

熊本市街区の暑熱環境の調査と評価 に関する研究

上野 賢仁¹・赤嶺 吉治²・神坂 一成³

¹正会員 崇城大学 工学部エコデザイン学科 (〒860-0082 熊本市池田四丁目22-1)

E-mail: ueno@eco.sojo-u.ac.jp

²非会員 翔土木設計 (〒901-0201 沖縄県豊見城市字真玉橋521-2)

³非会員 福岡県警察学校 (〒810-0016 福岡市中央区平和五丁目14-1)

熊本市中心市街地を解析対象として、気温及び暑熱環境指標WBGTの移動計測を行うとともに、熱中症の発生状況を踏まえて考察した。また、同街区の建物空調エネルギー負荷への影響について評価を試みた。具体的には、高解像度衛星画像 (IKONOS) を参照して市街地の建物モデルを仮定し、観測結果を用いて空調エネルギー負荷を計算し、影響評価を試みた。計算ではまず、仮定した建物の床面積と空調設定温度について感度解析を行った。感度解析を踏まえて、計算結果を基に都市街区空間の暑熱環境が空調エネルギー需要に及ぼす影響の評価を考察した。また追加的に暑熱環境調査と緑化実験を行い、都市気候緩和対策としての緑化効果について考察した。

Key Words : hot environment, urban district, WBGT, air conditioning load, energy consumption, estimation, IKONOS, green-planting

1. はじめに

近年、都市のヒートアイランド現象による夏季熱環境の悪化が顕著になっている。特に夏季の日常生活で不快感を増大させ、熱中症の発生を増加させる等、健康被害が増大している。大都市では既に緑化や舗装の改善等の対策が講じられているが、今後、地方中都市においても同様の対策が実施されてくると考えられる。その際に、熱環境対策がどれほどの効果をもたらすか十分な議論が必要になる。こうした目的のため、都市を緑化した場合のエネルギー消費削減や費用対効果についての研究事例や、緑化した場合の空調エネルギーを実験で調べた研究事例等が報告されている。例えば、Lisa Garlandは著書¹⁾で、緑化した場合のエネルギー消費削減や費用対効果について事例をまとめている。また、川島ら²⁾は緑化した場合の空調エネルギーを実験で調べている。ただ、こうした直接的な評価だけでなく、道路の舗装改善等が都市にどれだけの恩恵をもたらすか等、更に事例を積み上げていく必要がある。特に今後、エネルギー消費とともに二酸化炭素排出量で評価することは重要である。

著者ら³⁾はこれまで熊本市の中心市街地で暑熱環境を調査し、衛星情報等を活用して周辺状況との関係を見てきた。本研究では、これらを発展させてエネルギー消費

や二酸化炭素排出量で評価することを目指して、その前段階として空調エネルギー負荷による影響評価を試みる。

2. 熊本市の暑熱環境と熱中症発生状況

全国の都市で夏季の異常な高温化が見られ、熱中症等の健康面で影響が生じている。ここでは、熱中症の発生状況を調査し、市街地の暑熱環境調査と比較分析、評価を試み、暑熱環境の安全・危険度について考察した。

(1) 熱中症発生状況

国立環境研究所は、福岡市等、主要都市の熱中症発生情報をまとめている⁴⁾。これを参考にして、熊本市消庁から平成22年6月3日から10月8日までの熱中症患者発生情報を入手し⁵⁾、気象データ⁶⁾と対比させて検討した。図-1は日最高気温とその日の患者数を示したものである。気温の上下変動と共に熱中症発生数も上下に変動しているのがわかる。図-2は、これを気温別にしたものである。熱中症の件数は、33℃を境に急激に増えているのがわかる。

