分散型エネルギーシステムの導入による地域の熱・大気環境への影響に
関する研究EFFECTS OF INTRODUCING DISTRIBUTED ENERGY SYSTEM ON THE LOCAL THERMAL
AND ATMOSPHERE ENVIRONMENT

高 偉 俊*, 李 海 峰**, 尾 島 俊 雄***

Weijun GAO, Haifeng LI and Toshio OJIMA

The intensification of the global environmental problems is raised as one of the subject that the mankind have now in the 21st century. The global warming by the discharge of carbon dioxide and energy use, as an urgent subject, has resulted in a global interest as been seen in the World Environment Kyoto Conference etc, that was held in December, 1997. On this kind of background, the distributed combined heat and power generation has been expected to improve the energy and environment problem. Combined heat and power generation allows to reach efficiencies which can be as high as 85-90% for both products and result in substantial energy and CO₂ savings.

There is yet little research that is how much the influence to the contamination, heat, wind environment become, although the research are carried out numerously with regard to such an economic and efficiency face with introducing combined heat and power generation system conventionally. This study is to evaluate the influence to the environment by the introduction of combined heat and power generation system by the simulation of the heat and atmosphere environment. A case study has been made in the Kokura area of Kitakyushu-shi.

Keywords: *Distributed Energy System, District, Environment*

分散型エネルギーシステム・地域・大気環境

1. はじめに

21世紀を向かえる今、人類の抱える課題の一つとして地球環境問題の深刻化が挙げられる。その中でも、特にエネルギー問題、二酸化炭素の排出による地球温暖化が、緊急の課題として1997年12月に開催された世界環境京都会議等に見られる様に世界的な関心を集めている。

日本では1987年以降のエネルギー消費量の増加による二酸化炭素排出量の増加、その中で住宅・ビル等で消費される民生用エネルギーのシェアの増加が問題になっており、住宅・ビルの省エネルギー化、高効率化を強力に推し進めていく必要がある。

このような背景のもと、今日、様々な場所で、工場排熱やごみ発熱の利用と合わせて、分散型エネルギーシステム（コージェネレーションシステムや地域冷暖房）の導入が検討されている^{1, 2)}。従来の集中化した電力供給システムに代わる小規模分散型発電システムとしての役割と、エネルギーのカスケード利用による高度な省エネルギー性能に期待が高まっている。しかし分散型地域エネルギーシステムでは、温熱・冷熱及び電力を一カ所で製造、供給するため、排気・排熱が局所的に集中し、その周囲の環境に影響を与えることが考えられる。従来、地域エネルギーシステムを導入するための経済面及び効率面等については数多くの研究が行われている^{3, 4)}が、

大気汚染、熱、風等の環境への影響を総合的に評価する研究が未だ少ない。

そこで本研究では、分散型エネルギーシステム導入のケーススタディとして北九州市の小倉地区を例にし、分散型エネルギーシステムの導入による環境への影響をコンピューターによる熱及び大気環境のシミュレーションにより総合的に評価することを目的とする。

2. 評価するための土地建物利用に関する調査

2.1 対象地区の設定

ケーススタディーのエリアを図1に示す。小倉駅を拠点とした約2.5km×2.5kmの面積にあたる。分散型エネルギーシステム導入に伴う熱・大気環境評価をするため、北九州市小倉駅を中心にした10km圏を計算領域とする（図1）。また、土地利用のメッシュの大きさは250m×250mにした。

2.2 土地建物利用のメッシュ構成及びデータベースの作成

図2に示すようにGISデータを用いて、メッシュごとの土地利用を構成する。土地利用及び人工排熱などは図3に示したように計算した。

土地利用のレイヤ属性は、熱環境シミュレーションに必要な水域、緑地、道路、裸地、建物と5つに分けられる。人工排熱のレイヤ属

* 北九州市立大学 助教授, 早稲田大学 客員助教授・工博

** 早稲田大学理工学部建築学科 助手・博士(工学)

*** 早稲田大学理工学部建築学科 教授・工博

Assoc. Prof., The University of Kitakyushu and Waseda University, Dr. Eng.
Research Assoc., Dept. of Architecture, Waseda University, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Waseda University, Dr. Eng.

