

33. 東南アジアにおけるバイオマスバーニングの対流圏大気化学に及ぼす影響 —1994年9-10月事例のモデルシミュレーション—

Implication of Bio-mass Burning in Southeast Asia in Tropospheric Chemistry - Numerical Simulation of the Event for September-October in 1994 -

北田敏廣*・西沢匡人*・倉田学児*・千田幸広*・鶴田治雄**・近藤豊***

Toshihiro KITADA, Masato NISHIZAWA, Gakuji KURATA, Yukihiro CHIDA,
Haruo TSURUTA, and Yutaka KONDO

ABSTRACT: Numerical simulations were performed to investigate effects of bio-mass burning on tropospheric chemistry in Southeast Asia. Transport/transformation/deposition model for trace chemical species in semi-global scale (Kitada and Nishizawa, 1998) was used to simulate the severe fire events in September-October, 1994. Results were compared with vertical profiles of ozone observed at Kuala Lumpur and Watukosek, Java, and their agreements were generally good, though an unresolved gap between calculation and observation at Watukosek remained. Contributions of the bio-mass burning to the concentrations of several trace chemical species were also evaluated. This study means the first step to modeling work in the BIBLE project sponsored by NASDA.

KEYWORDS: chemical transport model, bio-mass burning, ozone, southeast Asia, lightning

1. はじめに

1994年、1997年の激しい森林火災を契機に、東南アジアでもバイオマス燃焼による広域大気汚染や大気化学への影響が、注目されている。我が国のBIBLEプロジェクトも、ジャワ、スマトラ、カリマンタン等のバイオマス燃焼が大気化学に与える影響を明らかにするために企画され、そのPhase Aが、すでに昨年実行された(近藤、1999年)。本研究は、BIBLEプロジェクト支援の大気化学物質輸送・反応シミュレーションモデル構築の予備研究の意味を込めて、インドネシア(南半球)の乾季に、やはり、顕著なバイオマス燃焼が見られた1994年9-10月(鶴田、1997年)を対象に微量大気化学物質の輸送・反応シミュレーションを行ったものである。

2. 微量化学物質の輸送・反応数値モデル

輸送・反応・沈着の数値モデルは、東アジアの酸性物質輸送、PEM-Bのシミュレーション等に用いたもの(Kitada and Nishizawa, 1998; Kitada et al., 1998)を、当該対象領域用に改変したものである。計算領域は、東西方向: 80°E - 160°E 、南北方向: 10°S - 60°N 、鉛直方向: 地表面-10hPaである。水平格子長 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、鉛直方向には変動格子長を持つ17層である。モデルは、移流、拡散、サブグリッド積雲対流、化学反応、乾性・湿性沈着のプロセスを含む。輸送化学種は、25種(NO , NO_2 , HNO_3 , PAN, O_3 , H_2O_2 , SO_2 , SO_4^{2-} , CO, 炭化水素類等)、その他、定常状態仮定適用が、13種(OH , HO_2 等)である。化学反応システムは、90の反応を含む。タイムステップは、輸送部分が30分、化学反応部分が12秒である。流れ、気温、水蒸気等は、ECMWF (operational analysis)の6時間毎のデータ、降水量は、同じく24時間(積算)毎の数値を用いた。シミュレーション期間は、1994年9月15日00GMT-同10月5日00GMTまでの20日間である。

* 豊橋技術科学大学エコロジー工学系、Dept. of Ecological Eng., Toyohashi Univ. of Technol.

** 農林水産省農業環境技術研究所、National Institute of Agro-Environ. Sciences

*** 名古屋大学太陽地球環境研究所、STE Lab., Nagoya Univ.

3. 化学物質排出源分布

バイオマス関連を除いて、以下の排出源を使用した。人為 NOx (化石燃料、地表レベル) : EDGAR(1990 年対応、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)、人為 NOx(航空機) : NASA(1990 年対応、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)、人為 NMHC : EDGAR(1990 年対応、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)、自然 NOx(土壌) : Levy and Yienger(1995) (9, 10 月用、気候值的、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)、自然 NOx(lightning) : Kumār et al. (1995) (9–11 月対応、気候值的)。

