典型的夏季晴天日を対象とした 大気部熱収支構造の定量評価に基づく都市内部の熱収支 MAP の試作

—気候数値解析に基づく都市気候の地域特性の定量化 (その2)—

PROPOSAL OF “HEAT BALANCE MAP” BASED ON EVALUATION OF HEAT BALANCE IN EACH REGION INSIDE A CITY IN TYPICAL SUMMER DAYS

—Evaluation of regional characteristics of heat island based on climatic analysis (Part 2)—

佐々木 澄*, 吉田知弘**, 持田 灯***, 渡辺浩文****, 吉野 博*****

Kiyoshi SASAKI, Tomohiro YOSHIDA, Akashi MOCHIDA,

Hironori WATANABE and Hiroshi YOSHINO

This study aims to clarify the regional characteristics of heat balance in an urban space inside a city. Since most of major cities in Japan are located in coastal areas, special attention is paid to the contribution of sea breeze to the heat balance in urban area. The spatial distribution of heat budget inside Sendai is drawn, as “heat balance map” using the numerical data provided by the analysis of mesoscale climate. This map shows the areas where the influence of sea breeze is larger than those of heat generated from ground surface and artificial heat release. In such areas, it is effective to introduce sea breeze into urban space by matching the building arrangement with wind conditions. Furthermore, the effects of urban planting and high-albedo surfacing on heat island reduction were evaluated based on the climatic analyses. Inside the urbanized area, the effects of urban planting and high-albedo surfacing are relatively large. But the effects of sea breeze are more important than those of planting and high-albedo surfacing in the coastal side. The mechanism that causes these differences was discussed by comparing the heat budgets in the four sub-domains set inside the urbanized area.

Keywords: Urban Climate, Regional Characteristics, Heat Balance, Sea Breeze, Heat Balance MAP

都市気候、地域特性、熱収支分析、海風、熱収支 MAP

1. 序

近年、様々な地域でヒートアイランド現象が進行しているが、ヒートアイランド対策の効果は地域の気候特性により大きく異なる。この問題に対し、筆者等は、東京を対象として都市空間の熱収支構造の分析を行うとともに¹⁾、東京とは地理的条件や都市の規模の異なる仙台市、福島県原町市等の地方都市との比較を通じて、各都市中心部の都市気候形成メカニズムの相違について定量的に分析し、各都市の特性に応じた効果的なヒートアイランド対策の選定方法について検討してきた²⁾。

都市気候の地域特性を考える場合、既報²⁾で分析した都市間の差だけでなく、一つの都市内部における各地域の気候特性の差についても考える必要がある。つまり、同一都市内においても、沿岸部と内陸部では都市空間の気候形成に大きく関与する要因は異なっており、このような相違を正しく理解することが、各地域に有効なヒートアイランド対策を提案する上で重要となるものと考えられる。

従来より、都市気候の地域特性の把握を目的とした研究は多くなされてきた。武政・小玉ら^{3) 4)}は、日本全国を対象とした AMeDAS データに基づく建築設計用地域気候マップの作成を行っている。また、西川ら⁵⁾は SPD データ、AMeDAS データにより気象マップ、自然エネルギーポテンシャルマップの作成を行い、九州地方の地域特性について詳細に検討している。しかしながら、都市気候の地域特性の把握には AMeDAS データ等の空間分解能では不十分であると考えられる。特に、風はきわめて局所性が高く、現在の観測網の空間分解能より得られるデータから大気流動の結果として形成される温湿度の詳細な空間分布を把握することは難しく、さらに細かい空間分解能での検討が必要である。岩井ら⁶⁾は長野市等の内陸都市における詳細な都市気候実測により、土地利用・標高と気候の関係について分析し、内陸都市の内部において形成される都市気候の地域特性について分析している。また、近年、東京都では 100 点以上の測定点を有する気象観測システム (METROS) が整備され、局地性の

* 清水建設 博士(工学)

** 東北大学大学院工学研究科 大学院生

*** 東北大学大学院工学研究科 助教授・工博

**** 東北工業大学工学部建築学科 助教授・工博

***** 東北大学大学院工学研究科 教授・工博

Shimizu Corporation, Dr. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Eng., Tohoku University

Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Tohoku University, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Faculty of Eng., Tohoku Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Eng., Tohoku University, Dr. Eng.

強いヒートアイランド現象の実態把握のためのデータが採取されつつあり、三上⁷⁾はこの結果を利用して都内の気温分布の特徴を分析する等、都市内部の気候特性を把握・分析しようとする試みもなされつつある。これらの観測データによる分析から、気温分布等の地域特性はある程度把握できるものの、気温上昇に大きく影響を及ぼす要因を特定することは困難である。これに対して、近年佐藤ら⁸⁾はメソ気候の数値解析結果を利用して、東京首都圏内の3地域（埼玉県南部、都心3区、内房）の熱収支構造の相違に関する興味深い結果を示している。しかし、都市全体の環境計画への応用、各地域の特性に応じたヒートアイランド対策の推進を考えると、特定の地域だけでなく、都市内部の各地域における気候形成メカニズムの面的な把握・評価が必要である。

