

都市域大気汚染物質の濃度評価に関する 簡便な評価方法の提案と適用 ー川崎市のケーススタディー

中谷隼¹・荒巻俊也²・花木啓祐³

¹ 博（工） 東京大学大学院 工学系研究科化学システム工学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1）

E-mail : nakatani@chemsys.t.u-tokyo.ac.jp

² 博（工） 東京大学助教授 工学系研究科都市工学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1）

³ 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科都市工学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1）

本稿では、都市域大気汚染物質の濃度評価を簡便に行う方法を提案し、その方法を川崎市のケーススタディに適用した。SO₂（二酸化硫黄）、NO_x（窒素酸化物）およびPM（粒子状物質）について、固定発生源と移動発生源を合計した各年度における総排出量を推定し、年平均濃度の経年変化との関係を調べたところ、SO₂については排出量と濃度の間に強い相関があることが分かった。また、NO_xのデータはSO₂のデータが構成している直線関係から大きく外れてはなかったが、PMのデータはSO₂のデータが構成している直線関係から大きく外れた位置にあり、排出や換気以外の要因による影響が示唆された。SO₂の排出量と濃度についての回帰分析の結果から、川崎市におけるSO₂およびNO_xの濃度変換係数が算出された。

Key Words: urban air pollutant, concentration assessment, concentration conversion factor,
Kawasaki City

1. はじめに

事業の実施にともなう環境影響評価や、事業段階よりも上位の政策・計画段階におけるSEA（戦略的環境影響評価）、被害算定型のLCA（ライフサイクルアセスメント）における都市域大気汚染物質の排出に対する評価は、それらの排出量から人間健康への影響といった具体的な被害量を算定することで、より有意義なものとなる。人間健康の被害量は、濃度評価－曝露評価－被害評価といった一連の手続によって算定される。これらの手続のうち、大気汚染物質の排出量から濃度上昇値を求める濃度評価は、具体的な排出源が特定される事業段階における環境影響評価では大気拡散モデルなどを用いて行われることが一般的である。しかし、大気拡散モデルを用いた評価は、非常に複雑な計算が必要であること、得られた結果を面積や気象条件などの異なる他の地域に適用する

ことはできないこと、複雑な計算の積み重ねによって得られた結果が妥当であるとは限らないこと（付録参照）といった理由により、比較的広い地域を対象とするSEAやLCAへの適用には必ずしも適当ではないと考えられる。そのため、簡便であり、なおかつ広い地域に対して現実的に妥当な結果が得られる濃度評価の方法が求められる。

本稿では、都市域大気汚染物質の濃度評価を簡便に行う方法を提案することを目的とし、その方法を神奈川県川崎市のケーススタディに適用した。SO₂（二酸化硫黄）、NO_x（窒素酸化物）およびPM（粒子状物質）について、各年度における総排出量を推定し、それぞれの物質について、総排出量と年平均濃度の経年変化に対して回帰分析を適用した結果、川崎市におけるSO₂およびNO_xの濃度変換係数が算出された。PMについては、提案した方法によって濃度換算係数を求めることはできなかった。

2. 簡便な濃度評価の方法の提案

岩崎他⁶⁾は、CO₂、SO₂、NO_xなど6種類の物質を通して、東京都における年間排出量と一般環境濃度の年平均値増加分（年平均値からバックグラウンド濃度を差し引いたもの）との関係が、非常に相関性が高いことを示している。また、この研究をふまえて山神他⁷⁾は、名古屋市において、大気中SO₂年平均濃度と推定排出量の間に、極めて明瞭な直線関係が認められたとしている。これらの研究では、「自然換気回数」あるいは「希釈係数」という考え方がベースとなっている。岩崎他⁶⁾は、東京都を取り巻く空気を1つのボックスと考え、このボックス内の空気がどの程度入れ替わるかを、自然換気回数としている。山神他⁷⁾は、名古屋市内のSO₂排出量の変化にともなう大気濃度の変化率を希釈係数としている。いずれも、物質の濃度が、その排出および空気の入れ替えのみによって決定されと考え、それら以外の要因による影響を無視しているという意味で、同様の概念である。

