大空間工場の夏季・冬季の熱負荷および室内環境に関する実測・調査研究

FIELD MEASUREMENT ON THE HEAT LOAD AND INDOOR ENVIRONMENT OF A LARGE FACTORY SPACE

宋 城 基*, 木村 建一**

Sung-ki SONG and Ken-ichi KIMURA

The results of the field measurement on the heat load and indoor environment of a large air-conditioned factory space in comparison with the simulation results are described together with the results of the questionnaire to the workers. It was found that the air conditioning effectively cooled the work space in summer and that the cold air was spread from the west part to the heated working zone of east and central parts in winter. The vertical temperature gradient obviously appeared in the space above 3m from the floor in summer, while the space above was heated to be at higher uniform temperature in winter. Although a greater amount of heat load was resulted with simulation than measurement, it could be judged that the simulation expressed the heat load of this factory quite well except for the start up period both in summer and winter. The results of CFD analysis turned out quite similar to the measured results with regard to the distribution patterns of air temperature and air flow. The workers of the factory were slightly satisfied with the indoor environment in summer and winter as found from the questionnaire and seemed to be accustomed to rather low temperature in winter.

Keywords : *Large Factory Space, Heat Load, Indoor Environment, Field Measurement, Simulation, Numerical Analysis*

大空間工場、熱負荷、室内環境、実測、シミュレーション、数値解析

1. はじめに

工場においても空調は作業者の安全衛生と快適な作業環境の場を維持することによって作業効率を向上させ、さらに機械部品、電気製品の故障を軽減させ、生産性を高めることに寄与している。しかし、作業域を中心とした空調を行う際にどれくらいの設備容量とエネルギー使用量の低減とが図られるかを予測するには、熱負荷計算を正しく行わなければならない。従来の大空間空調の研究では、アトリウム、体育館、ドームを対象とした大空間の室内温熱環境や熱負荷を予測する研究がある。特に一般の大空間の予測モデルとしては空間を高さ方向に分割し、空間と空間の間の空気移動の評価により上下温度分布と熱負荷を予測する宮川のモデル¹⁾と戸河里ら²⁾のブロックモデルがある。特に後者は実建物の実測からその有効性が確認されており、これに基いて空気調和衛生工学会・熱負荷算法小委員会が開発された大空間プログラム「ダイクウカン」³⁾がよく使われている。実測、模型実験、CFDを用いた村上ら^{4) 5) 6)}の研究もあり、また、小林ら⁷⁾によるアトリウム内の温熱環境の実測とアンケート調査研究もある。このようなアトリウム、ドームなどの大空間に対する研究は多くなされているが、大空間工場の熱負荷を対象とした研究はほとんどない状況にある。そこで、本研究では居住域空調が行われている大空間工場の夏季と冬季の実測結果と大空間プログラムを用いた計算結果とアンケート調査から、大空間工場の室内空調熱負荷と温熱環境に関する総合的な

評価を目的としている。さらに、数値計算(CFD)を用い、夏季および冬季の空調による工場の気流・温度性状の解析を行い、その結果を実測結果と比較した。

2. 建物およびシステム概要

実測した大空間工場は福岡県のある製缶プレス工場で、建築面積900m²、延床面積967.2m²、天井高さ約9.7mの鉄骨造スレート葺き一部2階建ての構造で、東西に細長い形状をしている。工場は東側の1階に奥行4mの倉庫とトイレがあり、2階にも同じ奥行の事務室と休憩室がある。工場空間の東側では製缶プレス作業を行っているが、西側の一部分は物置スペースとなっている。図1に工場の断面図及び平面図を、写真1に工場内部を示す。工場の空調システムは氷蓄熱(冷蓄熱専用)ビルマルチ方式で、室外機3台、蓄熱ユニット1台、室内機16台から成っている。室内機は工場空間に14台、事務室と休憩室にそれぞれ1台が設置されている。また工場空間内の室内機は高さ3.5mの壁面から斜め下向きに空気を吹出している。今回測定した工場は製缶プレス作業による騒音のため壁に吸音材を使用し、断熱性がよく、気密性がよい反面、外気導入がない。ただし、西側の壁面に高さ6.5m、幅5mの大きな製品運搬用自動上下シャッターがあり、この開閉による自然換気量が大いと思われる。また、空調機と生産機器は土日を除く平日は8:30～17:30毎日同じパターンで運転が行われている。

* 早稲田大学大学院理工学研究科 博士課程・工修

** 早稲田大学理工学総合研究センター 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Science and Engineering, Waseda University, M. Eng.
Prof., Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Dr. Eng.