図2 地理情報データベース図

図4 データベースのレイヤ属性の構成

図3 計算データベースの構築

性的設定においては、尾島研究室が作成した「建築の光熱水原単位(東京版)」の施設分類(図4)に従って、8つに大分類している⁵⁾。エネルギー原単位は九州地区の原単位を用いた⁶⁾。

北九州市小倉地区周辺 10km の土地利用の比率を見ると、水域面積(海を含む)は38%で、緑地面積は10%である。それから道路は9%、宅地は22%、工業用地は14%になっている。空地(7%)を含むと、約50%強の地表面は人工物に覆われている。

対象となる10km圏内では(図1)、水域は上の半分近く占めている。図面の右下、左下にはまとまった緑地が存在している。また、10km圏内の左側の上には工業用地が集中している。

3. 熱・大気環境評価モデルおよび諸設定

3.1 熱・大気環境評価理論概要

都市の熱環境評価手法は現在数多く提案されている⁷⁾が、本研究で
使用したモデルは、筆者ら⁸⁻¹³⁾が1994年に開発した都市キャノピー
モデルであり、流体運動方程式である Navier-Stokes 方程式を渦度法に
より近似し作成した。計算モデルはエネルギー式、運動量式、連続式(付
録1に参照)を都市大気に適用できるように展開し、差分方程式で近
似し数値計算を行うものである。ヒートアイランド現象に適用できるよ
うに、3次元空間を前提として一般流の成分と変位成分を分離している。
モデルでは、主に地表面から排出された熱が大気中でどのように拡散さ
れていくかを考察し、巨視的な自然対流による大気の運動を加味し、熱
拡散構造計算を行う。

また、大気環境の評価は、都市ガスを使用した地域冷暖房を導入する
場合に最も大気への影響が大きいと思われる NOx についてのみ行うこ
とにした。そのため NOx 濃度の輸送式を上記のモデルに組み込み、NOx
の拡散を計算した。熱環境シミュレーションモデルの計算式等は付録1
に示す。

3.2 環境評価シミュレーションの諸設定

計算ケースの設定

今回、分散型エネルギーシステムを評価するに当たって、コージェネ
レーションや地域冷暖房の導入による変化及びプラントの配置による
影響を考察するために、以下の3つのモデルケースを作成し、それぞれ

表1 商用電力及びガスの CO₂、NO_x、SO_x 排出原単位¹⁴⁾

	CO ₂ (kg/kWh) (kg/Nm ³)	NO _x (kg/kWh) (kg/Nm ³)	SO _x (kg/kWh) (kg/Nm ³)
商用電力	0.447	0.31	0.258
ガス(13A)	2.371	0.809(40ppm) 1.012(50ppm)	0.012

を比較することによって評価を行うこととした(図5)。

・Case 1：現状型

コージェネレーションや地域冷暖房は未導入。冷暖房を含むすべての
熱源は個々に供給するケース。

・Case 2：分散型1

コージェネレーションや地域冷暖房を導入。プラントはユーザサイド
に近く配置し、需要エリアに供給するケース。

・Case 3：分散型2

コージェネレーションや地域冷暖房を導入。プラントはユーザサイド
と離れた場所に配置し、需要エリアに供給するケース。

人工排熱の計算

Case1(現状型)における人工排熱は、個別の建物についてそれぞれ
冷暖房及び電力の使用によるエネルギーがすべて熱として排出される
とし、延べ床面積データ及び原単位から算出したエネルギー量をそのま
ま使用した。また、熱・大気環境評価モデルでは、人工排熱の顕熱のみ
評価するもので、現状型ケースの湿式クーリングタワー等からの潜熱は
考慮していない。

Case2(分散型1)及びCase3(分散型2)