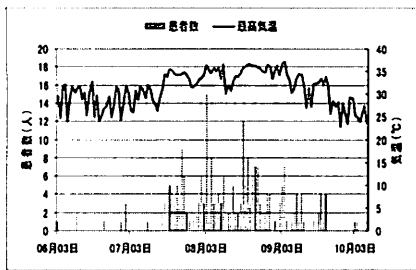


図1 日別患者発生数（熊本市，平成22年）

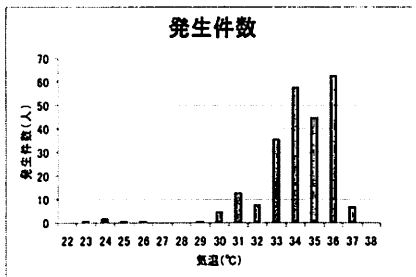


図2 気温に対する熱中症発生件数（熊本市，平成22年）

(2) 暑熱環境調査

平成22年8月4，5日の9，12，15，18時に熊本市中心市街地の暑熱環境を調べた。図3に示す観測点を機器（京都電子工業WBGT-113）を携帯して移動し，気温，湿度，黒球温度，暑熱環境指数（WBGT; Wet Bulb Globe Temperature）を計測した。WBGTは熱中症等の危険度を簡易に知るための指標⁷⁾で次式で定義される⁸⁾（表-1）。

$$\text{屋外：WBGT} = 0.7T_{\text{nw}} + 0.2T_g + 0.1T_a \quad (1)$$

$$\text{屋内：WBGT} = 0.7T_{\text{nw}} + 0.3T_g \quad (2)$$

ただし，WBGT：湿球黒球温度（℃）， T_{nw} ：湿球温度（℃）， T_a ：乾球温度（℃）， T_g ：黒球温度（℃）。

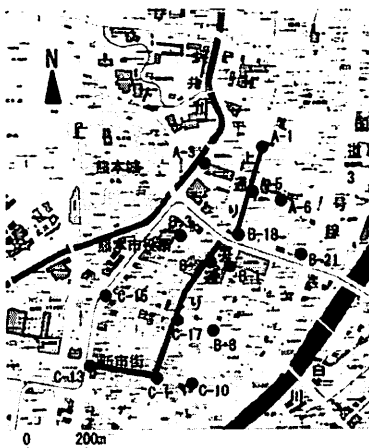


図3 熊本市中心市街地の観測点
（地図：福岡人文社「熊本グランドまちず」）

表-1 暑熱環境指標 WBGT と作業環境⁸⁾

WBGT (℃)	許容	作業強度
32.5	極軽作業	RMR-1
30.5	軽作業	RMR-2
29.0	中等度作業	RMR-3
27.5	中等度作業	RMR-4
26.5	重作業	RMR-5

熊本市中心市街地には，比較的集中したところに3つのアーケードがある。北に「上通り」，南に「下通り」と「新市街」である。上通りと下通りの間には，市電が走る交通量の多い道路「通町筋」が通る。市街地西側に熊本城が位置し，その間に堀「坪井川」が流れている。反対の東側は交通量の多い国道3号線が通る。

図4に上通り2日間の測定でWBGTが高かった8月5日15時の値を示す。最高値は地点A-6で33.5℃である。また，同時刻で値が低かった場所はB-18とA-3で30.0℃である。A-6は車の通りもあり日差しが当たるため高い値になったと考えられる。一方，B-18は大通りに面しているが，アーケード内にあるためA-6より3.5℃低い値であった。

図5に下通り2日間の測定でWBGTが高かった8月4日15時のWBGTを示す。WBGT最高値はB-2で33.1℃である。同時刻でWBGTが低かったのはC-17で30.9℃である。B-2はアーケード内であるにも関わらず高い値であった。次いでB-8，C-1，C-13の値が高かったが，交通量の多い大通りに面しているためと考えられる。C-17はアーケード内にあり比較的涼しい場所であるため低い値となった。

