

# 自然換気される大規模卸売市場内の 夏期温熱空気環境の CFD 解析

CFD Simulation on Velocity and  
Temperature Fields of Whole-Sale Market Building

加 藤 信 介\*・高 橋 岳 生\*\*・刑 部 知 周\*・村 上 周 三\*\*  
Shinsuke KATO, Takeo TAKAHASHI, Tomochika GYOBU and Shuzo MURAKAMI

大規模卸売市場内の温熱・空気環境に関して CFD (計算流体力学) により検討を行う。卸売市場は大きな開口部で囲まれた開放的な建物である。場内の換気の大半は風力等による自然通風により換気される。場内で車両等から汚染ガスの発生があっても室内の空気質はこの換気により一定水準に維持されることが期待される。しかし多量の換気は場内で部分的に行われる冷房の効果を減じてしまう。換気が少なければ大量の発熱や汚染質発生のある場所では室内温度や汚染質濃度が部分的に高くなる危険が生ずる。これらの問題点を検討するために内部発熱及び吸熱に対応させて密度調整したガスを模型内に吹き出す風洞実験を行うと共にこの風洞実験結果を元に CFD により詳細に場内の温熱環境、空気環境を解析した。本報では CFD による解析に関して解説する。

## 1. 序

平面が342 m×218.5 m となる大規模卸売市場<sup>[1]</sup>の温熱・空気環境に関して検討を行う。卸売市場は多数の大型トラック、小型運搬車による搬出搬入が頻繁に行われるため建物にはあまり壁を設けず、様々な交通動線の確保が可能となるように計画が行われる。このため壁面には空気の流通する開口部が広くとられている。開口の大きさは車両等により発生する汚染物質の濃度や室内の照明、車両等による発熱による温度がこの通風により設計温度・濃度以下となるよう計画されている。しかし、場内の温度分布や汚染質濃度分布は場内の通風性状並びに発生源位置、発生強度により大きく分布し、高温となる場所や汚染質濃度の高い領域が生ずる可能性がある。また外気を直接場内に導入することは空調等による場内の温熱環境調整を十分行うことが困難になる事を意味する。これらの問題に対応し、自然換気される大規模卸売市場棟の夏期の温度分布及び汚染質濃度分布を風洞模型実験<sup>[1], [2]</sup>並びに CFD により総合的に解析する。解析はまず、風洞模型実験により場内の通風換気性状をマクロ的に解析し、得られた結果に基づき CFD により場内の部分領域の温度や濃度の分布性状を詳細に解析する。風洞実験では内部発熱に対応させて密度調整したガスを模型内に吹き出して場内の通風量及び場内で発生した暖気、冷気の場内全体にわたる拡散性状を検討し、CFD により同様の検討を室内の上下方向の温度分布、

汚染質濃度分布の解析などでより詳細に行う。

## 2. CFD による検討の目的

風洞実験による検討では小縮尺 (1/300) の模型を用いて場内の暖気、冷気の分布性状、並びに汚染質拡散性状を検討した<sup>[1], [2]</sup>。写真 1 に風洞実験模型写真を示す。実験では、室全体の内部発熱を模擬するために密度調整したガスを比較的均一に模型室内に放出して場内の温度分布性状を検討している。CFD による検討では、各種の発熱位置高さなどにより実物に対応するようモデル化して設定し、場内の詳細な温度分布を検討する。なお検討は対流による顕熱輸送のみにして行い、水蒸気移動、放射熱伝達等の解析は行っていない。また解析対象空間が巨大であり、卸売市場内部に仲卸店舗等、複雑に配置されているため場内全体空間の解析には膨大な計算量が必要となるため今回の検討では場内の一部の領域のみを解析している。CFD 解析において、解析領域境界における、流入、流出条件は風洞



写真 1 市場模型 (模型縮尺 1/500 南東より見る)