一方、近年都市環境の計画やヒートアイランド対策立案のための基礎資料として都市環境気候図（クリマアトラス）が注目されており、その整備が進められている^{9)~11)}。従来の都市環境気候図は観測データを中心に作成されてきたが、最近の気候数値解析技術の成果を利用すれば、都市気候形成メカニズムの時・空間分布を定量的に把握するためのツールへと発展させることが可能であると期待される。

本研究は、気候数値解析技術の特性を利用し、これを都市環境設計のプロセスの中に適切に組み込み、合理的な決定を行うための方法論の構築を目指した研究の第一歩と位置づけられる。都市表面の緑化や日射反射率の調整、海風や川風の市街地への導入策のようなヒートアイランド対策は、都市空間の気温低下を促進するように都市空間の熱収支構造に変更を加えようとする試みであると言えることができる。従って、各地域において実効性の高いヒートアイランド対策を行うためには、各地域の都市空間の熱収支構造の特徴を明らかにする必要がある。本研究では、一つの都市内の各地域に対して、気温上昇をもたらす主要な要因や気温低下に利用可能な要因を数値解析に基づく都市空間の熱収支分析¹²⁾により抽出する方法を提案するとともに、都市内部の各地域における熱収支構造の諸量に関する時・空間的な分布を表示する方法を検討したものである。筆者らは文献 12) で熱収支構造の空間分布を定量化した一例を示しており、本報は、その内容をさらに深めたものである。

2. 数値解析概要

2.1 解析対象

東北地方の中核都市である仙台市とその周辺地域を対象とした。解析では図 1 に示す 3 段階 Nested grid system を採用した。最小 Grid（Grid3）で仙台市をクローズアップして解析を行っている。なお、図 1(1)中の数値は NOAA の衛星画像¹³⁾の測定結果を基に設定した海水温である。また、解析領域、メッシュ分割数及び水平方向のメッシュサイズを表 1 に示す。解析の詳細は文献 2) を参照されたい。

図 1(2)に示す 3 地域（内陸部、中心部、沿岸部）に熱収支の評価のための Control Volume（C.V.1~3、東西 2km×南北 2km×鉛直 80m）を設定し、仙台市内における熱収支構造の地域特性の分析を行った。また、ヒートアイランド対策が熱収支構造に与える影響を評価するために、仙台都市部に C.V.4（東西 8km×南北 12km×鉛直 80m）を設定し熱収支構造の変化を分析するとともに、さらにこの C.V.を水平方向に

(1) 各段階の解析領域 (2) Grid3 と設定した C.V.の位置
図 1 各段階の解析領域

表 1 解析領域、メッシュ分割数、メッシュ幅

	領域 (X×Y×Z) [km]	メッシュ分割数	水平方向 メッシュ幅[km]
Grid1	400×360×9.6	50×45×49	8
Grid2	120×120×9.6	60×60×49	2
Grid3	30×30×9.6	60×60×49	0.5

表 2 設定した気象条件、初期条件

項目	仙台
温位分布	地表面高さにおいて 25℃ (298.15K) とし、鉛直温位勾配には 0.005K/m を与えた
上空風・風速	上端 (9600m) において南東の風 4.0m/s とし、ベキ指数 0.3 のベキ乗則により鉛直方向に分布を与えた。水平方向には一様とした。
水蒸気分布	地表面での相対湿度を 70% とし、高さ 3km までは McClatchey の大気モデル ¹⁹⁾ に従い、それ以上では相対湿度を 0 とした
雲量	0.15 (快晴を想定)
海水面温度	図 1(1)参照。

表 3 現状を想定した地表面パラメータ (夏季)

項目	アルベド [-]	粗度長 [m]	熱拡散係数 [m ² /s]	容積熱容量 [J/m ³ ·K]	蒸発効率 [-]
田	0.20	0.050	0.67×10 ⁻⁶	3.0×10 ⁶	0.5
畑	0.10	0.010	0.40×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁶	0.3
果樹園	0.20	1.000	0.30×10 ⁻⁶	1.8×10 ⁶	0.3
その他の樹木畑	0.20	0.500	0.30×10 ⁻⁶	1.8×10 ⁶	0.3
森林	0.15	2.000	0.15×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁶	0.3
草地	0.20	0.010	1.40×10 ⁻⁶	1.9×10 ⁶	0.3
建物用地	0.10	1.000	2.30×10 ⁻⁶	2.1×10 ⁶	0.0
幹線交通用地	0.10	0.010	2.00×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁶	0.0
その他の用地	0.20	0.010	1.00×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁶	0.3
河川地及び湖沼	0.03	0.001	0.60×10 ⁻⁶	4.2×10 ⁶	1.0
海浜	0.30	0.005	0.74×10 ⁻⁶	2.9×10 ⁶	0.6
海水域	0.03	0.001	0.70×10 ⁻⁶	2.5×10 ⁶	1.0

表 4 解析ケース

	想定した状況	変更したパラメータ
Case1	現状	—
Case2	解析領域内の全ての建物用地全面緑化	建物用地の蒸発効率を 0.0 から 0.3 に変更
Case3	解析領域内の全ての建物用地全面高アルベド化	建物用地のアルベドを 0.1 から 0.6 に変更

