

1 はじめに

既往の研究^[1]では特定建築物の事務用途を対象として建築物衛生法に規定された定期測定において衛生管理基準^[2]（表1参照）を満たしていない割合（以下、不適合割合）が増加傾向にあり、とくに相対湿度、温度、二酸化炭素濃度（以下CO₂濃度）についてはその傾向が顕著であることが示されている。またこれら3項目の不適合割合は節電要請が開始された平成23年度において過去最も高い結果^[3]を示すなど、節電行為による建築物衛生環境の変化が示唆されている。

本研究では、蒸暑地域を含む多地域において、温度、相対湿度、CO₂濃度の他、グローブ温度や室内風速の測定なども行い、WBGT、PMVの測定・算定を実施し室内環境の全体的傾向、温熱的衛生面の安全性、温熱的快適性について検討を行った。なお測定期間である平成25年度の夏は記録的な猛暑であり熱中症による搬送者も平成24年度の数を大きく上回り^[4]かつ節電要請も続いている厳しい条件であった。冬の測定期間に関して例年より四国はやや寒く、関東は平年並みの気温であった。

表1 建築物衛生法の衛生管理基準値^[2]

項目	衛生管理基準値
浮遊粉じんの量	0.15 [mg/m ³]以下
一酸化炭素の含有率	10 [ppm]以下
二酸化炭素の含有率	1000 [ppm]以下
温度	17 [°C]~28 [°C]
相対湿度	40 [%RH]~70 [%RH]
気流	0.5 [m/s]以下
ホルムアルデヒドの量	0.1 [mg/m ³]以下

2 研究概要

本研究では空調制御方式として中央方式と個別方式を対象とし、室内環境の現状把握を目的として、建築物衛生法の定期測定において全国的に不適合割合が高い温度、相対湿度、CO₂濃度^[3]について、15分間隔で連続測定した。各測定対象室の概要を表2、測定期間を表3に示す。

加えて、温熱的衛生性を評価するため、WBGT（熱中症指数）、グローブ温度、湿球温度を5分間隔で連続測定した。（写真1）

本研究では、測定したWBGTとWBGT指数に基づく作業者の熱ストレスの評価^[6]（表4）と照らし合わせることで、

熱中症（温熱的衛生性）の危険度を評価する。本研究の対象は事務用途室であるため、代謝率区分は「1 低代謝率」となる。

WBGTは湿球黒球温度（Wet Bulb Globe Temperature）とも呼ばれ、室内での値は以下の式で求められる。

$$WBGT = 0.7t_{nwb} + 0.3t_g$$

ここに、

WBGT：WBGT指数[°C]

t_g ：グローブ温度[°C]

t_a ：空気温度[°C]

t_{nwb} ：自然換気状態の湿球温度[°C]

また熱的快適性を評価する指標としてPMV（予測平均温冷感）を算定した。ISOの標準では、PMVが±0.5以内、不快率10%以下となるような温熱環境を推奨^[7]している。PMVを計算するにあたり、上記の測定項目の他、測定器設置時に風速を10分間測定した。また文献^[8]を参考とし、PMV算定に必要なclo値（着衣量）を0.7、met値（代謝量）を1.2と設定した。

また風速の測定には微風速計（写真2）を使用した。使用した機器の測定項目、測定箇所を表5に示す。



写真1 WBGT計



写真2 微風速計

表2 対象室の概要

名称	所在地	省エネルギー 地域区分 ^[9]	空調制御方式	対象室 床面積(m ²)
A	高知県	6	個別方式	300
B	高知県	7	中央方式	275
C	愛媛県	6	中央方式	100
D	愛媛県	5	個別方式	190
E	愛媛県	6	個別方式	200
F	香川県	6	中央方式	230
G	高知県	6	個別方式	15
H	高知県	6	個別方式	15
I	高知県	6	中央方式*	400
J	高知県	6	個別方式	80
K	東京都	6	中央・個別 併用方式	350
L	神奈川県	6	個別方式	130

