

研究論文

街区構造に応じた高温化対策の導入が 都市空調エネルギー需要に及ぼす影響

Impacts of City-Block-Scale Countermeasures for Urban Warming Phenomena
upon Buildings' Energy Consumption for the Artificial Air Conditioning

亀卦川 幸浩* · 玄地 裕** · 近藤 裕昭*** · 花木 啓祐****
Yukihiko Kikegawa Yutaka Genchi Hiroaki Kondo Keisuke Hanaki

(原稿受付日2001年2月13日, 受理日2001年8月3日)

Abstract

This study quantifies the possible impacts of urban warming countermeasures upon buildings' energy use in summer Tokyo metropolis. Considering the dependency of around-buildings air temperature upon the local urban canopy structure, Tokyo urban canopies were classified in the city-block-scale using the sky view factor (svf). Then, a multi-scale model system describing the interaction between buildings' energy use and urban meteorological conditions was applied to each classified canopy.

In terms of urban warming alleviation and cooling energy saving, simulations suggested that the reduction of the air-conditioning anthropogenic heat could be the most effective measure in office buildings' canopies, and that vegetative fraction increase on the side walls of buildings in residential canopies. The both measures indicated daily and spatially averaged decreases in near ground summer air temperature of 0.2 to 1.2°C. The simulations also suggested these temperature decreases could result in the buildings' cooling energy savings of 4 to 40%, indicating remarkable savings in residential canopies. These temperature drops and energy savings tended to increase with the decrease of svf of urban canopies.

1. はじめに

21世紀は都市の世紀である。2000年, 世界人口(61億人)の47%を占めた都市人口は, 2030年に60%へ達し, この間の世界人口の増分(20億人)の90%以上が, アジア等の途上国都市人口の増加による, との予測¹⁾が存在する。以上の都市化は, 「規模と集積の経済」²⁾がもたらす地域経済の自己組織化の過程であり, この都市への社会経済活動集積に伴い顕在化した地域環境問題の一つとして, 都市高温化問題が位置づけられる。都市高温化は, 冷房熱需要増加に伴う電力需要の夏季偏在化や, 化石燃料消費の増大を誘発し, 地球環境の視点からも対策を要する課題とされつつある。一方, 高温化は暖房熱需要を削減し, 通年で都市省エネに寄与するとの見解もある³⁾。しかし, 今後巨大化するアジア, アフリカの低緯度都市では暖房需要が小さく, 高温化が一方的エネルギー需要増大を招く危険性が高い。

以上, 都市高温化対策は, 民生エネルギー需要削減策として, 汎地球的に検討されるべき課題である。しかし, この点を論じた既往研究は, 建築単体での検討に止まるもの⁴⁾や, 気象条件と建築側熱収支の動的相互作用過程を考慮していない事例⁵⁾が多く, 対策による空調熱需要への影響を都市スケールで動的に評価した例は存在しない。また, 各対策は, 都市内の全地域で有効な対策とは限らず, 例えば, 日が当たらない街路を緑化したところで蒸散冷却は期待できない。即ち, 対策の有効性は街区構造に依存し, その場の気温形成要因を考慮した対策配置が必要となる。

そこで, 本稿では都市気温形成要因の空間的多様性(地域性)に着目し, 夏季東京23区を対象に, 高温化対策の都市内配置とその空調エネルギー需要への影響に関し検討した。

2. モデルの住宅建築に関する検証

検討には著者らの夏季都市高温化対策評価モデル⁶⁾を用いた。同モデルは, メソスケール広域気象モデル(MM), 街区キャノピー気象モデル(CM), ビルエネルギー・廃熱解析モデル(BEM)のサブモデルより成る。CMとBEMは, 街区気象に対する建物冷房エネルギー消費の応答とその結果生ずる廃熱変動の外気温フィードバック過程を動的に表現する。一方, MMは海陸風等の広域現象の街

* 株式会社総合研究所 環境・資源エネルギー研究部主事研究員
〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3 竹橋スクエア
E-mail: kike@cyg.fuji-ric.co.jp

** (独)産業技術総合研究所 LCA研究センターエネルギー評価チーム研究員
*** 環境管理研究部門大気環境評価研究グループ長
〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-3

**** 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻教授
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

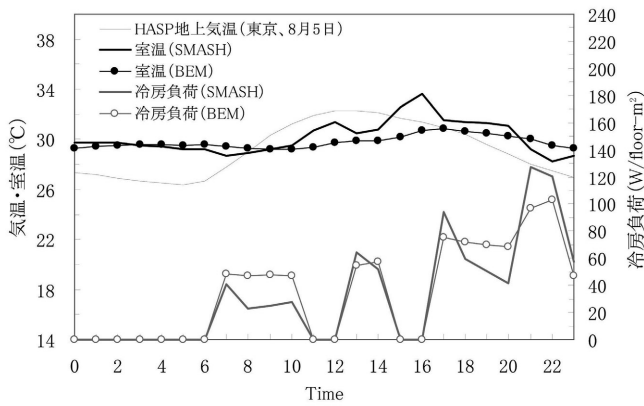


図1 室温・冷房負荷シミュレーション結果の比較 (SMASH vs. BEM)
[建築モデル: IBEC-RC造集合住宅標準プラン・無断熱壁ケース]

