

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：32708

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360241

研究課題名(和文) 領域気象モデルによる標準気象データと風工学技術を用いた都市大気環境影響評価の変革

研究課題名(英文) Reform of environmental assessment for pollutant dispersion in urban areas using standard meteorological data by meso-scale simulation models and wind engineering techniques

研究代表者

義江 龍一郎 (YOSHIE, Ryuichiro)

東京工芸大学・工学部・教授

研究者番号：60386901

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：都市域内の大気汚染濃度に対する大気安定度の影響を一般化し、中立大気状態のみの風洞実験や数値流体解析で大気汚染濃度の予測を可能とするとともに、無人自動濃度測定システムを開発して拡散風洞実験の労力を大幅に削減した。また、都市域を対象とした屋外拡散実測、風洞実験、数値流体解析を実施し、それらの相互比較により、風洞実験や数値解析による都市域の汚染物質拡散予測の精度を実証した。さらに領域気象モデルの適切な計算条件を観測結果との比較により見出し、その条件を用いた7年間の計算結果に基づく標準上空風データベースを作成した。これらの研究成果に基づき、大気汚染の環境影響評価手法の変革案を提案した。

研究成果の概要(英文)：We generalized effect of atmospheric stability on pollutant concentration in urban areas, and it enabled prediction of pollutant concentration by wind tunnel experiments (WT) or Computational Fluid Dynamics (CFD) only under neutral atmospheric condition. Unmanned automatic measuring system of gas concentration was developed, which drastically decreased labor for the WT. Field measurements, WT and CFD of gas dispersion in an urban area were conducted, which proved prediction accuracy of WT and CFD. Furthermore, appropriate calculation conditions for meso-scale simulation model were examined by comparison between observation data and calculated results. By using the appropriate conditions, seven years calculation was conducted. Using the calculated data, standard wind database for environmental assessment of pollutant concentration were prepared. Based on these research results, plan for reforming environmental assessment methods for pollutant concentration was proposed.

研究分野：建築環境工学・風工学

キーワード：環境影響評価 都市環境 大気汚染 領域気象モデル 大気安定度 風洞実験 数値流体解析 屋外拡散実測

1. 研究開始当初の背景

大規模な開発事業に対して条例で義務付けられている環境影響評価(環境アセスメント)の項目のひとつとして「大気汚染」があるが、その有風時の予測にはプルームモデルが用いられている。プルームモデルとは、汚染物質が風下に直線的に流されながら、ガウス分布に従って広がることを仮定したモデルである。申請者は地方公共団体の環境影響評価審議委員を務めているが、周りをビルで囲まれた建設地から発生する排ガス(工用建設機械や供用時の自動車、コジェネレーションやボイラ等からの排ガス)の周辺都市域内への移流・拡散予測にまでもプルームモデルが使われているのを数多く目にしてきた。しかし、その経路の途中で建物群が存在する都市域内での移流・拡散予測にプルームモデルを用いるのは適切でないことは明らかである。また、大気汚染の環境影響評価では、計画地最寄りの気象台または大気測定局での観測データを用いて風速・風向・大気安定度の発生頻度を求め、これとプルームモデルによる計算を組み合わせ、大気汚染物質の年平均濃度等を確率的に算出している。しかし観測点の周辺に高い建物が建ち並び、その影響で風の観測データが歪められている場合が多い。また風速計を設置している建物屋上のポールの高さが低く、自身の建物の影響を受けてしまっていることも多い。たとえば都心のK市には9ヶ所の大気測定局があり、その風観測データが大気汚染やビル風の確率的評価に用いられているが、その全ての大気測定局のデータが、周辺建物や自身の建物の影響によって歪められていると言っても過言ではない。

ビル風の環境影響評価ではかねてから風洞実験が一般的に行われてきた。また近年では数値流体解析(Computational Fluid Dynamics: CFD)によるものも見られるようになってきた。それにもかかわらず大気汚染の環境影響評価には、これら風工学の技術が用いられて来なかった。その主たる理由は3つ考えられる。1つ目は大気汚染の環境影響評価では大気安定度を考慮する必要があり、実験や解析のケース数が膨大となってしまうこと、2つ目は風洞実験やCFD解析による都市域での汚染物質拡散の予測精度が十分検証されていないこと、3つ目はビル風の実験では多点風速計で短時間に風速を測定できるのに対し、濃度測定の場合は1点1点測定していかなければならず、きわめて長い時間を要すること、が理由として挙げられる。

