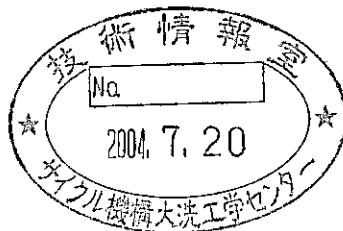


ナトリウム火災時における 水平接続部屋間対流通気の数値解析 —複数開口部配置に対する依存性評価—

(研究報告)

2004年5月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2004

ナトリウム火災時における水平接続部屋間対流通気の数値解析 —複数開口部配置に対する依存性評価—

(研究報告)

大木 裕¹、高田 孝²、山口 彰²

要旨

部屋間に水平開口部が存在した際に生じる対流通気が、火災現象に及ぼす影響を評価することを目的に、異なる2つのモデル(field, zone)の数値解析を実施した。使用した数値解析コードは、field model の多次元ナトリウム燃焼解析コード「AQUA-SF」と、zone model の多セル燃焼解析コード「SPHINCS」である。本研究により、以下の知見を得た。

1. BROWN 実験検証解析により、AQUA-SF の対流通気評価コードとしての妥当性と、開口部でのメッシュ分割依存性について確認した。メッシュ分割依存性に関しては、中性帯位置とメッシュ点が一致すれば、約 10%未満の誤差で評価可能である。
2. 単純な体系を用い、数値計算により、以下の知見を得た。
 - (1) field model による対流通気の複数開口部空間配置依存性は、開口部間距離に大きく依存し、開口部配置高さの影響はほとんどない。zone model の場合、開口部間距離の影響をモデル化することにより、開口部間距離への依存性を評価できる。但し、熱源と雰囲気との温度差が大きく、開口部間距離が小さい場合、一様仮定が成立しない。以上の傾向は、燃焼のあるなしで同様であった。
 - (2) 対流通気が燃焼に与える影響は大きい。対流通気量が増大すると燃焼現象は大幅に活性化する。

¹株式会社エヌデーデー

²核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 要素技術開発部 流体計算工学研究グループ

Numerical Investigation of Ventilation Rate between Horizontally Connected Rooms in
Sodium Fire Phenomena
—Dependency of Multi-Opening Layout—

(Research Document)

Ohki Hiroshi¹
Takata Takashi²
Yamaguchi Akira²

Abstract

Numerical analyses of the ventilation between horizontally connected rooms are carried out to investigate the influence of opening configuration, such as a location and number of opening, on the ventilation rate. SPHINCS and AQUA-SF codes, based on the zone model and the field model respectively, are used for this purpose. The following conclusions are obtained.

1. In the numerical analysis of the BROWN experiment, it is confirmed that AQUA-SF code is applicable to investigate the ventilation rate. Furthermore, if the elevation of mesh point agree with the equal-pressure axis, the ventilation rate would be able to be estimated within 10% of accuracy.
2. As a result of the numerical investigation of ventilation,
 - (1) As a result of the multi-dimensional analyses (the field model), it is confirmed that the longitudinal distance between openings strongly affects the ventilation rate. On the other hand, the elevation of the multi-opening is not influential on the ventilation rate. As a result of the multi-cell analyses (the zone model), it would be able to estimate the longitudinal distance between openings, if it uses an adequate model for summation of the openings in which the influence of the longitudinal distance between openings is taken into account. In this regard, a uniform assumption of zone model slightly differ from field model, especially under the lower case,. (i)The longitudinal distance between openings is small. (ii)The differences between heat source temperature and gas one is large. These tendencies are same whether or not it is under the condition of combustion.
 - (2) The influence of ventilation rate on a sodium combustion phenomenon is large. The increasing of ventilation rate have the sodium combustion phenomenon considerably accelerated.

¹ NDD Inc.

² Thermal-Hydraulic Research Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

目 次

1.はじめに	1
2.温度一定条件における対流通気解析	2
2.1 AQUA-SF による BROWN 自然対流通気評価解析	2
2.1.1 BROWN らによる自然対流通気実験	2
2.1.2 解析体系と解析条件	3
2.1.3 解析結果	3
2.2 SPHINCS における対流通気評価手法	5
2.2.1 BROWN らによる対流通気モデル	5
2.3 複数開口条件への適用	6
2.3.1 BROWN らによる等価開口部寸法換算式	6
2.3.2 等寸法 2 正方形開口条件	7
2.3.3 非等寸法 2 正方形開口条件	8
3.温度変化あり・不燃条件における対流通気の複数開口配置依存性	17
3.1 概要	17
3.2 解析体系と解析条件	17
3.3 不燃条件における評価(1) : SPHINCS (BROWN 換算式使用時) による 対流通気の開口部間距離依存性	20
3.4 不燃条件における評価(2) : SPHINCS (水力等価直径使用時) による 対流通気の開口部間距離依存性	21
3.5 不燃条件における評価(3) : AQUA-SF による対流通気の 開口部空間配置依存性	22
3.5.1 開口部配置	22
3.5.2 解析結果	22
3.6 不燃条件における評価(4) : 高温発熱体条件解析	25
4.温度変化あり・燃焼条件における対流通気の開口部配置依存性	41
4.1 解析体系と解析条件	41
4.2 解析結果及び考察	43
4.2.1 開口部間距離依存性	43
4.2.2 開口部配置高さ依存性	45
5 おわりに	58
参考文献	60
付録 1.AQUA-SF における対流通気量算出方法	61
付録 2.AQUA-SF におけるナトリウムプール入力設定	62
付録 3.SPHINCS におけるナトリウムプール及び構造材の入力設定	63

表・図目次

【2章】

表 2.1-1 BROWN 実験検証解析における温度条件	9
表 2.3-2 非等寸法 2 正方形開口条件における SPHINCS と AQUA-SF の解析結果	9
図 2.1-1 BROWN らによる対流通気実験測定結果	10
図 2.1-2 AQUA-SF による BROWN 実験検証解析の解析体系	11
図 2.1-3 AQUA-SF の開口部の横(Y)×高さ(Z)方向メッシュ分割依存性	12
図 2.1-4 AQUA-SF の開口部の厚さ(X)方向メッシュ分割依存性	12
図 2.1-5 AQUA-SF における中性帯のメッシュ分割依存性	13
図 2.3-1 BROWN 換算式の変数の定義	14
図 2.3-2 等寸法 2 正方形開口条件解析における対流通気量	15
図 2.3-3 非等寸法 2 正方形開口条件解析における開口部寸法	16

【3章】

表 3.2-1 不燃条件解析における体系条件	26
表 3.2-2 不燃条件解析における発熱体条件	26
表 3.2-3 不燃条件解析における温度境界条件(1) - 高温部屋と開口部 -	26
表 3.2-4 不燃条件解析における温度境界条件(2) - 大気部屋 -	27
表 3.3-1 SPHINCS による不燃条件解析における開口部の換算寸法(1)	27
表 3.5-1 不燃条件における開口部配置依存性解析の case 番号と開口条件	27
表 3.5-2 SPHINCS による不燃条件解析における開口部の換算寸法(2)	28
表 3.5-3 不燃条件における対流通気量の開口部配置依存性 (発熱体温度 50°C 条件)	28
表 3.6-1 不燃条件における対流通気量の開口部配置依存性 (発熱体温度 800°C 条件)	29
図 3.2-1 SPHINCS による不燃条件解析の解析体系概要	30
図 3.2-2 AQUA-SF による不燃条件解析の解析体系	31
図 3.2-3 AQUA-SF における熱伝達係数の評価 (発熱体直上節点における温度推移)	32
図 3.3-1 無次元開口部間距離パラメータ h_0^* の定義	33
図 3.3-2 SPHINCS による不燃条件解析の対流通気量の h_0^* 依存性	34
図 3.3-3 SPHINCS による不燃条件解析の定常温度の h_0^* 依存性	34
図 3.3-4 SPHINCS による不燃条件解析の Gr と Nu/Pr の関係	35
図 3.5-1 無次元開口部配置高さパラメータ H_c^* の定義	35
図 3.5-2 AQUA-SF による温度分布の開口空間配置依存性 (発熱体温度 50°C)	36

図 3.5・3 AQUA-SF による流束分布の開口空間配置依存性（発熱体温度 50°C）	37
図 3.6・1 AQUA-SF による温度分布の開口空間配置依存性（発熱体温度 800°C）	38
図 3.6・2 AQUA-SF による流束分布の開口空間配置依存性（発熱体温度 800°C）	39
図 3.6・3 不燃条件におけるエネルギー供給量の発熱体温度依存性	40
図 3.6・4 不燃条件における対流通気量と平均温度の関係	40

【4 章】

表 4.1・1 プール燃焼解析における体系条件	46
表 4.1・2 プール燃焼条件解析における温度境界条件(1) - 燃焼部屋と開口部	46
表 4.1・3 プール燃焼条件解析における温度境界条件(2) - 大気部屋	46
表 4.1・4 SPHINCS によるプール燃焼条件解析における開口部の換算寸法	47
表 4.1・5 プール燃焼におけるプール条件	47
表 4.1・6 床構造材条件	48
表 4.1・7 床構造材物性値	48
表 4.2・1 プール燃焼条件における開口部間距離依存性解析結果	49
表 4.2・2 プール燃焼条件における対流通気量の開口部配置高さ依存性解析結果	51
図 4.1・1 SPHINCS によるプール燃焼条件解析の解析体系概要	53
図 4.1・2 AQUA-SF によるプール燃焼条件解析の解析体系	54
図 4.1・3 プール燃焼条件における床構造材の概略	55
図 4.2・1 プール燃焼における流速分布と温度分布の開口部配置依存性	56
図 4.2・2 プール燃焼における酸素濃度分布の開口部配置依存性	57

1.はじめに

ナトリウムを冷却材とした高速増殖炉では、ナトリウム漏洩事故時に発生するナトリウム火災が高速炉建屋に及ぼす影響を評価することは、安全上重要である。

屋内火災では、部屋間の対流通気により、周辺室へ高温ガス及び燃焼生成物が、火災発生室へは新鮮な空気が輸送される。高速増殖炉建屋においても、連通する部屋間には開口部が多数存在しており、これら開口部を通した対流通気の把握は火災を評価する上で重要である。

本研究では、火災発生時における対流通気の部屋間開口部配置依存性について、数値解析により評価を実施した。部屋間の通気には、水平に接続された部屋間の通気と、垂直に接続された部屋間の通気の2通りあるが、本研究では水平接続部屋間のみを対象とする。

数値解析で使用したコードは、空間を離散化して分布の影響を考慮する多次元モデル(field model)の「AQUA-SF」[1]と、通気量を評価するモデルが必要となる多点近似モデル(zone model)の「SPHINCS」[2]である。両者を比較することにより、数値解析モデル違いが対流通気に与える影響についても評価を行った。

2. 温度一定条件における対流通気解析

本章では、最も理想化された状況である部屋内平均温度一定条件において、2部屋間の対流通気の評価を実施した。

2.1 AQUA-SF による BROWN 自然対流通気評価解析

AQUA-SF の対流通気評価の妥当性を評価するため、BROWN らによる対流通気実験[3]の検証解析を実施した。また、開口部のメッシュ分割数が対流通気に与える影響についても評価を実施した。

2.1.1 BROWN らによる自然対流通気実験

BROWN らによる自然対流通気実験は、開口部を通して水平方向に連通されている 2 部屋間の対流通気を測定したものである。各部屋の温度、及び開口部高さ（縦方向寸法）と開口部厚さの比の 2 つがパラメータとなっている。

実験の概要を以下に示す。閉じた箱状装置の中に、穴の空いた仕切り版を差し込むことにより、開口部を通して連通される 2 部屋を用意する。仕切り板の厚さが開口部の厚さになる。仕切り板両側の雰囲気温度を調整することにより、温度をパラメータとした自然対流通気が測定された。

実験結果を図 2.1-1 に示す。実験値は、横軸をグラスホフ数 (Gr)、縦軸をヌッセルト数 (Nu) をプラントル数 (Pr) で除した値 (Nu/Pr) で整理されている。横軸の Gr 数は、(2.1-1) 式に示すように温度条件と開口部高さに依存した量である。

$$Gr = \frac{g\Delta\rho H^3}{\nu^2 \bar{\rho}} \quad (2.1-1)$$

ここで g は重力加速度 [m/s²]、 H は代表長さ（開口部高さ） [m]、 ν は動粘性係数 [m²/s] である。縦軸の Nu/Pr は (2.1-2) 式に示す通り対流通気量と開口部の幅に依存した量である。

$$Nu / Pr = G / W / \mu \quad (2.1-2)$$

G は対流通気量 [kg/s]、 W は開口部の幅 [m]、 μ は粘性係数 [kg / m/s] を示す。

図 2.1-1 の実線が実験曲線を示している。図中の星印は AQUA-SF による解析値であり、2.1.3 節にて詳述する。

2 本の破線は、2.2 節にて詳述する BROWN らによる対流通気モデル (2.2-1) 式を用いて求められた (2.1-2) 式の値であり、下の破線が (2.2-1) 式のオリフィス係数 (C) が 0.6 の場合、上の破線が 1.0 の場合の値である。実験値は、これら 2 本の値の間に分布している。

以上の実験結果と比較することにより、AQUA-SF の対流通気評価コードとしての妥当性を検証する。

2.1.2 解析体系と解析条件

最も理想化された状況である部屋内平均温度一定条件において、2部屋間の対流通気の評価を実施する。本研究における AQUA-SF における対流通気量は、高温部屋と開口部の境界面を通過する質量流量[kg/s]と定義した。詳細を付録 1 に記す。

解析体系は、2.1.1 節で述べた BROWN 実験体系を模擬したものを用いる。解析体系図を図 2.1-2 に示す。実験装置の全長が不明であるため、検証解析では仕切り板寸法と開口部寸法のみ実験条件を採用した。仕切り板寸法と開口部寸法より、開口部が在る側壁寸法と、開口部断面寸法、開口部の厚さが決まる。 X 方向の部屋寸法を大きくしているのは、解析空間を大きく取ることにより、平均温度の変動を抑制して対流通気への影響を及ぼさないようにするためである。開口部寸法は、実験条件の中で最も大きな 0.305m の正方形開口条件を用いた。開口部寸法が大きい方が系に与える影響が大きいことから評価しやすいためである。開口部の厚さ(t)は、開口部の高さ寸法(H)の比 t/H が実験においてケース数の多い 0.38 となるように、 $t=0.116\text{m}$ とした。

境界条件は、部屋の温度変化を抑制するため、開口部と向かい合った両側の側壁（解析体系の $\pm X$ 方向の両端）に高い熱伝達率($Nu=1\times 10^5$)を設定することにより、両側の側壁近傍が温度一定となるようにした。その他の表面はすべて断熱とした。

解析条件は、温度条件と開口部の分割数をパラメータとする。温度条件は、Gr 数が 5×10^6 、 1×10^7 、 5×10^7 の 3 通りに対応する温度条件を用いる。3 通りの Gr 数に対応する 2 部屋の温度は、2 部屋間の温度の平均値を 26.85°C (=300[K])として表 2.1-1 の通り定めた。開口部分割数は、開口部の幅(Y)×高さ(Z)方向に対して 8 通り (1×2 , 2×2 , 3×3 , 4×4 , 5×5 , 6×6 , 1×10 , 10×10) を、開口部の厚さ(X)方向は、代表的な 4 通りの $Y\times Z$ に対して ($1, 2, 4, 6, 10$) の 5 通り実施した。

2.1.3 解析結果

開口部のメッシュ分割依存性を図 2.1.3 及び 2.1.4 に示す。図 2.1.3 は $Y\times Z$ 方向のメッシュ分割数依存性を示したものであり、図 2.1.4 は X 方向のメッシュ分割数依存性を示したものである。図 2.1.3 の(a)～(c)は、それぞれ表 2.1-1 の温度条件#1～3 に対応している。図 2.1.4 は、温度条件#3 で代表させた。その結果、次の(1)～(4)の特徴が見られた。

- (1) 図 2.1.3 より、 Z の分割数が奇数の場合（図 2.1.3 の■）、対流通気量を低めに評価する。本条件では中性帶（速度=0 となる位置）が開口部の中心となるため、中性帶に速度定義点であるメッシュ点がない場合、解析の精度が悪化したと考えられる。
- (2) 図 2.1.3 より、 Z 方向分割数が偶数の場合、大きなメッシュ分割依存性は見られない。但し、 Z 方向の分割数が同数同士では、 Y の分割数が粗い場合（図 2.1.3 の□）の方が対流通気量を高めに評価している。多次元解析の場合、開口部を詳細に分割することにより開口部の圧力損失が自動で加味されるが、今回の場合、分割数を粗くすること

で圧力損失を低めに評価するためであると考えられる。

- (3) 図 2.1.4 より、 $X=1$ 分割と、 $X \geq 2$ 分割の間の対流通気量との差異が大きい。これは $X=1$ の場合、開口部前後の流れが比較的直線状の貫流に近くになり、開口部に流れ込む際の縮流と、開口部から流れ出た際の拡流による圧損の影響を過小に評価するのではないかと考えられる。
- (4) 図 2.1.4 より、 X を詳細にするほど通気量が下がるケースが多い。これには 2 つの要因が考えられる。一つは、アスペクト比の悪化であり、もう一つは、中性帯位置に分布が生じてメッシュ点から若干ずれた場合である。開口部を通過した気流は、高温ガスは低温側の上方へ、低温ガスは高温側の下方へ抜けていく。そのため、対流通気量を算出している開口部と高温部屋の境界面では、中性帯位置が開口部の中心位置から僅かに下方にずれると予想される。図 2.1.5 に代表的な分割数における中性帯位置の分布図を示す。これは、高温側との境界面における開口部断面を図示したものであり、外枠は開口部を、破線はメッシュを、グラフは中性帯位置を示している。(a)は $Y \times Z = 2 \times 2$ 分割の場合であり、メッシュ点と中性帯位置はほとんど一致している。 X 分割数を 2 から 10 へ増やしても、メッシュ点と中性帯位置はほとんど一致している点に変化はない。図 2.1.4において、 $X \times Y \times Z = 2 \times 2 \times 2 \rightarrow 10 \times 2 \times 2$ とした時、 X 方向分割を増やすと対流通気量が大きく低下したのは、アスペクト比の悪化によるものだと考えられる。 $Y \times Z = 2 \times 2$ の場合、 $X=10$ 分割における比率は 10 以上になる。(b)は参考値として図示した、 $Y \times Z = 3 \times 3$ 分割の場合である。メッシュ点と中性帯位置が著しくずれており、(1)が裏付けられている。(c)は、最も X 依存性が小さかった $Y \times Z = 6 \times 6$ 分割の場合である。メッシュ点との一致性は比較的良好。(d)は、 $Y \times Z = 10 \times 10$ 分割の場合である。中性帯位置に分布が生じており、中性帯位置とメッシュ点の一致が良くないことが示されている。以上、AQUA-SF における開口部の厚さ(X)方向分割数の影響として、次の 2 点を確認した。

- ①開口部メッシュのアスペクト比が大きくなると、対流通気量を低めに評価する。
- ② $Y \times Z$ 方向分割を詳細にすると、中性帯位置に分布が生じて必ずしもメッシュ点と一致するとは限らなくなる。その場合、僅かであるが対流通気量を低めに評価する。

対流通気量の評価誤差について述べる。 $X=1$ 分割及び $Y \times Z = 2 \times 2$ 分割は誤差が大きいと考えると、図 2.1.4 より、本体系における通気量の評価誤差は約 7% であった。

実験結果との比較を図 2.1.1 に示す。図中★と☆が解析結果である。代表として★は $2 \times 10 \times 10$ 分割、☆は $10 \times 4 \times 4$ 分割における値を示している。前者は上記の誤差 7% の算定において通気量が最大であった分割数ケースであり、後者は最小であった分割数ケースである。図 2.1.1 には、図 2.1.4 で示した温度条件 #3 ($Gr=5 \times 10^7$) における解析結果の他に、温度条件 #1 ($Gr=5 \times 10^6$) と #2 ($Gr=1 \times 10^7$) の値も合わせて記載した。