区気象への影響を表現するCM大気初期・境界条件を生成する。著者らは、この結合モデル（以降MM-CM-BEMと略す）を夏季東京大手町へ適用し、各種実測との比較により、その事務所街区での妥当性を検証した⁷⁾。

本研究では都市スケールでの対策評価を目指した。都市の主要建築は住宅と事務所系建物であり、東京23区では両建物が延床面積比で80%以上⁸⁾（住宅60%、事務所21%）を占める。よって、モデルを都市全域へ適用する為には、事務所街区に加え住宅街区にてその検証が必要とされた。そこで、サブモデル中、建築条件への感度が最大となるBEMを対象に、その住宅への適用妥当性の検証を行った。

BEMの検証は、住宅空調熱負荷計算用の標準的市販ソフトであるSMASH⁹⁾との比較数値実験による。対象建物としては、RC造集合住宅の標準的建築モデル¹⁰⁾を採用し、外壁は無断熱とした。その他、冷房温度等の条件はSMASH側の標準設定に従い、気象条件はHASP標準気象データより東京最暑日条件を選択した。これら共通条件下での室温・冷房熱負荷の計算結果を図1に示す。BEMの室温はSMASHと日平均ではほぼ一致した（平均室温差0.4℃）。BEM側での室温振幅の減少は、同モデル上での室温が間仕切壁・床の熱容量までも加味した屋内平均温度である⁷⁾という物理モデルの相違に依った。冷房熱負荷についても、朝・晩のピーク時に多少の不一致が認められたものの、BEMはSMASH上での日変化を概ね再現可能であった。なお、著者らは、このBEMについて、同モデル上での冷房熱負荷の外気温への夏季ピーク時応答感度が住宅街区にて妥当に再現される事を、東京23区域冷房電力需要の夏季地域別気温感応度実態値との比較を通じ検証している¹¹⁾。

多数室熱収支の連成モデルであるSMASHに比し、BEMは建物を単室 (BOX) として扱う簡易熱収支モデルである。以上、両モデルの精度度の差も勘案すれば、街区気象に対する建物冷房エネルギー需要の応答表現モデルとして

のBEMの住宅街区でのパフォーマンスは十分と考えられた。

3. 気温形成要因に基づく街区形状の類型化

3.1 大気熱収支を特徴づける街区形状パラメータの導出

都市気温場形成のメカニズムは、同一の都市にあっても街区により異なる。気温形成に関わる主因子は、街区への日射熱入力、人工廃熱、街並みの熱容量や風通しであるが、各因子の影響度合いは街区構造に応じ変化する。最適な高温化対策とは、その場の支配的な気温形成因子を対象としたものである。よって、対策の都市内配置の最適化に向けては、街区構造と気温形成要因の関係についての知見が必要となる。この点について、ビル密度等、街区構造の気温への影響を解析可能なMM-CM-BEM上の大気熱収支基礎式に基づき考察を加えた。

MM-CM-BEM上、街区大気鉛直1次元非定常気温予測式（大気熱収支式）は以下のように表される⁷⁾。

$$C_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = -C_p \rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{H}{C_p \rho} \right) - C_p \rho (\alpha \overline{V_M}) \cdot \vec{\nabla} \theta_M + Q_A + Q_V + Q_W + Q_R \dots (1)$$

式中、右辺各項は大気温度時間変化（左辺）に寄与する加熱・冷却項（単位は $W \cdot m^{-3}$ ）を差し、第1項は大気乱流に伴う顕熱鉛直拡散、第2項は海陸風等の広域風侵入に伴う冷却・加熱を表す。他項は、街区構成物からの顕熱輸送を表し、 Q_A : 人工廃熱、 Q_V : 建物換気に伴う交換顕熱量、 Q_W : 建物側壁面からの顕熱輸送量、 Q_R : 屋根面からの顕熱輸送量、である。これら加熱・冷却項の算定手法の詳細に付いては、著者らの既報^{7), 12)}を参照されたい。この他、 $C_p \rho$ [$J m^{-3} K^{-1}$]: 空気熱容量、 θ [K]: 気温、 H [$W m^{-2}$]: 鉛直乱流拡散顕熱流、 $\overline{V_M}$ [ms^{-1}]: MM上の風速ベクトル、 θ_M [K]: MM上の気温、 α [-]: 街区内風速減衰率、を指す。

(1) 式を地上 ($Z=0$) から街区内の最大建物高度 ($Z=Z_i$) までの範囲にて鉛直積分する事で、次式が導かれる。

$$\frac{1}{Z_i} \int_0^{Z_i} C_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = \frac{1}{Z_i} (H_G - H_T) + \overline{Q_V} + \overline{Q_A} + \overline{Q_W} + \overline{Q_R} \dots (2)$$

ここで、 $\overline{Q_*} = \frac{1}{Z_i} \int_0^{Z_i} Q_* dz$ ($*$ =A, V, W, R), $\overline{A_V} = -\frac{1}{Z_i} \int_0^{Z_i} [C_p \rho (\alpha \overline{V_M}) \cdot \vec{\nabla} \theta_M] dz$ である。