2. 研究の目的

本研究は上記のような都市域での大気環境影響評価の不適切な現状を変革することを目指し、それを実現するために以下の4つの研究目的を掲げた。

(1) 都市域内の濃度に対する大気安定度の影響を一般化し、中立大気状態のみの風洞実験

やCFD解析で大気汚染の予測を可能とする。
(2) 拡散風洞実験の労力を大幅に削減するために、濃度の自動計測システムを開発する。
(3) 都市域を対象とした屋外拡散実測、風洞実験、CFD解析を実施し、それらの相互比較により、風洞実験やCFD解析による都市域の汚染物質拡散予測の精度を検証する。
(4) 領域気象モデルによる上空風の年間発生頻度の再現性を明らかにし、同モデルを用いて標準上空風データベースを構築して今後の大気汚染やビル風の環境影響評価に供する。

3. 研究の方法

(1) 大気安定度が都市域内での汚染物質濃度に及ぼす影響を一般化

東京都大気測定局(約50箇所)での観測データの分析ならびに大気安定度を変化させた風洞実験やCFD解析の結果に基づき、大気安定度が中立状態ではない時の汚染物質濃度と中立状態時の汚染物質濃度の比(係数)を求める。この係数を大気安定度パラメータ等の関数で一般的に表すことが可能か否かを明らかとする。

(2) 都市域での拡散風洞実験およびCFD解析の精度検証

東京工芸大学厚木キャンパス内で屋外拡散実測を実施し、その結果との比較により、風洞実験とCFD解析の予測精度を検証する。

(3) 濃度の自動計測システムの開発

コンピュータに事前入力した測定点座標に濃度計のサンプリングチューブを自動移動させ自動測定を行うシステムを開発する。

(4) 領域気象モデルによる標準上空風データの整備

領域気象モデルWRF(Weather Research and Forecasting)の各種物理モデル、計算領域、ナッジング等の計算条件が、計算結果に及ぼす影響をドップラーライダーによる観測結果と比較しながら適切な計算条件を見出す。その計算条件を用いて過去7年間の計算を実施して標準上空風データベース(風配やワイルド係数のデータベース)を作成する。

4. 研究成果

(1) 大気安定度が都市域内での汚染物質濃度に及ぼす影響の一般化

① 観測結果に基づく検討

東京23区内には25ヶ所の一般環境大気測定局があり、常時大気汚染濃度の観測が行われている2006年から2010年まで5年間の窒素酸化物NO_xの1時間平均濃度のデータを使用して、大気安定度が都市域内の大気汚染物質濃度に及ぼす影響を調査した。

1) 観測データの分析手順

- ・ステップ1: 現行の大気汚染の環境アセスメントに倣い、毎正時の大気安定度をPasquill安定度階級分類表に基づき分類する。
- ・ステップ2: 各観測点での毎正時NO_x濃度を次式により無次元濃度に換算する。

$$C^* = CUH^2/q \quad (1)$$

ここで、 C^* は無次元濃度、 C は NO_x 濃度の観測値[ppb]、 U は風速[m/s]、 H は代表高さ[m]、 q は NO_x の排出速度[ppb・m³/s]であるが、 H^2 と q は以下のステップでの仮定と手続きにより消去されるため、このステップでは CU [ppb・m/s]のみを計算している。

・ステップ3: 各測定点での C^* を曜日ごと、時刻(1時間刻み)ごとに分類する。曜日と時刻が同じなら NO_x 排出速度 q が同じであると仮定する。

・ステップ4: ステップ3で分類した各測定点の C^* を、さらに風向ごとに分類する。

・ステップ5: 各測定点で、曜日、時刻、風向ごとに中立状態時の無次元濃度 $C^*_{n,ave}$ を選択し、その5年平均値を求める。これを $C^*_{n,ave}$ とする。