図1 工場の断面図と平面図および測定位置[単位: mm]

写真1 工場内部

表1 測定項目および測定機器

	測定項目	測定数	測定間隔	測定機器	メーカー
連続測定 (1週間)	全体電力量	1点	60分積算	デマンドロガー	-
	空調システム電力	3点	60分積算	クランプオン電力計	日置電機
	工場内動力	1点	60分積算		
	吸込み温・湿度	16点	10分間隔 瞬時値	自己記録型 温湿度計	ティアンドディ
	吹出し温・湿度	16点			
	室内温度(1.5m)	16点			
	室内温度(4m)	6点			
	室内表面温度	6点			
	PMV	2点	5分	ポータブルPMV計(冬季)	京都電子工業
1日3回測定 (夏: 8月18、20日 冬: 2月16日、18日)	外気温・湿度	1点	60分	温湿度変換機	ティアンドディ
	室内温度(1.1m)	5mメッシュ	-	ハンディ温湿度電圧データロガー	神栄
	室内風向	間隔	-	気流検査器	光明理化学工業
	室内風速	-	-	低温度型熱式風速計	日本カノマック
	吹出し風速	12点	-	高速グローブ温度計	英弘精機
	グローブ温度	4点	-		
	PMV	1点	5分	ポータブルPMV計(夏季)	京都電子工業
	CO/CO2	1点	-	co2モニタ	-

しかし、工場空間の空調は13:00～14:00の昼休みの間停止する。また、生産機器は10:40～10:50、15:40～15:50の休憩時間にも停止する。

3. 測定およびアンケートの概要

測定期間は1999年8月18日～月24日、2000年2月16日～22日のそれぞれ1週間行った。また、測定は1週間連続測定と2日間(8月18日と20日および3月16日と18日)のトラバース測定に分け、工場内・外の環境、空調システムの電力消費量、室内温熱環境について行った。連続測定においては室内温度は、床面1.5m(16点)、4m(6点)に自己記録型小型温度計を設置し、10分間隔で測定した。室内表面温度

室内温熱環境アンケート

no. _____ 年 月 日

氏名: _____ 性別: (男・女) (記入例) ☐ 不快 ☐ 不快

年代: _____ (例え: 30代) 記入時間: _____

このアンケートは作業場の室内環境調査を目的としています。1番から8番まで各項目にのしをつけてください。

1. 快適感

快適 不快 不快 不快

2. 温冷感

非常に寒い 寒い 寒くない 暑い 非常に暑い

3. 湿度感

非常に湿っている 湿っている ちょうどいい 乾燥している 非常に乾燥している

4. 気流感

①気流感を感じる ②気流感を感じない

5. 4番の答えが①である方のみ答えてください。その気流感は快適ですか?

①はい ②いいえ

6. におい

においがいい においが悪くない においが悪すぎる

7. この温熱環境をあなたは受け入れることができますか?

①はい ②いいえ

8. 作業内容を書いてください。

()

ご協力ありがとうございました。もし、気になるあるいは作業環境についてご意見がありましたら、一言お願いします。

図2 アンケート内容

も壁面4点、天井面・床面各1点について室内温度と同じく連続測定した。さらに、吹出し・吸込み温湿度、外気温湿度も連続測定した。トラバース測定においては、作業に支障をきたさないこととかつ冷房負荷が一番大きいと思われる11:00～と15:00～、暖房負荷が一番大きいと思われる9:30～の暖房立上がり直後の工場空間の上下温度分布、居住域温度、室内風速、室内風向を1日3回1分間隔で測定を行った。また、PMV測定は図1に示すように、夏季は作業に支障を来すため中央部1点(PMV)でトラバース測定を、冬季は夏季と違い機器のレイアウトが変わったため作業者近傍の2点(PMV1、PMV2)で連続測定を行った。被験者の代謝量は夏季と冬季ともに作業内容が同じであるため2met、着衣量は夏季0.7clo、冬季0.85cloとした。測定項目及び測定機器仕様などを表1に示す。

