

B-53 都市圏の資源・エネルギー循環と都市構造に係わる温暖化防止に関する研究

(3) 都市気候モデルによる建築及び市街地の熱特性評価に関する研究

①都市の熱エネルギーバランスの評価モデル開発

研究代表者 資源環境技術総合研究所環境影響予測部大気環境予測研究室 吉門 洋

通商産業省工業技術院資源環境技術総合研究所

環境影響予測部 首席研究官 山本 晋
大気環境予測研究室 近藤裕昭
同 滞在研究員(NEDO) 亀卦川幸浩

平成9～11年度合計予算額 7,205千円
(平成11年度予算額 2,352千円)

〔要旨〕都市は自然破壊と大量エネルギー消費による地球環境破壊の一典型である。ビル等が密集する都市構造とエネルギー消費、都市気候の関係を観測とコンピューターモデルによって解明し、このモデルを都市づくりプランの評価システムに整備することにより、環境負荷が少なく住み心地のよい、自然と調和した都市構造を創るための指針の確立を目指す。

研究は次の三つの作業、第一に市街地熱環境の実態把握のための観測、第二に観測結果を踏まえ、また検証データとして利用した都市気候の数値モデル化、第三に都市のエネルギー消費や人工廃熱量の実態を都市構造や都市活動と関連付けるデータの収集、の組み合わせである。

観測により市街地熱環境の実態を把握するため、諸形態のビルを利用して周囲の気象要素を測定した。特に1998年8月から翌年12月まで、東京の旧来の都心部に位置するオフィスビル屋上で常時観測を継続し、あわせて同ビルにおけるエネルギー消費データの収集を行った。98年夏に関しては8月以降の冷房期間におけるこれらのデータを用いて、また99年は6～9月に関して気象とエネルギー消費の関係を解析した。

数値モデルの開発は、対象領域の異なる3種類のサブモデルを結合する構想によって進めた。都市を取り巻く広域を扱うメソスケール局地気象モデル(MM)はかなり確立されたものが存在したが、本研究の目的にそった高度化を行った。ビル群をとりまく大気のキャノピー層の熱環境を評価できる街区スケールモデル(CM)を新たな設計思想により開発した。さらに、街区スケールモデルと密接に結合した形で機能するビルエネルギーモデル(BEM)を開発し、ビル側の構造や熱・エネルギー機器の稼動を詳細に組み込んで、ビル外部の気象条件と連動するシステムを完成した。

以上の数値モデルを組合せて活用し、都市高温化と冷房負荷および電力等エネルギー消費の関係、また、種々の高温化対策がエネルギー消費に及ぼす効果を算定し、都市熱環境評価を行うことが可能になった。夏季の東京都心部に対応する検証実験を行い、良好な結果を得た。

〔キーワード〕エネルギー消費、都市気候、都市キャノピー、熱収支、熱環境評価システム

1. 序

世界的に都市域への人口集中が進むとともに、一人当りエネルギー消費も増大しつつある。このため、産業と並んで都市のエネルギー消費の増大による地球環境影響が懸念される。都市の構造やエネルギー消費によって都市の高温化と大気汚染が進行し、それがさらにエネルギー消費を増大させる悪循環がうまれている。そのためのエネルギー損失が膨大な量にのぼる一方、二酸化炭素の排出量を増加させ、温暖化の進行に結び付く。エネルギー消費の環境影響を最小限にいくため、限りある資源を有効に利用するため、長期的な視野に立って、エネルギーを効率良く、上手に使用してしかも住み心地の良い都市構造を創り出すことが求められている。

従来、都市の高温化、低湿化、風速の減少など、都市特有の気候はよく知られ、緑地がそれらを緩和する効果なども認められているが、研究はきわめて定性的な現象確認のレベルにとどまってきた。都市構造や都市活動に関係する特性値と都市気温などの環境特性値を定量的に関係づけるモデルを確立することができれば、エネルギー消費と環境悪化の悪循環を打開する方策を具体化し、その効果を事前評価することが可能になる。

2. 研究目的

エネルギー効率が高く環境負荷の小さい都市構造を長期的な視野で、なるべく快適さを損なうことなく創っていくためには、諸機器の高効率化技術開発と並んで都市システム自体の改革が必要である。例えば、燃費がよくクリーンな省エネ自動車の開発も必要であるが、自動車がスムーズに無駄なく走れる交通網の整備も不可欠である。冷房機器の省エネ技術も重要であるが、夏季でも冷房に頼ることの少ないさわやかな都市環境を作ることが部分的には現在でも可能であろう。これら前者の技術開発には実験が有効であるが後者の施策には実験ができない。後者の施策を推進するにあたって、その有効性を事前に評価するためには、コンピュータで数値モデルを走らせる以外に道はない。本研究は理論的な数式を体系化してこのような数値モデルを確立し、都市システムの改革方策の評価を行うことを目的としている。

3. 研究方法

都市システムの数値モデル化、特にそのエネルギー・熱構造の数値モデル化の進め方として、本研究では気象学的なアプローチを根幹としている。

都市システムへの活用がはかれる気象モデルとして既に一定の確立をみているのがメソスケールモデル(MM)である。メソスケールモデルは局地循環モデルとも呼ばれ、数百km四方、高さ数kmの大気境界層を対象とし、その地域の地形に応じた気温分布とそれに伴って発達する海陸風や山谷風などの局地風を表現するモデルである。しかし、これによって都市システムの評価を行うためには不十分な点が二つある。第一に、用いる数式の特長上、格子サイズは最小2km程度が限界であるため、都市の細部の構造(土地利用分布など)が取り扱えないことである。第二には、風に対する下面境界の抵抗が粗度定数というただ一つのパラメータで表現されているなど、都市構造に関する多種多様な特性が考慮されないことである。

このようなメソスケールモデルの欠点を補うため、本研究では一回り小さなスケールの気象を詳しく扱う「街区スケールモデル」(CM)を開発し、メソスケールモデルとの結合を目指した。これは、同程度の規模の建物が集合した区画を一括して取り扱い、外部の気象条件などに対する熱環境の応答を計算するモデルである。また、このCMと密接に結合した形で機能するビルエネルギー

ギーモデル(BEM)を開発し、ビル側の構造や熱・エネルギー機器の稼動を詳細に組み込んで、ビル外部の気象条件と連動するシステムを完成させる。

これらの数値モデルの構築を進めるには検証用実態データが必要である。従来得られている観測データは断片的といわざるを得ず、本研究において可能な限り総合的なモデル街区熱環境観測を目指した。