・ステップ6: 各測定点で、曜日、時刻、風向ごとに全ての C^* を $C^*_{n,ave}$ で除す。これがStability Effect Ratio (SER)である。

すなわち、

$$SER = C^*/C^*_{n,ave} \quad (2)$$

曜日と時刻が同じならば排出速度 q は同じと仮定しているため、(2)式により分子の C^* と分母の $C^*_{n,ave}$ の中に存在する排出速度 q は同じであり消去される。このように q が全く不明でもSERを求めることができる。

2) 観測データの分析結果

図1にPasquill大気安定度階級の発生頻度を示す。中立のDが60%近くを占めており、SERにはそれほど高い精度がなくても年平均濃度には大きな影響はないと考えられる。

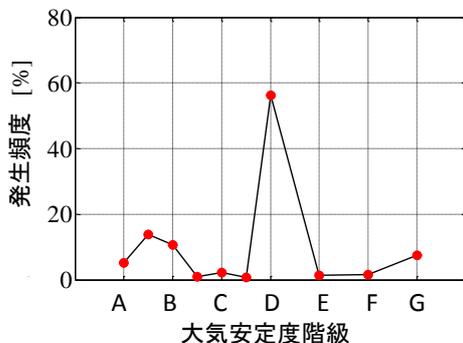


図1 大気安定度階級の発生頻度

図2には25ヶ所の全観測点、全風向のデータを用いて求めたSERと大気安定度階級の関係を示す。図中のマークは平均値でエラーバーは標準偏差である。また図中の数字はデータ数である。気象条件や排出速度の不確かさに伴うばらつきが非常に大きいものの、大気安定度が高いほどSERが大きくなっていく傾向は見られる。この傾向は全ての観測点に共通するものである。観測点25ヶ所の周辺状況は様々であり、周辺建物に対する風向角も様々である。それにもかかわらず全ての測定点で共通した傾向が見られるということは、SERが周辺状況や風向角に依存しない可能性があることを示唆している。

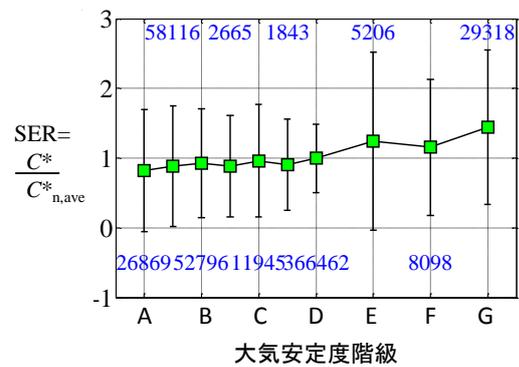


図2 SERと大気安定度の関係

② 風洞実験およびCFD解析に基づく検討

観測データの分析によるSERの調査では不確かさが非常に大きかったため、不確かさの小さい風洞実験およびCFD解析でもSERを調査することとした。

1) 風洞実験概要

実験には東京工芸大学の温度成層風洞を使用した。床面温度、気流温度、風速を変え、バルクリチャードソン数 Rb を変化させることで、計5ケースの大気安定度が異なる実験気流を作成した。

風洞内に都市街区モデルとして一辺60mmのアルミ製立方体ブロックを9行×14列の幅60mmの等間隔で配置した(図3, 図4)。トレーサーガス排出用の線源を模型群中心(風上から7列目と8列目の間)の道路中央床面に設置し、エチレンを排出した。都市街区モデル内の濃度の測定には高速炭化水素測定機を用いた。測定点はストリートキャニオン内の上昇流や下降流が生じる場所や道路上等、様々な流れが含まれるように設定した。濃度測定時間は測定点1点あたり2分間とし、2分間の時間平均濃度を評価対象とした。