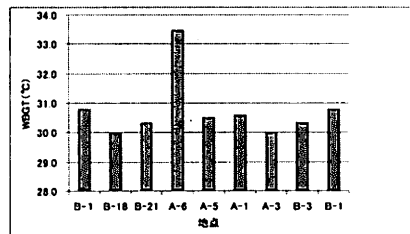


図4 「上通り」平成22年8月5日15時のWBGT

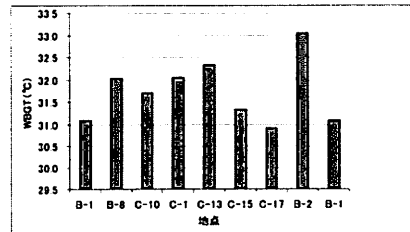


図5 「下通り」平成22年8月4日15時のWBGT

(3) 暑熱環境調査と熱中症発生状況の比較

暑熱環境調査を行った平成22年8月4，5日とその日の熱中症発生件数を比較した。4，5日ともに4回の観測で

最高値であった15時のWBGT、気温、相対湿度、黒球温度の平均値と、同日の最高気温、熱中症発生数を表-2にまとめる。最高気温は5日より4日の方が0.8℃高いが、熱中症発生は4日が1件、5日は8件である。5日は平均相対湿度が4日に対して約10～20%高かった。

今回対象とした熊本市中心市街地の熱中症の危険度は、WBGT値で見れば、日差しが当たり、交通量がある地点で高いことが改めて確認された。アーケード内であっても12時、15時には気温が35℃を超える地点もある。また、湿度が高い地点では熱中症の危険度が上がる。今後、同市街地の安全度・快適度を高めるためには、気温だけではなく湿度を下げる対策が有効である。

今回は熱中症の発生状況について場所、時間を特定できなかった。今後の情報収集が課題である。

表-2 平成22年8月4、5日15時平均と最高気温と発生件数

上通 り	平均 WBGT (℃)	平均 気温 (℃)	平均 相対湿度 (%)	平均 黒球温度 (℃)	最高 気温 ^{*1} (℃)	発生 件数 ^{*2}
4日	31.2	34.9	59.4	36.6	35.4	1
5日	30.8	32.9	71.4	34.7	34.6	8
下通 り	平均 WBGT (℃)	平均 気温 (℃)	平均 相対湿度 (%)	平均黒 球温度 (℃)	最高 気温 ^{*1} (℃)	発生 件数 ^{*2}
4日	31.7	35.8	50.2	41.2	35.4	1
5日	30.5	32.7	73.2	33.9	34.6	8

*1: 文献6, *2: 文献5

3. 空調エネルギー負荷計算による検討

(1) 解析概要

図-6に示す手順で、観測結果を用いて空調エネルギー負荷を計算した。計算式は次の通りである^{9) 10)} (図-7)。

$$QSC = K_T (\theta_r - \theta_o) \quad (3)$$

$$K_T = \sum K_k A_k H_k + c \rho_a V \quad (4)$$

ただし、QSC: 空調顕熱負荷 (J/K), K_T : 総熱貫流率 (J/hK), θ_r : 外気温 (K), K_k : 部位kの熱貫流率 (J/m²hK), A_k : 部位kの面積 (m²), H_k : 温度差係数 (-), $V (=n \times v)$: 換気率 (m³/h) (n : 換気回数(回/h)), $v (=床面積 \times 天井高)$: 建物内の気積 (m³)。

