

人工排熱が都市のヒートアイランド現象に及ぼす影響のCFD解析

The Effects of Artificial Heat Release on Urban Heat Island Using CFD Analysis

吉田伸治, 福井大学, 〒910-0018 福井県福井市文京 3-9-1, y-shinji@anc-d.fukui-u.ac.jp
 大岡龍三, 東大生研, 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1, ooka@iis.u-tokyo.ac.jp
 村上周三, 慶應義塾大学, 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, murakami@sd.keio.ac.jp
 原山和也, 東京大学大学院, 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1, harayama@iis.u-tokyo.ac.jp
 Shinji YOSHIDA, Fukui University, 3-9-1 Bunkyo, Fukui-city, Fukui, 910-0017, Japan
 Ryozo OOKA, I. I. S., University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, Japan
 Shuzo MURAKAMI, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa, 223-8522, Japan
 Kazuya HARAYAMA, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, Japan

Urban climate in Kanto plane was analysed by three dimensional CFD simulation. Four cases of numerical prediction were carried out in this study. In case1, the artificial heat release was assumed zero while spatial-temporal distribution of the artificial heat release was incorporated into the prediction of the other cases. By comparing the results of these analyses, the effects of artificial heat release on the predicted results of urban heat island were clarified.

1. はじめに

近年、都市化に伴う土地被覆の変化や人工排熱量の増大等により、ヒートアイランドに代表される都市固有の気候変化が顕著になっている^{文1)~3)}。筆者らはこれまでこの気候変化のメカニズムと抑制対策を検討するために、数値気候モデルに基づく都市環境の予測手法の開発に取り組んできた^{文4), 5)}。しかし、これらの解析では、都市のヒートアイランド形成に及ぼす人工排熱の影響の検討は不十分であった。また、一般に数値気候モデルによる都市気候解析では、人工排熱の解析上での取り扱いに対する幾つかの方法が利用されているが、この差異が予測結果に及ぼす影響に対する検討も不十分である。

本研究では首都圏の夏期を対象とした局地気候解析を行い、人工排熱の有無がヒートアイランド形成に及ぼす影響を検討する。ここでは、さらに局地気象モデルにおける人工排熱の取り扱いの違いが予測結果に及ぼす影響についても併せて検討する。

2. 解析概要

2.1 解析領域、メッシュ分割

Fig.1 に解析領域を示す。首都圏を中心とした 480km(x) × 400km(y) × 9.6km(z)を 60 × 50 × 49 メッシュに分割した。ここでは、水平方向には 8 kmの等間隔、鉛直方向には地表面から高度 9.6 kmまでの大気を不等間隔な 49 メッシュ(地表に接する大気側メッシュ幅 20m)に分割している。また、地表より地下は深さ 50cm までを不等間隔な 5 メッシュ(地中第1セルの幅 5mm)に分割している。

2.2 計算ケース

Table1 に計算ケースを示す。Case1 が解析領域内で発生する人工排熱を一様に 0 としたケースである。これに対して他のケース (Case2 ~ Case4) は、人工排熱データを東京都のエネルギー消費関連資料^{文6)}を参考に Fig.2 に示す分布を与えたケースであり、各ケースで人工排熱の解析上での取り扱いを次節に示す方法に変更した解析を行う。

2.3 人工排熱の取り扱い

(1) 地表面熱収支式へ組み込む場合 (Case2)

一般に本解析のようなメソスケールの気候解析では、一般に水平方向、鉛直方向ともにメッシュが粗く、建物等の幾何形状を表現することができない。そのため、地表の流体力学的な抵抗を表す粗度長 Z_0 というパラメータを用いて計算に組み込むこととなる。この様な場合、地表面というものは厳密な意味での地表面というよりも地表付近と解釈することも

できる。このような観点から、筆者らの既報^{文3), 4)}の研究では人工排熱 A を地表面の熱の境界条件(表面温度、顕熱放散量、潜熱放散量)を設定する際に用いられる 1 次元熱収支式 ((1) 式) 中に組み込んだ解析を行ってきた。

$$R_s + R_{L\downarrow} + R_{L\uparrow} + H + LE + C + A = 0 \quad (1)$$

R_s : 日射 (短波放射) 吸収量 [W/m²]
 $R_{L\downarrow}$: 地表が吸収する長波放射量 [W/m²]
 $R_{L\uparrow}$: 地表から放出される長波放射量 [W/m²]

