

B-5 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

(2) 対流圏における移流拡散モデルの開発に関する研究

研究代表者 資源環境技術総合研究所 林 正康

通商産業省 工業技術院 資源環境技術総合研究所

環境影響予測部

広域域間環境研究室

林 正康・蒲生 稔・田口 彰一

今須 良一・前田 高尚

大気環境予測研究室

山本 晋・兼保 直樹

平成3年度～5年度合計予算額 23,323千円

(平成5年度予算額 8,456千円)

[要旨] 解析された風速を用いた全球移流拡散モデルを開発した。このモデルは移流過程をセミラグランジュ、大気境界層を非局所的鉛直拡散、時間変化率に補正係数を掛ける形の質量保存機構を持ち、水平2.5度鉛直15シグマ座標で一日4回の濃度分布を計算する。

1992年のヨーロッパ中期予報センターの解析データを利用した実験の結果、このモデルは積雲による鉛直混合を含まないにもかかわらず南北半球間交換時間は一年であった。フロン11相当物質による実験で対流圏における南北半球間濃度差が観測とよく一致した。

[キーワード] 対流圏、移流拡散モデル、セミラグランジュ方式、大気大循環モデル

1. 序

地球大気を構成する化学成分は、太陽・地球系の自然変動と人間活動によって変動している。地球温暖化あるいはオゾン層の破壊を引き起こすと予想される産業活動起源の大気化学成分についても、発生源から遠くはなれた場所での現状把握と将来予測が重要な課題となっている。地球大気全域に渡る濃度の分布を再現するには、それらの物質の発生・移流拡散・消滅のそれぞれの過程の理解が必須である。

二酸化炭素は大気中では化学的に安定で大気中濃度が比較的長期間に渡って観測されているにもかかわらず、依然として発生源と消滅先に不明な事が多い¹⁾。このため今後の対策技術の展開と大気中濃度の予測に不確定を残したままとなっている。特に消滅先を特定するには地表面や海洋での素過程を解明する事と同時に、大気中濃度の観測から推定することも重要である。これらの観測を活用するためには3次元移流拡散モデルの必要性が指摘されている^{2), 3)}。

この様な要求に答える対流圏の移流拡散モデルが考慮しなければならない要素は次の3点である。第1に大気が温度成層を持っているためと卓越した東西方向の流れのために水平方向に限定された非等方的な拡散を引き起こす事、第2に地表付近から放出された物質は大気境界層を通じて自由大気に放出されるため、その拡散する速度が地表近くでの気象状態に影響される事、第

3に局所的に発生する大規模な積雲対流が鉛直の物質輸送に重要な役割を果たしている事である。これらの点はこれまでの研究によってその重要性が指摘されながら充分取入れられているとは言えない。

これらの点を取り入れた移流拡散モデルを手軽に利用できるように提供する事は、対流圏で安定な物質の消滅先の推定のみではなく、大気圏・生物圏の相互作用の理解のためにも不可欠であり、さらに光化学過程や湿性大気汚染の問題を検討する為にも必要である。

2. 研究目的

全球的な移流拡散の機構を解明するのは第1の目的である。そのため上に述べた3つの要素、すなわち格子点で表現される風速による移流拡散、この風速では表現されない大気境界層の乱流および積雲対流による鉛直輸送の効果を個別に検討する。

地球温暖化物質の発生源・消滅先の研究に利用可能な移流拡散モデルを開発することが本研究の最終的な目標である。

3. 研究方法

モデルの開発工程を年度順に①基本設計②積雲対流による輸送③大気境界層の3つに分けた。

第1年度の中心課題はモデルの基本設計を行い、移流拡散の計算方式を確立する事である。そのため移流拡散計算の開発および感度解析を行う。

モデルはセミラグランジュ法に基づき、移流のための風速は観測データまたは大気大循環モデルの出力を用いるオフライン型とする。観測データとしてはヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)作成の初期値解析値、また大気大循環モデルの出力としては米国大気研究センター(National Center for Atmospheric Research)のCommunity Climate Model version one (CCM1と略記)の低解像度(R15)版を利用する。

感度実験は時間切断誤差の解析を中心とし、①気候モデルから短い時間間隔で得られる疑似大気データを30分間隔で用いた場合と、観測データのように12時間間隔に間引き、それを内挿して計算する場合の比較、②12時間毎の観測データから風速を時間内挿して計算した場合の内挿の頻度による結果の比較、③保存性のある温位を移流して熱源を計算した場合の3種類を検討する。

第2年度の中心課題は低緯度における積雲による鉛直輸送の効果を評価し、客観解析データで鉛直輸送量が不足する場合は大気大循環モデルで用いられている積雲対流パラメタリゼーションを診断型に導入する。

