

# 大空間の温熱空気環境に関する CFD 解析 放射パネル暖房設備を有する大規模格納庫内の温熱環境解析

正会員 ○伊藤一秀 (東京工芸大学)  
正会員 小林信行 (東京工芸大学)  
正会員 加藤信介 (東京大学生産技術研究所)

## 1. 序

大規模格納庫内の流れ場・温度場および汚染質拡散場に関しては、その実測例や解析例が少なく、格納庫設計のための基礎データが十分に蓄積されているとは言い難い。そのため、本研究では大規模格納庫を対象として、格納庫内の流れ場・温度場および汚染質拡散場を CFD により詳細に解析し、格納庫設計資料の蓄積を図る。

本報では、比較的大規模なモデル格納庫を対象として、北海道の気候条件を仮定して解析を行う。

上記条件でモデル格納庫内の温熱環境解析を詳細に行うことで、寒冷地に大規模空間を有する格納庫施設を建設する場合の問題点が明らかとなる。

## 2. 解析対象モデル格納庫

解析対象のモデル格納庫を図 1 示す。平面形状は幅 55.0m(y)×奥行き 80.0m(x)、周壁の高さは 12.0 m(z) である。また、アーチ型天井の最高高さは 19.6m(z) である。格納庫(y)方向の両脇には事務室等のサイドショップが設置されている。サイドショップに関しては簡易にモデル化し、1階部分は空調室(事務室等)、2階部分は非空調室(倉庫)とし、格納庫(x)方向に対し全て2階建て(8.0m(z))とする。

解析は対称性を考慮し、全体の 1/4 領域で行う。

## 3. 設備条件

本解析では、モデル格納庫を北海道に設置した場合の冬期暖房条件を対象として解析を行う。

### 3.1. 放射パネル

本解析では、暖房方式として放射パネル方式を採用する。格納庫のような大空間を有する施設に放射パネル暖房方式を採用した場合、室内空気の加熱は主として放射により温められた床面からの対流熱伝達によると考えられ、上下方向の温度分布が小さくな

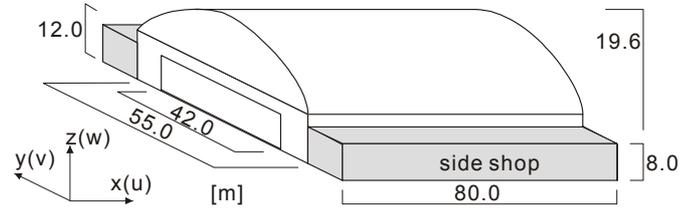


図 1 モデル格納庫

表 1 壁面熱負荷条件

	伝導率×建材厚 (W/m <sup>2</sup> K)	外側 α c (W/m <sup>2</sup> K)	外気 (°C)	境界条件 熱貫流率
上部外壁	2.92	20.0	-17.2	2.55
Side shop 内壁 (非空調室)	2.19	4.0	-1.6	1.42
Side shop 内壁 (空調室)	6.20	4.0	20.0	2.43
妻側下部	1.07	20.0	-17.2	1.02
妻側上部	2.64	20.0	-17.2	2.33
屋根	1.84	20.0	-17.2	1.68
床	0.5	-	-8.9	0.5

表 2 計算及び解析条件

解析メッシュ	(x)×(y)×(z)=192,425
差分スキーム	移流項: QUICK
流入境界	$U_{in}=2.0$ m/s (換気回数 1 回/h), $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$ , $\epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ , $l_{in}$ =吹出スリット幅の 1/7, $C_{\mu}=0.09$
流出境界	$U_{out}$ =(質量保存による), $k_{out}$ , $\epsilon_{out}$ = free slip
壁面境界	速度: 一般化対数則 温度: 一般化対数則 放射: 放射率は対称面を 0.0, その他壁面は 0.9

ることが予想される。また、暖房設備機器のエネルギー消費が少なく、ファン等の可動部が無いために騒音や埃が対流する、といった問題点が少ない。

本解析では、放射パネルの境界条件は表面温度で与え、下面 128°C (居住域側)、上面 40°C (天井側)とする。放射パネルは、床面から 9.0m 位置に設置し、(x)方向 4m モジュールに放射パネル 1 枚という割合で、幅 0.8m (x)×長さ 55.3m (y)のパネルを 20 枚設置する。