4 分割し、それぞれの Sub-domain（北東部、北西部、南東部、南西部）における効果の違い、熱収支構造の違いについて検討した¹⁴⁾。

2.2 解析モデル

複雑地形に適用可能な形に拡張された Mellor-Yamada モデルのレベル 2.5^{14)~16)}を利用した。また、解析には、文献 17) で示した Software Platform に組み込まれている近藤等の開発したメソスケール解析機能¹⁸⁾を使用した。

2.3 解析条件

解析は8月3日午前6時からスタートし、その後42時間の時間積分を行っている。解析はヒートアイランド現象の影響が顕著に現れる海風の卓越する典型的夏季晴天日の気圧配置を対象としている。設定した初期条件を表2に示す。地表面の境界条件として、本研究では国土数値情報²⁰⁾の土地利用データ(100mメッシュ)及び表3に示す各パラメータの値を基に、領域内の地表各メッシュの土地利用状況に応じた数値設定を行っている。初期条件、境界条件の詳細については文献21)を参照されたい。なお、人工排熱の与え方、顕熱・潜熱の配分比に関しては三浦ら²²⁾、渡辺ら^{23) 24)}、下田らの文献²⁵⁾を参考に与えた。

以降に示す水平分布は、解析開始後2日目(8月4日)の13時(計算開始後31時間目)の結果であり、C.V.1~4

(図2中の四角内)における熱収支の評価では、2日目0時(解析開始後18時間目)から3日目0時(解析開始後42時間目)の結果を用いている。また、都市大気部における移流による顕熱の流入出を算出するための基準値には、C.V.内の各時刻の平均気温をそれぞれ用いた²⁶⁾。

2.4 解析ケース

表4に解析ケースを示す。Case1は現状、Case2は解析領域内の建物用地を全面緑化した場合、Case3は建物用地を全て高アルベド化した場合を想定している。本解析では、緑化は水蒸気発生量の増加(蒸発効率 β を0.0→0.3に上昇)で、高アルベド化は日射反射率の増加(アルベドを0.1→0.6に上昇)で簡易に表現している。

3. 仙台市内における熱収支構造の地域特性の定量評価 (Case1)

3.1 仙台市内で形成される気候特性

まず、仙台市の現状を対象としたCase1の結果に基づき、仙台市内の各地域の熱収支特性の比較を行う。8月4日、13時、地上高さ10mにおける風ベクトル分布、気温分布、相対湿度分布を図2(1),(2),(3)にそれぞれ示す。図2(1)から、日中海風が卓越し内陸部まで吹き込んでいる様子が分かる。図2(2)を見ると、海風の影響で沿岸部では気温が低く、中心部と内陸部において気温が高くなっている様子が分かる。また、図2(3)では、海側ほど相対湿度が高く、仙台中心部付近では湿度が低くなっている。

3.2 仙台市内3地域における気温の日変化の比較

図2に示した仙台市内(Grid3)の3地域(C.V.1(内陸部(根白石))、C.V.2

(仙台中心部(東二番丁))、C.V.3(沿岸部(荒井)))の気温変化に関する数値解析結果と観測結果^{26) 注3)}の比較を図3に示す。なお、数値解析結果は各C.V.内の地表に接する大気側の第1メッシュの気温(地上高さ10m)の平均値であり、観測値は抽出した典型的夏季晴天日の気温の平均値である。数値解析は地上高さ10mのメッシュ内空間平均値であり、観測値と定量的に比較できるものではないが、各地域の気温のピークが訪れる時間は概ね対応している。すなわち、沿岸部(荒井)では、海風の影響で他の地域に比べて日中の気温が抑制されている様子が、午前中(12時頃まで)は仙台中心部(東二番丁)で最も高温となるが、15時頃には内陸部(根白石)で最も高温となる様子が、数値解析においても再現されている^{注4)}。

図2 仙台市内で形成される気候特性 (Case1、8月4日13時、地上高さ10m)

図3 仙台市内3地域 (Case1、内陸部(根白石)、仙台中心部(東二番丁)、沿岸部(荒井))の気温変化の比較(8月上旬の晴天日)

図4 C.V.内大気部に移流・乱流拡散・人工排熱成分で流入出する正味の顕熱量と収支量[MW] (Case1、+がC.V.内での顕熱の増加を示す)

図5 C.V.内大気部に移流・乱流拡散・人工排熱成分で流入出する正味の顕熱量と収支量[MW] (Case1、+がC.V.内での顕熱の増加を示す)

以上のように、同一都市内においても地域によって形成される気候が大きく異なっており、各地域の気温上昇・低下に大きく影響する要因を定量的に分析する必要があることが分かる。以降では、熱収支分析により、各要因の気温上昇・低下への寄与度を把握し各地域に有効なヒートアイランド対策を効率的に選定するための方法論について検討する。