4. 観測による市街地熱環境の実態把握、およびエネルギーデータの収集解析

(1) 短期観測実施概要

夏季のビルまわりの熱環境を把握するため、諸形態のビルを利用して周囲の気象要素を測定した。最初に、東京西新宿の新都心地区高層ビル街において、夏季2週間の観測を実施し、市街地における熱収支構造の実態把握を行った。同時に近隣区域の緑地でも観測を行った。実施方法の詳細を表1-1に示す。

表1-1 短期観測(1)仕様

得られたデータから、高層ビル街の中の低層屋上では直達日射のあたる時間帯が限られ、その結果、表面温度の最高値は近隣緑地の地表面と同程度であるが、夜間から翌朝にかけての温度降下はきわめて緩慢であり、ビル材質の蓄熱効果の大きさが示された。昼間の気温は高度とともに

時期	1996年7月22日～8月11日
場所	①新宿区西新宿1丁目(工学院大学ビル) 高層(29階)及び低層(8階)屋上 ②新宿区内藤町11 新宿御苑 管理事務所北側空地
測定項目	赤外放射・全天日射・放射収支・気温・湿度・風向風速・乱流・表面温度、等

に低下し、緑地であっても地上は低層ビル屋上より高温になるが、夜間は緑地で地表面温度まで降温するのに対してビル街では蓄熱効果による加熱がある(図1)。

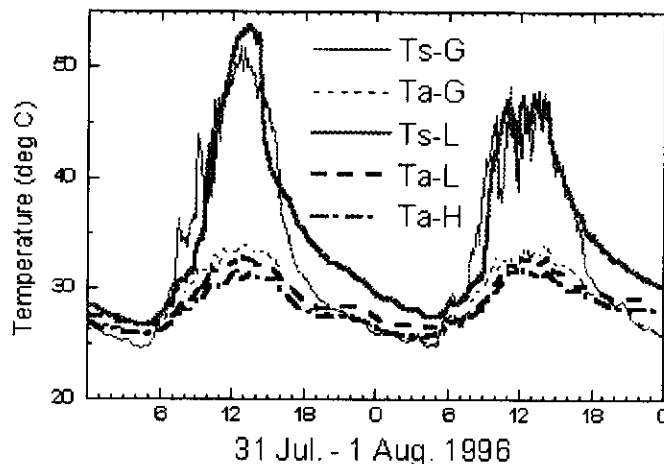


図1 夏季の表面温度Tsと気温Ta。

L:高層ビル街低層屋上、 H:高層屋上、 G:緑地

比較のため、翌年の夏はつくば市内の研究所のビルを利用して観測を実施した(表1-2)。前年

の東京都心部とはビルのサイズおよびビル周囲敷地の材質が対照的である。同所では前年の早春にも同種の観測を行っていたため、この2年間で街区構造の差異、季節の差異に応じた外的熱環境の特徴を示すデータが得られた。季節差については、意外にも夏季の正味入射量はむしろ春より20%程度小さく、これは路面や

表1-2 短期観測（Ⅱ）仕様

建築物が既に高温化した状態でバランスし、その表面からの放射と対流熱伝達によって大気が加熱されていることを示すと考えられた。 以上の観測から代表的な日の測定結果および算定値をまとめると表2のようになる。	時期	1997年8月2日～19日、8月28日～9月3日
	場所	茨城県つくば市小野川（資環研） 本館ビル6階屋上 南側地上（アスファルト舗装） 北側地上（芝生）
測定項目	赤外放射・全天日射・放射収支・気温・湿度・風向風速・乱流・表面温度、等	

表2 放射収支のまとめ

	筑波／ビル南地上昼		新宿L昼	筑波／ビル南地上夜		新宿L夜
	3月下旬	9月初旬	7月末	3月下旬	9月初旬	7月末
日射 S ↓	870	780	890	0	0	0
赤外 L ↓	290?	410	420	290?	410	420
放射収支 ↓	580	470	560	80	-50	60
S ↑ + L ↑	580	720	750	370	460	480
(残差)						
表面温度 T _s	30	45?	50	10	25?	30
σ T _s ⁴ (L ↑)	480	580	620	370	460	480
S ↑ (残差)	100	140	130	0	0	0

「昼」は正午前後の値。 新宿L：低層8階屋上。

単位はWm⁻²、ただし表面温度は℃。 "?"の数値は他の場所からの推定値。

(2) 長期継続観測とエネルギーデータの収集解析

①実施概要

1998年8月以降、旧来の東京都心部である丸の内・大手町地区に位置するオフィスビル（以下、便宜上「大手町ビル」とする）屋上で常時観測を開始し、99年12月まで1年5ヶ月間継続した。あわせて同ビルにおけるエネルギー消費データの収集を行った。

同ビルは地上24階建であるが、その屋上の半分以上は吹き抜け型塔屋構造の非常用ヘリポートとなっている。塔屋の南側に開けた屋上があり、そこにはボール状の避雷針とアンテナ、人の

表3 長期継続観測仕様

背丈程のバラボラアンテナ等がある。その中央部の開けた部分に測器類を設置した。

ビルの周囲は同規模のビルと6階建程度の低層ビルが混在しているが、低層ビルも敷地面積は広いものが多く、街区は整然とした印象を与える。

この地区には地域冷暖房システムが整備されており、大手町ビルもそこから温熱・

冷熱の供給を受けているが、それはエネルギー消費の一部であり、夏期の冷熱補給用に独自の設備も所蔵している。

時期	1998年8月1日～1999年12月10日
場所	千代田区大手町 オフィスビル24階屋上
測定項目	赤外放射・全天日射 気温・湿度（高さ1.5m）・表面温度 風向風速・乱流（高さ2.5m）

② 通年気象解析

大手町ビル屋上では、3次元の超音波風向風速温度計(Kaijo DAT600)を1998年12月より三脚付き自立式ポールの上端（屋上面より2.5m）に設置し、1999年12月まで計測を行った。データは10Hzでサンプリングして長時間デジタルデータレコーダ TEAC DR-M3b MK2-A の650MBのMO disk上に記録した。比較的連続的にデータが取得できた1998年12月17日12:30～1999年11月13日5:10のデータについて、他の気象要素と合わせ諸解析を行った。

