ij}) \right]$$

降水のように大気モデルで計算されたフラックスもFLXLとFLXOに含まれる。このようなフラックスの場合、分割された陸面・海面グリッドのフラックスはすべて対応する大気グリッドと同じ値になる。

4. 陸面モデルと河川モデル間のフラックス

4.1 河川陸面間のフラックスと河川モデル

現在のモデルの仕様では、河川陸面間の水のフラックスは、河川から湖への水の流入 (RUNIN) ・湖から河川への流出 (RUNOFF), 内陸消失点での陸面への水の流入 (RUNIN), 土壌であふれた水の河川への流出 (RUNOFF)

のみを取り扱っている (図4)。ここで、内陸消失点とは砂漠などで河川の終点が消滅している地点を示している。河川モデルでの水収支は氷と水に分けて取り扱っている。河川モデルで扱う氷は疑似的な氷河に対応する。ここで、融解熱の保存を保証するため、河川モデル内での相変化は考慮していない。また、河川の流量は河川グリッドに存在する水量をその面積で割ったものとして定義されている。河川モデル内で水と氷は河川流路網データに従って下流に運ばれる。

4.2 陸面からの水の流出

陸面グリッドにおけるそれぞれの土壌被覆において水もしくは雪氷を保持できなくなった場合、各土壌モデルからカプラーを通して河川モデルに水もしくは氷が渡される。

$$RUNOFF_{\text{all}}^{\text{grd}} = (1 - LKFRC) \times \sum_{k=1}^{km} (GLFRC_k \times RUNOFF_k^{\text{grd}})$$

各土壌被覆からの流出量の詳細は陸面モデルMATSIROの資料を参照されたし (Takata et al., 2003)。湖モデルにおいては湖の水位または雪氷の厚さ (H) が一定値 (Hc) を超えた場合時定数 τ_h で河川に流出する。

$$RUNOFF^{\text{lake}} = LKFRC \times \frac{(H - Hc)}{\tau_h}, \quad (H > Hc)$$

$$RUNOFF^{\text{lake}} = 0, \quad (H < Hc)$$

陸面からの平均流出量は次のようになる。

$$RUNOFF_{\text{all}}^{\text{land}} = RUNOFF^{\text{lake}} + RUNOFF_{\text{all}}^{\text{grd}}$$

陸面グリッドの平均流出量で考えた場合上記の式に陸面の占める割合FLNDを乗じる必要がある。河川モデルではRUNOFF^{land}を海陸分布の重みを付けて河川グリッドに変換した流出量RUNOFF^{riv}を用いて計算を行う。

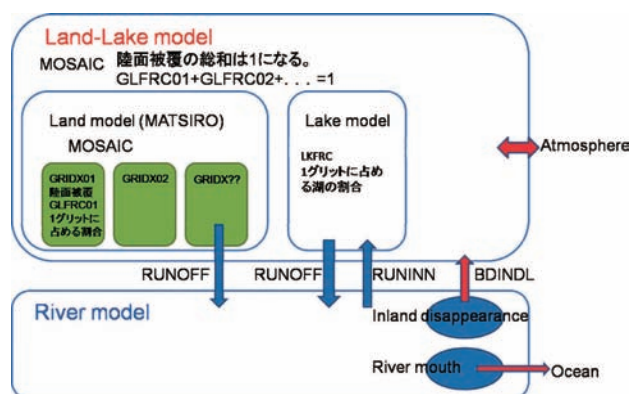


Fig 4 Coupling between land and river models
図4 陸面モデル河川モデル間の水のやり取りの模式図

4.3 河川から湖への水の流入

河川流路の途中で湖が存在する場合、河川流量に応じた水が湖に流入する。湖へ流入する水量を計算するため、カプラーを通して、河川グリッドの河川流量GDRIVを陸面グリッドにおける河川流量GDRIVLに変換する。ここで、GDRIVLは、陸面グリッドの面積で規格化した量である。陸面グリッドにおいて、湖への河川からの流入量RUNINNは河川流量（GDRIVL）と時定数 τ で次式のように定義する。

$$RUNINN^{lake} = GDRIVL / \tau$$

河川から陸面への流入は内陸消失点を除き、現在の仕様では湖への流入しか考慮していないので、陸面での平均の流入は

$$RUNINN^{land} = RUNINN^{lake} \times LKFR$$

となる。陸面グリッドに対して河川グリッドが複数対応している場合、陸面グリッドで平均した陸面への河川水の流入を、RUNOFFと同様に面積の重みのみで河川グリッドに戻すと、河川グリッドに存在する流量以上の水が河川から流出してしまうということが起こりうる（図5 CASE1）。そこで、河川流量に対する流出量の比を陸面グリッドから河

