

人間活動に伴って生成する一酸化二窒素の地域スケールでの評価

ESTIMATION OF ANTHROPOGENIC NITROUS OXIDE EMISSION IN PREFECTURE AND CITY SCALE

花木 啓祐** ・ 広瀬洋一郎*** ・ 松尾 友矩*

Keisuke HANAKI**, Yoichiro HIROSE***, Tomonori MATSUO*

ABSTRACT; Anthropogenic production of nitrous oxide (N_2O) was estimated in prefecture or city scale in Japan. N_2O production occurring with (1) incineration of solid waste, (2) incineration of sewage sludge, (3) fertilizer, and (4) exhaust gas from automobile were estimated. Literature values of N_2O production from these sources were surveyed to choose the most relevant values. Type of incinerator, amount of burned solid waste or sewage sludge in plant were obtained from available statistics in the estimation. Amount of each type of fertilized sold in the region was used in estimation of N_2O from fertilizer. Fuel consumption data were used to estimate N_2O production from automobile. Contribution of fertilizer was as high as 50% of total N_2O production in Hokkaido, but its contribution was very small in major cities where incineration of solid waste and sewage sludge is the main source. Contribution of automobile was rather constant between city area and non-city area. N_2O production density per area had very large variation depending on density of population and other activity. Per capita N_2O production was rather constant. N_2O production and regional GDP had good correlation.

KEYWORDS; Nitrous oxide, solid waste, sewage sludge, fertilizer, automobile

1. はじめに

人間活動に起因して生成する温室効果ガスの内、その発生量と源（ソース）と発生メカニズムが最も不確かなのが一酸化二窒素（通称「亜酸化窒素」とも呼ぶ、以下 N_2O と略す）である。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第1ワーキンググループ報告書¹⁾によれば、100年間のスパンで考えた場合、 N_2O の重量当りの温室効果は二酸化炭素の290倍であり、1990年現在、人為的に起きている温室効果の約4%が N_2O によるものとされている。この寄与率は決して高くはないが、温室効果ガスの削減策を考える場合、①エネルギー消費に密接に関係する二酸化炭素よりは N_2O の削減の方が社会・経済的影響が小さい、②温室効果ガス排出削減に関しては、一つの対策で非常に効果的なものはなく、単独では効果の小さい対策の積み上げで初めて温室効果ガスの削減が可能になる、といった面があるので N_2O の削減にも真剣に取り組むべきである。

N_2O の発生メカニズムは大きく分けて燃焼によるものと微生物反応によるものがある。いずれの場合も N_2O は副生成物として発生するため、その発生量を推定することは非常に難しく、さまざまな条件が N_2O 発生量に係わって来る。たとえば、窒素系肥料からの N_2O 発生の場合、土中の水分、有機物の存在、ミクロな環境（土の粒子の中）での酸素濃度など、空間的・時間的に不均一な環境因子が重要になると考えられている。

本研究においては、人間が大規模、あるいは一般的に行っている行為によって生成する N_2O を既存の統計資料を用いて地域のスケールで推定し、比較する。

*東京大学工学部都市工学科 Department of Urban Engineering, University of Tokyo; 現所属:#東京大学先端科学技術研究センター Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo, ##株式会社 Kubota Corporation

2. 推定対象とするN₂O発生源

本研究では、ごみ焼却、下水汚泥焼却、窒素肥料施用、自動車、の4つのN₂O発生源を対象とする。この他に、排水処理^{2), 3)}や排水が流入した水系でのN₂O生成、病院での麻酔ガスとしての使用、などもあるがここではまず第1段階の推定であるので無視することとした。工業からの発生もあると思われるが、脂肪酸工業を除けばそれはさほど大きくないので無視した。

3. 各発生源からのN₂O発生量の推定方法

本研究の目的は、地域スケールでN₂Oの発生量を評価し、そのおよその値を知ると共に、人口、面積、経済力などの地域属性、あるいは都市特性とN₂O発生量との関係を考察することにある。方法としては、現状で利用可能な各発生源からのN₂O生成量の報告値を用い、いわばこれを原単位として用いる。一方、それぞれのN₂Oの発生の原因となる活動にかかわる量（たとえばごみ焼却量）を対象地域毎に求め、これに原単位を乗ずることによってN₂O発生量を求める。この場合、いかなる原単位を用いるかは、それぞれの地域での利用可能な統計を配慮しつつ決める必要がある。以下にそれぞれの発生源からのN₂O発生量の推定方法を示す。