本稿で提案する方法では、上記の研究を参考に、市町村規模の地域を対象として、その地域を取り巻く空気を1つのボックスと考え、その地域における総排出量と年平均濃度の関係の経年変化から、回帰分析によって単位排出量当たりの濃度上昇値を求め、それを濃度変換係数として用いる。この方法は、非常に単純であり、比較的広い範囲に対して排出量当たりの濃度上昇値を過大評価もしくは過小評価する可能性が低いと考えられるため、SEAや被害算定型のLCAに適していると言える。

3. 川崎市のケーススタディへの適用

ここでは、2.で提案した濃度評価の方法を、川崎市におけるSO₂、NO_xおよびPMのケーススタディに適用した。まず(1)～(3)では、川崎市における各物質の人為的な排出源からの総排出量を、'70年代から現在までについて、固定発生源（工場・事業所）と移動発生源（自動車）に分けて推計した。次に(4)では、川崎市における各物質の年平均濃度を、'70年代から現在までについて示した。それらを用いて、(5)で単位排出量当たりの濃度上昇値を求めた。

(1) 固定発生源からの都市域大気汚染物質の総排出量

工場・事業所からの排出量としては、SO_x（'73年度～）、NO_x（'74年度～）、煤塵（'76年度～）について川崎市の統計⁸⁾が存在する。これを、川崎市における固定発生源からの総排出量と考えた。ただし、SO_xは全てSO₂として排出されと考え、以下では、このSO_x排出量をSO₂排出量とみなした。

(2) 移動発生源からの二酸化硫黄の総排出量

自動車からのSO₂排出量は、軽油の硫黄分が全てSO₂として排出されると仮定して、各年度の川崎市における軽油消費量と軽油の硫黄含有率から、(1)式によって求めた。

$$Q_{SO_2} = \rho_{go}^s \cdot g_{go} \cdot U_{go} \times \frac{64}{32} \div 10^6 \quad (1)$$

ここで、

Q_{SO_2} : 自動車からのSO₂排出量 [t/年]

U_{go} : 自動車による軽油消費量 [kl/年]

g_{go} : 軽油の比重 (= 0.83) ⁹⁾ [g/cm³]

ρ_{go}^s : 軽油の硫黄含有率 [ppm]

各年度における硫黄含有率は、実測値の調査結果が存在する年度については実測値⁸⁾を用いた。また、調査結果が存在しない年度については、調査結果が存在する年度の実測値⁸⁾と基準値¹⁰⁾の比から、実測値は基準値の0.7倍であると仮定して、基準値をもとに求めた。

軽油消費量は、各年における車種別（乗用車、バス、小型貨物車、大型貨物車）の軽油消費原単位 [l/km] に、各車種の走行量全体に占める軽油による走行量の割合を乗じ、それに各車種の川崎市における平日（年間245日とした）または休日（年間120日とした）の走行量 [千台・km/24時] を乗じて、それらを合計することで求めた。

各車種の川崎市における走行量は、「道路交通センサス」¹¹⁾をもとに「自動車輸送統計年報」¹²⁾を参照して調整した。まず、道路交通センサスにおける川崎市内の「24時間走行台キロ」の合計を、暫定的に川崎市内の走行量とした。道路交通センサスの調査が行われていない年度については、走行量が線型に経年変化するとして、その年度の前後で調査が行われた年度の数値から推測した。ただし、道路交通センサスをもとにした走行量は、川崎市内の高速道路、一般道路、指定市の一般市道についての合計であり、川崎市内の全ての道路についての走行量を示していないことに注意が必要である。そこで、以下の方法で走行量を調整した。まず、道路交通センサスにおける神奈川県内の24時間走行台キロ [千台・km/24時] の合計（平成11年度）をもとに、平日を年間245日、休日を年間120日として、神奈川県における各車種の走行量（道路交通センサス）を計算した。次に、自動車輸送統計年報における平成11年度の神奈川県の「業務別・車種別走行キロ」を、神奈川県における各車種の走行量（自動車輸送統計年報）とした。計算の結果、神奈川県において、走行量（自動車輸送統計年報）は走行量（道路交通センサス）に対して、乗用車については2.1倍、小型貨物については1.7倍、バスと普通貨物については1.0

