

318 近畿圏における船舶排出規制による光化学オキシダント濃度への影響予測

Impact to ambient ozone concentration by ship emission regulation in Kinki area

交河 茂晴 (阪大) 嶋寺 光 (電中研) 正 近藤 明 (阪大)
井上 義雄 (阪大)

Shigeharu KOKAWA, Hikari SHIMADERA, Akira KONDO, Yoshio INOUE, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka

The Annex VI on “Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships” in MARPOL 73/78 was revised to progressively reduce air pollutant emissions. The revised Annex VI went into effect in July 2010. This study estimated changes in air pollutant emissions from ship after the effect of the revised Annex VI and impact of the change in emission on air quality. For the estimate of change in ship emission from the present to 2050 in Japan, following assumptions were applied: the life of ship is 35 years; shipping tonnage is constant. The total amounts of NO_x and SO_x emission in the study region are expected to be decreased by 17.5% and 24.3% between the present and 2050, respectively. The WRF/CMAQ modeling system was utilized to predict the impact of the ship emission regulation on air quality in Kinki area. The results show that combination of ship emission regulation and land base VOCs regulation is more effective for the decreases of air pollutant concentrations in larger area.

Key Words: Ship emission, WRF, CMAQ, O_3 formation process

1. はじめに

近年、大気常時監視測定局データの解析から、日本における光化学オキシダント（主成分は O_3 ）濃度は全国的に増加傾向にあり、その原因として、東アジアにおける大気汚染物質排出量の増加に伴う、大気汚染の広域化が挙げられている。また、2007年5月8、9日には大分県や新潟県で観測史上初めて光化学スモッグ注意報が発令されるなど、日本の広域で高濃度の光化学オキシダントが観測され、大陸起源 O_3 の越境輸送による影響の顕在化が示唆された。このように、光化学大気汚染は再び注目を集めており、その実態把握のために広域数値シミュレーションモデルも用いられるようになってきている。

一方、陸上排出源の規制の進展とともに船舶排ガスの大気汚染への影響が相対的に増大している。¹⁾また、MARPOL条約附属書VIが2010年7月に発効されるなど船舶の排出規制が強化されている。²⁾よって、排出規制を導入した際の船舶排出量の推移と大気汚染物質に与える影響を評価する必要がある。本研究では、いくつかのシナリオ（船舶寿命、船腹量）から船舶排出量データを作成し、気象/大気質モデルWRF/CMAQを用いて近畿圏を対象とするシミュレーションを行い、船舶排出規制を考慮した場合の光化学オキシダント濃度に及ぼす影響を評価した。

2. 計算手法

2.1 数値モデルの概要

数値計算モデルとして、気象モデルにFifth-generation Mesoscale Model (MM5) (Grell et al., 1995) の次世代モデ

ルと位置付けられるWeather Research and Forecasting model (WRF) (Skamarock and Klemp, 2008; Skamarock et al., 2008) のAdvanced Research WRF (WRF-ARW) のバージョン3.2.1を使用した。^{3) 4) 5)}

また、大気質モデルにアメリカの環境保護庁 (EPA: Environmental Protection Agency) によって開発された大気質モデルCommunity Multiscale Air Quality modeling system (CMAQ) (Byun and Ching, 1999; Byun and Schere, 2006) のバージョン4.7.1を使用した。

2.2 計算条件

計算期間は、2008年7月を評価対象とした。計算領域は、東アジア域を対象とする格子数 105×81 の54km格子領域 (D1)、格子数 72×72 の18km格子領域 (D2)、近畿圏を対象とする格子数 72×72 の6km格子領域 (D3) の3領域とした (Fig.1)。鉛直方向には、地表面から上空100hPaまでを24層に分割し、地表面に接する層の中心高さは地上約15mとした。WRFの初期・境界条件は、D1には水平解像度 $1^\circ \times 1^\circ$ の全球データである米国環境予測センターの最終解析データ (NCEP.FNL) を用いた。D2には日本域で利用できる高解像度 (地上データは、 $0.05^\circ \times 0.0625^\circ$ 、各圧力平面のデータは $0.1^\circ \times 0.125^\circ$) の気象庁メソ数値予報モデルの客観解析値 (GPV-MSM) を用い、GPV-MSMに含まれていない地中・表面温度のみNCEP.FNLを用いた。D3の境界条件は、D2の計算結果を用いた。WRFの物理スキームは、積雲過程にKain-Fritsch、雲微物理過程にSimple ice、短波および長波放射過程にDudhiaおよびRRTM、大気境界層過程にYSU、地表面過程にNoah LSMを用いた。^{6) 7)}