3. 1 ごみ焼却

一般に焼却に伴うN₂Oの発生量は焼却する物質の窒素含有量、燃焼温度、燃焼方式などによって左右される。一般には窒素含有量が高いほどN₂Oが出やすいとされている。また、燃焼温度が高いほどN₂Oが出にくい、燃焼温度を高めると大気汚染物質であるNO_xの発生量が増すので、温度による制御も容易ではない。ごみの焼却時のN₂O発生量についてはいくつかの報告がある^{4) - 6)}。この中で、ごみの焼却施設に関する統計⁷⁾における焼却炉の分類との整合性などの面から、文献4)の値を中心にして排ガス中のN₂O濃度の標準値を表1のようにした。この値を元にしてごみ量当りのN₂O発生量を求めるには、焼却時の空気補給量を求める必要がある。これについては、文献8)を参考にし、そこで典型例として扱われているケースから、ごみ重量当りの標準的空気補給量を 10.29 Nm³/kg とした。最終的にごみ重量当り生成するN₂Oを重量で表すと表1のようになる。

表1. ゴミ焼却におけるN₂O発生原単位

炉のタイプ	排ガス中のN ₂ O濃度 (ppm)	空気補給量 (Nm ³ /kg)	N ₂ O発生量原単位 (g-N ₂ O/t-ごみ)
ストーカー	7.1	10.29	144
流動床	8.0		162
バッチ	4.2		85

一方で文献7)から、対象地域（市の場合も含む）で稼働しているごみ焼却炉のタイプと焼却量を求め、表1の原単位を乗じることによって地域全体としてごみの焼却から発生するN₂Oを評価することが出来る。

3. 2 下水汚泥焼却

下水汚泥の焼却の場合もごみの場合と同様に焼却の条件によってN₂Oの発生量が異なる。各種の炉についてN₂Oの実測値が報告されている^{4), 5)}。これらのデータを参考にし、また燃焼のための空気補給量を 3.1 Nm³/kg とすると、下水汚泥重量当りの原単位は表2のようになる。なお、ここで階段式については既報の値がなく、やむなく多段炉と同じ原単位を与えた。これらの値を見るとごみの場合に比べ高くなっている。下水汚泥の方が窒素含有率が高いこともその原因ではないかと考えられる。

対象地域内の各下水処理場における下水汚泥焼却方式と焼却汚泥量を下水道統計⁹⁾から求めて表2の原単位を乗じた。

表2. 下水汚泥焼却におけるN₂O発生原単位

炉のタイプ	排ガス中のN ₂ O濃度 (ppm)	空気補給量 (Nm ³ /kg)	N ₂ O発生量原単位 (g-N ₂ O/t-ごみ)
多段炉	82 ⁴⁾	3.1	500
流動床	91 ⁴⁾		550
回転式	50.7 ⁵⁾		310
階段式			500

3. 3 窒素肥料

肥料からの生成については先にも述べたように、さまざまな環境要因が影響する。肥料の種類と地下水位（水分に影響する）との関係で肥料中窒素成分のN₂Oへの転換の測定値を整理している例¹⁰⁾もある。しかしながら、本研究のように地域スケールでN₂Oの生成量を推定する場合、施肥量のデータは推定可能であるが、地下水位などのきわめてローカルな要因を定量的に把握することは全く出来ない。そこで、本研究においてはこの種の環境要因の影響を無視し、種類毎の施肥量からN₂O生成量を推定する方法を取る。ここでは、肥料中の窒素からのN₂Oへの転換比率の値としてアンモニア態窒素肥料から0.1%、尿素系肥料から0.5%という文献¹¹⁾に掲載されている値を第一近似的に使用した。なお、石灰窒素については報告値がないので、尿素系肥料と同じ値を採用した。これらの転換率と肥料中の窒素成分の含有量（主として文献¹²⁾によった）から、肥料の重量当りのN₂Oを表3のように出すことが出来る。なお、ここでいう化成肥料とは窒素の他にカリなども同時に含む肥料のことである。

この原単位に肥料の年間使用量を乗じて地域毎の肥料由来のN₂O生成量を推定した。肥料の使用量については、都道府県別の各種肥料の出荷統計¹²⁾をもとにした。ここで、市単位の肥料の使用量を求める場合、直接のデータがないため、対象とする市の耕地面積の全県に対する比率を県全体の肥料消費量に乗じて算出した。

