

## 4. ヒートアイランドに伴う人間生活への影響の緩和

### —建築環境工学の立場—

持田 灯\*

#### 1. はじめに

本稿では、理学と工学の共通の課題の一例としてヒートアイランド問題を取り上げる。建築の分野では、過去10余年の間にヒートアイランド対策に関して多くの研究がなされた。この間、筆者は「都市のヒートアイランド対策に関する建築学会提言」(日本建築学会 2005)の策定、建築物に起因するヒートアイランド緩和方策の効果を定量化するための評価システム Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency on Heat Island Relaxation (CASBEE-HI) (村上ほか 2006; 日本サステナブル建築協会 2010)の開発、日本建築学会叢書「ヒートアイランドと建築・都市—対策のビジョンと課題」(日本建築学会 2007)の編集等に携わり、建築分野におけるヒートアイランド対策のあり方について考える機会が度々あった。以下では、最初にこの点について述べた後に、CASBEE-HIの概要を紹介し、最後に、気象の専門家と連携して取り組むべき課題について考えてみたい。

#### 2. 建築分野におけるヒートアイランド対策の基本的考え方

ヒートアイランド現象は、都市化に伴う都市スケールの気候変化であるが、建物建設に伴う都市表面の人工被覆化やエネルギー消費の増加が、このような広域の気候変化をもたす元凶の一つであることは明らかである。従って、その原因となる建物敷地内からの大気への熱放散を削減することは建築分野に課された使命であると言える。

これとともに忘れてはならないのが、歩行者空間等の屋外の生活空間の温熱環境の改善のための努力である。ヒートアイランドの研究は、気象、地理、土木等様々な分野で進められているが、これらの諸分野と比べて建築という分野の大きな特徴の一つは、都市の居住者の生活に直接的に影響を及ぼすということである。現在、これほどまでにヒートアイランド問題が社会の関心を集めているのは、市民が日常的に体験している歩行者レベルの屋外空間の暑熱化の程度が、近年、人間の許容限界を超えてしまったということが大きいのではないと思われる。この屋外の生活空間の温熱環境は、建物の配置や形状、建物外装材、地表面被覆や樹木配置、空調排熱の排出位置や排熱形態等の相違により大きく変化するものである。例えば、同量の空調排熱が大気中に放散されるとしても、屋上から排出されるか地表付近から排出されるかにより、歩行者レベルの温熱環境は大きく変化する。このような変化は、都市境界層全体から見れば、その底部の地表付近で生じたごく僅かな変化かもしれないが、これにより屋外の生活空間の質は大きく異なったものとなる。従って、広域の気候に対する負荷の削減(第1図a)とともに、建物周辺の微気候(microclimate)の分布を適切にコントロールし(第1図b)、歩行者レベルの温熱環境の改善を図ることが大切であり、このような貢献は建築分野のみがなし得るものであると考えられる。

次に述べるCASBEE-HIは、このような考え方に基づいて開発されたものである。

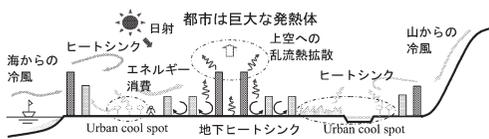
### 3. CASBEE-HIの概要

#### 3.1 開発の経緯

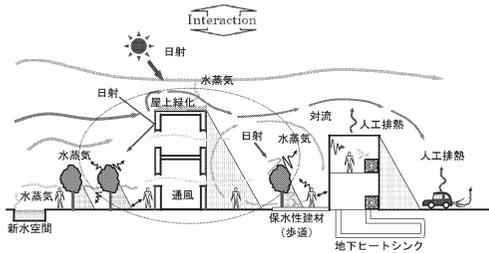
2004年3月には、政府の「ヒートアイランド対策大綱」(ヒートアイランド対策関係府省連絡会議 2004)