CMAQの初期・境界条件は、D1にはCMAQの初期設定値を用いた。D2およびD3の境界条件は、それぞれD1およびD2の計算結果を用いた。CMAQの化学スキームは、気相反応系にSAPRC99、エアロゾル反応系にAERO5を用い、雲・液相反応オプションを使用した。⁸⁾

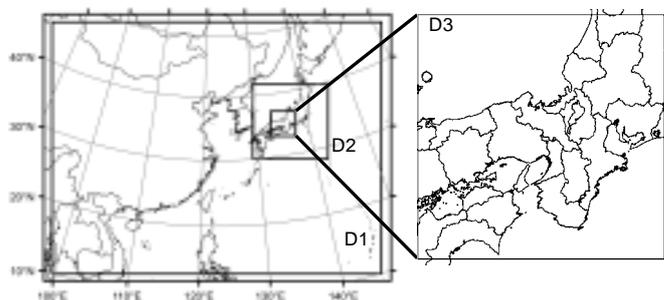


Fig. 1. Modeling domains for CMAQ

2.3 排出量データ

CMAQに入力する大気汚染物質の排出量データとして、日本域にはEAGrid2000-JAPANを用いた。⁹⁾

EAGrid2000-JAPANは、基準年を2000年とし、月別および平日・休日別に24時間変動が考慮され、日本全国を対象に水平解像度約1km×1kmで整備されたデータである。日本国内の自動車起源排出量については、自動車NO_x・PM法等による規制に伴う排出量削減を反映するために、兵庫県下の自動車排ガス測定局における濃度低下率を乗じて補正し2008年度の排出量を算定した。その他のアジア地域についてはSO₂、NO_x、CO、人為起源VOC、PMに2006Asia Emissions forINTEX-B、NH₃にREAS、植生起源VOCにEAGrid2000を用いた。¹⁰⁾ これらのデータの水平解像度は0.5°×0.5°である。¹¹⁾ さらに火山起源排出量や全球データのARCTAS Pre-missionEmission Inventoryを組み合わせて使用した。また、船舶排出データについては、以下に述べる排出規制シナリオを適用した。^{12) 13) 14)}

3. 排出規制シナリオ

船舶排出規制シナリオでは、国際海事機関(IMO)の規制に基づいた3つの条件を仮定した。Fig. 2, 3にIMO規制におけるNO_x、燃料中硫黄分の規制値を示す。

NO_x、燃料中硫黄分のIMO規制は、計画通りに施行されるものとする。まず、1つ目の条件として日本周辺海域を排出規制海域(ECA)と仮定した。ECAでは、2016年以降に建造される新船舶を対象に現行規制よりも厳しい規制が設定される。2つ目の条件として、日本海域を航行する船腹量を一定とした。これは、2000年以降日本商船船腹量が横ばいであることから仮定した。(日本船主協会)

3つ目の条件として、ロイド船級協会の資料を参考に船齢の寿命を35年とした。これらの条件下での2000年から2050年の船舶排出量の推移をFig.4に示す。(2000年の排出量を100とする)NO_x、SO_x排出の両方とも、2016年まで緩やかに、それ以降はECAの導入により急激に減少することが予測される。計算ケースは、2008年の現況ケース(2008_present)、2050年の船舶排出規制時ケース(2050)とした。両方のケースとも、2008年7月の気象場で計算を行った。Fig. 5に、2008年と2050年のD3内全排出量を示す。NO_x排出量は、17.5%減少し、SO_x排出量は、24.3%減少することが予測された。