### 3.2. 熱負荷条件

冬期の暖房状態を解析対象とするため、安全側を考慮し、インテリア負荷は全て無視する。また窓面か

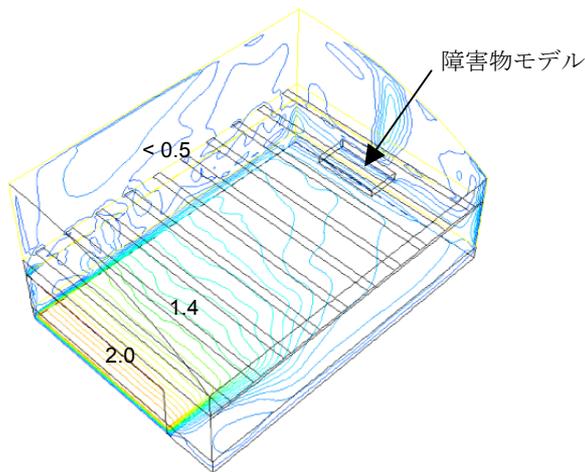


図2 スカラ風速分布 (m/s)

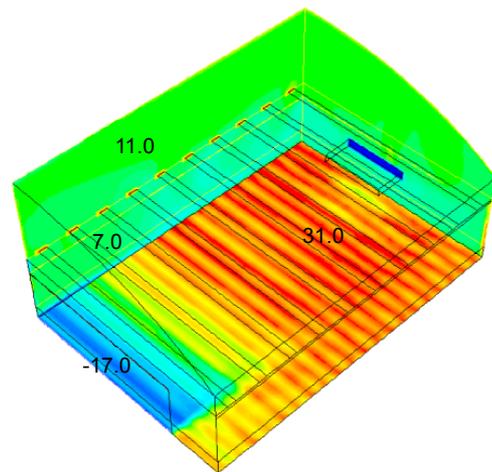


図3 平均温度分布 (°C)

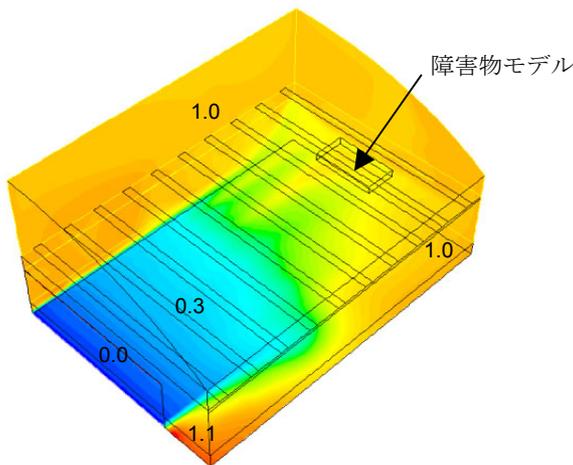


図4 平均濃度分布 (-)

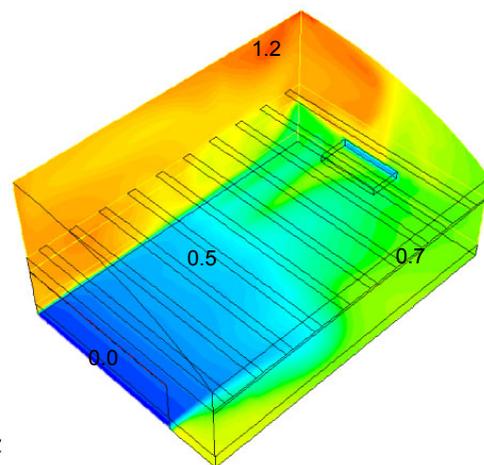


図5 空気齢(SVE3)分布(-)

らの日射負荷も無視する。各壁面および屋根面の境界条件として、部材に相当する熱伝導率と室外側の対流熱伝達率  $20 \text{ [W/m}^2\text{K]}$  より算出される熱貫流率を与える。外気温は北海道の冬期温度より  $-17.2^\circ\text{C}$  一定と仮定する。床面の境界条件は部材および地盤に相当する熱伝導率を与え、地中深さ  $1\text{m}$  地点の地中温度  $-8.9^\circ\text{C}$  一定と仮定して与える。(x)-(z)面に設置されているサイドショップに関しては、1階部分は暖房室とし空調温度  $20^\circ\text{C}$ 、2階部分は非暖房室とし室温  $-1.6^\circ\text{C}$  と仮定する。

CFD 解析で与える熱貫流率に関する壁面境界条件を表1に示す。

### 3.3. 障害物モデル

格納庫内には通常、車両や飛行機等の障害物が設置される。本解析では、格納庫内にモデル化した障害物を設置する。形状は単純化し  $60\text{m}^2$  の正方形平面と

し、厚さは  $0.5\text{m}$  と仮定する。障害物は放射パネルと床面の間の遮蔽物であると仮定し、設置高さは床面から  $5\text{m}$  とする。

