

B-1 気候・物質循環モデルによる気候変動の定量的評価に関する研究

(2) 人為起源硫酸塩排出データに基づく気候モデルによるエアロゾル分布導出の試行的研究

研究代表者 国立環境研究所大気圏環境部大気物理研究室 神沢 博

環境庁国立環境研究所

大気圏環境部

大気物理研究室

野沢 徹・江守 正多・日暮 明子

地球環境研究グループ 温暖化影響・対策研究チーム

甲斐沼美紀子・増井 利彦

社会環境システム部 環境経済研究室

森田 恒幸

平成9～11年度合計予算額 2,626 千円

(平成11年度予算額 2,626 千円；平成11年度のみ実施)

[要旨] エアロゾル関連排出シナリオデータの気候モデルへの入力インターフェースの検討および入力データの作成を行った。具体的には、IPCC 第3次報告書 (TAR: Third Assessment Report) への貢献を目的の一部とした地球温暖化の将来見通しに関わる CCSR/NIES 気候モデルによる数値実験に必要な研究の一部、すなわち、エアロゾル排出データのグリッド化とエアロゾル分布の導出を行った。その導出の際、地球温暖化統合評価モデルによる排出シナリオデータの気候モデルへの入力インターフェースの検討を、硫酸塩の他に炭素性エアロゾルも対象とし、IPCC の SRES 排出シナリオに即して行った。その結果、より整合性の高いインターフェースを作成するためには、気候モデルの中のエアロゾル輸送モデルが必要とする CO₂ 排出源と統合評価モデルから得られる CO₂ 排出源の両者が一致しない場合の対処方法、および、排出量の格子点データを作成する際の国毎の経済成長率の違い、人口移動、等の要因の取り扱い方法を開発する必要があることが判明した。

[キーワード] 全球気候モデル、排出シナリオデータ、格子点化、エアロゾル分布

1. 序

地球温暖化研究において解決すべき大きな課題の一つは、地球温暖化をもたらす温室効果気体および地球温暖化を基本的には抑制する働きのある対流圏エアロゾルの人為的発生量の定量的評価に基づいて、数値気候モデル計算を行い、地球温暖化の時空間分布を定量的に推定することである。温室効果気体およびエアロゾルの人為的発生量の年々変化に関する様々なシナリオに対して、気候がどのように応答するかを数値気候モデル実験により明らかにすることは、学問的に興味深い研究であるとともに、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) に貢献する研究ともなる。

2. 研究目的

影響および対策評価のため国立環境研究所が中心となり開発してきているアジア太平洋地域における温暖化対策統合評価モデル (AIM: Asian-Pacific Integrated Model) やその他の世界の研究機関等が開発し

たモデルによって得られるエアロゾル源のさまざまな排出シナリオデータをグリッド化し、気候システム研究のため国立環境研究所 (NIES) が東京大学気候システム研究センター (CCSR) と共同で開発している CCSR/NIES 気候モデル (CCSR/NIES CM: Climate Model) にインプットするためのインターフェースを作成することを目的とする。

3. 研究の方法・特色

本研究は、気候モデル (CCSR/NIES CM) と影響および対策評価のためのアジア太平洋地域における温暖化対策統合評価モデル (AIM) の2つのモデルを有機的に結びつける研究の嚆矢となるものである。自然系のモデルと社会経済系の2つのモデル研究推進者を有する研究所は、国内においては国立環境研究所以外に存在せず、また、国外においてもわずかであり、本研究課題の研究方向は推奨されているが、実現した例は国外における萌芽的研究を除くと存在しない。