*換気のみ個別方式

表3 測定期間

名称	測定期間(夏期)	測定期間(冬期)
A	8/4~8/31	11/25~1/22
B	8/2~9/3	12/17~1/22
C	8/8~9/4	12/12~1/15
D	8/8~9/4	12/12~1/15
E	8/8~9/4	12/12~1/15
F	8/18~9/5	12/18~1/14
G	9/11~9/19	1/23~1/30
H	9/11~9/19	1/23~1/30
I	7/7~8/3	1/23~1/30
J	7/7~8/3	1/23~1/30
K	8/20~9/3	12/18~12/26
L	9/12~9/26	12/18~12/26

表4 WBGT 指数に基づく作業者の熱ストレスの評価^[6]

代謝率区分	WBGT 基準値[°C]			
	熱に順化している人		熱に順化していない人	
0 安静	33		32	
1 低代謝率	30		29	
2 中程度の代謝率: 中程度の作業	28		26	
	気流を感じない時	気流を感じるとき	気流を感じない時	気流を感じるとき
3 高代謝率: 激しい作業	25	26	22	23
4 極高代謝率: 極激しい作業	23	25	18	20

*本研究では代謝率区分1を対象としている。

表5 各測定項目・箇所

測定項目	測定器	測定箇所
WBGT [°C]	データロガー熱中症計 HI-2000SD	机上
温度 [°C]		
相対湿度 [%RH]		
グローブ温度 [°C]		
湿球温度 [°C]		
CO ₂ 濃度 [ppm]	CO ₂ センサ KNS-CO2S	同上
風速 [m/s]	微風速計 SWA-03	同上

3 測定結果

取得データのうち、業務時間(8:00~18:00)のものを抽出して整理を行った。

3.1 温湿度、CO₂濃度の測定結果(夏期)

夏期の各対象室における温度、相対湿度、CO₂濃度をそれぞれ図2~4(箱ひげ図の凡例は図1を参照されたい)に示す。これら図中には衛生管理基準値の範囲をグレーで示し、箱ひげ図上の数字は各室の平均値を表している。温度について中央値は基準値外となっているBとFは中央方式であるため、管理者が空調の設定温度を高めに行っている可能性がある。相対湿度についてはほとんどが基準値内となっている。CO₂濃度についてはFが高く、中央方式の暖冷房であるが換気のみ個別方式のI、および間歇的に換気設備を停止していたJに課題がみられる結果となった。

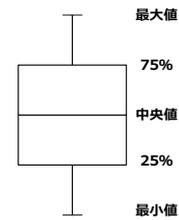


図1 箱ひげ図凡例

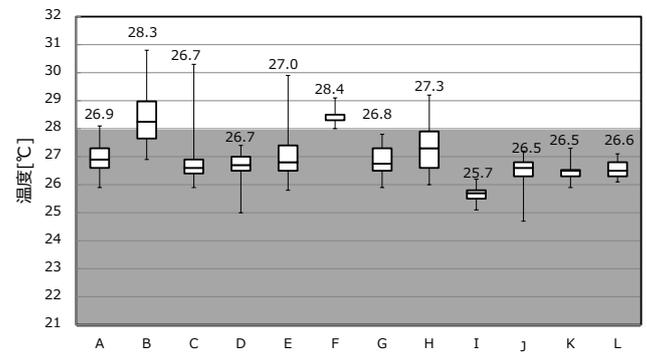


図2 夏期の業務時間における温度(値は平均値)