解析した項目のうち、ここでは、ア)日平均気温の年変化、イ)月平均および年平均した気温日変化パターン、ウ)顕熱フラックス $c_p \rho w' T'$ の日平均の年変化、エ)月平均および年平均した顕熱フラックス日変化パターンについて示す。なお、これらの解析値を他の地点と比較し、都市における特徴を抽出するため、同様に長期観測を行っている岐阜県高山市の岐阜大学流域環境研究センター（山間部：資環研が測定）、つくば市内にある筑波大学水理実験センター*（郊外部の平地：筑波大学が測定；<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/>）における同期間のデータと比較した。

高山では稜線上にある森林地帯に地上25mの塔を設置し^{1),2)}、この最上端の25mに超音波風向風速温度計（Kaijo-DAT600）、また25.5mに温湿度計（バイサラ白金抵抗温度計および Humicap hygrometer）を設置してある。筑波大学水理実験センターのデータは、風速については29.5m、その他については1.6mの高度の測定値を用いた³⁾。データのサンプリング間隔は高山が4Hz、大手町が10Hz、水理実験センターが20Hzであり、平均化時間は高山が30分、大手町が10分間平均の連続する3つのデータの平均、水理実験センターが10分間の移動平均値を0.68秒ごとにサンプリングした値の1時間平均値でそれぞれ若干の差がある。

*現：陸域環境研究センター

ア. 日平均気温の年変化

気温の日平均値を求め、その年変化を描いたのが図2である。高山は標高1420mの高地であるので気温が他の二点に比べて10℃程度低い。年変化の傾向は夏期の7～9月を除いて三点とも比較的好く似ており、相関係数も0.8以上あるが夏期の3ヶ月間の相関は低い（0.5程度）。大手町の測定場所は地上100m程度であり、気温は地上に比べれば気圧差だけで1℃低くなって

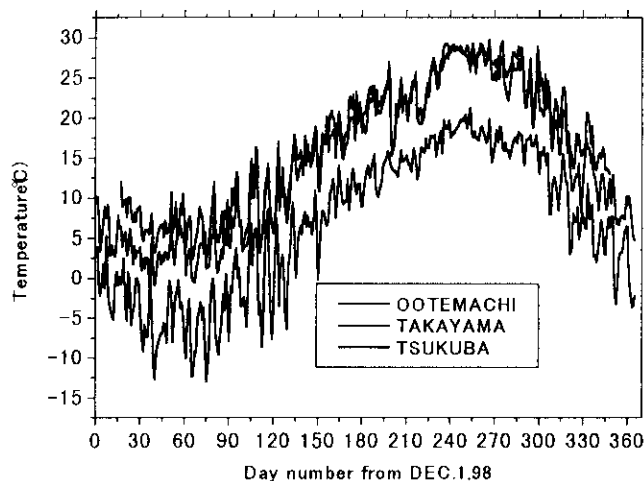


図2 日平均気温の年変化。

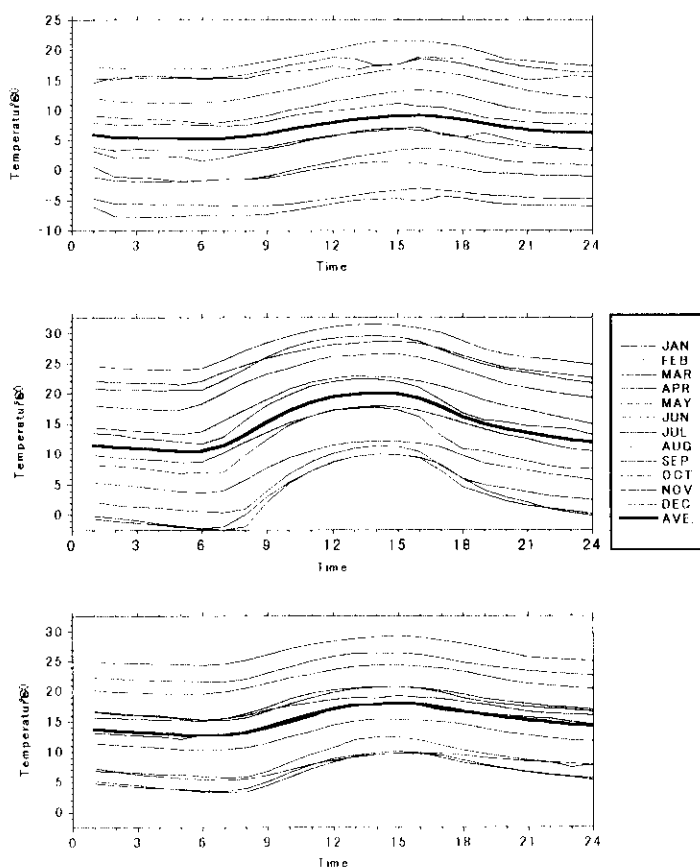


図3 気温の月別平均日変化パターンと年平均。
上から、高山、つくば、大手町。

いるはずであるが、夏期も冬期もつくばよりは高く、特に冬期は℃程度高い。日平均値の変動は冬期の高山で大きく、夏期は小さい。

イ. 気温の日変化パターン

三地点の気温の日変化パターンについて、各月平均と、年間平均をまとめて図3に示す。各地点の日変化パターンには特徴がよく現れている。大手町ではつくばに比べて日変化の振幅が小さい。最高気温は15時ころ出現する。つくばでは大手町に比べて朝の気温の上昇率と夕方の気温の下降率が大きい。また昼間の気温の変化が月別の日出、日没の時間の変化ときれいに対応している。高山では日変化幅が最も小さく、最高気温も16時頃出る場合もあるが、月によって異なる。年の前半に最高気温の出現時刻が遅く、後半は早くなっている。

ウ. 日平均顕熱量の年変化

ここでは超音波風向風速温度計の測定値から求めた $c_p \overline{\rho w' T'}$ をもって顕熱量とした。高山の場合複雑地形上にあり、測定された鉛直風速の平均値は一般にゼロではないので、鉛直風速の平均値がゼロとなるように3次元の座標を各平均化時間毎に座標変換をして

$c_p \overline{\rho w' T'}$ を求め直している。大手町のビル屋上では近くの建造物の影響

等があるが、ここではそれらを見捨てた。また、相対湿度が高い場合は超音波風向風速計のセンサーが結露

したり雨滴が当たっている場合が多く、誤差を生じるので、日平均相対湿度が90%以上の日は除外した。このようにして求めた日平均顕熱量の

年変化を図4に示す。顕熱量は大手町では4月から9月に大きくなるが、つくばでは3~4月が大きくなり夏には

少し下がる。また高山でも5月が最大で夏は一旦下がり、10月後半にも

小さいピークがみられる。これらは植生の影響で、植生の生育期間には有効放射量が潜熱に変換される分、顕熱量が少なくなるが、都心の大手町のビルの上ではこのような傾向は見られない。