表-3に計算に用いた諸定数を示す。

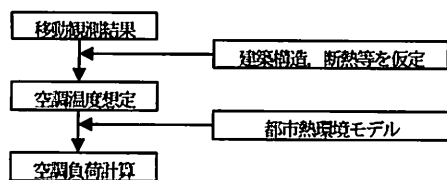


図-6 空調エネルギー負荷計算手順

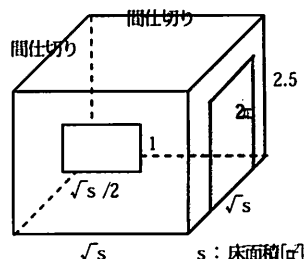


図-7 計算モデルの概要^{9) 10)}

表-3 計算に用いた諸定数¹⁰⁾

定 数	戸建住宅
壁・天井・床の熱貫流率 (J/m ² hK)	6,048
ガラス窓の熱貫流率 (J/m ² hK)	23,292
$c \rho_a$ (J/m ³ hK)	1,220.4
居室と外気の温度差係数 (-)	1.0
居室と床裏の温度差係数 (-)	0.6
間仕切りの温度差係数 (-)	0.7
換気回数 (回/h)	1.5
床から天井までの高さ (m)	2.5

(2) 感度解析

熊本市中心市街地は店舗が主であるが、本研究の主眼は暑熱環境を空調エネルギー負荷で評価を試みることであるため、簡易に計算が行える単室空調モデルを用い、戸建住宅を仮定した。しかし、空調負荷計算は仮定条件が計算結果に少なからず影響を与えるため、主なパラメータについて感度解析を行った。建物構造として床面積に対する感度と、空調設定温度に対する感度を調べた。計算条件を表-4と表-5に示す。図-7に床面積の計算結果を示す。外気温は35.0℃、空調設定温度は25.0℃とした。床面積は空調エネルギー負荷に概ね比例しており、比例係数は43.431J/hm²であった。床面積50m²程度で1.09%/m²の計算格差、150m²で0.51%/m²、250m²で0.35%/m²程度の計算格差を生じる。図-8に外気温と空調設定温度の差についての計算結果を示す。外気温と空調設定温度の差を6～10℃で変化させた。温度差に対する空調エネルギー負荷も比例関係にあり、比例係数は2,197J/h/℃であった。これは温度差6℃で6.0%/℃、8℃で8.0%/℃、10℃で10.0%/℃の計算格差を生じることを意味する。

表-4 建物構造(床面積)の感度解析計算条件

No.	床面積 (m ²)
1	50
2	100
3	150
4	200
5	250

※外気温35.0℃、空調設定温度25.0℃として計算。

表-5 空調設定温度の感度解析の計算条件

No.	外気温-空調設定温度 (°C)
1	6
2	7
3	8
4	9
5	10

※床面積100.0m²で計算。

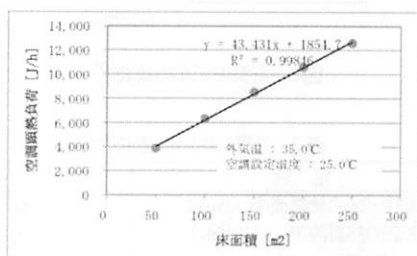


図-7 建物床面積と空調エネルギー負荷の感度解析

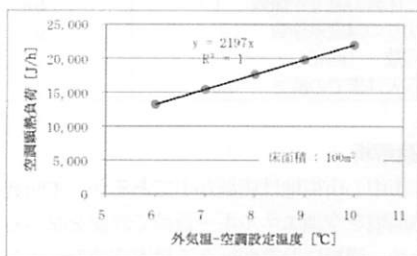


図-8 空調設定温度と空調エネルギー負荷の感度解析

熊本市中心市街地の暑熱環境調査結果から観測点8点を選び、空調エネルギー負荷を計算した。前述の通り、計算は戸建住宅を仮定した行ったものである。表-6にIKONOS画像を元に算出した床面積を示す。

表-6 観測地点のIKONOS画像を参考にした仮想床面積

No.	床面積 (m ²)	説明
A-1	550 (=22×25)	上通りアーケード北端
B-3	1,750 (=35×50)	熊本市役所東側
B-18	5,494 (=67×82)	上通りアーケード南端 (通町筋側)
B-21	841 (=29×29)	通町筋と国道3号線の交差点
C-10	720 (=18×40)	新市街アーケード東端から約150m東
C-13	1,260 (=36×35)	新市街アーケード西端
C-15	651 (=21×31)	下通りアーケード中央から約200m西
C-17	270 (=18×15)	下通りアーケード中央

