

ヒトの熱環境適応と想像温度に関する考察

正会員 ○ 齊藤 雅也*
同 辻原 万規彦**

適応的快適性 想像温度 暑熱不快
寒暑感 屋外環境 地域性

1. はじめに

住まい手に「涼しさ」や「温もり」をもたらす建築環境を実現するためには、ヒトに本来備わる生理から心理・行動に至る熱環境適応の特性を理解する必要がある。筆者らはこれまで、ヒトの温熱環境に対する心理尺度としての「想像温度」に着目し、想像温度が温熱環境や生理の影響をどのように受けて、その後の行動にどのような影響を及ぼすかを明らかにする実測・解析を進めてきた^{1), 2)}。

図1は、想像温度がヒトの熱環境適応のどこに位置するかを既往研究^{3)~5)}に基づいて、筆者らの仮説として示したものである。後述するが、想像温度は地域性を有するので、屋外環境要素からの影響を先ず受けて、その後、室内環境・人体要素、さらに自立体温調整（生理）などからの影響後に決定されると考えている。

本報では、小学生を対象とした過去の調査結果を用いて、想像温度が室内環境・人体要素に加えて屋外環境要素から受ける影響を明らかにした。さらに、熱環境適応に対する想像温度とMRT・SET*の関係を検証し、熱環境適応の評価において想像温度が有用である可能性を示した。

2. 暑熱不快と想像温度

図2は、小学生を対象に2010～2012年夏の教室の温熱環境を調査した結果で、札幌・熊本の通風された教室（冷房なし）での、想像温度（赤線）の変化に対する「これ以上我慢できない暑さ」を意味する暑熱

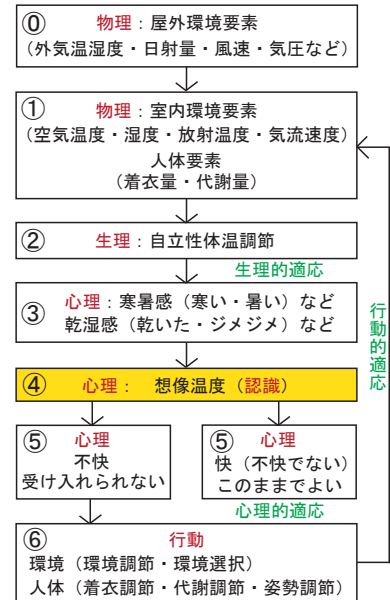


図1 ヒトの熱環境適応と想像温度

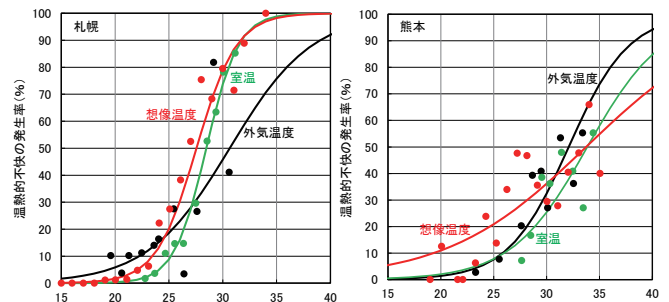


図2 札幌・熊本の想像温度と暑熱不快率（2010～2012）

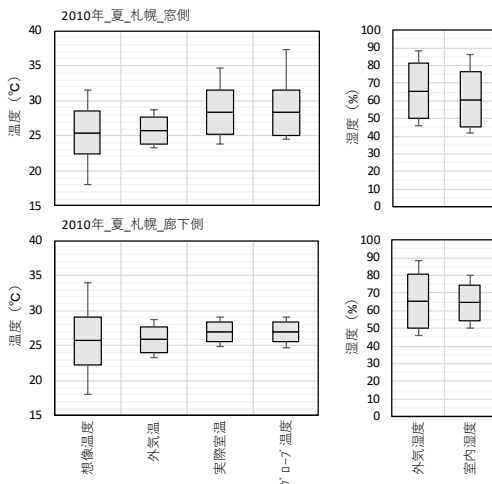


図3 札幌の想像温度・室内/外気温湿度・グローブ温
(上：窓側・下：廊下側、N=419)