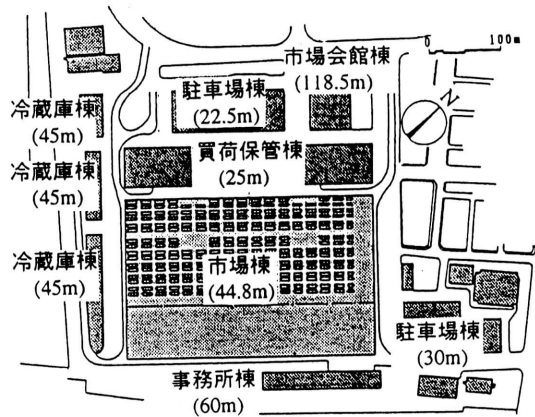
\*東京大学生産技術研究所 第5部

\*\*東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター

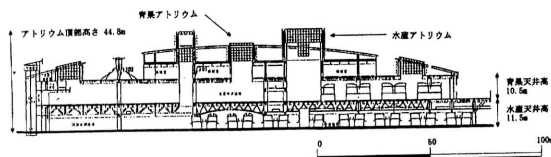
実験で得られた通風換気性状の結果に基づきこれをモデル化して与える。

### 3. 解析対象

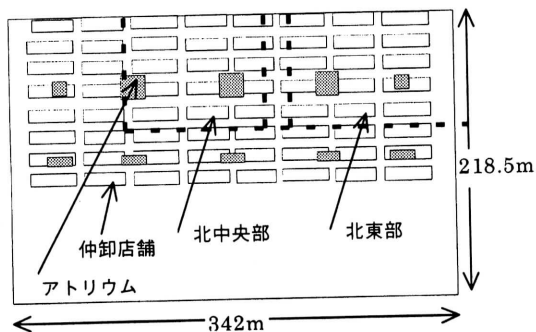
検討した卸売市場を図1に示す。市場は周囲を比較的高層の建物により囲まれており信頼性の高い通風量の評価を



(1) 市場配置図



(2) 市場棟南北断面図



(3) 市場棟水産階1F平面図

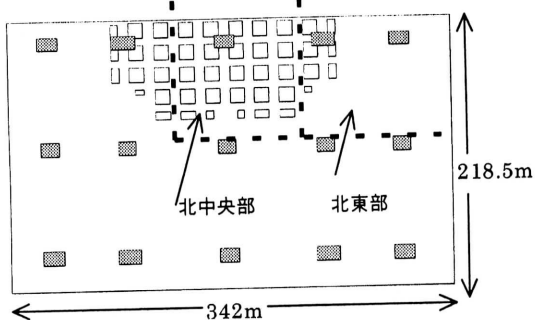
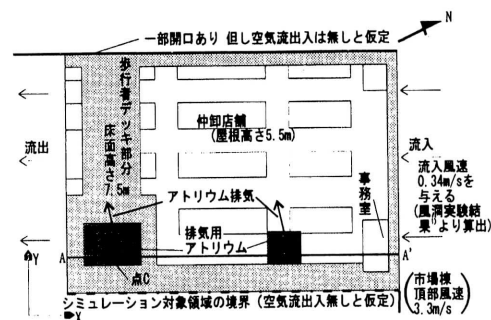
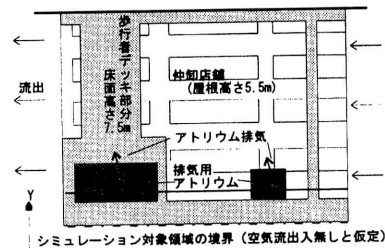


図1 解析対象の概要

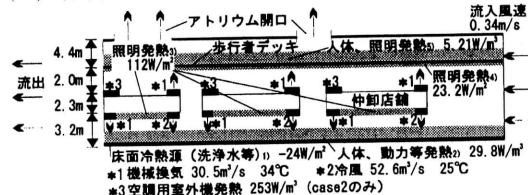
行うためにはこれらの建物も含めてモデル化された風洞実験が必要とされた。CFDによる解析は、卸売市場棟北東側の水産階の北東部(図2(1)), 115m(幅)×79.0m(奥行き)×11.9m(高さ), その風下側に当たる北中央部(図2(2)) 107m×79m×11.9m, 及び青果階の北東部(図3(2)), 107m×86.1m×10.5m, その風下側に当たる北中央部(図3(3)) 94m×86.1m×10.5mの4領域に対して行う。各解析領域と全体空間との対応を図1に示す。水産階には仲卸店舗、事務室などがある。空間上部には空調されない歩行者用デッキがあり、特に歩行者用デッキにおける夏期の温熱環境性状が本解析の重要な目的となっている。場内には建物側壁面開口及びアトリウム頂部発排気



(1) 北東部解析領域平面図 (114.6m(X)×79.01m(Y))