倍となった。バスや普通貨物が、高速道路、一般道路、指定市の一般市道などの大きな道路以外は走行することが少ないことを考えれば、妥当な結果が得られたと言える。この神奈川県における走行量の比が川崎市においても成り立つと仮定し、これらの比を道路交通センサスによる走行量に乗じることで、平日および休日の川崎市における走行量とした。

各年における車種別の軽油消費原単位（乗用車：0.08～0.12 l/km、バス：0.26～0.31 l/km、小型貨物車：0.11～0.16 l/km、普通貨物車：0.24～0.28 l/km）は、乗用車については、営業用および自家用乗用車の軽油消費原単位¹²⁾を、それぞれの軽油による全国の走行量で重み付けして求めた。バス、小型貨物車、大型貨物車についても同様である。各車種の軽油による走行量は、それぞれの車種についての軽油消費量¹²⁾を軽油消費原単位¹²⁾で割ることで求めた。

なお、軽油以外（ガソリン、LPG）に由来する自動車からのSO₂排出については、それぞれの硫黄含有率の観点から、軽油の硫黄含有率が高かった'70～'80年代における軽油由来の排出よりも十分小さいと考えられるため、ここでは考慮しないこととした。

(3) 移動発生源からの窒素酸化物および粒子状物質の総排出量

自動車からのNO_x排出量とPM排出量は、ガソリン車およびLPG車からの排出と、ディーゼル車からの排出に分けて推計した。

ガソリン・LPG車からのNO_x排出量は、各年におけるガソリン・LPG車の車種別（乗用車、バス、小型貨物車、大型貨物車）のNO_x排出係数に、各車種の走行量全体に占めるガソリンまたはLPGによる走行量の割合を乗じ、それに(2)で述べた各車種の川崎市における平日または休日の走行量を乗じて、それらを合計することで求めた。ディーゼル車からのNO_x排出量およびPM排出量についても同様である。ただし、ガソリン・LPG車からのPM排出量については、ディーゼル車からのPM排出量と比較して無視できると考え、推計と対象としなかった。

ここで、各年におけるガソリン・LPG車の車種別のNO_x排出係数は、ガソリン・LPG車の車種別の規制年別NO_x排出係数[g/km]¹³⁾を、各年3月末現在におけるガソリン・LPG車の車種別の初度登録年別車両数¹⁴⁾によって重み付けすることで求めた。各年におけるディーゼル車の車種別のNO_x排出係数またはPM排出係数についても同様に、ディーゼル車の車種別の規制年別NO_x排出係数[g/km]¹³⁾またはPM排出係数[g/km]¹³⁾を、各年3月末現在におけるディーゼル車の車種別の初度登録年別車両数¹⁴⁾によって重み付けすることで求めた。

(4) 都市域大気汚染物質の年平均濃度

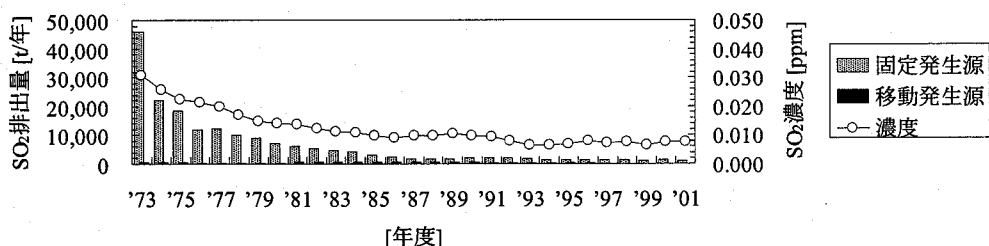
川崎市における各物質の年平均濃度に関しては、SO₂については'71年度以降、NO_xについては'72年度以降、SPM（浮遊粒子状物質）については'82年度以降、継続して測定結果が存在する川崎市内の一般局（一般環境大気測定局）における年平均値^{5),15)}をもとに、これらを単純平均した。

