

都市熱環境と建物空調負荷を評価するための 数値予測手法の開発

田村英寿¹・平口博丸²

¹正会員 工修 主任研究員 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

E-mail : tamtam@criepi.denken.or.jp

²正会員 工博 上席研究員 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

本研究では、都市街区の熱環境と街区内の個々の建物冷房負荷を同時に予測する手法を開発するとともに、開発した手法により、単純化された街区内の一つの業務ビルに「壁際の空調室外機の屋上移動(空調移動)」または「芝による屋上面の全面緑化(屋上緑化)」を施した場合の効果予測を試みた。その結果、建物の冷房省エネ効果に関して、(1)建物高さが高くなると空調移動の効果は大きく屋上緑化の効果は小さくなる、(2)都心と湾岸のそれぞれの気象境界条件下での計算結果を比べると湾岸の方が空調移動の効果が大きく現れやすい、といった両施策の効果特性に関する基本的な知見が得られた。

Key Words : heat island, cooling load, roof greening, anthropogenic heat, numerical simulation

1. はじめに

都市化の進展に伴うヒートアイランド現象は、熱中症による搬送人員数の増加や冷房エネルギー消費量の増大をもたらす要因として、近年注目されている¹⁾。わが国では、平成16年3月に「ヒートアイランド対策大綱」が発表され、対策技術導入に向けての本格的な取り組みが始まりつつある。また、地方自治体においても、例えば東京都は、平成13年に特定規模以上の新規建物の屋上緑化を義務づける条例を施行するとともに、平成14年に発行された環境基本計画²⁾の中で熱帯夜日数削減の具体的な数値目標を設定している。

効果的なヒートアイランド対策を検討するにあたって、数値シミュレーションは対象地域の地理・気象的な特性を踏まえて導入効果を事前に予測できる有用な手法である。これまでに、都市全域^{3),4)}などや都市街区^{5),6)}など、個々の建物周辺⁷⁾などを対象として、風速や気温、比湿の分布を予測する数値モデルの開発や適用が行われている。また、上記のような屋外熱環境に注目した解析の一方で、屋外気温と建物内の冷房排熱との相互作用に着目した数値モデルの開発や適用も進められている⁸⁾⁻¹⁰⁾。こうした手法は、

屋外熱環境緩和に加えて冷房省エネの観点からも効果的な施策を検討できる実用性の高い評価ツールであると考えられる。しかしながら、様々な施策の特性比較を含め、こうした観点からの施策の効果に関する基本的な検討は未だ十分になされているとはいえない。

本研究では、筆者らがこれまでに開発した屋外熱環境予測を目的とした数値モデルなどをもとに、街区の熱環境と建物冷房負荷を同時に予測する手法を開発した。また、開発した手法を排熱制御および建物表面改変に関する2種類の施策に適用して、両者を比較しつつ、これらの基本的な効果特性を把握することを試みた。

2. 数値モデルの概要

筆者らはこれまでに、都市圏全域および都市街区を対象として、気温・風速等を予測する三次元数値モデルをそれぞれ開発した^{11),12)}。また、占部・中野(2000)¹³⁾は、個々の建物の周辺熱環境と冷房負荷を予測する数値モデルを開発している。本研究では、これらのモデルをもとに、都市街区内の熱環境と街区内の個々の建物の冷房負荷を同時に予測する

手法を開発した。以下に、各モデル（詳細は既報を参照）およびこれらをもとに開発した手法の概要を述べる。

(1) 都市全域スケールモデル（都市モデル）の概要¹¹⁾

数10～数100km四方程度の都市域全体を対象として、上空約5kmまでの風速・温位・比湿および地表・地中の温度を非定常的に計算する。大気運動方程式には静力学平衡が仮定される。大気の計算格子の大きさは、水平方向が1～数km、鉛直方向が地上付近で約10m、上空で数100mであり、鉛直方向には地形に沿った座標系が設定される。地表の熱収支計算には、放射や風に及ぼす建物の凹凸効果をマクロ的にモデル化し、建物間の気温・比湿を計算できる都市地表面モデルの適用が可能である。