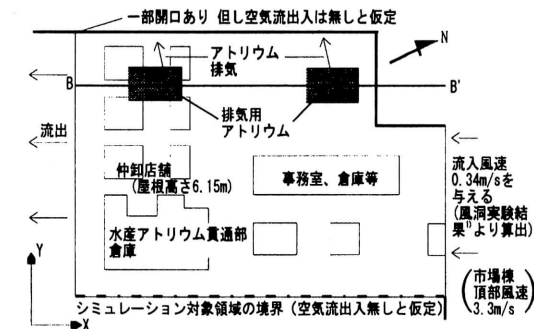
(2) 北中央部解析領域平面図 (107m(X)×79.01m(Y))



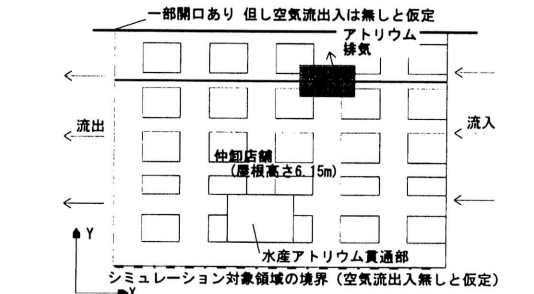
(3) 北東部解析領域断面図

- 注1) 床洗浄、氷類などの冷熱源に対しては、床面にマイナスの熱流を設定する。  
 2) 床面付近空間で生じた発熱は空間均一に熱が発生したと設定する。(床面高さ0~1.59mの空間)  
 3) 店舗などの照明発熱は店舗天井から均一発生すると設定する。  
 4) スカイウォークの下部に付いている照明発熱に関してはスカイウォーク面から均一発生とする。  
 5) 照明発熱とスカイウォークの人体発熱はスカイウォーク面から高さ方向2.967mまでのスカイウォーク上の空間で均一に発生するとする。

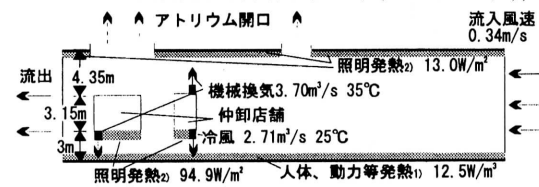
図2 水産階計算領域の概要



(1) 北東部解析領域平面図 (107.3m(X)×86.06m(Y))



(2) 北中央部解析領域平面図 (94m(X)×86.06m(Y))



(3) 北東部解析領域断面図

注1) 床面付近空間で生じた発熱は空間均一に熱が発生したと設定する。(床面高さ0~1.5mの空間)

2) 照明発熱は天井から均一発生すると設定する。

図3 青果階解析領域の概要

用開口を利用した自然換気その他、強制給気による機械換気吹き出しがある。また、各仲卸店舗は通路に対して全面が開放されており、店舗内には冷房用の吹き出しがある。店舗内は照明発熱の他、機械発熱等があり、通路部には車両等の発熱がある。青果階にも仲卸店舗、積み込み場などがあるが水産階と異なり歩行者デッキはない。CFD解析ではこれら発熱源、吸熱源を、その発生位置を考慮し、ある程度単純モデル化をして条件設定を行う。また仲卸店舗1階部分は壁等がなく通路に全面開放されているものとするが、2階部分は全体を気流障害として流れ場の境界条件をモデル化する。

#### 4. 計算概要

##### 4.1 CFDの概略

場内の気流は標準k-ε型2方程式モデル(Violletモデル)に基づく3次元シミュレーションにより解析する。シミュレーションにおいて移流項差分スキームはHybridを

用いた。解析格子点は、それぞれ水産階北東部 $27 \times 21 \times 20 = 11340$ 、北中央部 $31 \times 21 \times 20 = 13020$ 、青果階北東部 $28 \times 25 \times 20 = 14000$ 、北中央部 $30 \times 25 \times 20 = 15000$ としている。

##### 4.2 検討ケース

表1に検討ケースを示す。水産階北東部領域の解析では仲卸店舗屋上の発熱量を変化させ、Case 1, Case 2の2ケースを検討する。北中央部領域に関してはCase 3の1ケースを検討する。