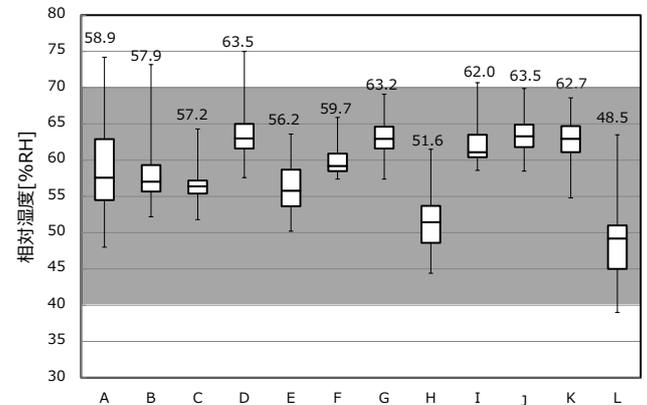


図3 夏期の業務時間における相対湿度(値は平均値)

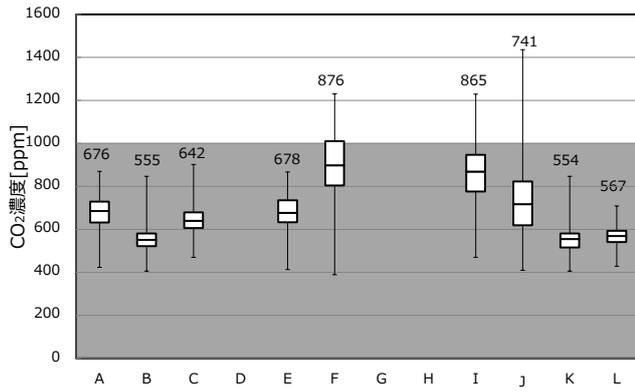


図4 夏期の業務時間におけるCO₂濃度(値は平均値)

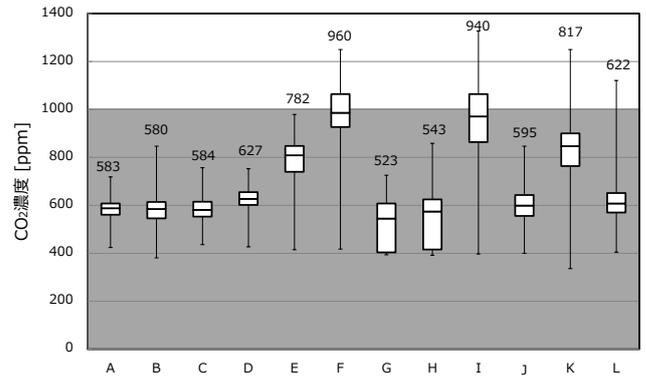


図7 冬期の業務時間におけるCO₂濃度(値は平均値)

3.2 温湿度、CO₂濃度の測定結果(冬期)

冬期の各対象室における温度、相対湿度、CO₂濃度をそれぞれ夏期測定結果と同様に図5~7に示す。温度について全箇所、中央値は基準値の範囲内となっている。相対湿度についてF以外の箇所の中央値は基準値外となっており対策が必要である。CO₂濃度については夏期の測定と同様にFとIが高く、Kも高い結果となった。

3.3 WBGT、PMVの測定結果(夏期)

WBGTとPMVについては測定期間中、外気温度の条件が同等のデータを抽出することで外気温度の差による影響のない分析を行った。WBGTおよびPMVについて各室の値を図8~9に示す。WBGTについて中央値付近は熱中症の危険はないが、最大値付近は、代謝率区分^[6]が「2 中程度の代謝率」の範囲内の数値であるため留意が必要であった。とくに節電のため設定温度が高く、且つ蒸暑地域のBは27℃まで達した。PMVについても中央方式のBとFが高くになっている。