バイオマス燃焼に関わる排出量をシミュレーション期間の現実に対応させて得るのは極めて困難である。したがって、本計算では、仮に、EDGAR の年間値(1990 年対応、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)と NOAA-AVHRR より推定された火災イベント分布 (IGBP ホームページ : 1993 年対 10 日毎、 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$) から 9, 10 月対応分を推定した。図 1 に、このようにして推定した 9 月のバイオマス燃焼 (火災) に基づく NOx の排出源分布を示す。

バイオマス燃焼に分類される排出源には、燃料としてのバイオマス燃焼、森林等の火災によるバイオマス燃焼、廃棄物処理としてのバイオマス燃焼が挙げられる。いま注目しているのは、火災によるバイオマス燃焼であるが、これが、他の排出源と比べてどの程度の規模であるかを見るために、各種排出源に基づく NOx 排出量の比較を表 1 に示す(年平均月間値)。図 1 の計算領域全体から見れば、いわゆる火災に基づくバイオマス燃焼(表中の Biomass burning-Biomass burning)は、化石燃料等に比べて微々たる寄与と見えるが、領域をインドネシア、マレーシア、シンガポールを含む“火災”が問題となっている国々に限れば (90E-120E, 10S-10N、図 2 参照)、表 2 に示されているように、“火災”は“化石燃料”に匹敵する排出源を形成することが分かる。

Table 1. NOx emissions in calculation domain, 80E~160E and 19S~60N

Source type	Strength (kgN/month)	Relative Strength
Fossil fuel	3.89×10^8	0.604
Biomass Burning	Biofuel combustion 6.57×10^7	0.102
	Biomass burning 1.74×10^7	0.027
	Waste treatment 5.88×10^7	0.091
Soil	5.95×10^7	0.092
Lightning	4.77×10^7	0.074
Aircraft	5.48×10^6	0.009
Total	6.44×10^8	1

Table 2. NOx emissions in 90E~120E and 10S~10N

Source type	Strength (kgN/month)	Relative Strength
Fossil fuel	1.47×10^7	0.244
Biomass burning	Biofuel combustion 0.69×10^7	0.114
	Biomass burning 1.14×10^7	0.189
	Waste treatment 0.56×10^7	0.093
Soil	1.17×10^7	0.194
Lightning	0.95×10^7	0.158
Aircraft	0.06×10^7	0.010
Total	6.03×10^7	1

4. シミュレーションケース

火災によるバイオマス燃焼の大気化学に及ぼす影響を見るために、case 1 : 全ての排出源を含む、case 2 : 火災によるバイオマス燃焼排出源だけを除く、case 3 : 火災バイオマス燃焼排出源のみを考慮する、の三ケースを行った。また、サブグリッド積雲対流の効果をテストするために、case 4 : case 1 と全く同じで、積雲対流だけを適用しない、場合を実行した。さらに化学反応そのものの効果を見るために、case 5 : 化学反応なし (その他、case 1 と同じ) および case 6 : 化学反応なし、積雲対流なし、も計算した。

5. 結果および考察

5.1 流れ場・降水場の特徴

図 2 は、9 月 29 日から 30 日における、高度 1km での流れ場を示す。図 2 において、影をつけた領域は、1 日降水量が 5mm を越えた場所を表す。カリマンタン島の北部、スマトラ島の西海岸および北部全域が、その日に 5mm 以上の降雨があった地域にあたっているが、このことは、シミュレーションの全期間に渡って共通している。また、火災の発生は、カリマンタン南部、スマトラ南部、ジャワ東部に見られることが多い (図 1)。図 1 は、1994 年 9 月そのもののデータではないが、図 2 で仮定した降水場ととも、1994 年 9 月に得られ