3.3 仙台市内3地域における熱収支構造の比較

図4はC.V.1~3(内陸部、中心部、沿岸部の3地域、図1(2)参照)の大気部各面から流入出する正味の顕熱量を、移流、乱流拡散及び、人工排熱の各成分に分けて示したものである。図4の移流、乱流拡散の数値は、C.V.各面(東西南北面、地表面、上空面)の計6面から流入出する熱量の総計であり、人工排熱²⁾はC.V.内で発生する熱量の総計である。なお、併せてこれらの全ての成分を足し合わせた大気部の全顕熱収支量(大気部への蓄熱量、 $\blacksquare$)も示す。各地域とも海風の効果を示す移流による顕熱の減少による気温低減効果が見られ、海側に行くほどその効果が大きくなっていることが分かる。また、人工排熱量は中心部(東二番丁)で最も大きくなっている。

また、図5に既報²⁾で示した東京駅周辺、仙台中心部(東二番丁)、原町中心部における図4と同様のグラフを示す。既報で論じたように、各都市の中心部において気温上昇・低下に影響を与える要因(地表面発熱効果や人工排熱、移流による海風の冷熱輸送効果)の気候形成への寄与の程度が異なる様子が分かるが、図4で比較した仙台市内の3地域においては、図5で比較した3都市間の差よりも大きな差が観察される。すなわち、一つの都市内部においても各種熱的要因が気温上昇・低下に与える寄与の程度が地域ごとに大きく異なり、熱収支構造の詳細な地域特性の把握が必要であることが分かる。

3.4 地域の気候特性を把握するための熱収支構造の空間分布特性のMAP化 - 熱収支MAPの試作 -

3.3節では、仙台市内の代表的3地域の比較を行ったが、以下では、仙台市内の解析領域全体(Grid3)を 60×60 のC.V.で分割し(一つのC.V.のサイズは $0.5\text{km} \times 0.5\text{km} \times 80\text{m}$:水平方向は解析のメッシュサイズに相当、鉛直方向は地表から3メッシュ分に相当)、それぞれのC.V.において熱収支分析を行い、その面的分布を考察する。移流、乱流拡散によりC.V.に流入出する熱量とC.V.内での内部発熱量(人工排熱)を算出し、この結果を用いて、都市内の熱収支構造の地域特

性を定量的に示す「顕熱収支MAP」を作成する。

図6(1)は、13時におけるそれぞれのC.V.の各面(上空面、東西南北各面)から移流により流入出する正味の顕熱量の合計(流入-流出、移流による顕熱収支)を算出し、その空間分布を示したものである。図中の正值を示す領域は移流によりC.V.内に顕熱が増加している地域、負値を示す領域は移流によりC.V.内の顕熱が減少している地域である。図を見ると、13時には解析領域のほぼ全域において負値を示しており、移流によって各地域内の顕熱が減少していることが分かる。特に、沿岸部では海風の影響が強いためその負の絶対値が大きい。

図6(2)は、13時におけるそれぞれのC.V.の各面から乱流拡散により流入出する正味の顕熱量の合計(流入-流出、乱流拡散による顕熱収支)を算出し、その空間分布を示したものである。地表面と大気間の乱流拡散による熱交換量(対流熱伝達量)は日中に正值(C.V.への流入)となり、C.V.上面とその上方間の乱流拡散による熱交換量は日中に負値(C.V.からの流出)となるが、流入と流出の差し引きは図6(2)では、解析領域のほぼ全域において正值を示している。すなわち、13時においてはほぼ全域において乱流拡散の作用により各C.V.内の顕熱が増加している。

次に、各C.V.において移流・乱流拡散で流入出する全ての顕熱量と内部で発生する顕熱の収支(全流入顕熱量+内部での顕熱発生量-全流出顕熱量=全顕熱収支)の空間分布を算出した結果を図6(3)に示す。これが正值を示す領域では気温が上昇し、負値を示す領域では気温が低下する。図中の負値を示す領域は、乱流拡散による顕熱の増加(主に地表面からの熱の流入、図6(2))とC.V.内での人工排熱による顕熱の発生(海風による冷熱の流入、図6(1))の効果が大きい地域と考えられる。沿岸部ほど負値が大きく、海風の気温上昇抑制効果が大きいことが分かる。一方、内陸部では正值となっており、海風の効果が十分には及んでいない地域と考えられる。

図6(4)は、日中の平均(9時~15時の平均)の全顕熱収支(全流入顕熱量+内部での顕熱発生量-全流出顕熱量=全顕熱収支)の空間分布を示している。図6(4)から、日中(9時~15時の平均)において海風の影響が大きい範囲が負値を示す領域として示されているが、このような領域では、建物配置を考慮すること、建物内での通風利用など、日中における海風の冷熱利用による気温低下のポテンシャルが高い地域と考えられる。

図6 仙台市内諸地域の大気部熱収支構造を示す「顕熱収支MAP」[MW]
 各C.V.に移流、乱流拡散で流入する正味の顕熱量「流入-流出」と全顕熱収支、
 8月4日、+が各C.V.内での顕熱の増加を示す。

図7 時刻別顕熱収支 MAP[MW]

(全顕熱収支(移流+乱流拡散+人工排熱)の空間分布特性、8月4日、9時～15時、+が各C.V.内での顕熱の増加を示す。)