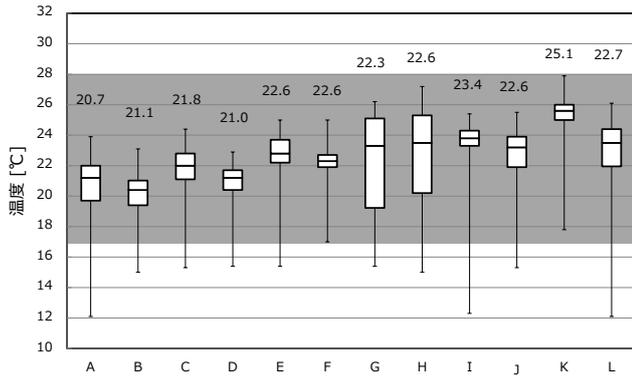


図5 冬期の業務時間における温度(値は平均値)

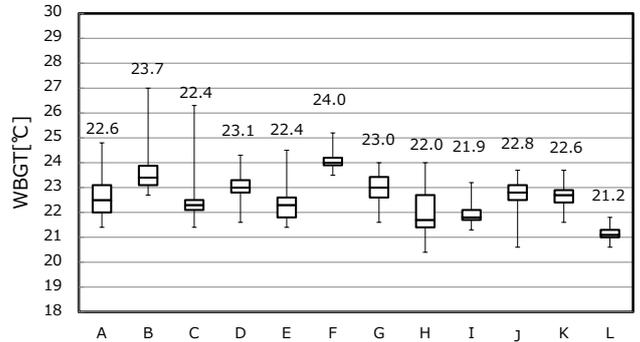


図8 業務時間におけるWBGT(値は平均値)

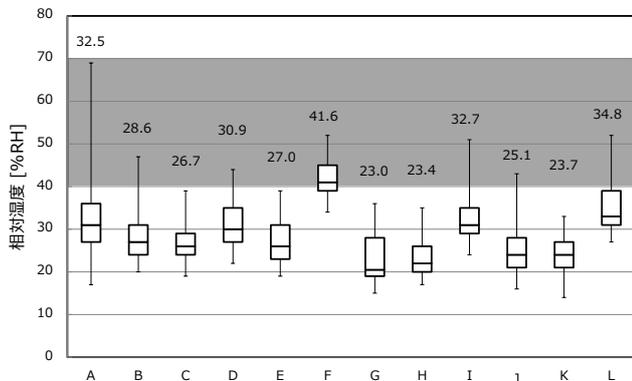


図6 冬期の業務時間における相対湿度(値は平均値)

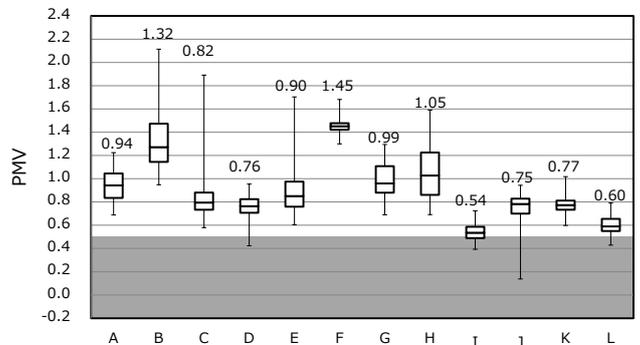


図9 業務時間におけるPMV(値は平均値)

※グレーの範囲がISO推奨範囲^[7]
(PPD:不快者率10%以下)

3.4 WBGT、PMV の測定結果（冬期）

WBGT および PMV について夏期と同様の分析を行った。各室の値を図 10～11 に示す。WBGT について K と L は関東であるにも関わらず四国の箇所より高い結果となった。PMV については夏期に比べると中央値が ISO 推奨範囲内である箇所が数カ所見られ、マイナスを示すものはほとんどなかった。

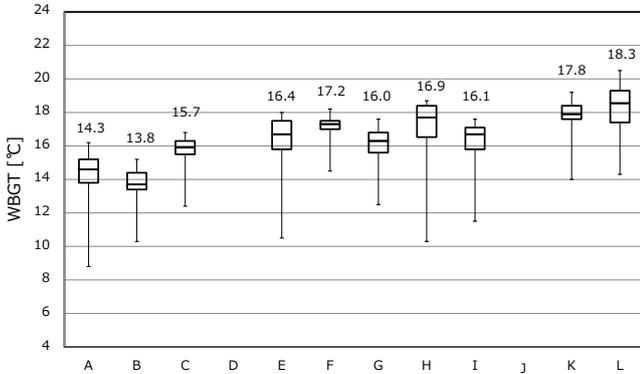


図 10 業務時間における WBGT (値は平均値)