4. 結果および考察

統合評価モデルによる排出シナリオデータの気候モデルへの入力インターフェースとして、AIM 等によって得られる二酸化炭素などの排出シナリオに応じた気候モデル実験を行うため、IPCC の新しい排出シナリオ、すなわち、IPCC WG III で作成された SRES (Special Report on Emissions Scenarios) (森田, 1999; IPCC, 2000)、を題材に取って以下のような研究を行った。SRES において、地球温暖化関連物質の新しい4つの排出シナリオファミリー (narrative scenario family) が設定されている (A1 高成長社会シナリオ、A2 多元化社会シナリオ、B1 持続発展型社会シナリオ、B2 地域共存型社会シナリオ)。A1, A2, B1, B4 の4つのマーカーシナリオ (marker scenario) データが SRES Web Site より提供されており、それを使用した。なお、SRES の最終報告では、A1 シナリオが A1B, A1T, A1FI の3つのグループに分けられ、最終的には4ファミリー、6グループとなった (IPCC, 2000)。ここでは、A1 シナリオとしては、当初より A1 の代表的シナリオとして掲げられていた A1B (AIM が作成担当) を取り上げた。したがって、以下で、および、サブテーマ (1) の報告で、A1 と記載されているのは、A1B のことである。

(1) IPCC の新しい排出シナリオにおける排出データの調和

SRES では、各シナリオに対する排出データはそれぞれ異なった経済モデルを用いて計算されている。そのため、排出量が同じであると仮定している 1990 年および 2000 年においても、その数値は異なった値を示している。この問題点を回避するため、以下のような手順で各シナリオデータを調和させた。

- ・ 1990 年、2000 年においては、4 シナリオ (A1B, A2, B1, B2) の排出データの平均値を各シナリオの排出データとする。

- ・ 2010 年以降は、2000 年におけるもともとの排出量と平均値との差を、各年におけるもともとの排出量に足し合わせ、その数値をその年の排出量とする。ただし、二酸化硫黄排出や土地利用変化起源の二酸化炭素排出など、将来的に減少が予想されている量に関しては、足し合わせる値を 10 年に 10% づつ減少させ、2100 年における排出量が各シナリオのもともとの 2100 年の値となるように調整する。

このような操作によって各排出シナリオは一般的には歪められるため、複数のシナリオを考えるような場合には、可能なかぎり同じ経済モデルを用いることが望ましい。なお、SRES においては、AIM

は A1 (A1B) シナリオを担当している。AIM は他の 3 つのシナリオ (A2, B1, B2) のデータも計算しているので、近い将来、AIM の 4 つのシナリオによる排出データを使用してゆく予定である。

排出シナリオ SRES に対応した CCSR/NIES 気候モデル (大気海洋結合全球モデル) 実験の計画は以下のとおりである。

シナリオ	すべて (4 シナリオ: A1 (A1B), A2, B1, B2) 行う
解像度	大気: 水平 $5.6^{\circ} \times 5.6^{\circ}$; 鉛直 20 層 海洋: 水平 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$; 鉛直 17 層
温室効果気体	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, 13 種類の Halocarbon (Halocarbon に関してはシナリオ共通) (CO ₂ 換算でなく、大気組成を個別に扱う)
対流圏オゾン	1990 年からの増分をシナリオに応じて変化させる (増分に対する空間分布は固定)
成層圏オゾン	帯状平均の気候値を経度方向に一樣に与える
エアロゾル	硫酸、炭素性、ダスト、海塩の 4 種類のエアロゾルによる直接・間接気候影響を考慮する (硫酸、炭素性エアロゾル分布については CCSR エアロゾル輸送モデルを用いて各排出シナリオより計算)