(2) 都市街区スケールモデル（街区モデル）の概要¹²⁾

数100m四方程度の都市街区を対象として、短波・長波放射や風に及ぼす個々の建物の効果を考慮しつつ、上空1～2kmまでの大気中の風速・温位・比湿および建物・道路等の表面や躯体内部の温度を非定常的に計算する。大気の計算格子の大きさは、水平方向が10m程度、鉛直方向が地上付近で数m、上空で数十mであり、地形は平坦であると仮定する。大気の方程式には、静力学近似を仮定しないモデル、浮力効果を考慮したk-εモデルが用いられる。

(3) 建物スケールモデル（建物モデル）の概要¹³⁾

側方に周期境界条件を用いて、一つの建物の周辺熱環境や室内冷房負荷を非定常的に計算する。屋外の気温・比湿については、接地層上端の値を境界条件として、都市キャニオン内の平均値が計算される。表面の放射・熱収支は、屋上、壁、窓、道路それぞれ数m四方の部位毎に計算される。室内については、屋上・壁・窓からの伝熱、日射（建物内床面の加熱）、換気、潜熱（換気によって取り込まれた比湿の除去）、室内発熱を考慮した冷房負荷および空調室外機からの放出熱量が計算される。

(4) 街区熱環境と建物冷房負荷を同時に予測する手法（同時予測手法）の開発

上述の街区モデルと建物モデルとを連携させ、図-1に示すように、各モデルの計算結果を他方の計算条件として受け渡しつつ、街区の熱環境と街区内の個々の建物冷房負荷を同時に予測する手法を開発した。また、都市モデルの計算結果をもとに街区モデルの計算境界条件（側方と上端の温位・比湿・風速）を設定できるようにした。

計算の手順としては、まず街区モデルによる計算を一通り実施して24時間分の計算結果を求め、1時間毎の計算結果（気温、比湿、屋上・壁の表面温度など）を建物モデルの屋外条件として受け渡す。続いて、この入力条件を用いて建物モデルによる解析を実施して24時間分の計算結果を求め、1時間毎の計算結果（空調室外機からの排熱量、室内温度など）を街区モデルの入力条件として受け渡し、街区モデルによる計算を再度実施する。こうして、1時間毎の建物冷房負荷の計算結果がほぼ変化しなくなるまで2つのモデルによる計算を交互に実施することによって、街区熱環境と建物冷房負荷の均衡解を得る。

なお、街区モデルには、換気の効果や日射・伝熱に及ぼす窓の効果が考慮されていない。そこで、換気や窓の効果を考慮した差分熱量を建物モデルから計算し、街区モデルの建物表面に熱のシンク（またはソース）分として付加する。この方法により、例えば窓から取り込まれた日射熱が屋上の空調室外機から放出されるといった熱的效果を模擬的に表現することができる。

3. 事例解析の概要および計算条件

図-2に示すような、幅50m、高さ15m（5階建て）または30m（10階建て）の業務ビルが30m間隔で東西5棟×南北5棟並んだ単純化された街区に、前章で述べた同時予測手法を適用した。空調室外機からの排熱が全壁面から均等に放出され、屋上緑化がなされていない場合を施策導入前の基本状態として、

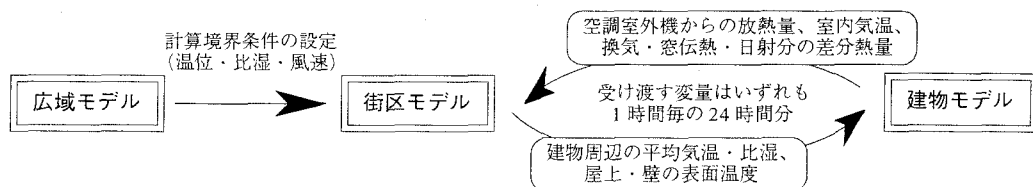


図-1 既開発モデルの連携による同時予測モデルの概要

領域中央の建物に

- 1) 壁際の空調室外機の屋上への移動（空調移動）
- 2) 芝による屋上面の全面緑化（屋上緑化）

をそれぞれ導入したときの屋外熱環境緩和および建物省エネ効果の評価を試みた。計算条件は表-1,2に示す通りであり、屋上緑化については、表-1の地表パラメータの他、蒸発効率を0.2（緑化前は0.0）とした。室内の電力・給湯エネルギー消費に伴う熱負荷は文献値¹⁴⁾をもとに8月の事務所の値を設定した。