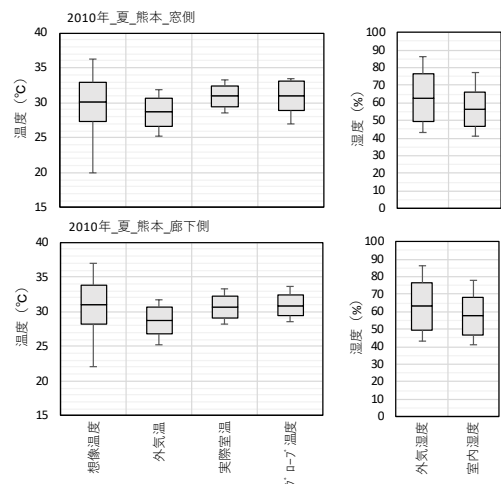


図4 熊本の想像温度・室内/外気温湿度・グローブ温
(上：窓側・下：廊下側、N=324)

Discussion on Human Thermal Adaptation and its associated Cognitive Temperature Scale

SAITO Masaya and TSUJIHARA Makihiko

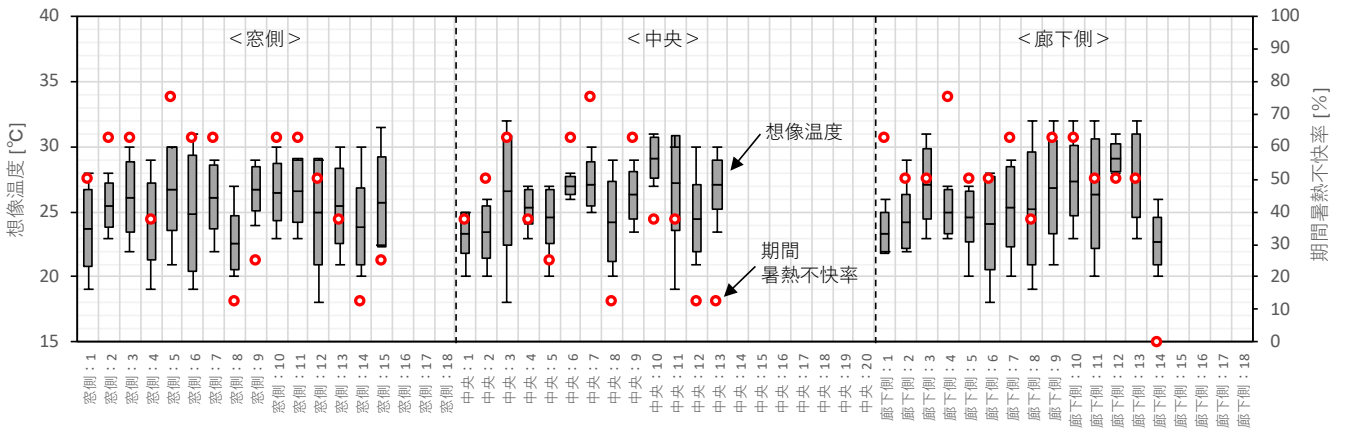


図5 札幌の各児童の想像温度・期間暑熱不快率

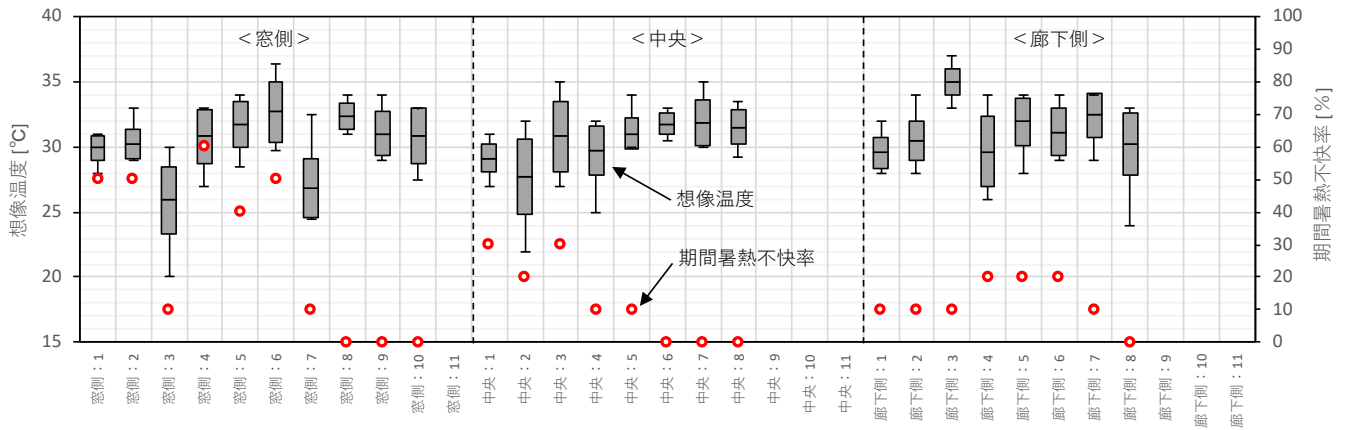


図6 熊本の各児童の想像温度・期間暑熱不快率

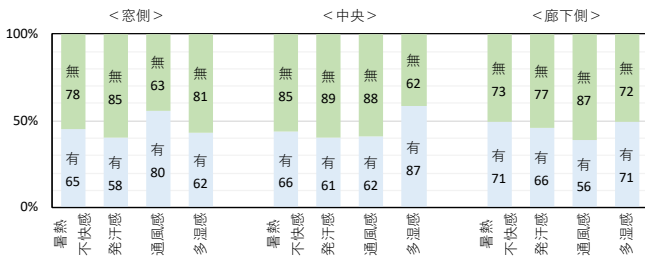


図7 札幌の暑熱不快感・発汗感・通風感・多湿感の割合

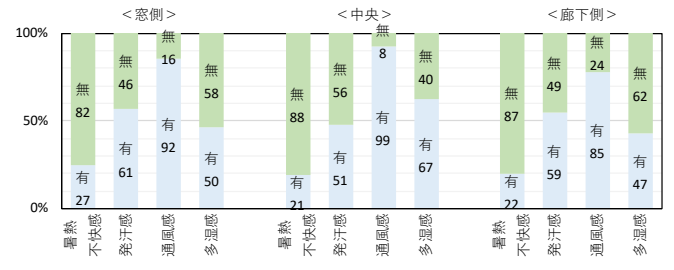


図8 熊本の暑熱不快感・発汗感・通風感・多湿感の割合

不快感の発生率（以下、暑熱不快率）である。札幌では、全児童の8割が暑熱不快を感じる際の想像温度が30°Cであるが、熊本では想像温度が34°Cでも半数は暑熱不快にならない²⁾。このように地域によって「我慢できない暑さ」を認識する想像温度の閾値は異なるので、想像温度は地域特有の尺度と言える。