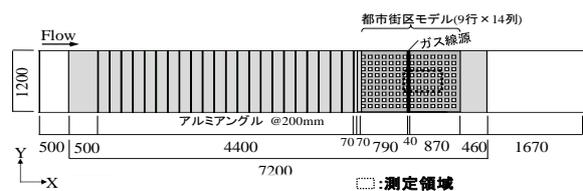


図3 風洞実験概要

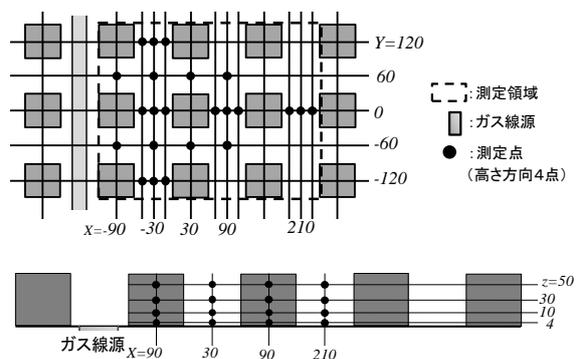


図4 都市街区モデルの測定点 (上: 平面、下: 断面)

3) 実験結果と計算結果

図5に中立時の無次元濃度 C^* と非中立時の無次元濃度 C^* との相関を示す。図中の1つのプロットは1つの測定点に対応している。左側に示した実験結果と右側に示した CFD 解析結果は同様な傾向を示している。すなわち、どの安定度の条件でもデータはほぼ一直線上に分布しており、中立時と非中立時の無次元濃度の比は測定点に依らず、ほぼ一定であることがわかる。また、不安定条件では、近似直線の勾配が 45 度以下となっており、中立時に比べて無次元濃度が低くなっている。安定度が高くなるにつれ、この勾配は急になっていき、安定条件では中立時に比べて無次元濃度が高くなっている。

中立時と非中立時の無次元濃度の比が測定点に依らずほぼ一定となる理由は、都市街区内の実質的な換気量(Purging Flow Rate)が、建物高さ付近での平均風速に支配されているからではないかと思われる。不安定の場合はアプローチフローの下層部の風速が高くなり Purging Flow rate が増加し濃度が低下すると考えられる。安定の場合はその逆である。

図6には中立時を基準とした濃度比(非中立時の無次元濃度/中立時の無次元濃度: C^*/C^*_n) すなわち SER とバルクリチャードソン数 R_b との関係を示す。図にはこの濃度比の全測定点平均値と $\pm 1\sigma$ (標準偏差)の範囲を表示している。データのばらつき(標準偏差)は平均値に対して比較的小さい。この曲線が汚染物質濃度に対する大気安定度の影響を表す関数である。さらに異なる流れ場・拡散場に対しても、この関数の普遍性が確認できれば、大気汚染の環境アセスメントに応用することが可能となると考えられる。

(2) 都市域での拡散風洞実験および CFD 解析の精度検証

① 屋外拡散実測と風洞実験の概要

東京工芸大学厚木キャンパス(図7)を対象として、屋外拡散実測、風洞実験(図8)、Large Eddy Simulation (LES) による CFD 解析を実施した。図7にはトレーサガス排出地点、建物屋上の基準風速の測定点、ガス濃度の測定点が表示されている。

② 屋外拡散実測と風洞実験結果

図9に屋外拡散実測と風洞実験結果を示す。実測結果、風洞実験結果ともに複数回実施して得られた無次元濃度 C^* の平均値と標準偏差を示している。屋外拡散実測結果と風洞実験結果はよく一致している。一番差がある測定点でも屋外拡散実測結果の濃度の標準偏差内に収まっている。紙面の都合上省略するが、LES による CFD 解析結果も屋外実測結果と風洞実験結果とよく合っていた。