川グリッドへ変換し、それぞれの河川グリッドで河川流出量（陸面への流入量）を見積もる（図5 CASE2）。河川流量の陸面グリッドでの流出率は

$$RINN^{land} = RUNINN^{land} / GDRIVL$$

となり河川グリッドに変換した流出率を $RINN^{riv}$ とすると河川グリッドでの流出量（陸面への流入量）は

$$RUNINN^{riv} = RINN^{riv} \times GDRIV$$

となる。

4.4 河川の内陸消失点での陸面への水の流出

河川モデルの内陸消失点での河川流量BUDINDは陸面モデルの湖の水位および土壌の第1層目にそのまま加える。氷の場合は湖の水と土壌被覆の積雪に加える。まず、河川グリッドの内陸消失点のGDRIVをBUDINDとしてカプラーをとおして陸面グリッドの内陸消失点の流量BDINDLに変換する。河川グリッドの内陸消失点の流量はカプラーにデータを渡した時点で0にする。この後で、BDINDLを陸面モデルに分配する。ここでBDINDLは海陸分布の重みを

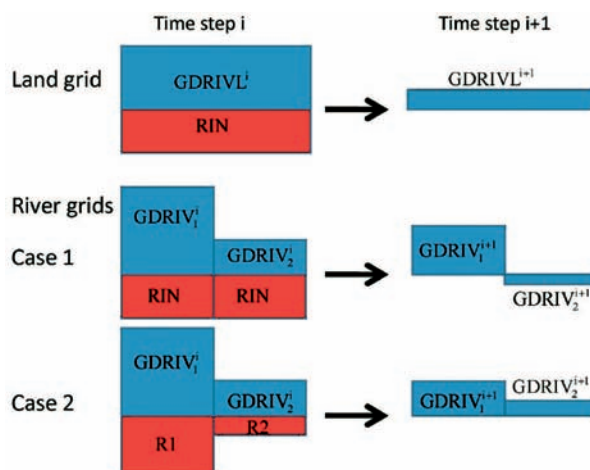


Fig 5 Procedures of water runoff from river grids to land grids - GDRIVL is the river water amount in the land grid and RIN is river water inflow into the land (or lake). In the case of two river grids corresponding with one land grid, the river water amount could be negative when the same river inflow (RIN) is subtracted in each river grid (CASE1); on the other hand, river water in each river grid doesn't show negative when the river water inflow is estimated in proportion to the water amount in each river grid ($GDRIV_L^{i+1} = GDRIV_L^i - RIN \times GDRIV_L^i / GDRIV$; CASE2).

図5 河川グリッドから陸面グリッドへの河川水の流出の取扱。GDRIVLは陸面グリッドでの河川水量、RINは河川から陸面(湖)への流入量。一つの陸面グリッドに対し2つの河川グリッドが対応する場合、陸面グリッドにおける河川から陸面への流入量をそれぞれの河川グリッドに対し同じ量だけ差し引くと、河川グリッドにおいて負の河川水量になる可能性がある（CASE1）。これに対し、それぞれの河川グリッドの河川水量に比例して陸面への流入量を見積もれば、河川グリッドにおいて河川水量が負になることはない（ $GDRIV_L^{i+1} = GDRIV_L^i - RIN \times GDRIV_L^i / GDRIV$; CASE2）。

付けていないので、内陸消失点に対応する陸面グリッドに海面の存在を許可しない（BDINDLが存在する陸面グリッドはFLAND=1でなければならない）。

5. 海洋モデルへのフラックス

5.1 海面グリッドでの海洋の境界条件

4.1で述べたように大気海洋間のフラックスは海面グリッドで計算される。ここでは海洋モデルのグリッドから海面グリッドへの変換について記述する。海洋モデルから大気海面グリッドに変換する変数は標準では海面水温（SST）海水密度（AI）海水厚さ（HI）海水上の積雪深（HSN）海水内部温度（TI）海洋表層流速（UO, VO）である。今後、どのグリッドでの変数を扱っているか明らかにするため、海洋モデルのグリッドでの変数には上付きでOGCM、海面グリッドでの変数には上付きでocと表記する。また、海面グリッドの位置をLO、海面グリッドの位置をLCとする。海面グリッドでの海洋の境界条件は以下のように定義される。