また、 $H_G = H_G|_{Z=0}$, $H_T = H_T|_{Z=Z_i}$ は、地表および街区大気上端での乱流顕熱流 [$W m^{-2}$] (街区平均値) を指す。以上の街区キャノピー空間における大気熱収支の模式図を図2に示す。(2) 式は、図中に示したキャノピー気柱の単位体積あたりでの街区平均熱収支を表す。ここで、各熱源項は街区形状との関係において、更に以下のように定式化できる。

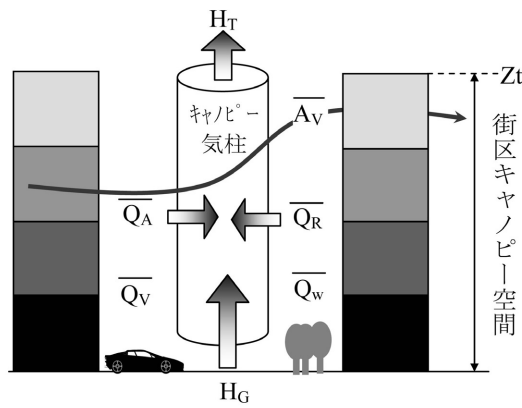


図2 キャノピー大気熱収支の概念図

$$\overline{Q_w} = A_w H_w, \quad \overline{Q_r} = A_r H_r, \quad \frac{1}{z_t} H_g = A_g H_g \quad (\because \frac{1}{z_t} = A_g) \quad \dots (3)$$

上式は、側壁、屋根、地表面からの加熱量 [W・m⁻³] (各式左辺) を、それら各キャノピー被覆面上での街区平均の顕熱流 [W・m⁻²] (H_w, H_r, H_g) と各被覆面積 (A_w, A_r, A_g) の積として表現したものである。但し、A_w, A_r, A_g はキャノピー単位空気体積あたりでみた各被覆面積 [m² m⁻³] である。また、残りの熱源項についても以下の定式化が可能である。

$$\overline{Q_a} = A_f q_a, \quad \overline{Q_v} = A_f (C_p \rho A V \Delta T) \quad \dots \dots \dots (4)$$

人工顕熱 ($\overline{Q_a}$) は、本研究が民生部門での高温化対策を検討対象とする事から建築冷房廃熱に着目し、q_a [W/m²] (単位床面積あたりの建物内エネルギー消費量) とA_f [m² m⁻³] (キャノピー単位空気体積あたり床面積) の積として近似した。また、換気交換熱 ($\overline{Q_v}$) は、単位床面積あたり交換熱量 (C_pρAVΔT) とA_fの積とした。なお、AV [air-m³/floor-m²/s] : 単位床面積・単位時間あたり換気空気量、ΔT [K] : 室温と外気温の平均温度差、を指す。

(3), (4) 式を (2) 式へ代入する事で、次式が導かれる。

$$\frac{1}{z_t} \left(C_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) dz = A_g H_g - A_g H_r + \overline{A_v} + A_f q_a + A_f (C_p \rho \cdot av \cdot \Delta T) + A_w H_w + A_r H_r \quad \dots (5)$$

3.2 天空率に基づく街区形状の類型化

本稿では、東京23区を対象に既存の街区幾何学構造の保存を前提とした対策評価を行う。ここで、夏季街区大気的主要加熱源は (5) 式によれば、街区被覆面からの顕熱輸送と冷房廃熱であり、よって、被覆面冷却と廃熱削減対策を評価対象とする。この他、広域移流の効果 (A_v) に関しては、街路再配置による海風導入策等も考えられるが、街区形状改変を伴う故、本検討ではA_vを統制条件として扱い、対策評価の対象外とする。この時、上述加熱源の気温形成への寄与度には (5) 式のA_g, A_r, A_w, A_fが関係し、それらの大小関係に基づき対策検討が可能と考えられる。

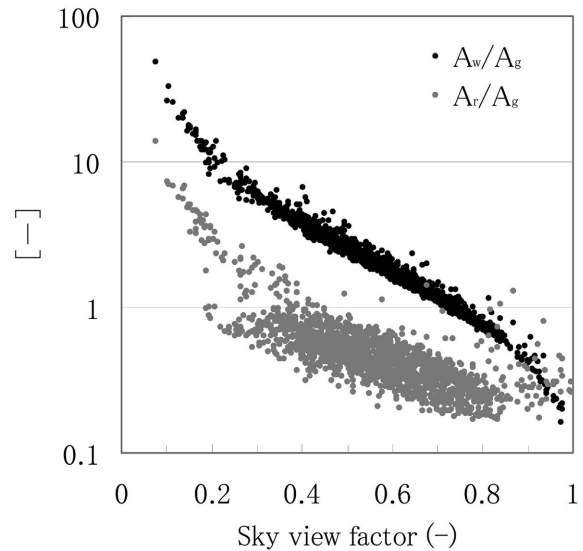


図3 天空率と街区表面積 (A_r, A_w, A_g) の関係

この点について、23区街区構造を対象に検討した。23区域に対し1/2地域緯経度メッシュ¹³⁾を適用し、同域を約500m四方の街区メッシュへ分割、各メッシュ平均のA_w, A_r, A_g, A_fを算出した。この際、東京都GISデータ⁸⁾に基づき、平均道路・建物幅、高度別建物存在割合を考慮した。結果を図3に示す。同図は街区毎のA_gに対するA_w, A_rの比と街区天空率の関係を表す。ここで、天空率とは、地面から見上げた空の形態係数を指し、上空日射のうち街区地表面まで到達する日射量の比率を支配するパラメータである。また、天空率はA_w, A_r, A_g, A_fの関数でもある。図3中、A_w/A_g, A_r/A_gは共に天空率と負の相関を示し、天空率≤0.8のレンジ (23区全街区の93%が含まれる) では、A_w + A_r ≥ A_gの関係が満たされている。即ち、街区表面冷却を考えた場合、天空率≤0.8の街区では建築面対策が有効である一方、天空率>0.8の街区では地表面対策が効果的と予想される。また、A_fも天空率と負の相関関係を示し