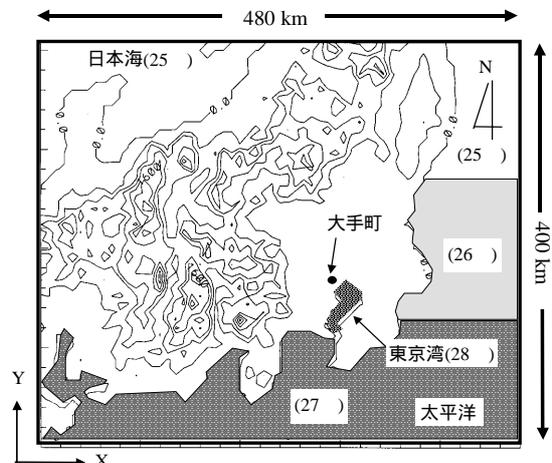


Fig.1 Computational domain.

Table 1 Computed cases.

	Artificial heat release	
	Used data	Method of inclusion
Case1	0	
Case2	Spatial-temporal distribution on public energy consumption in the Tokyo metropolitan area	Releasing into heat budgeted equation on ground surface
Case3		Releasing into atmosphere adjacent to ground surface
Case4		Separating into atmosphere and ground surface according to component ratio of artificial heat release

H : 地表からの顕熱放熱量 [W/m²]
 LE : 地表からの潜熱放熱量 [W/m²]
 C : 伝導熱量 [W/m²]
 A : 人工排熱量 [W/m²]

(上式で各物理量は地表への流入を正、流出を負とする)

Case2 は上記の方法に従った解析である。

(2) 全て大気中の流体セルに放出する場合 (Case3)

(1) 式を用いて人工排熱を組み込む場合、人工排熱の増加は直接的に地表面温度の上昇に寄与することとなる。しかし、人工排熱の一部は大気中に直接放出されるため、まず地表近傍の気温が上昇し、その結果地表面温度が上昇するとも考えられる。そのため、上記の熱収支式に直接組み込まず、大気中の熱輸送方程式中の発生項として組み込む方法を利用している研究例もある^{文3)}。Case3 はこの方法に従ったケースである。ただし、Case3 では大気中への放熱は全て顕熱として取り扱った。

(3) 大気中に放出される熱量を修正した場合 (Case4)

(1)節、(2)節で取り扱っている人工排熱 A は、具体的には次式に示す要素により構成されている。

$$A = A_L + A_I + A_R \quad (2)$$

A_L : 民生 (家庭、事務所、病院等) からの排熱 [W/m²]
 A_I : 産業 (製造業、建設業等) からの排熱 [W/m²]
 A_R : 交通 (自動車、鉄道) からの排熱 [W/m²]

Case4 では、これらの構成要素を以下の様に取り扱っている。

- a) 民生からの排熱 A_L の構成としては、冷暖房機器の稼働、給湯機器の利用、厨房からの放熱、その他の内部発熱が考えられる。このうち、は各建物の冷房機器の COP (ここでは 3.0 と仮定) に対応する建物空調負荷分と機器発熱量を大気への放熱量とした。、に関しては、その半が大気中に放出され、半が下水として地中に潜り込むと考えた。の内部発熱は全て一度建物駆体に吸収されるものと考え、地表面熱収支式 ((1)式) に加える。但し で与えた発熱のうち建物空調負荷分は一度建物に流入した外部からの熱が再び大気へ汲み出されるもので、正確には人工排熱とは呼べない。従って、大気にこの分の熱を付加する場合には、地表面熱収支式 (1) 式中の地中への伝導熱量 C よりこの部分を差し引くこととした。
- b) 産業からの排熱 A_I はそのうちの 80% が大気中へ、20% が地中へ排出されるものと仮定した。
- c) 交通からの排熱 A_R はその全てが大気中に放出されるものと仮定した。