3.5 各地域の熱収支構造の空間分布特性の時間変化

解析領域中の9時～15時における、時刻別顕熱収支MAP(全流入顕熱+内部の顕熱発生量-全流出顕熱=全顕熱収支)を図7に示す。9時頃には、地表面からの発熱の影響が大きいため、解析領域のほぼ全域で正值(顕熱の増加)となっているが、10時頃には、沿岸部(荒井)では海風の影響が大きくなるため全顕熱収支の値は負値となり(図7(2))、気温上昇が緩和される(図3(1))。海風の影響が大きい領域は時間が経つごとに内陸部へと拡大していき、12時頃に仙台中心部(東二番丁)、15時頃に内陸部(根白石)に到達して(図7(4),(7))、それぞれ気温上昇が緩和されている(図3(1))。

4. 都市内部の地域特性により異なるヒートアイランド対策の効果の定量評価(Case2とCase3)

—仙台東都市部におけるケーススタディー

3章では現状の仙台市を対象としたCase1の結果を用いて、同一都市内における各地域の熱収支構造の違いを示した。顕熱収支MAPにより、沿岸の地域においては海風の冷熱利用による気温低下の可能性が大きいこと、そして、内陸の地域においては海風の利用以外の対策、つまり土地被覆の改変や人工排熱削減等が優先される可能性が高いことが示唆された。本章では、各地域の熱収支構造の違いによるヒートアイランド対策の効果の違い、及び対策後の熱収支構造の変化について仙台東都市部の各地域を対象として検討する。

4.1 緑化、高アルベド化に伴う地表付近の温度分布の変化

現状に対応するCase1の13時の地表付近の温度分布と、対策ケース(Case2(建物用地全面緑化)、Case3(建物用地全面高アルベド化)、表4参照)と現状との温度差の分布((対策ケース)-(現状))を

図8に示す。なお、図中の白い四角は図1(2)で示したC.V.4の位置を示している。現状を見ると(図8(1))、仙台市都市部(C.V.4、図中の白い四角内)で地表付近の温度が高くなっている。両対策ケースを施した場合(図8(2),(3))の効果は同程度であり、仙台市中心部付近において最大で約3℃の温度低下が見られる。

4.2 C.V.4全体での熱収支構造の変化

図9に図1(2)に示すC.V.4(4つのSub-domainを合わせた8km×12km×80mの領域)の大気部におけるそれぞれ向かい合う面(鉛直の場合、地表面と上空面)の顕熱収支(移流及び乱流拡散による流入量-流出量)を示す。また、C.V.4内から発生する顕熱分の人工排熱量の総量についてもあわせて示す。現状では(図9(1))、鉛直方向の収支量の流入が大きく、水平方向(東西収支、南北収支)の流出が大きい。この水平方向の流出から、仙台東都市部の熱収支に及ぼす海風の効果の影響の大きさがうかがえる。また、東京に比べると人工排熱の寄与の程度は少ないことが分かる。両対策ケースでは(図9(2),(3))、鉛直方向の収支量が約30%減少しており、緑化、高アルベド化の効果が示されている。一方、両対策ケースの結果では、12時以降における水平方向(東西収支、南北収支)への顕熱の流出量が減少している。これは、両対策ケースの効果によりC.V.4内の地表付近の温度が低下し(図8(2),(3))、海風との温度差が減少したことにより、水平方向への海風の冷熱の輸送効果が弱まったことによる所が大きいと考えられる。

4.3 4分割したSub-domain内における都市大気部の熱収支構造の分析

(1) 各Sub-domainでの対策効果の比較

次に、4分割した各Sub-domain(北東部、北西部、南東部、南西

部、図 1(2)参照、一つの Sub-domain のサイズは $4\text{km} \times 6\text{km} \times 80\text{m}$ における気温の空間平均値の日変化を地図上に示す(図 10)。現状の場合(●)、海側(東側)の領域で気温が低くなっている。気温がピーク値を示す 12 時における現状(Case1)に対する緑化と高アルベド化による気温低下量を 4 つの Sub-domain ごとに算出した結果を表 5 に示す。両対策手法ともに、現状に対する気温の減少量は、海側(東側)の領域よりも内陸(西側)の領域で大きいことが分かる。特に北西部では対策手法の効果が大きく現れている。以上のことから、人工被覆率がほとんど同じである仙台市都市部内の各地域において、図 6(4)の顕熱収支 MAP で示唆されたように、沿岸部では海風の利用による気温低下効果が、内陸部では土地被覆の改変による気温低下効果が大きいことが確認された。

(2) 各 Sub-domain での熱収支構造の比較

図 11 に 4 分割した各 Sub-domain (図 1(2)) 内の大気部に流入する顕熱量を、鉛直方向(地上面と上空面の総量)及び水平方向(東西南北の各面からの総量)に分けた結果を示す。なお、流入する顕熱量を流入成分、流出成分に分けて示している。図 11 より、現状では、海側(東側)の領域で全体の熱収支に及ぼす水平方向の熱の流出量の寄与(海風の効果)が内陸側(西側)より大きくなっている。また、緑化、高アルベド化を施した対策ケースでは、東側領域と西側領域の間の水平流出量の差が減少している点も注目される。これは、対策ケースでは東側領域を海風が通過する間の気温上昇が緑化、高アルベド化により抑制され、海風の変質が少なくなったためと考えられる。対策を施した場合、鉛直流入量(主に地表面発熱量)の減少はあるが各領域間での

