

第

章

# 3

都市建物まわりの熱と  
大気汚染の予測

粕江研究所大気科学部 主任研究員 神崎 隆男

3 - 1	都市環境に作用する複合要因	39
3 - 2	都市域の大気拡散研究	39
3 - 3	風洞実験による熱と物質移動の把握	39
3 - 4	数値モデルによる熱移動と大気拡散の予測	42
3 - 5	まとめ	45



神崎 隆男（1992年入所）  
 都市環境を対象として、大気乱流中の熱や汚染物質の輸送現象に関する研究を行ってきた。現在は、大気拡散におよぼす化学反応の影響に関する研究に取り組んでいる。

コラム2	冷却塔は都市気象、気候を変えるか？	46
コラム3	暑い都市の環境改善技術を提案	47
コラム4	可視化でよくわかる空気の流れ	48
コラム5	大気中での混合反応を捉える	49



水鳥 雅文（1980年入所）  
 我孫子研究所環境科学部 上席研究員  
 これまでは、主に火力、原子力発電所の冷却水取放水に係る海域環境問題について研究してきた。最近は、省エネ、負荷平準化といったエネルギー消費との関連から見た都市熱環境問題の予測と対策について研究を行っている。



田村 英寿（1993年入所）  
 我孫子研究所環境科学部 主任研究員  
 東京23区等の大都市域を対象に、数値シミュレーションによる熱環境の実態把握や熱環境改善策の効果予測に携わってきた。現在は、都市中心部の街区スケールを対象に、建物・緑地の配置やエネルギーシステムの導入にともなう屋外熱環境や建物空調負荷の改善効果予測に取り組んでいる。

神崎 隆男（上記掲載）

## 3 - 1 都市環境に作用する複合要因

都市化の影響により、都市域が次第に周囲に広がってきた。最近では、都市中心近くに高層マンションなどの住宅が建設され、住空間とオフィス空間が交錯するようになった。このため、工場、ゴミ焼却場、エネルギー施設などが都市建物のすぐそばに設置されるというケースがよく見られる。平成11年版の環境白書<sup>1)</sup>によれば、大都市地域を中心として窒素酸化物、浮遊粒子状物質の環境基準の達成状況は依然として低い水準にある。これは自動車排ガスによるところが大きい。都市域に立地される各施設に対しても厳しい環境対策が要求されている。

大気中では、地形や植生の影響によって気流の乱れが生じる。また、昼夜の日射の変化に応じて、地面と大気の間で熱の移動がおこる。さらに、都市建物周囲

の大気拡散には、これらの影響に加えて、汚染物質の排出方法や排出位置、建物の形状や配置、日射による建物の部分的な加熱、エネルギー施設や空調器用室外機のような局所的な熱源など、数多くの条件が複合的に作用する。

以上述べたように、都市では、大気汚染が改善されていないこと、熱や大気汚染物質の移動現象に様々な要因が絡みあっていることを考えると、郊外の清浄地域と比べて、より精密な手法、より高精度の予測が必要となる。電力中央研究所では、都市環境問題の一つとして、都市建物まわりの熱と大気汚染に着目し、それらの移動現象の予測手法に関する研究を実施している。

## 3 - 2 都市域の大気拡散研究

都市建物周囲の大気拡散に関する研究は、最近、数多く報告されている。単体建物を対象とした研究では、アメリカ環境保護庁のグループによる安定成層の影響を調べる水槽実験、その実験結果の乱流モデルによる予測がある<sup>2, 3)</sup>。また、東京大学<sup>4, 5)</sup>や電力中央研究所<sup>6)</sup>では、乱流モデルを用いて気流と大気拡散の予測を行っている。複数の建物群に対しては、単体建物に比べて対象とする領域が大幅に増えるため、数値計算よりも野外観測や風洞実験に関する研究が先行している。イギリス、

アメリカ、カナダの研究者は、野外観測を行い、煙源サイズや建物配置が拡散におよぼす影響を調べた<sup>7-9)</sup>。風洞実験は清水建設<sup>10)</sup>や国立環境研究所<sup>11)</sup>、電力中央研究所<sup>12)</sup>で実施された。大気拡散に関する数値モデル研究は、都市ストリートキャニオン(ビルの谷間)を対象としたものが多い<sup>13-15)</sup>。このように、都市域の大気拡散に関する研究は多岐にわたって行われているが、個々の要因の影響を明らかにすることに重点がおかれ、複合した要因を系統立てて研究しているものは少ない。

## 3 - 3 風洞実験による熱と物質移動の把握

都市の建物壁面は、夏季の晴天日には日射により加熱され、温度が60℃にも達する。このとき、気温との温度差は30℃以上になる。このように、日射や散在す

る熱源の影響により、都市大気中に局所的な高温部が形成される。建物周囲の大気拡散はこれらの影響を直接受ける。では、建物周囲の大気拡散は建物壁面の加

熱によってどのように変化するのだろうか。それらの影響を調べるために風洞実験を行った。

### 風洞実験の概要

電力中央研究所が所有する風洞実験装置内に、都市ストリートキャニオンを300分の1の縮尺スケールで再現した。つまり、図3-1のように一辺が16cmの立方体を9個設置した。建物の壁面加熱の影響を調べるために、( ) 建物を加熱しない場合(非加熱時) ( ) 図中A位置の建物の壁面を加熱した場合(ケース1) ( ) 図中B位置の建物の壁面を加熱した場合(ケース2)の3種類の実験を行った。壁面は90°の一定温度に加熱した。この加熱条件は大気との相似則を用いて換算すると、実際の建物壁面と気温の間に約12°の温度差があることに相当する。本実験では、建物周囲の気流の動き、気温上昇、汚染物質の濃度を調べる必要がある。そこで、レーザー Doppler - 流速計で風速、抵抗線温度計で気温を測定した。また、大気汚染物質の代わりにエチレンと空気を混合したトレーサガスを放出し、高精度の炭化水素計で濃度測定を行った。ワークステーションを使用して、測定したデータを処理し、平均値や変動値を計算した。図3-2に風洞内の濃度測定の様子を示す。



図3-2 濃度測定の様子(風洞実験)