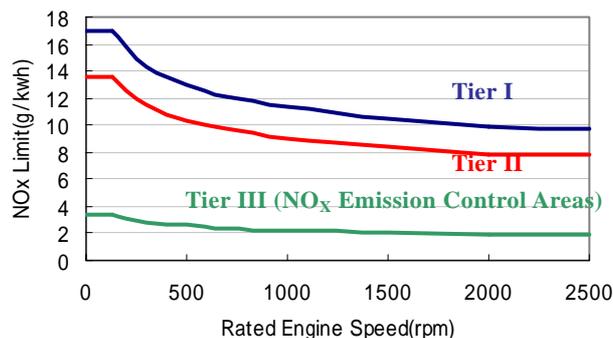


Fig. 2. Limit to NO_x emission from ship According to IMO regulation

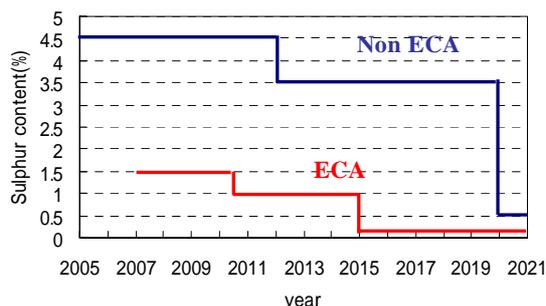


Fig. 3. Limit to sulfur content in ship fuel oil, According to IMO regulation

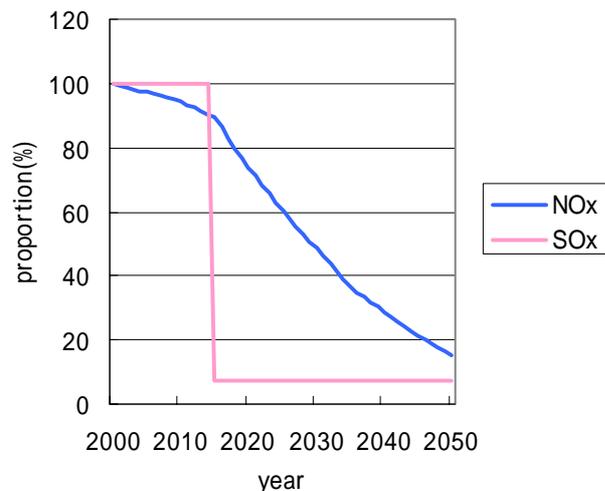


Fig. 4. Transition of ship emissions from 2000 to 2050 (The proportion in 2000 is 100)

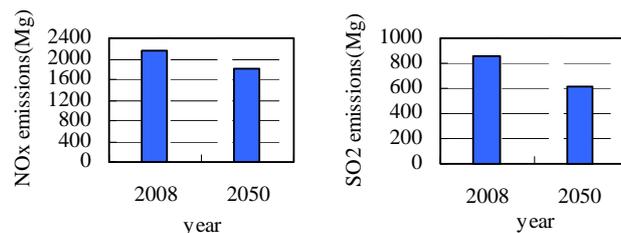


Fig. 5. Emissions in D3 in 2008 and 2050

4. 結果

4.1 NO₂ and Aerosol SO₄²⁻ concentrations

Fig.6.a, b に現況ケースの月平均 NO₂ 濃度の空間分布と規制時での濃度差の空間分布を示す。現況ケースでは、船舶の排出が多い港湾域で高濃度となっている。一方で、2050 年の規制時では、月平均 NO₂ 濃度が沿岸域で最大 28ppb 減少する。

Fig.7.a, b に現況ケースの月平均 Aerosol SO₄²⁻濃度の空間分布と規制時での濃度差の空間分布を示す。現況ケースでは、船舶の排出が多い港湾域で高濃度となっている。一方で、2050 年の規制時では、月平均 Aerosol SO₄²⁻濃度が沿岸域で最大 3.9μg/m³減少する。これらの結果は、船舶排出規制が沿岸部において NO₂ と Aerosol SO₄²⁻濃度減少に大いに寄与することを示す。

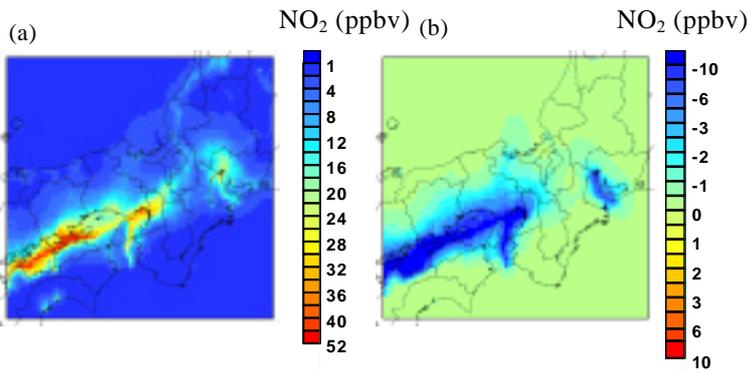


Fig. 6. Spatial distributions of (a) NO₂ concentration in 2008_present and (b) NO₂ concentration difference between in 2050 and in 2008_present in D3.