室内温熱環境のアンケート調査は、作業中の快適感、温冷感、湿度感、気流感について1日2回(10:30、15:30)、夏季、冬季あわせて約146データ×5項目の回答を得た。アンケート調査は工場の全ての

図3 外気温湿度・日射量の変動

図4 8月20日の床上1.1mの水平温度分布

(上: 9:30~10:30, 中: 11:30~12:30, 下: 15:00~16:00)

図5 2月16日の床上1.1mの水平温度分布

(上: 9:30~10:30, 中: 11:30~12:30, 下: 15:00~16:00)

作業者を対象とし、午前、午後の休憩時間に行った。回答に応じてくれた作業者は毎日同じ作業者である。アンケート内容を図2に示す。

4. 測定結果

この節では外気温と日射量、水平温度・気流分布、空気質の測定結果を示し、上下温度分布と熱負荷の結果については7節の実測結果

とシミュレーション結果の比較にまとめる。なお、ここでは居住域を床上3m以下の空間とする。また、ここで用いる各時刻表示は1回のトラバース測定に1時間程度かかることから9:30~10:30、11:30~12:30、15:00~16:00とした。

4.1 外気温と日射量

夏季の測定期間中の温湿度は24~32℃(平均27.12℃)、58.5~93.4%(平均79.26%)、冬季の測定期間中の温湿度は-0.3~14.7℃(平均6.4℃)、56.3~99%(平均54%)の範囲で変動した。また、夏季の測定期間中には快晴日は無く、雨の日が曇天日が多かったため、例年より平均湿度は高い値であった。冬季も測定期間中の2月19日の午前から2月20日午前にかけては雨が降ったため例年より湿度が高い値となった。図2に夏季と冬季の測定期間中の外気温湿度と福岡気象データの日射量変動を示す。

4.2 水平温度分布および水平気流速度分布

代表日として8月20日と2月16日の居住域床上1.1mでの水平温度分布測定結果を図4と図5に示す。8月20日は工場の中央部が一般的に温度が約1.5℃くらい低く、2月16日は東部が一般的に温度が高い傾向にあった。これは西部に室内機が設置されていないことと西部にある運搬用自動上下シャッターによる外気の流入のためと思われる。この工場は主に中央部から東部で作業が行われており、工場空調の負荷計算用基準値は空気調和・衛生工学会の設計用最大熱負荷計算法によると夏季27~29℃、冬季19~20℃であることから作業環境としては適切な空調が行われていると言える。図6に8月20日(夏季)および図7に2月16日(冬季)の9:30~10:30、11:30~12:30、15:00~16:00に測定した居住域の水平気流速度分布を示す。8月20日と2月16日の気流速度分布の測定結果では、工場の居住域気流速度は0.5m/s以下であり、室内機が多く設置されている中央部で0.5m/s、東側では0.3~0.4m/sであった。また、夏の場合は空調機が主に設置されている中央部と東部に気流速度の大きい部分が形成されているが、冬は工場の西部から東部にかけて気流がほぼ均一に分布していることがわかる。また、水平温度分布と気流分布とを総合的に見てみると、8月20日の場合は主に空調機が設置されている中央部と東部では吹出し空気により室内温度が他の場所よりも少し低くなっており、さらに気流速度が大きくなっていることから吹出し気流による冷却効果がよく現れていることがわかる。冬季の9:30~10:30、11:30~12:30の測定結果では推奨値より低い温度となっている。さらに、図9に示すように2月16日の場合は気流向きの測定結果から、西部から東部に向けて冷たい空気が拡散されていることがわかる。今回の測定から大空間工場では、図8に示すように夏は冷房気流が主に作業が行われているところを冷却し、冬季は空調機が設置されていない西部の冷たい空気が空調されている中央部と東部へ拡散されるという結果となった。

4.3 空気質環境

この工場では強制換気は行われていないが、図10に示すように工場のCO₂、CO濃度は一般環境の建築基準法・ビル管理法のCO₂(基準値1000ppm以下)、CO(基準値10ppm以下)の基準値以下であった。これは西壁面に製品運送のための自動シャッターがあり、その開閉による自然換気量が多かったためと思われる。なお、作業に使われている潤滑油の臭気が強かったが、粉塵、揮発性化学物質などの測定は行っていない。