ここまで推計した各物質の総排出量（固定発生源および移動発生源）と年平均濃度の推移を、図-1(a)～(c)に示した。SO₂に関しては、排出量、濃度ともに'70年代と比べて大きく減少していることが分かる。NO_xやSPMについては、濃度の著しい減少は見られない。

(5) 濃度変換係数の算出

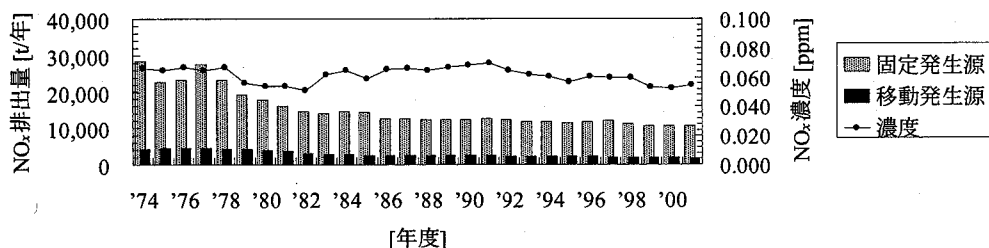
各年度における川崎市全域の総排出量と年平均濃度の関係を、SO₂（'73～'01年度）、NO_x（'74～'01年度）、SPM（'82～'01年度）について、図-2(a)に示した。SO₂とNO_xの濃度については、それぞれの分子量を用いて[ppm]単位から[mg/m³]単位に換算した。ただし、NO_x濃度の換算にはNO（一酸化窒素）の分子量30を用いた（NO_xは全てNOとして排出された後、一部が大気中で酸化されたと考えたため）。また、各物質の濃度から、それぞれのバックグラウンド濃度（SO₂:0.006 mg/m³、NO_x:0.013 mg/m³、SPM:0.010 mg/m³）を差し引いた（各物質の人為的な排出がそれぞれの濃度に与える影響を比較するためには、自然界由来の濃度を除いて示すことが妥当であるため）。SPMの排出量としては、固定発生源からの煤塵の総排出量と移動発生源からのPMの総排出量を単純に合計した。図-2(a)のデータを両軸とも対数目盛にプロットしたものが、図-2(b)である。

まず、図-2(a)からは、排出量が15,000 t/年より小さい範囲（'76～'01年度のデータ）で、SO₂排出量とSO₂濃度の間に強い相関があることが分かる。しかし、NO_xとSPMに関しては、排出量と濃度の間に明確な関係は見られない。ただし、図-2(b)で見ると、NO_xのデータは、SO₂のデータが構成している直線関係から大きく外れてはいないことが分かる。しかし、SPMのデータは、SO₂のデータが構成している直線関係から大きく外れた位置にある。すなわち、SO₂とNO_xは排出量と濃度に関して同様の関係を持つことが否定されないが、SPMは明らかにSO₂と異なる関係を持つと言える。そこで、'76～'01年度のSO₂総排出量およびSO₂年平均濃度からSO₂の濃度変換係数を算出し、その値をもとにNO_xの濃度変換係数を算出することとした。SO₂についても、'73～'75年度のデータは回帰直線から外れた位置にあるが、排出量が2,000 t/年を下回る近年の条件下における濃度変換係数を求める際には、これらのデータは必ずしも必要ではないと考えられる。