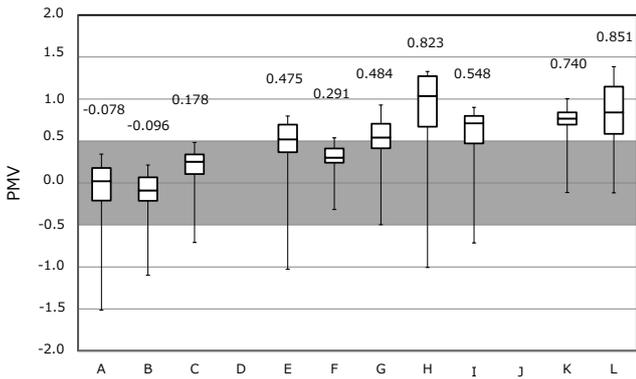


図 11 業務時間における PMV (値は平均値)

※グレーの範囲が ISO 推奨範囲^[7]

(PPD:不快者率 10%以下)

3.5 全国データとの比較（夏期）

上記の業務時間における夏期の測定値の中央値（以下、中央値）を既往の研究^{[1][3]}による全国ビルメンテナンス協会を通じて取得した室内環境の測定値（以下、全国データ）と比較を行った。全国データは 2011 年 3 月 11 日以前且つ今般の節電要請前に取得されたデータである。表 6 に測定項目と本研究による中央値を全国データに当てはめた場合の百分位（夏期）、表 7 に全国データにおいて衛生管理基準値^[2]の範囲を百分位の範囲（夏期）として示した。それぞれの項目の百分位は全国データの最小値を 0、最大値を 100 と設定し、測定結果の中央値を全国データの累積頻度に当てはめた場合の数字となっている。

温度については建築物衛生法の衛生管理基準値内であ

るが B と F の値は大きい。相対湿度について値が大きいものはあるが測定値は基準値内であるため、問題はない。CO₂ 濃度について F と I は値が大きい。F は CO₂ 濃度制御があったため基準値を超えていないが全国的には高い順位となる。I の換気は個別方式であったことが原因と考えられる。本研究で測定対象とした事務用途室の測定値のほとんどが全国データと比べ、順位が高かった。

表 6 各室の測定値の中央値を全国データに当てはめた場合の百分位（夏期）

名称	温度[°C]	相対湿度[%RH]	CO ₂ 濃度[ppm]
A	75.3	62.4	65.6
B	85.9	50.0	40.2
C	77.5	45.4	57.1
D	67.0	70.1	-
E	79.0	32.5	64.2
F	88.3	62.4	90.9
G	61.8	41.1	40.6
H	56.7	25.5	46.0
I	56.7	67.0	89.4
J	50.2	73.4	72.2
K	61.8	54.2	40.6
L	44.8	22.1	42.0

*グレーのセルにて 50 位を超えているものを示す。

表 7 衛生管理基準値の全国データの百分位の比較（夏期）

項目	衛生管理基準値 ^[2]	百分位
温度[°C]	17.0~26.0~28.0	0.0~50.2~94.2
相対湿度[%RH]	40.0~55.0~70.0	3.7~50.0~95.8
CO ₂ 濃度[ppm]	400~601~1000	3.9~51.5~96.6

3.6 全国データとの比較（冬期）

冬期の測定値についても夏期と同様に全国データとの比較を行った。表 8 に測定項目と本研究による中央値を全国データに当てはめた場合の百分位（冬期）、表 9 に全国データにおいて衛生管理基準値^[2]の範囲を百分位の範囲（冬期）として示した。