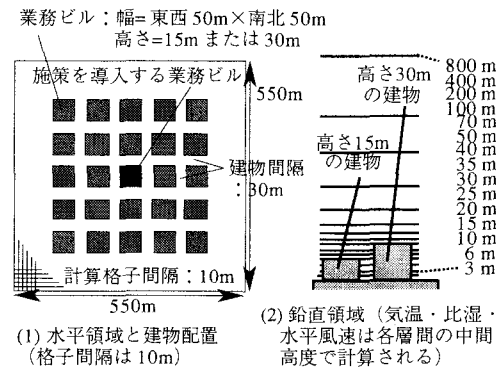


図-2 街区モデルの計算領域

表-1 建物や道路に関する計算条件

		比熱 [J/cm ³ /K]	熱伝導率 [W/m/K]	短波 反射率 [-]	層厚 [m] ×層数
屋上	コンクリート	1.900	1.40	0.1	0.1×2
	断熱材*	1.900	0.0511	-	0.1×1
屋上 緑化	土壌	3.100	1.50	0.1	0.1×2
	コンクリート	1.900	1.40	-	0.1×2
壁	断熱材*	1.900	0.0511	-	0.1×1
	コンクリート	1.900	1.40	0.3	0.1×2
道路	断熱材*	1.900	0.0511	-	0.1×1
	アスファルト	1.421	0.90	0.1	0.1×3

* 2つのコンクリート層の間に断熱材があると仮定

表-2 建物モデルで設定した計算条件

計算条件	設定方法
壁面のうちの窓占有率	全壁面の25%（東面・西面の20%、南面の60%）
窓ガラスの物性値	厚さ0.01m、熱伝導率0.8[W/m/K]、容積比熱1.9[J/cm ³ /K]、庇・ブラインド無し
空調時の室内条件	気温26℃、相対湿度50%
空調機の成績係数	COP=3.0
空調時の換気率	床面積あたり 4 [m ³ /m ² /hr.]
非空調時の漏気率	室内空間面積あたり 0.1 [m ³ /m ² /hr.]

計算境界条件として設定する気象条件としては、図-3に示す計算領域を対象として、1996年8月のうち晴天弱風の真夏日であった4日間（4,18,22,23日）の平均的な日射量、温位・比湿の鉛直分布、海水温度の条件下で都市モデルによる計算を行った上で、都心（大手町）または湾岸（新木場）の各地点の計算結果をもとに設定した。

検討に先立ち、街区モデルにより屋上緑化に伴う表面温度や熱収支の変化を予備的に調べた。その結果、屋上表面温度の低下量は日中に15℃、早朝に3℃程度であり、屋上からの潜熱輸送の増加量は日中10～16時平均で全天日射量の50%程度であった。これらの数値は、夏季の芝による屋上緑化を対象とした既往の実測結果^{15),16)}とも概ね符合しており、実態に即した結果であると考えられる。

4. 解析結果

(1) 屋上緑化や空調移動の効果

まず、建物高さ15m、都心の気象境界条件を設定した場合の結果を述べる。施策導入前の建物冷房負荷を熱負荷因子別に図-4(1)に示す。日中に換気の負荷が大きく、潜熱の負荷が小さくなるのは、それぞれ屋外の気温が上昇、比湿が減少することによる。

続いて、空調移動または屋上緑化を導入した際の、街区領域中央の建物周辺（ここでは、東西南北の各壁際から10mまでと屋上から5mまでの全空間の平均値と定義する）の気温・比湿および建物冷房負荷の変化量を図-5(1)にそれぞれ示す。空調移動では、比湿はほとんど変化せず、気温が低下し、これに伴い主に換気と窓伝熱の熱負荷が減少することで冷房負荷が減少している。一方の屋上緑化では、建物周辺の気温低下量は空調移動の1/3程度であるが、冷房負荷の削減量は空調移動の3倍以上である。これは、屋上緑化によって屋上表面温度が低下し、屋上