減少量(現状-対策ケース)の差はほとんど見られない。すなわち、水平移流による熱の流出効果が大きい海側(東側)の領域では、緑化、高アルベド化による地表面発熱減少の効果は相対的に小さいものとなっているが、水平移流の効果が小さい内陸側(西側)の領域では、地表面発熱の減少の効果が相対的に大きくなっている。以上

表 5 現状に対する 12 時の気温低下量 [°C]

Sub-domain	緑化 (Case2-Case1) [°C]	高アルベド化 (Case3-Case1) [°C]
北東部	-0.37	-0.74
南東部	-0.28	-0.53
北西部	-0.76	-1.21
南西部	-0.46	-0.87

(1) Case1 (現状)

(2) Case2-Case1
(建物用地全面緑化-現状)

(3) Case3-Case1
(建物用地全面高アルベド化-現状)

図 8 地表面付近の温度分布、温度差分布[°C] (8月4日、13時)

図 9 C.V.4 の向かい合う面の顕熱収支と人工排熱 (+が C.V.の大気部に流入する向き) [MW]

図 10 4 つの Sub-domain の平均気温の日変化
(8月4日) [°C]

図 11 4 つの Sub-domain 内大気部の顕熱収支の日平均値
(水平方向は東西南北各面からの総量 (8月4日) [MW])

のことから、ヒートアイランド対策としては、海風の効果の大きい海側（図 10 中の北東部、南東部）では海風の導入が最も効果的と考えられる。一方、内陸側では、緑化、高アルベド化による地表面発熱の減少の影響が相対的に大きいので、図 10、表 5 に示したように、その効果が東側の領域より大きくなるものと考えられる。

5. 結論

本研究では、既報²⁾に続き、都市間の違いのみならず都市内部における各地域の熱収支構造の違いを定量評価する方法を示し、これに基づいて各地域の気温上昇を抑えるのに有効なヒートアイランド対策を選定する方法を検討した。今回の検討では、仙台市内の各地域に熱収支構造の評価空間を設定し、熱収支分析により得られる情報の有用性を確認することができた。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 同一都市内においても、例えば沿岸部、中心部、内陸部などの立地条件の違いによって、異なる都市間で見られるような熱収支構造の地域特性の違いが見られる。
- (2) 詳細な各地域の熱収支構造の特性を把握するため、顕熱収支構造の空間分布を示す“顕熱収支 MAP”を作成する方法を示した。
- (3) 特に、仙台市内全域を対象とした検討から、地表面発熱や人工排熱による気温上昇効果よりも、海風による気温低減効果の方が大きい“海風の影響範囲”を明確に示すことができた。
- (4) さらに、顕熱収支 MAP の時間変化により、仙台市内各地域における気温変化のパターンの違いが説明できることを確認した。
- (5) “顕熱収支 MAP”により示唆された各地域の熱収支構造の違いによる対策の効果の違いを検証するため、緑化、高アルベド化を施したと想定した場合の仙台都市部内における対策の効果と熱収支構造の関係について分析した。
- (6) 仙台市都市部を 4 分割し、緑化、高アルベド化の効果を比較し、東側（海側）よりも西側（内陸側）においてその効果が大きいという結果を得た。
- (7) さらに、その原因を 4 分割した各 Sub-domain の熱収支構造の比較、特に海風の影響に伴う水平方向の熱収支の変化から定量的に明らかにした。

謝辞

本研究は、2004 年度財団法人住友財団環境研究助成金（代表：持田灯、気候数値解析に基づく都市環境のマイクロゾーニングとこれを利用した都市環境デザイン）の助成を受けた。ここに記して謝意を示します。

表 6 C.V.4(仙台都市部)内の各 Sub-domain における土地利用割合[%]

	北東	北西	南東	南西
田	10.4	1.1	14.8	6.9
畑	4.4	0.5	6.0	4.0
果樹園	0.2	0.0	0.0	0.1
その他の樹木	0.0	0.0	0.1	0.0
森林	7.6	17.4	0.2	18.3
荒地	0.9	1.1	0.0	1.7
建物用地	56.3	60.8	55.0	48.9
幹線交通用地	4.7	3.2	7.6	4.1
その他の用地	13.1	12.9	11.5	13.5
内水地	2.4	2.8	4.7	2.4
海浜	0.0	0.0	0.0	0.0
不明	0.0	0.0	0.0	0.0
計	100.0	100.0	100.0	100.0

注

注1) 今回の検討では、対策に顕著な効果が見られると考えられる人工被覆率の比較的高い領域（C.V.4、仙台市中心部とその周辺）を対象とした。また、C.V.4 を 4 分割した各 Sub-domain における土地利用割合を表 6 に示す。建物用地の割合を見ると各 Sub-domain ともほとんど同じ割合を示しており、緑化、高アルベド化可能面積の違いによる気温低下効果の違いはそれ程大きくないと考えている。