図3と4は、2010年夏の札幌・熊本での教室の窓側・廊下側の児童の想像温度と室内外の環境要素である（以降の図は全て2010年の結果）。札幌の外気温湿度は23～29°C・40～85%、熊本は25～32°C・40～80%で、札幌では窓側の実際室温・グローブ温の最高が廊下側より2～3°C高いが、熊本では窓側・廊下側に差がない。また、児童の平均想像温度は札幌25～26°C、熊本30～31°Cで、札幌・熊本ともに窓側と廊下側に差はない。

図5と6は、札幌・熊本の各児童の着席位置（窓側・

中央・廊下側）の違いによる想像温度と調査期間中の暑熱不快率（以下、期間暑熱不快率）である。前述のように、札幌の想像温度は熊本より5°C低い、期間暑熱不快率は熊本より高い。また、着席位置による想像温度の違いは札幌・熊本ともにあまり見られないが、熊本の期間暑熱不快率は、窓側が中央・廊下側よりやや高い。

図7と8は、札幌・熊本の児童の着席位置による暑熱不快感・発汗感（汗をかいていると感じる）・通風感（風を感じる）・多湿感（ジメジメさを感じる）の有無である。これらの生理的適応に大きく関わる感覚は児童の主観申告であるが、札幌・熊本ともに座席位置の差はほとんどない。また、発汗感・多湿感は見られませんが、暑熱不快感は熊本が札幌より小さく、通風感も熊本が札幌より大きい。この結果は、熊本の教室が3階、