解析値は、オリフィス係数(C)が 0.6 の時に近い値を示している。BROWN 論文[3]によると、オリフィス係数とは開口部の形状因子であり、短流路開口部が角形状の場合 0.6 から 0.8、トランペット形状の場合は、上限が 0.98 であると述べている。解析体系の開口部は角形状であるので、0.6 の時の理論値に近い値を示すのは妥当と思われる。

よって、AQUA-SF は約 10%未満程度の誤差で評価可能であることを確認した。

2.2 SPHINCS における対流通気評価手法

2.2.1 BROWN らによる対流通気モデル

本研究にて用いる多点近似モデル (zone model) コード「SPHINCS」には、対流通気モデルに BROWN らによる式[3]が用いられている。水平方向に連通されている 2 部屋間の対流通気モデルは、次の(2.2-1)式のように表される。

$$Q = \frac{C}{3} \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}}} \cdot S \cdot H^{\frac{1}{2}} \quad (2.2-1)$$

Q : 通気体積流量 [m³/s]

C : オリフィス係数 [-]

g : 重力加速度 [m/s²]

$\Delta \rho$: 2 部屋間の密度差 [kg/m³]

$\bar{\rho}$: 2 部屋の平均密度 [kg/m³]

S : 開口部断面積 [m²]

(2.2-1)式は、温度差による対流が相殺される中性帯があると仮定し、その中性帯を基準にして、ベルヌイ定理に基づく速度分布式を高さ方向に積分することより求められている。

よって、温度差を駆動力とした通気質量流量は、以下のように(2.2-1)式に各部屋の雰囲気ガス密度を乗じた量になる。

$$G_1 = \rho_1 * Q \quad (2.2-2)$$

$$G_2 = \rho_2 * Q$$

G₁ : 高温側から低温側への温度差を駆動力とした通気質量流量 [kg/s]

G₂ : 低温側から高温側への温度差を駆動力とした通気質量流量 [kg/s]

ρ_1 : 高温側の密度 [kg/m³]

ρ_2 : 低温側の密度 [kg/m³]

ここで、 $\rho_1 < \rho_2$ であることから、常に G₁ < G₂ となる。温度差（密度差）による通気量のみでは、高温側の部屋内の質量が増して圧力が上昇し続け、低温側は逆に圧力が下がり続けてしまう。

SPHINCS では、(2.2-1)式と(2.2-2)式で表された温度差による通気量を算出した後、通気

の影響による部屋内の温度や圧力変化を陽的に計算する。その際、圧力差を駆動力とした流量 G_p が生じると仮定し、流れ方向の流量に G_p を加算することで圧力差による通気も考慮する。

よって本研究では、温度差に圧力差も考慮した正味の質量通気量を「対流通気量」と定義する。 G_1+G_p 、及び G_2 が正味の対流通気量である。定常である場合、両者はほぼ釣り合う関係にある。以後の評価では、解析結果取得の簡便さから、 G_2 を対流通気量[kg/s]として採用する。

2.3 複数開口条件への適用

実際の建屋の部屋間開口部は、複数構造となっている場合が多い。そこで本節では、AQUA-SF と SPHINCS により複数開口条件における対流通気解析を実施する。

2.3.1 BROWN らによる等価開口部寸法換算式

SPHINCS では zone model を用いているため、各部屋の開口部はたとえ複数設置されても単一開口として扱う。そのため、複数開口寸法を等価な単一開口寸法に換算するモデルが必要になる。

BROWN らは、こうした複数開口寸法を等価な単一開口寸法に換算するモデル式も提唱しており（以後 BROWN 換算式と呼ぶ）、2 開口の場合は次の(2.3-1)式で表される。

$$\begin{aligned} W \left(\frac{H}{2} \right)^{1.5} \\ = W_1 (H_1 + x)^{\frac{3}{2}} - W_1 x^{\frac{3}{2}} \\ = W_2 (H_2 + S_{12} - x)^{\frac{3}{2}} - W_2 (S_{12} - x)^{\frac{3}{2}} \end{aligned} \quad (2.3-1)$$

H は換算開口高さ、 W は換算開口幅を示す。その他の各変数の定義は、図 2.3-1 を参考のこと。

(2.3-1)式と、換算前後の開口部合計断面積は一定であるという条件と連立することにより、換算開口寸法 W と H を得ることができる。

(2.3-1)式は最も基本的な 2 開口の場合を例示したものである。中性帯を境に上下の開口部の幅 \times (高さ)^{1.5} が換算開口幅(W) \times (換算開口高さ/ 2)^{1.5} に等しいという考え方により、開口部数が 3, 4, ..., n 個の場合であっても換算寸法を得ることができる。

2.3.2 等寸法 2 正方形開口条件

本項では、寸法の等しい 2 つの正方形開口条件における対流通気の SPHINCS と AQUA-SF の比較を実施した。

開口部条件として、図 2.1.2において 0.305[m]の正方形開口を 1つ追加し、それら 2 開口を上下に並べて配置した体系を用いた。また、複数開口部の開口部間距離(h_0)について、0[m]の場合と 0.2[m]の場合の 2 通り実施することにより、開口部間距離の違いによる影響も調べた。SPHINCS における開口部寸法は、(2.3-1)式による換算寸法を用いた。 $h_0=0.0[m]$ の場合は実寸と同じ幅(Y)×高さ(Z)= $0.610 \times 0.305[m]$ であり、 $h_0=0.2[m]$ の場合は幅(Y)×高さ(Z)= $1.099 \times 0.169[m]$ となる。

開口部以外の解析体系は 2.1 節と同様である。温度条件は、表 2.1.2 における温度条件#3 を用いた。

SPHINCS でのオリフィス係数(C)は、実験経験値の上限値 1.0 と下限値 0.6 の相乗平均(C_0) ($\sqrt{0.6 \times 1.0} \approx 0.775$) を代表値として用いる。図 2.2-1 の縦軸は対数スケールであることから、 C_0 が対数スケールでの C=0.6 と 1.0 の中間値となる。

また、複数開口条件での AQUA-SF のメッシュ分割依存性を評価するため、個々の開口部の分割数を変えた以下の 3 ケースの評価解析も合わせて実施した。

- (1) 開口部厚さ(X)×幅(Y)×高さ(Z)= $1 \times 2 \times 2$ 分割
- (2) 開口部厚さ(X)×幅(Y)×高さ(Z)= $1 \times 6 \times 6$ 分割
- (3) 開口部厚さ(X)×幅(Y)×高さ(Z)= $2 \times 2 \times 2$ 分割

(1)を基準とし、(2)で Y×Z 方向分割数への依存性を、(3)で X 方向分割数への依存性を評価する。

解析結果を図 2.3-2 に示す。(a)は参考値として示した 2.1.3 節の单一開口条件である。同図(b)が $h_0=0.0$ の 2 開口条件の場合、(c)が $h_0=0.2$ の 2 開口条件の場合である。図中の棒グラフにおける数値は、上記(1)の $1 \times 2 \times 2$ 分割における対流通気量で規格化した値である。

図 2.3-2(b)(c)より、複数開口部条件における AQUA-SF のメッシュ分割数の違いによる対流通気量への影響は約 2%未満であり、その依存性は小さいことが示されている。

開口部間距離の違いによる対流通気量への影響として、AQUA-SF 及び SPHINCS 共に開口部間距離が大きいほど通気量は高くなる。これは高低差があるほど位置エネルギーが大きく、エネルギー保存の関係から、生じる流れの運動エネルギーが大きくなるからではないかと考えられる。

一方の SPHINCS の対流通気量を、AQUA-SF と比較する。SPHINCS の対流通気量は、開口部間距離(h_0)が小さいとき 40%以上も高めに評価し、 h_0 が大きいときほぼ同程度になる。AQUA-SF を正であると考えると、SPHINCS は開口部間距離の変化に対する依存性の程度を低く評価する弱点があることが示されている。これは、SPHINCS で対流通気量を評価するためにオリフィス係数(C)を問題ごとに最適化する際、開口部間距離を変化させることに再最適化が必要であると考えれる。

2.3.3 非等寸法 2 正方形開口条件

対流通気の評価では、中性帯の位置が重要となる。zone model である SPHINCS は、BROWN 換算式 ((2.3-1)式) と開口部断面積を連立することにより、比較的容易に中性帯位置が求まる。しかし、field model である AQUA-SF の中性帯の位置は、単一開口や等寸法 2 開口条件を例外として容易には得られない。よって、本節では非等寸法 2 正方形開口ケースにおける解析を実施することにより、AQUA-SF における中性帯位置の再現精度を確認する。比較基準として SPHINCS の中性帯位置を用いる。

図 2.3-3 に、開口部条件を示した。0.305[m]開口の他に、1 回り小さい 0.203[m]開口を追加し、両者を上下に配置した。図 2.3-3 の各開口部は同縮尺で図示している。開口部のメッシュ分割数は、上部開口が $X \times Y \times Z = 1 \times 4 \times 4$ 、下部開口が $X \times Y \times Z = 1 \times 6 \times 6$ とした。

開口部以外の解析体系は 2.1 節と同様である。温度条件は、表 2.1.2 における温度条件#3 を用いた。

解析結果を表 2.3-2 に示す。AQUA-SF と BROWN 換算式による SPHINCS との中性帯の位置のずれ幅は 0.0062[m]であった。これは、BROWN 換算式による開口部高さ寸法 0.699[m]の 0.9%であり、AQUA-SF と SPHINCS は良い一致を示している。同縮尺で図示した図 2.3-3 からも、両者の中性帯位置のずれは小さいことが示されている。

また、同じ開口部条件を用いて SPHINCS における単一開口への換算方法の評価を目的とし、BROWN 換算式 ((2.3-1)式) の他に、水力等価直径を用いた場合の解析も実施した。

但し、ここでいう水力等価直径による換算方法とは、“ $4 \times \text{断面積}/\text{濡れ縁長さ}$ ”を換算高さとし、換算前後で断面積を保存すると定めたものを指す。本開口条件の場合、換算高さは 0.246m、幅が 0.508m となる。

換算開口の寸法を図 2.3-3、解析結果を表 2.3-2 に示す。BROWN の通気量モデル (2.2-1)(2.2-2) 式を用いて、換算方法の違いによる対流通気量の比を表したのが次の(2.3-2)式である。

$$\frac{G_{2B}}{G_{2A}} = \left| \frac{\rho_{1B} - \rho_{2B}}{\rho_{1A} - \rho_{2A}} \right|^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\rho_{1A} + \rho_{2A}}{\rho_{1B} + \rho_{2B}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{H_B}{H_A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3-2)$$

(添え字 A : 水力等価直径使用時、添え字 B : BROWN 換算式使用時)

平均温度一定条件であることから、密度の項は 1 である。(2.3-2)式の右辺第 3 項(H_B/H_A)^{1/2}は 1.681 (\because 図 2.3-3) である。これは、(2.3-2)式左辺 G_{2A}/G_{2B} の解析値である 1.682 (\because 表 2.3-2) とほぼ一致する。よって、自然対流通気量の換算式の違いによる影響は開口部高さ比の平方根に比例することが確認された。

表 2.1-1 BROWN 実験検証解析における温度条件

温度条件#	グラスホフ数[-]	温度差[°C]	高温側温度[°C]	低温側温度[°C]
#1	5×10^6	1.424	27.562	26.138
#2	1×10^7	2.846	28.273	25.427
#3	5×10^7	14.232	33.966	19.734

表 2.3-2 非等寸法 2 正方形開口条件における SPHINCS と AQUA-SF の解析結果

中性帶高さ[m]		対流通気量[kg/s]		
AQUA-SF	SPHINCS(*1)	AQUA-SF	SPHINCS(*1)	SPHINCS(*2)
下部開口部 上端より 0.0545 下方	下部開口部 上端より 0.0483 下方	1.404×10^{-2}	2.361×10^{-2}	2.003×10^{-2}

温度条件：表 2.1-1 の条件#3

(*1)： BROWN 換算式使用時

(*2)：水力等価直径使用時

開口部高さ H × 幅 W [m] , 開口部厚さ t / 開口部高さ H
実験値

△ : 0.305 × 0.305	, t/H=0.35
● : 0.152 × 0.152	, t/H=0.38
○ : 0.152 × 0.305	, t/H=0.38
▽ : 0.076 × 0.076	, t/H=0.38
▼ : 0.152 × 0.152	, t/H=0.75
□ : 0.076 × 0.076	, t/H=0.75
▲ : 0.305 × 0.305	, t/H=0.19
■ : 0.229 × 0.229	, t/H=0.25

解析値 (AQUA-SF) (2.1.3 にて詳述)

★ : 0.305 × 0.305	, t/H=0.38, X×Y×Z=2×10×10
☆ : 0.305 × 0.305	, t/H=0.38, X×Y×Z=10×4×4