\* 東北大学大学院工学研究科,  
mochida@sabine.pln.archi.tohoku.ac.jp  
© 2014 日本気象学会

が発表され、これを受けて2004年7月には、国土交通省の住宅局長名で「ヒートアイランド現象緩和のための建築設計ガイドライン」(国土交通省 2004) が公表された(第2図)。CASBEE-HIは、このガイドラインで定性的に示された建築設計に係わるヒートアイランド対策が実際の設計で採用された際の効果を定量的に評価するためのツールとして整備され、2005年7月に公表された。その後、2006年のマイナーチェンジを経て、2010に大幅な改訂が加えられている(持田・林 2011)。



(a) 都市スケール(メソ気象モデルの対象スケール)



(b) 建物・街区スケール(工学モデルの対象スケール)

第1図 ヒートアイランド対策において着目する2つのスケール。

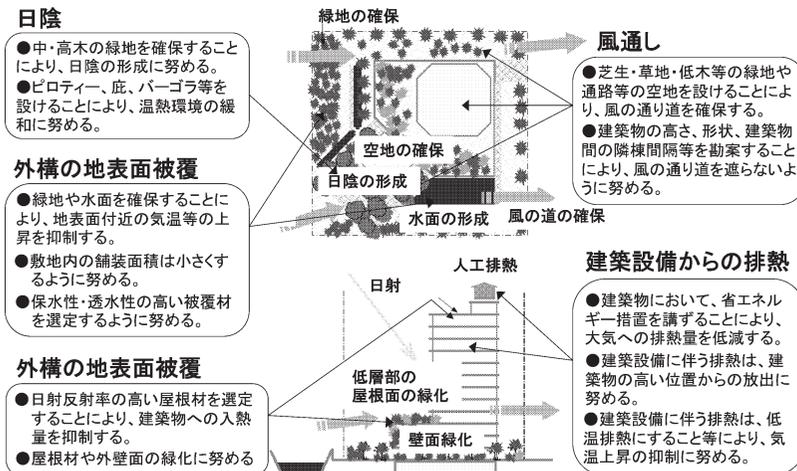
### 3.2 CASBEE と CASBEE-HI

CASBEE-HIは我が国の建築環境総合性能評価システム Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency (CASBEE) (村上 2004; 伊香賀 2013) のサブシステムである。CASBEEは、国土交通省住宅局の支援のもとで、産官学共同で開発した建築物の環境性能の総合評価システムであり、建物単体から街区、都市までの様々なスケールでの評価システムが開発され(伊香賀 2013)、ファミリーを構成している。

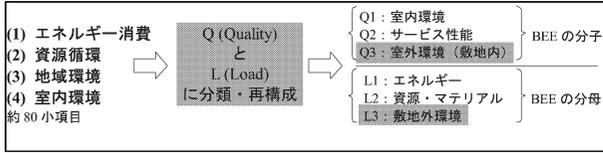
CASBEEでは、環境品質・性能を  $Q$  (Quality), 環境負荷を  $L$  (Loadings) と表し、両者を明確に区別する。そしてその比 ( $Q/L$ ) を環境効率 (BEE: Built Environment Efficiency) と定義し、これに基づく評価を行う。この目的のために、第3図に示すように、多くの評価項目を  $Q$  と  $L$  に分類、再構成している。CASBEE-HIは、建築設計に係るヒートアイランド対策の効果を定量的に評価し、CASBEEによる評価を補完することを目的としており、第3図の評価項目中の  $Q3$  (室外環境(敷地内)) と  $L3$  (敷地外環境) の中の屋外温熱環境、ヒートアイランド負荷に係わる部分をより詳細に評価するという位置づけになっている<sup>1)</sup>。