図6 8月20日の床上1.1mの水平気流分布

(上: 9:30 ~ 10:30, 中: 11:30 ~ 12:30, 下: 15:00 ~ 16:00)

図7 2月16日の床上1.1mの水平気流分布

(上: 9:30 ~ 10:30, 中: 11:30 ~ 12:30, 下: 15:00 ~ 16:00)

図8 8月20日の床上1.1mの水平気流風向 (左: 9:30 ~ 10:30, 中: 11:30 ~ 12:30, 右: 15:00 ~ 16:00)

図9 2月16日の床上1.1mの水平気流風向 (左: 9:30 ~ 10:30, 中: 11:30 ~ 12:30, 右: 15:00 ~ 16:00)

図10 空調によるの居住域の室内温度変動とCO₂・CO濃度

5. アンケート調査結果

夏季と冬季の実測期間中のアンケート調査による快適感、温冷感、湿度感、気流感などの146データ×5項目のうち有効回答の6割の結果を図11～図13に示す。

5.1 快適感

図11に示す快適感と周囲温度とのアンケート調査結果から、この工場は、夏季は周囲温度が26～32℃で「やや不快」と「不快」の間であり、冬季は12～20℃で「快適」と「やや不快」の間の結果となった。ところが、「この工場の温熱環境を受け入れることができるのか」の質問に対し、「受け入れるのができる」と答えたのが夏の場合6割以上、冬の場合8割以上であった。このような結果から作業者はこの

工場環境に満足していることが言える。

5.2 温冷感

図12に示すアンケートとPMV測定による温冷感と作業者の周囲温度との相関の結果からこの工場では周囲温度と温冷感との相関があると判断できる。夏季の場合は周囲温度が26～32℃でアンケートとPMV測定結果ともに「やや暑い」と「暑い」の間であった。また、冬季の場合、13℃以下でPMV測定結果では「やや寒い」と「寒い」との間であったが、アンケート結果は「やや寒い」の結果であった。これは作業による人体発熱が大きいこととこの工場の作業者がこの工場の温熱環境に慣れていたことを示すものと考えられる。

5.3 湿度感

図13に示す湿度感と湿球温度との相関を見ると夏季の作業場の湿度感は全体的に「どちらでもない」より「やや湿っている」、冬季のは「どちらでもない」より「やや乾燥している」との結果となった。また、湿度感と湿球温度の相関関係では夏季より冬季の方が相関が高い結果となった。なお、湿度感と相対湿度との関係も調べたが、相関は低かった。

5.4 気流感とにおい

気流感は、夏の場合は作業員の2割が気流感を感じ、そのうち5割以上が、その気流感は快適だと答えた。また、冬の場合は3割以上が気流感を感じ、そのうち6割がその気流は快適だと答えた。

においについては、夏と冬のアンケート結果、「におう」、「におわない」とも1割を占めた。また、作業者の経験年齢が多いほどにおいに対する馴れが現れていた。

図11 快適感のアンケート調査結果
(上: 夏季、下: 冬季)

図12 温冷感のアンケート調査結果
(上: 夏季、下: 冬季)

図13 湿度感のアンケート調査結果
(上: 夏季、下: 冬季)

6. シミュレーション条件

6.1 「ダイクウカン」によるシミュレーション条件

シミュレーションには空気調和・衛生工学会の大空間プログラム「ダイクウカン」を用いた。この工場の空調時間は土日を除く平日で、夏は8:30～17:30、冬は8:30～18:00であるが、シミュレーションでは計算に必要な気象データの外気温・湿度を1時間間隔で測定したことと気象庁からの日射量データも1時間間隔のデータしかなかったため、空調時間を8:00～18:00とした。また、居住域温度の測定結果から午前と午後の室内平均温度がかなり異なっていたため、シミュレーションの設定温度としては居住域平均温度の測定値の各時間帯の平均値を用いた。さらに、実際の工場では換気設備はあるものの工場の作業事情により機械換気による外気導入は行っていない。この工場の建築の気密性は高いが、西側にある製品運搬用上下シャッターからの自然換気があるため、シャッターの開閉回数測定から換気回数を夏は1回/h、冬は0.5回/hと推定した。また、内部発熱量は電力量を調べ、人体発熱は作業員の実数から求めた。壁面の放射・対流熱伝達率については表2のシミュレーション計算条件に示す値で与えた。居住域の空調設定温度を表3に示す。ここで、初期温度とはシミュレーションのために必要な値で、各時間帯の前の時間の室温の測定値を用いた。また、気象条件としての外気温・湿度は実測データを用い、日射量についてはその日の福岡の気象データを用いた。空間分割は高さ方向に下から5分割(3,1,2,2,2m)とし、居住域高さを床から3mとした。