青果階に関しては北東部領域に関するCase 4, 北中央部領域に関するCase 5の2ケースを検討する。なおCase 1の水産階北東部領域の流れ場解析結果に関しては、床面から均一に汚染質を発生させた場合の汚染質拡散性状をCase 6として解析している。

##### 4.3 計算条件(図2, 3参照)

盛夏時を想定してモデル化し計算条件の設定を行った。夏期の卓越風向及び風速頻度から解析は風向NNW, 市場棟頂部風速(地上44.8m)3.3m/s, 外気温 $33^{\circ}\text{C}$ の条件で行っている。各ケースにおける内部発熱条件を図2, 3に示す。Case 1では店舗天井面から $112 \text{ W/m}^2$ 及びスカイウォーク面から $23.2 \text{ W/m}^2$ の照明発熱を仮定する。1階床近傍空間から $29.8 \text{ W/m}^3$ (図2注2参照), 3階歩行者デッキレベル空間で $5.21 \text{ W/m}^3$ の人体・照明・作業動力発熱を見込んでいる。また1階床面では $-24.6 \text{ W/m}^2$ の床洗浄等による吸熱を仮定した。Case 2ではCase 1の条件に対し、店舗屋根面において店舗内の空調機等の室外機により発生する熱量 $253 \text{ W/m}^3$ (図2(3)\*3参照)を加えた条件を仮定した。Case 4は青果階の解析であり、店舗天井面から $94.9 \text{ W/m}^2$ 及び青果階天井から $13.0 \text{ W/m}^2$ の照明発熱を仮定している。青果階床空間から $12.5 \text{ W/m}^3$ (図3注1参照)の人体・照明・作業動力発熱が発生する

表1 計算条件

場所	風向	外風速 (m/s)	外気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	解析空間内 熱負荷(KW)		冷房による 除去熱量 (KW)	解析空間内 自然 通風量( $\text{m}^3/\text{s}$ )
				発熱	吸熱		
Case1 水産階北東部	NNE	3.3	$33^{\circ}\text{C}$	843	-222	-352	192
Case2 水産階北東部	NNE	3.3	$33^{\circ}\text{C}$	948	-222	-352	192
Case3 水産階北中央部	NNE	3.3	$33^{\circ}\text{C}$	627	-222	-352	192
Case4 青果階北東部	NNE	3.3	$33^{\circ}\text{C}$	365	0	-16.4	142
Case5 青果階北中央部	NNE	3.3	$33^{\circ}\text{C}$	369	0	-58.7	94

注1 吸熱は水撒き等の吸熱負荷を示す。発熱負荷等は解析空間内の合計を示す。

注2 冷房による除去熱量は外気温 $33^{\circ}\text{C}$ と吹出温度の差より算出

表2 境界条件

通風流入 開口等 $_{\text{in}}$	風速、温度は図1、図2を参照。 $U_{\text{in}}=0.34\text{m/s}$ $U_{\text{in}}$ :通風流入風速 $T_{\text{in}}=33^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{in}}$ :流入温度 乱れ $k=10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$ $k$ :乱流エネルギー $\epsilon=10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$ $\epsilon$ : $k$ の乱流散逸率
通風流出 開口等 $_{\text{out}}$	$k, \epsilon, \Theta$ : free slip, 速度:質量保存則による
壁面	(速度)一般化対数則を用いた (温度)加熱面(冷却面)は熱流を与条件として与える。 断熱面: $(\partial T/\partial x)_n=0$

注3 風洞実験結果を参考にして流入・流出量を推定

と想定した。

#### 4.4 境界条件

表 2 に条件設定した流入風速，他を示す。解析領域への自然通風量は風洞実験により側定した場内の換気回数により得られた換気量から開口面での流入風速を一樣として与えている。なお Case 5 では，Case 4 の流出風量，熱量を流入条件として与えている。自然通風の流出側は，風下側の解析領域端部の全面，及び屋根における 2 つの開口（排気用アトリウム）から行われるものとしてそれぞれ排気流量を計算条件として与えた。なお，各解析領域では北側壁面開口及び南側の解析領域境界面からの空气の流入出はないものとした。

場内の汚染質濃度分布を検討する Case 6 では，Case 1 で解析した流れ場に対し床面で汚染質が一樣に発生するものとして濃度を解析した。

### 5. 結 果

#### 5.1 Case 1 水産棟北東部

##### (1) 気流性状 (図 4, 5, 6)

図 4, 5, 6 で示されるように東部から流入した流れは内部の講造物の影響を受けて複雑な様相を呈する。高さ 1 m の風速分布では，流入直後の仲卸店舗前で風速が低下