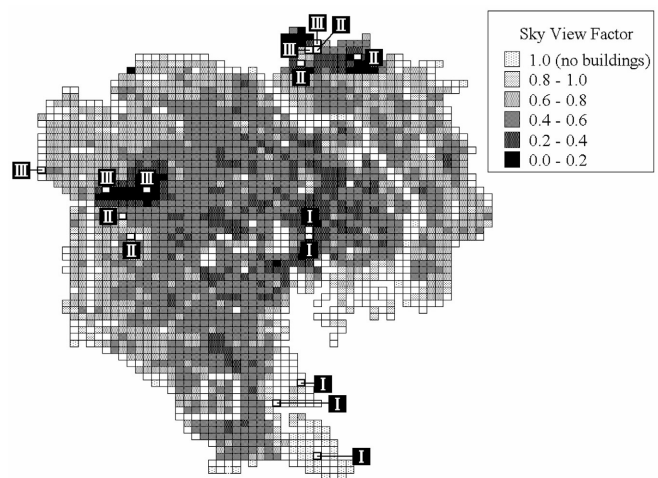


図4 メッシュ平均天空率と計算対象街区の分布(東京23区域) (計算対象街区：I→TYPE-I街区，II→TYPE-II街区，III→TYPE-III街区)

(図省略)，天空率小の街区での廃熱削減の有効性が示唆された。なお，ここでの街区天空率は，建物密集度を考慮したCM上での計算に依った。その23区域での計算結果を図4に示す。

以上，街区気温形成要因の推定と，それに基づく高温化対策検討に際し，天空率が有効な一指標となる可能性が示された。天空率を用いる事で，高温化対策の都市内配置検討の観点より街区形状の類型化が可能と考えられた。

4. 街区構造の違いを考慮した対策効果の検討

4.1 計算条件

前節で示唆された天空率の対策検討指標としての有効性を確認すべく，MM-CM-BEMによる23区数値実験を行った。

対象街区の選択は，天空率に加え，街区建物構成に基づいた。構成建築種の変化に伴う断熱性等の計算条件の相違を考慮すべく，23区の500mメッシュ街区を，GISデータ上の建物用途と建築構造（耐火造か否か）の街區別構成に基づき表1の4種類（I～IV）へ分類した。そして，モデル妥当性が確認済みの事務所街区（I）と住宅街区（II，III）より天空率レンジ（レンジ刻み0.2）毎にA最大（建物廃熱最大）の街区を抽出し，3（I～III）×5（天空率レンジ数）=15街区を選択した。それらの分布を図4に示す。

以上15街区を対象とした数値実験の計算条件を表2～4に示す。表2は，高温化対策を導入しない基準ケース（CASE-0）設定である。表中，空冷型冷房熱源については，そのCOPの部分負荷率と外気温への依存性¹⁴⁾を考慮した。地中熱物性等，記述を割愛した他の条件は文献⁷⁾に従った。一方，建築壁熱物性は，TYPE-I～III街区の各建物について文献より引用した標準建築モデル上の壁体構造に基づき設定した（表3の標準ケース）。住宅については，23区域での耐火造比率³⁾（集合住宅：69%，戸建：15%）を考慮し，耐火造（TYPE-II）としてRC造集合住宅，非耐火造（III）として木造戸建の建築モデルを引用した。なお，これら住宅の標準ケースでは，無断熱と次世代省エネ基準相当断熱（表3の高断熱化ケース）の中間断熱

表1 建物用途・構造に基づく街区分類（東京23区域）

街区 TYPE	建物用途 ^{注1)}	耐火造比率(%) ^{注2)}		建物構造 ^{注3)}	該当メッシュ数
		平均	標準偏差		
I	事務所街区	96.6	3.6	耐火造	112
II	住宅街区	59.1	16.7	耐火造	1047
III				非耐火造	467
IV	その他街区	87.8	9.6	耐火造	293

注1)事務所，住宅街区とは，床面積ベースで50%以上を事務所，住宅が占める街区。その他街区は，事務所，住宅とも構成比50%未満。
 注2)500mメッシュ街区毎の建物耐火造比率の23区内統計値。
 注3)耐火造比率でみて，平均 - 3×標準偏差 ≥ 50% なら耐火造街区。住宅街区は50%未満の為，建物の過半が耐火造ならTYPE-II，それ以外をTYPE-IIIへ分類。