の需要エリアにおける人工排熱の計算では、冷暖
房エネルギーが地域冷暖房プラントにより供給さ
れ、その排熱がプラントから排出されるため、需
要エリアとしては照明、機器等電力による排熱だ
けとなる(図6参照)。従って需要エリアの人工排
熱を推定するとき、エネルギー原単位から計算さ
れた総エネルギーの消費量の中に冷暖房用エネル
ギー(図6のQ)をひいた部分を需要エリアの人工
排熱とした。また、需要エリアに冷房している
建物は実質上に周辺の熱(図6のQ1)を吸収し
ているので、その冷却効果を配慮して、マイナス

図5 計算ケースの設定

図6 人工排熱の計算

の人工排熱として計上する。地冷プラントの人工排熱に関しては、まず供給先の建物の負荷を累積し、コージェネレーションシステムの容量を決め、その容量から人工排熱を算出した。

大気汚染の計算

環境に対する効果は、排出原単位¹⁴⁾を用いて、計算を行う。電力及び都市ガスの排出原単位は表1のように設定した。都市ガスのNOx排出原単位は、理論乾き燃焼ガス量や成分気体の体積分率から求めた計算値である。NOx排出原単位は、ガスボイラは50ppm、ガスタービン、ガスエンジンは40ppmで排出された場合の数値を用いた。

また、各計算ケースとも、その環境影響を評価するため、建物の冷暖房用ガスによるNOx排出を地域に放出すると仮定し、計算を行った。環境シミュレーションの仮定

シミュレーションの対象となる時間帯は、冷房による負荷が最も大きくなる、夏期の13時に設定した。熱環境シミュレーションの初期条件は、気温30.5℃、建築物、道路、裸地ともに47.5℃、緑地29.5℃、水域26.4℃に設定した。

境界条件は周期条件とし、同一条件の平面がXY方向に無限に存在すると仮定した。即ち10km圏の対象エリアは連続存在することである。風速の設定は、大気汚染等を計算するとき最も厳しい条件である無風状態とした。大気環境については、二成分を仮定した。即ちNOx成分と空気成分だけとした。従って付録に示すようにNOxの濃度輸送式からNOxの濃度を予測できる。初期NOx濃度は0.04ppmとした。

4. 熱・大気環境の評価

4.1 人工排熱

図7Aは地域ケース別のメッシュ面積あたりの人工排熱密度を示す。地冷プラントが存在しないCase1では、人工排熱は最大で約465W/m² (400kcal/m² h) となった。そのメッシュの中に商業施設の百貨店があり、約200,000 m²の延べ床面積に達しているため、大きな人工排熱が発生している。

地域配管熱ロスを省略しているため、Case2とCase3では、地冷プラントの配置が違うが、プラントからの人工排熱の大きさが同じく、最大でメッシュ面積あたり3,038W/m² (2,612kcal/m² h) になっている。また、地域冷暖房システムにより、需要エリアに冷熱を供給するため、需要側周辺の対気に対しては、建物自体は冷源になっているので、そのエリアのメッシュからはマイナスな人工排熱が生ずる。その値は最大約-209W/m² (-180 kcal/m² h) にも達している。

4.2 熱・風環境の評価

図7Bはケース別における地域全体及び需要エリア(対象地区)の気温と風の分布を示している。表2は、地域全体、需要エリアの最高、最低と平均気温をまとめたものである。

CASE1では、需要エリアは業務、商業の集積地のため、かなり高い気温を示している。地域全体の最高気温は約34℃、平均気温は約32℃である。また、需要エリアでは、他のケースと比べ、最高気温が最も低いものの、平均気温は他のケースより0.1-0.7℃高くなっている。CASE2とCASE3では、地域プラントがあるため、地域全体の最高気温は34.5℃を超えるが、地域全体平均気温はCASE1に比べ、ほんのわずかに低くなる。需要エリアの最低気温は、特にCASE3では、プラントが需要エリアからはなれたため、CASE1より約0.5℃低い。