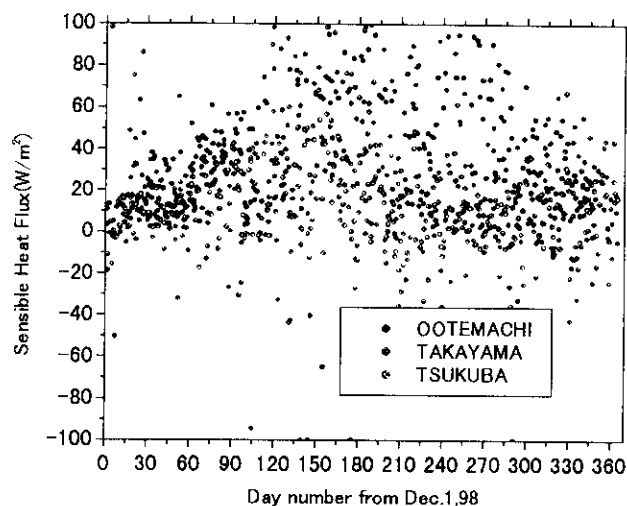


図4 顕熱の日平均値の年変化。

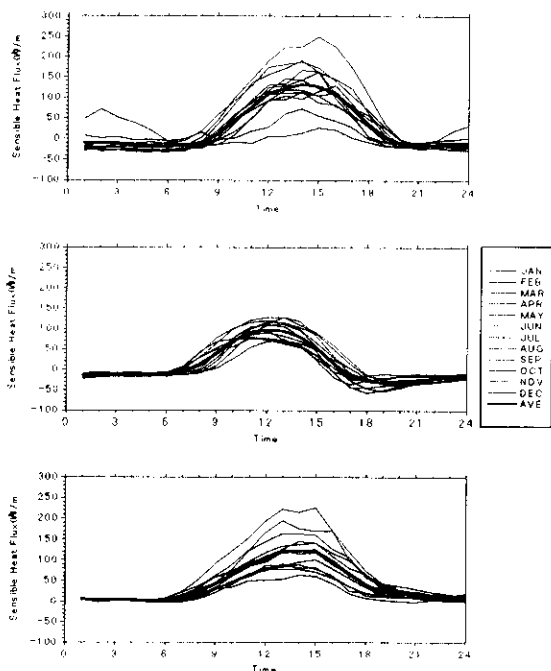


図5 顕熱の月別平均日変化パターンと年平均。上から高山、つくば、大手町。

エ. 顕熱の日変化パターン

顕熱の月別平均日変化パターンを見ると(図5)、つくばの1.6mでの顕熱量が他と比べて小さいことがわかる。高山および大手町では顕熱量は13~15時の午後の時間に最大となる。高山では顕熱量は5月に最大であり、一方大手町では7、8月に多い。つくば、高山では夜間の顕熱量が負になるが、大手町ではわずかにあるが正の値をとる場合が多い。

③ビルのエネルギー消費と気象条件の関係

大手町ビル屋上で気象の継続観測を実施した期間中の1年余について、ビル内でのエネルギー使用実績に関するデータの提供を受けた。同ビル周辺地区一帯には地域冷暖房システムが整備されており、同ビルはビル全体での冷房用冷水需要の50%以上、暖房と給湯用蒸気は全量を地域冷暖房に依存している。冷水の不足分はビル保有のターボ冷凍機と氷蓄熱システムにより賄う。冷却塔は屋上（気象観測場所から離れた一段低いフロア）に設置してある。

ここでは夏季の冷房期間を対象とした解析結果を示す。提供されたデータから各冷熱供給システムの1時間単位の稼働状況を確定するためにはある程度の仮定を加えた。解析対象期間は、98年夏に関しては8月1日から10月13日（ターボ冷凍機の夏季通常運転終了日9、99年は6～9月の4ヶ月とした。

ビル気象データおよびビルのエネルギー消費とも日代表値を用いる。すなわち、各気象要素、地域冷暖房システムとビル内設備を合わせた「総冷熱供給量」および「総受電電力量」の毎時値を昼間時間帯（98年は07～18時、99年は08～19時）について平均して用いた。なお、気温と湿度の総合効果を代表する気象要素として、両者から「外気エンタルピー」 E を以下の式により求め、解析に用いた。

$$E = Cpd \cdot T + r (L + Cpw \cdot T)$$

ただし、 Cpd 、 Cpw はそれぞれ乾燥空気と水蒸気の定圧比熱、 L は0℃における蒸発潜熱、 r は混合比、 T は気温（℃）である。

図6は日々の平均外気エンタルピー E に応じた冷熱供給量 C を示している。冷熱供給が2000MJ/h以下の日は休日であり、これらを除いたウィークデイの冷熱供給量は図中に示すように外気エンタルピーと高い相関を持っている。図中の回帰式も休日を除いたものである。99年(II)では98年(I)と比べ冷熱需要が増大している。これは主としてビル内設備の変化によるものと考えられる。

さらに、これらの回帰直線からのずれ、すなわち(I)の場合なら $Cdev = C - (536E - 845)$ がいかなる影響によるものかを、いくつかの要素に注目して調べてみた。図7は $Cdev$ を総受電電力

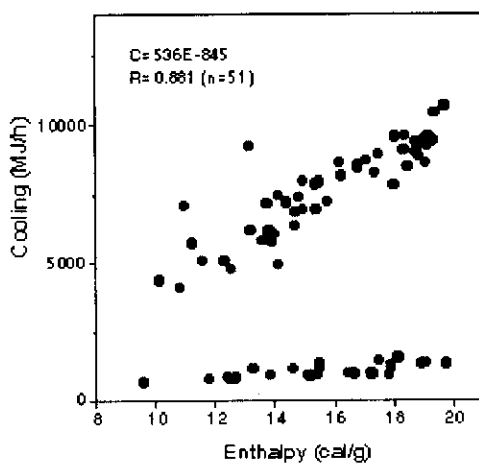
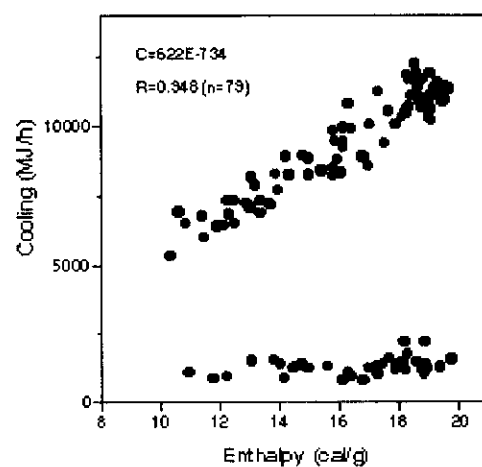