表2 無対策ケース（CASE-0）における計算条件

設定項目	TYPE-I 街区	TYPE-II & III 街区
冷房熱源構成	電動空冷ヒートポンプ:70% ¹⁵⁾ 都市ガス駆動冷温水発生機:30% ¹⁵⁾	電動空冷パッケージエアコン:100%
廃熱源配置	空冷室外機:各階(顕熱放出) 水冷冷却塔:屋上(潜熱放出) (自動車:地上からの顕熱排出)	室外機:各階(顕熱放出)
被覆構成	側壁:窓比率=30%(TYPE-I)，=18%(TYPE-II & III) 地表・屋根面を含め他の面はコンクリート面と仮定	
被覆放射特性	アルベド:コンクリート面 0.2，窓面 0.4 放射率:窓以外 0.97，窓面 0.87	

表3 壁体熱物性の設定(熱容量は壁体単位断面積あたりの値)

建築種	建築モデル	適用街区	部位	標準ケース		高断熱化ケース	
				熱貫流率 (Wm ⁻² K ⁻¹)	熱容量 (J・m ⁻² ・K ⁻¹)	熱貫流率 (Wm ⁻² K ⁻¹)	熱容量 (J・m ⁻² ・K ⁻¹)
事務所	IBEC ¹⁶⁾	I	全壁	0.68	3.11×10 ⁵	0.38	2.12×10 ⁵
RC造	IBEC ¹⁶⁾	II	屋根	1.35	3.79×10 ⁵	0.39	3.81×10 ⁵
集合住宅			外壁	1.94	3.97×10 ⁵	0.72	3.98×10 ⁵
木造戸建	建築学会 ¹⁷⁾	III	屋根	1.54	2.60×10 ⁴	0.23	2.95×10 ⁴
住宅			外壁	1.65	2.84×10 ⁴	0.56	2.97×10 ⁴

表4 シミュレーションにおける対策ケース設定

Case	対策内容	計算条件
A1	冷房廃熱削減	冷房廃熱 50%削減
A2	(廃熱の大気外放出)	冷房廃熱 100%削減
B1	地表・建築面 冷却 (高アルベド化)	地表面
B2		屋根面
B3		側壁面(窓除く)
C1	地表・建築面 冷却 (緑化 [※])	地表面
C2		屋根面
C3		側壁面(窓除く)
D1	建築空調負荷削減	内部発熱削減
D2	削減	外壁高断熱化

※対策面アルベド=0.15，対策面の水蒸気輸送コンダクタンス=5mm/sec

性能を想定した（事務所高断熱化ケースは断熱層厚倍増を仮定）。表4は高温化対策のケース設定である。廃熱削減策としては，土壤熱源型地域冷暖房システム¹⁸⁾の導入等により可能となる冷房廃熱の大気外放出（CASE-A1&A2）を想定した。また，被覆面冷却策は，地表，屋根，側壁別に日射反射率向上（高アルベド化：B1～B3）と緑化（C1～C3）を設定した。ここで，緑化面積率等のこれら対策の導入レベル設定に際しては，既往の評価事例を参考とし，主に技術的観点よりその実現性に配慮した。また，ここでの緑化とは，保水性建材等の導入も含む広義の被覆面湿潤化対策を指す。対策面の蒸発性能は，牧草地相当（蒸発効率=0.2～0.4）¹⁹⁾とした。この他，CM大気の初期・上端境界条件と広域風移流に伴う冷却・加熱率については，文献⁷⁾より1998年8月の大手町上空のMM計算結果を採用し，街区キャンピ外部の大気条件を全街区共通の設定とした。

4.2 対策による街区気温緩和効果

地上気温でみた対策効果の街區別シミュレーション結果を街区分類毎に図5に示す。対策効果はCASE-0に対する街区日平均地上気温（高度3m）の増減量として示してある。