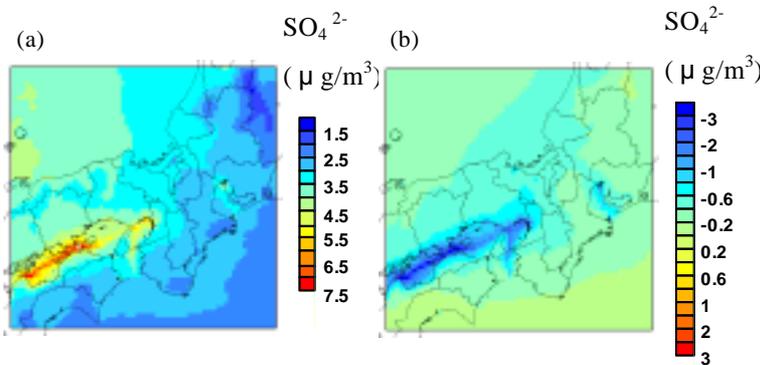


Fig. 7. Spatial distributions of (a) aerosol SO₄²⁻ concentration in 2008_present and (b) aerosol SO₄²⁻ concentration difference between in 2050 and in 2008_present in D3.

4.2 O₃ concentrations

O₃ 生成に関わる光化学反応は、様々な種類の VOCs が関連しているために複雑な反応である。トルエン、キシレンのような Aromatics, プテン, ヘキセンのような Olefins が、O₃ 光化学生成反応に大いに寄与している。

したがって、これらの化合物の陸上源排出規制を船舶排出規制に加えて想定した。塗装, 印刷, 燃料蒸発を含む蒸発発生源の Aromatics, Olefin 排出を 0 とした。その結果, D3 内における人為的 VOC 排出が 26.7% 減少した。(583Mg/y) 3 節で述べた排出ケースの他に、現況ケースに蒸発発生源の VOC 排出規制を導入したケース(2008_VOCred), 船舶排

出規制ケースに蒸発発生源の VOC 排出規制を導入したケース (2050_VOCred) を加えた。

Fig.8a に現況ケースの 13 時の月平均 O₃ 濃度分布を示す。自動車や工場等の陸上排出源が多い都市部や内陸部で濃度が高くなって、沿岸部や海域では比較的低くなっている。

排出規制の影響を考察するために、現状ケースと各計算ケースとの 13 時の月平均 O₃ 濃度差を Fig.8b(2008_VOCred), c (2050), d(2050_VOCred)に示す。

2050 のケースでは、O₃ 消滅反応に寄与する NO の減少により瀬戸内海または沿岸部で濃度が上昇している。内陸部では、O₃ 生成反応に寄与する NO₂ 輸送の減少により最大で 3.0pp 減少している。(陸域平均 0.2ppb) したがって、船舶排出規制は沿岸部から少し離れた地域の O₃ 濃度減少に影響を与えることが示された。

2050_VOCred のケースでは、陸域で最大 4.6ppb 濃度が減少した。(陸域平均 1.4ppb) 2008_VOCred のケースと比べると、より広範囲で O₃ 濃度減少が見られる。

Fig.9 に、風が強く気温が高い気象条件下である 7 月 21 日 13 時の O₃ 濃度の分布図を示す。広範囲で顕著な濃度減少が見られた。また、船舶排出規制を導入したケースでは沿岸部または海域の O₃ 濃度増加が見られるが、現状ケースにおいて低濃度であるので規制導入後も環境基準値を満たす値となっている。