## 4. 数値解析条件

### 4.1. 流れ場

標準  $k-\varepsilon$  model に基づく3次元解析を行う。 $\varepsilon$  方程式の浮力生産項は Violet 型を用いる。外気導入として、(y)-(z)平面のシャッター下部より流入(infiltration)、シャッター上部より流出(exfiltration)を与える。格納庫の隙間面積は、合計で約  $6.38\text{m}^2$  とし、シャッター上下にスリットを設ける(シャッターの幅(y)は  $42.0\text{m}$ )。流入量(隙間風量)は換気回数  $1 \text{ 回/h}$  を想定し  $48,500 \text{ m}^3/\text{h}$  と仮定する。

### 4.2. 温度場

温度に関する壁面境界条件として一般化対数則を用

いる。放射と連成して解析する。

### 4.3. 壁間相互放射熱伝達

discrete beam 法により形態係数を算出し、radiosity 法による緩和計算により室内の相互放射性状を解析する。計算及び解析条件を表 2 に示す。

### 4.4. 汚染質拡散場解析

流れ場の解析の後、換気効率の解析を行うために居住域(床面から 1.8m 領域)および空間全体において passive contaminant を一様発生させ、汚染質拡散場の解析を行う。

## 5. 数値解析結果

### 5.1. 流れ場

床面から 0.05m レベルおよび格納庫中央断面におけるスカラ風速分布を図 2 に示す。シャッター下部から流入した冷気は格納庫中央部まで床面に沿って流れ、その後上昇する。放射パネルより上部では明確な流れは生じておらず、滞留域となっている。

### 5.2. 温度場

床面および格納庫中央断面における平均温度分布を図 3 に示す。放射パネルにより床面が温められており、床面平均温度は 20.4℃となっている。空間には上下方向に温度成層が形成されており、最大で 10℃程度の温度勾配がある。図は割愛するが、天井面平均温度は 10.4℃と低くなっている。

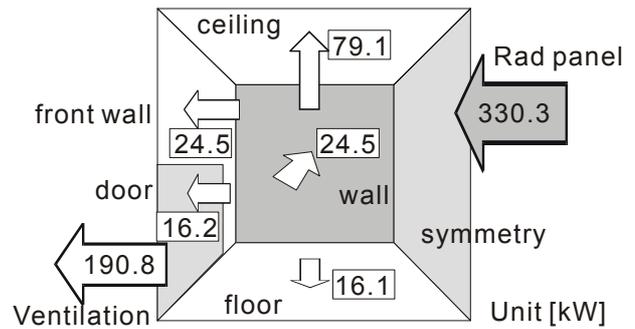
居住域平均温度(床面から 1.8m 位置までの領域)は 6.7℃と低い値となった。これは、本解析に用いた放射パネルの表面積が相対的に小さく、放射パネルによる投入熱量が 330kW と小さいことが主因である。また、-17.2℃の外気が直接居住域に供給されることも大きく影響している。

### 5.3. 各壁面における熱収支

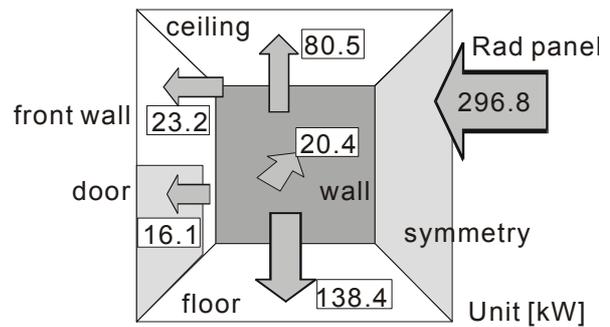
各壁面における熱収支を図 6 に示す。空間内には放射パネルにより 330.3kW の熱量が投入され、漏気によりその 58%が排出されている(図 6(1))。天井面からの熱損失が大きい。図 6(2)・(3)より、床面は放射により温められ、その後対流により室内空気に熱が移動している。

### 5.4. 規準化居住域濃度の解析

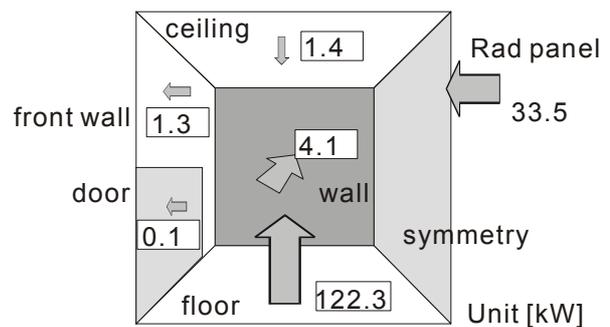
居住域で汚染質を一様発生させた場合の床面から 0.05m レベルおよび格納庫中央断面における格納庫内濃度分布を図 4 に示す。居住域で発生した汚染質



(1) 貫流熱損失



(2) 放射による熱移動量



(3) 対流による熱移動量

図 6 各壁面における熱収支 (1/4 領域での値)