6.2 CFD 数値解析条件

非圧縮(デカルト座標系) モジュールを用いて8月20日の15時および2月16日の10時の室内温度分布と気流分布の数値解析を試みた。計算はk-ε乱流モデルを用い、定常計算を行った²⁾。設計対象空間は工場空間のみとした。実際の工場の機械や照明などの形状を単純化させた上で計算を行った。また、床3.5mのところの壁面に0.6m(横)×0.1m(縦)の吹出口14個を、その下の床2.7mのところの0.6m(横)×0.3m(縦)の吸込口を配置させた。空間のメッシュは34×18×16=9792である。表4に計算のための境界条件を示す。

表2 大空間シミュレーションの計算条件

空間定義	56[m](幅)×15[m](奥行)×10[m](天上高)
空調時間	8～18時
室温設定層	5層
照明発熱	7.4 [W/m ²]
人体・機器発熱	3.2 [W/m ²]
空調方式	CAV
吹出し風量	14000 [m ³ /h]
吹出し風向	下向き30°
吹出し面積	0.065 [m ²]
吹出し個数	14個
気象条件	外気温・湿度: 測定データ 日射量: 福岡気象データ
分割数	5分割
対流熱伝達率	7(上向き) 2.33(下向き) 4.65(壁面)
放射熱伝達率	4.65 [W/m ² K]
CB値	2.9 [W/m ² K]
換気回数	0.5(冬)、 1(夏)
窓面積率	N: 0.33、E: 0.38、 W: 0.21、S: 0.45

表3 大空間シミュレーションの室内空調設定温度(午前: 8時～12時、午後: 12時～18時)

日付	空調時間	初期温度 [°C]	設定温度 [°C]
8月18日	午前	28.5	26.4
	午後	29.2	27.8
8月19日	午前	28.8	27.5
	午後	32.2	28
8月20日	午前	29.4	27.5
	午後	31.4	28
8月23日	午前	28	24.5
	午後	26.6	25.2
8月24日	午前	26.6	26.4
	午後	29.9	27.8
2月16日	午前	11.2	12
	午後	16.3	16.6
2月17日	午前	10.9	12
	午後	17.4	17.2
2月18日	午前	11.5	13.5
	午後	21.3	21.1
2月21日	午前	12.2	13.4
	午後	19.7	20
2月22日	午前	10.7	13
	午後	21.2	18.7

表4 CFD 計算境界条件

		吹出口	吸込口	各部分					
				天井	東	西	南	北	床
8月20日	温度 [°C]	15	free	41	32.5	32.4	32.3	32.1	29
15:00	速度 [m/s]	水平=4.5, 垂直下=2.4	-	-	-	-	-	-	slip
2月16日	温度 [°C]	32	free	12	14.2	10.1	12.6	11	10.8
10:00	速度 [m/s]	水平=3.6, 垂直下=2.1	-	-	-	-	-	-	slip

7. 実測結果と「ダイクウカン」シミュレーション結果の比較

7.1 上下温度分布

8月20日と2月16日の上下温度分布測定結果とシミュレーション結果を図14と図15に示す。測定結果から上下温度差は場所によって異なるが、夏季の場合は3～6°C、冬季の場合は2～5°Cの上下温度差が生じた。8月20日の11:30に上下温度差が他の時間より小さくなったのは11時頃に雨が降ったためと思われる。また、夏の場合は断面1より断面3の方が、冬の場合は夏と反対に断面3より断面1の方が上下温度差が大きく生じる結果となった。これは断面1に近い西壁面

図14 8月20日の上下温度分布 (左: 9:30~10:30、中: 11:30~12:30、右: 15:00~16:00)

図15 2月16日の上下温度分布 (左: 9:30~10:30、中: 11:30~12:30、右: 15:00~16:00)