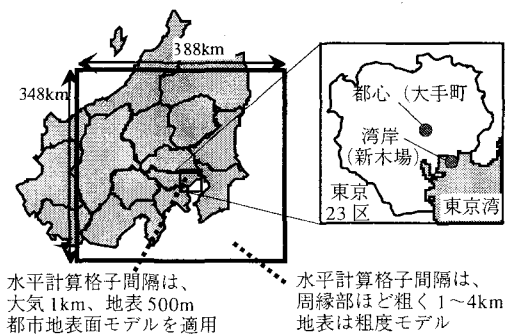


図-3 広域モデルの計算領域

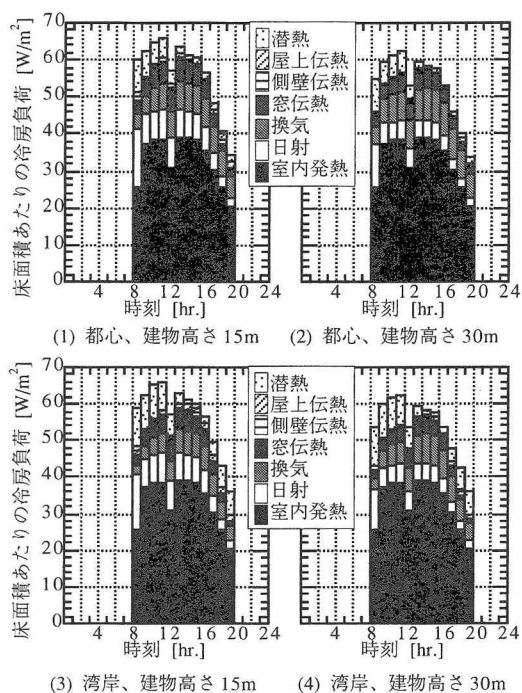


図-4 建物冷房負荷の計算結果

から室内への伝熱量が減少したためであり、この要因が屋上緑化の冷房負荷削減量の大半を占めている。なお、緑化に伴う比湿の増加は潜熱による負荷を逆に増大させる要因となる。

(2) 建物高さによる効果の相違

建物の幅や間隔は同じとしたまま高さ（および階数）を2倍とした場合について検討を行った。結果を図-4(2)、図-5(2)に示す。まず、施策導入前の床面積あたり建物冷房負荷（図-4(2)）は、高さ15mの場合（図-4(1)）よりも約5%小さい。これは、建物間隔が同一であれば建物が高いほど建物側面のうちの日当たりが悪くなるため、日射や窓伝熱による冷房負荷が減少したことが最大の要因である。

施策導入後の変化については（図-5(2)）、空調移動の場合は、建物高さが高くなることでより多くの量の排熱がより高い層に移動するため、気温低下量、冷房負荷削減量とも大きくなり、建物高さ15mの場合（図-5(1)）の約3倍となる。一方、屋上緑化の場合は、室内の容積（床面積）が2倍に増えるにもかかわらず屋上面積は同じであるため、床面積あたりの冷房省エネ効果は逆に小さくなり、建物高さ15mの場合の約半分となる。