注2) 都市空間（C.V.）への顕熱の移流による流入出を分解して検討するとき、気温の基準値をとる必要がある。基準値をとらずに算出した場合（絶対零度を基準とした場合）の移流 Flux の値は、一般の日中の地表面からの顕熱 Flux の値に比べてかなり大きなオーダーの値となるため、誤解を与える表現となりがちである。これは、C.V.の熱収支構造に対しては、移流 Flux の影響を考慮するとき、界面全体の面積分値を用いなければならないためである。また、基準値をとらない場合、各界面における移流顕熱 Flux 同士の大小は比較できても、移流 Flux と乱流 Flux の各界面における寄与の大小を比較することもできない。このため、顕熱の移流による流入出を分解して検討する際には、適切な基準値が必要となる。本研究では、各界面における移流と乱流の適切な相互比較を可能とするために、各時刻の C.V.内の平均温度を移流 Flux を算出する際の基準値として設定した。つまり、空気の比熱を C_p [J/kg/K]、空気の密度を ρ [kg/m³]、C.V.境界面に直交する風速成分を u_n [m/s]、各面の温位を θ [K]、C.V.内の平均温位を Θ [K]とすると、移流 Flux の評価式は(1)式のようになる。

$$\text{移流による顕熱 Flux} = C_p \times \rho \times u_n \times (\theta - \Theta) \quad (1) \text{式}$$

移流成分の正值（流入）とは、(1)式の値が正であること、つまり各面を通じて C.V.大気部内への C.V.内の平均気温より気温の高い空気の流入、及び気温の低い空気の流出を表し、負値（流出）は、(1)式の値が負であること、つまり C.V.内の平均気温より気温の低い空気の流入、及び気温の高い空気の流出を表している。

注3) 観測結果は渡辺が行っている多点温湿度実測調査のデータ（2002 年、2004 年 8 月の典型的夏季晴天日の平均値）を用いている。測定点は仙台市内の小学校（全 37 点）とし、百葉箱に測定器を設置し測定している²⁰⁾。なお、典型的夏季晴天日は、以下の基準により選定している。

①仙台管区気象台の 2002 年、2004 年 8 月のデータを用いて、仙台管区気象台の気象観測日別値より、a)1 日あたりの全天日射量が 20 MJ/m² 以上、b)1 日あたりの平均雲量(10 分比)が 6.5 以下、c) 一日あたりの日照時間が 8.0h 以上、②以上より選ばれた候補日の中から、さらに台風の影響のある日、6～18 時の風速が常に 5～6m/s 以上の日を除く、③さらに、以上より選ばれた日の中から、宮城県内の仙台以外の AMeDAS 測定点において、日照時間が 8.0h 未満の日を除く。以上より、計 8 日が選定された。なお、2003 年は“やませ”の影響が強い年と判断されたため、典型的夏季晴天日の選定からは除外した。選出された典型的夏季晴天日の仙台管区気象台の気温変化の一例を図 12 に示す。海風の卓越する夏季晴天日においては、絶対値は異なるものの、気温の日変化の傾向などは図 3 に示した中心部の気温変化の結果とほぼ同様である。

注4) 観測結果では夜間の中心部の気温が他の地域より高くなっているが、これは、①周辺ビルによる放射冷却抑制効果、②建物の蓄熱の影響、③夜間の安定成層時の人工排熱の影響等によるものと考えられる。一方、数値解析結果では夜間の中心部の気温は他の地域と大きな差は見られない。数値解析結果は 500m メッシュ平均値であり観測結果と定量的に比較できるものではないが、今回の解析では、建物の影響を地表面上の粗度長 Z_0 や蒸発効率 β 、熱容量、熱拡散係数の変更により簡易に表現しているため、上記の①と②の影響を過小評価し、③についても局所的な影響の

図 12 典型的夏季晴天日における気温変化の一例
(2002 年、2004 年 8 月の仙台管区気象台データを使用)

大小を再現することは難しいと考えられる。以降では、日中の気温変化のピーク発生時刻の違いなど本解析でも定性的に再現できた現象を中心に分析を行うこととする。今回の検討では、気候数値解析から都市環境計画のための基礎資料を導くための方法論を提案することに主眼を置いている。今後、都市キャノピーモデルを組み込む等して、予測精度を改善していく必要があると考えているが、その場合も各地域の熱収支構造から各地域に適したヒートアイランド対策を導くという本研究で提案する手法の有効性は変わらないと考えている。