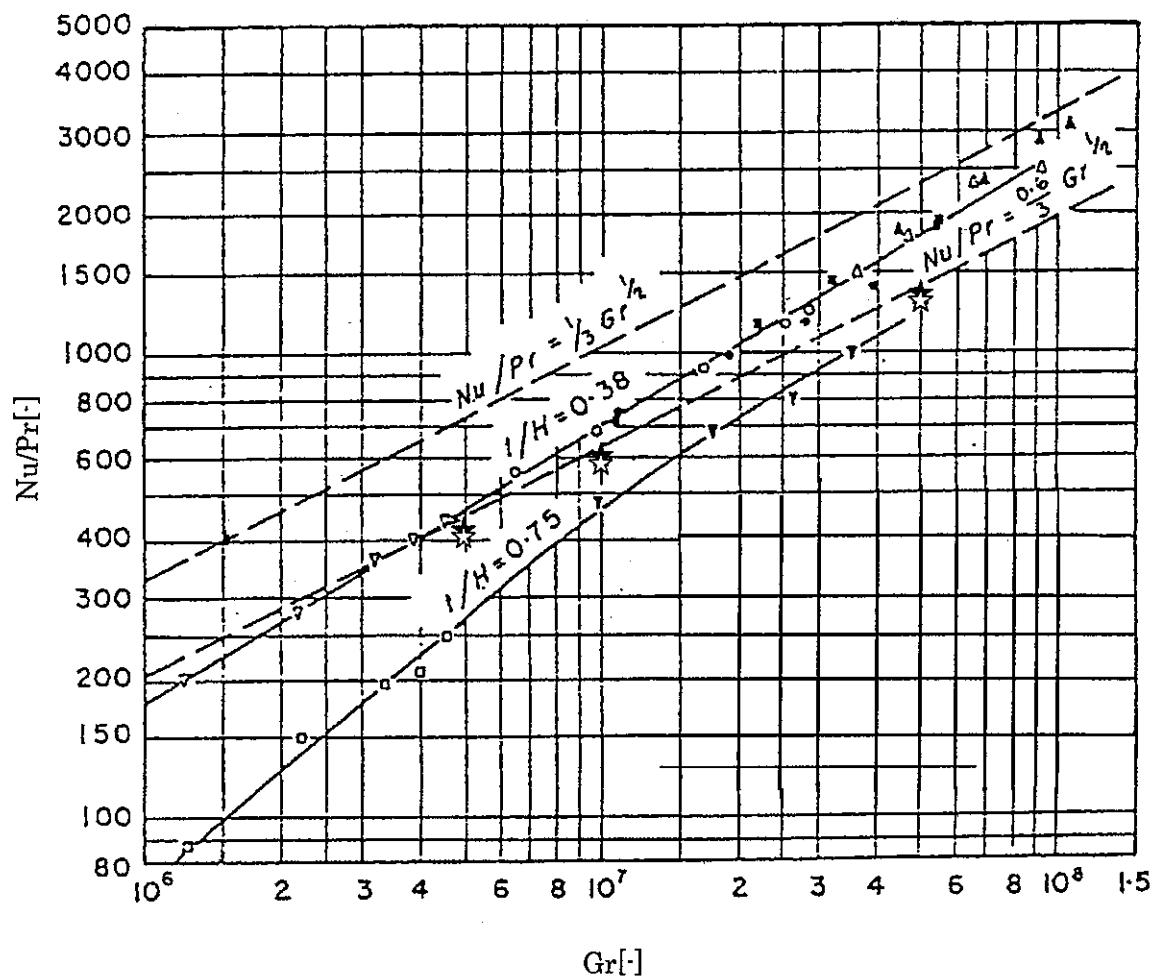


図 2.1-1 BROWN らによる対流通気実験測定結果

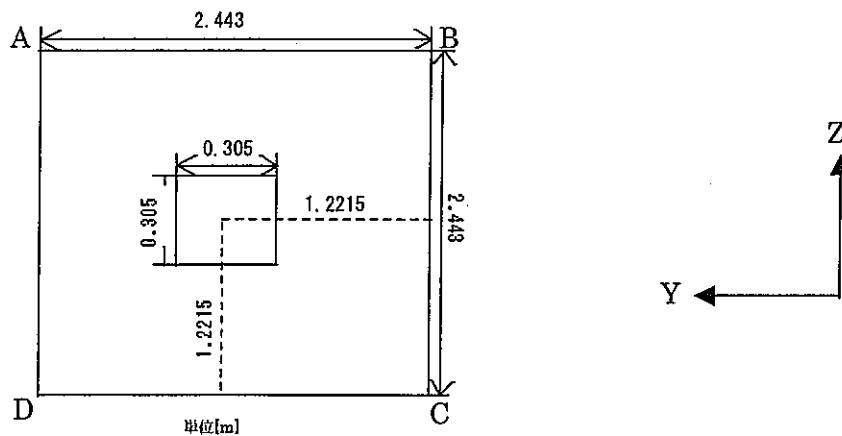
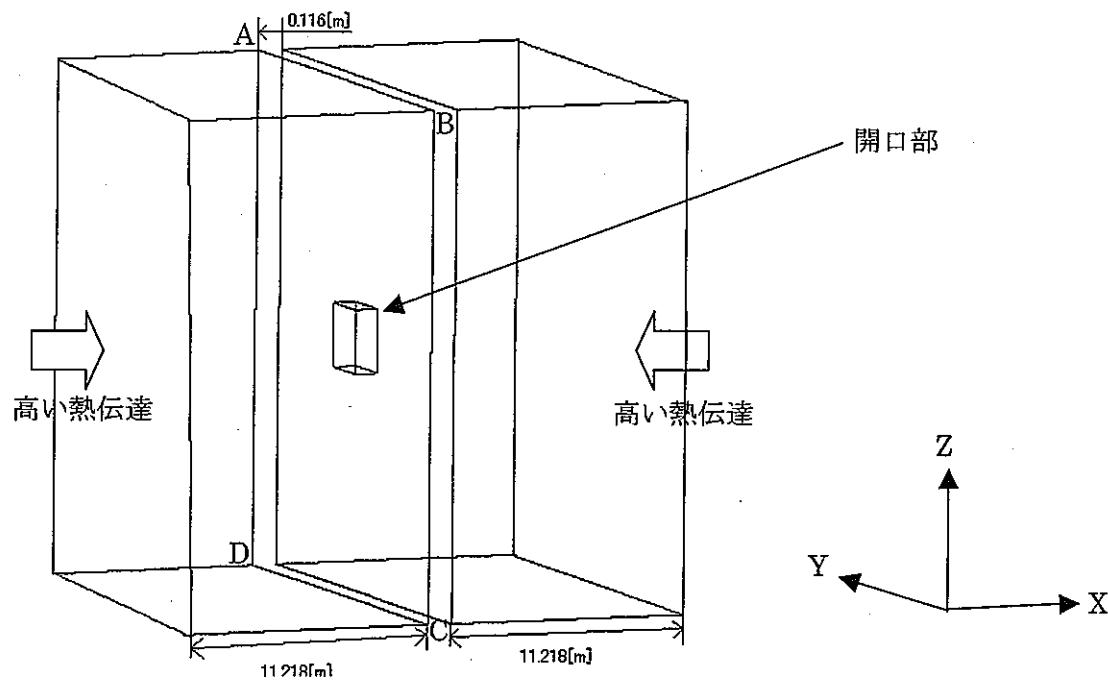
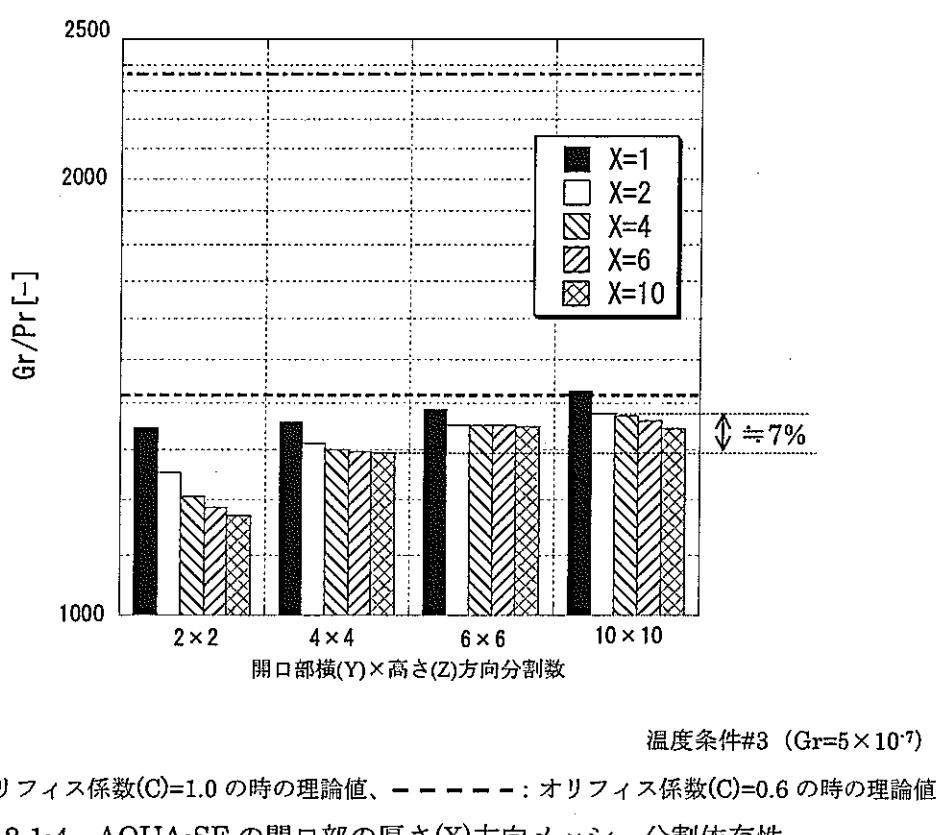
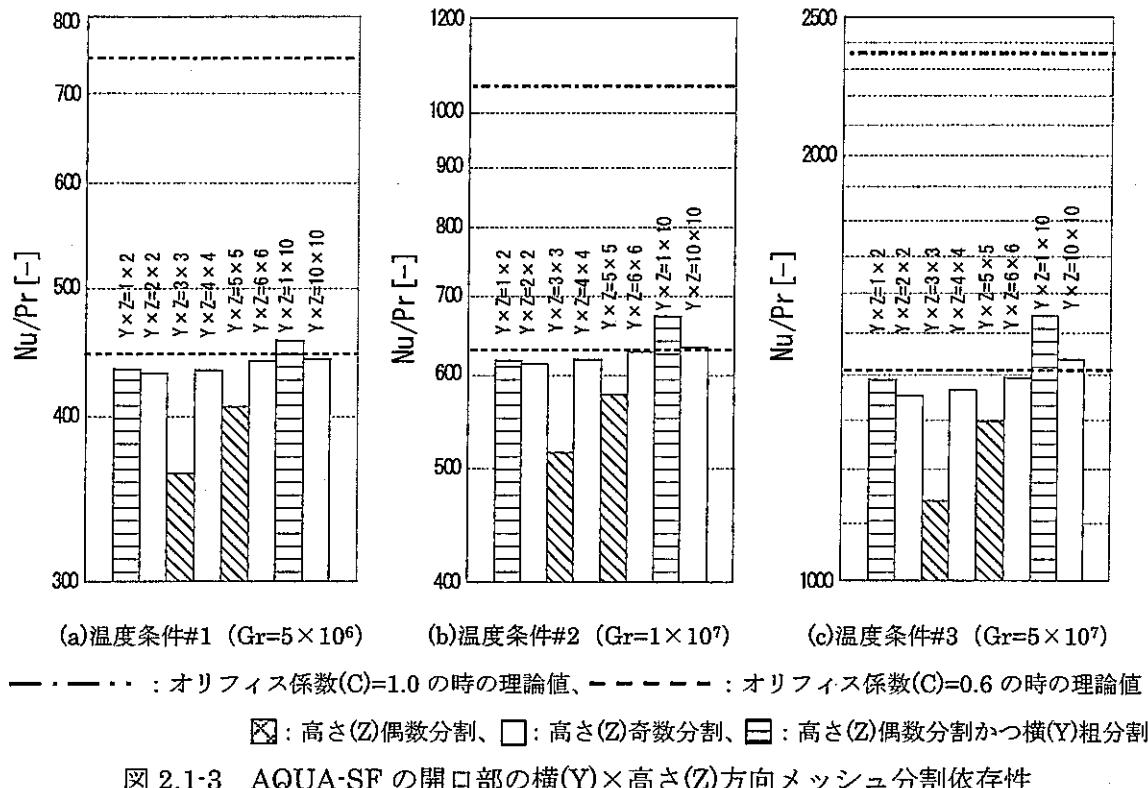


図 2.1・2 AQUA-SF による BROWN 実験検証解析の解析体系



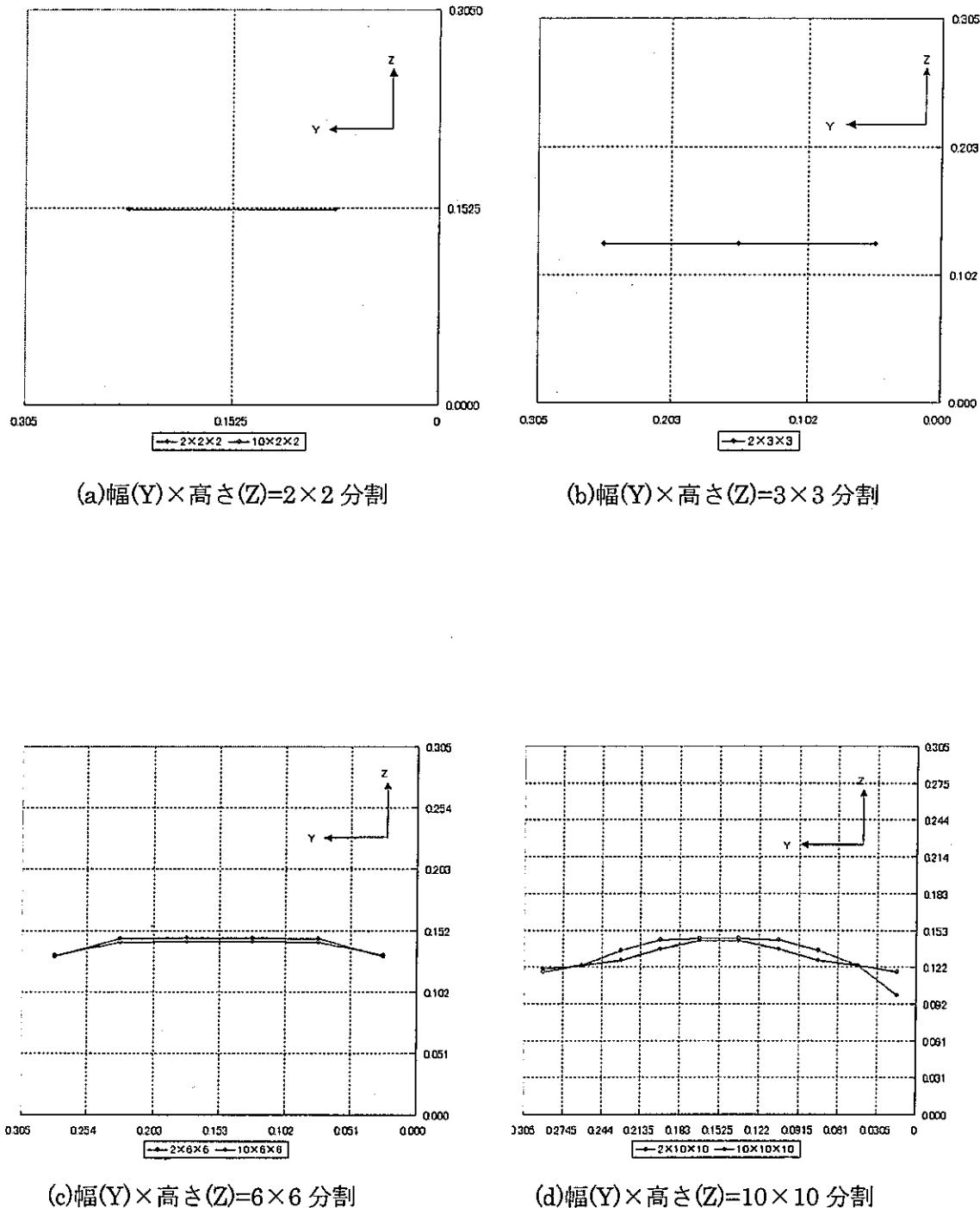


図 2.1-5 AQUA-SF における中性帯のメッシュ分割依存性

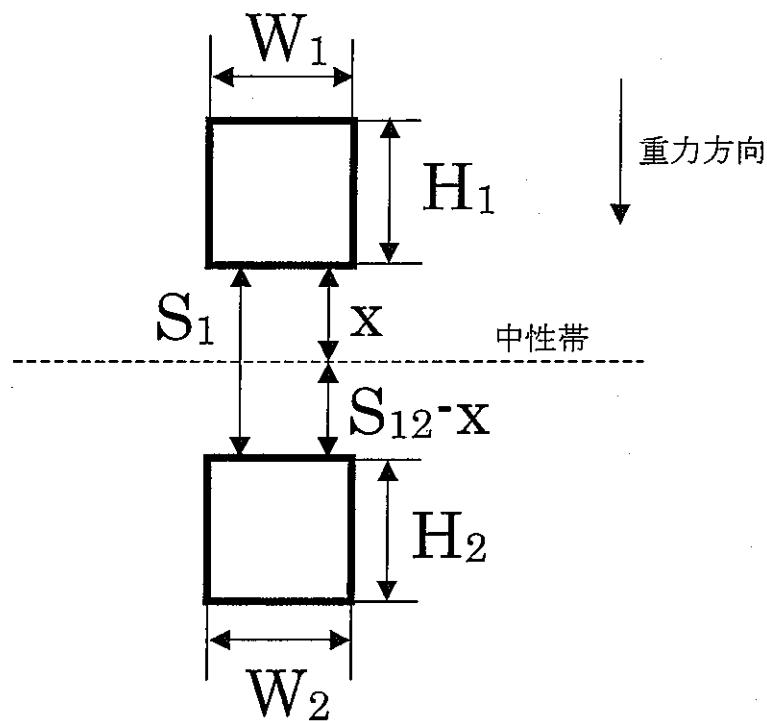
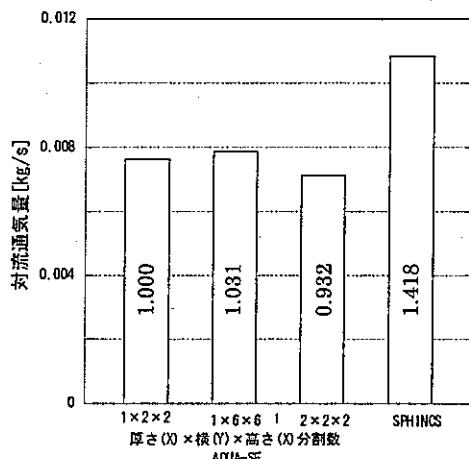
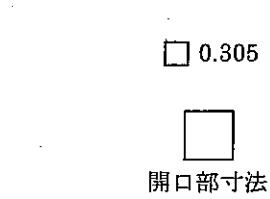
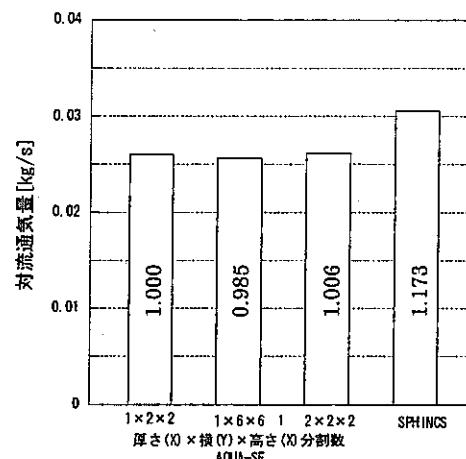
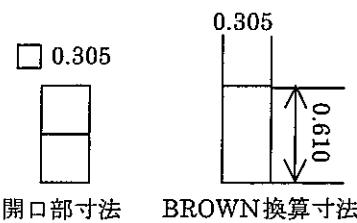


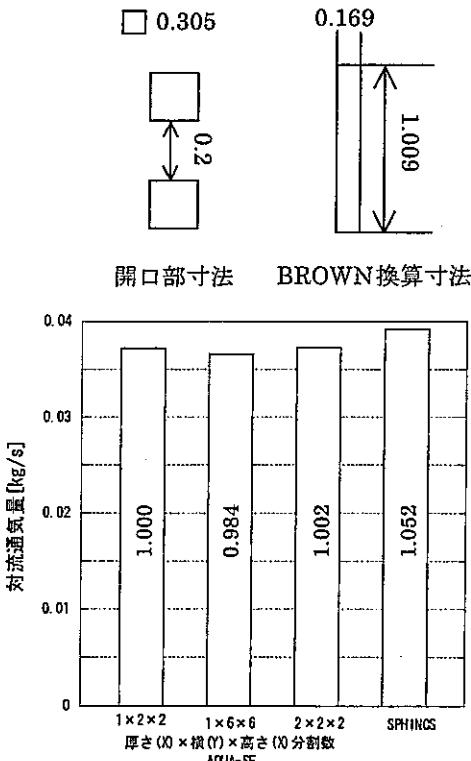
図 2.3-1 BROWN 換算式の変数の定義



(a) (参考値) 単一開口条件



(b) 2 開口条件(開口部間距離 0)



(c) 2 開口条件(開口部間距離 0.2)

図 2.3-2 等寸法 2 正方形開口条件解析における対流通気量

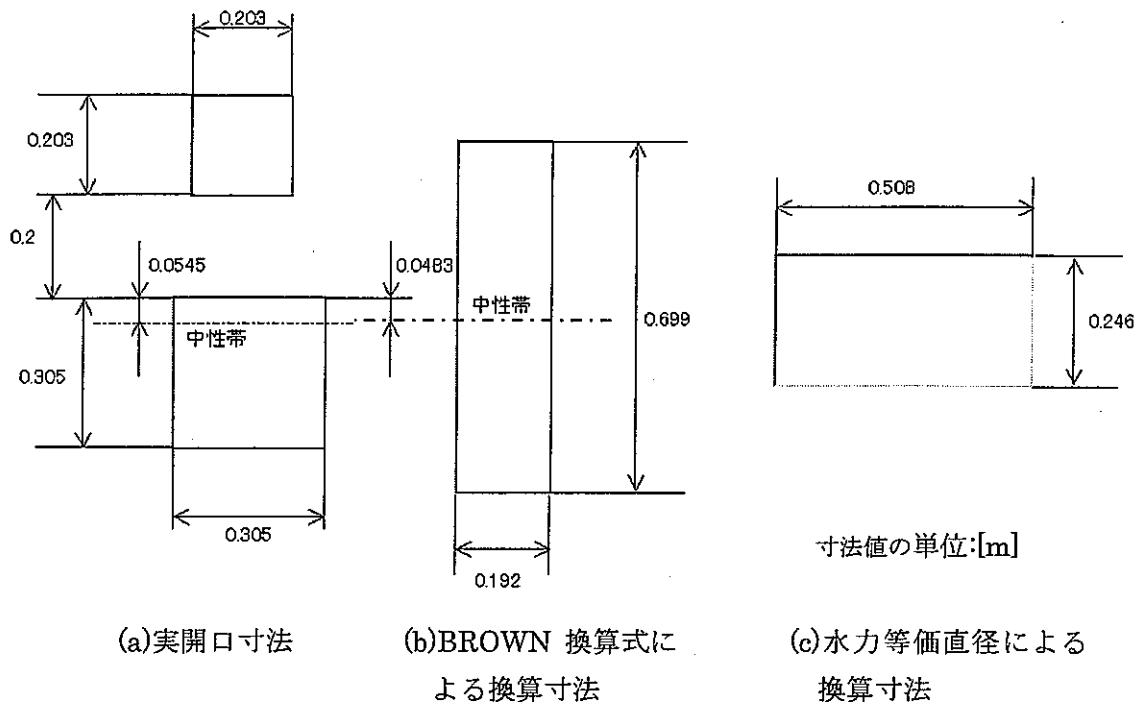


図 2.3-3 非等寸法 2 正方形開口条件解析における開口部寸法

3. 温度変化あり・不燃条件における対流通気の複数開口配置依存性

3.1 概要

本章では、温度分布と温度の時間変化がある条件下にて、複数開口部の配置の違いによる対流通気への影響を評価する。

評価用体系として、2つの開口部を通じて、比較的低温の外気とつながっている部屋を用いる。最終的には定常状態が得られる方が、比較・検討に適当であることから、床の一部に発熱体を設置した。本体系において、外気と通じている2開口部配置（2開口部間距離、中心位置）を変化させ、対流通気への影響を評価する。

3.2 解析体系と解析条件

(1) 解析体系

対流通気が行われる開口部は、評価を実施する部屋（床に高温部を持つ部屋。以後、高温部屋と記述）の側壁に、2つの等寸法の正方形開口を上下方向に並んで設けた。また、温度一様・一定の発熱体を床に設け、温度の時間変化と空間分布が生じる体系における熱源とする。

高温部屋とは別に、外気大気を模擬する大きな容積をもつ部屋（以後、大気部屋と記述）を設定する。高温部屋と大気部屋は2つの流路を通して接続されており、2部屋間で対流通気が行われる。

SPHINCSにおける解析体系の概念図を図3.2-1に示す。zone modelでは、部屋を1つのセルとして取り扱う。高温部屋と大気部屋に相当する2つのセルを設定し、それらを流路で接続する。しかし、セル同士の接続で設定できるのは、開口部寸法（厚さ、幅、高さ）と接続方向（水平接続か上下接続か）のみであり、複数流路の設定はできない。複数流路の場合は、開口部寸法を单一開口に換算して取り扱う。その換算方法には、BROWN換算式を用いる場合と、水力等価直径を用いる場合の2通りがあり、前者を用いた評価を3.3節、後者を用いた評価を3.4節にて実施する。また、SPHINCSでは開口部の配置高さ(elevation)が対流通気に与える影響を考慮できない。一方、field modelであるAQUA-SFでは開口部の配置高さを考慮できるため、3.5節にてその影響を検討する。

AQUA-SFの解析体系図を図3.2-2、体系条件を表3.2-1に示す。

床に設定した発熱体の条件を表3.2-2に示す。大きさは床面積の約1/10とした。大気部屋には、高温部屋との接続開口とは別に開口面積の大きい開口部を設定する。これは、体系を開放系にすることによって圧力の変動を抑制するためである。なお、SPHINCSでは図3.2-1に示すように、大気開口部を設ける代わりに、大気部屋の体積を十分に大きくする($1 \times 10^9 m^3$)ことで圧力変動を抑制する。

開口部分割数は、開口部厚さ(X)×開口部幅(Y)×開口部高さ(Z)=1×2×2を用いる。

(2)境界条件

温度境界条件を、表3.2-3及び3.2-4に示す。大気部屋の一部の壁は、温度変化を抑制するため $Nu=1 \times 10^5$ という大きな熱伝達を設定した。AQUA-SFにおける大きな熱伝達は、部屋間流路開口対面側壁の他、多くの壁に設けたのに対して、SPHINCSにおいては瞬時拡散を仮定しているため1つの側壁にのみ設けた。

流速の境界条件は、AQUA-SFにおいて設けた大気開口部のみを質量保存を満足する流出入境界とし、壁面はすべてフリースリップとした。

(3)発熱体と空気の間の熱伝達相関式

発熱体と空気の間の熱移行は、伝熱工学資料[4]より周辺が垂直壁で囲まれた水平面の、上向き加熱における自然対流熱伝達相関式を用いる。

$$Nu = CRa^{\frac{1}{4}} \quad (3.2-1)$$

$$C = \left(\frac{Pr}{2.4 + 4.9\sqrt{Pr} + 5Pr} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\nu_{\infty}}{\nu_w} \right)^{0.21}$$