図6 (I)1998年夏期の E と C の関係。



(II)1999年夏期の E と C の関係。

量との対比で見たものである。解析結果からそれるが、このビルに関する限り1年間で電力消費も冷熱消費も20%程度の伸びを示しているのが目立つ。電力と冷熱供給の関係では、99年(II)の相関係数は高くはなく、98年(I)にも傾向の異なる日が若干あるが、(I)では明らかに電力量との関係が見られる。ただし、98年(I)は図6(I)の中でたまたまエンタルピーの小さな日の多くが回帰直線の下側、すなわちCdevがマイナスとなったことが比較的高い相関に影響している。それらの日は気温が低く冷熱需要の小さな日であり、それに伴う電力需要も小さくて当然である。

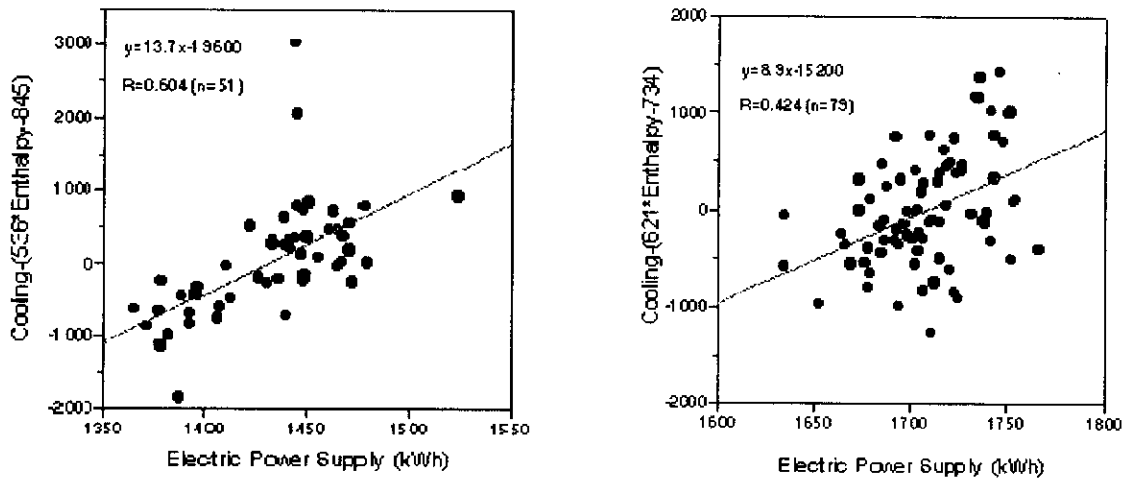


図7 (I)1998年夏期の電力とCdevの関係。(II)1999年夏期の電力とCdevの関係。

しかし、その点を除いて、エンタルピーの大きかった日のみを取ってみても、Cdevがマイナスの日よりプラスの日の方が電力量が大きいことが確認できる。この関係は両側面から考える必要がある。第一は、ビル稼働による電力消費が大きい日ほど内部発熱が大きくなり、その埋め合わせとして相対的に冷熱需要が増すという側面である。もしこのビルの冷熱供給のすべてが地域冷暖房システムによってまかなわれているのであれば、この一方的な流れで説明される。しかし、現実にはビル独自システムからも冷熱供給があるため、逆の側面も存在する。すなわち、冷熱需要が増大した日にビル独自の冷熱供給システムが相対的に強く稼働し、その結果として電力消費が増す、という側面である。

この点の検討のためビル独自システムの機能を振り返ってみると、二つのシステムのうち氷蓄熱では対象時間帯(昼間)は電力消費はなく、もう一方のターボ冷凍機では8月中の冷熱消費の約20%に当たる2000MJ/h程度をまかない、これに最大400kWh程度の電力を使っている。しかし、ターボ冷凍機の出力は通常細かな調整は行われておらず、変動分は主として地域冷暖房システムから受ける冷熱量の変動として現れていた。この結果、大まかな推定ではあるが、電力消費と冷熱需要の関係における上記の両側面のうちの後者、すなわち冷熱需要の増加に伴う電力消費の増加はそれほど大きくないと見なせる。結局、外気温・湿度に次いで二次的に冷熱需要を増加させる要素として、ビル内の諸活動に伴う電力消費の増加が内部発熱として影響する点が重要と考えられる。

図7(I)の関係によると、総受電電力量が100kWh増加すると冷熱消費が1370MJ/h増加している。電力量100kWhを換算すると360MJ/hであるので、冷熱消費の増加の方がはるかに大きい。これは冷熱供給の実効率の低さを示すものかも知れない。1370MJ/hを昼間平均で5°Cの気温差として見

積もると乾燥空気 $2.1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ となり、毎時ビル容積以上の空気を余計に冷却することに相当する。

以上のように、図6の回帰直線からのずれ C_{dev} は電力消費による内部発熱と密接な関係があることがわかったが、エンタルピー以外の気象要素との関係についても調べてみた。図8は C_{dev} と外気湿度の関係(98年)であるが、目立った傾向は見られない。湿度は既にエンタルピー E の一部として考慮されているので、 C_{dev} が湿度と無関係でも意外ではない。

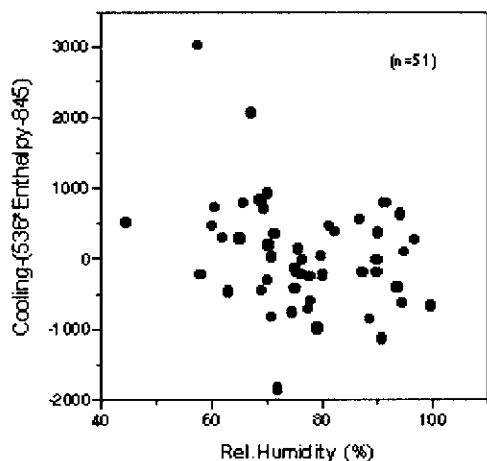


図8 相対湿度と C_{dev} の関係。

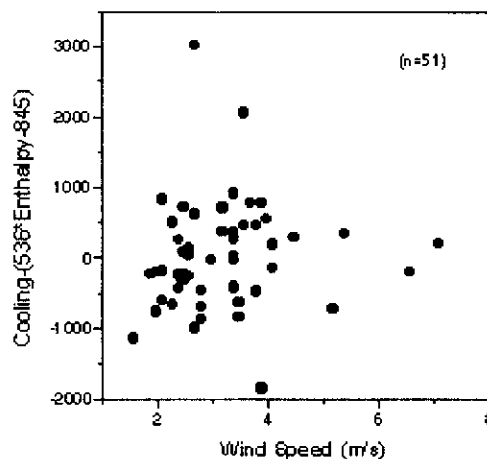


図9 平均風速と C_{dev} の関係。

図9は C_{dev} と風速の関係(98年)である。風速は地域代表性の見地から現地データではなく600m離れたアメダス(気象庁)のデータを用いた。目立った傾向は見られず、ビル外の風速は冷気需要に特別な影響を及ぼさないとと言える。