なお、この実験の結果については、サブテーマ (1) の報告で述べられている。

(2) 二酸化炭素排出シナリオの格子点データ作成

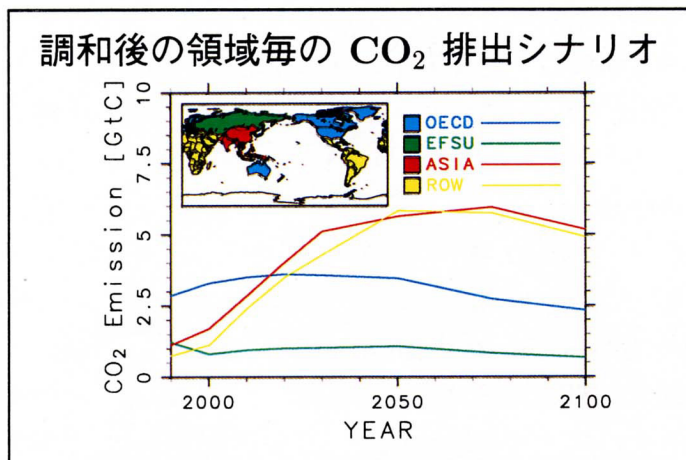
AIM などの経済モデルによって得られる排出データは、経済成長の度合や地域性等を考慮して全世界を十程度に分割した各領域毎の積算値である。これらのデータを数値気候モデルに与えるためには、何らかの方法を用いて排出データを格子点化しなければならない。ここでは、IPCC の新しい 4 つのシナリオにおける二酸化炭素排出データに対して、以下のような方法で格子点化作業を行った (図 1 参照)。格子点データの作成方法に関しては、二酸化硫黄に対して NCAR の S. Smith が行った方法 (IPCC, 2000) を基本的には踏襲している。

・全世界を 4 地域に分ける: (a) OECD 加盟国: EU・アメリカ・カナダ・日本・オセアニア、(b) 東欧および旧ソ連、(c) アジア、(d) それら以外: 中東・アフリカ・中南米)。各領域積算値に対して、上記 (1) の調和操作を行う (図 1a)。

・各領域内の分布については、既存の格子点データ (EDGAR V2.0 (Oliver et al., 1996), GEIA (Cooke and Wilson, 1996) など) を上記で求めた積算値でスケーリングして与える (図 1b)。

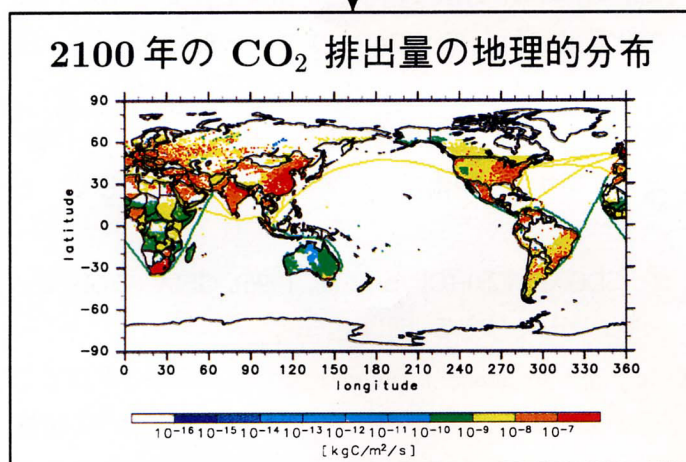
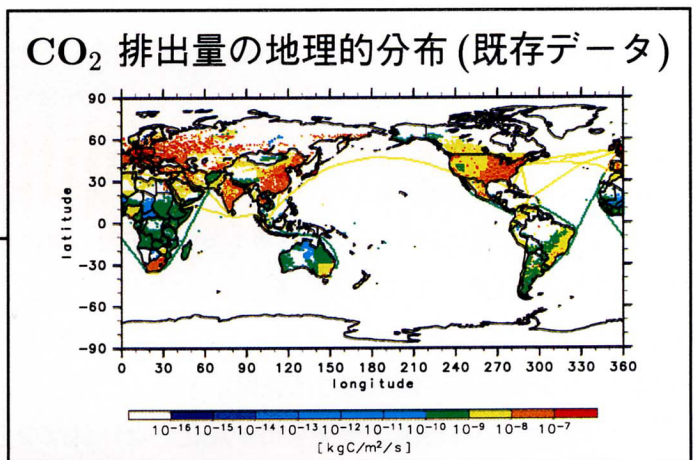
二酸化炭素排出量に関する既存の格子点データ ($g(i,j)$, i : longitude, j : latitude) から各領域毎の積算排出量 ($G(R) = \sum g(i,j)$, (i,j) は領域 R に含まれる格子点) を求め、スケーリング後の各領域における積算排出量 ($H(R) = \sum h(i,j)$) が上記で求めた排出シナリオによる領域積算排出量 ($S(R)$) に等しくなるようにスケーリングを行う ($h(i,j) = g(i,j) / G(R) * S(R)$)。すなわち、スケーリングファクターは、 $S(R) / G(R)$ である。こうして将来の二酸化炭素排出量の格子点化を行う (図 1c)。