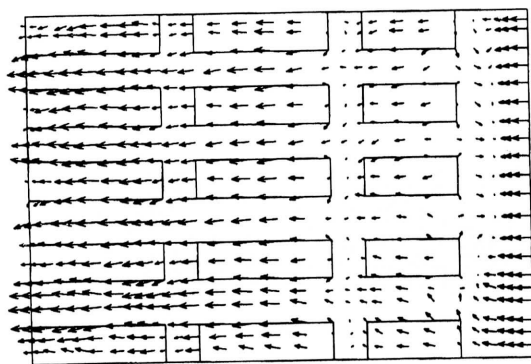


図 4 Case 1 水産棟北東部気流性状  
(←風速0.5m/s) (高さ1m)

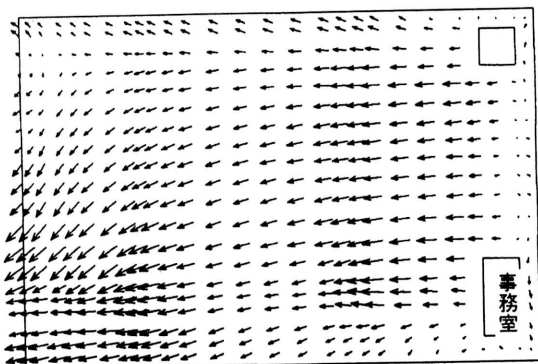


図 5 Case 1 水産棟北東部気流性状  
(←風速0.5m/s) (高さ8.75m)

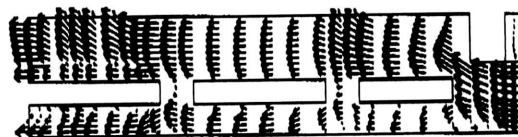


図 6 Case 1 水産棟北東部気流性状 (A-A'断面)  
(←風速0.5m/s)

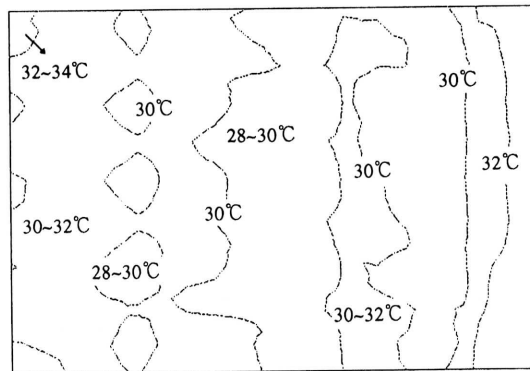


図 7 Case 1 水産棟北東部温度分布 (高さ1m)

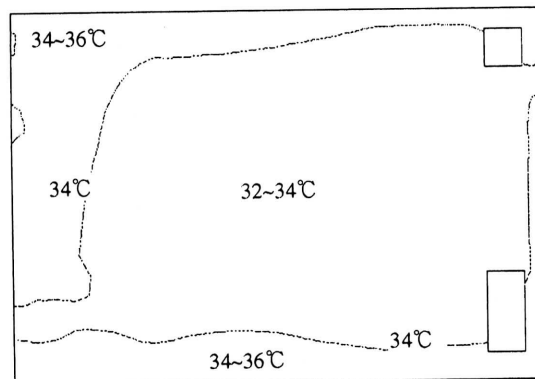


図 8 Case 1 水産棟北東部温度分布 (高さ8.75m)

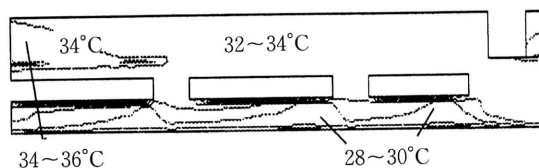


図 9 Case 1 水産棟北東部温度分布 (高さ A-A'断面)

しており流れの方向も一樣ではない (図 4)。しかし，高さ 8.75 m の流れは全体的には一樣で NNE 開口から風下側に向かって流れる (図 5)。またアトリウムの方向に向かって気流が誘引されており，その近傍で風速が速くなる。