適用範囲： $10 \leq Ra \leq 4 \times 10^9 \sim 3 \times 10^{10}$

Nu :ヌッセルト数[-]

Ra :レイリー数[-]

Pr :プラントル数[-]

ν_{∞} :周囲流体の粘性係数[m²/s]

ν_w :発熱体近傍流体の粘性係数[m²/s]

代表長さ：加熱面が長方形の場合は短辺の長さ（本体系の場合、6[cm]）

係数Cは発熱体温度が50[°C]、流体温度が25[°C]と仮定して、 $C=0.54$ [-] ($Pr=7.17 \times 10^{-1}$ [-]、 $\nu_{\infty}=1.885 \times 10^{-5}$ [m²/s]、 $\nu_w=1.855 \times 10^{-5}$ [m²/s])とした。この時のRa数は 1.6×10^4 [-]であり、(3.2-1)式の適用範囲内である。

field modelの場合、境界での熱交換はメッシュサイズにより伝熱相関式を用いるか、熱伝導仮定で十分かを評価する必要がある。そこで、本解析体系における相関式使用の妥当性を検討する。相関式を用いた場合の熱伝達係数 h_1 は、

$$h_1 = Nu * \frac{\lambda}{L} \quad (3.2-2)$$

λ :熱伝導係数[W/(m · K)]

L:代表長さ（発熱体の短辺の長さ）[m]

相関式を用いず、熱伝導からの交換熱量を評価する際の熱伝達係数 h_2 は、

$$h_2 = \frac{\lambda}{\frac{\Delta z}{2}} \quad (3.2-3)$$

Δz : 発熱体直上節点メッシュの Z 方向長さ

であるが、熱伝達相関式を用いる必要があるのは $h_1 \geq h_2$ の時である。よって、(3.2-2), (3.2-3) および各寸法 $L=0.06[m]$, $\Delta z=0.01[m]$ より

$$Nu \geq \frac{2}{\Delta z} \cdot L = 12 [-] \quad (3.2-4)$$

が相関式を用いる境界値となる。本体系の場合、温度差をが $15[^\circ\text{C}]$ 以上の時に(3.2-4)を満足する。従って、境界面と境界面に接するセルの温度差が $15[^\circ\text{C}]$ 以上であれば相関式による評価が必要となる。

AQUA-SFにおいて、 h_1 を用いた場合と h_2 を用いた場合とで比較計算を実施した。サンプルケースとして、開口部配置は 3.5 節で詳述する caseA8 (開口部の配置は表 3.5-1 を参照) を、開口部のメッシュ分割数は厚さ(X)×横(Y)×高さ(Z)=1×2×2 分割を用いた。発熱体の直上節点の温度推移を図 3.2-3 に示す。初期では温度差が 15°C 未満であり、 h_2 の方が熱伝達率は大きくなるが、2 つの推移はほとんど一致している。このことより、初期では h_1 と h_2 どちらを用いても大きな影響はないと考えられる。時間が経過するにつれ、温度差が 15°C よりも大きくなる。この場合、 h_2 使用時は h_1 使用時よりも低い温度になっている。これは、対流による効果を考慮していないため、熱交換量を過小に評価するためである。以上により、本メッシュ体系では伝熱相関式による境界での熱交換を考慮する必要がある。以後の解析では相関式(3.2-1)式 ($C=0.54$ で一定) を用いる。

3.3 不燃条件における評価(1) : SPHINCS (BROWN 換算式使用時) による対流通気の開口部間距離依存性

zone model である SPHINCSにおいて、2開口部の開口部間距離が対流通気に与える影響について評価を実施する。

2開口部間距離は、体系高さで割ることにより無次元化し、得られた結果が体系の大きさに依存しないようにする。開口部間距離を h_0 、体系高さを H_0 とおく。パラメータとなる無次元量を $h_0^*[-]$ と記述する。 h_0 、 H_0 、 h_0^* の定義を図 3.3-1 に示す。なお、SPHINCS では開口部配置高さの影響は考慮されない。

開口部が上下に 2 個配置されている条件において、 h_0^* を 0 から 0.8 まで 9 通り変化させる。本節では、2つの開口部寸法を BROWN 換算式 ((2.3-1)式) により単一開口に換算して取り扱う。開口部間距離を h_0^* を 0 から 0.8 まで 9 通り変化させた場合の換算寸法の一覧を表 3.3-1 に示す。表より、開口部間距離が広がるほど開口部の換算高さが大きくなることが示されている。

対流通気量の解析結果を図 3.3-2 に、高温部屋ガス温度の解析結果を図 3.3-3 示す。両図における水力等価直徑使用時の値は、次節 3.4 節にて詳述する。

図 3.3-2 及び 3.3-3 より、BROWN 換算式使用時は、 h_0^* が大きくなるほど対流通気量も高くなる。これは、SPHINCS の対流通気量は、(2.2-1)式より開口部の高さ寸法の平方根に比例するためである。

また図 3.3-3 より、ガス温度も通気量の増加に従い大きく変化し、開口部間距離が広がるほど低下していることが示されている。

図 3.3-4 に本解析における Gr と Nu/Pr との関係を示した。 Gr 数における代表長さは BROWN 換算式による換算開口部高さを用いた。 Nu/Pr における開口幅は BROWN 換算式による換算開口部幅を、各物性値は高温部屋温度における値と外気温度における値の平均値を用いた。図 3.3-4 より、開口部間距離を増大させると、理論値に沿って上昇することが示されている。

以上、SPHINCS における対流通気量は、開口部間距離が広がるほど高くなるという、大きな依存性があることを確認した。

3.4 不燃条件における評価(2) : SPHINCS (水力等価直径使用時) による対流通気の開口部間距離依存性

本節では、複数開口寸法の等価な单一開口寸法への換算方法として、水力等価直径を用いた場合の評価について述べる。水力等価直径は、開口部間距離を考慮しない手法を用いた場合の例として挙げた。前節の結果と比較することにより、対流通気評価において開口部間距離を考慮することの重要性について述べる。

3.3 節と同様に、開口部が上下に 2 個配置されている条件において、 h_0^* を 0 から 0.8 まで 9 通り変化させる開口部条件を用いる。しかし、水力等価直径による換算では、開口部間距離(h_0)を考慮できないため、水力等価直径による換算寸法は 1 通りとなる。ここでは、"4 × 断面積/濡れ縁長さ"を換算高さとし、換算前後で断面積を保存すると定めると、換算高さは $2.0 \times 10^{-2} \text{m}$ 、幅が $4.0 \times 10^{-2} \text{m}$ となる。

対流通気量を図 3.3-2 に、高温部屋の温度を図 3.3-3 に示す。

図 3.3-2 より、水力等価直径使用時の対流通気量は、開口部間距離が増大しても一定のままで変化しない。BROWN 換算式と比較して大幅に低く評価することが示されている。

対流通気量が低いため、図 3.3-3 より、温度は BROWN 換算式と比較して大幅に高く評価する。

このことは、図 3.3-4 に示すように、水力等価直径を使用した場合、換算高さが BROWN 換算値に比べ低いため、Gr 数を過小評価していることからも示されている。

BROWN 換算式を用いた場合の対流通気量 (G_B) と水力等価直径を用いた場合の対流通気量 (G_A) の比は、(2.3-2)式において低温側である大気部屋の温度は一定であることから $\rho_E = \rho_{2A} = \rho_{2B}$ と置くことにより、以下の(3.4-1)式のように表される。

$$\frac{G_B}{G_A} = \left| \frac{\rho_{1B} - \rho_E}{\rho_{1A} - \rho_E} \right|^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho_{1A} + \rho_E}{\rho_{1B} + \rho_E} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{H_B}{H_A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.4-1)$$

各項の $h_0^* = 0.0 \rightarrow 0.8$ における変化は、第 1 項が $0.944 \rightarrow 0.700$ 、第 2 項が $0.998 \rightarrow 0.992$ 、第 3 項が $1.414 \rightarrow 5.571$ である。 G_B/G_A 変化に対して、第 3 項が最も大きな影響を与えており、換算開口部高さの対流通気量に与える影響は非常に大きい。そのため、開口部間距離を考慮できない水力等価直径などのモデルは、考慮するモデルを使った場合と比較して通気量を低く評価してしまう。

3.5 不燃条件における評価(3) : AQUA-SFによる対流通気の開口部空間配置依存性

zone model である SPHINCS では、開口部配置(elevation)の違いによる対流通気や雰囲気温度への影響を評価することはできない。一方、field model である AQUA-SF は、開口部間距離(h_0)に加えて開口部の配置位置が対流通気へ与える影響を評価することが可能である。

そこで本節では、開口部間距離パラメータ(h_0^*)に加えて、体系に対する配置高さについて対流通気へ与える影響評価を検討した。

また、BROWN 換算式を使用した場合の SPHINCS の結果と比較し、数値解析モデルの違いが対流通気へ与える影響を評価した。

3.5.1 開口部配置

開口部配置の変化を示すパラメータは、2 開口部間距離と配置高さの 2 つである。2 開口部間距離は、3.3 節においても用いた無次元 2 開口間距離パラメータ(h_0^*)（図 3.3-1 参照）である。本節では $h_0^*=0,0.0625,0.1875,0.3125$ の 4 通りで評価する。配置高さは、2 開口の中心線高さを指標とし、体系高さで規格化した無次元量である開口部配置パラメータ(H_c^*)を導入する。 H_c^* の定義を図 3.5-1 に示す。本節では $H_c^*=0.25,0.50,0.75$ の 3 通りで評価する。以上、開口部配置条件は、 h_0^* が 4 通り、 H_c^* が 3 通りの合計 12 通りにて解析を実施する。一方の SPHINCS では、AQUA-SF における開口部間距離条件に対応させた 4 通りの解析を実施した。解析ケースをまとめたものを表 3.5-1 に、SPHINCS における BROWN 換算結果を表 3.5-2 に示す。

3.5.2 解析結果

対流通気量の開口部配置依存性解析結果を表 3.5-3 に示す。AQUA-SF の解析結果は、1 段目が対流通気量、2 段目の括弧内の数値が $h_0^*=0$ の時の通気量で規格化した値、3 段目の中括弧内の数値が $H_c^*=0.25$ の時の通気量で規格化した値、4 段目が SPHINCS の解析結果で規格化した値を示す。

表 3.5-3 より、開口部間距離が大きいほど対流通気量が高くなることが示されている。 $h_0^*=0.0\rightarrow0.3125$ の変化に対して、2.3~2.5 倍も増大した。一方、 $H_c^*=0.25\rightarrow0.75$ に対する依存性は 2%未満であり、ほとんど影響がない。つまり、AQUA-SF における対流通気の開口部配置依存性として、開口部間距離に対する影響が大きく、開口部配置高さに対する依存性はほとんどないということを確認した。

定常状態における対流通気量は、エネルギー保存の関係から以下に示された関係になる。

$$G = \frac{H_g (T_w - T_{h1}) S_1}{c_p (T_{h2} - T_o)} \quad (3.5-1)$$

ここで、 H_g ：熱伝達係数[W/K/m²]、 T_w ：発熱体温度[K]、 T_{h1} ：発熱体上部流体温度[K]、 S_1 ：発熱体面積[m²]、 C_p ：定圧比熱[J/kg/K]、 G ：対流通気量[kg/s]、 T_{h2} ：高温部屋出口温度[K]、 T_o ：大気部屋温度[K]である。

対流通気量が2.37～2.43倍の変化を示した $h_0^*=0.0 \rightarrow 0.3125$ に対して、(3.5-1)式の分母である開口部を通しての排熱量 $c_p \times (T_{h2} - T_o)$ は0.63倍、(3.5-1)式の分子である発熱体からガスへのエネルギー供給量 $H_g \times (T_w - T_{h1}) \times S_1$ は1.50～1.56倍 (H_g : 1.09～1.10倍、 $(T_w - T_{h1})$: 1.36～1.44倍) であった。一方、対流通気量の変化量がほぼ等倍であった $H_c^*=0.25 \rightarrow 0.75$ に対しては、 $c_p \times (T_{h2} - T_o)$ が0.94～0.98倍、 $H_g \times (T_w - T_{h1})$ が0.95～0.98倍であった。以上より、対流通気量の開口部配置変化に対する変化は、 T_o, T_w =一定、 c_p =一定であることを考慮すると熱源近傍温度である T_{h1} と出口温度である T_{h2} の変化によるものであることが分かる。

図3.5-2の温度分布より、 T_{h1} と T_{h2} は h_0^* が増大するほど大きく低下しているのに対して、 H_c^* の変化に対してはほとんど依存性がない。

以上の現象を、図3.5-3に示す流速分布から考察する。

下部開口部から大気部屋からのガスが流入し、上部開口部から流出している点ではすべてのケースで共通している。下部開口部から流入したガスは、低温であるため体系下面に下降し、発熱体からの浮力による上昇流と合流して、高温部屋を回りこむ大きな循環流を形成している。

図中の太矢印は、下部開口部からの低温の潜り込み流が、水平方向にどれだけ離れた位置まで到達したかを示したものである。但し、caseA7とA10については、循環流の主流が中央断面からはずれているため省略している。

開口部間距離(h_0^*)が小さい場合、下部開口部からの低温の潜り込み流は発熱体まで届いておらず、発熱体からの上昇流はほぼ直上に発達している。ところが、開口部間距離が大きくなると、水平方向到達距離が伸び、発熱体まで潜り込み流が到達している。そのため、発熱体からの上昇流は部屋の奥まで押しのけられて、部屋全体を大きく回り込む循環流を形成する。よって、潜り込み流の水平方向到達距離が、循環流の規模を示す指標になると考えられる。

一方、開口部配置高さについては、開口部が体系の下部に設置された場合と、上部に設置された場合とで潜り込み流の水平方向到達距離には変化がないことから、循環流の規模にも変化がなく、部屋全体の攪拌の様相にも大きな変化は見られない。

よって、対流通気の開口部配置依存性は次のようなメカニズムであると推測される。開口部間距離が大きくなると、循環流の規模が大きくなり、下部開口部からの低温の潜り込み流が、より水平方向遠方が伸びて発熱体上部まで到達することから T_{h1} が低下する。循環

流の規模拡大により、体系の上部で堆積していた高温ガスも攪拌されて T_{h2} も低下する。そうした T_{h1}, T_{h2} の低下変化により対流通気量が増大したのではないかと考えられる。

一方、開口部配置高さの変化に対しては、潜り込み流の水平方向到達距離はほとんど依存性がないことから T_{h1} への影響がない。また、循環流の規模にも大きな変化がないため T_{h2} への影響も小さい。そのため、対流通気量がほとんど変化しなかったのではないかと考えられる。

対流通気量の AQUA-SF の SPHINCS との違いについて述べる。開口部間距離を広げた時の通気量の増大率は、AQUA-SF の方が高い。これは、2 章の熱源のない平均温度一定条件と共通の特徴である。

SPHINCS では、セル内情報は瞬時拡散する仮定をしているため常に均一であり、分布の影響を考慮できない。分布を考慮できるか否かの数値モデルの違いが対流通気評価に与える影響はないか調査を行った。

(3.5-1)式の $h_0^*=0.0 \rightarrow 0.3125$ に対する変化を以下に示す。

・ $H_g \times (T_w - T_{h1}) \times S_1$: AQUA-SF は 1.505~1.552 倍、SPHINCS が 1.325 倍

・ $c_p \times (T_{h2} - T_0)$: AQUA-SF は 0.626~0.633 倍、SPHINCS が 0.637 倍、

前者のエネルギー供給量 $H_g \times (T_w - T_{h1}) \times S_1$ の倍率に違いが見られる。これは、AQUA-SF では発熱体上部で高温ガスの偏在化が起きるからである。本体系の場合、開口部間距離を広げた時の通気量の増大率が AQUA-SF の方が高い原因は、こうした偏在化の影響によるものではないかと考えられる。

3.6 不燃条件における評価(4)：高温発熱体条件解析

3.5 節までの解析では、熱源である発熱体温度として常温より数十度高い程度の 50°C 条件としていた。本節では、この発熱体温度を高くし、火災現象のように非常に高い熱源がある条件における評価を実施した。

解析体系と解析条件は 3.5 節と同様であり、発熱体の温度条件を 800°C に設定し、非常に高い熱源がある条件下での開口部配置の対流通気への依存性を評価する。

開口部条件は 3.5 節の開口部間距離パラメータ(h_0^*)と開口部配置パラメータ(H_c^*)を用いる。但し、 h_0^* に対しては、最も小さい $h_0^*=0.0$ のケースと最も大きい $h_0^*=0.3125$ の 2 ケースのみとした。

定常時における対流通気量の解析結果を表 3.6-1 に、温度分布を図 3.6-1、流速分布を図 3.6-2 に示す。

表 3.6-1 より、AQUA-SF の h_0^* 、及び H_c^* の変化が対流通気量に与える影響は、 h_0^* を広げるほど大幅に増大し、 H_c^* への影響はほとんどない。これらは、3.5 節の 50°C 条件と同様の傾向である。図 3.6-1 の温度分布と図 3.6-2 の流速分布の開口部配置依存性も 50°C 条件と同様であった。つまり、AQUA-SF の開口部間配置と対流通気量の基本的関係は、発熱体温度の変化に対して大きな違いはない。

3.5 節の 50°C 条件において、開口部間距離が小さい場合、発熱体直上部に局所的な高温ガス分布が生じ、発熱体からのエネルギー供給量に影響を与えていた。図 3.6-1 より、発熱体温度条件を高くした本条件では、こうした高温のガスの偏在化傾向がより顕著になって現れている。そのため、エネルギー供給量への影響もより大きくなっていることが予想される。

図 3.6-3 に、エネルギー供給量の発熱体温度条件依存性を示す。3.6 節における 50°C 条件の解析結果と、上記の 800°C 条件に加えて、100,200,300,500°C 条件の結果を付け加えた。

AQUA-SF における解析値はいずれも $H_c^*=0.25$ における値である。通気量に H_c^* の影響はないことは、3.6 節及び本節において示されている。また、サンプルに $H_c^*=0.25$ を選んだのは、対流通気量などの諸量に微振動が発生するケースが少ないからである。図 3.6-3 が示すように、開口間距離が小さい場合 ($h_0^*=0.0$ 、図中○,●)、SPHINCS は AQUA-SF よりも高い値となっている。一方の開口間距離が大きい場合 ($h_0^*=0.3125$ 、図中△,▲) では、AQUA-SF との違いは小さい。よって、分布を考慮できないことに起因する、熱源からのエネルギー供給量を高めに評価する SPHINCS 特徴は、熱源温度が高くなるほど顕著となることが示された。

最後に、対流通気量と高温部屋平均温度との関係を図 3.6-4 に示す。AQUA-SF と SPHINCS は、熱源温度条件を上げるとともに対流通気量、平均温度ともに乖離していくことが示されている。AQUA-SF と SPHINCS とでエネルギー供給量に大きな違いがなかった $h_0^*=0.3125$ の場合においても、対流通気量に大きな差異が生じている。これは、対流通気量は、エネルギー供給量の他に、出口温度にも強く依存するからである (\because (3.5-1)式分母)。

表 3.2-1 不燃条件解析における体系条件

	AQUA-SF	SPHINCS
高温部屋の寸法	横(X)×幅(Y)×高さ(Z) : 0.204×0.194×0.32[m]	容積 $1.266432 \times 10^{-2} [\text{m}^3]$ 高さ 0.32[m]
大気部屋の寸法	横(X)×幅(Y)×高さ(Z) : 0.83×0.194×1.07[m]	容積 $1 \times 10^3 [\text{m}^3]$ 高さ $1 \times 10^3 [\text{m}]$
開口部寸法	厚さ(X)×幅(Y)×高さ(Z) : 0.01×0.02×0.02[m]	断面積 $8 \times 10^{-4} [\text{m}^2]$ の単一等価 開口を仮定する。単一等価開口 寸法は、厚さが 0.01[m]、幅× 高さは 2 開口の相対距離から換 算する
開口部数	2	
初期温度	高温部屋 : 50[°C]、大気部屋 : 15[°C]	
初期圧力	高温部屋、大気部屋共に 0.1[MPa]	
空気の成分	酸素濃度 0.21[vol%]、窒素濃度 0.79[vol%]の乾燥空気	