ここで用いた領域分割数は、もともとの排出シナリオデータの制約によって決定されたものであるが、本格的な格子点化作業を行う場合には、より細かい領域分割が必要である。また、今回の格子点化作業では、各領域内の国同士の経済成長や人口増加などの違いは全く考慮されていない。東アジアなどの地域スケールの温暖化を考える場合には、これらの要因も考慮に入れた格子点化方法を確立することが望



(a)

(b)



(c)

エアロゾル輸送モデルへ

図 1: 将来における二酸化炭素排出量の地理的分布を求める方法の流れ図. AIM モデルが担当している A1 シナリオの化石燃料起源の二酸化炭素排出量を例にとって図示している. (a) 各領域毎に調和操作を行った後の排出シナリオ. (b) 既存の格子点データ. EDGAR V2.0 (Oliver et al., 1996) より引用している. (c) 2100 年時点における化石燃料起源の二酸化炭素排出量の地理的分布.

まれる。

(3) 物質輸送・変質モデルによる大気中のエアロゾル分布の作成

CCSR/NIES 気候モデルが必要とする変数は温室効果気体やエアロゾルの大気中濃度であるため、上記で求めた排出量の格子点データから大気中濃度を求める必要がある。この過程の流れを図 2 に示す。炭素性エアロゾルには、硫酸エアロゾルと同様、主に太陽放射を散乱する親水性エアロゾル (organic carbon: OC) と、煤に代表されるような、主に太陽放射を吸収する疎水性エアロゾル (black carbon: BC) とがある。両エアロゾル排出量の比率 (OC/BC) は燃焼形態によって大きく異なると考えられ、ここでは起源別に異なる数値を与える。化石燃料および木燃料起源の炭素性エアロゾルに関しては、それぞれ $OC/BC = 3.33, 5.64$ とし、全球一様であると仮定する。森林火災・焼き畑起源に関しては、熱帯林とその他の森林とを区別し、それぞれに対して $OC/BC = 8.28, 6.92$ と仮定する。

ここでは、CCSR/NIES 気候モデルの枠組みの中で最近開発したオフラインの物質輸送・変質モデル (Takemura et al., 2000) を用いて、二酸化炭素排出データから炭素性エアロゾル濃度を求めた。物質輸送・変質モデルで必要となるデータは、化石燃料起源、木燃料起源、森林火災・焼き畑起源の BC 排出量である。そのため、上記 (2) で求めた二酸化炭素排出量をスケールリングすることにより、各 BC 排出量を求めた。スケールリングファクターは、1990 年における全球積算 BC 排出量が化石燃料起源では 7.786 TgC/year、木燃料起源では 1.352 TgC/year、森林火災・焼き畑起源では 6.436 TgC/year となるように決定した。化石燃料および木燃料起源の二酸化炭素排出量に関しては、それぞれ対応するシナリオデータが存在しており、比較的容易に求める事ができた。しかし、森林火災・焼き畑起源については、現状では対応するシナリオデータが存在しないため、便宜的に化石燃料以外による二酸化炭素排出データを代用した。領域積算排出量が負となる場合には、物質輸送・変質モデルでは負の排出量を取り扱えないため、スケールリングファクター $S(R)/G(R)$ を 0 とした (排出シナリオにおける化石燃料以外による二酸化炭素排出量は、主に土地利用変化によるものと考えられる森林面積の増減に対応して二酸化炭素を吸収 (負の排出) あるいは排出させているため、化石燃料以外による二酸化炭素排出量が負の数値を持つ場合が生じている)。したがって、シナリオによっては、森林火災・焼き畑起源の排出が全世界的に 0 というケースが出てきてしまった。この問題点を今後どのように解決するかは大きな課題である。