##### (2) 温度分布 (図 7, 8, 9)

仲卸店舗の空調及び床面の水撒き等による吸熱の影響で，温度は高さ 1 m ではほとんどの場所で外気温 (33°C) より低くなっている (図 7)。また，店舗の近傍では 30°C

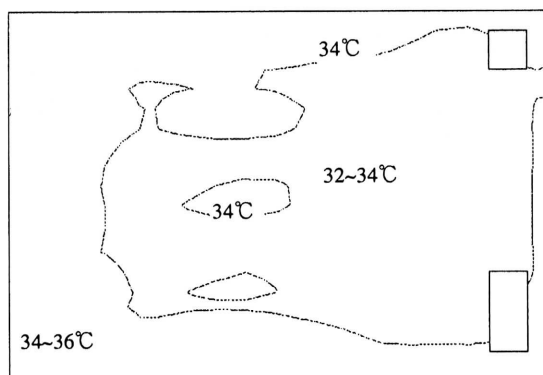


図10 Case 2 水産棟北中央部温度分布 (高さ8.75m)

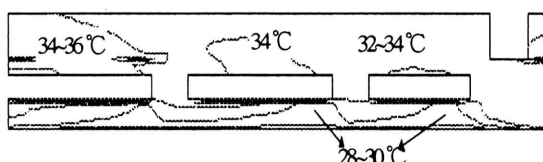


図11 Case 2 水産棟北中央部温度分布 (高さ A-A'断面)

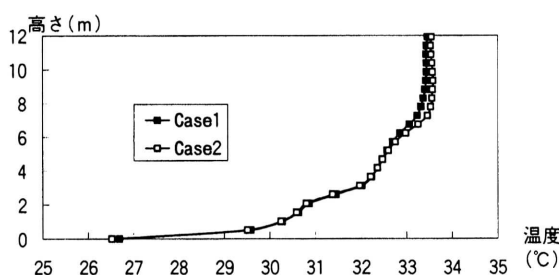


図12 水産棟点 C 鉛直温度分布 (図 2 参照)

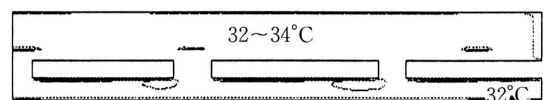


図13 Case 3 水産棟北中央部温度分布 (高さ A-A'断面)

以下になっている。高さ8.75 m の水平面でみると、歩行者デッキ部分はおおむね34℃になっており外気温より1℃高くなっている。デッキ以外の部分は32℃から34℃になっている(図8)。断面における温度分布に示されるように居住域はほとんどの場所で32℃以下になっている(図9)。

## 5.2 Case 2 水産北中央部

### (1) 気流性状

Case 1 とほぼ同様であり内部発熱量の増加による変化は見られない。結果の図は省略。

### (2) 水平温度分布 (図10, 11)

高さ8.75 m の平面では、歩行者デッキはおおむね34℃以上になっており、外気温より1℃高い程度である。

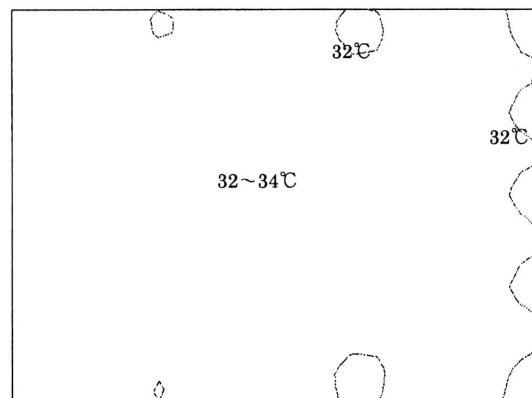
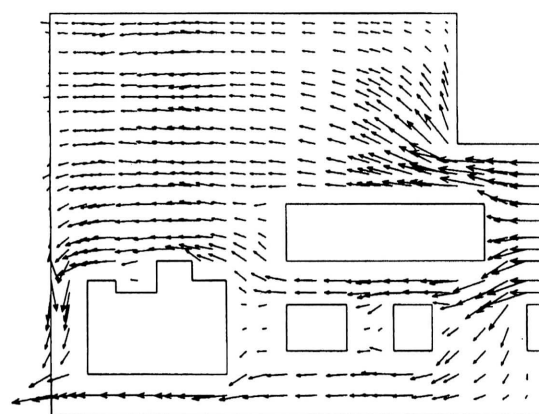