表3 窒素肥料からのN₂O発生の原単位

肥料の種類	窒素含有率(%)	N ₂ OへのN成分転換率(%)	N ₂ O発生量(g/t-肥料)
硫 安	26	0.1	630
尿 素	46	0.5	7200
硝 安	35	0.1	1100
塩 安	25	0.1	790
石灰窒素	21	0.5	3300
高度化成	14	0.1	440
NK化成	14	0.1	440
普通化成	8	0.1	250

3. 4. 自動車排気ガス

自動車排気ガスからのN₂O生成は用いられている触媒の種類、走行モードに依存して変化する。走行距離当りのN₂O発生量を走行速度別に整理した実測値、あるいはエンジン排気量と排気ガス処理触媒別の実測値¹³⁾が報告されているが、いずれも今回のように地域全体のN₂O生成量を推定するには必ずしも適当でない。そこで、消費エネルギーあたりのN₂O生成量として平均的に示された値¹⁴⁾（表4）をここでは採用する。

表4 自動車からのN₂O発生原単位

自動車の種類	ガソリン車（LPG車含む）			ディーゼル車
	3元触媒	酸化触媒	触媒なし	
排出係数(g-N ₂ O/GJ)	10	5	5	10

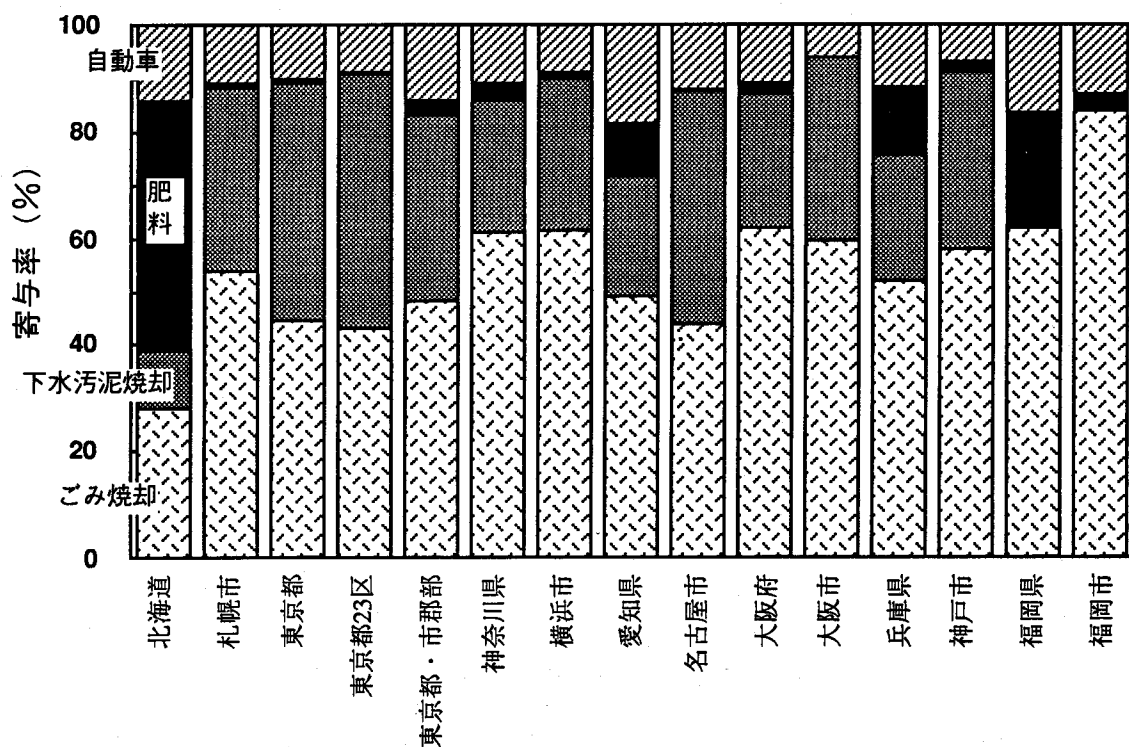


図1. 7都道府県と地方庁所在都市におけるN₂O排出における各発生源の寄与率

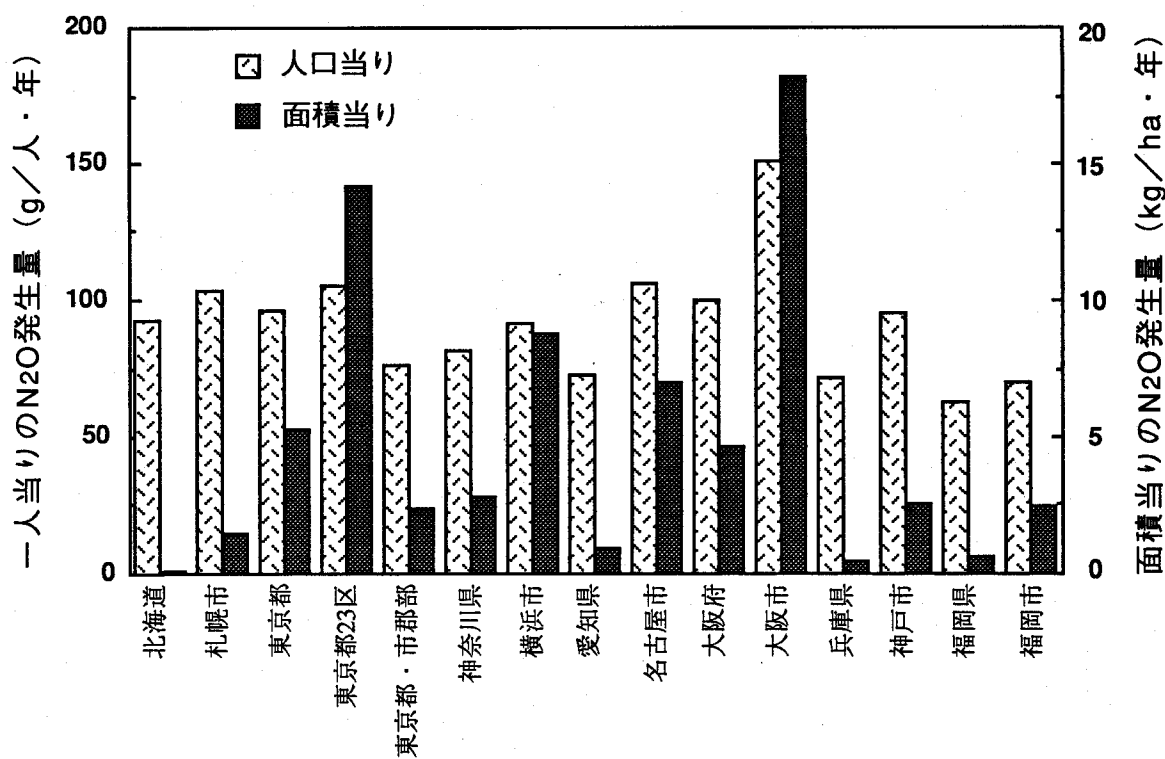