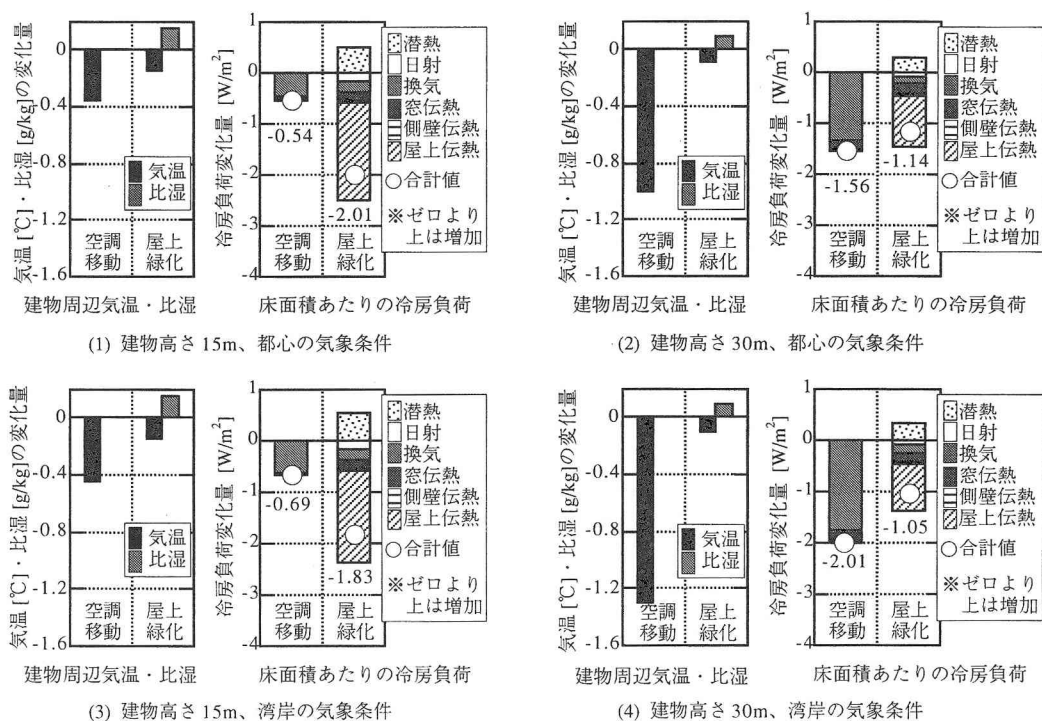


図-5 施策導入に伴う建物周辺気温・比湿および冷房負荷の変化量（日中14-15時の平均）

(3) 地域気象条件による効果の相違

街区モデルの気象境界条件として、都市モデルで計算された湾岸（江東区新木場）の計算結果を設定した場合について、先の都心の条件下での結果と比較した。

施策導入前について、都市モデルで計算された気温・比湿の比較を図-6に示す。湾岸の方が日中の気温は約3℃低く、比湿は逆に約1g/kg多い。なお、図は省略するが、両地点の地上風速はほぼ同じであった。湾岸の気象条件下での建物冷房負荷が図-4(3),(4)である。換気の負荷は気温の高い都心（図-4(1),(2)）の方が大きい、潜熱の負荷は比湿の多い湾岸の方が大きく、これらが相殺しあって日中における両気象条件下での冷房負荷は同程度となっている。

施策導入後の建物周辺気温・比湿および建物冷房負荷の変化量を図-5(3),(4)に示す。都心（図-5(1),(2)）と比較すると、空調移動の冷房省エネ効果は湾岸の方が約20%大きく、屋上緑化の効果は逆に都心の方が約10%大きい。空調移動に関しては、図-7に示すように湾岸よりも都心の方が大気の混合層が発達し、排熱変化の影響が上空に拡散されやすいために地上

付近に現れにくかったと考えられる。屋上緑化に関しては、両気象条件について屋上面の熱収支を較べたところ、湾岸の方が緑化後の潜熱輸送増加量が10～15%小さく、屋上表面温度の低下量も7%（約1℃）小さかった。これは、湾岸の方が比湿が多いため、緑地からの蒸発散が促進されにくく、屋上面が冷却されにくかったためと考えられる。

5. おわりに

本研究では、都市街区の熱環境と街区内の個々の建物冷房負荷を同時に予測する手法を開発するとともに、単純化された都市街区内の建物に空調移動または屋上緑化を施した場合の効果を実測した。その結果、以下の基本的な知見を得ることができた。

- 1) 屋上緑化による気温低下量は空調移動の約1/3倍であるが、屋上緑化によって屋上から室内への伝熱量が減少するため冷房省エネ効果は約3倍である。
- 2) 建物高さを2倍にすると、空調移動ではより多くの熱がより高い場所に移動するため冷房省エネ効果は約3倍になるが、屋上緑化では緑化面積は変わらず床面積が2倍になるため、冷房省エネ効果は約1/2倍となる。
- 3) 都心と比べて湾岸では、大気成層が安定し排熱影響が地上に現れやすいため空調移動の冷房省エネ効果は約20%大きい、比湿が多く緑地からの蒸散が促進されにくいため屋上緑化の効果は約10%小さい。

謝辞：本研究で使用した同時予測手法の一部である建物モデルは、電力中央研究所システム技術研究所の占部亘主任研究員が開発したものであり、本研究の実施にあたり快く提供していただいた。また、独立行政法人建築研究所の足永靖信上席研究員には、手法の開発にあたり多くの貴重な助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省ヒートアイランド実態解析調査検討委員会：平成12年度ヒートアイランド現象の実態解析と対策のあり方について報告書、2001。
- 2) 東京都環境局総務部企画課：東京都環境基本計画、2002。
- 3) Kimura, F. and Takahashi, S. : The Effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area : A numerical experiment, *Atmospheric Environment*, Vol.25B, No.2, pp.155-164,