X,Y,Z の各方向は図 3.2-2 を参照

表 3.2-2 不燃条件解析における発熱体条件

	AQUA-SF	SPHINCS
寸法	横(X)×幅(Y) : $0.066 \times 0.06 [\text{m}]$ (表面積 $3.96 \times 10^{-3} [\text{m}^2]$)	
配置位置	床中心	—
温度	50[°C] (固定)	
空気との輻射	考慮しない	
壁との輻射	考慮しない	

X,Y の各方向は図 3.2-2 を参照

表 3.2-3 不燃条件解析における温度境界条件(1) - 高温部屋と開口部 -

	高温部屋		開口部
	発熱体	その他	
AQUA-SF	3.4 節にて検証		断熱
SPHINCS	熱伝達相関式を 使用((3.4-1)式)		断熱

表 3.2-4 不燃条件解析における温度境界条件(2) - 大気部屋 -

	大気部屋			
	部屋間流路開口の在る側壁	部屋間流路開口対面側壁	大気開口部	その他
AQUA-SF	断熱	$Nu=1 \times 10^5$	温度一定 (15°C)	$Nu=1 \times 10^5$
SPHINCS			—	断熱

表 3.3-1 SPHINCS による不燃条件解析における開口部の換算寸法(1)

$h_0^*[-]$	$h_0[m]$	高さ(H)[m]	幅(W)[m]
0	0	4.0000×10^{-2}	2.0000×10^{-2}
0.1	0.032	1.1552×10^{-1}	6.9252×10^{-3}
0.2	0.064	1.8810×10^{-1}	4.2531×10^{-3}
0.3	0.096	2.6035×10^{-1}	3.0728×10^{-3}
0.4	0.128	3.3249×10^{-1}	2.4061×10^{-3}
0.5	0.160	4.0458×10^{-1}	1.9773×10^{-3}
0.6	0.192	4.7665×10^{-1}	1.6784×10^{-3}
0.7	0.224	5.4869×10^{-1}	1.4580×10^{-3}
0.8	0.256	6.2073×10^{-1}	1.2888×10^{-3}

注) $H_0=0.32[m]$

表 3.5-1 不燃条件における開口部配置依存性解析の case 番号と開口条件

$h_0^*(h_0)$	0(0.00)	0.0625(0.02)	0.1875(0.06)	0.3125(0.10)
$H_c^*(H_0)$	0.25(0.08)	A1	A2	A3
AQUA-SF	0.50(0.16)	A5	A6	A7
	0.75(0.24)	A9	A10	A11
	SPHINCS	S1	S2	S3
				S4

注) h_0^* と H_c^* の単位は [-]、 h_0 と H_c の単位は [m]。また、 $H_0=0.32[m]$

表 3.5-2 SPHINCS による不燃条件解析における開口部の換算寸法(2)

$h_0^*[-]$	0	0.0625	0.1875	0.3125
高さ(H)[m]	0.00	0.02	0.06	0.10
幅(W)[m]	4.0000×10^{-2}	8.8038×10^{-2}	1.7905×10^{-1}	2.6937×10^{-1}
	2.0000×10^{-2}	9.0869×10^{-3}	4.7680×10^{-3}	2.9699×10^{-3}

注) $H_0=0.32[m]$

表 3.5-3 不燃条件における対流通気量の開口部配置依存性 (発熱体温度 50°C 条件)

			開口部間距離 $h_0^*[-]$			
			0	0.0625	0.1875	0.3125
AQUA-SF	開口部配置 H _c *[·]	0.25	2.694 (1.000) {1.000} <0.778>	3.916 (1.454) {1.000} <0.831>	5.342 (1.983) {1.000} <0.865>	6.370 (2.365) {1.000} <0.885>
		0.50	2.643 (1.000) {0.981} <0.763>	3.899 (1.475) {0.996} <0.772>	5.352 (2.025) {1.002} <0.866>	6.407 (2.424) {1.006} <0.890>
		0.75	2.671 (1.000) {0.991} <0.772>	3.852 (1.442) {0.984} <0.817>	5.337 (1.999) {0.999} <0.864>	6.426 (2.406) {1.009} <0.893>
SPHINCS			3.146 (1.000)	4.712 (1.058)	6.177 (1.784)	7.911 (2.079)

注) 数値表表記内容

括弧なし : 対流通気量 [$\times 10^{-6} \text{kg/s}$]() : $h_0^*=0$ において規格化した値 [-]{ } : $H_c^*=0.25$ において規格化した値 [-]

< > : SPHINCS において規格化した値 [-]

表 3.6-1 不燃条件における対流通気量の開口部配置依存性（発熱体温度 800℃条件）

			開口部間距離 h_0^* [-]	
			0	0.3125
AQUA-SF	開口部配置高さ H_c^* [-]	0.25	6.755 (1.000) {1.000} <0.584>	18.805 (2.784) {1.000} <0.767>
		0.50	6.808 (1.000) {1.008} <0.589>	19.056 (2.799) {1.013} <0.777>
		0.75	6.892 (1.000) {1.020} <0.596>	19.030 (2.761) {1.012} <0.776>
		—	11.565 (1.000)	24.524 (2.120)
SPHINCS				

注) 数値表表記内容

括弧なし : 定常状態における対流通気量 [$\times 10^{-5} \text{kg/s}$]() : $h_0^*=0$ において規格化した値 [-]{ } : $H_c^*=0.25$ において規格化した値 [-]

< > : SPHINCS において規格化した値 [-]

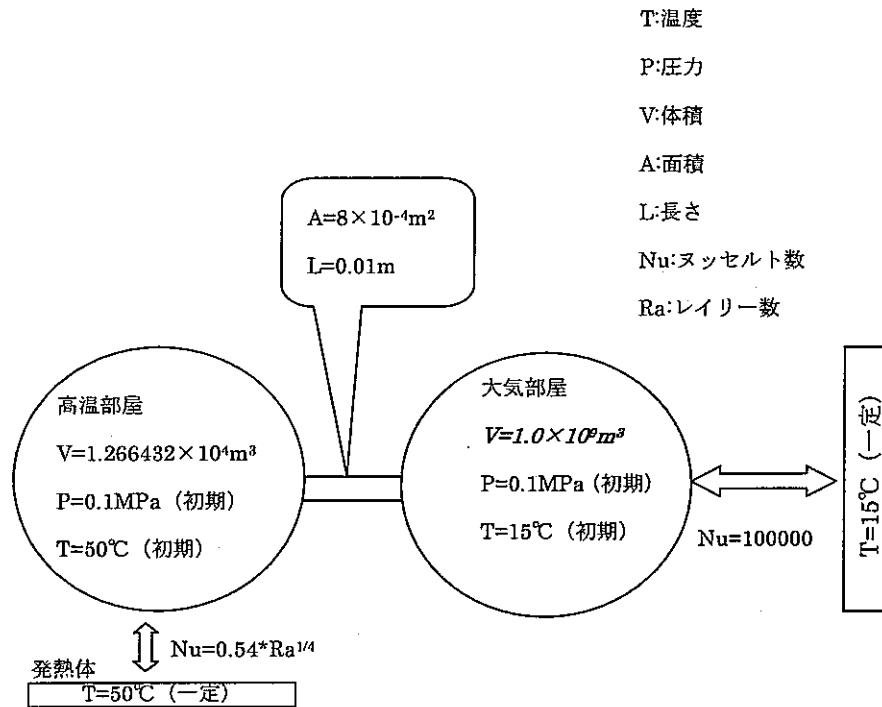


図 3.2-1 SPHINCS による不燃条件解析の解析体系概要

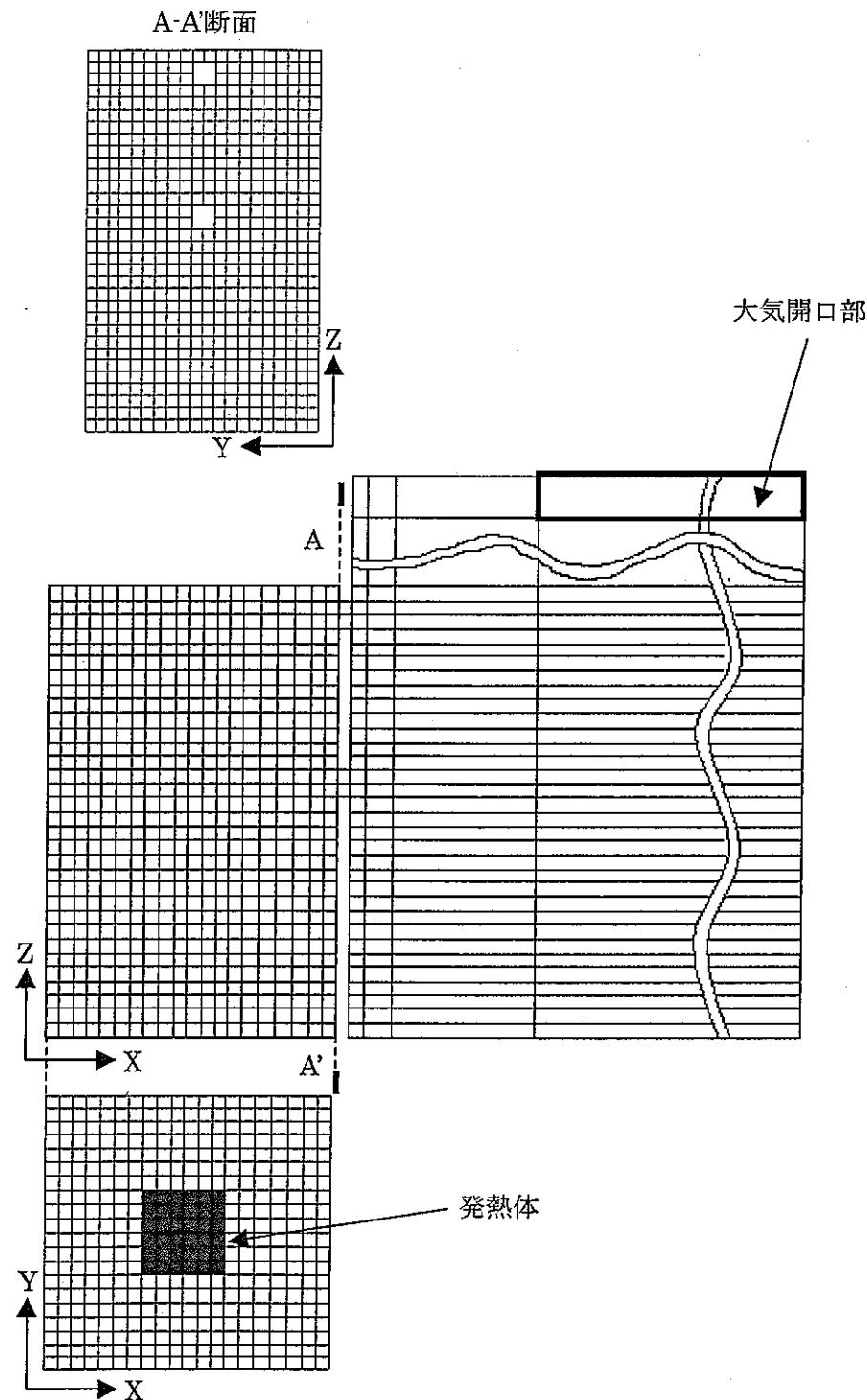


図 3.2-2 AQUA-SF による不燃条件解析の解析体系

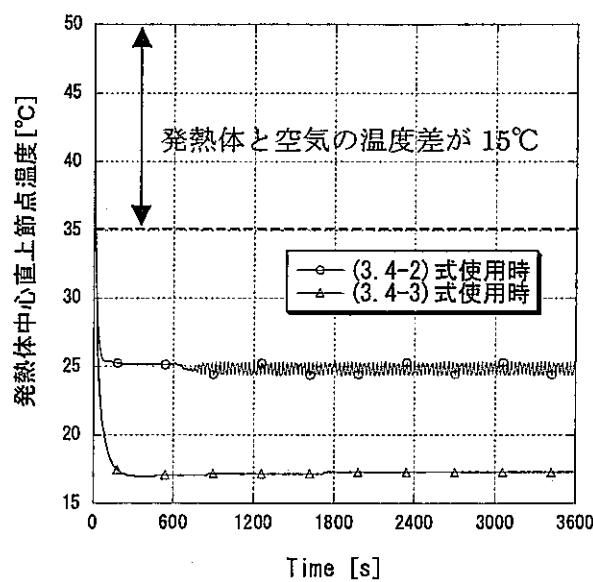


図 3.2-3 AQUA-SF における熱伝達係数の評価
(発熱体直上節点における温度推移)

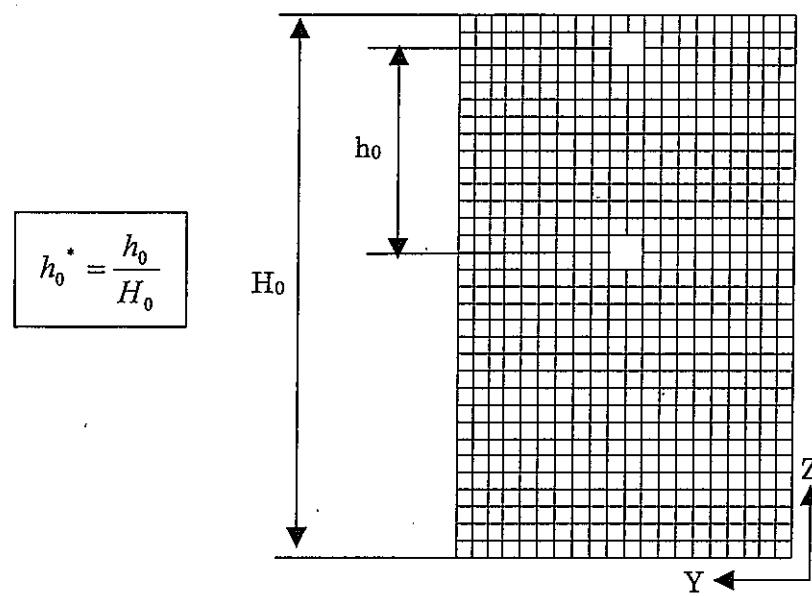
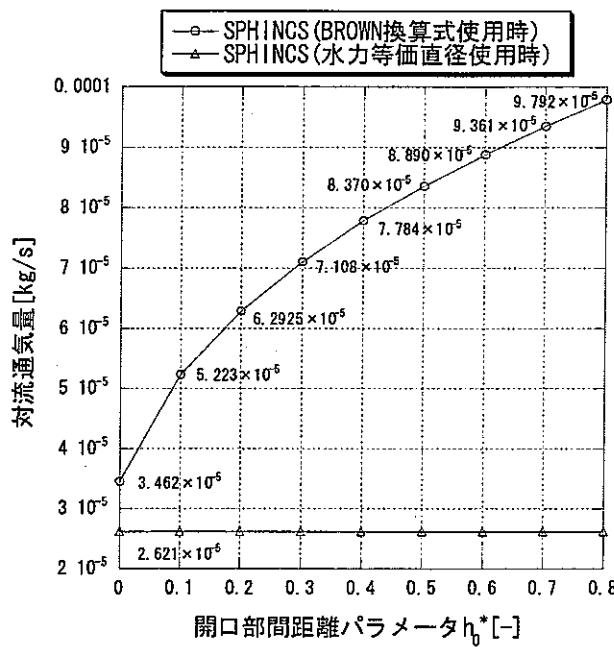
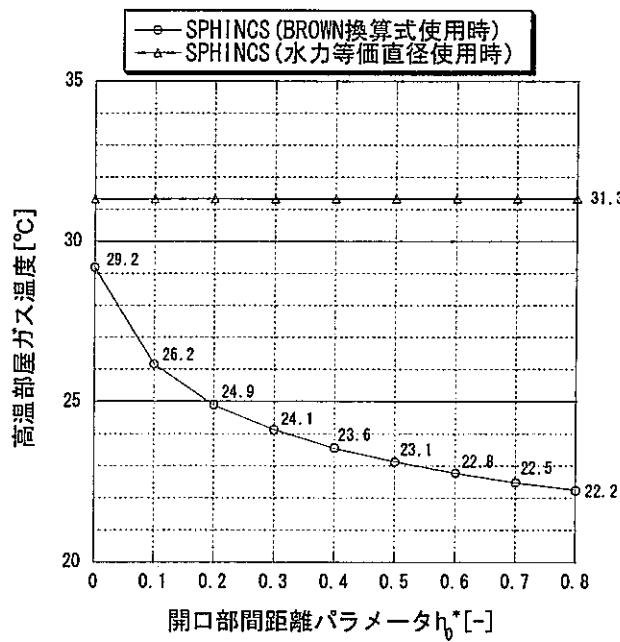


図 3.3-1 無次元開口部間距離パラメータ h_0^* の定義

図 3.3-2 SPHINCS による不燃条件解析の対流通気量の h_0^* 依存性図 3.3-3 SPHINCS による不燃条件解析の定常温度の h_0^* 依存性