(4) 課題

より整合性の高いインターフェースを作成するためには、以下の 2 つの課題が残されている。

- (a) 排出データの対応の整合性：気候モデルの中のエアロゾル輸送モデルが必要とする CO₂ 排出源と温暖化統合評価モデルから得られる CO₂ 排出源の両者が一致しない場合にどのように対応させるかが課題のひとつである。例えば、森林火災・焼き畑を化石燃料以外を起源とする CO₂ 排出 (土地利用変化による CO₂ 排出/吸収) の場合。
- (b) 排出データの空間分布：現状では各領域内の空間分布は固定 (既存のデータを利用) し、国ごとの経済成長率の違い、人口移動、等は全く考慮されていない。排出量の格子点データを作成する際に、これらの要因をどのように加味するかが課題のひとつである。

5. 参考文献

Cooke, W.F. and J.J.N. Wilson (1996): A global black carbon aerosol model. J. Geophys. Res., 101, 19395-19409.

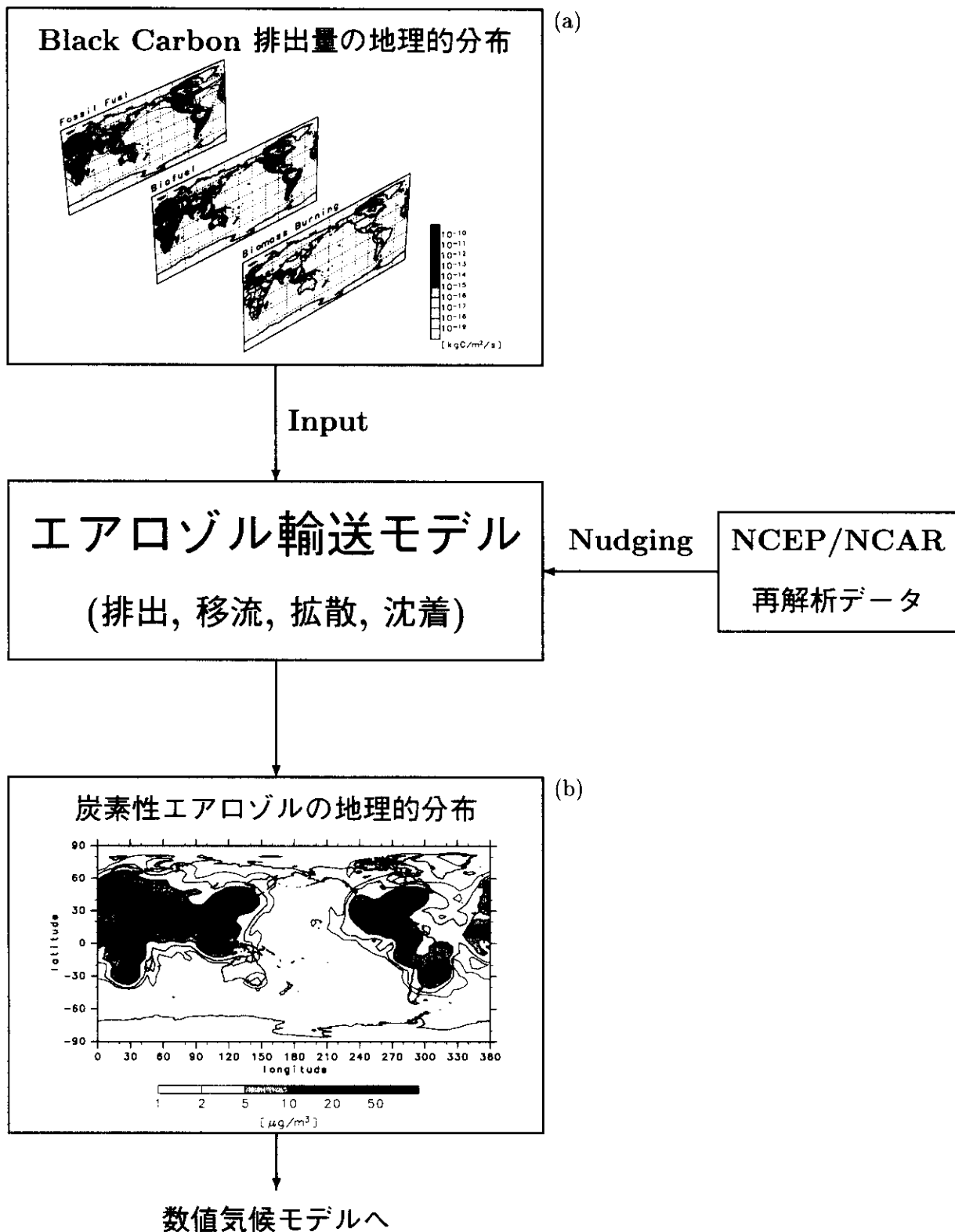


図 2: 将来における炭素性エアロゾル濃度の 3 次元分布を求める方法の流れ図. AIM モデルが担当している A1 シナリオの 2100 年を例として図示している. (a) 2100 年時点における Black Carbon 排出量の地理的分布. 左から順に化石燃料起源, 木燃料起源, 森林火災・焼き畑起源を示す. (b) 2100 年時点における地表付近の炭素性エアロゾル濃度の地理的分布.

IPCC (2000): Special Report on Emission Scenarios. Cambridge Univ. Press, to be published.

森田恒幸 (1999): 地球温暖化と経済. 「大気環境の変化」 (岩波講座地球環境学 3) 第 6 章, 岩波書店, p.249-279.

Olivier, J.G.J., A.F. Bouwman, C.W.M. van der Maas, J.J.M. Berdowski, C. Veldt, J.P.J. Bloos, A.J.H. Visschedijk, P.Y.J. Zandveld and J.L. Haverlag (1996): Description of EDGAR Version 2.0. A set of global emission inventories of greenhouse gases and ozone-depleting substances for anthropogenic and most natural sources on a per country basis and $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ grid. RIVM report nr. 771060 002 (TNO-MEP report nr. R96/119), 171pp.

Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi and T. Nakajima (2000): Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. J. Geophys. Res., 105, D14, 17853-17874.