### 風洞実験の結果

図3-3は建物壁面の高温化が気温におよぼす影響を示している。図中の等値線は、風洞中心位置の風下方向断面における上昇温度値の分布である。斜線部の立方体が壁面加熱された建物模型である。風上側の建物加熱時(ケース1)にも、中央の建物加熱時(ケース2)にも、加熱された壁面直後のキャニオン内に高温領域が形成され、約5°の温度上昇が観測された。また、加熱の影響は風下領域にもおよんでいる。このように、建物壁面の高温化は、人々の居住空間に相当する都市キャニオン領域の温度上昇に大きく影響をおよぼしている。

次に、建物壁面の高温化が気流におよぼす影響について調べた。非加熱時には、建築物の存在により、都市大気中に気流の乱れが大量に生成されるため、風上側の建物の屋根面近くやキャニオン内で乱流エネルギーが大きい。加熱時には、加熱壁面直後のキャニオン内において、乱流エネルギーは非加熱時に比べて増加した。これは、壁面加熱による部分的な気温の上昇により、気流に対して浮力の効果が作用する結果、気流中の乱流運動が活発化されたことを意味する。このように、建物壁面加熱の効果は気流場にも影響をおよぼし、気流中の乱れを増やす方向に作用する。

建物壁面の高温化が大気拡散におよぼす影響を図3-4

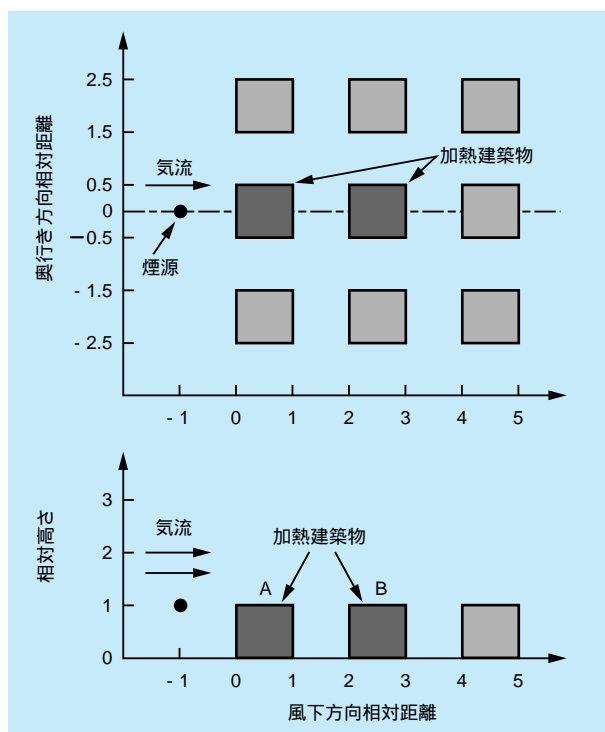


図3-1 建物模型の配置

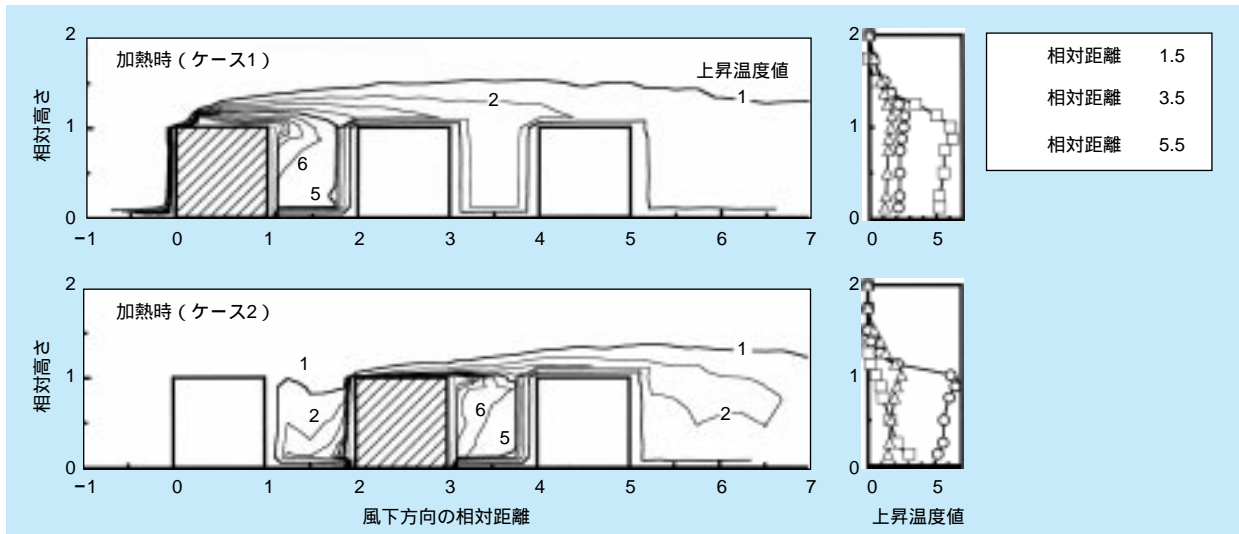


図3-3 建物壁面の高温化が周囲の気温におよぼす影響

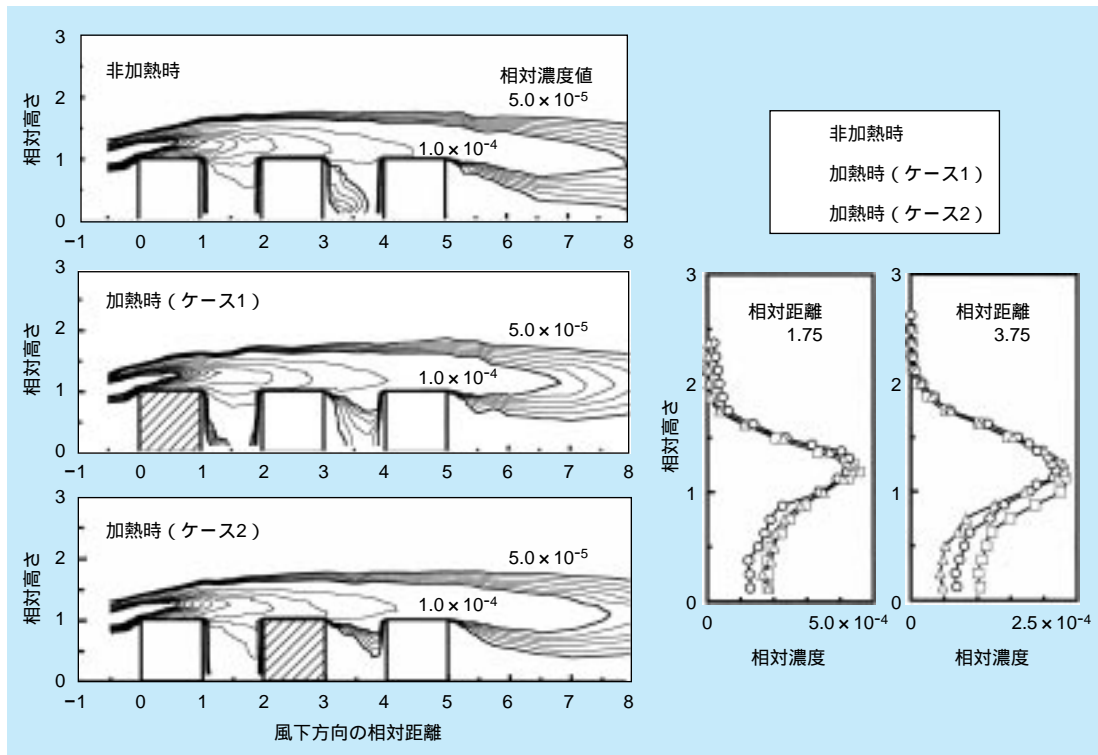


図3-4 建物壁面の高温化が大気拡散におよぼす影響

に示す。図中の等値線は、トレーサガスの相対濃度の分布である。非加熱時の分布から、相対距離 - 1、相対高さ1の位置から放出されたトレーサガスが、建物群を越える気流によって風下方向に運ばれ、その途中で一部がキャニオン内に拡散している様子がわかる。これ

に対して、加熱時には、ケース1の場合にも、ケース2の場合にも、相対濃度値は加熱面直後のキャニオン内で減少している。つまり、建物の壁面加熱は、直後のキャニオン内では、地表付近の大気汚染物質濃度を減少させる方向に作用する。

## 3 - 4 数値モデルによる熱移動と大気拡散の予測

前節で述べた3種類の風洞実験のうち、中央の建物壁面を加熱した場合(ケース2)を対象に、都市建物まわりの熱移動と大気拡散を予測した。ここでは、応力方程式モデルと呼ばれる乱流モデルを使用して、3次元数値計算を行った。

都市建物周囲の気流分布、気温分布、トレーサガス濃度分布を数値計算で予測するには、一言で言えば、連続の式、運動方程式、温度の輸送方程式(エネルギー方程式)、物質の輸送方程式を連立させて解けばよい。しかし、これらの式中には平均量のみならず変動値が含まれ、方程式の数に比べて未知変数の数が多い。したがって、未知変数の数を何らかの方法で方程式の数に合わせなければならない。