温度について建築物衛生法の衛生管理基準値内であるため問題はないが、全国データと比較すると低いものが数カ所見られる。相対湿度については F 以外の箇所は基準値外であり、全国データと比較しても低いものが多い。CO₂ 濃度について中央値は基準値内であるが、夏期同様、F と I は全国データと比較してとても高い順位となっている。

表 9 衛生管理基準値の全国データの百分位の比較（冬期）

項目	衛生管理基準値 ^[2]	百分位
温度[°C]	17.0~22.7~28.0	3.4~50.0~99.9
相対湿度[%RH]	40.0~40.1~70.0	46.5~50.1~99.9
CO ₂ 濃度[ppm]	400~624~1000	3.4~50.0~92.2

表 8 各室の測定値の中央値を全国データに当てはめた場合の百分位（冬期）

名称	温度 [°C]	相対湿度 [%RH]	CO ₂ 濃度 [ppm]
A	27.1	17.3	40.1
B	19.4	9.7	39.8
C	36.2	8.0	39.5
D	27.1	15.1	50.4
E	51.2	8.0	78.7
F	42.5	53.3	91.5
G	60.7	2.8	31.2
H	63.8	3.6	38.0
I	69.5	17.3	91.0
J	58.9	5.6	41.7
K	95.9	5.6	81.8
L	63.8	22.4	47.2

*グレーのセルにて温度、相対湿度が50位を下回っているもの、CO₂濃度は50位を超えているものを示す。

3.7 WBGT、PMVの相関についての分析（夏期）

全測定箇所のWBGT、算定したPMVの値を業務時間内かつ外気温度の条件が同等の日のデータ抽出し、WBGT、PMVの中央値をプロットしたものを図12に示す。近似式に乗っている点（B、C、F、I）は空調制御方式が中央式のものでCとI、BとFの二つのグループに分かれている。CとIのグループはWBGT、PMVが低く、BとFのグループはともに高い。節電のため設定温度の違いが生じてしまい、同じ中央式であっても分布に差ができた。図12のプロットにはWBGT、PMVの近似式を外れる点が見られる。そこで各箇所のデータ（温度、相対湿度、外気温度、CO₂濃度等、以下、室内外環境データ）と比較し分析することで原因を探った。

PMVが同等、WBGTに差がある組み合わせの例としてGとHがある。GとHは同じビルの北側室（G）と南側室（H）である。温度はGよりHの方が少し高い結果となっており、相対湿度について明らかにGは高い。これら室内外環境データと比較するとGとHには温度の中間値に大きな変化はない。温度の最大最小値の幅の違いが見られた。北側は顕熱負荷が小さく除湿ができていないためWBに感度の高いWBGT値が高く出た結果と考えられる。逆の条件のもので分析したが室内外環境データと関係性は見られなかった。そこで、WBGTとPMVそれぞれに温度、湿度、輻射、気流（以下、温熱四要素）がどの程度影響があるか重回帰分析を行った。

WBGTおよびPMVについて環境側の温熱四要素の内、どの要素が影響を与えているかについて統計的な分析を行った。測定項目である相対湿度とグローブ温度を説明変数として分析を行い、データは全測定箇所、業務時間内のものである。相対湿度は湿度の影響を表し、グローブ温度は温度、気流、輻射の影響を代表している。相対湿度とグローブ温度を標準偏回帰係数に変換し、比率に算定したものを表10、図13に示す。