また風洞実験では、汚染物質の排出量や基準風速を変えても無次元濃度は変化しないことが明らかとなり、相似則を確認することもできた。

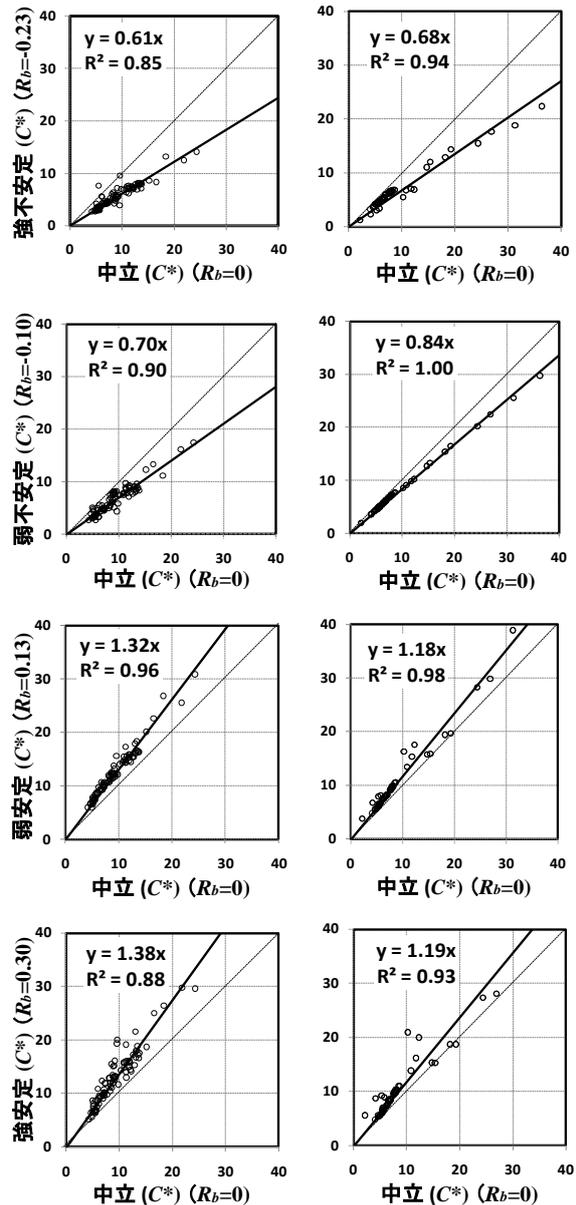


図5 中立時と非中立時の無次元濃度の相関 (左: 実験、 右: CFD)

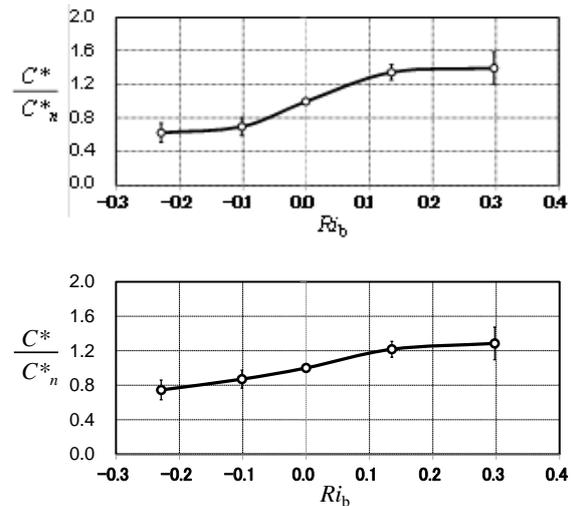


図6 大気安定度と SER との関係 (上: 実験、 下: CFD 解析)



図7 屋外拡散実測概要

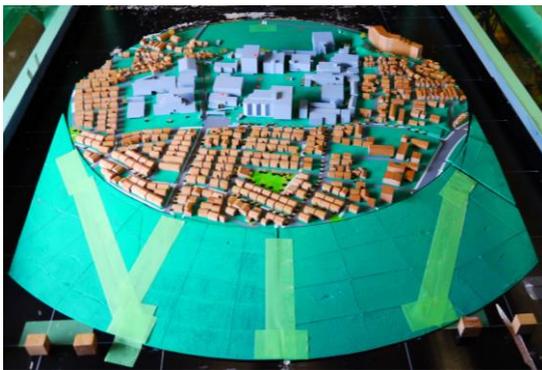


図8 風洞実験模型

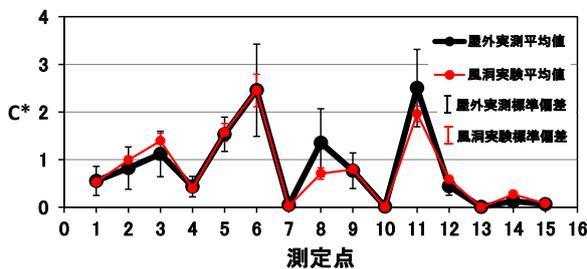


図9 屋外拡散実測結果と風洞実験結果

(3) 濃度の自動計測システムの開発

コンピュータに事前入力した測定点座標に濃度計のサンプリングチューブを移動させ自動測定を行うシステムを開発した。例えば1点当たりの計測時間を移動時間も含めて2分とすれば、夜間12時間の間に360点の濃度を無人自動計測ができるようになった。