この方法としては、( )未知変数を勾配拡散などの物理現象にもとづいた仮定により与える方法と、( )乱流モデルを使用して未知変数の輸送方程式を解く方法(ただし、より高次の未知量に対しては仮定が必要)がある。応力方程式モデルは、後者の方法の一つであり、比較的高レベルのモデルに相当する。具体的には、速度変動の二重相関量(レイノルズ応力)、速度変動 - 温度変動の二重相関量(乱流熱フラックス)、速度変動 - 濃度変動の二重相関量(乱流物質フラックス)に対して、輸送方程式を解くのである。一概に応力方程式モデルといっても、方程式中の各項に対して各種の乱流モデルが提唱されている。それらのモデルの大部分は平地上の気流や円管内の気流のように、解析が比較的簡単な気流に対して開発されたものである。したがって、都市建物周囲のような複雑な気流に対して、適用可能性を検討することは重要である。

ここで紹介する応力方程式モデルの計算には、標準的と言われているロンダーらのモデル<sup>16)</sup>を使用した。境界条件には、風速分布、乱流エネルギー分布、壁面加熱温度、トレーサガスの濃度フラックスなどを風洞実験と同じ条件で与えた。計算には、主流(x)方向18Hb(Hbは建物高さ)、鉛直(z)方向6Hb、奥行き(y)方向11Hbの領域を使用した。また、予測精度上、建物壁面近くの格子間隔を細かくするために、不等間隔計算格

子を使用し、図3-5に示すように計算領域をx、y、z方向に85 × 70 × 38の226,100点に分割して計算を行った。

図3-6は建物周囲の気流を予測した結果である。風洞中心の風下方向断面位置で、実験結果との比較を行っている。図中の矢印が平均風のベクトルを表している。数値モデルの結果は、建物に接近して一旦上昇後、建物群を通過して地表に近づく流れや、上空からキャニオン内に流れ込み、循環する流れの特徴をよく予測している。しかし、詳細に実験結果と比較すると、キャニオン内への下降流や循環流が弱く、建物群風下側に形成される循環流動領域がかなり大きく予測されている。これは応力方程式モデルが未だ開発段階にあるため、単体建物の場合でさえ、循環流領域が大きく計算される傾向にある<sup>4)</sup>。この点は今後モデルの改良が必要である。また、建物壁面近くの計算格子間隔をより小さくすれば、モデルの予測精度は改善することが予想される。

図3-7は建物周囲の気温の予測である。図中の数値は、上空気温に対する相対値を示している。予測結果は、壁面加熱の影響により、加熱壁直後のキャニオン内に高温の領域が作られ、周囲で温度上昇が生じている様子をよく表している。しかし、風上側のキャニオン内では地表近くの温度上昇が実験結果よりも若干高く、風下側のキャニオン内では若干低く予測されている。この点は、前述のように、キャニオン内の循環流の予測結果が実験結果よりも弱いことが原因である。

図3-8は建物周囲の大気拡散を予測した結果である。図中の数値は、放出時のトレーサガス濃度に対する相対値を示している。予測結果は、煙源から放出されたトレーサガスが建物群を通過する気流によって輸送され、その途中でキャニオン内に拡散される様子をよく表している。