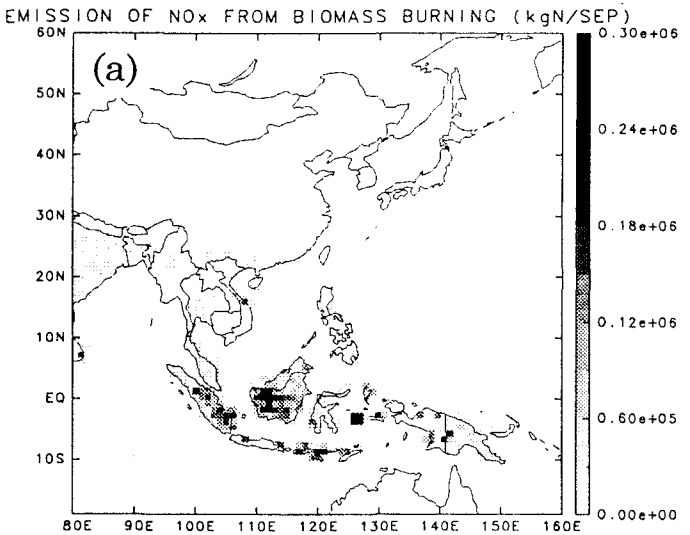


Fig. 1 Estimated monthly-NOx-emission by biomass burning, i. E. forest fire, in September, 1990. Unit: kg-N/($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)/month.

た AVHRR 画像に良く対応している。図 2 に見られるように、9 月 30 日の高度 3 km 程度までの流れ場は、オゾン等の観測データが存在するシンガポールやアラルンプールが、カリマンタン、スマトラのバイオマス燃焼の影響を受ける可能性を示唆する。

5.2 オゾン観測データとの比較

シミュレーション期間中のオゾン観測データで、計算結果と比較可能なものは、Kuala Lumpur, Malaysia (鶴田、1997), Watukosek, Indonesia (藤原ら、1995) における鉛直分布 (Kuala Lumpur, 30 Sept.; Watukosek, 27 Sept.) と、Singapore における地上濃度である。

図 3a, b が Kuala Lumpur での観測値と case 1, 2, 3 の計算値の比較を (図 3a, 9 月 15 日; 図 3b, 9 月 30 日), 図 3c が 9 月 27 日の Watukosek における同様のプロットを示す。図 3a は、計算開始直後の状態を表し、計算のオゾン濃度はほぼ初期値と見なせるものである。図 3b, 9 月 30 日の Kuala Lumpur の計算結果は、観測値と良く対応しているように見える。例えば、圏界面の直下で濃度が極小値を持つことには失敗しているが、対流圏上部に行くほど濃度が高い点等うまく再現している。一方、図 3c の Watukosek では、高度 7km 以下でのオゾンの平均的な値に対しては、計算も、一応、対応できているが、7km 以上 15km の圏界面直下まで観測値が減少を続け極小値を持つことは表せていない。また、7km 以下でも、観測値は細かな層構造を示すが計算値は追従できていない。Kuala Lumpur と Watukosek は、同じくバイオマス燃焼の影響を受ける地域であるけれど、図 2 に見られるように気象条件はかなり異なる。Kuala Lumpur が、ほぼ毎日、降水があり、その地点自身でも積雲対流による鉛直方向輸送が頻繁に生じている地域であるのに対して、Watukosek は、逆に、毎日が晴天の乾季であり、対流圏中層、上層は、むしろ、弱安定成層をなして、バイオマス燃焼に伴ってそれぞれの高度に持ち上げられた汚染物質は、互いに混合せず層状に水平輸送されるのかも知れない。この点に関して、本モデルの改良点として、対流圏中層、上層の鉛直方向解像度を上げること、バイオマス燃焼が生じている小領域について火災によって励起される上昇流等メソスケール流れも適切に解像できるメソスケール気象モデルをネスティングすることが考えられる。

図 3b, c に見られる (火災) バイオマス燃焼の影響は、case 1 と case 2 の差で示されているが、いずれも微々たるものであり、数 ppb にしかすぎないように見える。これが現実なのか、あるいは、モデルの空間解像度等に問題があるのか、より詳細なデータとの比較が必要である。

図 4 は積雲対流の効果を見るために、case 1 (積雲対流有り) と case 4 (積雲対流なし) の結果をを比較したものである。“積雲対流なし”の場合、対流圏中、上層でオゾン濃度が高くなっている。高くなる原因は、設定し