図-9と図-10に平成22年8月4日と5日の15時の観測気温を用い、空調設定温度を25°Cとして計算した結果を示す。表-7は観測気温である。計算結果を見るとB-18 (上通りアーケード南端) が高い値になった。再開発された建物「びぶれす熊本」があり床面積が大きな値であったためと考えられる。似通った結果のB-3 (市街地東側) とC-

13 (新市街アーケード西端) を比較すると、B-3の方が床面積がやや大きく、気温はやや低く、空調熱負荷はやや大きい結果となった。床面積が同程度のB-21 (通町筋と国道3号線の交差点) とC-10 (新市街アーケード東端から約150m東) を比較すると、観測気温は8月4日15時で2.1°Cの差があり、5日15時でも1.1°Cの差があるが、空調負荷については殆ど差が見られない。

これらは一例であり、今回の計算では実際の建物条件を考慮しているわけではないため、仮想的な結果に留まるが、今後詳細な建物情報を収集し、GISを活用する等によって現実に近い検討が可能になると考えられる。

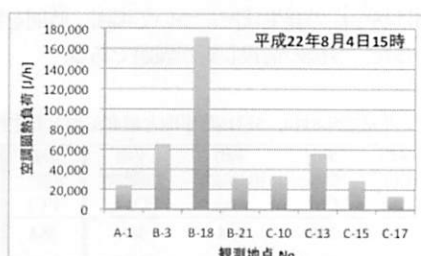


図-9 「上通り」8月4日15時の空調エネルギー負荷 (仮想)

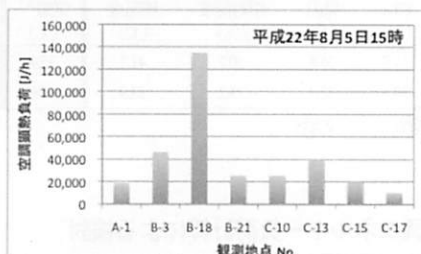


図-10 「下通り」8月4日15時の空調エネルギー負荷 (仮想)

表-7 平成22年8月4日と5日の観測気温

No.	8月4日15時	8月5日15時
A-1	35.1 °C	32.7 °C
B-3	35.2 °C	32.2 °C
B-18	34.4 °C	32.4 °C
B-21	34.2 °C	32.4 °C
C-10	36.3 °C	33.5 °C
C-13	36.7 °C	33.2 °C
C-15	35.7 °C	32.4 °C
C-17	35.2 °C	32.6 °C

4. 大学内暑熱環境調査と緑化効果実験による考察

ヒートアイランド現象の対策の一つとして緑化が有力である。ここでは追加的に崇城大学で実施した暑熱環境の観測結果と、緑化効果の実験 (冬季のみ実施) を基に

考察を加える。図-11に観測地点を示す。平成22年7月23、26日9、12、15、18、21時に暑熱環境計を用いた移動観測を行った。また8月3日12時～7日12時に自作測定器を用いて定点観測を行った。8月7日～9月5日には1つの棟の内外で定点観測を行った。緑化効果の実験は平成23年1月25、26日に自作実験装置（ペニア製90cm立方体）で行った。装置は側面と底部を3cm発泡スチロールで断熱し、上部を何も置かない（ブランク）、3cm発泡スチロール、砂、芝とし、上部表面と内部の温度を計測した。