図3-9は大気拡散予測モデルの性能を調べる上で重要な因子である、最大濃度値、拡散幅、煙軸高さの予測結果を実験結果と比較したものである。ここで、煙軸高さは平均濃度の鉛直分布が最大値を示す高さ、拡散幅は平均濃度が最大濃度の50%以上を示す鉛直方向領

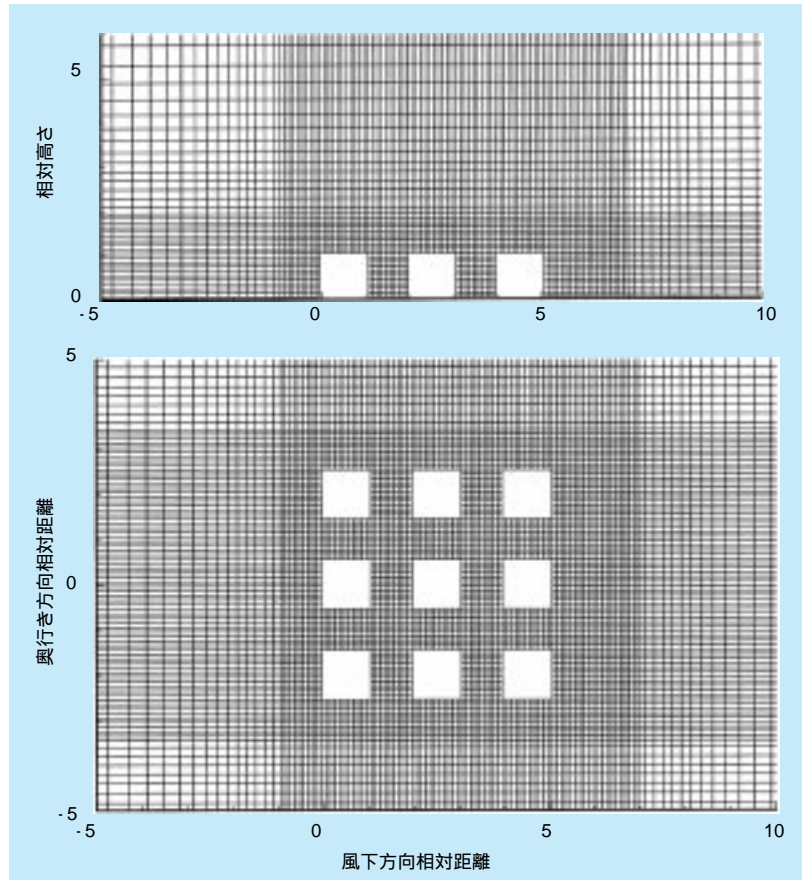


図3-5 計算格子の概要

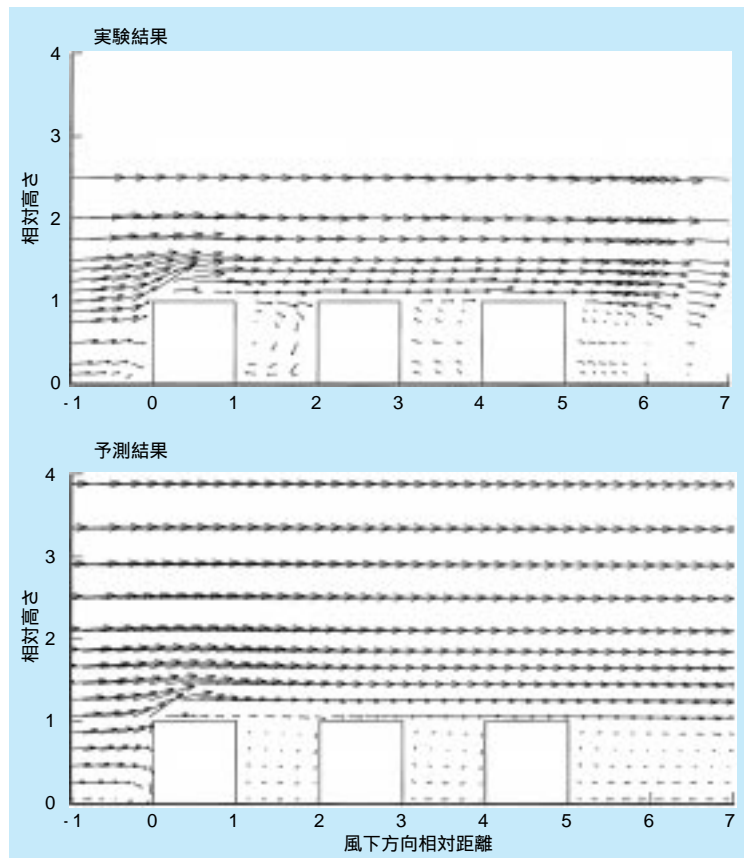


図3-6 建物群周囲の気流の予測結果と風洞実験結果の比較

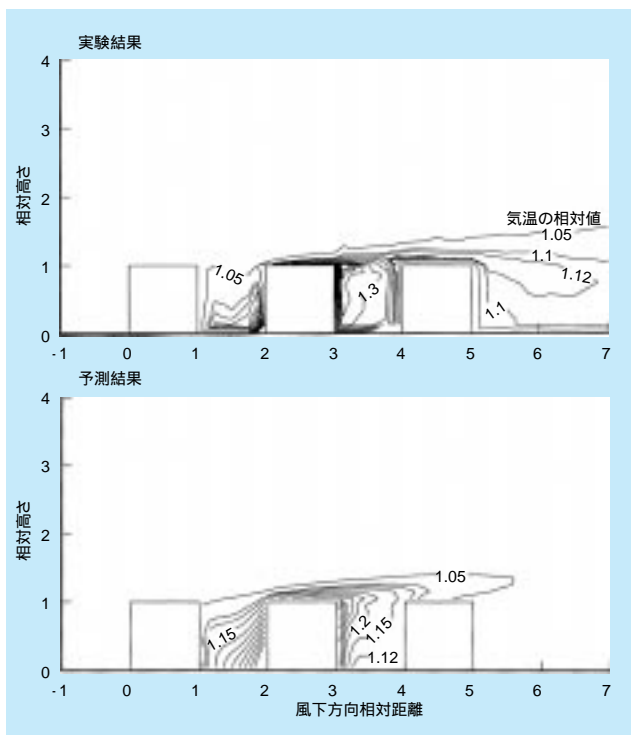


図3-7 建物群周囲の気温の予測結果と風洞実験結果の比較

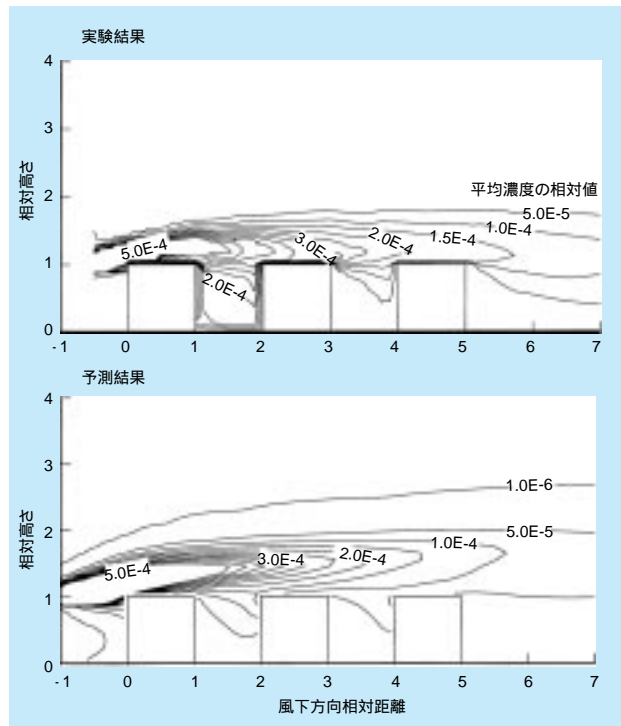


図3-8 建物群周囲の大気拡散予測結果と風洞実験結果の比較

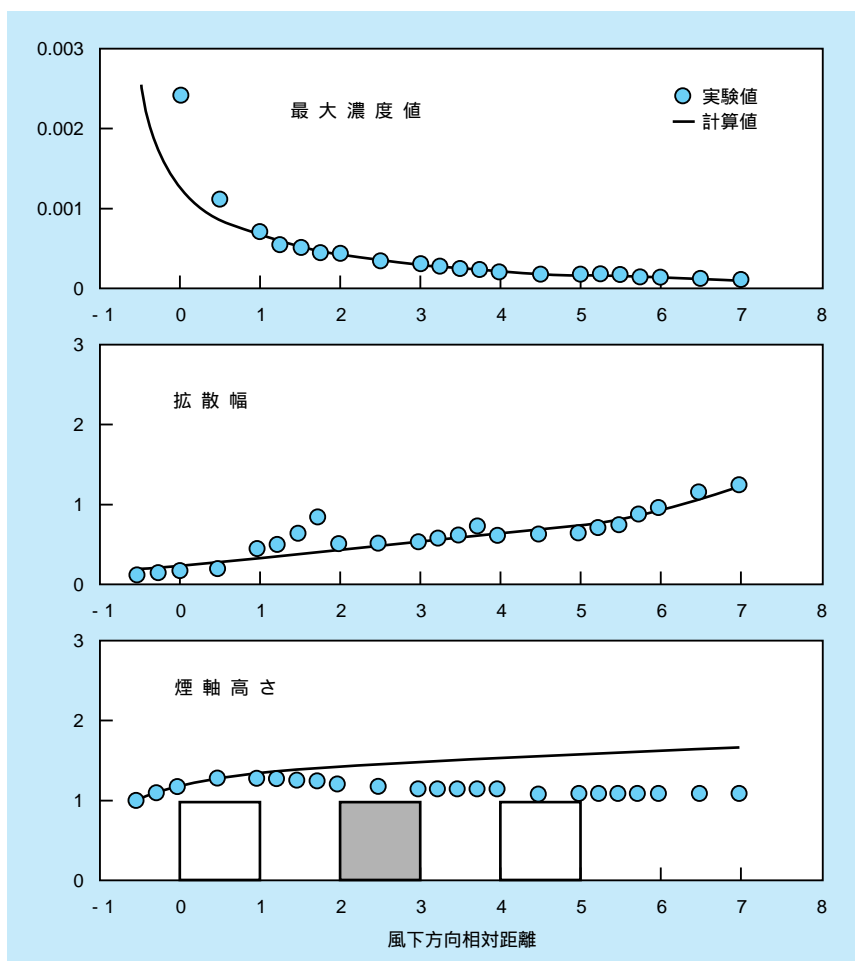


図3-9 建物群周囲の大気拡散の予測結果と風洞実験結果の比較