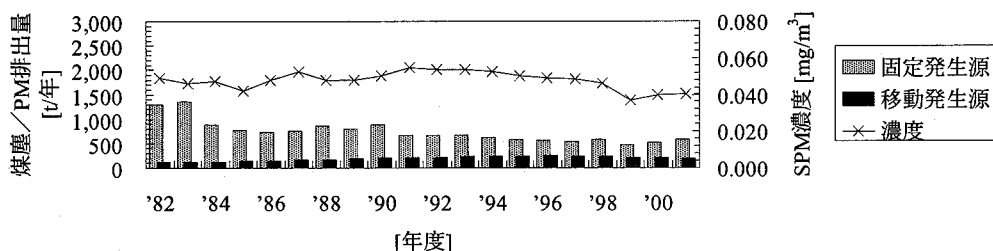
資料) 固定発生源：川崎市⁸⁾ 濃度：国立環境研究所^{9), 15)}

(a) SO₂



資料) 固定発生源：川崎市⁸⁾ 濃度：国立環境研究所^{9), 15)}

(b) NO_x



資料) 固定発生源：川崎市⁸⁾ 濃度：国立環境研究所^{9), 15)}

(c) PM/煤塵

図-1 川崎市における都市域大気汚染物質の総排出量と年平均濃度の推移

'76～'01年度について、市全域のSO₂排出量とSO₂濃度が、(2)式に示すような直線関係にあるものとして、回帰分析を適用した。ここでは、年平均濃度からバックグラウンド濃度を差し引いていないため、定数項にバックグラウンド濃度が含まれることになる。

$$y_{SO_2} = \beta_0 + \beta_1 x_{SO_2} \quad (2)$$

ここで、

y_{SO_2} ：川崎市全域のSO₂年平均濃度 [μg/m³]

x_{SO_2} ：川崎市全域のSO₂総排出量 [千t/年]

β_0, β_1 ：パラメータ

回帰分析の結果を表-1に示した。この回帰式は決定係数 $R^2 = 0.948$ と非常に当てはまりが良く、また、推定されたパラメータは、いずれも p 値が0.000と相当に有意である。この回帰直線の傾きが、SO₂の濃度変換係数に相当する。すなわち、SO₂の濃度変換係数は、総排出量1t/年に対して $3.23 \times 10^{-3} \mu\text{g}/\text{m}^3$ の濃度上昇となった。

また、[μg/m³]単位でのNO_xの濃度変換係数は、大気中での酸化の影響を無視すると、SO₂の濃度変換係数と等しいと仮定できる。ただし、NOとして排出されたNO_xは、大気中で一部が酸化されてNO₂となるため、ここでは、NO_xは全てNOとして排出され、その半分が大気中で酸化されてNO₂となると仮定して値を調整した。計算