5. 都市熱環境評価モデルの開発

(1) メソスケールモデルの改良

本研究の目的は、外気条件の変化に対応してビル消費エネルギーが動的に変化し、その結果増加する廃熱の影響を再び外気条件にフィードバックする都市熱環境・エネルギーシステムモデルの開発である。このようなモデルは、スケールの異なる複数のモデルを有機的に結合することによって成り立つ。

都市域を含む数百km四方の領域、すなわち地方規模の気象の変動を算定・予測するのがメソスケールモデル(MM)であり、既に一定の確立をみている。資源環境技術総合研究所でも独自のMMを保有している⁴⁾。しかし、これをそのまま都市システムの評価に用いるためには不十分な点があった。第一点として、都市の気温を左右する大きな要因である蒸発と水蒸気の輸送過程が含まれていなかったため、まず水蒸気輸送過程の組み込みを行った。第二に、従来はモデルの1格子についてはその格子の平均の表面温度や顕熱フラックスなどの情報しか得られなかった。これを同じ格子内でも地表面条件の差による顕熱フラックスや地表面温度の変化の情報を得ることのできるように、地表面条件に応じて熱収支式を独立に解く方法に改めた。

また、実測との比較検討によりモデルの評価を行う際に、実際に起こっているいろいろな気象条件下での長時間積分による評価が必要となってくる。これを行うにはMMの計算範囲よりも外側の情報をMMに取り込みながら計算を続ける四次元同化を行う必要がある。外部気象データと

してここでは気象庁RSM (Regional Spectral Model)の計算結果を用い、それを内挿等により格子に割り付けたあとnudgingの手法によって四次元同化を行う方法をとった。

(2) 街区スケールモデルの開発

メソスケールモデルでは表現できない詳細な都市構造や気象特性の分布を計算するため、本研究では街区スケールモデル (一次元都市キャノピーモデル、CM)を開発した⁵⁾。これは、同程度の規模の建物が集合した区画を一括して取り扱い、外部の気象条件などに対する熱環境の応答を計算するモデルである。たとえば1km四方にあるビル街を、底面が正方形 (辺の長さb) で同じ底面積を持つビルの集まりと仮定し、間隔 (道路幅) wおよびビル高さの分布をパラメータとする。

CMの基本方程式は、

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \cdot m \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) - cau \left(\sqrt{u^2 + v^2} \right) + f(v - v_g) + \eta(u_o - u)$$

のように、運動方程式等にキャノピー抵抗 (右辺第2項) を考慮したものである。mがbやwの関数として表される。ビル表面と空気との間の顕熱輸送については、表面が空気温度よりも高い場合にはJurgesの式、表面が空気よりも低温の場合にはMonin-Obukhov式を用いた。地面、壁面、屋上の植生等からの蒸発散を考慮するため、水蒸気輸送コンダクタンスを3種類までの異なる表面毎に導入できるようにして水蒸気輸送を評価した。

CM検証結果の一例を図10に示す。

シミュレーションの対象としたのは東京大手町の気象庁における気温実測値である。対象日時は1992年夏季で晴天の続いた7月28日~30日である。アルベド・地表面特性・天空率として局所パラメータを使用して計算した結果、CMによって3日間を通じて気温がよく再現された。同期間、実測地点から数百mしか離れていない阪本小学校でも気温測定がされたが、最高気温は2°C程度阪本小学校が高かった。このことから都心部ではビル街区の気温が数百m程度で異なり、MMだけでなくCMを用いて計算することの意味が明瞭に示された。

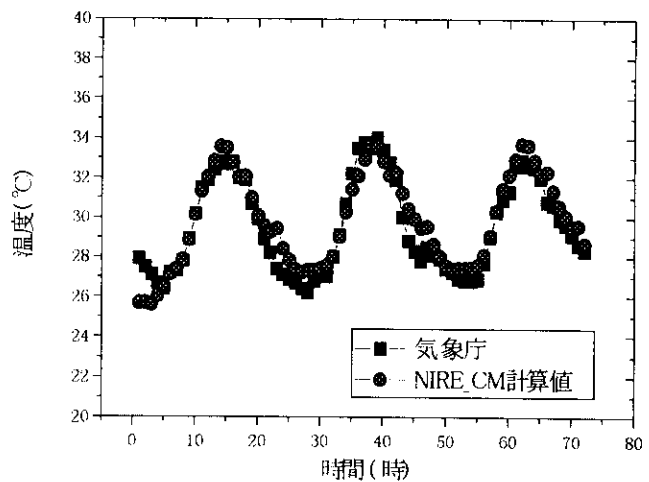


図10 気象庁実測気温とCMによるシミュレーション結果の比較

(3) ビルエネルギーモデルの開発

ビル外部の気象条件による空調の稼働状況や、それに応じたエネルギー消費と熱放出のビル外部へのフィードバックをモデルに組み込むため、CMと密接に結合した形で機能するビルエネルギーモデル(BEM)を開発した。これによって、単にビル壁面の熱収支のみの計算から、ビルの空調エネルギー収支と外気条件との動的関係を解析することを可能にした。この際、窓の存在についても考慮に入れた。

BEMは建築物における冷房熱負荷を顕熱分 H_{in} と潜熱分 E_{in} とに分離して算出する。前者はビル壁を通過して流入する熱、窓からの日射、室内の内部発熱等の和であり、後者は換気に伴う湿気の流入と室内水分蒸発から成る。一方、冷房システムによる顕熱負荷と潜熱負荷の処理量を H_{out} と E_{out} とする。 H_{in} と H_{out} 、 E_{in} と E_{out} は空調システムの稼働状況に支配されつつ室内気温と湿度を変動させる。これらの方程式に加え、顕熱に関してはビル外壁での熱収支と室内側の熱収支の式により連立計算を行う。