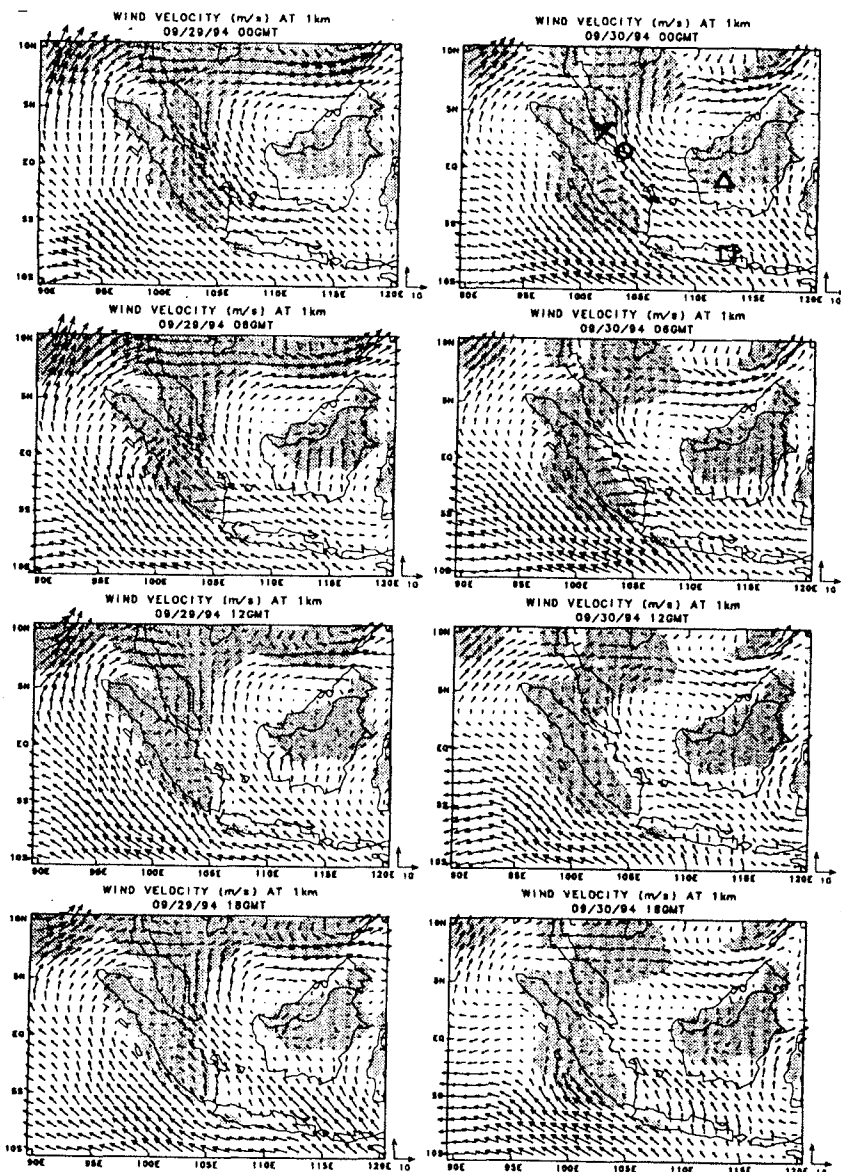


Fig. 2 Temporal variation of horizontal wind field over Indonesia and Malaysia area on 29 and 30 Sept., 1994, at the height of 1km. Shaded areas show those that 24-hour-precipitation exceeded 5mm. The symbol “x” denotes Kuala Lumpur, “o” Singapore, “□” Watukosek, Indonesia, and “Δ” a place at which heavy biomass burning occurred occurred in Kalimantan.