図14 Case 3 水産階北中央部温度分布 (高さ1m)

図15 Case 4 青果階北東部気流分布 (高さ1m)  
(←風速0.5m/s)図16 Case 4 青果階北東部気流分布 (高さ A-A'断面)  
(←風速0.5m/s)

デッキ以外の多くの部分は32℃から34℃になっているが部分的に34℃から36℃の場所が見られる。1階居住域レベルは冷房の効果にほとんどの場所で31℃以下になっている(図10)。

### (3) 鉛直温度分布 (図12)

場内で排出された熱量が完全混合すると仮定した場合、Case 1 と Case 2 では室内平均温度で約0.3℃の温度差しか生じない。計算結果はこの完全混合を仮定した場合の温度差と同程度の温度差しか観測されない。特に1mでは両者に差はほとんどみられない。高さ6m以上の領域で、Case 2 の温度は Case 1 の温度より0.2℃~0.4℃ほど高くなっており、内部発熱量増加の影響が観察される。

## 5.3 Case 3 北中央部

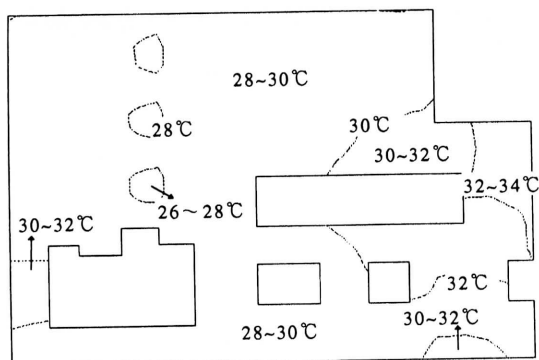


図17 Case 4 青果階北東部温度分布 (高さ 1 m)

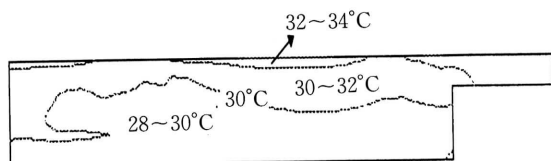


図18 Case 4 青果階北東部温度分布 (高さ B-B'断面)

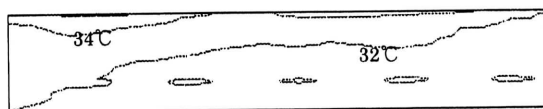


図19 Case 5 青果階北中央温度分布 (高さ B-B'断面)

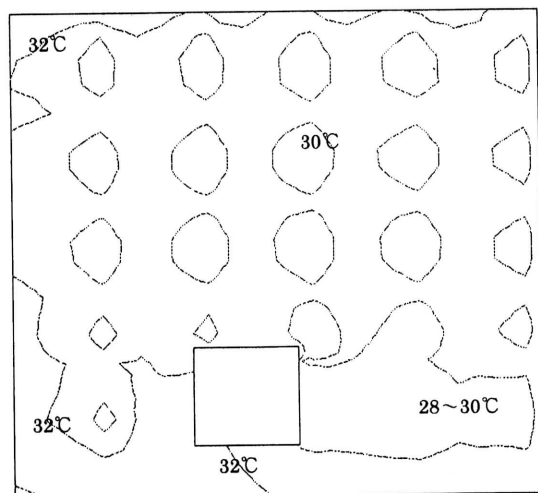


図20 Case 5 青果階北中央部温度分布 (高さ 1 m)

- (1) 気流性状 流入した空気は、ほぼ一様に流れている。  
 (2) 温度分布 (図13, 14) 仲卸店舗の冷房吹き出し近傍と床面以外のほぼ全域で32~34°Cになっている。歩行者デッキレベルでは、ほぼ全域で34°Cとなっている。

#### 5.4 Case 4 青果北東部

- (1) 気流性状 (図15, 16) 東部から流入した流れは内部の気流障害物となる構造物の影響を受けながらも、ほぼ一様に風下に流れる (図15)。上層部の空気はアトリウム

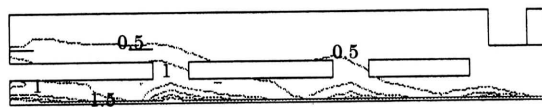


図21 Case 6 水産棟北東部汚質濃度分布 (高さ A-A'断面)

