

ロジスティクスにおける大気汚染拡散に関する基礎的研究

—A Study on Air-pollutant Diffusion in Logistics—

山邊 茂之^{**}、相浦 宣徳^{***}、杉本 剛^{****}、唐澤 豊^{*****}、佐藤 馨一^{*****}

By Shigeyuki YAMABE, Nobunori AIURA, Takeshi SUGIMOTO, Yutaka KARASAWA, Keiichi SATOU

1. はじめに

「アメリカの京都議定書撤退」で幕を開けた「環境世紀 21 世紀」は、地球環境対策に陰りを落とした状態でスタートし、アメリカの撤退発表により、地球レベルでの環境対策は十数年遅れたと言われていいる。これに対し企業を含む民間レベルでは、リユースやリサイクルに代表される対策活動がますます盛んになり、その活動意識は向上の一途を辿っている。

しかし、見方を変えれば、活動が活発化しているリユースやリサイクル等により解決される目に見える環境問題に対し、アメリカが撤退した理由の一つでもある「大気汚染問題」等の見えない環境問題への対策は、その困難性から非常に遅れており、活路を見出す事すら困難な状況に追い込まれているといえる。

大気汚染問題の代表格である CO₂、NO_x の主な発生源は、工場からの排気ガスや、ディーゼル車による道路輸送であり、非常に明確である。しかしながら、大気汚染問題に対する良策は、アメリカの主たる主張に示される「低公害燃料への移行と産業界への影響の関係」または「リユースやリサイクルとそれによる新たな輸送機会の発生に伴う汚染の関係」のような多面的問題による矛盾が生じてしまう難しさからゆえ、なかなか見出せないのが実情である。

このような背景から本研究では、より身近な問題である「リユースやリサイクルとそれによる新たな

輸送機会の発生に伴う汚染の関係」の解明を主題として、道路輸・配送活動の大部分で使用されているディーゼル車の排気ガスの濃度、拡散状況及び範囲を示すことを目的としている。

研究の初期段階となる本論文では、単純経路を考え、図 1 における条件下で排出起源から排出された排出物が道路内または大気中でどのように拡散するかをシミュレーションし、トータル的に拡散状況を把握するためのプロトタイプモデルを構築する。

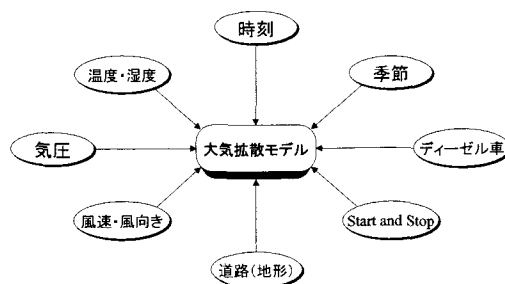


図 1 環境・設定条件

2. 研究概要と前提条件

(1)研究方法の概要

本論文では、ディーゼル車による道路輸送がもたらす排出ガス NO_x の濃度と拡散状況を①道路内拡散状況の算出および算出結果に基づく②大気拡散状況の算出の2段階によりシミュレーションする。

①道路内拡散状況の算出では、道路内濃度を Puff model により求め、その濃度を複数のグリッド(格子)に切り分け、グリッド上に存在する濃度塊を微粒子として捉え、ランダムウォークとブラウン運動によりその拡散状況を表現する。更には、拡散後グリッド間の濃度展開と濃度誤差修正を行い、道路内拡散状況と濃度を算出する。②大気拡散状況の算出では、①で求めた道路内の拡散状況全体を 1 つの濃度

*キーワード 交通公害測量

**学生員 学(工) 神奈川大学大学院工学研究科経営工学専攻

***正員 工博 神奈川大学工学部経営工学科

****工博 神奈川大学大学院工学研究科経営工学専攻

*****正員 工博 神奈川大学大学院工学研究科経営工学専攻

(横浜市神奈川区六角橋三丁目 27 番 1 号、Tel 045-481-5661)