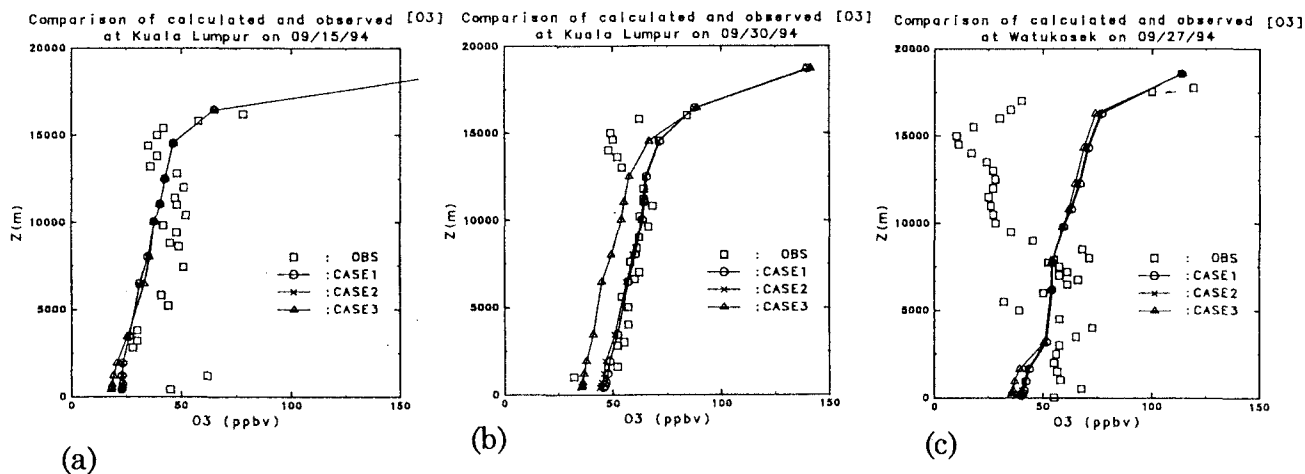


Fig. 3 Comparison of calculated ozone profiles in case 1, 2, 3 with observations: (a) Kuala Lumpur at 6GMT on 15 September, (b) Kuala Lumpur at 6GMT on 30 September, and (c) Watukosek at 6GMT on 27 September, 1994. Case 1 is the base case (see text for detail).

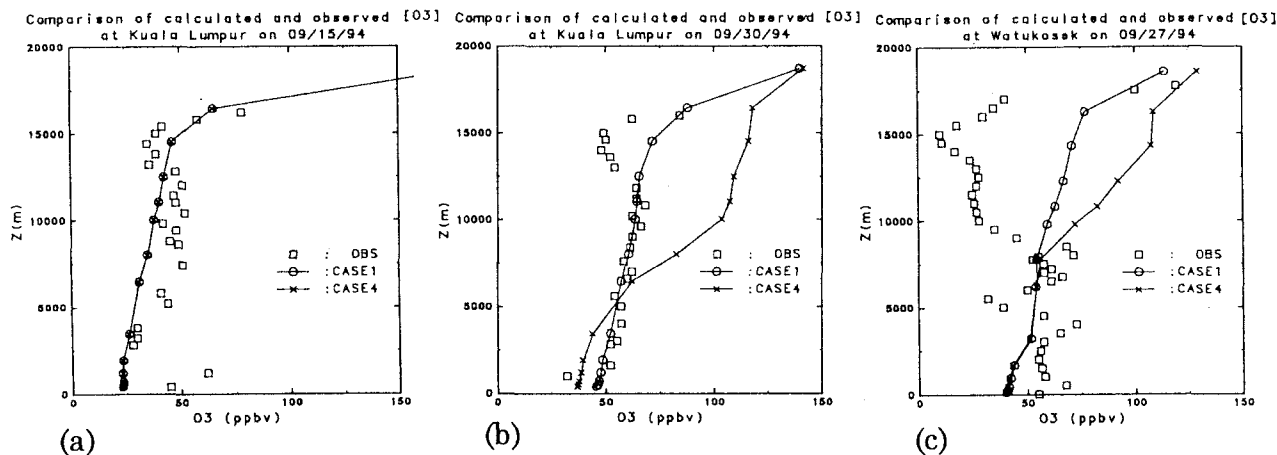


Fig. 4 Same as in Fig. 3 but for effect of cumulus convection on ozone concentration; "O" for case1 with cumulus convection and "x" for case4 without cumulus convection.