表3 地域全体、需要エリアの最高、最低と平均NOx濃度

		地域全体		需要エリア	
NOx濃度(ppm)					
CASE1		CASE1との差		CASE1との差	
最高	0.27			0.24	
最低	0.04			0.05	
平均	0.07			0.12	
CASE2					
最高	0.17	-0.10		0.17	-0.07
最低	0.04	0.00		0.04	-0.01
平均	0.06	-0.01		0.08	-0.05
CASE3					
最高	0.18	-0.08		0.09	-0.15
最低	0.04	0.00		0.04	-0.01
平均	0.06	-0.01		0.05	-0.08

表2 地域全体、需要エリアの最高、最低と平均気温

		地域全体		需要エリア	
		気温(℃)			
CASE1		CASE1との差		CASE1との差	
最高	33.95			33.77	
最低	30.85			31.50	
平均	32.08			32.94	
CASE2					
最高	34.56	0.61		34.56	0.79
最低	30.85	0.01		31.29	-0.21
平均	32.02	-0.06		32.84	-0.10
CASE3					
最高	34.78	0.83		32.94	-0.82
最低	30.86	0.01		31.08	-0.42
平均	32.00	-0.08		32.20	-0.74

また、断面図を考察すると、CASE1、CASE2では需要エリアにヒートアイランドが形成され、上昇流が見られる。CASE3では、クールアイランドになり、気流が吸い込まれるようになっている。

CASE2は平均気温から見ると、CASE1に比べて僅かながら、気温の緩和効果があるが、需要エリアの熱環境改善のため、最もよいのはCASE3であることがわかる。

4.3 大気環境の評価

図7Cはケース別における地域全体及び需要エリア(対象地区)のNOx濃度の平面分布、表3では、地域全体、需要エリアの最高、最低と平均NOx濃度をまとめたものである。今回の大気汚染の計算では、分散エネルギーシステムの導入による大気環境への影響を考察するため、自動車排気ガス等の影響による大気汚染の変化を一定と仮定し、初期条件としてそれらを配慮して0.04ppmを与えた。

CASE1では、個別建物のガスエネルギー消費による大気汚染によるものである。地域全体の最高NOx濃度は約0.18ppm、平均NOx濃度は約0.05ppmである。最高濃度はほぼ他のケースと同じである。平均濃度は他の2ケースより0.01ppm低くなっている。また、需要エリアでは、CASE3と比べ、最高、最低NOx濃度がいずれも高い。

上記の計算結果は対象地区におけるNOx濃度のみを検討したため、CASE1の個別建物の電力消費に伴う発電所でのNOx排出は考慮していない。このため、発電所を含めた都市全体の大気環境を考えたとき、CASE1の場合は必ずしもNOx排出量の削減につながるとは限らない。そこで、CASE1-2として、現状エネルギーシステムで供給した場合の発電所からのNOx排出量が対象地区で排出されたと仮定し、CASE2及びCASE3との比較検討を行った。

計算の結果として、CASE1-2では、地域全体の最高NOx濃度は約0.27ppmまで上昇し、平均NOx濃度も約0.07ppmとなった。また、

図7 ケース別地区全体の熱・風環境・NOx濃度分布

需要エリアでは、他のケースと比べ、最高、最低、平均 NOx 濃度がいずれも高い。最高 NOx 濃度は他のケースより 0.07-0.15ppm 高くなっている。平均 NOx 濃度は他のケースより 0.04-0.07ppm 高くなっている。環境基準では NOx の日平均値が 0.04-0.06ppm になっているが、CASE1-2 を除けば、ほぼ基準以下に収まると考えられる。地球環境の保全や自己完結した都市環境づくりを考える場合、分散型エネルギーシステムの導入は大気環境面にも効果的であるといえる。

5. まとめ

本研究では、北九州市の小倉地区を対象とし、分散型エネルギーシステムを導入した場合、地域の熱・風・大気環境評価を行った。その結果として、以下のことが明らかになった。