これらの結果により、船舶排出規制は、蒸発発生源の VOC 削減と組み合わせることで、より広範囲で効果的な濃度減少に貢献できることが示された。

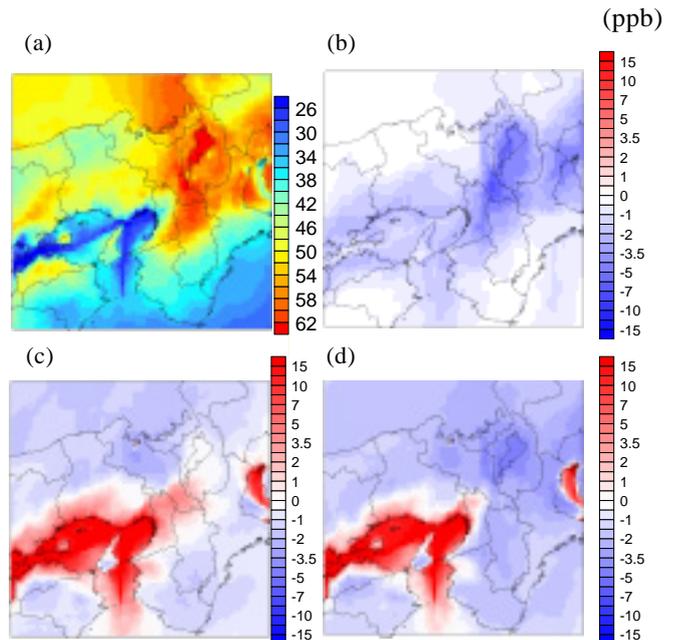


Fig. 8. Spatial distributions of average O₃ concentrations at 15h. (a) O₃ concentrations in 2008_present, (b) the concentration differences between in 2008_VOCred and in 2008_present, (c) between in 2050 and in 2008_present and (d) between in 2050_VOCred and in 2008_present in D3

5. 結論

本研究では、船舶排出量データにいくつかのシナリオ (船舶寿命 35 年、船腹量一定、建造年ごとの船舶割合) を作成し気象/大気質モデルである WRF/CMAQ を用いて近畿圏を対象とするシミュレーションを行い、船舶排出規制を考慮した場合の光化学オキシダント濃度に及ぼす影響を評

価した。

船舶排出規制を導入した場合、2050年で月平均NO₂濃度が沿岸域で最大28ppb減少し、月平均Aerosol SO₄²⁻濃度が最大3.9μg/m³減少することが予測された。

船舶排出規制だけを導入したケースで、陸域で最大3.0ppb濃度が減少した。(陸域平均0.2ppb) また、船舶排出規制と蒸発発生源のVOC削減の両方を導入したケースで、陸域で最大4.6ppb濃度が減少した。(陸域平均1.4ppb)

これらの結果により、船舶排出規制は、蒸発発生源のVOC削減と組み合わせて実施することで、より広範囲で効果的な濃度減少に貢献できることが示された。

参考文献

[1] V. Eyring, H W. Köhler, J. v. Aardenne and A. Lauer. "Emissions from international shipping: 1. The last 50 years," *J. Geophys. Res.*, 110, pp. 12, 2005.
 [2] IMO, revised Annex IV "Prevention of Air Pollution from Ships," , 2008.
 [3] G.A. Grell, J. Dudhia, D.R. Stauffer, "A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note NCAR/TN-398+STR0," pp. 117, 1994.
 [4] D.W Byun, J.K.S Ching,. (Eds.). "Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) Modeling System. NERL, Research Triangle Park, NC," 1999
 [5] S.Y Hong, H.L Pan. "Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model," *Monthly Weather Review* 124, pp. 2322-2339. 1996.
 [6] J. Dudhia, "Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model," *the Atmospheric Sciences*, 46 (20), 3077-3107,1989.
 [7] Dudhia, J, "A multi-layer soil temperature model for MM5. Preprints. The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop," pp. 22-24, Boulder, Colorado, pp 49-50, July 1996