域の幅である。最大濃度の予測結果は、風下領域で概ね実験結果とよく一致している。しかし、煙源に近い領域では、計算格子間隔に依存する煙源サイズの違いにより、予測結果は実験結果に比べて低い。また、拡散幅の予測結果は、キャニオン内においては実験結果よりやや小さいが、他の領域では実験結果とよく一致している。一方、煙軸高さの予測結果は、煙源近くでは実験結果とよく一致しているが、風下領域においては、実験結果よりも大きな値になっている。これは、建物風下側の下降流の予測結果が実験に比べて弱いためである。

これらの結果から、数値計算により、最大濃度値、拡散幅などは概ねよく予測できることがわかった。今

後、予測精度を向上させるためには、より高レベルの乱流モデルを使用すること、複雑な気流場に適用できる高性能の乱流モデルを開発すること、建物壁面近くの計算格子をより細かく設定することが有効と考える。

都市域の大気拡散過程には、まだまだ未解明の現象が多く残されている。例えば、都市建物周囲の強い気流の乱れによって進行する反応混合が、大気拡散過程に大きな影響をおよぼすことが予想される。今後、反応混合過程を考慮したモデル開発が求められる。さらに、微小粒子状物質の浮遊拡散過程、汚染物質の気体から液体、液体から固体への相変化など、複雑なメカニズムをともなう現象のモデル化も必要となる。