(4) 都市熱環境評価システム

前述のMM、CMとBEMの結合により都市熱環境評価システムを構築した。

代表的業務街区として大手町地区を選び、評価システムの検証実験を実施した。モデル領域中央に立地する大手町ビル(4.(2)に前述)で取得した1998年8月の実測データ(屋上での連続気象観測、およびそれと同期したビル内空調実態に関わる各種データ)を検証に用いた。

CMでの街区形状は東京都のGISデータに基づき、ビル外壁構造、路面下の構造に関しては典型的な数値を仮定した。BEMでのビル側空調条件は標準的事務所ビルの設定とした。冷房熱源は、領域内に存在する地域冷暖房システムの熱源構成を考慮し、設備容量比で70%を都市ガス駆動・冷却塔廃熱型の吸収式冷温水発生機とした。残り30%は、電気駆動型の空気熱源ヒートポンプを仮定し、足永ほか⁶⁾によるCOP推定式を採用する事で、COPの部分負荷と外気温への依存性を考慮した。一方、これら運転条件への依存性が低い吸収式冷温水発生機のCOPは1.2の標準的固定値とした。また、冷却塔廃熱の全量を潜熱⁶⁾、空冷室外機廃熱の全量を顕熱と見なした。その他、在室人員密度等、時間変動を伴うパラメータを図11に示すように設定した。

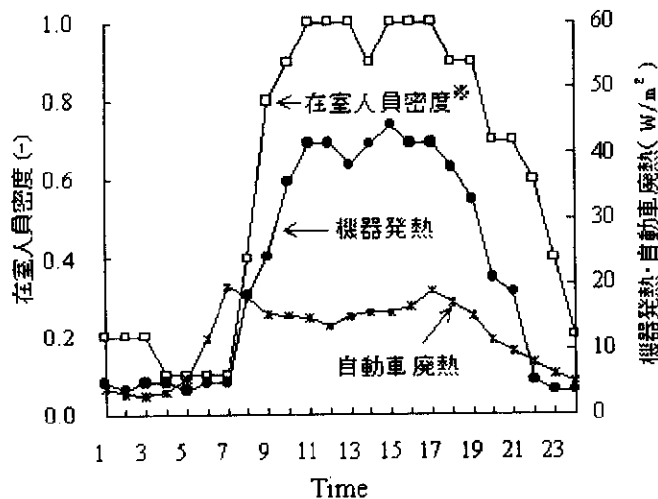


図11 各種パラメータの時間変化。

人員密度はビル照明電力消費の夏季時間変動より推定、ピーク値を1.0として表示。

大手町地区でのCM大気初期条件、上端境界条件、移流冷却・加熱率を導出すべく、まずMMによる数値実験を行った。人工廃熱は、10kmメッシュ平均の特別概算値⁷⁾を用いた。対象期間は、関東地方が概ね太平洋高気圧の支配下にあり、最高気温は連日32°Cを超える典型的真夏日の条件であった1998年8月2日より5日までとした。そのMMシミュレーション結果の下でCM・BEMによる計算を行った。計算ケースを表4に示す3種類とした。

表4 シミュレーションのケース設定 (大手町街区)

ケース名	計算条件 (ビル廃熱源の配置条件)
CASE-1	冷房廃熱源を各ビル屋上に設定
CASE-2	冷房廃熱源を各ビルの地上3m部に設定
CASE-3	ビルの冷房廃熱は外気へ放出されないものと仮定 (下水熱源ヒートポンプ等、大気以外を熱源として利用する冷房システムの導入を想定したケース)

ビル屋上 (地上100m) における気温の実測と計算結果との比較を図12に示す。MM単独での結果は実測と比べ気温の日振幅をやや過大評価する傾向にあり、夜間における過小評価が著しい。これは、ビル街区を一様平坦なコンクリート面と見なすMMで街区の熱容量が過小に評価されたこと、ビル長波輻射によるキャノピー内の夜間放射冷却の抑制過程が考慮されなかったこと、によると考えられる。これに対して、キャノピーの効果を考慮したCM・BEMは夜間の気温変化をほぼ再現出来ている。日中は、冷房廃熱を無しとしたCASE-3に対し、CASE-1 (屋上廃熱) とCASE-2 (地上廃熱) がより実測に近い結果を与えている。大手町街区において多数の冷房廃熱源が存在する実態と合致する。なお、廃熱に伴う昇温幅は、計算期間を通じた平均で約1℃であった (CASE-1と2の間に差は見られず)。この他、8月3日と4日午後における急激な実測気温の降下 (雲と風況変化による) への追従が不十分であった点を除き、CM・BEMはキャノピー上部での気温をより現実的に再現し得た。

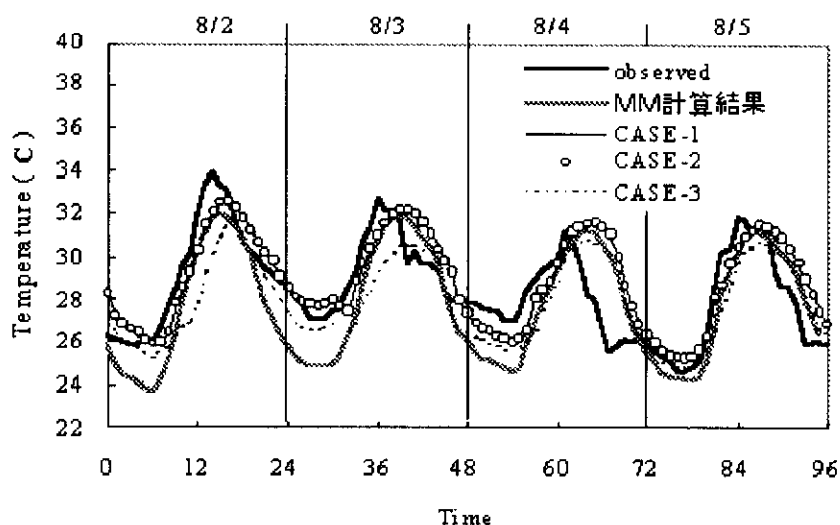


図12 気温 (地上100m) の実測と計算結果の比較 (1998年8月2日~5日、大手町)