低緯度に於ける大規模積雲活動の大気拡散に及ぼす影響は、2つ考えられる。

第一に、積雲による上向き輸送であり、第二にその結果生ずる水平拡散である。従来の研究ではこの2つは必ずしも区別されていない。

従来の研究では、観測される ^{85}Kr の緯度分布を説明するために、大気による水平拡散を積雲域に導入することで対処してきた^{3),4)}。

ここでは、まず客観解析データのみを用いた場合の半球間交換時間を計算する。これは、今回利用するデータ(ECMWF/TOGA)が重力波の除去処理を施さないデータであるため2.5度の解像度でも積雲クラスターにともなうメソスケール対流群の上昇流が含まれている可能性があるからで

ある。

最終年度の課題は大気境界層と総質量の保存機構を導入する点にある。地表から放出された物質は大気境界層の厚みに応じてモデルの下層のいくつかの層に加算される。大気境界層の厚みはバルクリチャードソン数によって算出する。

総質量は一回の時間積分では一万分の1の誤差しか含まないが一年の積分では数%の変動となる。これを防ぐために濃度の時間変化率に補正係数をかけることにより、時間変化しない領域での補正量を押え、大きく変動した部分に修正を集中する形式とする。

最後に寿命が長く発生源と大気中濃度の分かっている物質でモデルを検証する。

4. モデルの開発過程と実験結果

(1) モデルの基本設計

①移流の計算法

移流の計算方式としてセミラグランジュ法を採用した。セミラグランジュ法⁶⁾では各時刻で格子点の気体濃度をラグランジュ的に計算する。この手法は誤差の評価ができる事、気体の出発点を一度計算しておけば種々の物理量を移流する事が出来る点で適当と考えた。

②利用データ

感度実験のためには気象データとしてECMWF/WMO Global Analysis Data set (ECMWF/WMOと略記)の1988年と疑似気象データとしてCCM1の標準版(R15)の1月の条件に固定した積分の第20日の風速を用いた。

ECMWF/WMOは水平2.5度(144x73)、鉛直7層(1000,850,700,500,300,200,100hPa)に気温、湿度、3次元風速のデータがある。データの頻度は12時間毎である。

CCM1は東西7.5度(48)、南北約4.5度(86.6S-86.6Nに40)、の解像度で鉛直は12層(0.991,0.926,0.81,0.664,0.5,0.355,0.245,0.165,0.11,0.06,0.025,0.009)で、時間間隔は30分。標準で53の物理量が得られるがここでは水平風速のみを用いた。

③流跡線計算

水平移動は気圧座標(ECMWF)またはシグマ座標(CCM1)の水平風速を固体地球に固定した3次元カーチesian座標系のベクトルとして取り扱って計算した。これにより南北両極での計算が安定に行われる。移流の計算には時間に関して線形に内挿した風速を用いた。データの与えられる時間間隔を更に細分化して計算する場合は分割された時間の中央へ内挿した風速を用いた。移流計算には、到着点の風速を用いたが、到着点が格子点と一致しない場合は、水平方向は緯度経度に関して線形、鉛直方向は気圧またはシグマに関して線形に内挿した風速を用いた。

④感度解析の結果

ア. 風速データの時間間隔の影響

NCAR/CCM1の30分毎の風速データとそれを間引いて用いた場合の出発点の差による時間切断誤差の解析を行った。NCAR/CCM1を工業技術院情報計算センター(RIPS)へ移植し、1ステップ毎の出力を得た。1975年1月15日を初期値とした20日間の数値積分を行い最後の1日のデータを利用した。

30分毎の風速をすべて使用した場合と12時間の間隔のデータを30分毎に内挿して用いた場合での出発点の計算結果を比較した。その結果、最大の差は約7度で中緯度対流圏上部で発生

していた。低緯度での差は1度以下であった。

イ. 風速データの内挿頻度と出発点の位置の関係

ECMWF/WMOの1988年1月1日0Zの200hPaの風速場が12時間定常に吹いていたとして、12時間の間隔を2, 4, 8, 16, 32, 64回時間空間で内挿した風速を使って出発点を計算した。その結果出発点の変化は32回(22.5分)と64回(11.5分)ではその差が1度以下であった。従って30分より頻繁な内挿を行っても精度は向上しないと考えた。