## 3 - 5 ま と め

電力中央研究所では、都市域の大気環境影響予測手法を開発するために、都市の特徴である建物と排熱に着目した。これまで、風洞実験により、都市建物周辺の熱と大気汚染物質の輸送過程を明らかにした。また、固定煙源を対象に、建物影響を受けた都市域の気温と大気汚染物質の濃度を予測する数値モデルを開発した。

今後は、都市部で深刻な状態になっている窒素酸化物の混合反応機構の解明とモデル化に関する研究を進める。そして、分散、多様化する電源立地への対応をはかるために、都市内部だけでなくその周辺部を含めた地域や内陸地域を対象に、排ガス拡散予測手法を開発する予定である。

## コラム2 冷却塔は都市気象、気候を変えるか？

火力、原子力発電所循環水の冷却方式として、わが国では、ほとんどの場合、海水を利用する冷却水方式が採用されている。しかし、欧米では発電所が内陸に立地されることが多いため、冷却塔から大気中へ排熱する方式も多く採用されている。わが国では、これまで主に地熱発電所でこの方式が用いられてきたが、最近では独立系発電事業者（Independent Power Producers：IPP）の中で採用するケースが見られるようになってきた。こうしたIPPによる火力発電所は、電力需要の多い都市部に近接して立地される場合が比較的多い。そのため、冷却塔に関して以下のような環境問題が考えられる（図1）。

都市気候、気象への影響

白煙化による日射の遮蔽、交通障害などの影響

水滴の飛散にともなう水分、塩分（海水使用の場合）

菌類、薬品類などの影響

騒音、景観問題

欧米における研究事例をみると、アメリカでは塩分飛散に関するもの、ヨーロッパでは日射の遮蔽や景観に関するものが多いが、実際に重大な環境問題になった事例は数少ない。

前述のようにわが国では、地熱発電所用以外の冷却塔の実例がほとんどなかったため、その環境影響評価については、予測手法ならびに評価基準とも十分整備されていない状況にある。さらに今後は、需要地に近い都市部近郊での事例も増えることが予想されており、予測評価手法の整備が急務となっている。

電力中央研究所では、都市ヒートアイランド研究で培った基礎基盤力をもとに、これまでにあまり解析的な影響評価が行われてこなかったの問題を主な対象として、その影響の大きさについて評価、検討するための研究に着手した。

現在わが国で計画されている冷却塔方式による発電所は、比較的小規模なものが多いが、それでも隣接する都市部全体から排出される総人工排熱量に対して無視できるほど小さいものではない。そこで、冷却塔からの排熱が周辺地域の気温や湿度の上昇にどの程度寄与するのか？、局所的な雷雨や降雨の発生をもたらす可能性があるのか？などの問題について、コンピュータシミュレーション手法によって明らかにしていく予定である。

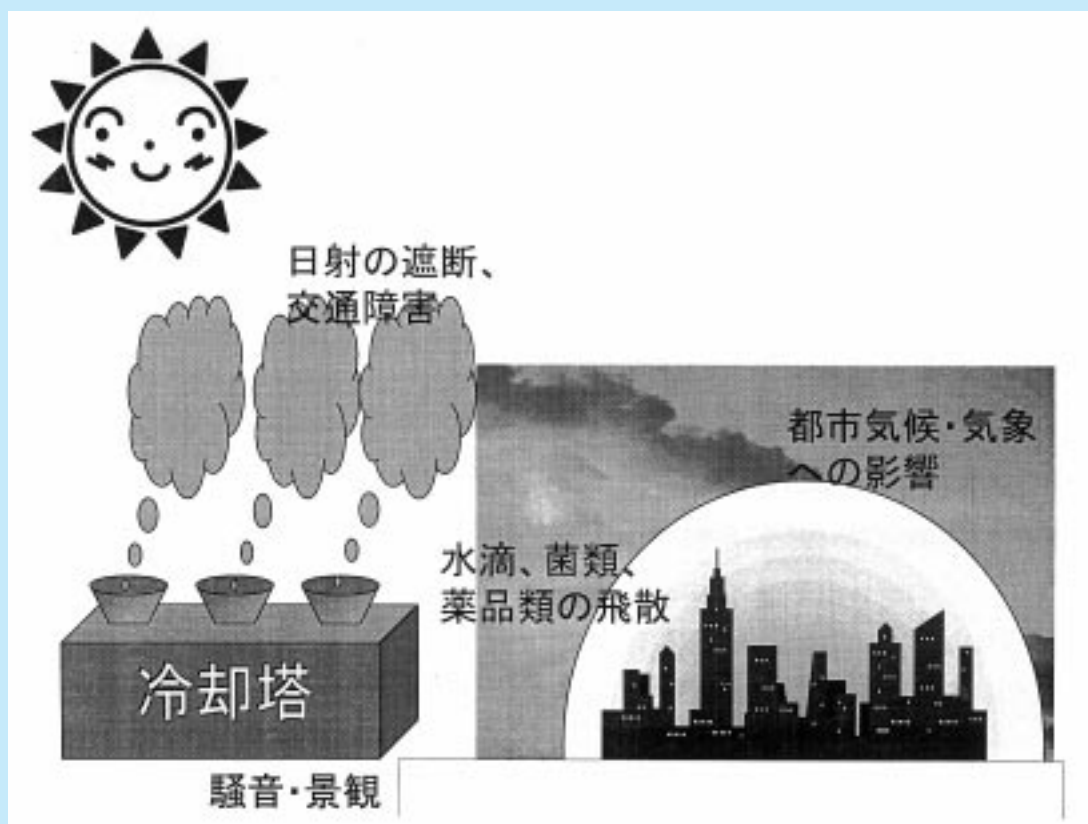


図1 冷却塔に関する環境問題

### コラム3 暑い都市の環境改善技術を提案

ヒートアイランド(図1)とは、大都市の中心部が周辺地域に比べ気温が高くなり、等温線を描くと海に浮かぶ島のように見える現象である。この現象は、一般に都市のアメニティを損なうばかりでなく、冷房需要を助長するなど、都市部のエネルギー消費と密接に関連している。

電力中央研究所では、ヒートアイランド現象のメカニズムを詳細に検討し、種々の改善方策の効果を定量的に評価することを目的として、新たに3次元数値シミュレーションモデルを開発した。このモデルは、都市部周辺の地形、土地利用状況、人工排熱分布などを入力条件として、都市部での局地風や海陸風などを計算するとともに、それによる大気中の熱と水蒸気の移流、拡散を計算するものである。したがって、本モデルにより、都市域における温暖化ばかりでなく、乾燥化や風系の変化なども予測、評価することができる(図2)。