[国際共同研究等の状況]

IPCC 第 3 次報告書 (TAR: Third Assessment Report) への貢献に必要不可欠な研究である。本研究で得られたエアロゾル濃度データを用いた CCSR/NIES 気候モデル実験の結果得られたデータ (サブテーマ (1) の報告参照) は、IPCC 事務局に登録されており、また、IPCC TAR に引用される予定である。

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

野沢徹, 江守正多, 沼口敦, 竹村俊彦, 中島映至, 阿部彩子, 木本昌秀 (1999): 多種類のエアロゾルによる直接・間接効果を考慮した場合の全球大気海洋結合モデルを用いた気候変化実験. 日本気象学会 1999 年秋季大会, 福岡, 1999 年 11 月.

Nozawa, T., S. Emori, A. Numaguti, T. Takemura, T. Nakajima, A. Abe-Ouchi and M. Kimoto (2000): Coupled ocean-atmosphere model experiments of future climate change based on IPCC SRES scenarios. 11th Symposium on Global Change Studies, Am. Meteorol. Soc., Long Beach, CA, U.S.A., January 2000.

Nozawa, T., S. Emori, A. Numaguti, T. Takemura, T. Nakajima, A. Abe-Ouchi and M. Kimoto (2000): Projections of future climate change simulated by a coupled ocean-atmosphere model under the IPCC SRES scenarios. The Joint Workshop for the Indonesian Forest Fire and its Environmental Impacts, Tokyo, March 2000.

野沢徹, 江守正多, 沼口敦, 竹村俊彦, 中島映至, 阿部彩子, 木本昌秀 (2000): 大気海洋結合モデルによる将来の気候変化見通し実験における対流圏エアロゾルの気候影響. 日本気象学会 2000 年春季大会, つくば, 2000 年 5 月.

(2) 論文発表

Nozawa, T., H. Kanzawa, Y.N. Takayabu, S. Sugata, S. Emori, A. Higurashi, K. Takata, A. Numaguti, A. Abe-Ouchi and M. Kimoto (1999): Direct and indirect radiative forcings due to various aerosols. CGER's Supercomputer Activity Report, Vol. 7, 16-21.