図2. 面積別、人口別にみた各地域のN₂O発生量

ガソリン車の N_2O は触媒のタイプによって異なるが、現在ではほとんどの自動車が3元触媒を備えていると考えられる。この原単位にその地域のガソリンあるいは軽油（ディーゼル用）消費量を乗ずれば N_2O 発生量を推定できる。これらの燃料の消費量は都道府県単位では容易に入手できる。市単位での消費量の推定は平松らの方法¹⁵⁾によった。

4. 地域毎の N_2O 生成量の評価

上に述べた方法で、7都道府県とそれぞれの地方庁所在都市に対して1988年現在の N_2O 発生量を推定した。都道府県全体とその中で大都市の両者に対して推定を行っているのは、都市と非都市部の比較を行うことを目的としたためである。各地域におけるごみ焼却、下水汚泥焼却、肥料、自動車のそれぞれの部門からの N_2O 発生シェアを図1に示す。北海道の場合には肥料の寄与が大きく、5割近くに達している。これに対し、肥料の寄与は都市部では低く、同じ北海道内の札幌でも低く、東京都23区ではほとんど無視できる量である。ごみ焼却由来の N_2O 発生については、都市部と非都市部の差は肥料の寄与が大きい北海道と福岡県を除いて顕著ではない。下水汚泥焼却については、それぞれの地域でどのような汚泥処理方法が採用されているかに依存している。自動車の寄与については都市部で大きいと言うことはなく、むしろ非都市部の方が大きい寄与率を示している。