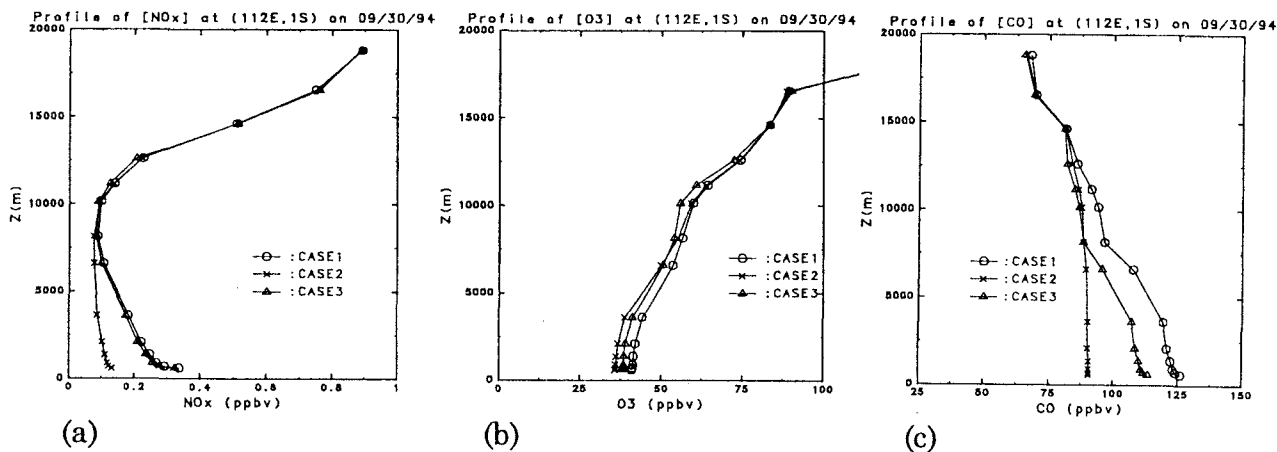


Fig.6 Profiles of computed (a) NO_x, (b) O₃, (c) CO at 112° E and 1° in Karimantan at 6GMT on 30 September, 1994. See text for case 1, 2, 3.

た拡散に基づく成層圏からの滲み出しや上層でのNO_xソース（ライトニング、航空機等）と炭化水素による光化学オゾン生成の両方が考えられる。Case 5,6 で化学反応なしの場合の同様の比較を行ったが、その結果、Watukosek では、対流圏上部での case1 と case 4 の差（図 4c 参照）のかかなりの部分が反応により生成したオゾンによるものであることがわかった。本計算では、上部対流圏でのかかなりのNO_x ソースがライトニングによっており（表 1, 2）、その当否、それから、圏界面を通しての物質輸送機構、に検討すべき所があると考えられる。図 5 は Singapore における地上でのオゾン観測値と計算値の比較である。シミュレーション側の初期設定値が実測よりかなり大きい、日を追っての変動の特性は捕えられているように思える。

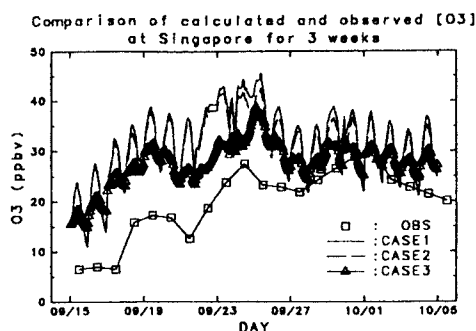


Fig. 5 Ozone at ground level in Singapore from 15 Sept. to 5 Oct., 1994. "□" shows observation, and other lines for computed ozone concentration in case 1, 2, 3.

5.3 オゾン、NO_x 濃度へのバイオマス燃焼（燃焼）の寄与推定

図 3b,c に見られるように、バイオマスの燃焼源から少し離れた点のデータではそのオゾン濃度への寄与をはっきり示すことが容易ではない。そこで、高度 1km でのオゾン（図 7）、NO_x の水平面分布を描き、バイオマス燃焼の影響を直接的に強く受けると思われる場所をカリマンタン島で見つけた（112° E, 1° S）上で、この点での NO_x, O₃, CO の鉛直分布を示したのが図 6 である。これらの図中、case 1 から case 2 を引いた差が、バイオマス燃焼の影響を表すと考えられる。図 6a は、この地点でバイオマス燃焼の影響が NO_x に強く現れていることを示唆する。地表付近の NO_x 濃度のおよそ 50% がバイオマス燃焼起源であることを示唆する。このことは CO に対しても同様である（図 6c）。一方、オゾンに対しては、その影響は、むしろ、少ない方であり、地表付近で約 6ppb 程度と推測される。