ここで、

IJO（LC）：大気ノード内の海面グリッド（LC）に対応する海洋グリッドの数

IJO2C（LC,N）：大気ノード内の海面グリッドに対応する海洋グリッドの位置

SOCN（LC,N）：大気ノード内の海面グリッドに対応する海洋グリッドの面積

RUO（LC）：ベクトルの回転角の余弦

RVO（LC）：ベクトルの回転角の正弦

SOCNG（LC）：海面グリッドに海洋が占める面積

である。海面グリッドに占める陸面の割合もここで定義され

$$FLND^{oc} = (1 - SOCNG)/SO$$

となる。SOは海面グリッドの面積。

また、海面グリッドに変換する海水に関する変数は海水層厚でカテゴリー分けした変数（AIM, HIM, HSM, TIM）の平均値として以下のように計算されている。

$$SST^{oc}(LC) = \sum_{N=1}^{IJO(LC)} [SST^{OGCM}(IJO2C(LC, N)) \times SOCN(LC, N)] / SOCNG(LC)$$

$$AI^{oc}(LC) = \sum_{N=1}^{IJO(LC)} [AI^{OGCM}(IJO2C(LC, N)) \times SOCN(LC, N)] / SOCNG(LC)$$

$$HI^{oc}(LC) = \frac{\sum_{N=1}^{IJO(LC)} [HI^{OGCM}(IJO2C(LC, N)) \times AI^{OGCM}(IJO2C(LC, N)) \times SOCN(LC, N)]}{SOCNG(LC) \times AI^{oc}(LC)}$$

$$HSN^{oc}(LC) = \frac{\sum_{N=1}^{IJO(LC)} [HSN^{OGCM}(IJO2C(LC, N)) \times AI^{OGCM}(IJO2C(LC, N)) \times SOCN(LC, N)]}{SOCNG(LC) \times AI^{oc}(LC)}$$

$$TI^{oc}(LC) = \frac{\sum_{N=1}^{IJO(LC)} [TI^{OGCM}(IJO2C(LC, N)) \times HI^{OGCM}(IJO2C(LC, N)) \times AI^{OGCM}(IJO2C(LC, N)) \times SOCN(LC, N)]}{SOCNG(LC) \times HI^{oc}(LC) \times AI^{oc}(LC)}$$

$$UO^{oc}(LC) = RUO(LC) \times \sum_{N=1}^{IJO(LC)} [UO^{OGCM}(IJO2C(LC, N)) \times SOCN(LC, N)] / SOCNG(LC) + RVO(LC) \times \sum_{N=1}^{IJO(LC)} [VO^{OGCM}(IJO2C(LC, N)) \times SOCN(LC, N)] / SOCNG(LC)$$

$$VO^{oc}(LC) = -RVO(LC) \times \sum_{N=1}^{IJO(LC)} [UO^{OGCM}(IJO2C(LC, N)) \times SOCN(LC, N)] / SOCNG(LC) + RUO(LC) \times \sum_{N=1}^{IJO(LC)} [VO^{OGCM}(IJO2C(LC, N)) \times SOCN(LC, N)] / SOCNG(LC)$$

$$SOCNG(LC) = \sum_{N=1}^{IJO(LC)} SOCN(LC, N)$$

$$\begin{aligned}
 AI^{OGCM} &= \sum_{L=1}^{NIC} AIM^{OGCM}(L) \\
 HI^{OGCM} &= \sum_{L=1}^{NIC} [HIM^{OGCM}(L) \times AIM^{OGCM}(L)] / AI^{OGCM} \\
 HSN^{OGCM} &= \sum_{L=1}^{NIC} [HSM^{OGCM}(L) \times AIM^{OGCM}(L)] / AI^{OGCM} \\
 TI^{OGCM} &= \sum_{L=1}^{NIC} [TIM^{OGCM}(L) \times HIM^{OGCM}(L) \times AIM^{OGCM}(L)] \\
 &\quad / (AI^{OGCM} \times HI^{OGCM})
 \end{aligned}$$