これまでに本モデルを東京、大阪、名古屋といった代表的な大都市圏に適用し、ヒートアイランド現象を緩和するための幾つかの具体的な対策(緑化の推進や省エネ、負荷平準化策の導入など)の効果について、定量的な評価を行ってきた。

これまでの研究によれば、緑化による気温緩和効果は1日を通じて平均的に現れること、省エネなどによる排熱削減の気温緩和効果は夜間や早朝の方が顕著に現れること、気温の緩和効果は必ずしも対策を施した場所に現れるのではなく、風系にも変化を生じさせるために、その出現分布が複雑であること等の知見が得られている。

今後は、こうした大都市部における気温緩和効果と電力需要の関係を定量的に明らかにするとともに、対策導入時のビル街区レベルの熱環境改善効果や電力負荷変化

を予測する手法の開発を目指していく。そして、電気事業側の立場からばかりでなく、広く需要家サイドの立場に立って本問題の重要性とその解決策について提言していくことにより、環境共生・省エネ社会の実現に研究成果を役立てる予定である。

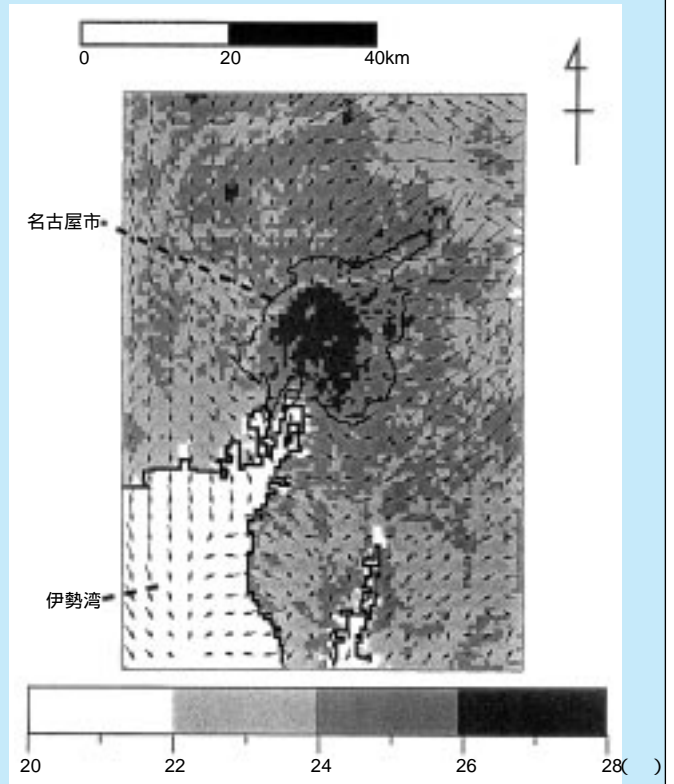


図2 早朝5時における名古屋市域の気温分布と風速分布の計算結果



図1 都市ヒートアイランド化の主な要因

## コラム4 可視化でよくわかる空気の流れ

### 創造的発想システムによる可視化

気象分野における数値シミュレーションでは、時間とともに変化する3次元的な流れ、温度等が解析対象となる場合が多い。こうした複雑な計算結果を正しく理解するため、電力中央研究所では、立体視等によって現象を可視化するための環境（創造的発想システム）の構築や可視化手法の開発に取り組んでいる。これらは研究の効率的な推進に役立っている。図1は海岸付近の平野部に70km<sup>2</sup>の都市を配置した場合を想定し、都市の配置法による日中の海風の現れ方の違いを3次元的に可視化した例である。間に緑地を挟んで都市を分散配置することにより、都市部での上昇気流が弱まり、海風が内陸に届きやすくなる様子がわかる。

### レーザー光による可視化

都市域や発電所周囲の大気汚染物質の拡散には、建物や地形により生じる複雑な気流が影響をおよぼす。また、日射や局所的な温度分布により生じる浮力の効果も影響をおよぼす。したがって、これらの影響を風洞実験や数値シミュレーションで明らかにするためには、予め、対象とする気流場の可視化を行い、その概要を把握しておくことが有効である。図2は、風洞実験装置内に都市と類似の気流場を再現し、建物周囲の大気拡散の様子をレーザースリット光によって可視化したものである。都市建物群は透明アクリル製の立方体で模擬した。建物上流側から放出された大気汚染物質（煙）が、建物の屋根面付近を通過する気流や側面を通過する気流によって、建物直後のキャニオン内に巻き込まれる様子が、青色に光る煙粒子の動きにより明瞭に示されている。可視化に