(4) 領域気象モデルによる標準上空風データの整備

① 各種計算条件がWRFの計算結果に及ぼす影響

領域気象モデルWRF(Weather Research and Forecasting)の各種物理モデル、計算領域、ナッジング等の計算条件が、計算結果に及ぼす影響をドップラーライダーによる観測結果と比較しながら適切な計算条件を見出した。

まず各種物理モデルのうち、風に対する影響が大きいと考えられる、雲物理過程、短波放射過程、大気境界層過程、地表面過程を

化させた計算を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・物理モデルが上空の風向の計算結果に及ぼす影響は小さく、どのモデルを用いても観測結果とかなりよく一致する。

- ・WRFの計算結果は上空の風速のピークを観測結果より大きめに評価するが、地表面過程にNoah Land Surface Modelを用いることで、このピークが抑えられ観測結果との対応が向上する。

上記の例として、図10に風向・風速の時刻歴波形、図11に風速の超過確率を示す。

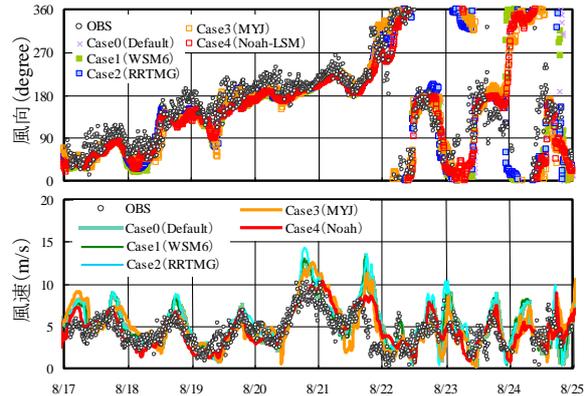


図10 風向・風速の時刻歴変化 (高度285m)

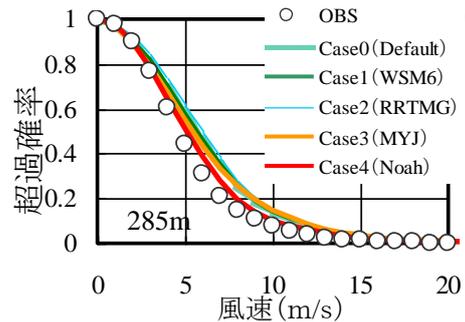


図11 10分間平均風速の超過確率(高度285m)

次に計算領域の大きさとナッジング(モデルの予報値と観測データあるいは客観解析データとの差を補正する手法)が計算結果に及ぼす影響を調査するために、計算領域を関東地方の大きさとした場合(領域小)、その周囲に日本列島全体を含む領域を加えた場合(領域大)、加えた領域にナッジングをかけた場合の計算を行った。

その結果、計算領域を大きくすると上空の風向・風速ともに観測結果と対応が相当悪くなるが、ナッジングをかけることで観測結果に近づくことが明らかとなった。これは、ナッジングに用いた客観解析データが上空の風速・温度を良い精度で再現できているためである。

② 関東地方標準上空風データベースの整備

観測値との対応が良かった計算条件を用いて、過去7年間の計算を実施した。その計算結果を用いて、緯度と経度を指定すれば、その地点上空の風配やワイブル係数を算出し、表示するシステムを作成した。