### 3.3 建築物の集積としての都市

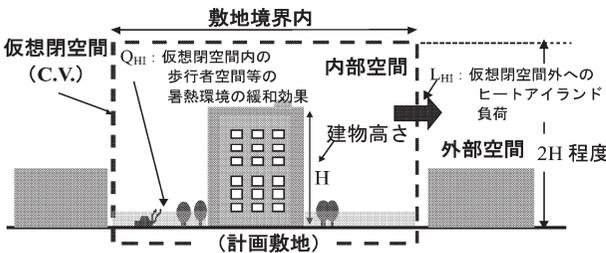
従来のヒートアイランド対策の研究では、都市スケールの気候(第1図a)に着目し、各種対策手法が都市全体の気候に与える影響について検討が加えられることが多かったが、個別の建築設計における工夫の積み重ねから全体の気候改善をめざす場合、別の視点も必要である。CASBEE-HIでは、都市を個別の建築物の集積として捉え、個々の建築物周辺のマイクロな気候(第1図b)を改善するための建築設計上の種々の対策の中で、同時に広域への負荷の削減にも効果的に寄与する手法を優先的に選択するための評価手法の提案をめざした。



第2図 ヒートアイランド現象緩和のための建築設計ガイドラインに基づく建築設計に当たっての配慮(例)(国土交通省)。



第3図 CASBEE-における評価項目 Q (建築物の環境品質・性能) と L (建築物の環境負荷) による分類・再構成 (CASBEE-HI では Q3 と L3 を詳細に評価) (村上ほか 2004; 日本サステナブル建築協会 2010).



第4図 評価のための仮想閉空間。

### 3.4 CASBEE-HI における環境効率 BEE<sub>HI</sub>

CASBEE-HI では、敷地を囲む仮想閉空間を考える (第4図)。敷地境界の内部に対しては、建築主や建築家はその力を及ぼし得るので、敷地内の環境の質 (以降  $Q_{HI}$  と表記) の最大化のために努力することが可能である。一方、敷地境界の外部は、いわば公的空間であるので、これに対する影響、負荷 (以降  $L_{HI}$  と表記) は最小化しなければならない。このような考え方に基づいて CASBEE-HI における環境効率 BEE<sub>HI</sub> を次式で定義する。

$$BEE_{HI} = Q_{HI} / L_{HI} \quad (1)$$

ここでは、 $L_{HI}$  は対象領域内の建築物の建設等により、敷地外の、①気温がどれだけ上昇するか、②温熱快適性がどれだけ悪化するかという観点から評価する。一方、 $Q_{HI}$  は、人間の存在する地上 2~3m の領域の温熱環境の改善効果から評価する。

### 3.5 BEE<sub>HI</sub> の定式化

#### 3.5.1 仮想閉空間外へのヒートアイランド負荷

##### $L_{HI}$ の評価式の定式化

CASBEE-HI では屋外の温熱環境を評価するための指標として Standard New Effective Temperature (SET\* : 新標準有効温度) (Gagge *et al.* 1986) を採用している。SET\* とは、空調等の分野で用いられて

いる人体の温冷感を表す指標であり、気温、湿度、風速、人体に入射する放射量 (日射と路面や外壁面等からの長波長放射) の環境 4 要素と、人の状態を表す着衣量、代謝量から算出される。そして、対象領域内の建築物の建設等により、敷地外の①気温、② SET\* がどれだけ上昇するかという観点から各時刻のヒートアイランド負荷  $L_{HI}(t)$  を評価する。

$$L_{HI}(t) = w_{L1}(t) \times (\text{気温上昇に対する負荷}) + w_{L2}(t) \times (\text{SET* 上昇に対する負荷}) \quad (2)$$

ここで、 $w_{L1}(t)$  は評価対象空間 (第4図) の外部の気温上昇に対する負荷の重み (寄与率) を示す係数、 $w_{L2}(t)$  は評価対象空間外部の SET\* 上昇に対する負荷の重み (寄与率) を示す係数であり、時間の関数として与えられる。