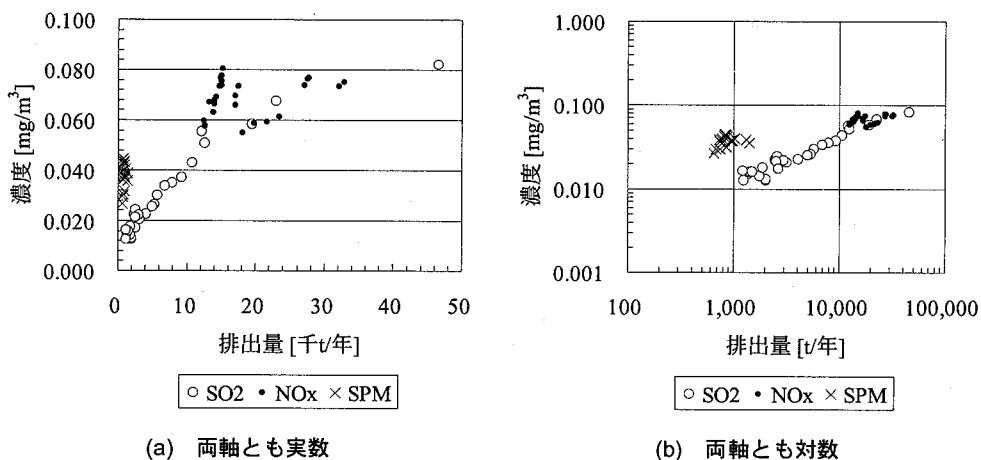


図-2 川崎市における都市域大気汚染物質の総排出量と年平均濃度の関係

表-1 SO₂の総排出量と年平均濃度についての回帰分析の結果

	推定値	標準誤差	<i>t</i> 値	片側 <i>p</i> 値
β_0	16.299	0.854	19.093	0.000
β_1	3.227	0.154	21.010	0.000
R^2	0.948			
観測数	26			

の結果、NO_xの濃度変換係数は、総排出量 1 t/年に対して $4.09 \times 10^{-3} \mu\text{g}/\text{m}^3$ の濃度上昇となった。

4. まとめと考察

本稿では、都市域大気汚染物質の濃度評価を簡便に行う方法を提案し、その方法を神奈川県川崎市のケーススタディに適用した。SO₂、NO_x および PM について、固定発生源と移動発生源を合計した各年度における総排出量を推定し、年平均濃度の経年変化との関係を調べたところ、SO₂ については排出量と濃度の間に強い相関があることが分かった。また、NO_x のデータは SO₂ のデータが構成している直線関係から大きく外れてはいなかった。SO₂ の排出量と濃度についての回帰分析の結果から、川崎市における SO₂ および NO_x の濃度変換係数が算出された。PM については、そのデータは SO₂ のデータが構成している直線関係から大きく外れた位置にあり、排出や換気以外の要因による影響が示唆されたため、提案した方法によって濃度換算係数を求めることはできなかった。

以下では、本稿で提案した方法によって妥当な結果が得られるための条件について、川崎市のケーススタディの結果を通して考察する。まず、本稿で提案した手法が

理論的な整合性を持つためには、対象とする大気汚染物質が、対象地域内からの排出および換気のみによって濃度が決定され、それら以外の要因による濃度の変化は無視できることが条件となる。そのため、一次粒子だけでなく二次粒子まで考慮しなければならない PM のような物質については、本稿で提案した方法による濃度変換係数の推定は適当ではない。しかし、上記の条件を仮定できる物質であれば、簡便に濃度変換係数を推定できる。特に、川崎市における SO₂ のように、排出量および濃度が経年的に大きく変化している場合、回帰直線の傾きが有意になる可能性が高く、信頼性の高い濃度変換係数が得られると考えられる。また、上記の条件を満たす物質であれば、物質の種類によらず同一の濃度変換係数を持つと言える。そのため、対象とする物質の中に信頼性の高い濃度変換係数が得られるものがあれば、その他の物質についても、排出量と濃度の関係が矛盾しないことを確認した上で、濃度変換係数を推定することができる。

付録 大気拡散モデルによる濃度評価の例

経済産業省による「製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発」(通称: LCA プロジェクト) では、濃度評

価（運命分析）において、汚染物質の濃度が排出源を中心に正規分布すると仮定したブルームモデル、パフモデルを用いてシミュレーションを実施し、その結果から濃度変換係数を算定している^{1), 2)}。ここで示されている濃度変換係数を、川崎市におけるNO_x排出量に対して適用した。川崎市と気象条件が近い東京について、点源からのNO₂の濃度変換係数は3,728 (μg/m³)/(kg/年)・m²と算定されている。この濃度変換係数がNO_xについても当てはまるとして、川崎市の面積144.35 km²（平成15年3月31日現在）³⁾を用いて、川崎市全域の固定発生源からのNO_x排出量10,609 t/年（平成13年度）⁴⁾による濃度上昇値を求めると、約270 μg/m³となった。これを、大気中のNO_xのうちNOとNO₂がそれぞれ50%ずつを占めると仮定して単位を変換すると、0.16 ppmとなった。この結果は、川崎市全域のNO_x濃度の年平均値0.055 ppm（平成13年度）⁵⁾と比較すると、妥当な結果とは言えない。