WBGTはPMVに比べて相対湿度に大きく影響を受けグローブ温度の影響は小さいという結果であった。つまり、事務用途室において温熱的衛生性は快適性より湿度の影響

が大きい。温熱的快適性は衛生性より温度、輻射、気流の影響が大きい。

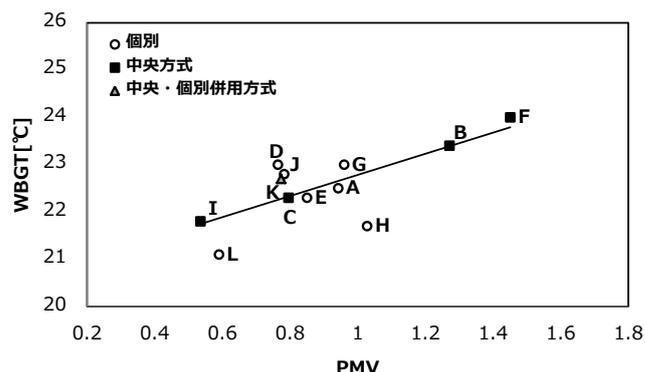


図 12 各測定箇所のWBGT、PMV相関図

表 10 WBGT および PMV の各説明変数の標準偏回帰係数

	相対湿度	グローブ温度	R ²	n
WBGT	0.682 (50.6%)	0.667 (49.4%)	0.984	12,907
PMV	0.095 (10.0%)	0.849 (90.0%)	0.744	

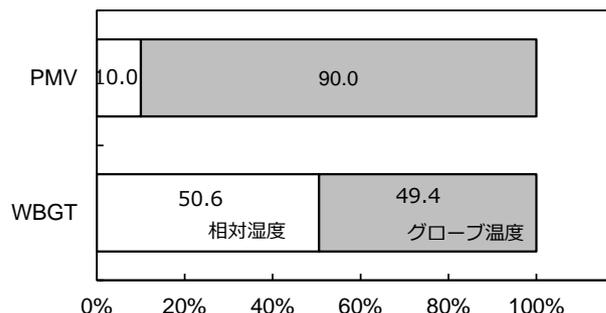


図 13 WBGT および PMV の各説明変数の標準偏回帰係数の比率

3.8 WBGT、PMVの相関について（冬期）

全測定箇所のWBGT、算定したPMVの値を夏期結果と同様にプロットしたものを図14に示す。冬期のデータでばらつきが見られず、プロットのほとんどが近似式に沿って散布しているため、夏期のものより相関が強いことがわかる。Fについては近似式から少し上方に離れているが、相対湿度が高い箇所がFだけであったことから、湿度と影響の大きいWBGTが高くなったためと考えられる。また図17においても、KとL（関東の室）はWBGT、PMVが他の箇所（四国の室）より高いことがわかるため、北の地域ほど室内を暖かくしており、南の地域の室内は寒いという結果であった。冬期のWBGT、PMVについても温熱四要素との影響を調査するため、重回帰分析を行った。

分析の方法は夏期結果と同様に、グローブ温度と相対湿度を説明変数とし、データは全測定箇所、業務時間内のものである。相対湿度は湿度の影響を表し、グローブ温度は

温度、気流、輻射の影響を代表している。相対湿度とグローブ温度を標準偏回帰係数に変換し、比率に算定したものを表 11、図 15 に示す。

夏期と同様、PMV に比べ WBGT の方が湿度の影響する割合は多いが、夏期よりは影響が小さいものとなっている。冬期においては、温度、輻射によって温熱的衛生性、快適性が決まるという結果となった。

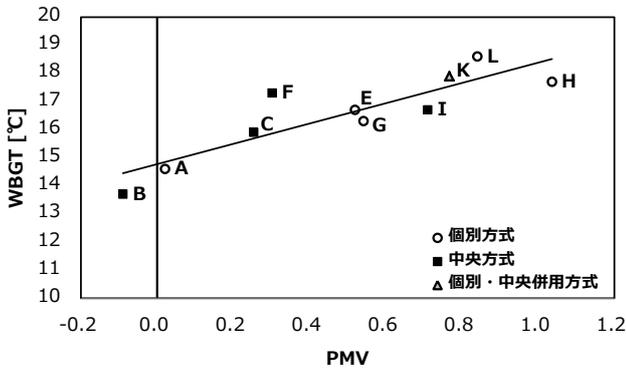


図 14 各測定箇所の WBGT, PMV 相関図

表 11 WBGT および PMV の各説明変数の標準偏回帰係数

	相対湿度	グローブ温度	R ²	n
WBGT	0.431 (30.3%)	0.993 (69.3%)	0.996	16372
PMV	0.110 (9.8%)	1.01 (90.2%)	0.992	