現在のヒートアイランド対策の主要な目標は、①日中の暑熱環境の緩和、②夜間気温の低下 (熱帯夜の削減) であると考えられる。①は SET\* で評価されるが、②の目的は、夜間の主として非空調時の室内環境の改善であり、これに関わる負荷は、屋外空間の SET\* よりも気温そのものから評価するほうが適切である。そこで CASBEE-HI では、日中は  $w_{L2}(t)$  を大きく、そして夜間は  $w_{L1}(t)$  を大きく与え、各時刻の  $L_{HI}(t)$  を評価する。ここで、 $L_{HI}(t)$  の評価のための入力値としては、評価対象空間の境界面を単位時間あたりに通過する熱量 (顕熱、潜熱) や運動量を利用する。そして、次式により  $L_{HI}(t)$  を定義する (村上ほか 2006; 日本サステナブル建築協会 2010)。

$$L_{HI}(t) = \left[ \frac{w_{L1}(t) + 0.7w_{L2}(t)}{c_p} \right] \Delta S(t) + w_{L2}(t) \left[ \frac{320}{t} \right] \Delta E(t) + 2.0w_{L2}(t) (-\Delta M(t)) \quad (3)$$

但し、 $c_p$  : 空気比熱 ( $1.003 \times 10^3$  [J/kg · K])

$\iota$  : 水の蒸発潜熱 ( $2.5 \times 10^6$  [J/kg])

$\Delta S$  : C.V.境界面から単位時間あたりに放散される顕熱量の変化 (流出-流入) [W]

$\Delta E$  : C.V.境界面から単位時間あたりに放散される潜熱量の変化 (流出-流入) [W]

$\Delta M$  : C.V.内の建物等の存在による単位時間あた

りの運動量の変化 (流出-流入)  
[kgm/s<sup>2</sup>]

式(3)により, C.V.内の建築物および敷地内の地表面被覆や樹木等の影響による顕熱上昇 (+ΔS), 潜熱上昇 (+ΔE), 運動量低下 (-ΔM) から  $L_{HI}(t)$  が評価される.

3.5.2 仮想閉空間内の温熱環境の改善効果:  $Q_{HI}$  の評価式の定式化

仮想閉空間の内側における温熱環境の改善効果 ( $Q_{HI}$ ) は, 人間の存在する地上 2~3m の領域 (歩行者空間等) を対象に評価する. ここで言う歩行者空間等には歩行者空間の他に屋上庭園やピロティ<sup>2)</sup>等のような敷地内の屋外において人が存在する領域全体 (屋外生活空間) を含む. ここでは, 各時刻の暑熱環

境の緩和効果 ( $Q_{HI}(t)$ ) を SET\* から評価する. すなわち,

$$Q_{HI}(t) = W_Q(t) \times \langle (\text{SET}^* \text{の許容上限値} - \text{SET}^*(x,y,z,t)) \rangle \times V_{許容} \quad (4)$$

但し,  $W_Q(t)$ : 敷地内の歩行者空間等に人間の存在する確率を示す重み係数

$\langle \rangle$ :  $Q_{HI}$  の評価領域内の空間平均値

$V_{許容}$ :  $Q_{HI}$  の評価領域内の地上 2~3m の人の存在する空間 (歩行者区間等) 内において SET\* が許容上限値以下となる領域の体積

式(4)は, 敷地内の歩行者空間等における SET\* が許容上限値を超えない空間領域が広いほど良いという考えに基づいている. また,  $Q_{HI}(t)$  で問題とするのは

第1表 環境配慮項目の分類.