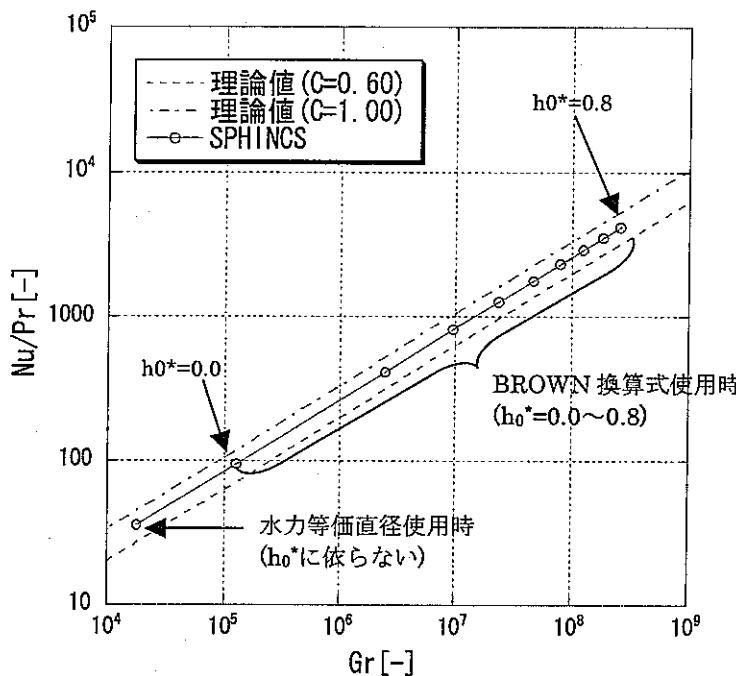


図 3.3-4 SPHINCS による不燃条件解析の Gr と Nu/Pr の関係

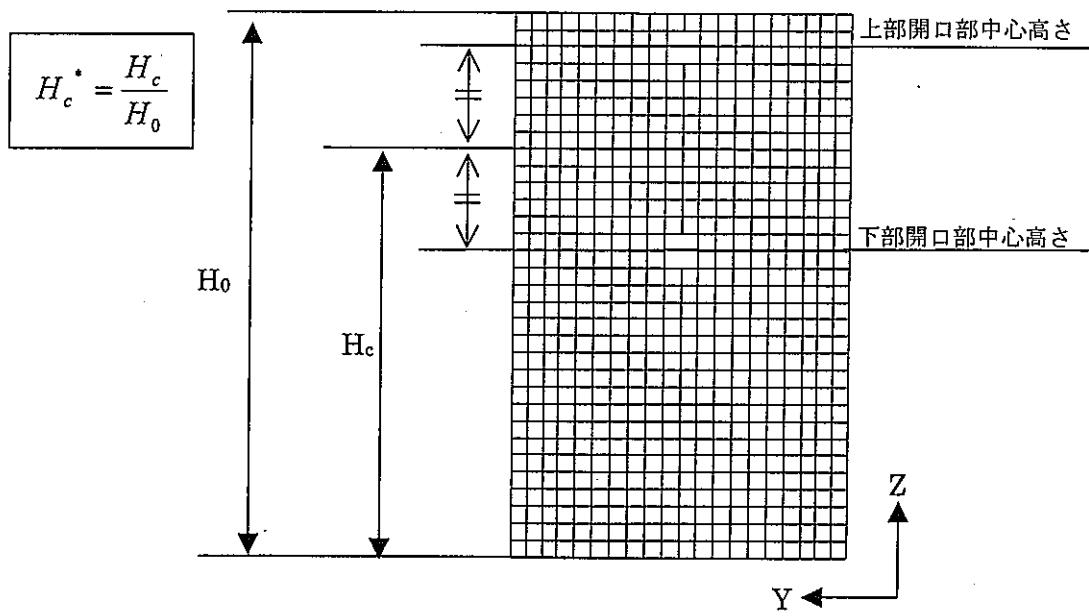
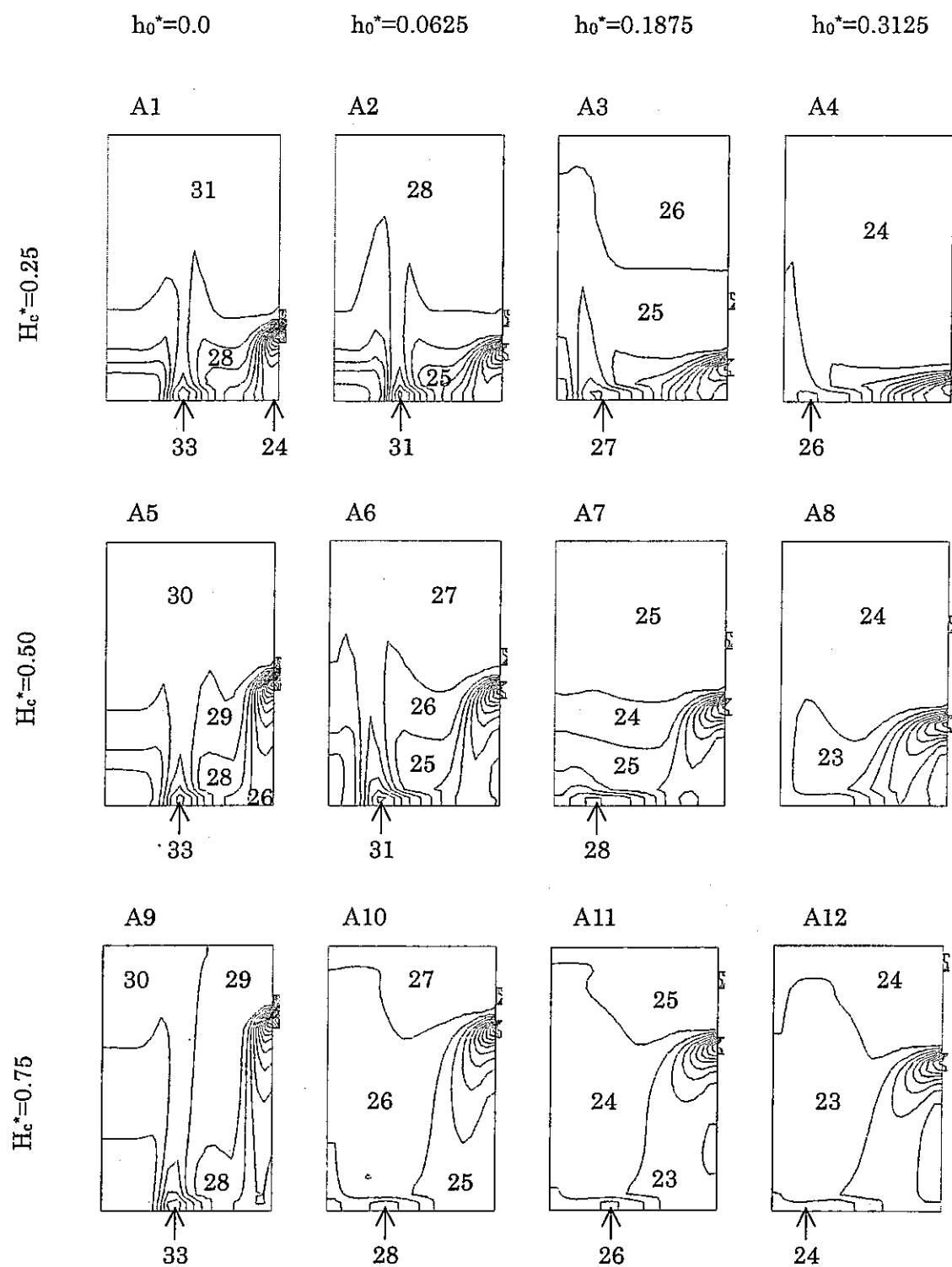


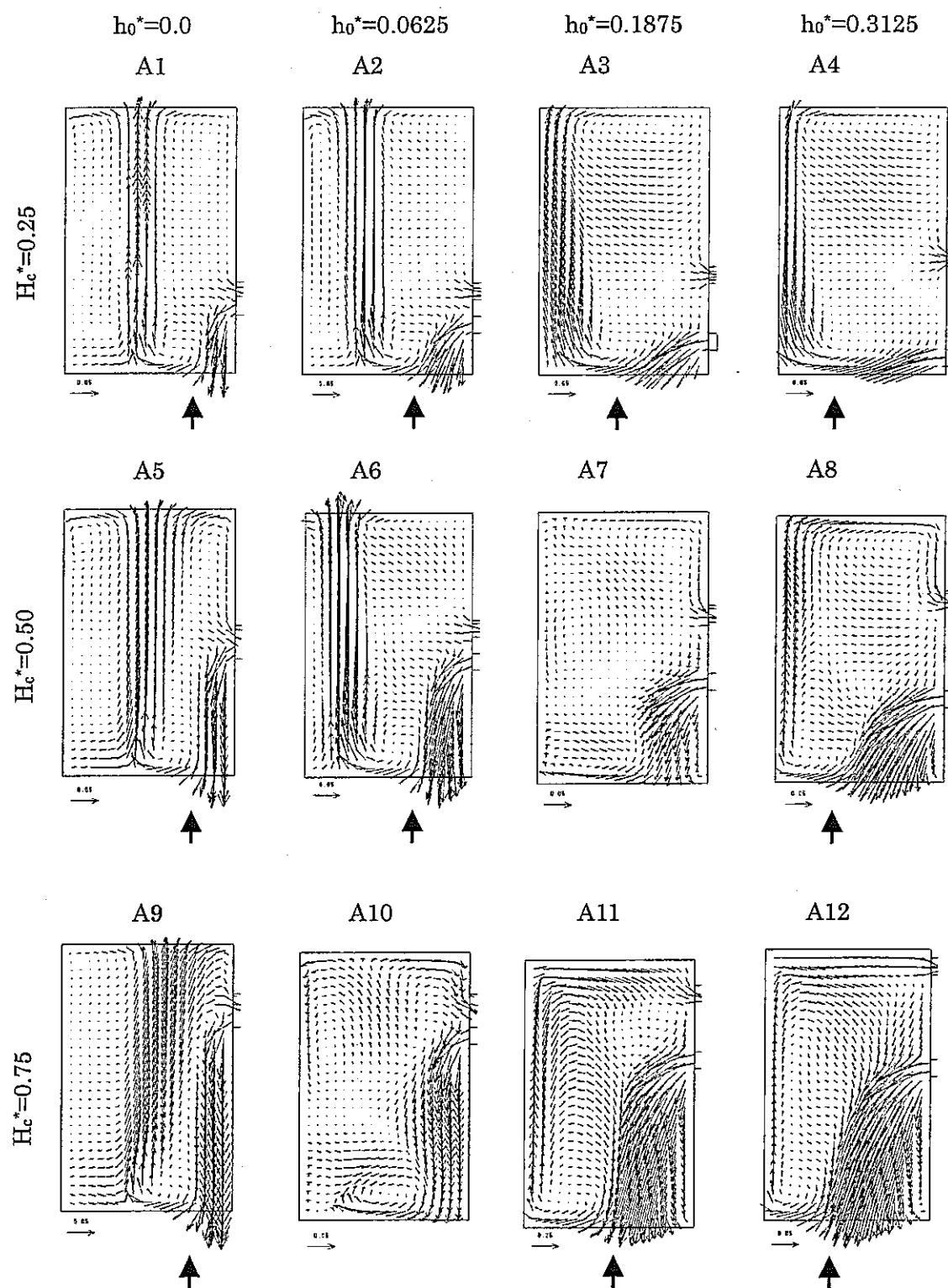
図 3.5-1 無次元開口部配置高さパラメータ H_c^* の定義



定常時における高温部屋の奥行き方向中央断面温度分布

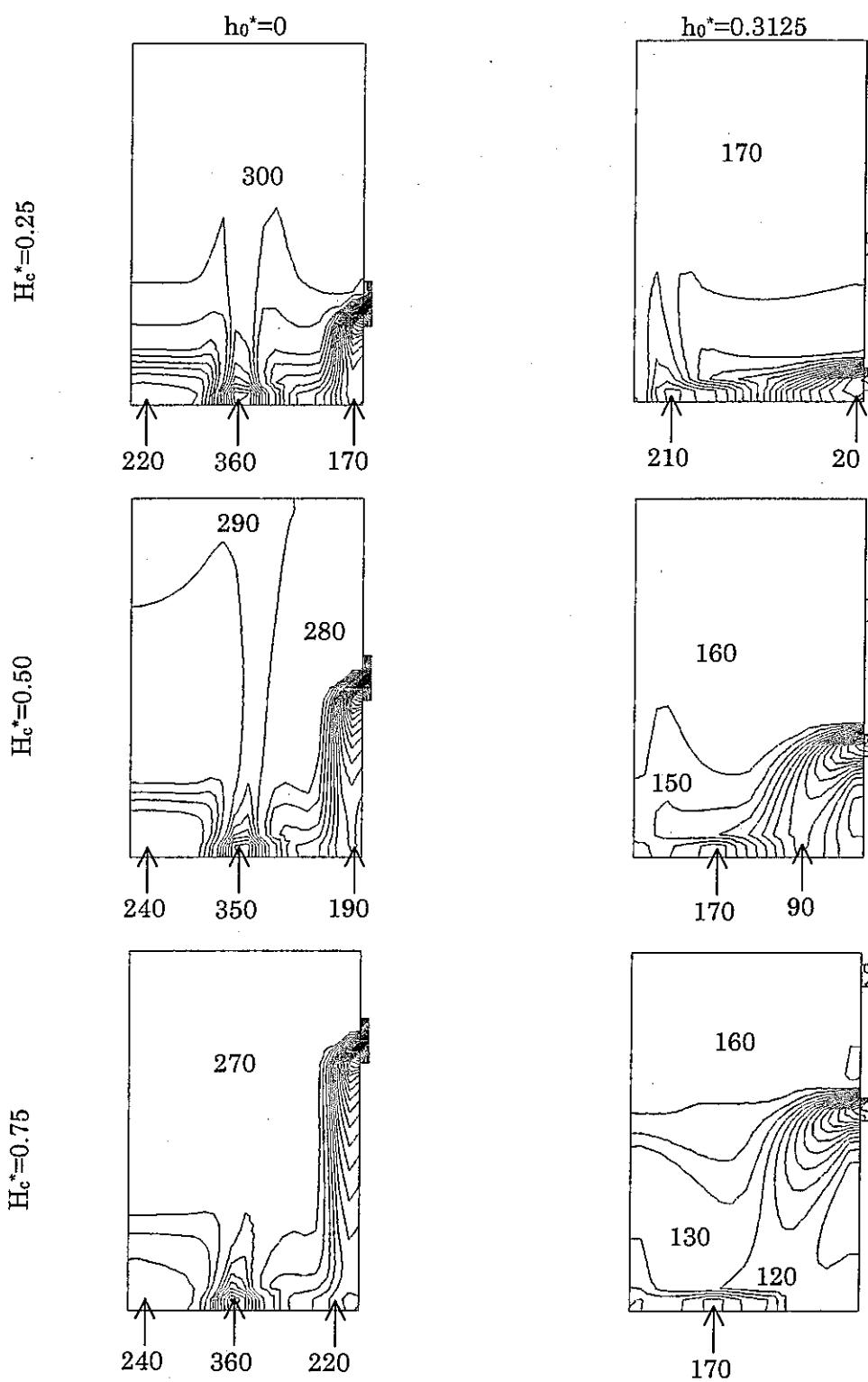
センター間隔 : 1°C

図 3.5-2 AQUA-SF による温度分布の開口空間配置依存性 (発熱体温度 50°C)



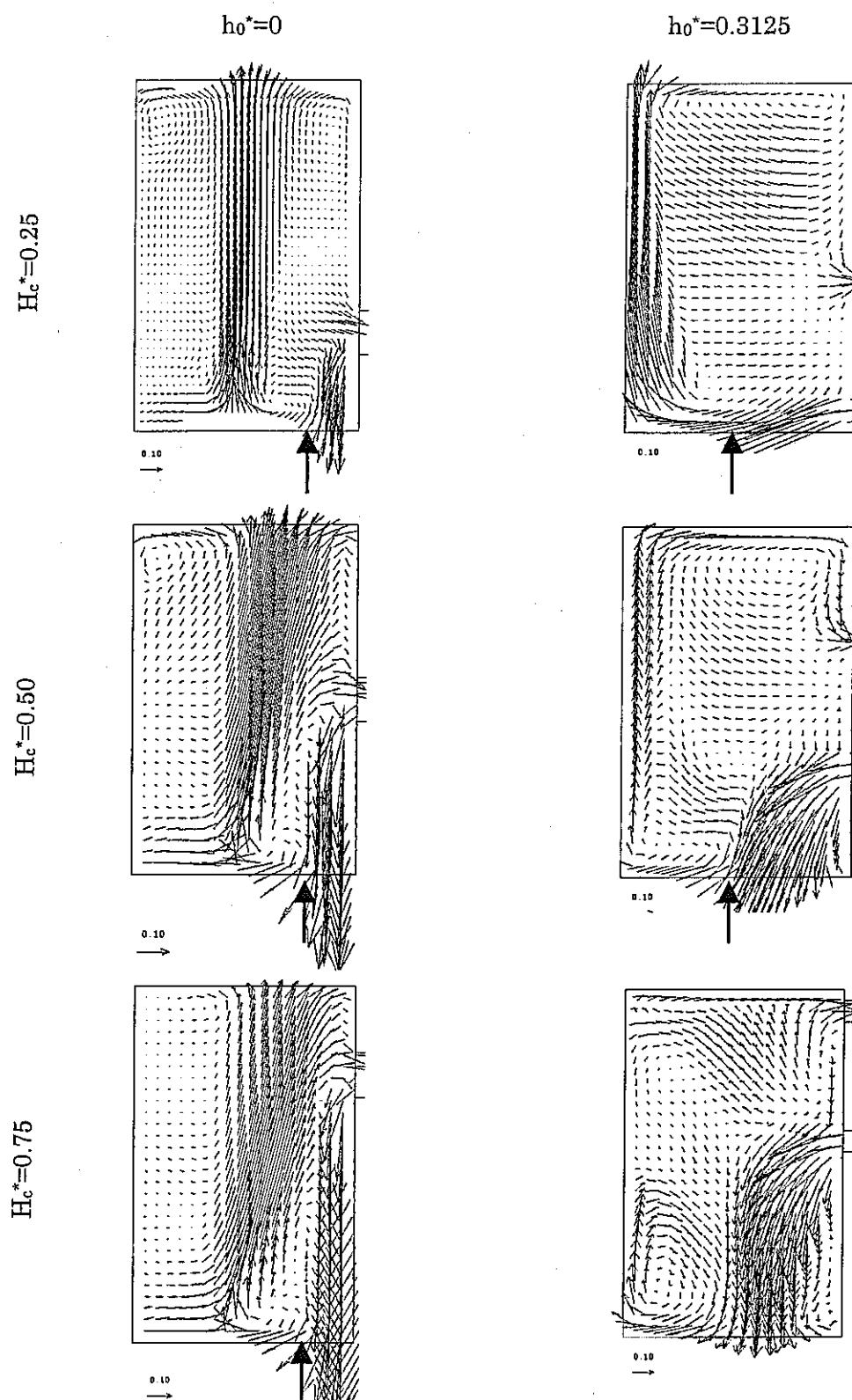
定常時(3600 秒時)における高温部屋の Y 方向中央断面流速分布
流速の単位[m/s]

図 3.5-3 AQUA-SF による流速分布の開口空間配置依存性 (発熱体温度 50°C)



定常時における高温部屋の奥行き方向中央断面温度分布
センター間隔 : 5°C

図 3.6-1 AQUA-SF による温度分布の開口空間配置依存性 (発熱体温度 800°C)



定常時における高温部屋の奥行き方向中央断面流速分布
流速の単位[m/s]

図 3.6-2 AQUA-SF による流速分布の開口空間配置依存性 (発熱体温度 800°C)

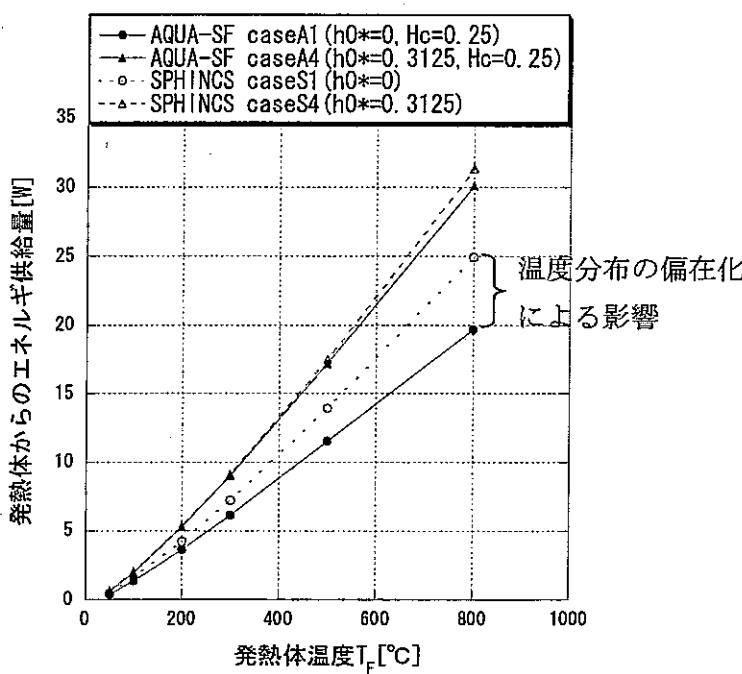


図 3.6-3 不燃条件におけるエネルギー供給量の発熱体温度依存性

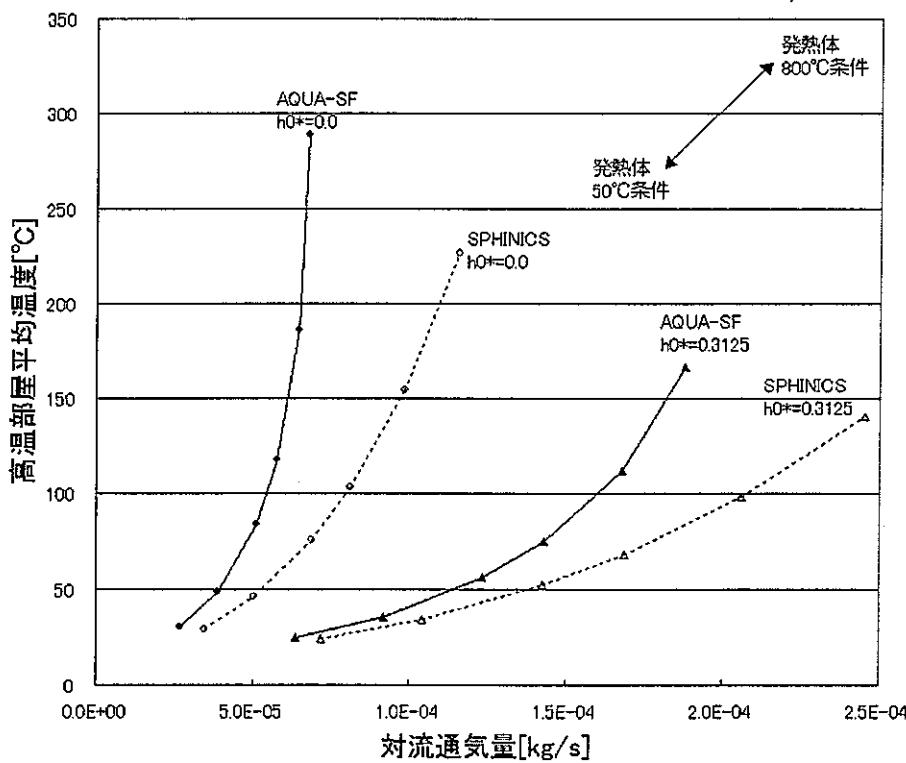


図 3.6-4 不燃条件における対流通気量と平均温度の関係

4. 温度変化あり・燃焼条件における対流通気の開口部配置依存性

本章では、火災条件において開口部配置が対流通気に与える影響評価解析を実施した。火災条件は、ナトリウム火災の一形態であるプール燃焼条件を用いた。プール燃焼が発生している部屋の側面に複数の開口部を設置し、それらの開口部間距離と開口部配置高さを変化させて対流通気への影響を評価する。