表 3 換気効率解析結果

換気効率指標	解析結果
規準化居住域濃度	0.86
空気齢(SVE3)	居住域平均 : 0.70 室平均 : 0.92
VF	1.04

は、天井部に滞留している。居住域平均濃度  $C_p$  を完全混合濃度  $C_{ext}$  で無次元化した規準化居住域濃度は、0.86 と 1 を下回る値となった。

### 5.5. 空気齢(SVE3)の解析

空間一様で汚染質を発生させて解析した空気齢分布(SVE3)を図 5 に示す。シャッター下部より流入があるため、シャッター近傍で空気齢は 0 を示す。天井部近傍では、空気齢 1.3 程度の値となる。シャッター

下部より居住域に外気が直接供給されているために、居住域平均空気齢は 0.70 となり、名目換気時間の 70%程度の小さな値となる(表 3)。また室全体の平均空気齢は 0.92、放射パネルより上部の天井空間では局所的に 1.2 を越える領域が存在するが、平均空気齢は 0.97 と 1 を下回る値となった。シャッター下部からの漏気条件は、格納庫全体で置換換気方式(Displacement Ventilation)に近い換気方式となっている。

### 5.6. 汚染質再帰率(VF)の解析

居住域で発生した汚染質の挙動を VF (Visitation Frequency; 汚染質の再帰率)により解析する。VF は汚染質排出のスムーズさを評価する指標であり、値が小さいほど効率的な換気性状であることを示す。

本解析対象では、居住域に対する VF は 1.04 であり、居住域で発生した汚染質は居住域に再帰することなく、シャッター上部より格納庫外に排出されていることが分かる。

### 5.7. 考察

本解析条件では、漏気をシャッター下部領域に集中させている。そのため、外気(冷気)は居住域に直接供給されることになる。すなわち居住域温熱環境の側面からは厳しい境界条件(安全側)となり、居住域換気効率の側面からは危険側の境界条件で解析を行ったこととなる。

より厳密な解析を行うためには、実現象にそって外気導入部を分散設置する必要がある。

## 6. 結論

(1) 放射パネル暖房設備を有する大規模格納庫内の温熱環境を解析した結果、漏気が存在するシャッター下部領域を除き、明確な流れは存在せず、特に天井部では滞留域となる。

(2) 換気回数 1 回/h を仮定した漏気が存在する場合、放射パネルによる室内投入熱量の 58%が漏気により室外に排出される。

(3) 今回の解析条件では放射パネルにより床面が暖められ、その後、対流により室内空気が暖められる性状が確認された。

(4) 天井面における熱損失が大きいことから、天井の断熱性能を改善することが、温熱環境改善に有効である。

(5) 本解析条件では居住域で発生した汚染質はシャッター下部からの漏気により空間上部に効率的に輸送され、規準化居住域濃度は 0.86 となる。また VF の解析より居住域で発生した汚染質は居住域に再帰せず、室外に排出される。

## 注

[1] SVE3 (Scale for Ventilation Efficiency 3)は室内の空気齢分布を直接与える指標である。定義式を(1)式に示す。

$$SVE3(X) = C'x(X) / C_s \quad (1)$$

$$C_s = q/Q \quad (2)$$

[2] VF は Passive Contaminant を仮定した平均拡散場解析による流入 flux を用いて(3)式のように定義される。

$$VF = 1 + (\Delta q_p / q_p) \quad (3)$$

ここで、

VF : 平均 Visitation Frequency [ - ]

$\Delta q_p$  : 単位時間当たり対象領域 P に流入(再帰)する汚染質量[流入 flux, kg/s]  
但し汚染質は P 内で発生

$q_p$  : 単位時間当たり対象領域 P 内で発生する汚染質量 [kg/s]

## 参考文献

- [1] 空気調和・衛生工学会規格 HASS102-1997, 1997
- [2] 格納庫暖房設備技術動向調査検討委員会 報告書, 2001
- [3] Kato, S. and Murakami, S. : New ventilation efficiency scales based on spatial distribution of contaminant concentration aided by numerical simulation. ASH-RAE Transactions 94 (2), pp.309- 330, 1988
- [4] 伊藤一秀, 加藤信介, 村上周三: 平均拡散場解析による Visitation Frequency, Purging Flow Rate の解析 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No. 529 (2000), pp. 31- 37

## 謝辞

本解析結果に関しては東京防衛施設局建設部から委託を受けて空気調和・衛生工学会 格納庫暖房設備技術動向調査検討委員会(主査 小林信行東京工芸大学教授)を設置し、その活動の一環として行い、委員の皆様、防衛施設庁および東京防衛施設局関係者の皆様よりご意見を頂いた。また CFD 解析を行う上で、東京大学大学院 朱清宇氏にご助言いただいた。

記して深甚なる謝意を示す。