大項目	中項目	小項目	
1. 風通し	$Q_{HI-1}$ 敷地内の歩行者空間等へ風を導き、暑熱環境を緩和する		
	LR <sub>HI-1</sub> 風下となる地域への風通しに配慮し、敷地外への熱的な影響を低減する		
2. 日陰	$Q_{HI-2}$ 夏期における日陰を形成し、敷地内歩行者空間等の暑熱環境を緩和する		
3. 外構の地表面被覆	$Q_{HI-3}$ 敷地内に緑地や水面等を確保し、敷地内歩行者空間等の暑熱環境を緩和する		
	LR <sub>HI-3</sub> 地表面被覆材に配慮し、敷地外への熱的な影響を低減する		
4. 建築外装材料	$Q_{HI-4}$ 建築外装材料等に配慮し、敷地内歩行者空間等の暑熱環境を緩和する	①屋上(人が出入りできる部分)の緑化に努める	
		②外壁面の材料に配慮する ・特に建築物の南側や西側の壁面等の日射の影響が強い部位の緑化等に努める	
	LR <sub>HI-4</sub> 建築外装材料等に配慮し、敷地外への熱的な影響を低減する	①屋根面の緑化等と高反射材料を選定するように努める	A. 屋根面の緑化等に努める B. 日射反射率の高い屋根材を選定するよう努める
		②外壁面の材料に配慮する	
5. 建築設備からの排熱	$Q_{HI-5}$ 建築設備に伴う排熱の位置等に配慮し、敷地内歩行者空間等の暑熱環境を緩和する		
	LR <sub>HI-5</sub> 建築設備からの大気への排熱量を低減する	①建築物の外壁・窓等を通しての熱損失の防止及び空調設備等に係るエネルギーの効率的利用のための措置を講ずることにより、大気への排熱量を低減する。	
		②建築設備に伴う排熱は、低温排熱にすること等により、気温上昇の抑制に努める	
③排熱のピークシフトをはかる ・蓄熱システムなどがあるが、全日評価の場合には評価をしない。日中のみを評価する場合に評価する			

人間がいる時の歩行者空間等の温熱環境の改善効果であるので、実際にそこに人間の存在する確率の時刻変化を示す重み係数  $W_Q(t)$  を右辺に乗じている。

### 3.5.3 BEE<sub>HI</sub>の評価

式(3),式(4)から与えられる各時刻の  $L_{HI}(t)$ ,  $Q_{HI}(t)$  の日積算値 ( $\sum L_{HI}(t)$ ,  $\sum Q_{HI}(t)$ ) から BEE<sub>HI</sub> を評価する。

$$BEE_{HI} = \sum Q_{HI}(t) / \sum L_{HI}(t) \quad (5)$$

### 3.6 評価シートの構成

BEE<sub>HI</sub> を正確に算出するためには、詳細な流体数値解析と放射解析を行う必要があるが、あらゆる建物の計画段階において、その都度数値解析を行うということは困難である。このため、CASBEE-HI では評価シートを用いた評価システムを準備している。第1表に評価項目の分類を示す。大項目は、「風通し」、「日陰」、「外構<sup>3)</sup>の地表面被覆」、「建築外装材料」、「建築設備からの排熱」の5つからなり、中項目には大項目のそれぞれに対応して、 $Q_{HI}$  (敷地内の屋外温熱環境改善効果)、 $LR_{HI}$  (敷地外へのヒートアイランド負荷低減性) が設定されている。また、小項目には建築設計上の配慮事項が設定されている。

評価対象は、敷地の立地条件と法定容積率に応じて9分類され、各分類ごとに各評価項目の重み係数の異なる評価シートが準備されている。この各評価項目の重み係数は、1次元都市キャノピーモデルと3次元流体解析に基づく各環境配慮項目の効果に関する広範な感度解析の結果 (日本サステナブル建築協会 2010)

から定められている。

第5図に評価結果の一例を示す。横軸が  $L_{HI}$ 、縦軸が  $Q_{HI}$  であり、各ケースの結果を示すプロットと原点を結んだ直線の傾きが環境効率 BEE<sub>HI</sub> に相当する。最終的には、この傾きに応じて、S, A, B+, B-, C の5段階の格付けがなされる。