ここでNICは海水カテゴリーの数。

5.2 海面グリッドで計算した大気海洋間のフラックスの 海洋グリッドへの変換

海面グリッドで計算されるフラックスは海水面と海氷面でそれぞれ計算され、大気へのフラックスは

$$FLXO = (1 - AI) \times FLUXO + AI \times FLUXI$$

となる。これらのフラックスは大気モデル内のフラックスカプラーで海水面、海氷面積の重みを付けて時間積算した後で、大気海洋の結合時間ステップで海洋グリッドに変換し、海洋モデルに渡される。

$$\begin{aligned}
 FLUXOA^{OGCM}(LO) &= ROCN(LO) \times \sum_{N=1}^{IJA(LO)} [FLUXOA^{OC}(IJC2O(LO, N)) \\
 &\quad \times SATM(LO, N)] / SATMG(LO)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 FLUXIA^{OGCM}(LO) &= ROCN(LO) \times \sum_{N=1}^{IJA(LO)} [FLUXIA^{OC}(IJC2O(LO, N)) \\
 &\quad \times SATM(LO, N)] / SATMG(LO)
 \end{aligned}$$

$$SATMG(LO) = \sum_{N=1}^{IJA(LO)} SATM(LO, N)$$

$$ROCN(LO) = SATMG(LO) / S^{OGCM}(LO)$$

$$FLUXOA^{OC} = (1 - AI^{OC}) \times FLUXO^{OC}$$

$$FLUXIA^{OC} = AI^{OC} \times FLUXI^{OC}$$

ここで

IJA (LO) : 海洋グリッド (LO) に対応する 大気モデルの海面グリッドの数

IJC2O (LO,N) : 海洋グリッドに対応する大気モデルの海面グリッドの位置

SATM (LO,N) : 海洋グリッドに対応する大気モデルの海面グリッドの面積,

$$SATM(LO, N) = SOCN(LC, L), LC = IJC2O(LO, N),$$

$$LO = IJO2C(LC, L) \text{ を満たす.}$$

S^{OGCM} (LO) : 海洋グリッドの面積

である。

海洋グリッドの面積と対応する海面グリッドの面積の総和は一致するはずであるが、大気モデルと海洋モデルの座標系の違い（大気モデルと海洋モデルの地球の表面積が厳密に一致しない）、変換ファイル作成時に、大気モデルのグリッドを微小面積に分割し、その積算から対応する海洋グリッドの面積を見積もっていることから厳密には一致しない。このため、その比（ROCN）を乗じることによって、大気海洋間のフラックスの収支を合わせている。

海洋への風応力も同様に海面上での風応力（TXO,TYO）,海氷面上での風応力（TXI,TYI）としてそれぞれ計算するが、積算時に海水面、海氷面積の重みを乗じない。

$$\begin{aligned}
 TXO^{OGCM}(LO) &= RU(LO) \times ROCN(LO) \times \sum_{N=1}^{IJA(LO)} [TXO^{OC}(IJC2O(LO, N)) \\
 &\quad \times SATM(LO, N)] / SATMG(LO) \\
 &\quad + RV(LO) \times ROCN(LO) \times \sum_{N=1}^{IJA(LO)} [TYO^{OC}(IJC2O(LO, N)) \\
 &\quad \times SATM(LO, N)] / SATMG(LO)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 TYO^{OGCM}(LO) &= -RV(LO) \times ROCN(LO) \times \sum_{N=1}^{IJA(LO)} [TXO^{OC}(IJC2O(LO, N)) \\
 &\quad \times SATM(LO, N)] / SATMG(LO) \\
 &\quad + RU(LO) \times ROCN(LO) \times \sum_{N=1}^{IJA(LO)} [TYO^{OC}(IJC2O(LO, N)) \\
 &\quad \times SATM(LO, N)] / SATMG(LO)
 \end{aligned}$$