以上の取り扱いを、人工排熱データの内訳が分析可能であった東京都について行った。その他の領域では Case3 と同様の取り扱いとしている。

Table 2 Surface parameters.

	albedo [-]	roughness length Z_0 [-]	thermal diffusivity ($= \times 10^{-6}$) [m ² /s]	heat capacity ($= \times 10^6$) [J/m ³ K]	soil moisture availability [-]
1) Rice paddy	0.20	0.050	0.20	3.0	0.5
2) Farming	0.10	0.010	0.45	2.0	0.3
3) Orchards 1	0.20	1.000	0.50	2.0	0.3
4) Orchards 2	0.20	0.500	0.50	2.0	0.3
5) Forest	0.15	2.000	0.50	2.0	0.3
6) Vacant land	0.20	0.010	0.50	2.0	0.3
7) Buildings	0.10	1.000	0.81	2.1	0.0
8) Paved road	0.10	0.010	0.50	1.4	0.0
9) Other land	0.20	0.010	0.50	2.0	0.3
10) River site	0.03	0.001	0.14	4.2	1.0
11) Coast	0.30	0.005	0.77	1.3	0.6
12) Ocean	0.03	0.001	0.14	4.2	1.0

東京大手町を含むメッシュにおける大気中へ放出される排熱量の各ケースの比較を Fig.3 に示す。Case4 が Case3 よりも大気中への放熱量が大きくなるのは、Case4 では人工排熱以外に建物空調負荷分が大気へ放出されているためである。

2.4 乱流モデル

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^{文7)-9)}を利用した。また、実際の解析には、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に筆者らを中心とした研究グループが開発した Software Platform^{文10)}のメソスケール解析機能を利用している。

2.5 初期条件および境界条件

Table2 に本解析で用いた土地利用分類による各パラメータの設定を示す。本研究では、国土庁の国土数値情報^{文11)}の土地利用データ(100m メッシュ)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。このパラ

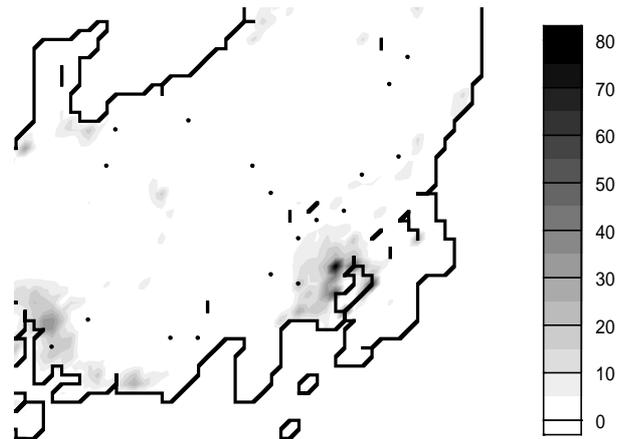


Fig.2 Distribution of artificial heat release [W/m²] (15:00, in summer season).

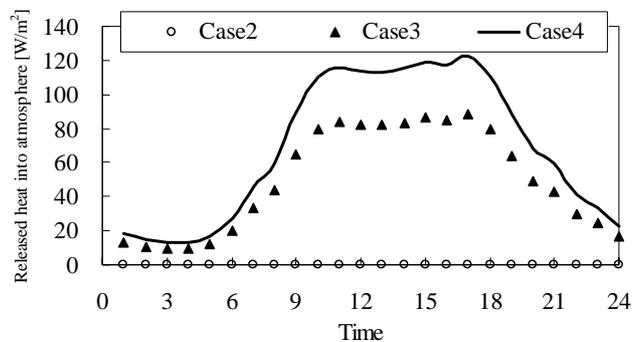


Fig.3 Diurnal distribution of released heat into atmosphere (Tokyo (Otemachi)).

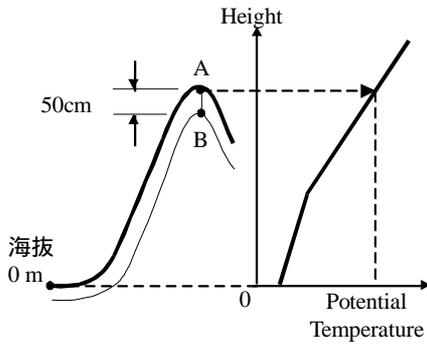


Fig.4 Initial temperature on the ground surface and under ground.