*****フェロー 工博 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
(札幌市北区北 13 条西 8 丁目、Tel011-706-6209)

塊として捉え、より広範囲なランダムウォークを行うことにより、ディーゼル車から排出された排気ガスが大気中にどのように拡散していくかを求める。

(2)前提条件

(a)配送経路と走行条件

配送経路は図 1 に含まれる時期、時刻、地形等の条件により大きく変化するが、本研究では複雑な経路は考えず、直線的な単純配送経路に範囲を限定する。又、経路は勾配の無い片道 2 車線、走行距離 10km とし、設置される信号数は 5、信号間隔は与件とする(図 2 参照)。

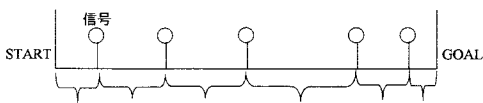


図 2 基本経路パターン

(b)走行条件及び NOx 排出量

ディーゼル車に限らず車両の走行は様々なパターンにより構成され、当然のことながら各パターンによって NOx の排出量は変化する。本研究では、以下に示す 4 パターンに限定しシミュレーションを実行する。

Pattern 1 : 渋滞による速度制限および信号による停止がない平均速度での走行。

Pattern 2 : 渋滞に遭うが、信号による停止はない。

Pattern 3 : 渋滞は無いが、信号による停止がある。

Pattern 4 : 渋滞に遭い、信号による停止もある。

速度と時間に関する設定条件を表 1 にまとめる。

表 1 速度・時間設定

速度設定	平均速度：時速30km
	渋滞時：時速10km以下
	車線変更時の加速度無し

アイドリング時間	減速時間30秒間+停止時間120秒間
加速時間	0～30秒間 → 時速20km

走行に伴う排出量を考える際には、停止を含む走行(信号機の前後等)を重視する必要がある。信号が赤の場合、減速→停止→停止中→発進→加速が行われ、一連の行動中ディーゼルエンジンは稼動し、排気ガスも排出されている。この一連の動作中の排出量の算出では、減速時はアクセルを離す事からエン

ジンに付加はかからないものとし、減速しだした点から発進するまでの間をアイドリング時間と捉え、アイドリング時の排出係数を用いる。又、加速時の排出係数は速度に相当する排出係数を用い、渋滞の際には加速時間は無いものとする。

使用データとしてはディーゼル車の該当排出ガスを想定している。

3. 道路内濃度拡散シミュレーション

道路内拡散のシミュレーションにおいて、拡散状況を予測する事は大変困難である。その主たる理由として、ディーゼル車によって排出された排出ガスは、後続車により攪拌され、常にそれが繰り返される点、さらには、道路脇の建造物の有無により排出ガスの拡散状況に大きな相異が生まれる点などが挙げられる。

これらに対応するため、本研究は弱風時における物質空間内濃度を表す **Puff Model** により濃度を算出し、その濃度をグリッド(格子)方法を用い切り分け、グリッド上で濃度塊を 2 次元ブラウン運動とランダムウォークを用い移動させる事で拡散状況を示す。

(1) 道路内濃度の算出方法

濃度の算出は、図 2 示す 6 区間において行う。濃度算出には濃度算出に一般的に用いられる **Puff Model** を用いる。**Puff model** は次式により表される。

$$C = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \alpha^2 \gamma} \left[\frac{1 - \exp(-l/t_0^2)}{2l} + \frac{1 - \exp(-m/t_0^2)}{2m} \right] \quad (1)$$

$$l = \frac{1}{2} \left[\frac{x^2 + y^2}{\alpha^2} + \frac{(z-H)^2}{\gamma^2} \right] \quad m = \frac{1}{2} \left[\frac{x^2 + y^2}{\alpha^2} + \frac{(z+H)^2}{\gamma^2} \right]$$

C : (x,y,z)地点の濃度 (ppm)

Q : 排出起源の排出量 (ml/s)

α, γ : 拡散幅に関する係数

t_0 : 初期拡散幅に相当する時間 (s)