図-11 観測地点（定点：○，移動：●）

図-12に移動観測結果の一部を示す。15時の気温は平均して日向35.5℃、日陰33.6℃であった。気温が高い場所は風通しが悪く、影にならない、地面がアスファルトやレンガである等である。逆に、気温が低い所は風通しが良く、日陰であり、芝や土の地面等である。図-13に示す定点観測の結果も同様の傾向であった。国道沿いでは温度が下がりにくい環境に加え、自動車の排気により常に高い温度であった。芝生のソフトボール球場がある地点18'と比較すると1日の平均気温は1～2℃差があった。図-14は棟内外の観測結果である。屋外は日向で最高39℃近くまで上昇し、日陰でも34℃程度であった。室内では南側で34.5℃程度、北側で33.5℃程度であった。図-15は緑化効果の実験結果である。結果からブランクと砂が一日を通して外部温度の影響を受けやすく、逆に、芝と発泡スチロールは影響を受けにくいことがわかる。この結果で見れば芝と発泡スチロールの効果は同程度と言える。ただ、発泡スチロールは厚さ3cm、芝約1cmであることから緑の保温効果は効率が良いことがわかる。

以上の結果は、前出の計算のように屋内外の温度差を

想定することにより建物の空調エネルギー負荷と関連付けることも可能である。また既往の文献にも、空調時の室温を1℃緩和することで10%程度削減することができるとの試算例もあり¹¹⁾、こうした温度差自体が意味あるものと考えられる。今回、緑化効果の実験は冬季のみの検討であるが、更に発展させることにより暖房効率改善効果を定量的に議論することも可能である。夏季実験を行えば一年を通した緑化による空調エネルギー負荷低減効果を検討することも可能である。

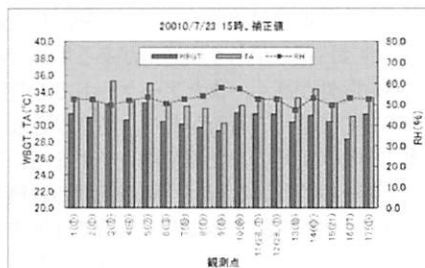


図-12 移動観測結果（平成22年7月23日15時、暑熱環境指標 WBGT、気温:TA、湿度:RH）

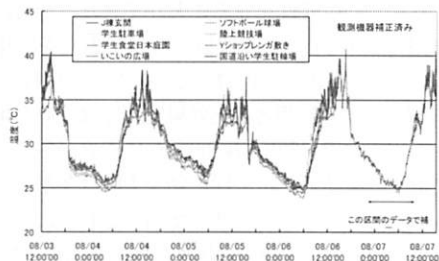


図-13 定点観測結果（気温、平成22年8月3日～7日）

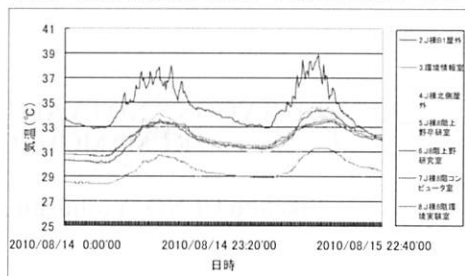


図-14 J棟定点観測結果（平成22年8月14日）

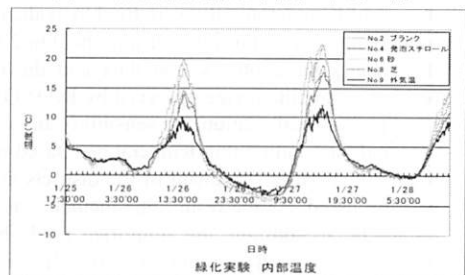


図-15 緑化効果の実験（装置内部温度）

5. おわりに

本研究は、熊本市中心市街地についてこれまで継続的に行ってきた移動観測方法によって暑熱環境を調査し、この結果を用いることを前提として空調エネルギー負荷計算を行い評価すること試みたものである。また追加的に崇城大学で実施した観測と、緑化効果実験を基に緑化の効果について考察を加えた。以下に本研究の主な結論と今後の課題についてまとめる。