- ・局所的な視点で見ると、地域冷暖房プラント周辺の最高気温は高くなっている。全体的な熱環境の視点から見ると、分散型エネルギーシステムはヒートアイランドの緩和に貢献している。現状と比較して、最大で約 0.7℃の気温緩和効果のあることがわかった。

- ・分散型エネルギーシステムを導入した場合、地域の NOx 濃度は平均的に高くなる傾向があるが、地球環境の保全や自己完結した都市環境づくりを考えた場合、分散型エネルギーシステムの導入は大気環境面にも効果的である。設定した現状型ケース (CASE1-2) と比較して、NOx の濃度は平均最大で約 0.07ppm まで低減ができる。

- ・また CASE2、CASE 3 に対する分析で、分散型エネルギーシステムを導入する場合、プラントの配置を十分に検討する必要があることを示唆している。緑地計画等と合わせて総合的な検討が必要であるといえる。

謝辞

本研究実施に関して、北九州市の深堀氏及び電源開発の吉田氏、湯屋氏から多大のご協力・ご指導を頂いた。なお本研究の一部は NEDO 産業技術研究事業費助成及び北九州市立大学国際環境工学部特別研究費助成を受けて実施したものである。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 環境省、平成 12 年環境白書、3 章、地球化時代の環境問題、2 節エネルギーと環境
- 2) European Commission Directorate-General XVII (Energy) Cogeneration, District Heating and Cooling in the EU ENERGY POLICY, pp 9-11 Amhem, The Netherlands (1997)
- 3) 下田吉之、「環境保全型地熱供給システムの総合評価手法に関する研究(1~2 報)」『空気調和・衛生工学会論文集』70 号 pp 59-71(1998)、74 号、pp 113-120(1999)
- 4) 佐土原聡、柴田理、市川徹、尾島俊雄、東京都区部におけるコージェネレーション導入地域選定に関する研究、日本建築学会計画系論文集、NO.468、pp47-54、1995
- 5) 尾島俊雄研究室、「建築の光熱水原単位」、早稲田大学出版部 (1995)
- 6) 依田浩敏、北山広樹、片山忠久、西田勝、行政数値データを活用した福岡市の民生用熱需要量の推定と熱負荷密度図の作成、日本建築学会計画系論文集、NO.536 pp.101 (2000)
- 7) 日本建築学会地球環境委員会都市環境動態小委員会、都市と熱環境 WG、都市熱環境の実態・予測・評価に関する研究成果集 (1999)
- 8) 菊池健二、三浦昌生、高俣俊、尾島俊雄、都市形態の変化に伴うクールアイランド・都市風の形成に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.461-462 (1994)
- 9) 谷吉智、市川健、西濱謙、浅川賢司、高俣俊、尾島俊雄、緑地と都市形態の熱的効果に関する理論研究、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.109-113(1995)
- 10) 渋谷玲、李海峰、高俣俊、尾島俊雄、西新宿地域冷暖房の大気熱環境シミュレーション研究、日本建築学会関東支部研究報告集、pp. 309-313 (1998)
- 11) 李海峰、高俣俊、吉田公夫、湯屋博史、尾島俊雄、地理情報を用いた地域の熱環境評価システムに関する研究、日本建築学会計画系論文集、第 518 号、pp.67-73 (1999)
- 12) 李海峰、高俣俊、尾島俊雄、土地利用図を用いた都市の熱環境評価手法に関する研究——巨大都市の 50km 圏におけるケーススタディー——日本建築学会計画系論文集、第 530 号、pp.73-78(2000)
- 13) 李海峰、高俣俊、吉田公夫、湯屋博史、尾島俊雄、東京都区部の地域における大気環境の影響要因に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第 537 号、pp.85-91 (2000)
- 14) 社団法人空気調和・衛生工学会、都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計、pp 236、丸善 (1994)