ウ. 風速データの内挿回数と温位の移流による正味加熱冷却率の関係

ECMWF/WMOの1988年1月の気温と風速から、計算された流跡線によって断熱過程で保存される温位を移流しその変化から加熱率を計算した。内挿する時間間隔によって計算される加熱率は変化した。12時間を一つの時間間隔として計算した場合、1カ月平均の加熱率は中緯度対流圏上部の子午面平均で-6度/日と計算された。一方12時間を24回時間内挿し30分毎に追跡した計算では-1度/日と計算された。これ以外の場所では加熱率に大きな変動はなかった。

加熱率が時間内挿に依存しやすい場所が中緯度対流圏上部である点は疑似気象データでの感度実験の結果と一致している。また、長い時間間隔で計算した出発点の位置は系統的な誤差を含んでいる事を示唆している。これはこの付近の波動の形状にも関係しているのではないかと推測される。

(2) 積雲対流による鉛直輸送の効果

①気候モデルの中における積雲による水蒸気の鉛直移流の効果

米国大気研究センターの共同利用気候モデル(NCAR/CCM1)に、従来組み込まれていた湿潤対流調節に加えオーブレヒトの対流パラメタリゼーション⁶⁾を組み込み、その効果を調査した。オーブレヒトのパラメタリゼーションは大気の鉛直成層状態から対流の発生を予測し成層状態に応じた水蒸気の鉛直フラックスを推定するスキームで、移流拡散モデルへ導入することも原理的には可能である。

このパラメタリゼーションの導入により、水蒸気が上層へ輸送され、対流圏上部の水蒸気量を約2g/Kg増大させた。これにともない、気温も約3度上昇し観測値に近付いた。

②仮想的な物質の拡散実験

ア. 初期に南極で1北極でゼロとなるような線形の濃度分布を与える。高さと経度方向には濃度勾配をもたせない。これを1月1日に与えて、一年間の拡散実験を1989, 90, 91の3年について行った。

イ. 利用データ

輸送の計算のための気象データとしてECMWF/TOGA Basic LEVEL-III と呼ばれるデータで水平2.5度、鉛直14層と地表、一日二回、期間は1989年から1991年の3年間である。

また、雲の統計として国際雲気候研究計画(ISCIP)のC2データ(GEDEX-CDRROM, NASA)を用いた。

ウ. 南北半球大気境界

濃度傾度の強い部分が対流圏下層に見いだされた。この境界は経度方向にも変動し、季節とともに南北に移動した。北半球の夏には全ての傾度で北半球側へ移動し特にインド洋ではチベット付近まで北上した。北半球の冬は南半球側へ移動し、特に南アメリカではアマゾンの南側まで移動した。同様の実験は従来⁷⁾も行われているが、帯状平均の場が注目されているために、地域的

な差異には言及されていない。

エ. 南北半球間交換時間

鉛直に積分した仮想物質の量を東西に平均した。全球平均と一致する緯度を境界と定義した。この境界の移動と両側での濃度の変動とを最小自乗法的に解いて南北間移動量を推定し、交換時間を計算した。その結果北から南は北半球の春に多く、南から北は秋に大きく、平均すると約1年であった。

オ. 南北半球間大気境界と積雲活動

ISCCPの雲の統計と比較すると、濃度勾配の強いところは上層雲の多い領域の極側に位置することが分かった。これは直接循環の上昇流域が赤道から離れた場合に南北非対象となる為だと理解される。すなわち赤道から離れたところでは直接循環の赤道側が強くなり極側には強い循環が見えなくなる事と対応している。この点は従来南北半球間交換過程の研究では強く意識されていなかったが、今回の実験によりその重要性が明確となった。すなわちモンスーンなどの領域例えばインドでは5月から9月に掛けては南半球の大気成分の影響を強く受けており、アマゾンでは12月から3月に掛けて北半球の影響を強く受けている。

(3) 大気境界層の導入

バルクリチャードソン数を用いて大気境界層の高度を計算し地表から放出された物質は この中に一様に拡散すると仮定した。

まず、一日2回(00, 12 UTC)の気象データを用いた場合は地方時の影響で、境界層高度は不均一となった。特に、オーストラリアとアマゾンでは、00, 12 UTCが、午前、午後9時頃に対応するので、熱的に形成される混合層は発達せず、地表に発生源を置いても自由大気中へ注入されないという障害が発生した。このため一日4回(1992年: 00, 06, 12, 18 UTC; ECMWF/TOGA Advanced Upper Air dataset)の気象データに変更したところ この問題は解決した。

(4) 質量保存機構の導入

セミラグランジ1法の一つの欠点は総質量を保存させる事ができない点である。前年度までのモデルでは、1回の積分では1万分の1の精度が保たれていたが1年の積分(720回)では濃度が5%上昇した。