これら各地域の N_2O 発生量そのものの値を示しても、地域の人口や面積の大小が大きく影響し、 N_2O 発生の特徴が捉えられない。そこで人口当たり及び地域の面積当たりの N_2O 発生量を計算し、図2に示す。まず面積当たりの発生量を比較すると地域により非常に大きな差（200倍）がある。これはさまざまな人間活動の密度の差を反映しているが、特に北海道では、肥料の寄与が大きいものの、それ以外の N_2O 発生量の密度が小さく、結果的に小さな値となっている。高い値を示しているのは大阪市と東京都23区である。これらの地域でごみの発生や焼却される汚泥の発生量が大きいことが反映されている。都道府県全体とその中で大都市を比較すると、都市部では面積当りはるかに高い N_2O 発生が起きていることがわかる。

これに対し、人口当たりの N_2O 発生量は大阪市がやはり大きいものの比較的差が小さい。これは、前述のごみや下水汚泥発生量が基本的には人口にほぼ比例するからである。都市部と非都市部の間でも前者でやや高い程度である。

次に地域の経済活動と N_2O 発生量との関係を考察する。なお、データの都合上、市では名古屋と福岡のみを解析の対象とした。図3には地域のGDPと N_2O 発生量の関係を示す。全体として明白な正の相関が存在し、東京都を除けばほぼ直線の関係がみられる。この結果はGDPが N_2O 生成の支配因子であることを示唆するが、これはごみや汚泥の排出、肥料の消費、自動車の利用が経済活動と関連を持つためでもある。しかし、実際に最も支配的な因子が人口であるか、GDPであるかは、はっきりとはとらえられない。

図4は一人当たりGDPと一人当たり N_2O の発生を比較したものである。この解析の目的は、GDPで表現できる生活

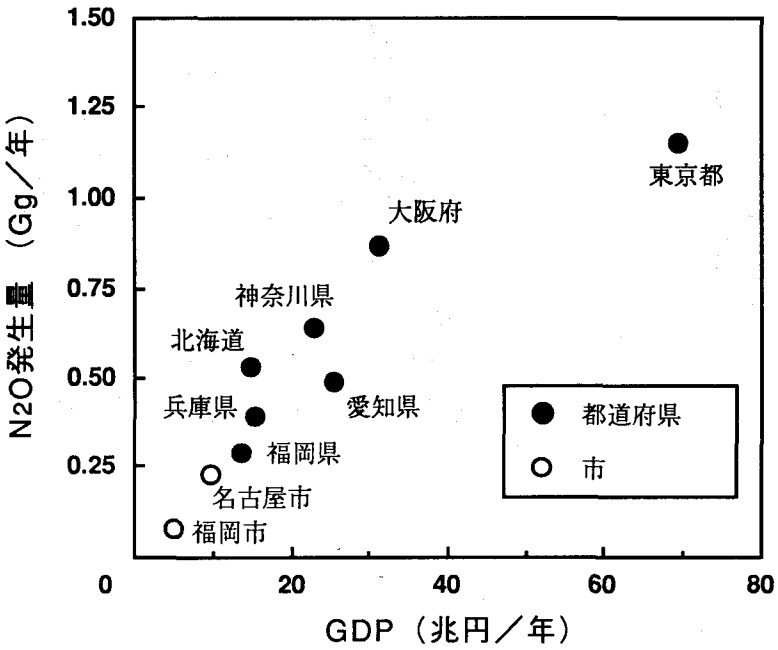


図3. 各地域の地域総生産（GDP）と N_2O 発生量の相関

の質と N_2O の発生量の間に関係があるかどうかを確かめることにある。この図からわかるように、特に明確な関係はみられていない。また、2つの都市のプロットも他の都道府県のプロットと顕著な違いを示していない。言い換えれば、一人当たりGDPの大きい都市型のライフスタイルが特に N_2O の発生量の増大につながるとは言えないのである。もっともわが国の場合都市部も非都市部もライフスタイルは変わらず、個人の生活を取り巻く経済的な環境にも大きな差はないので、真にライフスタイルの影響を知るためにはおそらく国際比較が必要になるだろう。