付録 1 熱環境シミュレーションモデルの計算式

基本方程式

■エネルギー方程式

$$\frac{DT}{dt} = D_{Tj} \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{Q}{C_p \rho}$$

■連続方程式

$$\frac{DU_i}{dx_i} = 0$$

■運動方程式

$$\rho \frac{DU_i}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho D_j \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \rho g_i$$

■濃度輸送方程式

$$\frac{DC}{dt} = D_{Cj} \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial C}{\partial x_j} + \frac{Qc}{\rho_c}$$

ここに、

T : 温度(℃)

U_i (U, V, W) : X, Y, Z 方向の平均風速(m/s)

D_j (D X, D Y, D Z) : X, Y, Z 方向の拡散係数(m²/s)

Q : 発生熱量(W)

P : 圧力(kg/m²)

ρ : 空気密度(kg/m³)

C_p : 空気の比熱(J/kg℃)

g_i : 空気の重力 (kg/m³)

C : 成分(NOx, SOx, COx)の濃度(kg/m³)

D_{c_i} : X, Y, Z 方向の成分(NOx, SOx, COx)の拡散係数(m²/s)

Q_c : 成分(NOx, SOx, COx)の発生量(kg/m³s)

地表面の熱平衡式

$$Q_s = Q_{cv} + Q_{rd} + Q_{vp} + Q_{cd}$$

ここに、

Q_s : 太陽輻射による熱量(W)

Q_{cv} : 対流による熱伝達量(W)

Q_{rd} : 長波輻射による熱量(W)

Q_{vp} : 蒸発による熱量(W)

Q_{cd} : 地中への熱伝導熱量(W)

本研究では、以下の仮説を用いた。

- 1). 空気は連続、均一で、空気密度や比熱は常数である。
- 2). エネルギーや運動量の拡散は等しい。
- 3). 建物の熱容量が考慮しない。
- 4). 気流は下式のように二つの成分に分けることができる。即ち、一般流 (general current) 及び自然対流による乱流 (変位) (natural current) である。

$$U_i = \bar{U}_i + u_i \quad P = \bar{P} + p$$

- 5). 気流の渦度は下式のように定義する。

$$\omega_i = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i}$$

- 6). 自然対流による乱流 (変位) (a, b) は一般流(A, B)より小さい。以下の仮定が成立する。

$$AB = (\bar{A} + a)(\bar{B} + b) = \bar{A}\bar{B} + \bar{A}b + \bar{A}a + ab \approx \bar{A}\bar{B} + \bar{A}b + \bar{A}a$$

境界条件は、x、y 方向は周期連続と仮定した。Z 方向では、上部の境界は気象条件と同じ条件で、乱流はゼロと仮定した。

都市境界層内の風速の垂直分布はべき法則によって与えられる。高度 Z_g(m) の風速が U_g(m/s) であるとき、高度 Z(m) における平均風速 V(m/s) は次式で与えられる。

$$U = U_g \left(\frac{Z}{Z_g} \right)^a$$

ここで、a は地表面の粗さによって異なるべき指数で、都市においてはおよそ 0.33~0.45 の範囲である。一方、風速の垂直分布を表す対数法則は、高度 Z(m) における平均風速 V(m/s) を次のように与える。

$$U = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right)$$

ここで、k(=0.41) はカルマン定数、Z₀ は地表面の粗さを示す地表面粗度、u_{*}(m/s) は摩擦速度である。その定義は、

$$u_*^2 = \frac{\tau}{\rho} = D \frac{dU}{dz}$$

であり、τ は摩擦応力、ρ(kg/m³) は空気の密度である。D(m²/s) は拡散係数であり、対数法則のもとでは

$$D = k^2 Z^2 \left| \frac{dU}{dz} \right| = k u_*^2 z$$

となり、D が Z に比例することを示す。以上の式を用いると、風速及び拡散係数の垂直方向の分布を求めることができる。

(2001年5月10日原稿受理、2002年2月1日採用決定)