メータは、2.3 節で示した地表面の境界条件の設定に関わる各項の算出に利用される。上空風速は 2m/s の南風とした。地中温度の境界条件に関しては、Fig.4 に示すように山岳部等の標高の高い地域における地表面温度の初期値は、同じ高さでの大気中の温度の初期値の鉛直分布から与えられる温度と等しいと仮定し、さらに地中 50cm の温度は設定された地表面温度の初期値と同じとした。地表面温度、地中温度は計算の進行より変化するが、地中 50cm の土壌温度は、この様に与えられた数値がそのまま境界条件となる。その他の条件については文献 4 を参照されたい。

3. 解析結果

3.1 流れ場、温度場の性状

解析は 8 月上旬の太陽高度に基づき午前 6 時からスタートし、その後 42 時間の時間積分を行った。Fig.5 に 15:00 (計算開始から 33 時間後) における Case4 の高さ 10m の風速ベクトルを示す。本解析では各ケース間で流れ場に大きな差異が生じなかったため、代表して人工排熱の取り扱いを最も最適化したと考えられる Case4 の結果のみを示す。既往の観測結果¹²⁾に見られる関東平野への海風の流入がよく再現されている。風速は 2~5m/s 程度の値となる。

Fig.6 に Fig.5 と同時刻における地表面温度分布を、また Fig.5 と同時刻、同じ表示高さにおける気温の水平分布を Fig.7 に示す。これらの結果についても、Case1 と他のケース (Case2~4) で差異が見られる (後述) 以外は大差無いため、Case4 の結果のみを示す。東京大手町付近において、地表面温度が約 34.1、高さ 10m の気温が約 32.7 の値となる。

3.2 気温、地表面温度の時間変化

本節では、大手町を含む 8km×8km メッシュについて人工排熱の有無、取り扱いの差異が地表面温度、気温に及ぼす影響を、0 時 (計算開始から 18 時間目) から 24 時 (42 時間目) までの各物理量の時間変化より検討する。

まず、Fig.8 に地表面温度、また高さ 10m の気温の時間変化を Fig.9 に示す。人工排熱の無い Case1 に比べ他の 3 ケース (Case2~Case4) では地表面温度が昼間で約 0.6、夜間で約 1.1~1.5 上昇する。また高さ 10m の気温は昼間で約 0.4、夜間で約 1.1~1.6 上昇する。

次に、人工排熱の取り扱いの差異が及ぼす影響を検討するため、Case2~Case4 の地表面温度、気温の値から Case1 の対応する値を引いたものを Fig.10、Fig.11 に示す。本解析では、地表面温度については Case2 が最も排熱の組み込みによる昇温効果が大きく、夕方 (16 時) から明け方 (6 時) にかけて約 0.4~1.6、Case1 より高温となり、次いで Case3、Case4 という結果となった。一方、気温については逆に Case4 が全般を通じて Case1 より約 0.4~1.6 高温となり、次いで Case3、Case2 の順に温度が高く、地表面温度とは全く逆の結果とな

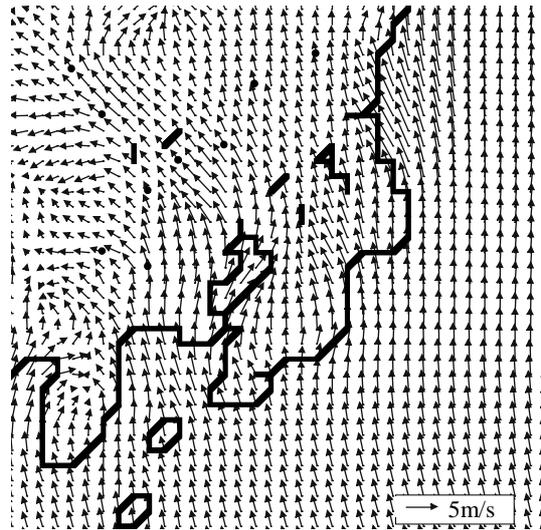


Fig.5 Horizontal distribution of wind velocity vectors (at the height of 10m, 15:00, Case4).