ここで

RU (LO) : ベクトルの回転角の余弦

RV (LO) : ベクトルの回転角の正弦

である。

5.3 海洋モデルでのフラックスの再分配

海洋のグリッドに変換されたフラックスは結合の時間ステップごとに更新される。結合の時間ステップは海洋モデルの時間ステップより長い場合、海洋モデルの海面・海水面積の比はフラックスの計算に用いた値とは異なる値に更新されている。このため、正確に熱・水収支をとるためには更新された海面・海水面積比に応じたフラックスの分配が必要になる。海面、海水面でのフラックス FLUXOA, FLUXIAは海洋グリッドの平均値である。各海水カテゴリーへのフラックスは現在のところ海水の厚さに依存せず均等に分配している。

$$\text{FLUXIAM}(L) = \text{FLUXIA} \times \text{AIM}(L)$$

$$\text{FLUXOA} = \text{FLUXOA} + \text{FLUXIA} \times \left[1.0 - \sum_{L=1}^{\text{LMAX}} \text{AIM}(L) \right]$$

AIMはグリッドに海水の占める面積の割合(海水密度度), Lは海水厚さカテゴリーの種類, LMAXは厚さカテゴリーの数を示す。海水面が存在しなければ全て海水面にフラックスが入る。海水が結合の時間ステップの途中で消滅した場合、昇華によるフラックスは、海水面を仮定した熱フラックスと淡水フラックス(海水の減少量)で分けて考える。熱フラックスはそのまま海洋1層目の温度変化に反映される。一方、昇華による淡水フラックスは昇華分の海水を生成したと仮定し、熱フラックス、淡水フラックスに換算し海洋1層目に与える。

風応力に関してはグリッド変換前に海面・海水面積の重みを付けていないので、海洋モデル内の各海水厚さカテゴリーでそれぞれの面積の重みを付けて駆動することになる。このため、運動量は保存していない。

5.4 河川から海洋への水の流出

河川モデルの最後で河口から海に流れる水を計算する。河川グリッドの河口にきた水はまず、大気海面グリッドに変換されフラックスカプラーで時間積算される。その後、大気降水データと同様にエクステンジャー経由で海洋グリッドに変換し海洋モデルに渡される。このとき河川水の温度は降水などと同様に海面水温と同じとして取り扱う。このため、厳密には熱は保存しない。水の流出に関しては降雪と同様に処理する。

5.5 海面グリッドの分割個数と海洋モデルの解像度

海面グリッドは大気グリッドの緯度経度を分割して作成しているが、分割個数が十分でなく、海洋モデルのグリッドが大気海面グリッド比べて高解像度の場合、エクステンジャーを通してフラックスを海洋のグリッドに変

換した際に大気グリッドサイズの構造が残る場合がある。また、大気からの降水などのデータは大気グリッドから海面グリッドに変換する際に補間をおこなわないため、これらのフラックスについては海洋グリッドで大気グリッドサイズの構造が残る。また、海面グリッドに変換する際に、3次スプライン補間ではなく線形補間を用いた場合は風応力カールのような微分量で大気グリッドサイズの構造が残る場合がある。

参考文献

- Hasumi, H. (2006), CCSR Ocean Component Model (COCO) version 4.0, *CCSR Report*, 25, 103pp.
- Hill, C., C. DeLuca, V. Balaji, M. Suarez, A. da Silva and the ESMF Joint Specification Team (2004), The Architecture of the Earth System Modeling Framework. *Comp. in Science and Engineering*, 6, 12-28.
- K-1 Model Developers (2004), K-1 coupled GCM(MIROC) Description, edited by H. Hasumi and S. Emori, *K-1 Technical Report 1*, 34pp., Cent. For Clim. Syst. Res., Univ. of Tokyo, Kashiwa, Japan
- Numaguti, A., M. Takahashi, T. Nakajima and A. Sumi (1997), Description of CCSR/NIES Atmospheric General Circulation model, *CGER's Supercomputer Monograph Report*, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, 3, 1-48.
- Takata, K., T. Watanabe and S. Emori (2003), Development of the minimal advanced treatment of surface interaction and runoff, *Global and Planetary Change*, 38, 209-222.
- Valcke, S., A. Caubel, R. Vogelsang, and D. Declat (2004), OASIS3 User's Guide, PRISM-report No2, 5th Edition. CERFACS, Toulouse, France.
- Yoshimura, H. and S. Yukimoto (2008), Development of simple coupler (Scup) for Earth System modeling, *Pap. Met. Geophys.*, 59, 19-29.