に大きな製品運搬用自動上下シャッターがあり、そこからの外気の流入があるためと思われる。上下温度分布測定結果からこの工場は夏季では成層空調になっていることが分かる。居住域の上下温度分布は夏季と冬季ともにISO-7730の推奨値3℃以内に収まっており、居住域の上下温度差の許容範囲は満足されている。また、床から3m以上の上部空間では、夏季は高さ方向に温度勾配が現れているが、冬季の温度は居住域より数度高く上下方向にほとんど均一になっている。2月18日の上下温度分布ではシミュレーションと測定とで異なる結果となった。これは図14からわかるように、夏の代表日8月20日の断面③-Aはシミュレーションと実測の空調による居住域の室内変動はほぼ一致を見せているが、冬の代表日2月16日の場合は測定とシミュレーションとの居住域温度が異なっており、その分上下温度差が生じているためと考えられる。しかし、対象工場に対する大空間シミュレーションの結果は夏においては上下温度分布をよく捉えていると言える。

7.2 熱負荷

夏季の測定期間中の日積算熱負荷は測定で622~707W/m²・日、シミュレーションで512~927W/m²・日であった。また、冬季の場合は測定で563~868W/m²・日、シミュレーションで716~1063W/m²・日となった。図16に8月18日と8月20日の実測とシミュレーションの熱負荷変動を示す。1日の熱負荷変動は冷房の立ち上がりの8時を除いて実測とシミュレーションとでよく一致している。8時のシミュレーションと実測との熱負荷が異なったのは実際の空調時間は8:30からであり、シミュレーションでは8時からとなっているためと考えられる。また、室内設定温度を午前中一定としたため、シミュレーションでは

冷房の立ち上がり時の熱負荷が過大となった。

図17に2月16日と2月18日の1日の熱負荷変動を示す。熱負荷変動パターンは午前を除いて実測とシミュレーションでほぼ同じ傾向の結果となった。しかし、午前においては空調の立ち上がり時間である8時では実測とかなり異なっており、負荷変動も異なる結果となった。これは冷房と同様に実際の空調時間は8:30からであり、またシミュレーションでは居住域設定温度を午前の平均温度を用いて計算したため、8時には空調設定温度と実際の室内制御温度とは5℃以上の温度差があることからこのような結果となったと思われる。また、熱負荷の測定結果から工場の1日の負荷変動は空調立ち上がりを除いた時間帯では外乱の変動とほとんど関係なく毎日ほぼ同じ変動をしていることがわかった。

夏季と冬季の測定期間中の日積算熱負荷を図18に示す。夏季と冬季の測定期間中の熱負荷は全般的にシミュレーションの方が多い結果となった。これはシミュレーションでは設定温度を一定にして熱負荷を計算するが、実際の場合は制御対象の居住域温度が時間によって変動するため、熱負荷変動が正確に一定な設定温度の場合と異なるためと思われる。また、今回行った熱負荷計算に用いた日射量は、工場のある地域と異なる福岡の気象庁のデータであるため、その分誤差が生じることになる。しかし、シミュレーションでは熱負荷変動は測定結果と少し異なるが、実際の工場の熱負荷が比較的精度よく求められたと思われる。

8. 実測結果とCFD数値解析結果の比較

8.1 水平断面温度および気流速度分布

図16 測定とシミュレーションの熱負荷変動 (8/18、8/20)

図17 測定とシミュレーションの熱負荷変動 (2/16、2/18)

図18 日積算熱負荷 (左: 夏季、右: 冬季)

CFD解析の一例として8月20日15:00と2月16日10:00の水平断面温度分布と気流速度分布の結果をそれぞれ図19と図20に示す。図19に示す床上1.1mの水平断面温度分布の計算結果では、実測結果と同じく主に空調機が設置されている中央部と東部の温度が作業が行われていない西部より夏季8月20日の15:00は低く、冬季2月16日の10:00は高くなった。ところが、8月20日のCFD計算結果では実測より西部では約2℃、中央部と東部では約0.5℃高く、2月16日では実測より西部では0.1℃、中央部と東部では約1℃高い結果となった。これは実際の工場では西部のシャッターからの自然換気があるが、CFD計算ではこれを考慮していないためと考えられる。しかし、温度分布の形状は実際の状況をよく捉えているといえる。