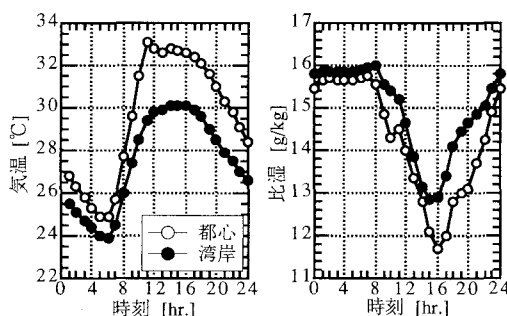


図-6 都市モデルで計算された建物間レベルの気温（左）・比湿（右）の時間変化

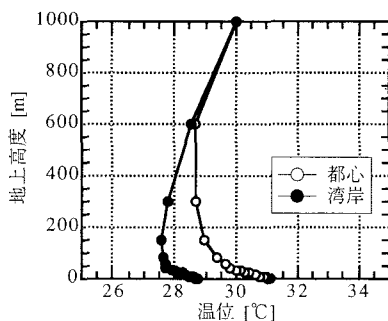


図-7 14時の大気温度鉛直分布（街区モデル境界条件）

- 1991.
- 4) 重光泰宗・佐藤歩・中辻啓二・村岡浩爾：大都市とその沿岸の土地利用の変化と人工排熱が大気環境へ与える影響の評価，土木学会第2回地球環境シンポジウム講演集，pp.69-75，1994.
 - 5) 赤川宏幸，小宮英孝，大塚清敏：地域開発における熱環境評価，環境システム研究，Vol.24，pp.586-592，1996.
 - 6) 浅枝隆・藤野毅・ウタンカ・足永靖信：都市キャノピーモデルの街区スケールへの適用，水文・水資源学会誌，第10巻4号，pp.308-318，1997.
 - 7) 吉田伸治・村上周三・持田灯・大岡龍三・富永禎秀・金相進：CFDによる屋外の気流分布と温熱環境に対する緑地の影響の検討，第15回風工学シンポジウム，pp.91-96，1998.
 - 8) 足永靖信・ウタンカ・浅枝隆：ヒートアイランド現象の緩和による冷房エネルギー消費の抑制に関する解析的研究，土木学会第8回地球環境シンポジウム講演論文集，pp.229-234，2000.
 - 9) 浦野明，稲井康弘，花木啓祐：街区における熱環境改善計画の効果に関する熱収支・エネルギー解析，環境システム研究論文集，vol.29，pp.253-262，2001.
 - 10) 亀卦川幸浩・玄地裕・大橋唯太・近藤裕昭：電源・空調システムの構成が夏季の都市熱環境に及ぼす影響，第19回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集，pp.69-74，2003.
 - 11) 田村英寿・水島雅文：東京23区を対象とした建物間気温への人工排熱影響に関する数値実験，環境システム研究論文集，第28巻，pp.63-68，2000.
 - 12) 田村英寿・平口博丸：都市街区を対象とした熱環境予測モデルの開発および実測との比較，第30回環境システム研究論文発表会講演集，pp.279-284，2002.
 - 13) 占部亘・中野幸夫：ビル周辺歩道の湿潤舗装による冷房負荷の削減効果ービルのエネルギー消費に及ぼす都市熱環境の影響評価ー，電力中央研究所研究報告，T00063，2001.
 - 14) 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・設計と評価，1994.
 - 15) 梅干野晃，萩原賢二：屋上の芝生植栽による照り返し防止・焼け込み防止効果，日本建築学会建築環境工学論文集，pp.133-140，1983.
 - 16) 小宮英孝，三小田憲司：屋上緑化による熱環境の改善，土の環境圏，第2編，第6章，第5節，フジ・テクノシステム，pp.598-607，1997.

DEVELOPMENT OF NUMERICAL PREDICTION METHOD FOR EVALUATION OF URBAN HEAT ENVIRONMENT AND COOLING LOAD IN BUILDING

Hidetoshi TAMURA and Hiromaru HIRAKUCHI

In this paper, a new analysis method is developed to predict air temperature, air humidity and wind velocity in a block of urban area and cooling load of each building simultaneously. This analysis method is applied to a simplified urban block with regularly arranged office buildings. Numerical experiments are executed for evaluating two measures, the one is to move heat discharger of air-conditioner from wall to roof, and the other is roof greening. Numerical results exhibit the effect of these two measures on heat environment and cooling load with the different condition of building height and meteorological inflow air.