- (1) 熊本市を事例対象として、熱中症発生状況を参考にして中心市街地の暑熱環境について検討した結果、同市街地は日差しがあり交通量がある地点で熱中症になる危険性が高く、またアーケードでも時間帯によって35℃を越える箇所があり、注意が必要である。
- (2) 熊本市中心市街地の暑熱環境調査結果を用いて空調エネルギー負荷計算を行い、同市街地の暑熱環境による環境影響を空調エネルギー負荷で評価することを試みた。計算はあくまで仮定に基づくもので現実とは異なるが、都市熱環境対策やヒートアイランド対策をエネルギー量或いは二酸化炭素排出量で議論することの可能性があることができた。今後は建物情報を収集しGIS（地理情報システム）を活用する等によって現実的に検討することが考えられる。
- (3) 崇城大学での観測と緑化効果実験では、同じ地域でも周辺状況で暑熱環境に明らかに差異が生じることを量的に確認できた。緑化効果実験は冬季のみ実施したが緑（芝）の保温効果が明示された。今後夏季に実験を実施し、時季を超えた検討が求められる。

謝辞：熱中症発生についてデータは熊本市消防庁に提供頂きました。IKONOS データは東京大学古米弘明教授との共同研究を通して使用させて頂きました。記して感謝致します。

参考文献

- 1) Lisa Garland: HEAT ISLAND – UNDERSTANDING AND MITIGATING HEAT IN URBAN AREAS, earthcan, pp. 109-138, 2008.
- 2) 川島久宜, 加藤千尋, 鎌田祥啓, 黒岡秀次, 石間経章: 植生マットを用いた屋上緑化に関する実証実験—夏期における冷房の消費エネルギー削減効果—, 日本ヒートアイランド学術論文集, Vol. 6, pp. 1-7, 2011.
- 3) 上野賢仁, 山口浩太郎, 松岡孝介, 岸本進一, 永友久通: 熊本市中心市街地の暑熱環境と衛星情報等による周辺状況との比較研究, 第36回環境システム研究発表会 講演集 Vol. 36, pp. 325-330, 2008.
- 4) 国立環境研究所: <http://www.nies.go.jp/>
- 5) 熊本市消防庁: 内部資料.
- 6) goo 天気: <http://weather.goo.ne.jp/>
- 7) (財) 日本気象協会ホームページ: <http://www.jwa.or.jp/>
- 8) 京都電子工業: WBGT - 113 熱中症指標計取扱説明書.
- 9) 上野賢仁, 柴田学, 谷川寛樹, 井村秀文: 都市熱環境モデルを利用した空調エネルギー需要の空間分布推計, 環境システム研究, Vol. 27, pp. 165-170, 1999.
- 10) 上野賢仁, 柴田学, 谷川寛樹, 井村秀文: 都市域の家庭の夏季空調エネルギー負荷と家族形態との関連分析, 環境システム研究論文集, Vol. 28, pp. 69-75, 2000.
- 11) (財) 省エネルギーセンター: <http://www.eecj.or.jp/>

(2011.8.8 受付)

INVESTIGATION AND EVALUATION OF THE HOT-ENVIRONMENT IN KUMAMOTO CITY URBAN DISTRICTS

Takahito UENO, Yoshiharu AKAMINE and Kazunari KAMISAKA

The influences of air-conditioning load due to the hot-thermal environment in the district of urban area in case of Kumamoto city were tried to evaluate. The WBGT index, Wet Bulb Globe Temperature, based on moving-observations which were held in 2009 was used to indicate the hot-thermal environment. And then, using these observation data and the building model, which was assumed referring the high resolution satellite image observed by IKONOS, the air-conditioning load was calculated and discussed. Leading these calculation, the sensibility analyses were held about the parameters, assumed building floor area and air-conditioning temperature. Based on the results of this sensibility analyses, the evaluation of the hot-thermal environment of the districts in urban area, which influences to the air-conditioning load, was discussed. As the result, this method was shown to make it possible to evaluate with a reasonable reliability. In addition, the simplified field observations and the green planting experiments were also performed to add discussions about the effect of green covering.