参考文献

- 産業環境管理協会：「平成13年度 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託 製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発 成果報告書」，(2002)。
- Nagata, Y., Ohara, T., Itsubo, N., and Inaba, A.: "Development of Damage Functions for Air Pollutants Considering Local Conditions of Japan," *Proceeding of the Fifth International Conference on Eco Balance*, pp. 41-44, (2002)。
- 川崎市総合企画局企画部統計情報課：「川崎市統計書 平成15年版（2003年版）」，かわさき生活ガイド，<http://www.city.kawasaki.jp/20/tokei/home/tokei/tokeisyo/html/mokuji.htm>。
- 川崎市環境局公害部企画指導課編：「平成15年度 環境局事業概要—公害編—」，(2003)。
- 国立環境研究所環境情報センター：「環境数値データベース」，<http://www.nies.go.jp/igreen/index.html>。
- 岩崎好陽・早福正孝・老川進：「一般環境濃度を用いた有害化学物質の都内総排出量の算出」，『大気環境学会誌』，36(3)，pp. 166-173，(2001)。
- 山神真紀子・大場和生・大野隆史・北瀬勝・酒井哲男・渡辺征夫：「二酸化硫黄の大気中年平均濃度と推定排出量との関係から見かけの空間希釈容量の試算 一名古屋市での9年間のデータから」，『大気環境学会誌』，38(1)，pp. 13-25，(2003)。
- 川崎市環境局公害部企画指導課編：「平成15年度 環境局事業概要—公害編—」，(2003)。
- 環境情報科学センター編：『環境アセスメントの技術』，第4章，第17章，中央法規，(1999)。
- 石油連盟 HP（低硫黄軽油について／石油とエコ），http://www.paj.gr.jp/html/eeco/low sulphur_index.html。
- 国土交通省道路局編／建設省道路局編：「昭和46，49，55，58，60，63，平成2，6，9，11年度 道路交通センサス（全国道道路交通情勢調査）一般交通量調査基本集計表」，交通工学研究会，(1972，1975，1981，1984，1986，1989，1991，1995，1998，2000)。
- 国土交通省総合政策局情報管理部交通調査統計課編／運輸省運輸政策局情報管理部／運輸省大臣官房情報管理部編：「自動車輸送統計年報／陸運統計年報 昭和45～平成14年度分」，<http://toukei.mlit.go.jp/06/jidousya.html>。
- 札幌市環境局：「排出量の算出方法」，(2003)。
- 国土交通省自動車交通局監修／運輸省自動車交通局監修／運輸省地域交通局監修：「自検協統計 自動車保有車両数」，No. 1-30，自動車検査登録協会の会，(1974-2003)。
- 国立環境研究所環境情報センター：「大気環境月間値・年間値データファイル（昭和45～平成元年度）」，環境情報普及センター。

CONSTRUCTION AND APPLICATION OF A SIMPLE METHOD FOR CONCENTRATION ASSESSMENT OF URBAN AIR POLLUTANTS: A CASE STUDY OF KAWASAKI CITY

Jun NAKATANI, Toshiya ARAMAKI, and Keisuke HANAKI

In this paper, a simple method for concentration assessment of urban air pollutants was proposed and applied to a case study of Kawasaki City. Regression analysis was applied between total emissions and average concentrations of SO₂ (sulfur dioxide), NO_x (nitrogen oxides) and PM (particulate matter) for the past thirty years, and the results showed a strong correlation between the emissions and the concentrations of SO₂. The data set of NO_x was consistent with the linear relation composed by the data set of SO₂, while the data set of PM was inconsistent with the above linear relation. Concentration conversion factors for SO₂ and NO_x in Kawasaki City were calculated from the result of regression analysis.