まず鉛直座標を気圧系からシグマ系へ変換した上で、各格子点の濃度の時間変化率に補正係数を乗ずる事によって、全質量を保存させる方式を導入した。ここでは、全質量が増加した場合は、増加した格子点のみに調整を加える(減少した場合は減少した格子点に)方式を採用した。これは時間変動が小さい点での修正量をできるだけ小さく抑制する事と、調節を加える格子点をできるだけ少なく抑えるためである。これによって、全質量は1年の積分によっても1千分の1程度に保存された。

(5) 定常発生源による試算

電力消費量に基づく発生源の水平分布と工業統計に基づく発生強度の年変化を用いてCFC-11に相当する物質の濃度を10年にわたって計算した。

CFC-11は大気寿命が、約65年で成層圏での紫外線による破壊が主な消滅先とされているが、今回は導入していない。

半球間濃度差は15 pptvとなり、ALE/GAGEの観測と一致した。

5. 考察

感度実験の結果から、中緯度対流圏の上部では風速を30分程度の間隔で与えても流跡の計算で最大12時間に7度の誤差が発生することが分かったが、これから考察する地球温暖化物質に関してはこの付近は発生源から遠いので濃度の水平傾度が小さいことが予想され、濃度の時間変化の計算への影響は小さいと思われる。但し、成層圏から供給されるオゾンの濃度を考える場合は別途検討する必要がある。

移流拡散計算に良く用いられているGISSモデルでは時間積分の方法を変えないまま水平解像度の影響などが調査され、水平解像度が結果に影響しないことから8度×10度の水平解像度で計算が行われている。今回の感度実験では時間内挿の影響は空間内挿を通して起きているので、GISSモデルでの結果には疑問が残った。

このモデルでは水平拡散係数を全く取り入れていない。水平拡散は出発点が格子点の中間に位置した場合に計算誤差として発生する。上昇流をゼロと置いた実験では対流圏下層に強い濃度傾度が形成され解消されなかった。上昇流をゼロとすると水平風速の収束がある場合に周囲の情報をもって来るので傾きが生じ、その部分の拡散とのバランスで濃度が決まっていると考えられる。このことから線形の内挿による拡散が大きすぎるとは判断できなかった。

熱帯の対流活動にともなう鉛直移流はここで用いたデータに関する限り表現されている可能性があり、従来の大気輸送モデルで行われているような特別の処理は必要なかった。但し、大気大循環モデルの計算結果を利用する場合は改めて検討する必要がある。

このモデルでは対流圏の下層に南北半球大気の明瞭な境界が見いだされこれが季節とともに南北に移動する様子を観察することが出来た。

モデル大気の微量成分の総量を保存させるため、鉛直座標はシグマ座標とした。モデル下層に設定した大気境界層で非局所的鉛直拡散を導入したが、モデルの下部境界に与えたフラックスを全球で積分した一年当りの放出量と一年間の積分を行った後の全球積分量は必ずしも一致しなかった。このため補正係数を掛けることで両者を一致させた。大気境界層の高度は場所と季節によって異なるため定常なフラックスを与えてもモデル大気に入る物質の量は季節によって変動した。

対流圏と成層圏の間の交換時間は成層圏の交換時間として3カ月であった。観測からは約2年とされるので対流圏と成層圏を同時に含むモデルとするためには圏界面付近の輸送過程を今後改良する必要がある。

6. まとめ

数年より長い寿命を持つ大気微量成分の地球大気下層における濃度分布が精度良く再現出来る全球移流拡散モデルが開発された。その理由は、格子点気象データの整備、微量成分観測の蓄積、移流拡散モデルの改良の3点に要約できる。

格子点気象データが整備された理由は、人工衛星データの利用技術が向上した事と、数値天気予報の精度が向上した事が大きい。国連の下部組織である世界気象機構(WMO)が中心となって、1979年にFGGEと呼ばれるプロジェクトが実施され、初めての全球格子点気象データが作成された。英国に設置されたヨーロッパ中期予報センタ(ECMWF)は、4次元データ同化と呼ばれる手法で、気球、航空機、人工衛星等の観測を数値予報の結果と組合せ、世界を約5

0 kmの網目で覆う格子点での気温、水蒸気量、風速等の気象データを高さ約30 kmまで作成している。このモデルが従来のモデルに較べて優れている最も大きな理由はこの気象データが優れているからと考えられる。

マサチューセッツ工科大学 (MIT) やジョージア工科大学は、大気寿命実験に端を発する一連のプロジェクト (ALE/GAGE/AGAGE) の中で、世界の5カ所においてフロンやメチルクロロフォルムを1978年から測定している。これらのデータは二酸化炭素情報解析センタ (CDIAC) から公開されている。このデータは移流拡散モデルを検証する上でたいへん有効で従来85 Kr等によるものよりはるかに優れていると考えられる。