注5) ここで示す人工排熱は、顕熱・潜熱に分けて全て大気中に排出したもののうち顕熱分のみ表示している^{22)~25)}。

参考文献

- 大岡龍三、吉田伸治、村上周三、佐々木澄、持田灯、吉野博：都市の熱代謝モデルの提案と緑化に関わる熱収支分析—都市気候モデルに基づく東京の都市熱環境の分析—、日本建築学会環境系論文集、No.579、pp.73-80、2004.5.
- 佐々木澄、持田灯、吉野博、渡辺浩文、吉田知弘：海風が卓越する夏季晴天日における規模の異なる3つの太平洋沿岸都市、東京、仙台、原町の中心部の大気部熱収支構造の比較—気候数値解析に基づく都市気候の地域特性の定量化（その1）—、日本建築学会環境系論文集、No.595、pp.121-128、2005.9.
- 武政孝治、小玉祐一郎：AMeDAS データに基づく建築設計用地域気候マップの作成（1）気温、日射量、暖房度日による地域気候特性の表示、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1017-1018、1992.8
- 小玉祐一郎、武政孝治：AMeDAS データに基づく建築設計用地域気候マップの作成（2）PSP（パッシブ地域係数）による地域気候特性の表示、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1019-1020、1992.8
- 西川邦彦、斉藤郁雄、石原修：自然エネルギーの活用のための気象データの整備と気候マップの作成、日本建築学会計画系論文集、No.509、pp.15-20、1998.7.
- 岩井一博、高木直樹、三谷弘真、山下恭弘：内陸の地方都市における都市気候の実態に関する研究、日本建築学会環境系論文集、No.569、pp.33-39、2003.7.
- 三上岳彦：都市ヒートアイランドの実態—東京の事例を中心に—、環境情報科学、No.32-3、pp.32-36、2003
- 佐藤大樹、村上周三、大岡龍三、吉田伸治：都市の熱代謝モデルを用いた夏季の東京首都圏における大気熱収支構造の地域性の比較、日本建築学会環境系論文集、No.586、pp.61-68、2004.12.
- 日本建築学会環境工学委員会環境設計小委員会クリマアトラスの実用化ワーキンググループ、クリマアトラス研究会：クリマアトラスの実用化に関する研究—ワークショップによる計画指針図作成の試み—、日本建築学会技術報告集、No.14、pp.207-210、2001.12
- 日本建築学会環境工学委員会環境設計小委員会クリマアトラスの実用化ワーキンググループ：クリマアトラスの実用化に関する研究（その2）—北九州ワークショップによるクリマアトラス気候解析図と計画指針図作成の試み—、日本建築学会技術報告集、No.18、pp.203-206、2003.12
- 日本建築学会環境工学委員会都市環境・都市設備小委員会クリマアトラス実用化ワーキンググループ：仙台都市域を対象としたワークショップによる気候解析図と計画指針図作成の試み—クリマアトラスの実用化に関する研究（その3）—、日本建築学会技術報告集、No.20、pp.183-186、2004.12
- 持田灯、佐々木澄、吉田知弘、吉野博、渡辺浩文：大樹部の熱収支構造の都市内における地域特性の定量化—仙台を対象とした検討—、第18回風工学シンポジウム論文集、pp.105-110、2004.12
- 岩手県水産技術センターHP：<http://www.suigi.pref.iwate.jp/>
- Mellor G.L., and Yamada T.: 1974, A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary layer, J of Applied Meteorology, Vol.13, No.7, pp.1791-1806、1974
- Mellor G.L., and Yamada T.: 1982, Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problem, Rev. Geophys. Space Phys., Vol.20, No.4, pp.851-875、1982
- Tetsuji Yamada and Susan Bunker: 1989, A Numerical Model Study of Nocturnal Drainage Flows with Strong Wind and Temperature Gradients, Journal of Applied Meteorology, Vol.28, pp.545~554、1989
- 持田灯、村上周三、Sangjin KIM、近藤裕昭、島田昭男、玄地裕、吉田伸治：ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合評価のための Software Platform の開発と風環境の解析事例、第16回風工学シンポジウム論文集、pp.137-142、2000.11
- Hiroaki Kondo: 1990, A Numerical Experiment of the “extended Sea Breeze” over the Kanto Plain, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.68, No.4, pp.419-434、1990
- McClatchey, R. A., Fenn, R. W., Selby J. E. A., Volz F.E. and Garring J.S.: 1971, Optical Properties of Atmosphere, AFCRL-71-0279, Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, Massachusetts.
- (財) 日本地図センター、数値地図ユーザーズガイド、1998
- 村上周三、持田灯、Sangjin KIM、大岡龍三：関東地方における土地利用状況の変化と流れ場・温度場の関係—Mellor-Yamada型の都市気候モデルによる局地気象解析—、日本建築学会計画系論文集、No.491、pp.31-39、1997.1
- 三浦秀一：全国における住宅の用途別エネルギー消費と地域特性に関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.510、pp.77-83、1998.8
- 菅野陽介、井上雅博、十二村佳樹、渡辺浩文他：実測・数値解析に基づく仙台市の都市環境気候図作成（その6）～（その7）、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1、pp.671-674、2003.9
- 渡辺浩文、尾島俊雄：河川水熱利用地域冷房施設の大気への熱的影響に関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.460、pp.61-69、1994.6
- 下田吉之、高原洋介、亀谷茂樹、鳴海大典、水野稔：大阪府におけるエネルギーフローの推定と評価、日本建築学会計画系論文集、No.555、pp.99-106、2002.5
- 石田剛健、十二村佳樹、渡辺浩文、鈴木博司：実測・数値解析に基づく仙台市の都市環境気候図作成（その1）—仙台都市域を対象とした広域温熱環境実測—、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、D-1、pp.661-662、2003.9.

(2005年10月8日原稿受理、2005年12月21日採用決定)