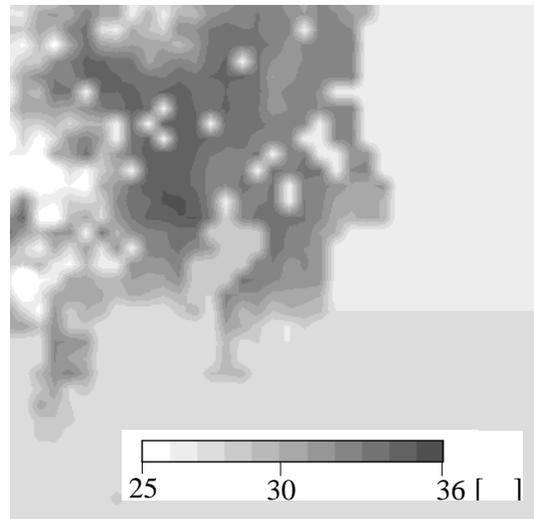


Fig.6 Distribution of Surface temperature (Case4).



Fig.7 Horizontal distribution of air temperature (at 10m height, 15:00, Case4).

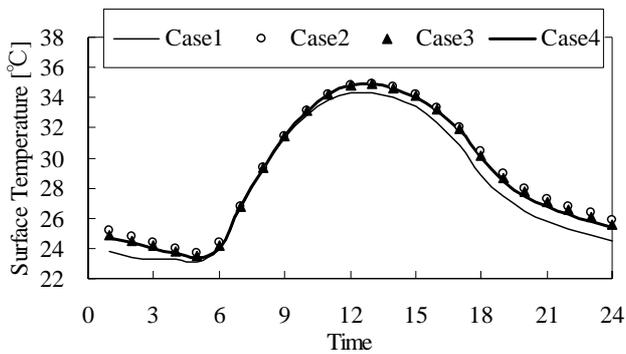


Fig.8 Diurnal distribution of surface temperature at the height of 10m (Tokyo (Otemachi)).

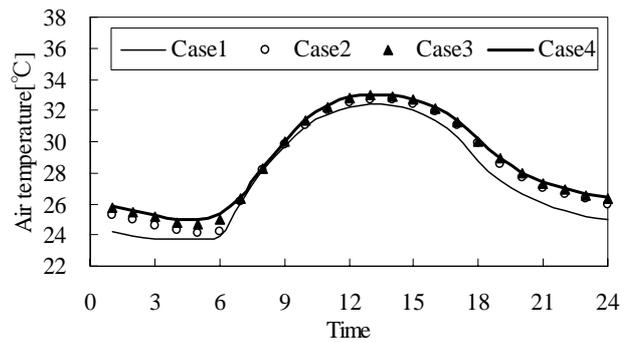


Fig.9 Diurnal distribution of air temperature at the height of 10m (Tokyo (Otemachi)).

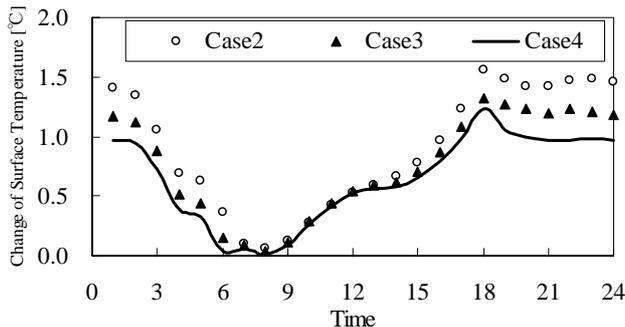


Fig.10 Diurnal distribution of change of surface temperature by artificial heat release (Tokyo (Otemachi), (Case2, 3, 4)-(Case1)).