輸送を計算する手法は、地球に固定したオイラー法と気体に固定したラグランジュ法で計算する方法があり、それぞれ一長一短がある。今回は両者を組み合わせたセミラグランジュ法を利用したが、気象データのように比較的疎らにしか風速が獲られない場合でも有効性であることが明らかとなった。

7. 本研究により得られた成果

水平2.5度、鉛直15層のシグマ座標を用いて全球移流拡散モデルを作成した。南北半球間交換時間は約1年間でCFC-11の実験結果は観測と一致した。

開発された3次元移流拡散モデルは、二酸化炭素やメタンの発生源や消滅先の推定に用いられる他、代替フロンの大気中寿命の推定や対流圏大気化学の研究にも利用できる。

8. 参考文献

- 1) WMO/UNEP, 1990; Climate change, The IPCC scientific assessment, J.T.Houghton ed., Cambridge University Press, pp365.
- 2) Tans, P., T.J.Conway, and T.Nakazawa, 1989; Latitudinal distribution of the sources and sinks of atmospheric carbone dioxide derived from surface observation and a tropospheric transport model, J.G.R., 94, 5151-5172.
- 3) Heimann, M., and C.D.Keeling, 1989; A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 2. model description and simulated tracer experiments, in Aspects of climate variability in the pacificand the western americas, edited by D.H.Peterson, Geophysical Monograph 55, American Geophysical Unicon, Washington, DC, 237-275.
- 4) Taylor J.A., G.P.Brasseur, P.R.Zimmerman, and R.J.Cicerone, 1991; A study of the sources and sinks of methane and methyl chloroform using a global three-dimensional lagrangian tropospheric tracer transport model, J.Geophys. Res., 96, 3013-3044.
- 5) Trenberth K., E., 1992: Global analyses from ECMWF and atlas of 1000 to 10mb circulation statistics. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-300+STR, 94pp.
- 6) Albrecht, B., A., V. Ramanathan and Byron A. Boville, 1986; The effects of cumulus moisture transport on the simulation of climate with a general circulation model. J. Atmos. Sci., 43, 2443-2462.
- 7) Plumb, R. A. and J.D.Mahlman, 1987; The zonally averaged transport characteristics

of the GFDL general circulation/transport model, J. Atmos. Sci, 44, 298-327.

・国際共同研究等の状況

工業技術院国際特定共同研究・地球環境技術として豪州・CSIRO（産業技術研究開発機構）、大気研究部門と「南北両半球球にわたる物質循環輸送過程及びそのモデル化の研究」を実施。

・研究発表の状況

講演

田口 彰一、山本晋、林正康、尾形和彦、セミラグランジュ法を用いた大気の正味かねつ冷却率の推定。1991年日本気象学会秋期大会。

田口 彰一、尾形和彦、山本晋、林正康、対流圏における物質輸送の研究（I）、第33回大気汚染学会。

田口 彰一、水蒸気の鉛直輸送を導入したNCAR-CCM1の気候、1992年日本気象学会春季大会

田口 彰一、対流圏の南北両半球大気境界、1992年日本気象学会秋期大会

チョン・ヒョンビン、木村龍治、田口 彰一、500hPa等圧面から見た大気変動の特性：夏半球と冬半球の比較、1992年日本気象学会秋期大会

田口 彰一、地球規模拡散の可視化、第33回大気汚染学会

Taguchi,S., The interhemispheric exchange in an atmospheric transport model based on observed winds, Fourth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography.

Taguchi,S.,J.Hack, The climate of the CCM1 with a hybrid cumulus convection. Fourth workshop on the community climate model.

Taguchi,S., A three dimensional global transport model for source/sink detection of carbon dioxide, Fourth International CO2 conference.

Taguchi,S and J.Taylor, A simulation of methane and methyl chloroform using the NIRE global three-dimensional tracer transport model., International symposium on global cycles of atmospheric greenhouse gases.

田口 彰一、全球3次元モデルを用いたCFC-11の濃度の試算。消滅を考えない場合の結果。1994年日本気象学会春季大会。

論文

田口 彰一、積雲活動による輸送が対流圏の水蒸気の平均濃度場に与える影響について。公害。

Taguchi,S., Inter-hemispheric exchange in the troposphere by an atmospheric transport model based on observed winds, J. Meteor. Soc. Japan.

Taguchi,S., Cross tropical trajectories in the troposphere, J. Meteor.Soc.Japan.