より得られた情報は、風洞実験を行うときの測定点の決定や数値シミュレーションを行うときの最適な計算格子の設定に役立っている。

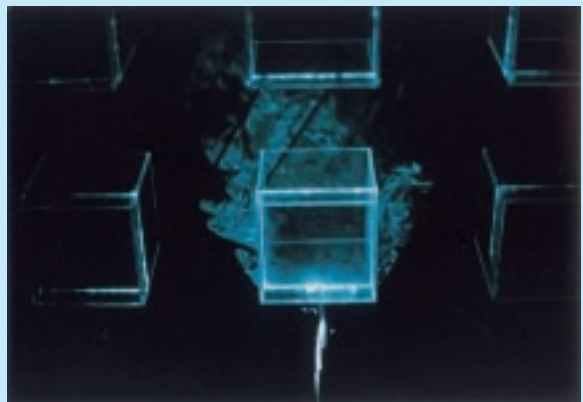


図2 建物周囲の大気拡散の可視化（風洞実験）

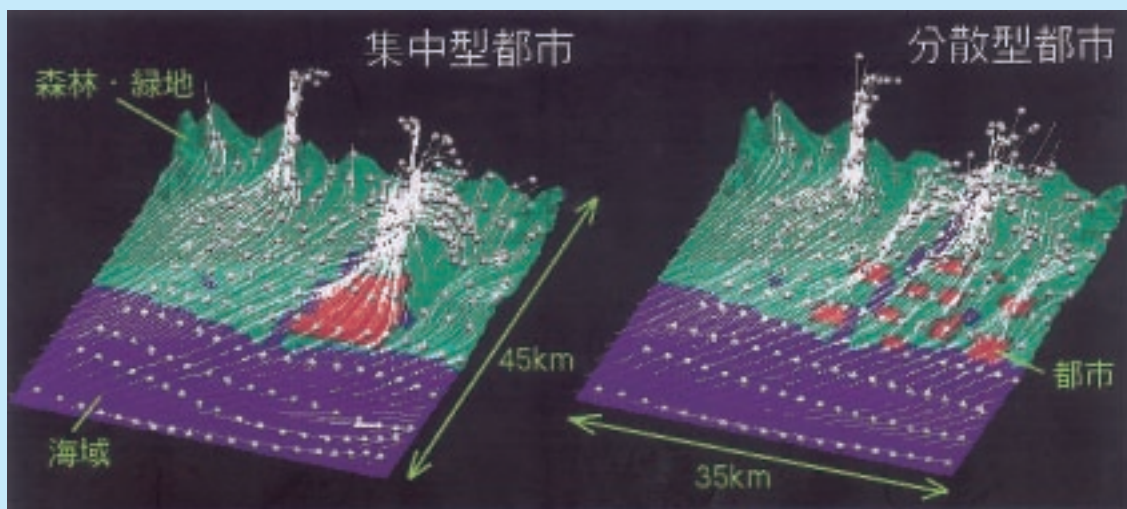


図1 集中型都市と分散型都市の海風の可視化（計算）

## コラム5 大気中の混合反応を捉える

大気汚染物質が反応性物質である場合、拡散過程で化学反応が起こる。このとき、化学反応の進行速度は、気流の乱れの強さによって変化する。

図1は反応性物質AとBの混合状態を説明したものである。大気中で化学反応 $A+B \rightarrow P$ が起こる場合を考える。排ガス中に含まれる成分Aと大気中に含まれている成分Bは、気流中の乱れにより不均一に混合され、図1に示すように、混合領域に濃度むらが生じる。化学反応はAとBが均一に混合された反応界面(斜線部)のみ進行する。反応界面の面積は気流の乱れ成分の強さに左右される。したがって、A、B成分の均一な混合状態(図1)を仮定して汚染物質濃度を予測すれば、化学反応による濃度減少を過大に評価することになる。その結果、汚染物質濃度を実際よりも低く予測してしまう恐れがある。特に、都市大気中のように、建物形状や配置の影響によって、不規則な気流乱れが生じ、濃度むらが生じやすい気流中では、この影響を受けやすい。また、化学反応の種類によっても影響の程度は異なる。

化学反応におよぼす気流乱れの影響を詳細に調べるためには、気流実験により、A、B成分の瞬間的な濃度変

動を同時に測定しなければならない。しかし、気流中の多成分濃度の同時測定は技術的に非常に難しく、これまで開発されている測定法はいずれもサンプル方式のものである。今後、レーザー蛍光法などの非接触法を利用した高精度の濃度測定法の開発が期待される。図2は、電力中央研究所で開発中の濃度測定装置を用いて撮影した、一酸化窒素(NO)噴流の蛍光測定画像である。

一方、これらの影響を考慮して大気拡散予測に適用できる数値シミュレーション手法には、輸送方程式を何の仮定も用いずに直接解く直接法(ダイレクト・シミュレーション)、計算格子以上の濃度変動に対しては直接輸送方程式を解き、計算格子以下の濃度変動に対してはモデルを使用するLES(Large Eddy Simulation)、濃度変動に関する高次の項を平均濃度勾配など低次の項で仮定して解くクロ・ジャ・モデル、多数個の微小な気流塊の動きから、統計的に濃度を計算する確率密度関数モデルなどがある。これらのなかで、大気拡散モデルに必要な計算領域や実用上使用できる計算機容量の制約、あるいは、大気中の渦構造が複雑であること、反応項に対してモデルを必要としないなどの理由から、現時点では、確率密度関数モデルを使用する方法が有望視されている。今後、このモデルを使用して、実大気中の化学反応のメカニズムをできるだけ正確に取り入れた大気拡散予測手法の開発を行う予定である。

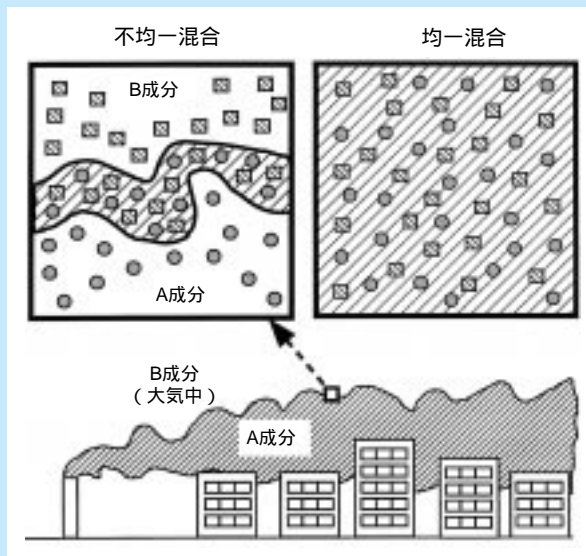


図1 大気中の混合反応のメカニズム

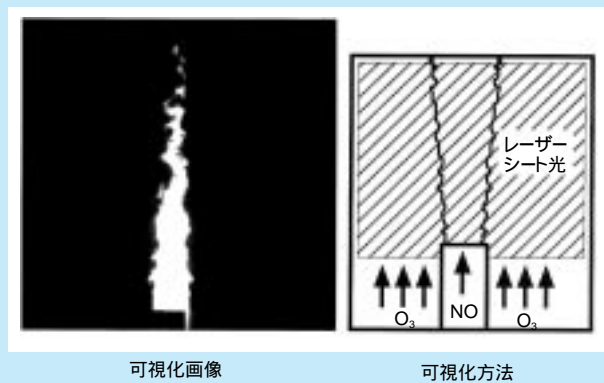


図2 レーザー蛍光法によるNO噴流の可視化画像