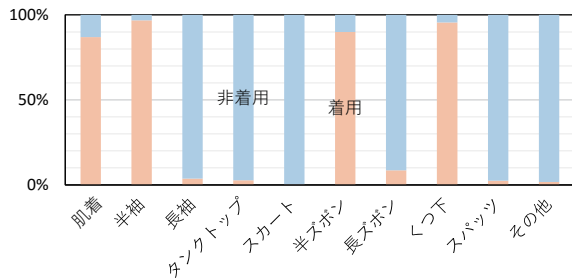


図9 札幌の児童の着衣状態

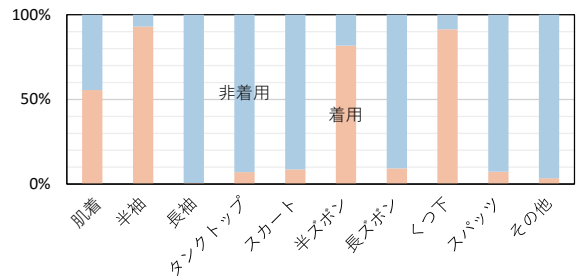


図10 熊本の児童の着衣状態

表1 札幌の物理量・生理量・心理量の各相関係数

		屋外要素			室内要素		
		外気温 [°C]	外気湿度 [%]	日射量 [W/m ²]	実際室温 [°C]	室内湿度 [%]	MRT [°C]
暑熱 不快率 [%]	窓側	0.87	-0.60	0.57	0.88	-0.64	0.88
	中央	0.92	-0.72	0.63	0.91	-0.73	0.90
	廊下側	0.81	-0.52	0.51	0.81	-0.49	0.83
想像温度 [°C]	窓側	0.86	-0.50	0.50	0.86	-0.57	0.86
	中央	0.89	-0.53	0.42	0.88	-0.55	0.86
	廊下側	0.75	-0.41	0.43	0.77	-0.35	0.79
発汗感率 [%]	窓側	0.73	-0.44	0.32	0.70	-0.46	0.70
	中央	0.61	-0.24	0.17	0.59	-0.23	0.60
	廊下側	0.55	-0.29	0.26	0.54	-0.31	0.57
通風感率 [%]	窓側	-0.69	0.85	-0.92	-0.83	0.86	-0.85
	中央	-0.72	0.90	-0.87	-0.74	0.89	-0.76
	廊下側	-0.62	0.86	-0.89	-0.62	0.82	-0.64
多湿感率 [%]	窓側	0.81	-0.41	0.28	0.73	-0.47	0.72
	中央	0.80	-0.68	0.54	0.77	-0.68	0.76
	廊下側	0.56	-0.23	0.16	0.64	-0.25	0.64

表2 熊本の札幌の物理量・生理量・心理量の各相関係数

		屋外要素			室内要素		
		外気温 [°C]	外気湿度 [%]	日射量 [W/m ²]	実際室温 [°C]	室内湿度 [%]	MRT [°C]
暑熱 不快率 [%]	窓側	0.55	-0.89	0.93	0.49	-0.85	0.66
	中央	0.73	-0.47	0.45	0.82	-0.48	0.74
	廊下側	0.70	-0.12	0.14	0.64	-0.01	0.69
想像温度 [°C]	窓側	0.92	-0.69	0.70	0.93	-0.62	0.89
	中央	0.81	-0.18	0.27	0.84	-0.12	0.73
	廊下側	0.74	-0.08	0.14	0.77	-0.04	0.78
発汗感率 [%]	窓側	0.76	-0.72	0.76	0.79	-0.68	0.90
	中央	0.78	-0.08	0.11	0.82	0.00	0.71
	廊下側	0.79	-0.53	0.45	0.84	-0.51	0.81
通風感率 [%]	窓側	-0.10	0.70	-0.45	-0.16	0.74	-0.44
	中央	-0.24	0.33	-0.02	-0.24	0.34	-0.30
	廊下側	-0.65	0.56	-0.67	-0.59	0.50	-0.47
多湿感率 [%]	窓側	0.71	-0.13	0.09	0.73	-0.01	0.57
	中央	0.24	0.42	-0.52	0.30	0.46	0.16
	廊下側	0.64	-0.47	0.30	0.67	-0.43	0.68

札幌が1階にあり、熊本の教室では札幌の教室よりも外部風を室内に導きやすかったことが理由の一つに挙げられる。

図9と図10は、札幌・熊本での児童の着衣状態である。札幌・熊本の地域差はほとんどないが、唯一、肌着の着用率に差がある。札幌の着用率は約9割（女子はほぼ全員）なのに対して、熊本では半分である。これは札幌の平均外気温（26°C）が熊本（29°C）より3°C低いことによる熱環境適応の地域差と言える。