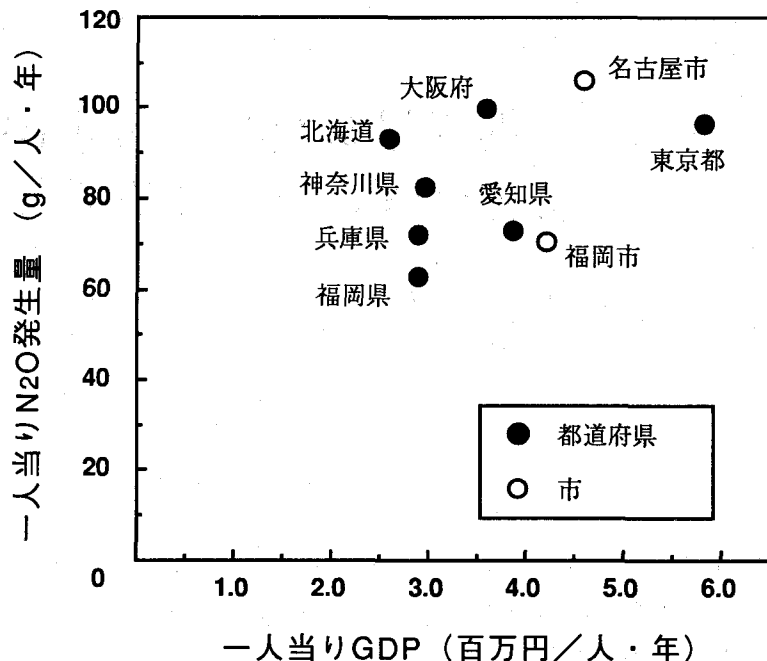


図4. 各地域の一人当たりGDPと一人当たり N_2O 発生量の関係

5. おわりに

本研究による推定の結果、特に都市

部ではごみや下水汚泥の焼却に伴う N_2O 発生が重要であり、また自動車は都市部、非都市部である程度重要であることがわかり、これに対して肥料由来の N_2O 生成は非都市部でのみ重要であるとの結果を得た。しかし、推定方法の項でも述べたように、今回の推定には不確定な部分が非常に多く、今後は更に信頼性の高い推定が出来るようにデータの蓄積が強く望まれる。これは、排出削減を考える際にぜひ必要となる情報である。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change (1990), Scientific assessment of climate change (Report of Working Group I).
- 2) Hanaki, K., Zheng, H. and Matsuo, T. (1992), Production of Nitrous Oxide Gas during Denitrification of Wastewater, Water Science & Technol., Vol. 26, No. 5/6, 1027-1036.
- 3) 鄭 荭, 花木啓祐, 松尾友矩(1993), 脱窒における一酸化二窒素生成と操作因子の関係 下水道協会誌論文集, Vol. 30, No. 352, 30-41.
- 4) Iwasaki, Y., Tatsuichi, S. and Ueno, H. (1992), N_2O emission from stationary sources, Proc. 5th Intl. Workshop on Nitrous Oxide Emissions, July 1992, Tsukuba, Paper 3-1.
- 5) Yasuda, K. and Takahashi, M. (1992), Emissions of nitrous oxide from waste management system, Proc. 5th Intl. Workshop on Nitrous Oxide Emissions, July 1992, Tsukuba, Paper 3-2.
- 6) Watanabe, M., Sato, M., Miyazaki, M. and Tanaka, M. (1992), Emission rate of N_2O from municipal solid waste incinerators, Proc. 5th Intl. Workshop on Nitrous Oxide Emissions, July 1992, Tsukuba, Paper 3-4.
- 7) 厚生省水道環境部環境整備課(1989), 廃棄物処理施設データブック, 平成元年度
- 8) 厚生省水道環境部(1980), 廃棄物処理施設構造指針解説
- 9) 日本下水道協会(1990), 下水道統計昭和63年度版
- 10) Tsuruta, H. (1992), N_2O and NO emissions from fertilized soils in Tsukuba, Japan, Proc. 5th Intl. Workshop on Nitrous Oxide Emissions, July 1992, Tsukuba, Paper 6-2.
- 11) (財)日本環境衛生センター(1989), 地球温暖化問題への対策に関するスクリーニング調査結果報告書
- 12) 農林水産省肥料機械課監修(1992), ポケット肥料要覧
- 13) Sasaki, S. and Kameoka, A. (1992), Nitrous oxide emissions from automobiles, Proc. 5th Intl. Workshop on Nitrous Oxide Emissions, July 1992, Tsukuba, Paper 10-2.
- 14) (財)日本環境衛生センター(1990), メタン等排出量分析調査結果報告書
- 15) 平松直人, 花木啓祐, 松尾友矩(1992), エネルギー消費の大都市間比較, 土木学会環境システム研究, Vol. 20, 252-261.