4.1 解析体系と解析条件

(1) 解析体系

解析体系図を図 4.1-1 及び 4.1-2 に、解析体系の詳細を表 4.1-1 に示す。図 4.1-1 は SPHINCS、図 4.1-2 は AQUA-SF における体系の概略図である。解析体系は基本的に 3 章と同様であり、高温部屋（本章では燃焼部屋）と低温部屋（以下、大気部屋）との側壁に、2 つの等寸法の正方形開口を上下方向に並んで設定する。こうした 2 つの開口部を通して 2 部屋間の対流通気が行われる。各部屋の寸法は 3 章よりも大きく、燃焼部屋は $X \times Y \times Z = 10 \times 10 \times 10 [m]$ 、大気部屋は $18.5 \times 10 \times 30 [m]$ 、開口部は各々 $1 \times 1 \times 0.5 [m]$ である。

燃焼部屋の床中心に一辺 3m の正方形の燃焼皿容器を設置し、予め初期温度 500°C の液体ナトリウムプールを 5cm の厚さまで注いでおく。

プールの下には炭素鋼の燃焼皿、断熱材、コンクリートを設置し、熱伝導を考慮する。構造材の概略図を図 4.1-3、構造材条件を表 4.1-6、構造材物性値を表 4.1-7 に示す。なおコンクリートの最下端は断熱境界とした。

火災条件として、部屋の床に初期温度 500°C の液体ナトリウムプールを設置し、空気と反応して燃焼が起きる状況を想定する。ナトリウムプールは、部屋の床中心に設置した燃焼皿中にあらかじめ存在しているものとする。

ナトリウムのプール燃焼については、いずれのコードにおいてもフレームシート燃焼モデルを用いている。これは、質量のない極薄い燃焼面（フレームシート）を仮定し、そこでの流入フラックス保存（フレームシートに流入する O_2 と Na は全て反応する）、エネルギー保存を満たすように燃焼速度、フレーム温度およびフレーム高さを評価する。

境界条件も、基本的に 3 章と同様である。温度境界条件を表 4.1-2 及び 4.1-3 に示す。ここで、フレームと雰囲気の間の熱伝達相関式は 1/3 乗則を用いた。

流速の境界条件も 3 章と同様に、AQUA-SF において設けた大気開口部のみを質量保存を満足する出入り境界とし、壁面はすべてフリースリップとした。

(2)開口部配置

開口部条件は、3章と同様に開口部間距離(h_0^*)と、開口部配置高さ(H_c^*)をパラメータとする。 h_0^* は、0.0及び0.3125の2ケースを用いる。 H_c^* は0.25及び0.50、0.75の3ケースを用いる。

SPHINCSでは、換算開口寸法の算出においてBROWN換算式を使用した場合と、水力等価直径を使用した場合について実施した。BROWN換算式使用時は、 h_0^* を考慮できることから $h_0^*=0.0$ 及び0.3125の2ケースとも実施した。但し、 H_c^* は考慮できない。一方の水力等価直径使用時の場合は、 h_0^* 、 H_c^* 共に考慮できないため、同じ開口部断面積を持つ1ケースだけ実施した。換算開口寸法は、水力等価直径(4×断面積/濡れ縁長さ)を用い、開口部面積の保存を考慮するため高さ1.0m、幅2.0mとした。SPHINCSでの換算寸法一覧を表4.1-4に示す。

以上、AQUA-SFは、 h_0^* 依存性評価ケースとして、 $(h_0^*, H_c^*)=(0.0, 0.50), (0.3125, 0.50)$ の2通りを、 H_c^* 依存性評価ケースとして、 $(h_0^*, H_c^*)=(0.0, 0.25), (0.0, 0.50), (0.0, 0.75)$ の3通りを実施する。SPHINCSは、BROWN換算式使用時の場合、 $h_0^*=0.0, 0.3125$ の2通りを、水力等価直径の場合は、高さ1.0m×幅2.0mの1通り実施した。

(3)ナトリウムプール条件

プール条件の詳細を表4.1-5に示す。床中心に置いた3×3m(表面積9m²)の正方形の燃焼皿に初期温度500°C、初期厚さ5cmのナトリウムプールを設定した。本解析ではナトリウムプールの縮みを考慮しないため、燃え尽きるまでプール表面積は常に一定である。初期ナトリウム量は、燃焼や対流通気が定常に達する状態までの間に燃え尽きないよう十分な量を設定した。フレームシートモデルでは、雰囲気からフレームへ面に供給される酸素のフラックスの算出に物質伝達相関式を用いる。物質伝達相関式は、自然対流の熱伝達式から、熱伝達と物質伝達のアナロジーを用いて表4.1-5の通りとした。輻射は、フレーム—雰囲気ガス間とフレーム—プール間において考慮する。輻射の熱流束式は、輻射係数×ボルツマン係数×(フレーム温度⁴—雰囲気温度⁴or プール温度⁴)である。輻射係数は、フレーム—雰囲気ガスの場合0.65、フレーム—プールの場合0.50とした。

AQUA-SFにおけるナトリウム注入のインプット設定方法について解説したものを付録2に、SPHINCSにおけるナトリウムプール設定方法の解説を構造材条件設定と合わせて付録3に示す。

4.2 解析結果及び考察

4.2.1 開口部間距離依存性

解析結果をまとめたものを表 4.2-1 に示す。表中の「燃焼部上部」はナトリウムプール（以下、プールとする）が接するセル（SPHINCS の場合は燃焼部屋平均と同値）での平均値とした。

SPHINCS の場合について述べる。表 4.2-1 より、開口部間距離(h_0^*)を 0 から 0.3125 に広げると、対流通気量は 1.86 倍もの増大を示した。燃焼部屋平均温度(SPHINCS での定義点は 1 点)は、通気量の増大により 72°C も低下している。また、燃焼率が 1.28 倍、プール中の生成物が $\text{Na}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}_2$ いずれにおいても約 20[kg]増大、フレーム温度が 57°C 上昇といった特徴を示すことから、燃焼が活発になっていることが分かる。これは、対流通気量の増大により、新鮮な外気の流入が増大して酸素濃度が上昇したことが引き金となり、蒸発量の増大、反応熱の上昇、反応点温度（フレーム温度）の上昇といった連鎖が起きた結果と考えられる。よって、SPHINCS における開口部間距離が対流通気に与える影響、かつ対流通気が燃焼に与える影響は大きいことを確認した。

水力等価直径を用いた場合の結果について述べる。水力等価直径を用いると開口部間距離が考慮できないことから、開口部間距離を大きい場合ほど BROWN 換算式使用時とのずれが大きいことが予想される。表 4.2-1 より、 $h_0^*=0.3125$ の場合の BROWN 換算式使用時と比較すると、対流通気量は約 6 割も低く評価し、部屋内のガス温度を高く評価する。また、燃焼率を約 3 割の過小評価ことから燃焼規模を低く評価する。

AQUA-SF の場合について述べる。表 4.2-1 より、開口部間距離(h_0^*)を 0 から 0.3125 に広げると、対流通気量は 2.35 倍増大した。その他についても、定性的な傾向はすべて BROWN 換算式使用時の SPHINCS と同様であった。よって、AQUA-SF においても開口部間距離が対流通気に与える影響、かつ対流通気が燃焼に与える影響は大きいことを確認した。

燃焼部屋での空間分布により、AQUA-SF における開口部間距離を変えたときの対流通気及び燃焼への影響について述べる。図 4.2-1 に温度分布及び速度分布、図 4.2-2 に酸素濃度分布を示した（尚、図 4.2-1,2 は開口部配置高さを変化させた解析結果も併せて示している）。

開口部間距離が小さい場合、高温ガスの燃焼部上部における偏在化と体系上部での滞留が起きている。開口部間距離を広げた時、循環流の規模が大きくなつて分布が均一化するのも 3 章と同様であり、燃焼近傍点と出口温度が低下することから、(3.5-1)式より、対流通気量が増大したと考えられる。但し、燃焼の場合、燃焼部の偏在化は温度分布だけではなく酸素濃度分布においても生じている。つまり、高温であることによる雰囲気への熱移行量の抑制と同時に、低酸素濃度であることによる燃焼およびそれに伴う発熱量の抑制効果も生じていると考えられる。zone model の SPHINCS では、こうした分布を影響を評価できない。

最後に、表 4.5-1 より対流通気量の違いは反応割合にも影響を及ぼしている。ここでいう

反応割合とは、O₂が 1mol 消費されるときの、ナトリウムの反応モル数のことである。値が大きいほど 2Na+O₂→Na₂O₂ が起きている割合が大きく、小さいほど 2Na+(1/2)O₂→Na₂O が起きている割合が大きいことを示している。そのため、反応割合の変化は、個々の生成物量評価に影響を与える。本解析の場合、SPHINCS はいずれの条件でも反応割合は 0.5 台であるのに対して、AQUA-SF では 0.3~0.4 台と小さい。これは、表 4.2-1 より、AQUA-SF の方が、SPHINCS よりも酸欠条件になっているためであると考えられる。また、同じコード同士の場合、対流通気量が増大したときの反応割合変化が、SPHINCS と AQUA-SF とで逆の傾向を示している。もともと SPHINCS は AQUA-SF よりも大幅に対流通気量が高く、その影響によりフレーム温度が高い。そのため、蒸発量の増大 (Na 増により Na₂O 寄りへ)の方が、酸素濃度の上昇 (O₂ 増により Na₂O₂ 寄りへ) よりも強い影響を反応割合に与えたためと考えられる。

4.2.2 開口部配置高さ依存性

解析結果をまとめたものを表 4.2-2 に、温度分布ならびに速度分布、および酸素濃度分布を図 4.2-1,2（図中左側）に示す。

表 4.2-2 に示すように、開口部高さの違いによる対流通気などへの影響はほとんど無いことが確認された。これは不燃条件（3 章）と同じ傾向である。図 4.2-1 に示すように、開口部間距離が同じであるため、開口に起因する循環流の規模には変化がなく、いずれも燃焼部上部の浮力による上昇流を乱しておらず、燃焼近傍点と出口温度、いずれにおいてもほとんど差異はない。このため、対流通気等への影響はほとんどなかったものと考えられる。

表 4.1-1 プール燃焼解析における体系条件

	AQUA-SF	SPHINCS
燃焼部屋の寸法	横×幅×高さ： 10×10×10[m]	容積 $1 \times 10^3 [m^3]$ 高さ 10[m]
大気部屋の寸法	横×幅×高さ： 18.5×10×30[m]	容積 $1 \times 10^9 [m^3]$ 高さ $1 \times 10^3 [m]$
開口部寸法	厚さ×幅×高さ： 0.5×1.0×1.0[m]	単一の等価開口を仮定 断面積 $2.0 [m^2]$
開口部の数	2	幅×高さは 2 開口の相対距離から 換算する
初期温度	燃焼部屋 : 50[°C]、大気部屋 : 15[°C]	
初期圧力	燃焼部屋、大気部屋ともに : 0.1[MPa]	
空気の初期成分	酸素濃度 0.21 (モル分率) 窒素濃度 0.79 (モル分率) の乾燥空気	
考慮化学種	O ₂ (gas), N ₂ (gas), Na(gas), Na ₂ O(aerozol), Na ₂ O ₂ (aerozol)	

表 4.1-2 プール燃焼条件解析における温度境界条件(1) - 燃焼部屋と開口部 -

	燃焼部屋		開口部
	フレーム	その他	
AQUA-SF	熱伝達相関式 $Nu=0.14 \times (Gr \cdot Pr)^{1/3}$	断熱	断熱
SPHINCS			

表 4.1-3 プール燃焼条件解析における温度境界条件(2) - 大気部屋 -

	大気部屋			
	部屋間流路開口の在る側壁	部屋間流路開口対面側壁	大気開口部	その他
AQUA-SF	断熱	$Nu=1 \times 10^5$	温度一定 (15°C)	$Nu=1 \times 10^5$
SPHINCS			—	断熱

表 4.1-4 SPHINCS によるプール燃焼条件解析における開口部の換算寸法

開口部間 距離パラ メータ	開口部 間距離	BROWN 換算式使用時		水力等価直径使用時	
$h_0^*[-]$	$h_0[m]$	高さ(H)[m]	幅(W)[m]	高さ(H)[m]	幅(W)[m]
0.0	0.0	2.0	1.0	1.0	2.0
0.3125	3.125	9.235	0.217		

注) $H_0=10[m]$

表 4.1-5 プール燃焼におけるプール条件

	AQUA-SF	SPHINCS
サイズ	9[m ²] (固定)	
配置位置	床中心	—
初期高さ	5 × 10 ⁻² [m]	
初期温度	500[°C]	
雰囲気とフレーム間の物質伝達式	熱伝達相関式とのアナロジーより $Sh=0.14 \times (Gr \cdot Sc)^{1/3}$	
フレームとプール間の輻射	輻射係数 0.5 (固定)	
フレームとガス間の輻射	輻射係数 0.65 (固定)	
フレームと壁間の輻射	考慮しない	
燃焼生成物のプール落下割合	0.75 (固定)	
潜熱の扱い	フレーム→プールへの熱量から潜熱を差し引く	

表 4.1-6 床構造材条件

	表面積 [m ²]	厚さ [m]
燃焼皿（炭素鋼）	9.0	0.01
断熱材		0.1
コンクリート		1

表 4.1-7 床構造材物性値

	熱伝導率 [W/(m K)]	比熱 [J/(kg K)]	密度 [kg/m ³]
鉄	38.3	690	7700
断熱材	0.1	1300	180
コンクリート	1.7	960	2300

表 4.2-1 プール燃焼条件における開口部間距離依存性解析結果

		SPHINCS (*1)	SPHINCS (*2)		AQUA-SF	
			$h_0^*=0.0$	$h_0^*=0.3125$	$h_0^*=0.0$	$h_0^*=0.3125$
対流通気量(G_2) [kg/s]		1.583	2.103	3.919 (1.864)	1.263	2.965 (2.348)
燃焼部屋 ガス温度 [°C]	部屋全体 平均	287.6	243.1	171.2 {-71.9}	313.2	187.06 {-126.1}
	燃焼部 平均				363.2	256.5 {-106.7}
燃焼部屋 酸素濃度 [モル分 率]	部屋全体 平均	0.2001	0.2016	0.2043 {-0.0027}	0.1949	0.1978 {-0.0029}
	燃焼部 平均				0.1930	0.1957 {-0.0027}
フレーム温度[°C]		796.1	814.9	871.8 {+56.9}	811.4	861.9 {+50.5}
プール温度[°C]		692.9	702.5	718.0 {+28.4}	700.9	748.7 {+36.8}
燃焼率[kg/s]		4.587×10^{-2}	5.056×10^{-2}	6.488×10^{-2} (1.283)	4.211×10^{-2}	5.358×10^{-2} (1.272)
反応熱[W]		6.306×10^5	6.978×10^5	8.887×10^5 (1.274)	5.981×10^5	7.669×10^5 (1.282)
熱移行量 (flame →air) [W]	輻射	4.008×10^5	4.414×10^5	5.571×10^5 (1.262)	4.017×10^5	5.275×10^5 (1.313)
	対流	3.596×10^4	4.342×10^4	5.937×10^4 (1.367)	2.893×10^4	4.688×10^4 (1.621)
	合計	4.368×10^5	4.848×10^5	6.165×10^5 (1.272)	4.306×10^5	5.744×10^5 (1.303)
熱移行量 (flame →pool) [W]	輻射	1.113×10^5	1.265×10^5	1.791×10^5 (1.416)	1.128×10^5	1.470×10^5 (1.864)
	対流	8.253×10^4	8.651×10^4	9.311×10^4 (1.076)	5.531×10^4	4.741×10^4 (0.857)
	合計	1.938×10^5	2.130×10^5	2.723×10^5 (1.278)	1.681×10^5	1.944×10^5 (1.334)

前ページの続き

反応割合[-]		0.528	0.570	0.545 {-0.025}	0.353	0.461 {+0.108}
プール組成 [kg]	Na	204.1	192.3	155.1 {-37.2}	214.9	184.9 {-30.0}
	Na ₂ O	90.13	91.17	113.8 {+22.63}	105.4	114.3 {+8.9}
	Na ₂ O ₂	103.4	117.1	135.9 {+18.8}	70.4	97.4 {+27.0}
燃焼部ガス 中のエアロ ゾル[kg]	Na ₂ O	3.969	3.344	2.776 {-0.568}	6.732	3.773 {-2.959}
	Na ₂ O ₂	2.835	2.819	2.104 {-0.715}	5.968	4.272 {-1.696}
構造材 (炭素鋼) 温度[℃]		692.4	701.9	730.4 {+28.5}	710.4	740.3 {+29.9}
構造材 (断熱材) 温度[℃]		190.7	192.4	197.4 {+5.0}	192.7	197.5 {+4.8}
構造材 (コンクリート) 温度[℃]		50.1	50.1	50.1 {=0}	50.1	50.1 {=0}