3. 屋外環境要素と想像温度

図5、6で示したように想像温度の個人差は大きい。つまり、同じ室内温熱環境でも想像温度が高い者もいれば低い者もいて幅がある。一般にヒトの寒暑感には想像温度と同じような個人差が存在する。人体エネルギー収支に基づいて導かれるPMVは、ヒトの寒暑感を7段階尺度に正規化し、個人差や地域差の影響を取り除いた指標と言える。PMVのように想像温度を正規化すると、想像温度が本来もつ地域性やヒトの熱環境適応の特性が表れなくなる可能性がある。そこで、今回は調査日・着席位置別に、屋外・室内環境要素・想像温度・暑熱不快率などの温熱心理との対応関係を確認した。

まず屋外環境要素の中で、室内環境要素に直接的な影響を与えると考えられる外気温・外気湿度・日射量の3要素について調査日別に主成分分析を行なった。その結果、札幌・熊本ともに強い日射で外気温が高く、湿度が低い日もあれば、弱い日射で外気温が低く、湿度が高い日もあった。また、屋外3要素と室内3要素（実際室温・室内湿度・MRT）に強い相関があったので、屋外・室内の計6要素と暑熱不快率・想像温度・発汗感率・通風感率・多湿感率の各相関を確認した。

表1と2は、札幌と熊本での結果を着席別に示したもので、赤は正、青は負の相関、濃い色ほど高い相関を意味する。札幌の暑熱不快率・想像温度・発汗感率・多湿感率は外気温・実際室温・MRTと正の相関が高く、外気湿度・室内湿度と負の相関が比較的高い。一方、通風感率は外気温・日射量・実際室温・MRTと負の相関が高く、外気湿度・室内湿度と正の相関が高い。通風感は、弱い日射で外気温・実際室温・MRTがともに低く、外気湿度・室内湿度が高い日に得られやすい。つまり、高湿度環境下でも日射を遮へいしてMRTを極端に上げないように配慮すれば、発汗によって濡れた皮膚や着衣面に室内を抜ける風が当たり、蒸発が促されることで通風感は得られやすいと考えられる。

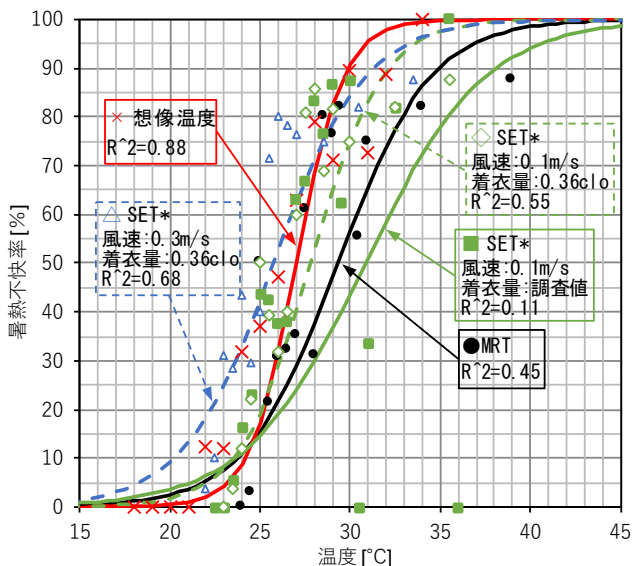


図 11 札幌の想像温度・MRT・SET* と暑熱不快率 (2010)

熊本も札幌と同様の傾向がみられるが、暑熱不快率・想像温度・発汗感率は外気温・日射量と正の相関があり、窓側が最大で、中央、廊下側と徐々に下がる。また、外気湿度・室内湿度とは負の相関があり、同じく窓側・中央・廊下側と徐々に下がる。これは、特に窓側の児童が屋外要素（外気温湿度・日射）の影響を強く受けていることを意味する。熊本で暑熱不快感を回避・緩和するためには、窓の外での日射遮へいが児童の熱環境適応を促す上で重要と考えられる。

4. 熱環境適応 評価のための想像温度

図 11 と 12 は、札幌・熊本での想像温度・MRT・SET* に対する暑熱不快率の関係である。これは、実測データを調査日・着席位置別に分類して求めた結果ではなく、全調査日における被験者ごとの想像温度・MRT・SET* と暑熱不快率の関係（図中のプロット）をロジスティック関数によって近似曲線で示したものである。なお、暑熱不快率の集計間隔は、想像温度は 1°C、MRT・SET* は 0.5°C とした。MRT は空気温度・グローブ温度・風速 (0.1m/s と仮定) の簡易式から求め、SET* の風速は 0.1m/s、0.3m/s 一定の 2 ケース、着衣量は 0.36clo 一定 (札幌・熊本の平均値)、調査値 (各児童の毎日の着衣に関する回答) の 2 ケースとした。