(5) 大気汚染の環境影響評価手法の変革案

以上の研究成果に基づき大気汚染の環境影響評価手法の変革案を以下のように提案する。

① 風洞実験または CFD 解析による濃度予測
ブルームモデルによる都市街区内大気汚染濃度の予測値が環境基準を十分下回らない場合には、風洞実験または CFD 解析による濃度予測を義務づける。検討ケースは 16 風向、大気安定度は中立状態のみとし、SER を乗じて非中立状態の濃度を求める。なお、図 1 に示した通り、中立大気状態の頻度が大半であるため、そもそも大気安定度を考慮しなくてもよい可能性もある。無次元濃度は風速（レイノルズ数）に依存しないため、風速を変えて実験を行う必要はない。ここで懸念されるのは風洞実験のためのコストと労力であるが、風洞実験の場合、風環境予測のための風洞実験模型があるわけだから模型製作の追加コストはかからない。また 1 点あたり 2 分で測定すると仮定すると、100 点、16 風向の測定が $2 \text{分} \times 100 \times 16 = 3200 \text{分} = 53 \text{時間} = 2.2 \text{日}$ 、濃度計の較正を含めても 3 日以内に実験を終了することができる。較正が終わった後は自動計測で放置しておけばよいので労力もかからない。

CFD 解析の場合は、風環境評価のために 16 風向の CFD 解析が既に行われるようになっていたり、濃度輸送方程式の連成に伴う計算時間の増加はわずかであることから、コストや労力の面で大きな問題はない。

② 標準上空風データベースと標準大気安定度データベースによる年平均濃度の算出
本研究で作成した標準上空風データベース、さらには WRF の解析結果に基づく風向・風速別のバルクリチャードソン数の発生頻度を求め、標準大気安定度データベースを整備すれば年平均濃度の確率的予測が可能になる。このバルクリチャードソン数は図 6 のような関数によって SER を求めることに使用される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 33 件)

- ① 宮里 龍太郎、義江 龍一郎、三浦 翔、東海林 諭、領域気象モデル WRF にもとづく風環境評価のための標準上空風データ整備、第 23 回風工学シンポジウム論文集、査読有、Vol.23、2014、61-66、https://www.jstage.jst.go.jp/article/kazekosy/23/0/23_61/pdf
- ② 田辺 剛志、義江 龍一郎、都市街区内の大気汚染物質拡散に安定度が与える影響の一般化、第 23 回風工学シンポジウム論文集、査読有、Vol.23、2014、25-30、https://www.jstage.jst.go.jp/article/kazekosy/23/0/23_25/pdf

- ③ 立花卓巳、田辺 剛志、義江 龍一郎、中山悟、並木慎一、宮下 康一、都市域における屋外実測と風洞実験による汚染物質拡散予測について、第 23 回風工学シンポジウム論文集、査読有、Vol.23、2014、31-36、https://www.jstage.jst.go.jp/article/kazekosy/23/0/23_31/pdf
- ④ Tingting Hu、Ryuichiro Yoshie、Indices to evaluate ventilation efficiency in newly-built urban area at pedestrian level、Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics、査読有、Vol.112、2013、39-51、Doi:10.1016/j.jweia.2012.11.002
- ⑤ Tingting Hu、義江龍一郎、大気安定度が都市街区内の NOx 濃度に及ぼす影響の分析とその一般化、第 22 回風工学シンポジウム論文集、査読有、2012、55-60、https://www.jstage.jst.go.jp/article/kazekosy/22/0/22_55/pdf

〔学会発表〕(計 36 件)

- ① Ryuichiro Yoshie、Sho Miura、Ryutaro Miyazato、Preparation of standard wind data for assessment of pedestrian wind environment using WRF、The 6th International Symposium on Computational Wind Engineering、ハンブルグ(ドイツ)、2014/6
- ② Ryuichiro Yoshie、Tingting Hu、Effect of Atmospheric Stability on Urban Pollutant Concentration、The Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering、チェンナイ(インド)、2013/12
- ③ Ryuichiro Yoshie、Masanori Mochizuki、Regeneration of Occurrence frequencies and vertical profiles of wind velocity by WRF calculation、The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications、上海(中国)、2012/9

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.collaborate.wind.t-kougei.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

義江 龍一郎 (YOSHIE, Ryuichiro)

東京工芸大学・工学部・教授

研究者番号：6 0 3 8 6 9 0 1

(2)研究分担者

白澤 多一 (SHIRASAWA, Taichi)

大妻女子大学・社会情報学部・講師

研究者番号：4 0 4 2 3 4 2 0