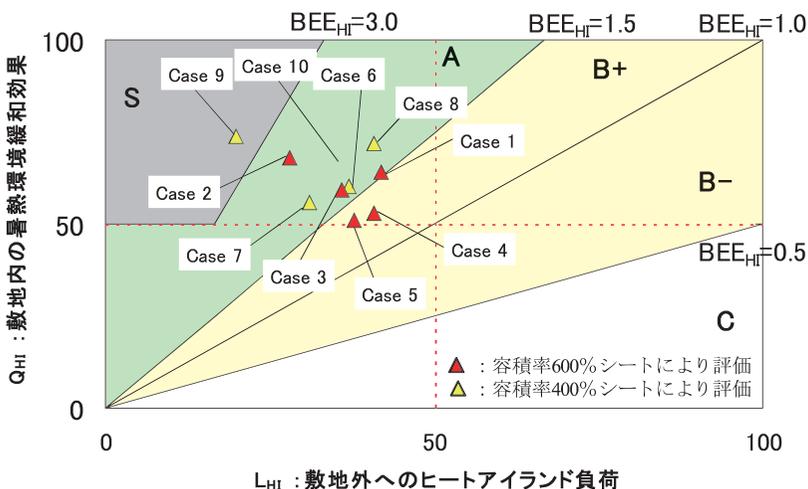
## 4. 気象学の専門家との連携への期待

本稿では建物の外部環境の問題を取り上げたが、建物の内部の温熱環境、空気環境、光環境も全て気象条件の影響を強く受ける。従って、健康で快適な建築環境、建物周辺環境を計画するためには気象データの利用は欠かせない。また、太陽エネルギーや風力エネルギーの有効利用や災害安全性の確保の観点からも気象データの利用は不可欠である。最後に気象分野との連携に際して留意すべき事項と期待されるテーマについて私見を述べたい。

### 4.1 通常の気象情報と設計に必要とされる気象情報

まず指摘しておきたいのは、我々が建築設計や都市計画で必要としているのは、日々の天気予報の結果 (気象情報) ではなく、各地域の気象条件の平均的性状 (気候情報) であつたり、統計的意味づけのなされた極値であるということである。一例を挙げると、建築の分野では、建物の環境設計や空調設計に用いるための気象データとして、拡張アメダス気象データ (赤坂ほか 2000) が整備されているが、設計段階で建物の空調負荷を評価するためには標準的な入力条件が必要となる。

このために、842のアメダス観測地点の15年間のデータから、地点ごとに1~12月の月別に平均的な年 (平均月) を選択し、滑らかに接続して得られた仮想の1年間の時刻別気象データを作成し、標準年気象データとしている。気象の専門家の協力を仰ぐ場合、我々に必要なのは日々の天気予報の結果ではなく、各地域の気象条件の標準的な特性や統計的性状であることを確認しておく必要がある。



第5図 評価結果表示シート。

## 4.2 気候情報の空間分解能の改善

上述した拡張アメダスデータは、気象官署の測定データのみでは地域特性に立脚した環境設計を行うのが困難であることから、アメダスでは観測されていない日射量、大気放射量、湿度データを推定して与え、空間分解能を大幅に向上させたものである。しかし、本稿で取り上げたヒートアイランドの問題もその一例であるが、一層の分解能の改善が求められる問題は数多くある。この面から、近年の気象分野の数値解析の分解能の向上 (down-scaling) の流れには大変期待している。さらに気象モデルと街区スケールを対象とする工学分野のCFDモデルを接続した多重スケールの解析が容易に行えるようになれば、様々な問題の予測・分析、対策評価の精度が格段に向上するものと期待される。しかし、気象モデルと工学モデルのモデル化の考え方の相違や領域間の境界条件の取り扱い等、解決すべき課題も多い (Mochida *et al.* 2011)。

また、最近、気象分野でも建物形状を解像したメッシュ分割を用いた市街地気流の解析が行われるようになってきたが、我々が20年以上前に行った検討が繰り返されているように見える点もあり、我々の過去の蓄積 (例えば、日本建築学会 2007; Tominaga *et al.* 2008) も参考にさせていただければ幸いと考えている。

## 4.3 気候変動下における設計入力条件

現在空調設計で用いられている標準年気象データは過去の観測データから作成されたものである。また、構造設計で想定する建物に作用する風力や積雪荷重も過去の気象データに基づき定められている。地球温暖化、都市温暖化が進行するとともに、大型台風、集中豪雨、豪雪、竜巻等による気象災害が頻発する中で、今後、長期にわたり利用される都市や建物の計画、設計の前提条件を過去の気象データから定めてよいかは大いに疑問であり、気象の専門家の協力を仰ぐべき重要なテーマの一つと考えている。