H : 排出起源の高さ (m)

モデルの特徴としては、排出物を一つの塊(本研究では道路幅を一辺とする正方形)として考え濃度を算出する方法を取っている点にある。又、欠点としては、本モデルは中心と外円が同じ濃度となるため、広範囲濃度の算出に不向きな点が挙げられる。

(2)拡散シミュレーション

道路内の拡散をシミュレーションする場合、風速風向きは勿論、建造物の存在も考慮しなくてはならない。そこで本研究では、濃度を複数のグリッドで分割し、分割された濃度塊を微粒子に見立て、予期できない風速風向きによる微粒子の運動をブラウン運動とランダムウォークにより表現させる。

(a)グリッド単位の切り分け

Puff model で求めた一固体の大きな濃度塊は、グリッド単位に切り分ける事により、無数の小さな濃度塊の集合体とした。そして、切り分けられた個々の小さな濃度塊を微粒子に見立て、さらに濃度塊同士の距離に関連を持たせた。これにより、微粒子に見立てた濃度塊を個別にグリッド上でランダムウォークさせた際に濃度塊の距離が広がったり、狭まったりしても、グリッド間の距離関係から濃度塊を持たないグリッドに濃度塊を持つグリッドの濃度を展開する(図 3 参照)事により、ランダムウォーク後の濃度と動きを表現できると考えた。

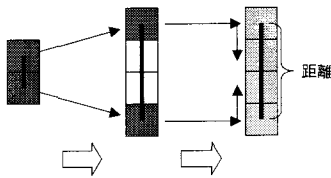


図 3 グリッドの濃度展開

さらに、道路内拡散のシミュレーションにおいて困難な問題となる建造物の有無に対してもグリッド(格子)分割が適用できる。簡述すると、建造物がある所にはグリッドを割り付けなければならない。本研究は、2次元を考えているので、建造物の高さが10m以上にはグリッドを割り付けず、それ未満の場合は攪拌や気温によるガスの上昇を考え、建造物の存在を無視する。

(b)ブラウン運動・ランダムウォーク

ブラウン運動やランダムウォークは何ら規則性のないランダムな運動である。本研究では道路内の攪拌現象をこれらの運動によって表現する。つまり、グリッド上で微粒子をブラウン運動させることにより、複雑な風向き時の粒子運動を表現できると考える。すなわち本研究で用いる方法は、まず、微粒子を微小時間ブラウン運動させ、その運動によって取

られた軌跡に基づき、ランダムウォークをグリッド上を通るように走らせる(図 4 参照)。以後それを繰り返して、始点から拡散をさせた一グリッド点の一定時間後の拡散状況を示す。以上を微粒子に見立てたグリッド全てに行う。ランダムウォークは式(2)により示される。

$$W(x, y, t) \Delta x \Delta y = \frac{1}{4\pi Dt} e^{-(x^2 + y^2)/4Dt} \Delta x \Delta y \quad (2)$$

W : 時間 t において $(x, x + \Delta x), (y, y + \Delta y)$ の間に
いる確率

$$D = \frac{l^2}{4\tau}$$

D : 拡散係数

l : 格子点間隔

τ : 一回の移動に要する時間

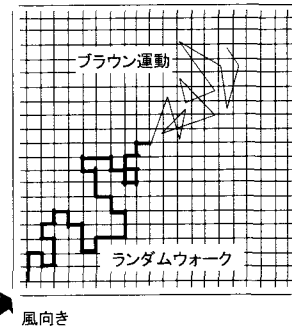


図 4 微粒子の運動

(c)基準風によるブラウン運動の制限

拡散に於いて最大の要因となるのは風速と風向きである。しかし、排出起源の風速風向きが解っても離れた場でのそれを正確に予測する事は不可能であり、データも入手困難である。そこで、一様の風速風向きとして排出起源のデータを用い、これを基準の風速風向きとして、排出起源より離れた所での粒子運動を、基準の風速風向きによる制限を加えたブラウン運動で表現する。例えば、排出起源の風が南西から北東に吹いている場合、粒子はなるべく左下には走らないようにする(図 4 参照)。但し、始点から遠距離になるにつれ、その制限を弱めていく。又、大気中での粒子同士の衝突を考え、粒子をランダムウォーク中にある確率の元で任意点にジャンプさせる。