また、図20に示す水平気流速度分布のCFD解析結果を見ると8月20日と2月16日の気流速度は主に空調機が設置されているところで0.3～0.4m/sであった。また、8月20日と2月16日の気流方向は全体的に西部から中央部にかけては西から東へ、東部では東から西への

図19 CFD数値解析による床上1.1mの水平断面温度分布 (上: 8月20日15:00、下: 2月16日10:00)

図20 CFD数値解析による床上1.1mの水平断面気流速度分布 (上: 8月20日15:00、下: 2月16日10:00)

図21 CFD数値解析による断面③-③の垂直断面温度分布 (左: 8月20日15:00、右: 2月16日10:00)

結果であった。ところが、図8に示す8月20日の15:00～16:00の測定結果ではCFD計算結果と異なって西部から中央部にかけては逆の方向であった。これは実測の場合は1時間かけて測定したため、またCFD計算では西部にある上下自動シャッターの開閉を考慮していないためと思われる。

8.2 垂直断面温度分布

図21にCFD解析による夏季8月20日15:00と冬季2月16日10:00の断面③-③の垂直断面温度分布結果を示す。居住域全体が空調の設定温度にほぼ近くなっている。また、東部の断面③-③のCFD計算結果では、居住域を除いた上下温度分布で、図14に示す8月20日の15:00～16:00の断面③-Bの測定結果と、図15の2月16日の9:30～10:30の断面③-Aと③-Bの測定結果とほぼ同じ結果となった。これは西部の上下自動シャッターからの外気の影響がこの断面では少ないためではないかと考えられる。

9. 考察

1)一般的に冬季には冷気に触れると不快と感じるが、アンケート調査結果では気流感に対して作業者の半数以上が快適と回答した。これ

は、この工場で主に作業を行っているところは暖房空気が届いているので、暖気流に触れることが快適に感じたためと思われる。

2) 夏季に大きな上下温度分布が形成される主な原因は日射と内部発熱によるものと考えられる。図14に示すように特に8月20日の上下温度分布のトラバース測定結果をみると11:30~12:30の測定結果では、他の時間より上下温度差が小さい結果となっている。これは11:30~12:30の測定前の時間に雨が降ったため、屋根面に降り注ぐ直達日射がないことと、雨により前の時間に温まった屋根面が冷やされたため、屋根面の温度が下がったと考えられる。また、この工場の作業内容上機器からの内部発熱はそれほどなく、作業人数も少ないため11:30~12:30の上下温度差は他の時間より小さくなったと思われる。

3) 図15に示すように冬は室内空気温度より吹出し温度が高いため、3m以上の空間を暖めているのは、空気の密度差により吹出された空気が3m以下の居住域に届く分もあるが、直接3m以上の空間に拡散される分もあるため、吹出し空気が3m以上の空間を暖めることとなり、そのため結果的に温度成層が生じたと思われる。

4) 図15に示すように夏季に比べて冬季の実測結果とシミュレーションの結果はあまりよい一致を見せてない。これはまず居住域の室内温度変動の測定結果から夏の場合は室内温度変動はシミュレーションの居住域の空調設定値とほぼ一致を見せているが、冬の場合は測定値の室内温度が変動し場所によっても異なっているため、その分上下温度差が生じたと思われる。また、測定値は瞬時値であるため西側にある大きな製品運搬用上下シャッターからの冷たい外気が居住域温度を下げるが、シミュレーションでは空間全体の換気回数のみを算入しているため上下温度分布が異なっただと思われる。

5) 図18に示すようにシミュレーションによる日積算熱負荷は冬季の場合がより実測に近い結果となっている。これは、図16、図17に示す実測とシミュレーションとの熱負荷変動が夏季より冬季に近い結果を示していることから、シミュレーションの日積算の熱負荷は夏季より冬季の方が測定結果に近くなったと思われる。

6) CFDによる数値解析では、西部にある上下自動シャッターの開閉を考慮していないため居住域の水平温度分布や気流分布などが所々で実測結果とやや違う結果となったが、その分布形状は実測結果をよくとらえられていると思われる。このことから他の日時についても急激な外乱の変動はないことから同様の結果が得られるものと推定される。また、図19の水平温度分布と図20の水平気流速度分布の結果から、大空間の空調の場合主に作業が行われているところを中心に空調できることがCFD解析でも示されたと考えられる。