## 4.4 部分最適化の蓄積の全体への影響

3.4節で述べたようにCASBEE-HIは敷地単位で $Q$ と $L$ を評価している。これは、建物オーナーや設計者の権限の及ぶ範囲で最善を尽くしてもらうという考えに基づいている。現在の我が国の状況では、想定されるのは既に発展を遂げた都市内部での部分的な改善であるが、急速に発展しているアジアの都市の状況等を考えると、敷地単位ごとの部分最適化の蓄積が全体に及ぼす影響 (環境負荷 $L$ ) に関するより慎重な検討が必要ではないかと考えている。これは、今後、気

象モデルと工学モデルの双方向のネスティングに基づく解析により検討されるべき課題であると思われる。

## 後 注

- 1) 本稿で紹介するCASBEE-HIはCASBEE-新築等と併用されることを前提としている。室内の温熱環境・エネルギー消費等はCASBEE-新築等で評価されるものと考え、評価対象には含めてはいない。
- 2) ピロティとは、一般に2階以上の建物において地上部分が柱を残して外部空間とした建築形式のことである。
- 3) 外構とは、敷地内の建物の外にある構造物を指す言葉であるが、敷地内の建物周辺環境全般を指す場合が多い。外構工事の中には、門や塀の工事、舗装工事等の他に造園植栽関係の工事も含まれる。

## 参 考 文 献

- 赤坂 裕, 二宮秀興, 松本真一, 曾我和弘, 永村一雄, 三木信博, 永村悦子, 武政孝治, 2000: 拡張アメダス気象データ. 日本建築学会編著, 丸善, 427pp.
- Gagge, A. P., A. P. Fobelets and L. G. Berglund, 1986: A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHRAE Trans., 92, 709-731.
- ヒートアイランド対策関係府省連絡会議, 2004: ヒートアイランド大綱. 18pp, [http://www.env.go.jp/press/file\\_view.php?serial=5450&hou\\_id=4837](http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=5450&hou_id=4837) (2012.12.21閲覧).
- 伊香賀俊治, 2013: 日本の建築環境総合性能評価システムCASBEE. 空気調和・衛生工学, 87, 331-336.
- 国土交通省, 2004: ヒートアイランド現象緩和のための建築設計ガイドライン. 3pp, <http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha04/07/070716/02.pdf> (2012.12.21閲覧).
- 持田 灯, 林 立也, 2011: CASBEE-HIの改訂について. IBEC, (182), 25-28.
- Mochida, A., S. Iizuka, Y. Tominaga and I. Y.-F. Lun, 2011: Up-scaling CWE models to include mesoscale meteorological influences. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 99, 187-198.
- 村上周三, 2004: CASBEE入門—建築物を環境性能で格付けする. 日経BP, 198pp.
- 村上周三, 松縄 堅, 持田 灯, 丹羽英治, 大岡龍三, 足永靖信, 谷本 潤, 森川泰成, 柳原隆司, 2006: ヒートアイランド現象緩和に関する評価システムCASBEE-HIの開発. 日本建築学会技術報告集, (23), 247-252.
- 日本建築学会, 2005: 都市のヒートアイランド対策に関する提言. 建築雑誌, 120, 74-76.
- 日本建築学会編, 2007: 市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック—ガイドラインと検証データベース—. 日本建築学会, 207pp.

日本サステナブル建築協会編，2010：CASBEE-HI 評価  
マニュアル（2010年版），建築環境・省エネルギー機構，  
155pp.

Tominaga, Y., A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T.

Nozu, M. Yoshikawa and T. Shirasawa, 2008: AIJ  
guidelines for practical applications of CFD to pedestrian  
wind environment around buildings. J. Wind  
Eng. Ind. Aerodyn., 96, 1749-1761.

---