[8] W.P.L .Carter, Documentation of the SAPRC-99 chemical mechanism for VOC reactivity assessment. Final Report to California Air Resources Board Contract No. 92-329, and (in part) pp 95-308, 2000.
 [9] Q. Zhang, D.G. Streets, G.R. Carmichael, K. He, H. Huo, A. Kannari, Z. Klimont, I. Park, S. Reddy, J.S. Fu, D. Chen, L. Duan, Y. Lei, L.Wang, Z.Yao, "Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*," 9 (1), pp 4081-4139, 2009.
 [10] T. Ohara, H. Akimoto, J. Kurokawa, N.Horii, K. Yamaji,, X. Yan, T. Hayasaka, "An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020,"*Atmospheric Chemistry and Physics* 7 (16), pp 4419-4444., 2007.
 [11] K. Murano, International Co-operative Survey to Clarify the Trans-boundary Air Pollution Across the Northern Hemisphere (Abstract of the Final Report), Summary Report of Research Results under the GERF (Global Environment Research Fund) in FY2004, 237-243, Research and Information Office, Global Environment Bureau, Ministry of the Environment, Government of Japan, 2006.
 [12] D.G. Streets, K.F. Yarber, J.-H.Woo, G.R.Carmichael, Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions. *Global Biogeochemical Cycles* 17 (4), pp 10/1-10/20. 2003.
 [13] S.L Gong., A parameterization of sea-salt aerosol source function for sub- and super-micron particles. *Global Biogeochemical Cycles* 17 (4), pp 8/1-8/7,2003.
 [14] K.M.Zhang, E.M. Knipping, A.S. Wexler, P.V. Bhawe, G.S. Tonnesen, Size distribution of sea-salt emissions as a function of relative humidity. *Atmospheric Environment* 39 (18), pp 3373-3379, 2005.

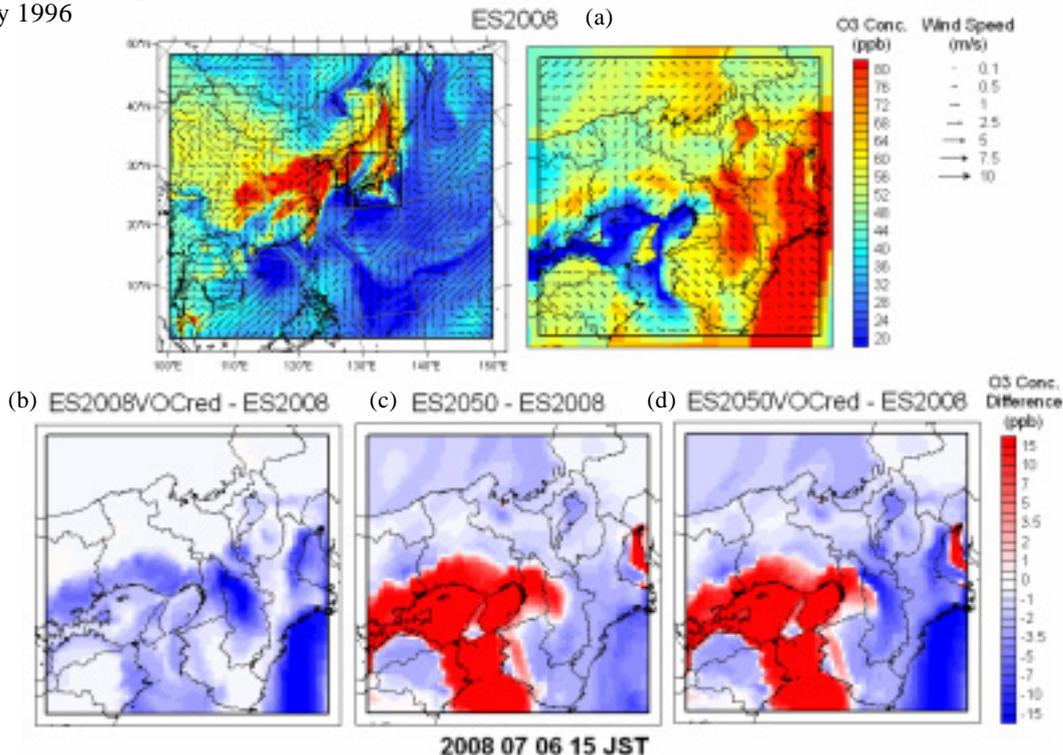


Fig. 9. Spatial distributions of O₃ concentrations at 13h on July 21.
 (a) O₃ concentrations in 2008_{present},
 (b) the concentration differences between in 2008_{VOCred} and in 2008_{present}, (c) between in 2050 and in 2008_{present} and
 (d) between in 2050_{VOCred} and in 2008_{present} in D3