図 7 は、9 月 30 日における高度 1km 面でのオゾンの時間変化である（case 1）。全領域から、インドネシア、マレーシアを中心とする領域を取り出したものである。（なお、図 7b に対応する全領域のオゾン濃度分布を図 9 に挙げている。）図 7b,c より、カリマンタン、スマトラ、ジャワ、マレー半島上からその東部海上、にオゾン濃度の極値が見られる。これらのうち、バイオマス燃焼起源の前駆体が寄与している部分を同定するために、case 1 のオゾンから case 2 のオゾンを差し引いたものが、図 8 である。すなわち、図 8 は、バイオマス燃焼のソースを加えたことによって増加したオゾン濃度を表す。この時、図 7b と図 8b を比較すれば、図 7b でマレー半島の東部海上にあった高オゾンは、図 8b では消え、したがって、バイオマス燃焼起源ではないと結論されそうだが、どうであろうか？図 8b より、バイオマス起源の物質がオゾン生成に寄与しているのは、高度 1km 面では、カリマンタン、スマトラ、マレー半島南西部を含むジャワ海および南シナ海南部海域と考えられる。またそのオゾン濃度増加分は、約 4–5ppb 程度（高度 1km）と推測できる。

6. 結論

1994 年 9–10 月を対象に、東南アジアにおけるバイオマス燃焼が、オゾン生成を中心とする大気化学にどう影響するかを見るためのモデルスタディを行った。昨年からはまった BIBLE プロジェクトの支援のためのモデルに関する研究という意味を持つ。おおむね正しい線にあるとモデルを評価できたが、（1）ライトニング排出源場の合理的な推定、（2）対流圏中層および圏界面付近の空間解像度を上げること、（3）バイオマス燃焼に伴う局所的な鉛直流速とそれによる物質輸送の大規模領域モデルへの反映—メソスケールモデルによる火災イベントの再現と、それにとりまう物質輸送評価、等が必要と考えられる。

参考文献

Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) Version 2.0, 1997:
<ftp://info.rivm.nl/pub/lae/EDGARV20/>

藤原 正智, 北 和之, 小川 利紘, 三木 緑, Ninong Komala, Slamet Saraspriya, Agus Suripto, 佐野 琢己, 前里 卓, 森山 隆, 1995: インドネシアにおけるオゾン観測, 第 6 回大気化学シンポジウム講演集, 名古屋大学太陽地球環境研究所, pp. 16-19.

IGBP-DIS Global Fire Product Home Page, 1998 : <http://www.mtv.sai.jrc.it/projects/fire/gfp/home.html>

Kitada, T., and Nishizawa, M, 1998 : Modeling study of the long range transport of acidic pollutants over east Asia and the west Pacific ocean -Sensitivity of acid deposition to scavenging model parameters and emission source distribution., *J. Global Environment Engineering*, Vol. 4, 1-29.

Kitada, T., Nishizawa, M., and Kondo, Y., 1998 : Long range transport of NO_x, NO_y, O₃, and SO_x over east Asia and the western Pacific ocean in winter season --- A numerical analysis., *Air Pollution Modeling and Its Application XII*, Plenum Pub. Co., 205-215.

近藤 豊, 1999: 熱帯域のオゾン化学航空機観測の概要: BIBLE-A, 平成10年度特定領域研究「対流圏グローバルダイナミクス」成果報告会, 仙台, 3月23日, 1999年.

Kumar, P. P., Manohar, G. K., and Kandalgaonkar, S. S., 1995 : Global distribution of nitric oxide produced by lightning and its seasonal variation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 100, 11,203-11,208.

NASA Langley, 1997 : Archive on aircraft emissions in 1990, <http://uadp1.larc.nasa.gov/bsrp/emissions.html>.

鶴田 治雄, 1997: 熱帯アジア東部のバイオマス燃焼の実態とそれによる地球大気化学への影響 -1994年の事例解析を中心に-, 森林総研シンポジウム.

Yienger, J. J., and Levy II, H., 1995 : Empirical model of global soil-biogenic NO_x emissions. *J. Geophys. Res.*, Vol. 100, 11,447-11,464.