街区被覆面冷却による効果は，緑化ケース（CASE-C1

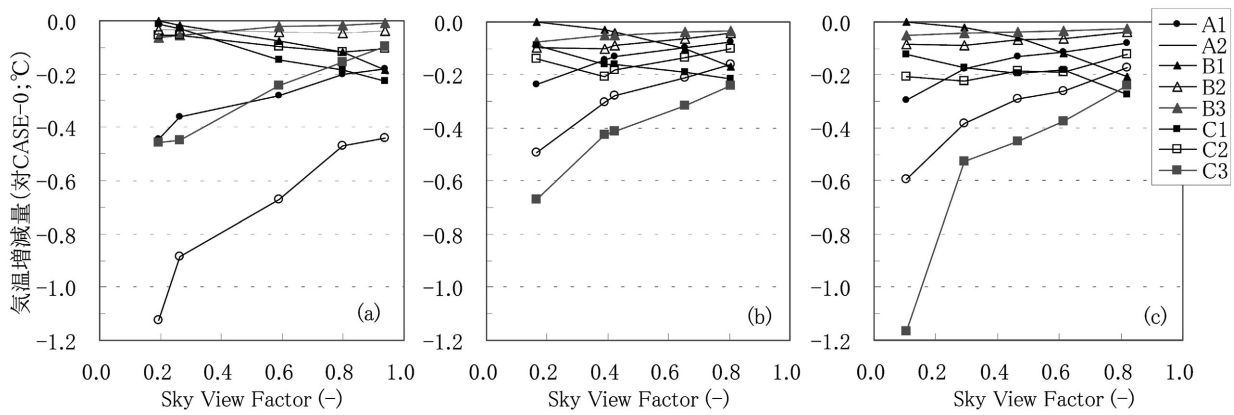


図5 各対策による日平均地上気温の増減
(a) TYPE-I 街区群, (b) TYPE-II 街区群, (c) TYPE-III 街区群

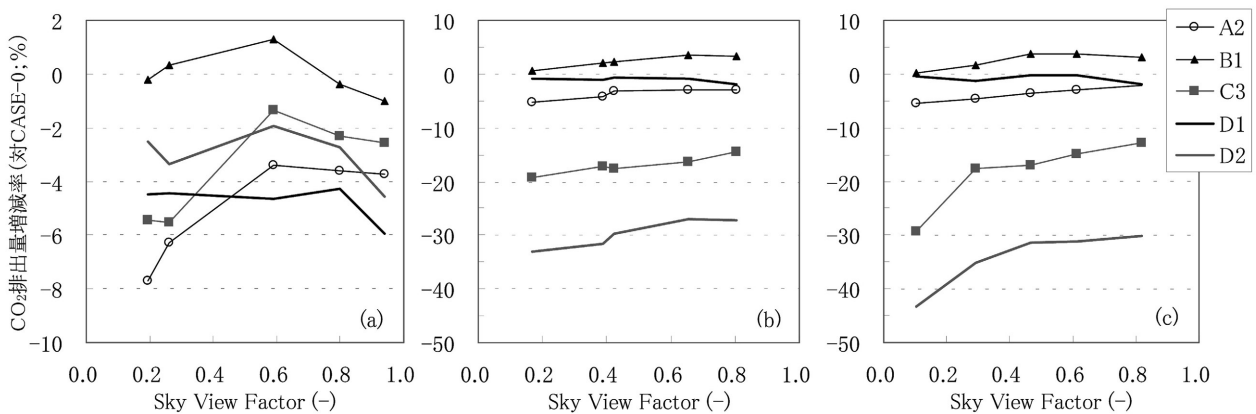


図6 冷房熱源エネルギー消費起源CO₂の排出量の増減 (計算期間積算値ベース)
(a) TYPE-I 街区群, (b) TYPE-II 街区群, (c) TYPE-III 街区群

~C3)において顕著である一方、高アルベド化 (B1~B3) による気温低減量は、いずれの街区でも0.2℃以下に止まる。緑化ケース中、街区天空率と特徴的な関係を示すのは、地表面緑化 (C1) と側壁面緑化 (C3) に伴う気温低減であり、前者は天空率増大と共に増加、後者は減少し、天空率0.8程度で両効果が等しくなる。一方、建物冷房廃熱の削減 (大気外放出) による気温降下量は街区天空率と負の相関を示す (A1, A2)。これら対策効果の街区天空率との関係は、前章のA_w, A_r, A_g, A_tの天空率依存性と整合する。

また、各種対策効果は、天空率のみならず街区建物構成によっても変化する。全天空率レンジの平均でみた場合、いずれの街区群においても最大の気温低減を示す廃熱削減策はCASE-A2、被覆面冷却策のそれはC3となり、TYPE-I 街区での両ケースによる平均気温降下は、0.72℃、0.28℃であった。一方、TYPE-II 街区にてそれらは0.29℃、0.41℃、TYPE-III 街区では0.34℃、0.55℃となった。即ち、事務所街区では、建物冷房廃熱の削減が被覆面冷却と比較し有効である一方、住宅街区ではその優位性は低下し、逆に側壁面緑化による効果が最大となった。ここでのCASE-0の冷房廃熱 (全街区日平均) は、TYPE-I 街

区で133.0W/m² (単位地表面積あたり) に達したが、TYPE-II と III 街区では41.5W/m²と58.5W/m²に止まった。この廃熱量減少により住宅街区でA2の効果が低下する結果となった (自動車廃熱は全街区10W/m²程度であった)。なお、事務所街区での廃熱削減策の優位性は、天空率レンジ毎にA_r最小 (廃熱最小) の街区群を対象とした場合も同様であった (図省略)。

以上、東京23区の場合、住宅街では側壁緑化、事務所街では冷房廃熱削減、が有効な夏季地上気温緩和策であり、両対策は天空率が小さな街区ほど有効と推察された。但し、23区の約7%を占める天空率>0.8の街区中には、地表緑化が最良となる例外街区の存在が予測された。以上の結果は、天空率の高温化対策検討指標としての有効性を支持した。

5. 対策が建物冷房エネルギー需要に及ぼす影響

表4の各種対策導入に伴う街区冷房エネルギー需要増減量のMM-CM-BEM計算結果を図6に示す。同図は、評価対象とした廃熱削減、高アルベド化、緑化の対策群毎に最大の地上気温緩和 (図5) を示したCASE-A2, B1, C3での計算結果の比較である。冷房エネルギー需要の増減は、単位床面積あたり街区平均として算出された冷房熱源用の

電力・都市ガス消費に伴うCO₂排出量基準での比較であり、CASE-0を基準とした。ここで、電力、都市ガスのCO₂排出原単位は文献²⁰⁾より、0.39kg-CO₂/kWhと0.23kg-CO₂/Mcal（日本平均）を用いた。対策中、CO₂排出量でみて最大の冷房熱源エネルギー需要削減を示すのは、事務所街でA2、住宅街でC3であり、両対策効果は概ね天空率と負の相関を示した。以上は、地上気温緩和の計算結果（図5）と整合した。住宅街区（TYPE-II、III）でのC3のCO₂削減率は平均17.7%でA2（同3.7%）の約5倍に達し、両対策の地上気温緩和量（C3：0.48℃、A2：0.31℃）を考慮すると、C3で際立った省エネが見られた。これは、A2の省エネが廃熱削減による気温低下がもたらす冷房熱負荷削減に依ったのに対し、C3では、側壁面顕熱流減少による同様の効果に、壁体温度低下に伴う直接的熱負荷削減が加わった為であった。なお、C3の熱負荷削減は、緑化による外気湿度上昇に伴う換気潜熱負荷増大も加味した結果であった。