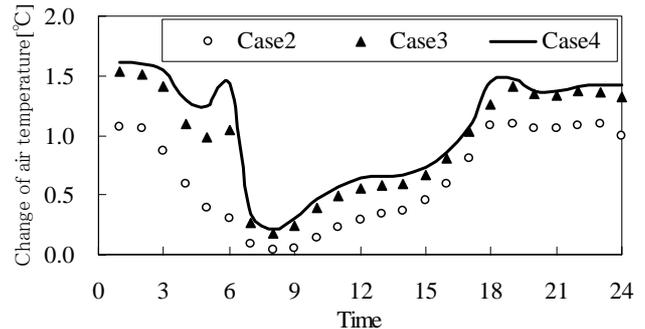


Fig.11 Diurnal distribution of change of air temperature by artificial heat release (Tokyo (Otemachi), (Case2, 3, 4)-(Case1)).

った。これら一連の結果の差異は人工排熱の解析上での取り扱いの差異によるものである。つまり、Case2 では人工排熱を地表面熱収支式 ((1)式) に直接組み込むため、地表面温度が直接昇温する。これに伴い顕熱放散量も増加するため、結果として気温も昇温する。これに対して Case3 では人工排熱を全て大気中の熱輸送方程式に組み込むため、気温が直接昇温する。これに伴い地表面からの顕熱放散量は逆に減少するため、地表面温度は間接的に昇温する。更に Case4 では人工排熱の構成要素の比率を分析し、大気中に放出される熱量を推定した結果、大気中への放熱量が Case3 の 1.3 倍に増加し、その増分と釣り合う様に地表面熱収支式の中の熱伝導項 C が減少する (Fig.3)。これらは気温上昇、地中温度低下に作用し、地表面温度は気温上昇の影響を強く受け、結果として全般に Case1 より高温となったと考えられる。

4. まとめ

- (1) 数値気候モデルを用いて関東地方の局地気象解析を行い、人工排熱の有無、並びに取り扱いの差異が予測結果に及ぼす影響を検討した。
- (2) 人工排熱の有無により、地表面温度、気温ともに最高 1.5 程度の温度差が生じる。また、人工排熱の解析上での取り扱いの相違により地表面温度で最高 0.5、気温で最高 1 の予測結果の差が生じる。
- (3) 本解析では排熱の放出を全て顕熱として計算した。今後は潜熱による排熱の効果も検討する予定である。
- (4) また、Case4 では東京都のみ大気中への排熱量の修正を行ったが、今後は分析データの拡充や都市キャノピーモデル^{文13)~15)}の導入による予測精度の向上を計る予定である。

<参考文献>

- [1] T. Ojima, 1991, Changing Tokyo Metropolitan Area and its Heat Island Model, Energy and Buildings, 15, 191-203
- [2] 環境庁企画調整局, 1990, 首都圏・その保存と創造に向けて、

大蔵省印刷局。

- [3] 吉門, 1993, 大都市上空における汚染物質輸送の観測的研究, 資源環境技術総合研究所報告, 第 6 号, 1~136.
- [4] 村上, 持田, 金, 大岡, 1997, 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, 31-39.
- [5] 金, 村上, 持田, 大岡, 吉田, 2000, 数値気候モデルによる関東地方の気候変化のメカニズムの解析, 日本建築学会計画系論文集, 第 534 号, 83-88
- [6] 資源環境技術総合研究所環境影響予測部, 1997, 大都市における夏季高温化対策技術の評価方法の開発, 環境影響予測部研究資料, 135-138
- [7] 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, 1791~1806.
- [8] 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, 851~875.
- [9] 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, 545~554.
- [10] 持田, 村上, 金, 近藤, 島田, 大岡, 2000, 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D1, 1099-1102
- [11] 国土庁計画・調整局, 建設省国土地理院, 1992, 国土数値情報
- [12] 桑形恒男, 近藤純正, 1990年3月, 東南北部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定, 天気, 55~59.
- [13] 亀掛川, 玄地, 吉門, 近藤, 2001, 工社・資源, Vol. 22, No.3, 55-60
- [14] Ashie, Y., Vu Thanh Ca and Asaeda, T., 1999, Journal of Wind Engineering and Industrial aerodynamics, 81, 234-248
- [15] 谷本, 林, 片山他, 1998, 日本建築学会計画系論文集, 第 504 号, 87-94