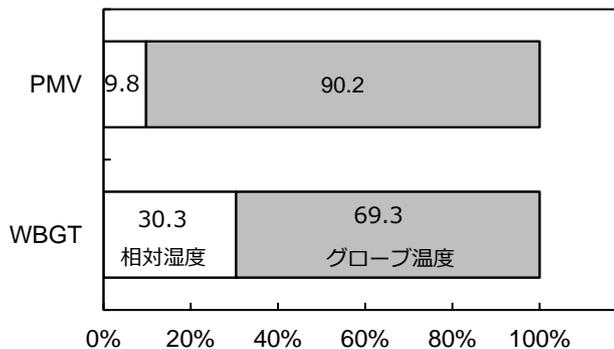


図 15 WBGT および PMV の各説明変数の標準偏回帰係数の比率

4 おわりに

本研究では、事務用途室について室内環境調査を行い、温度、湿度、CO₂濃度を全国データと比較、WBGT と PMV の測定・算定結果から空調制御方式の違いで室内環境に課題があることを示した。

夏期において、WBGT と PMV には一定の相関はあるが一部に偏差が生じており、原因として相対湿度が大きく影響

していることが判明した。

湿度は温熱的衛生性に大きな影響を及ぼし、熱的な安全性を守る上で湿度が重要であるという認識を見直す必要がある。本研究の範囲で温熱的快適性を考える場合には温度、輻射、気流の影響が強いことが結果となった。

冬期において、全体的に相対湿度が低いことから、WBGT と PMV の相関は夏期より強いものであり、温熱的衛生性と快適性は輻射の影響で決まることがわかった。

また、北側の地域ほど室内は暖かく、南側の地域ほど室内は寒いという結果であったため、今後は意識調査を絡めて室内環境調査を行う必要がある。

WBGT は現在の建築物衛生法による空気環境測定項目にグローブ温度を追加するだけで算出が可能である。節電対策で空気調和設備の設定温度が高い場合などの温熱衛生的な安全性確認のため追加測定項目とすることも考えられる。

【謝辞】

本研究は多数の事務用途室において測定を行った結果をとりまとめたものであり、執務者各位には大変お世話になりました。記して謝意を表します。

【参考文献】

- [1] 大澤元毅ほか:「建築物の特性を考慮した環境衛生管理に関する研究」(課題番号: H20-健危-一般-009), 平成21~22年度総括・分担研究報告書, 2011. 3
- [2] 厚生労働省: 建築環境衛生管理基準, <http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/seikatsu-eisei10/>
- [3] 厚生労働省: 平成23年度全国特定建築物立入検査等状況調査, 2012
- [4] 総務省消防庁: 平成25年9月30日~10月6日全国の熱中症による救急搬送状況(速報値), <http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/heatstroke/pdf/sokuhouti.pdf>
平成24年夏期(7月~9月)の熱中症による救急搬送の状況, http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h24/2410/241016_1houdou/01_houdoushiryou.pdf
- [5] 国土交通省 気象庁: 気象統計情報, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- [6] JIS Z8504:1999 人間工学-WBGT(湿球黒球温度)指数に基づく作業者の熱ストレスの評価-暑熱環境
- [7] ISO 7730:1994: Moderate thermal environments-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for the thermal comfort
- [8] 社団法人 空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧<第14版>, 1基礎編, P330, 2010. 2
- [9] 一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構: 省エネルギー地域区分, <http://www.jjj-design.org/area/index.html>