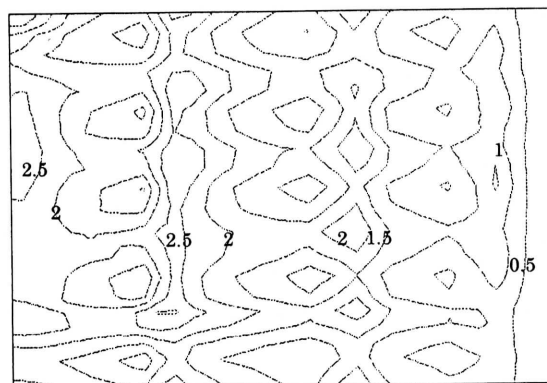


図22 Case 6 水産棟北東部汚質濃度分布 (高さ 1 m)

に誘引されている (図16)。

- (2) 温度分布 (図17, 18) 高さ 1 m の水平面では、仲卸店舗の空調の影響で、通路部も含めほとんどの場所で32°C以下になっている。また断面図の温度分布に示されるように、32°C以上の場所は上層部の限られた部分にしか現れない。

#### 5.5 Case 5 青果北中央部

- (1) 気流性状 流入した流れは内部の気流障害物となる構造物の影響を受けながらも、ほぼ一様に風下に流れている。  
 (2) 温度分布 (図19, 20) 高さ 1 m の水平面では、仲卸店舗の空調の影響で、通路部も含めほとんどの場所で32°C以下になっている。特に仲卸店舗内では30°C以下になっている。また断面図の温度分布に示されるように、34°C以上の場所は上層部に限られた部分にしか現れない。

#### 5.6 Case 6 水産階北東部における汚染質の拡散性状

床面から汚染質が一様に発生した場合の濃度分布を図21, 22に示す。図中汚染質濃度は発生した汚染質が、完全混合 (瞬時一様拡散) した場合に、「1」になるように無次元化して表示している。汚染質が床面で発生するため高濃度領域は床面近傍となり床上 1 m のほぼ全域で濃度が1を越えている。汚染質濃度は風下側、上層部にゆくほど高くなっている。床下 1 m での最高濃度は風下側で、約3を示しており場内で汚染質が完全混合した場合に対し約3倍の高濃度領域が生ずることが示唆されている。

## 6. ま と め

自然換気される大規模卸売市場の温熱・空気環境を風洞模型実験に引き続くCFD解析により検討した。主な結果

は以下の通りである.

①水産階, 青果階共に排気用アトリウムからの各階上層部の空気は誘引される.

②通風 (外気温 $33^{\circ}\text{C}$ ) のある市場棟内で, 仲卸店舗が冷房されると, Case 3 を除き仲卸店舗 1 階居住域にも通風があるにもかかわらず $32^{\circ}\text{C}$  以下の空気温となる.

③水産階において床上 $5.5\text{ m}$  の位置で場内の内部発熱を総発熱量の $1.3$ 割程度増加させても発熱位置が高いため床上高さ $1\text{ m}$  での温度変化はほとんどない.

④上記の場合, 床上高さ $8.75\text{ m}$  の歩行者デッキは, 内部発熱量増加の影響が観察され室温が上昇する.

⑤床面で汚染質が一樣発生すると仮定した場合, 場内床上 $1\text{ m}$  の居住域の汚染質濃度は完全混合濃度 (瞬時一樣拡散濃度) の $1.5\sim 3$  倍を示す領域が生ずる.

注) 解析対象は東京都に建設予定の鮮魚・青果の卸売市場.

## 謝 辞

本研究を行うに当たり, 東京都中央卸売市場, 並びに(株)日本設計, (株)梓設計の関係各位より多大のご協力を得ました. また新潟大学赤林伸一助教授にも貴重な御助言を頂きました. ここに記して, 謝意を表します.

(1995年12月15日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 刑部, 村上, 加藤, 高橋: 風洞実験による大規模卸売市場の空気・温熱環境に関する研究その 1, 換気性状に関する検討, 日本風工学会誌, No. 63, 1995.
- 2) 刑部, 村上, 加藤, 高橋: 自然換気される大規模卸売市場の夏期温熱空気環境に関する検討, 空気調和・衛生工学会, 学術講演会講演論文集, I, 1992.