これらA2、C3に対し、B1では逆に冷房熱源エネルギー需要の増大が住宅街区を中心に認められた。各高アルベド化対策下での、全街区建物における窓面透過日射量（街区別平均）の増減を図7に示す。ほぼ全街区にて、CASE-0

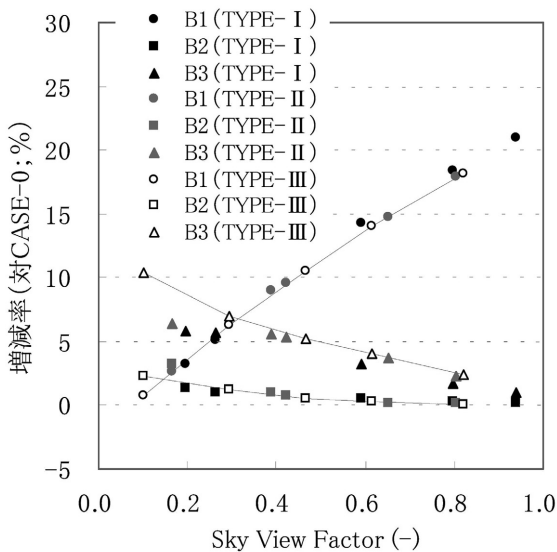


図7 各対策下での窓面透過日射（日平均）の増減

に対し透過日射量は増加していた。これは、高アルベド化により増光した街区表面反射光の窓面透過（透過率は事務所0.3、住宅0.5と設定）による。この透過光増加に伴う冷房熱負荷増大が、高アルベド化がもたらす気温低下に伴う熱負荷削減を上回り、B1で冷房エネルギー需要の増加が見られた。高アルベド化については、ロサンゼルス（LA）を対象とした評価事例²¹⁾が存在し、LA表面アルベドの倍増により、夏季昼間気温2℃低下、LA全体で冷房電力需要10%削減と予測されている。同結果は、街区キャンピーを考慮しないメソスケール気象モデルによる。これに対し、MM-CM-BEMは、地表面の高アルベド化が必ずしも街区内の冷房省エネに結びつかない可能性を示した。

以上の街区高温化対策を、従来型の冷房省エネ対策と比較すべく、対策ケースとしてCASE-D1とD2を追加した（表4）。D1は、非空調用の一般電力需要の10%削減（高効率照明採用による照明電力20%削減を想定）による内部発熱低減策であり、D2は壁体高断熱化策（表3の高断熱化ケース）である。両ケースの計算結果を図6に示す。事務所街区（TYPE-I）ではD1のCO₂削減率が大きく、街区平均で4.8%（一般電力削減分含まず）に達し、A2（4.9%）と同等でD2の効果（3.0%）を上回った。一方、住宅街区（TYPE-II&III）では、反対にD2の平均CO₂削減率（32.0%）がD1（1.0%）を凌駕し、C3（17.7%）は両者のほぼ中間に位置した。この、D1、D2の省エネルギー性の逆転は、事務所、住宅間での熱負荷構造の相違（図8）に依った。事務所（TYPE-I 建築）では内部機器発熱が支配的であるのに対し、住宅（TYPE-II&III）では壁体貫流熱の寄与が大きく、これにより前者ではD1、後者ではD2が最大の省エネルギー性を示した。

6. まとめ

都市気温形成要因の地域性に着目し、街区構造を考慮した夏季高温化対策の都市内配置とその建物冷房エネルギー需要への影響について検討した。検討には著者らの夏季都市高温化対策評価モデルを用い、事務所街にて検証済みで

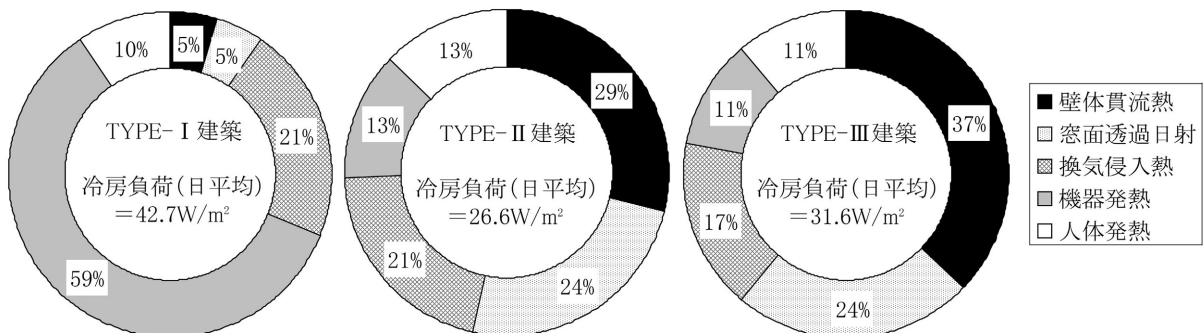


図8 CASE-0における冷房熱負荷の平均構成

あった同モデルを都市全域へ適用すべく、その住宅への適用妥当性を合わせて検証した。次に、モデル上の気温予測物理式に基づき、大気熱収支構造の街区形状依存性に関し考察した結果、街区気温形成要因の推定と、それに基づく対策検討に際し天空率が有効な指標となる事が示唆された。