(d)濃度修正

ランダムウォーク終了後、グリッド上に点在する濃度塊に対してグリッド間距離が短いものから、濃度塊間に存在する濃度を持たないグリッドへの濃度展開を行う(図3参照)。展開されて新たな濃度を持ったグリッドはその濃度のまま、次に対象となるグリッド間に影響を与える。同じ様な方向に濃度を持つグリッドがいくつかある場合、近距離にあるものを選択する。濃度展開が終了したグリッドを基にその周辺のグリッドに対し誤差分散法によって濃度補正を行う。誤差分散の基本的な考え方は式(3)で示される。

$$E_{x,y} = f(x,y) - g(x,y) \quad (3)$$

元となるグリッドの濃度 $f(x,y)$ と展開した濃度 $g(x,y)$ を引いた誤差を $E_{x,y}$ とし、 $g(x,y)$ の周りに補正する。補正する比率はグリッド間の距離により比率が決められる。

1/4	3/8	1/4
3/8	●	3/8
1/4	3/8	1/4

図4 誤差分散(例)

$$\begin{aligned} g(2,2) &\leftarrow \text{拡散後の濃度} \\ E_{2,2} &\leftarrow f(2,2) - g(2,2) \\ g(1,1) &= g(1,1) + E_{2,2} * \frac{1}{4} \\ g(1,2) &= g(1,2) + E_{2,2} * \frac{3}{8} \\ &\vdots \end{aligned} \quad (4)$$

さらに、一度誤差分散を受けたグリッドは、再度誤差分散を行わないようにする。これには、濃度展開の結果、あるグリッドが高濃度化した場合、隣接する別のグリッド間において濃度が減少する事を防ぐためである。

4. 大気拡散シミュレーション

基本的に大気拡散は、道路内拡散の延長線に位置する。現在ではまだ検討段階であるが、一方向性として、次の2つを検討している。①道路内拡散で算

出した拡散状況結果を一つの濃度の塊として扱い、その塊をさらに広範囲なランダムウォークをさせる事により大気拡散状況を求める。

②遠距離における風速風向き、地理条件、バックグラウンド濃度等の様々な要因を加味した拡散方程式(式(5))による大気拡散濃度の算出。しかしながら、②における拡散方程式は、道路内での攪拌時の拡散状況の把握において不十分な点が挙げられる事から、道路内拡散を3章で示した方法で求め、大気拡散を拡散方程式で算出する事を検討している。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = K \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

c : 大気中の汚染濃度

K : 拡散係数

速度(u, v)

t : 時間

5. おわりに

本論文では、ディーゼル車排出ガスの濃度、並びに拡散状況をトータル的に求める方法の初期提案を示した。道路内拡散状況の把握が可能となれば、 NO_x ガスの道路内での滞留を防ぐ建造物の配置など事前に検討可能となる。

本論文は拡散過程をブラウン運動とランダムウォークによるシミュレーション方法を用いたが、今後の課題として、①上記の拡散方程式、②一部に流体力学の導入、③2次元を3次元への拡張が挙げられる。

最後に、本研究で示した濃度拡散算出方法をベンチマークテストにより評価し、その信頼性を示す予定である。

参考文献

- [1] 唐沢豊、“現代ロジスティクス概論”、2000、NTT出版
- [2] 桜井邦朋、“物理学の統計のみかた”、2000、朝倉書店
- [3] 福田正、“交通工学”、1994、朝倉書店
- [4] 鈴木栄一、“現代の環境解析と予測手法”、1995、近代文藝社
- [5] タマス・ヴィチェック、(訳 宮島佐介)、“フラクタル成長現象”、1990、朝倉書店