10. 結論

夏季と冬季の大空間工場の空調による室内環境と熱負荷について実測とシミュレーションおよびCFD解析を行い、以下の結果を得た。

- 1) この測定を行った工場では夏は冷房気流が主に作業が行われている空間を冷却し、冬季は空調機が設置されていない西部の冷たい空気が暖房されている中央部と東部へ拡散されるという状況が確認された。
- 2) 上下温度分布の測定結果から、床から3m以上の空間では夏季の場合上下温度差が現れているが、冬季ではほとんどなく、居住域より上部の空間が暖められることが明らかとなった。
- 3) また、夏の居住域温度は実測とシミュレーションとで少し違うも

のの上下温度差はよく一致した。冬はシミュレーションの方が11時より15時の上下温度差が大きい結果となった。これはシミュレーションでは実際のような居住域の温度変動がなく、常時設定温度に保たれるとしているためと思われる。

4) 夏冬ともに空調の立ち上がりの8時の熱負荷が実測よりシミュレーションの方が大きくなった。これは実際の空調時間は8:30からで、またシミュレーションでは居住域設定温度を午前の平均温度を用いて計算したため、8時にはシミュレーションの空調設定温度と実際の室内設定温度とが異なっているためだと思われる。

5) 夏と冬の測定期間中の日積算熱負荷は全般的にシミュレーションの方が多くなったが、熱負荷の日変動の比較からシミュレーションは立ち上がり時を除いてこの工場の熱負荷をよく示すことができたと判断される。

6) アンケート調査結果とPMV測定結果からこの工場の作業員は夏季冬季とも温熱環境にやや満足しており、冬季の温熱環境に慣れていると思われる。また、なおいに関しては夏季・冬季ともに平均的に「ややにおう」と回答した。

7) 8月20日のCFD計算結果では実測より西部では約2℃、中央部と東部では約0.5℃高く、2月16日では実測より西部では0.1℃、中央部と東部では約1℃高い結果となった。これは実際の工場では西部の自動上下シャッターからの自然換気があるが、CFD計算ではこれを考慮してないためと考えられる。しかし、CFDによる数値解析では、居住域の温度分布や気流分布などが実測結果とおおむね同じ形状になったことから実際の状況がよく捉えられたといえる。

本研究は早稲田大学理工学総合研究センターと九州電力(株)、(株)九電工との共同研究によるもので一部は既に報告した⁸⁾。

謝辞

本研究にあたり九州電力株式会社の山下政夫氏、山崎達也氏、株式会社九電工の北村邦彦氏、毛利一美氏に多大な協力を頂きました。ここに記して深謝の意を表します。

注) 気流解析にはα-flow気流解析プログラムを用いた。

文献

- 1) 宮川：大空間の上下温度分布算定に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、第286号、pp.75~81、昭和54年12月
- 2) 戸河里、荒井、三浦：大空間の空調・熱環境計画手法の研究(その1、その2)、日本建築学会計画系論文報告集、第427号、pp.9~19、1991年9月、第435号、pp.11~21、1992年5月
- 3) 空気調和・衛生工学会：大空間の熱負荷計算法、熱負荷算法小委員会報告集、1993年3月
- 4) 平松、原田、村上、他：実験用実大アトリウム内の温熱環境解析(その1~5)、日本建築学会学術講演梗概集D、1995年、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、1995~1996年
- 5) 平松、原田、村上、他：自然室温時における室内温熱環境の統計的解析 その2 実験用実大アトリウム内の温熱環境解析、日本建築学会計画系論文報告集、第504号、1998年2月、第435号、pp.11~21、1992年5月
- 6) 加藤、村上、他：自然換気される大規模卸卸市場内の夏季温熱空気環境に関する研究(その1、その2)、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp.129~136、1995年10月
- 7) 小林、他：低層建物におけるアトリウム環境の実測調査(その1~5)、日本建築学会学術講演梗概集、pp.869~878、1993年9月
- 8) 宋、木村、北村、他：大空間工場の熱負荷に関する研究(その1、その2)、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp.1079~1082、2000年9月

(2001年7月6日原稿受理、2002年1月18日採用決定)