この事を検証すべく、東京23区より天空率レンジ、構成建築種別に対象街区を抽出し、冷房排熱削減、街区被覆面の高アルベド化と緑化を対策として想定し、夏季条件下にて数値実験を行った。その結果、23区の90%以上を占める天空率0.8以下の街区中、事務所街区では冷房廃熱削減、住宅街区では側壁面緑化、が有効な夏季気温緩和策である事が示された。日平均地上気温降下量でみた両対策効果は、前者の平均が0.7℃、後者0.5℃であり、共に天空率減少につれ増大する傾向を示した。以上、評価対象とした対策中、気温緩和効果でみて最良であった両対策は、建物冷房エネルギー需要の削減においても最大の効果を示した。事務所街区での冷房廃熱削減は、内部発熱削減、高断熱化による従来型対策と比較しても同等以上の約5%に達する冷房熱源エネルギー需要の削減効果を示した。また、住宅街区での側壁緑化も、高断熱化の約半分にあたる20%程度の省エネ効果を示す実効的対策であった。一方、街区高アルベド化策は窓面透過光を増大させ、地表面への対策導入時においては必ずしも省エネに寄与しない可能性が示された。

以上、天空率を街区形状の指標とし、建物構成も考慮する事で、街区構造に適し、冷房省エネルギー性とも矛盾しない夏季高温化対策の選定が可能と考えられた。ここでの、高層業務街から低層住宅街までの多種多様な街区構造を有する東京23区域での有効性が確認された対策評価手法は、国内の他都市域への適用も可能と考えられる。著者らは、この全国規模での検討に向け、各種対策導入に伴う影響の広域気候へのフィードバック、および冬季暖房需要への影響を合わせてモデル化し、通年かつ広域スケールの対策評価手法への拡張を進めていく予定である。

参考文献

- 1) United Nations Population Division; World urbanization prospects, the 1999 revision (2000).
- 2) 佐々木公明, 文 世一; 都市経済学の基礎, (2000), 253, 有斐閣.
- 3) 平野勇二郎, 茅 陽一; 環境システム研究, 26 (1998), 527-532.
- 4) 近藤靖史, 他 2 名; 空気調和・衛生工学会論文集, 78 (2000), 15-24.
- 5) H. Taha et al.; Theoretical and Applied Climatology, 62 (1999), 175-185.
- 6) H. Kondo and Y. Kikegawa; Temperature variation in the urban canopy with anthropogenic energy use, Pure and Applied Geophysics (accepted in November 2000).
- 7) 亀卦川幸浩, 他 3 名; エネルギー・資源, 22-3 (2001), 235-240.
- 8) 東京都都市計画局編; 東京の土地利用 (1998), 52.
- 9) 建築環境・省エネルギー機構; SMASH for Windows Ver.2 ユーザーマニュアル (2000), 191.
- 10) 建築環境・省エネルギー機構; 住宅の新省エネルギー基準と指針, (1992), 181.
- 11) 亀卦川幸浩, 他 3 名; 第28回環境システム研究論文発表会講演集, (2000), 357-364.
- 12) 近藤裕昭, 劉 發華; 大気環境学会誌, 33 (1998), 179-192.
- 13) 国土地理院; 数値地図ユーザーズガイド (1998), 471.
- 14) 足永靖信, 他 2 名; 空気調和・衛生工学会論文集, 75 (1999), 89-97.
- 15) 建築設備技術者協会; 1994年建築設備情報年鑑 (1994).
- 16) 建築環境・省エネルギー機構; 建築物の省エネルギー基準と計算の手引, (1998), 402.
- 17) 日本建築学会環境工学委員会熱分科会; 熱シンポジウム-伝熱解析の現状と課題, 15 (1985).
- 18) 玄地 裕, 他 3 名; エネルギー・資源, 20-6 (1999), 60-67.
- 19) 近藤純正; 水環境の気象学, (1994), 350, 朝倉書店.
- 20) Y. Matsuno and M. Betz; The International Journal of Life Cycle Assessment, 5-5 (2000), 295-305.
- 21) H. Taha; Energy and Buildings, 25 (1997), 99-103.

協賛行事ごあんない

「マイクロ波効果・応用国際シンポジウム —21世紀の革新的グリーンテクノロジー—」

〔主催〕 (財)産業創造研究所, (財)日本産業技術振興協会

〔協賛〕 マイクロ波応用研究会, 日本電磁波応用研究会, 奈良教育大学

〔期日〕 2002年11月21日(木)~23日(土)

〔会場〕 奈良県新公会堂

〔連絡先〕 〒113-0034 東京都文京区湯島1-6-8

(財)産業創造研究所 (担当; 芹生尚之, 水野利佳子)

TEL: 03-5689-6361 FAX: 03-5689-6360 e-mail: MW_symp@iri.or.jp