図 11 の札幌では、想像温度と暑熱不快率の相関が一番高く、MRT との相関は比較的ある。一方、着衣量を調査値とした SET* と暑熱不快感の相関は極めて低く、clo 値を一定とした SET* の相関の方が高い。着衣量の与え方で大きな差が生まれる。なお、札幌・熊本とも実際室温と暑熱不快率の相関は MRT より低かった。

* 札幌市立大学デザイン学部 教授・博士 (工学)

** 熊本県立大学環境共生学部 教授・博士 (工学)

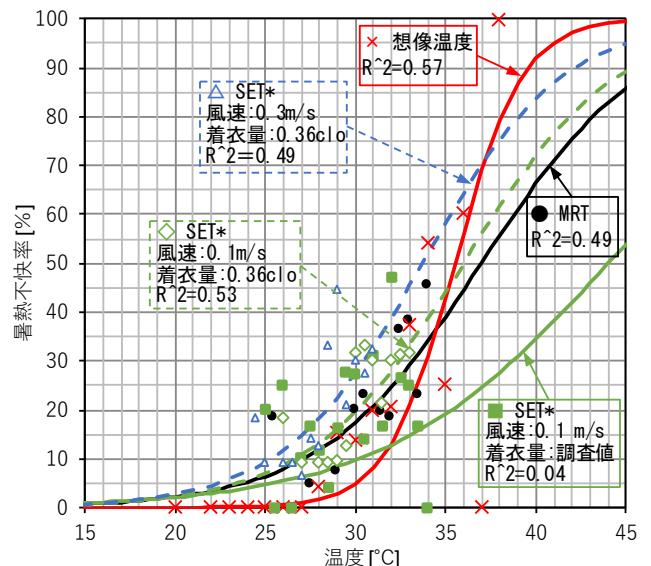


図 12 熊本の想像温度・MRT・SET* と暑熱不快率 (2010)

図 12 の熊本では、想像温度・MRT・SET* と暑熱不快率の各相関は札幌より低い、札幌と概ね同じ傾向で、2010～2012 年の結果 (図 2) とも整合する。

想像温度と暑熱不快率とはともに心理量で、両者の相関が高いのは当然とも言えるが、今後、筆者らは外気温湿度や日射量との相関が高く、地域性を有する想像温度の特徴を活かすことができないかと考えている。例えば、屋外環境要素 (気象データ) に基づき、建築の断熱性・ヒトの熱環境適応性の組み合わせ別に想像温度と人体エクセルギー収支^{6)~8)} の関係を整理すれば、地域別に異なると予想されるヒトの熱環境適応をさらに説明できる可能性がある。以上は今後の課題である。

参考文献 1) 齊藤雅也：ヒトの想像温度と環境調整行動に関する研究 夏季の札幌における大学研究室を事例として、日本建築学会環境系論文集 第 74 巻 第 646 号, pp.1299-1306, 2009. 2) 齊藤雅也・辻原万規彦：人の想像温度と温熱環境適応, 日本建築学会 第 45 回熱シンポジウム予稿集, pp.107-112, 2015. 3) Humphreys and Nicol: Understanding the Adaptive Approach to thermal comfort, ASHRAE Transactions, 104 (ab), pp.991-1005, 1998. 4) Humphreys: Principal of Adaptive Thermal Comfort, H.B リジナル・梅宮典子 (訳)、適応を考慮した熱的快適性の原理、空気調和・衛生工学 第 83 巻 第 6 号, pp.413-419, 2008. 5) 中野淳太・田辺新一：半屋外環境の熱的快適性に関する考察 - 温熱環境適応研究の日本における温熱環境計画への応用とその課題 -, 日本建築学会環境系論文集 第 79 巻 第 701 号, pp.597-606, 2014. 6) M.Shukuya: Exergy -theory and applications in the built environment, Springer-Verlag London, 2013. 7) 宿谷昌則：人体の熱環境適応性とエクセルギー収支にかんする考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.435-438, 2014. 8) 齊藤雅也：クリマデザイン 新しい環境文化のかたち (クリマデザインと放射環境), pp.94-101, 鹿島出版会, 2016.

* Professor, Sapporo City University, Dr. Eng.

** Professor, Prefectural University of Kumamoto, Dr. Eng.