6. 成果のまとめ

地球環境問題の最重要課題として二酸化炭素の排出削減が議論されているが、民生と運輸からの排出は将来大幅にのびることが予想される⁸⁾。都市はこの双方の一大排出源であり、地球環境破壊に対処するうえで、環境負荷の少ない都市構造を創っていくことの重要性は容易に認識されるところである。そのためにどのような方法が可能であり、どれほどの効果があるかを予測・評価する手法の開発を目的として本研究を始めた。

短期的なビル周囲での熱環境観測を種々の地区および季節のもとで行うとともに、東京都心の業務ビル街である大手町における観測では、ビル側のエネルギーデータも併せて1年間以上継続

して収集し、長期的な統計的関係を解明することができた。これらはモデルの検証と高度化を考えるうえでも大いに参考としたが、年間にわたるデータベースとして今後も活用できる貴重な資料である。

夏季には都市の高温に伴い、都市に集中した建築物では冷房を中心にエネルギー使用が増大する。そして冷房装置が外気に対して廃熱を行うことによりさらに外気温度が高温化していくことが予想される。このようなフィードバック過程は、従来の都市気象や建築関係のモデルでは考慮されていない。本研究において新しくこの関係をモデル化し、ビルのエネルギー消費を気象と結びつけて動的に評価できるモデルシステムを作成した。またモデルの計算結果を実測データと比較し、良好な結果を得ることができた。詳細は省いたが、シミュレーションの結果、業務用ビルについては断熱効果がよく、また、ビルの単位容積に対する壁面の面積が低層住宅などに比べて小さいため、上記のフィードバック効果はさほど大きくないことがわかった。低層住宅への適用・検証は未実施であるが、壁面からの貫入熱量が大きいことが予想される。

7. 参考文献等

- 1) <http://www.nire.go.jp/~atmosenv/CO2/taka.html>
- 2) Yamamoto, S., S. Murayama, N. Saigusa and H. Kondo, 1999: Seasonal and inter-annual variation of CO₂ flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan, *Tellus*, **51B**, 402-413.
- 3) 新村典子・杉田倫明, 1999: 熱収支・水収支観測資料 -1998年, 筑波大学水理実験センタ報告, No.24, 107-115.
- 4) Kondo, H., 1989: Description of NPIPR mesoscale model, *Technical Report of National Research Institute for Pollution and Resources No.44*, pp.76.
- 5) 近藤裕昭、劉發華 1998: 1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究, 大気環境学会誌, **33**, 179-192.
- 6) 足永靖信、山本亨、田中稔, 1999: 事務所建物の空調システムの排熱特性に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, **75**, 89-97.
- 7) 資源環境技術総合研究所, 1997: 大都市における夏季高温化対策技術の評価手法の開発, 環境影響予測部研究資料97-1.
- 8) 資源環境技術総合研究所, 1996: 二酸化炭素排出を考慮した我が国のエネルギー将来展望の調査研究報告書, 157 ページ.

[国際共同研究等の状況] 特になし

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

- ① 近藤裕昭、吉門洋、山本晋、水野建樹、劉發華、井上実：日本気象学会春季大会(1996)
「熱輸送過程を考慮した都市環境モデルの構築」
- ② Kondo, H., and Liu Fa-Hua : 13th International Clean Air & Environment conference, Clean Air Society of Australia and New Zealand, Adelaide (Sept. 1996)
“Urban canopy model including heat transfer process” , Proc. p.546-550.
- ③ 吉門洋、近藤裕昭、山本晋、井上実：日本気象学会秋季大会(1996)

- 「市街地における熱収支の観測－特に表面温度と放射環境について」
- ④ 近藤裕昭：大気環境学会モデリング・動態解析分科会(1997)
「夏の都市の気温を決める要因と熱輸送」
 - ⑤ 近藤裕昭、吉門洋、山本晋、他 8 名：日本気象学会春季大会（1997）
「夏の都市の高温の要因について」
 - ⑥ 吉門洋、近藤裕昭、山本晋：第38回大気環境学会年会（1997）
「都市の熱環境に関する研究（8）都心高層ビル街における観測」
 - ⑦ 近藤裕昭、劉發華、井上実、吉門洋：第38回大気環境学会年会（1997）
「都市の熱環境に関する研究（9）都市構造・廃熱分布と気温の関係」
 - ⑧ 近藤裕昭、亀卦川幸浩：第39回大気環境学会年会（1998）
「都市の熱環境に関する研究（10）高層ビルの冷却効果と人工廃熱」
 - ⑨ 近藤裕昭、亀卦川幸浩：第40回大気環境学会（1999）
「都市の熱環境に関する研究（11）－植栽による潜熱の効果－」
 - ⑩ Kikegawa, Y., H. Kondo and H. Yoshikado: 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, Sydney (Nov. 1999)
“A study on the dynamical interaction between thermal environment and building energy consumption in the urban canopy,”
 - ⑪ Kondo, H., Y. Kikegawa, Y. Genchi and S. Yamamoto: 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, Sydney (Nov. 1999)
“Heating in the urban canopy by anthropogenic energy use”
 - ⑫ Kondo, H., and Y. Kikegawa: International Conference on Air Quality Management, University of Burnei (Nov. 1999)
“Temperature variation in the urban canopy with anthropogenic energy use”
 - ⑬ 近藤裕昭、亀卦川幸浩：日本気象学会秋季大会（1999）
「人工廃熱による都市キャノピーの温度変化」
 - ⑭ 吉門洋、亀卦川幸浩：日本気象学会秋季大会（1999）
「都心高層ビル屋上と地上における気温測定」
 - ⑮ 亀卦川幸浩、近藤裕昭：日本気象学会秋季大会（1999）
「夏期都市キャノピーにおける気温変化とビルエネルギー消費の関係」
 - ⑯ 亀卦川幸浩、近藤裕昭、玄地裕：第16回エネルギー・システム・経済・環境コンファレンス（2000）
「民生エネルギー需要への影響を考慮した都市高温化対策評価手法の開発」
- (2) 論文発表
- ① 近藤裕昭、劉發華：大気環境学会誌、33、3、179-192（1998）
「1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究」
 - ② Kondo, H., and Y. Kikegawa：Pure and Applied Geophysics (2000年1月投稿)
“Temperature variation in the urban canopy with anthropogenic energy use”
 - ③ 亀卦川幸浩、玄地裕、吉門洋、近藤裕昭：エネルギー・資源（2000年2月投稿）
「建築物空調エネルギー需要への影響を考慮した都市高温化対策評価手法の開発」
- (3) 出願特許、受賞等　なし