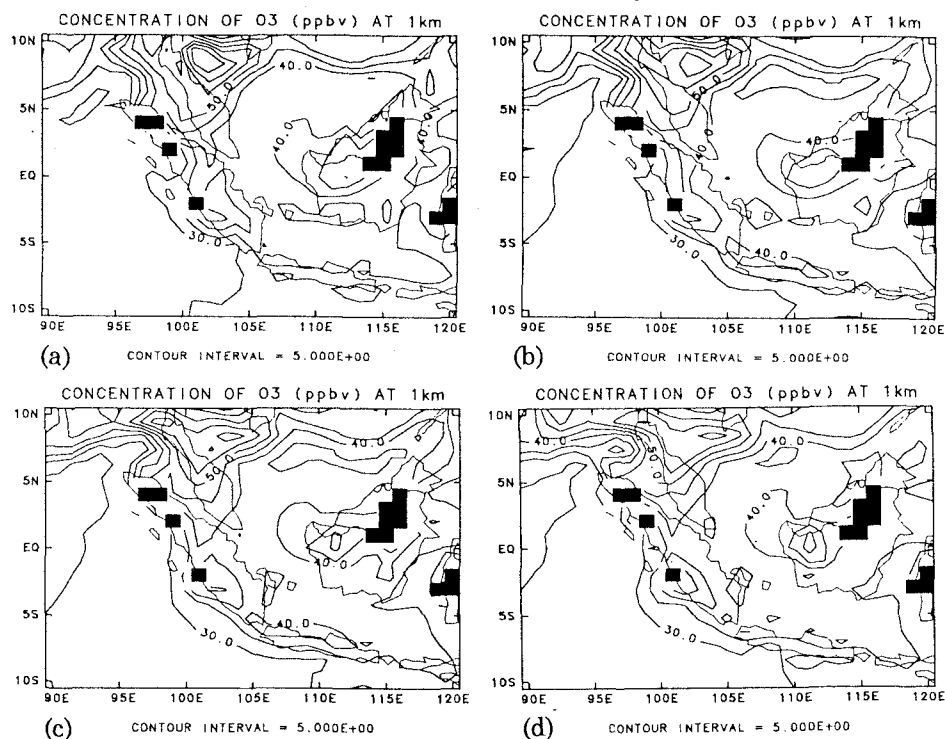


Fig. 7 Temporal variation of computed O₃ distribution (case1) at 1km high on 30 Sept., 1994; (a) 00, (b) 06, (c) 12, and (d) 18GMT.

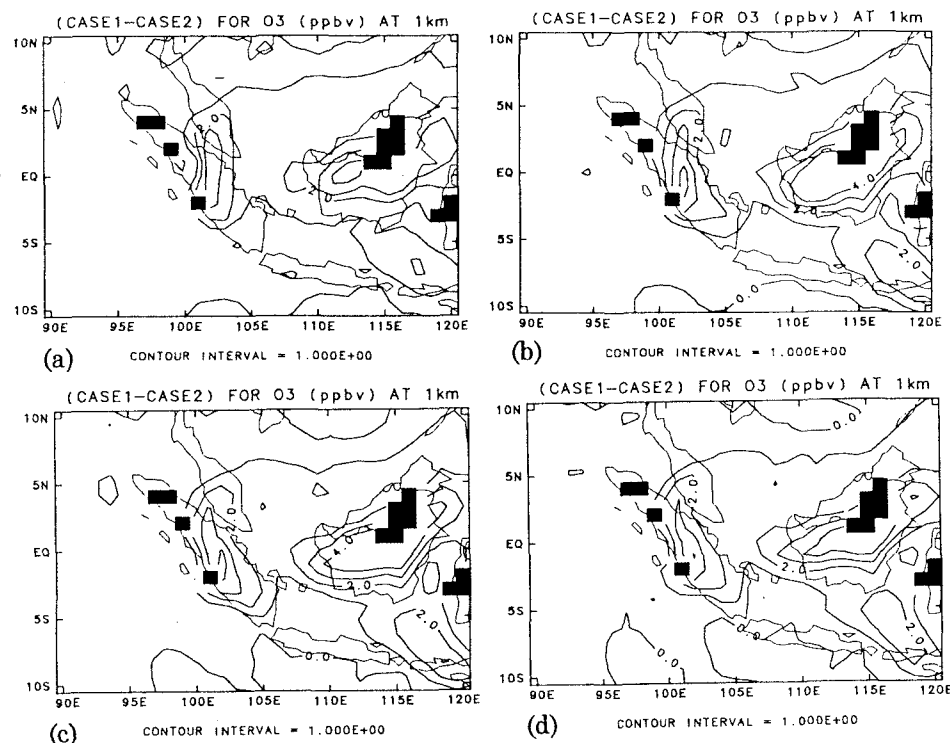


Fig.8 Same as in Fig.7 but for increase of O₃ due to biomass burning (forest fire), i.e., (O₃)_{case1} - (O₃)_{case2}.