注 1) (*1) : 水力等価直徑使用時

(*2) : BROWN 換算式使用時

(): $h_0^*=0$ の場合を 1 としたときの値{ } : $h_0^*=0$ の場合との差

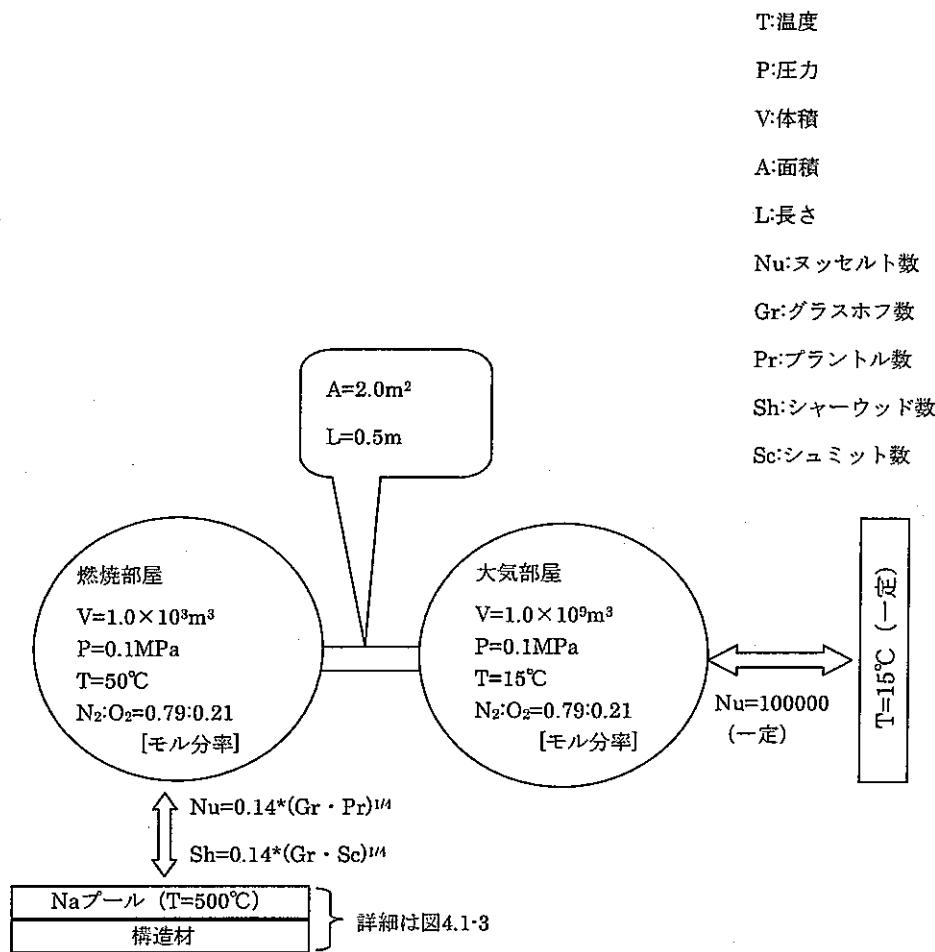
表 4.2-2 プール燃焼条件における対流通気量の開口部配置高さ依存性解析結果

		AQUA-SF		
		H _c *=0.25	H _c *=0.50	H _c *=0.75
対流通気量(G ₂) [kg/s]		1.263	1.263 (1.000)	1.270 (+1.006)
燃焼部屋ガス温度[℃]	部屋全体平均	329.1	313.2 {-15.9}	302.8 {-26.3}
	燃焼部平均	339.9	363.2 {+23.3}	373.9 {+34.0}
燃焼部屋酸素濃度 (モル分率)	部屋全体平均	0.1941	0.1949 {+0.0008}	0.1954 {+0.0013}
	燃焼部平均	0.1935	0.1930 {-0.0005}	0.1929 {-0.0006}
フレーム温度[℃]		815.0	811.4 {-3.6}	811.0 {-4.0}
プール温度[℃]		713.9	711.9 {-2.0}	711.8 {-2.1}
燃焼率[kg/s]		4.339×10^{-2}	4.211×10^{-2} (0.971)	4.173×10^{-2} (0.962)
反応熱[W]		6.192×10^5	5.981×10^5 (0.966)	5.913×10^5 (0.955)
熱移行量 (flame →air) [W]	輻射	4.165×10^5	4.017×10^5 (0.964)	3.976×10^5 (0.955)
	対流	3.203×10^4	2.893×10^4 (0.903)	2.795×10^4 (0.873)
	合計	4.485×10^5	4.306×10^5 (0.960)	4.256×10^5 (0.949)
熱移行量 (flame →pool) [W]	輻射	1.157×10^5	1.128×10^5 (0.975)	1.124×10^5 (0.971)
	対流	5.632×10^4	5.531×10^4 (0.982)	5.485×10^4 (0.974)
	合計	1.810×10^5	1.681×10^5 (0.929)	1.673×10^5 (0.924)

前ページの続き

反応割合[-]		0.397	0.353 {-0.044}	0.332 {-0.065}
プール組成 [kg]	Na	211.7	214.9 {+3.2}	216.2 {+4.5}
	Na ₂ O	103.9	105.4 {+1.5}	106.6 {+2.7}
	Na ₂ O ₂	76.3	70.4 {-5.9}	67.2 {-9.1}
燃焼部ガス 中のエアロ ゾル[kg]	Na ₂ O	6.732	6.732 {0.000}	7.048 {+0.316}
	Na ₂ O ₂	3.773	5.968 {+2.195}	3.284 {-0.536}
構造材 (炭素鋼) 温度[°C]		713.8	710.4 {-3.4}	710.5 {-3.3}
		193.3	192.7 {-0.6}	192.5 {-0.8}
構造材 (コンクリート) 温度[°C]		50.1	50.1 {=0}	50.1 {=0}

() : H_c*=0.25 の場合を 1 としたときの値{ } : H_c*=0.25 の場合との差



寸法値(A,L,V)以外の数値は初期値

図 4.1-1 SPHINCS によるプール燃焼条件解析の解析体系概要

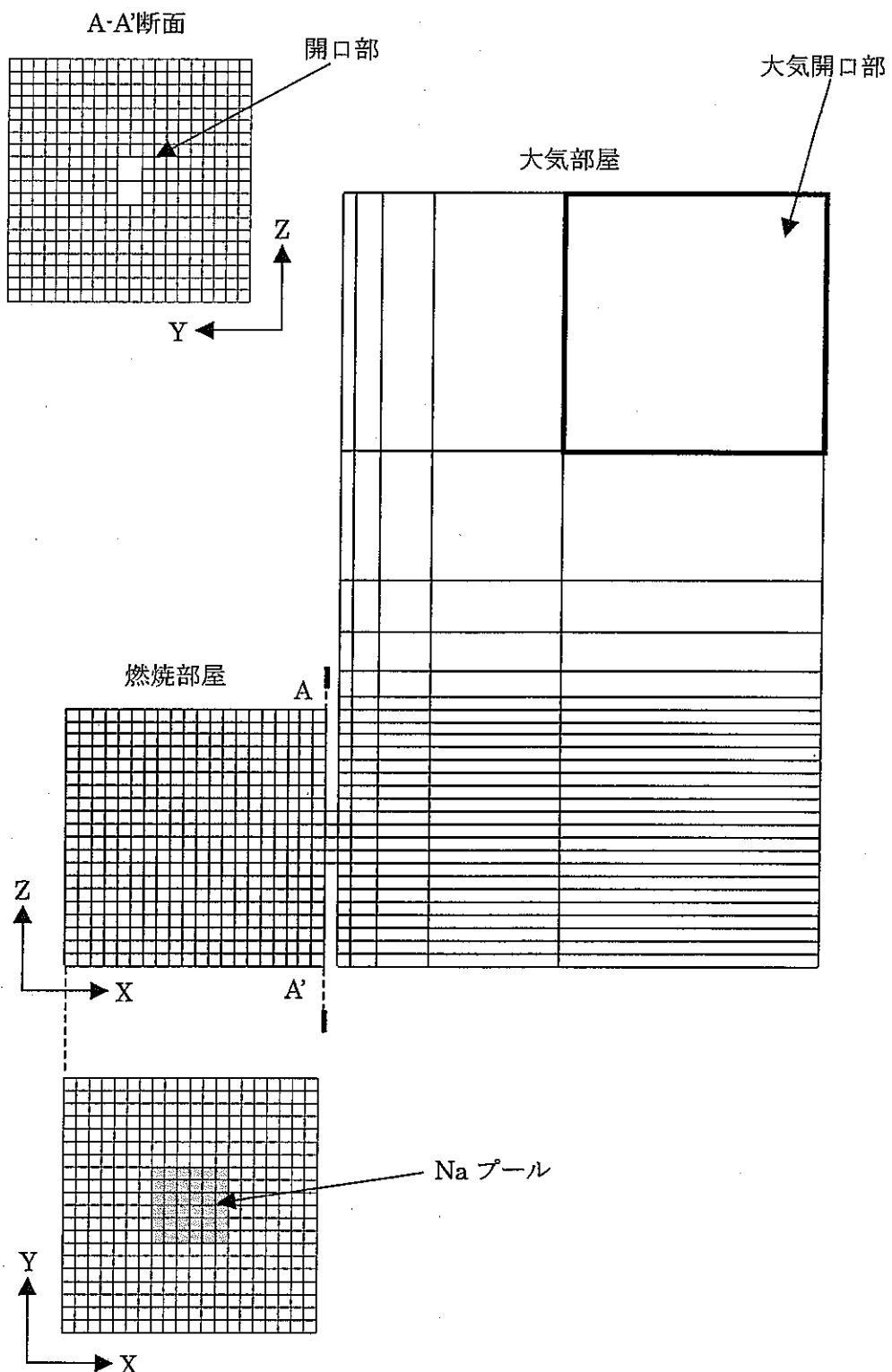


図 4.1-2 AQUA-SF によるプール燃焼条件解析の解析体系

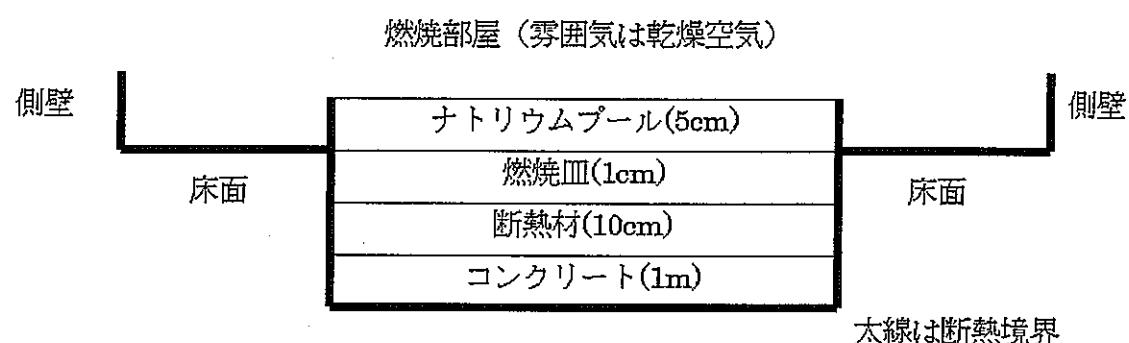


図 4.1-3 プール燃焼条件における床構造材の概略

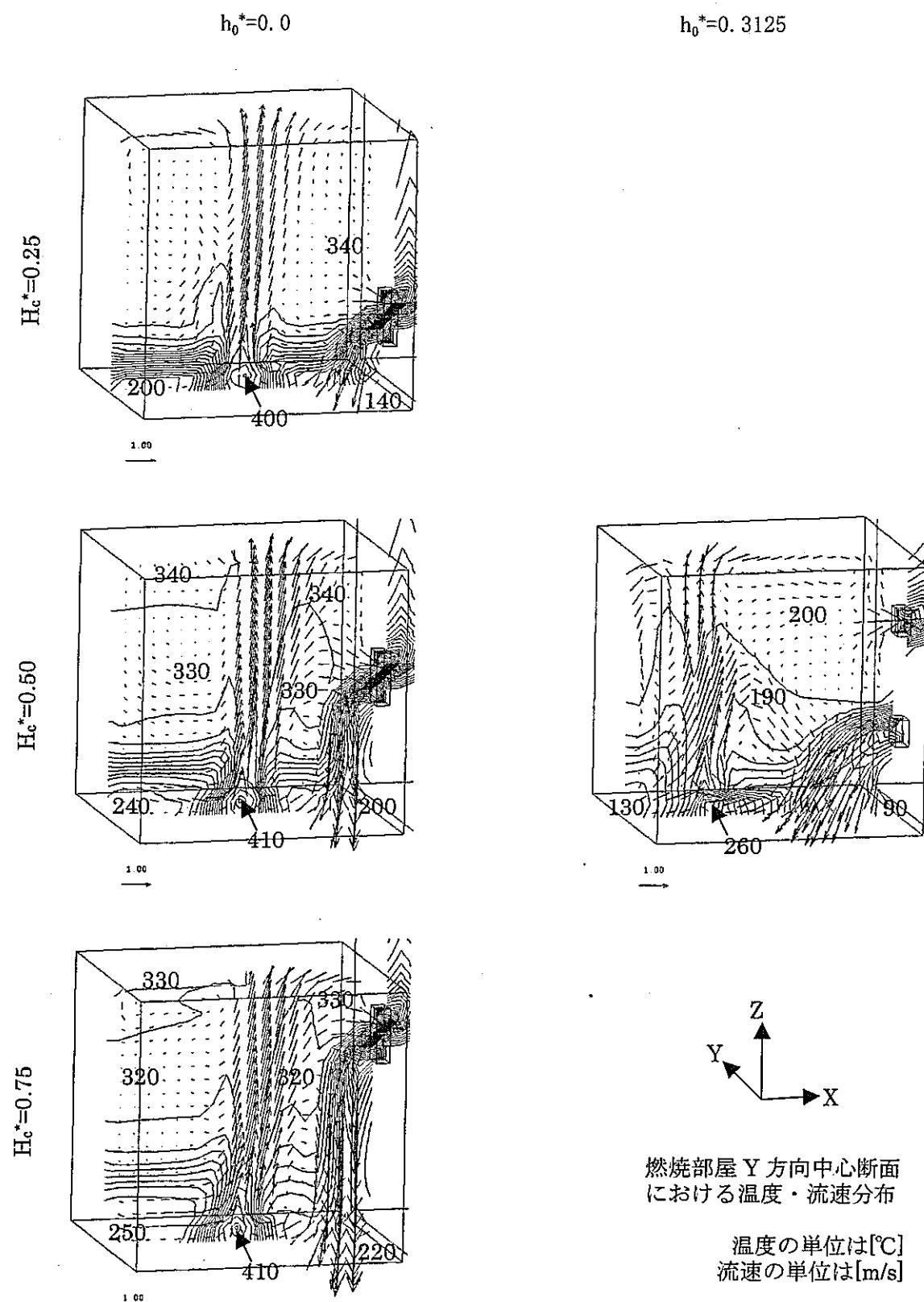


図 4.2-1 プール燃焼における流速分布と温度分布の開口部配置依存性

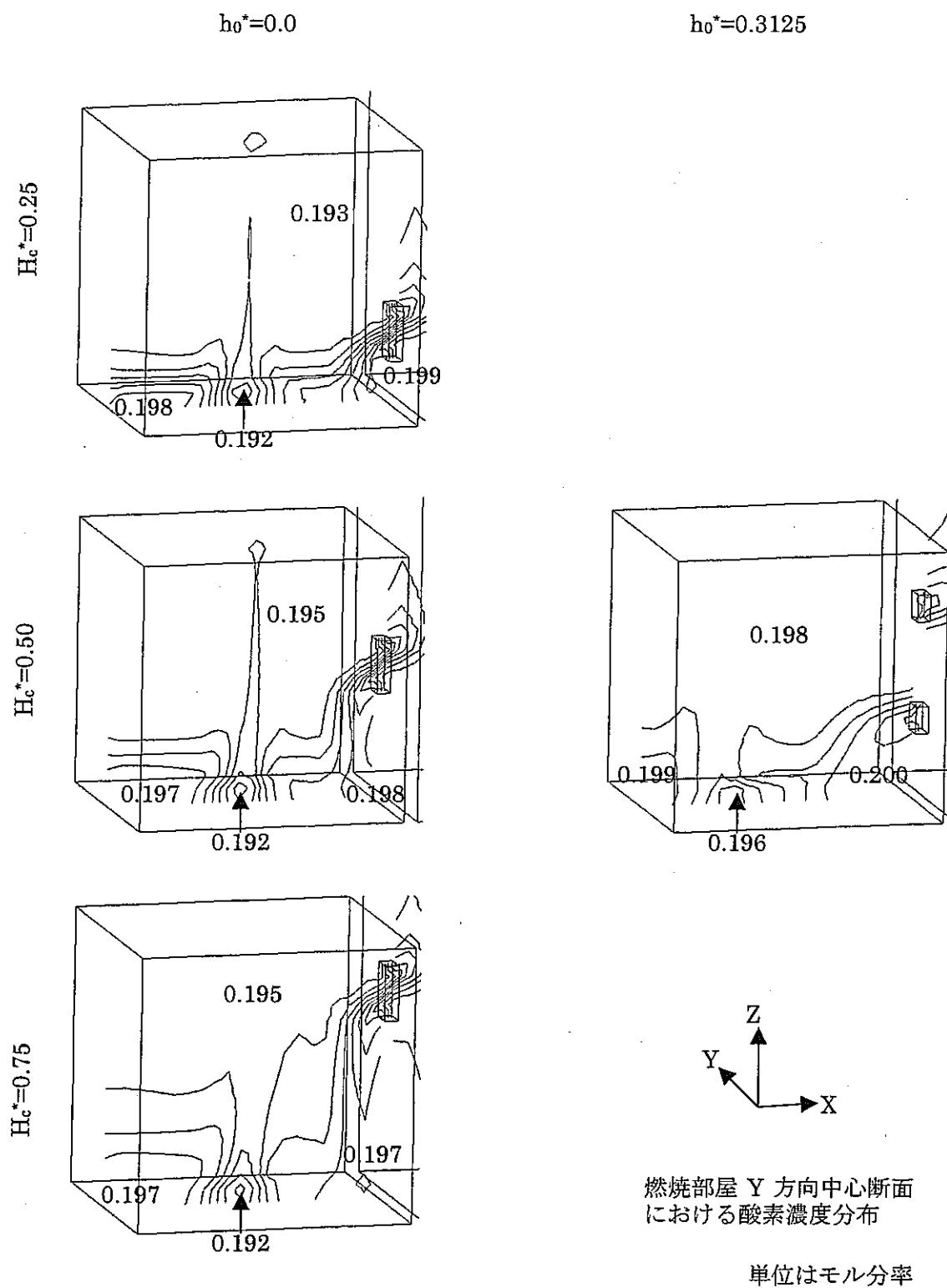


図 4.2-2 プール燃焼における酸素濃度分布の開口部配置依存性

5.おわりに

field model のナトリウム燃焼解析コード「AQUA-SF」と zone model の多セル燃焼解析コード「SPHINCS」を用い、複数の開口により水平方向に接続された部屋間における対流通気の評価解析を行い、以下の結果を得た。

1. 平均温度一定条件解析（2章）

AQUA-SFにおいてBROWN実験解析の検証および開口部メッシュ分割に関する影響を評価した結果、AQUA-SFは概ね対流通気に関する実験結果を再現しており、コードとしての妥当性が示された。また、開口部メッシュ分割数に関する依存性に関しては、①アスペク比が大きくならないようし、②中性帯位置にメッシュ点があるようにすれば、約10%の誤差程度で評価可能であることを確認した。

2開口条件において、AQUA-SFとSPHINCSとの比較解析を実施した。その結果、中性帯の位置については両者で非常に良い一致を示すことを確認した。また、一律のオリフィス係数を用いたSPHINCSは、AQUA-SFよりも開口部間距離に対する依存性を小さく評価するという問題があることを確認した。

複数開口部寸法モデルにおいて、開口部間距離を考慮する(BROWN換算式)と考慮しない(水力等価直径)場合との比較解析を行った。その結果、開口部間距離が大きいほどBROWN換算式使用時の対流通気量が高くなり、その比率は換算開口部高さの平方根に比例することを確認した。

2. 不燃条件解析（3章）

側壁に等寸法2正方形開口が存在する単純な評価体系を用いて、床面の一部を温度一定の発熱体とした条件における解析を実施した。

SPHINCSによる対流通気は、開口部間距離に対する依存性が大きいことを確認した。また、等価な单一開口に換算する際は、開口部間距離を考慮したモデル化(BROWN換算式等)を行うことが重要である。

AQUA-SFによる対流通気は、開口部間距離に対する依存性が大きく、一方で開口部配置高さへの依存性はほとんどない。

SPHINCSは、AQUA-SFと比較して熱源からのエネルギー供給量を高めに評価する問題がある。開口部間距離が小さい場合や、熱源と雰囲気との温度差が大きい場合においてより顕著であった。これは、AQUA-SFは高温のガスが熱源近傍で偏在する分布を考慮できるのからである。こうした空間分布の影響を考慮できないことが、一様仮定を前提としているSPHINCSなどのzone modelの限界であると考えられる。

3. プール条件解析（4章）

側壁に等寸法 2 正方形開口が存在する単純な評価体系を用いて、火災現象の一つであるナトリウムプール火災が発生したとした条件における解析を実施した。

その結果、対流通気の開口部配置依存性は不燃条件と同様であった。つまり、開口部間距離に対する依存性が大きく、開口部配置高さに対する依存性はほとんどない。SPHINCSでは、単一開口に換算する際、開口部間距離を考慮したモデル化が重要である点も同様である。

燃焼規模と対流通気の関係を調べたところ、SPHINCS,AQUA-SF 双方において、対流通気量の増大に伴い、燃焼が活発化することを確認した。つまり、部屋間開口部配置モデルなど、対流通気評価手法の妥当性は、燃焼事象を評価する上でも重要である。

また、対流通気は反応割合にも影響を与える。そのため、対流通気を妥当に評価することは生成物量の評価においても重要である。

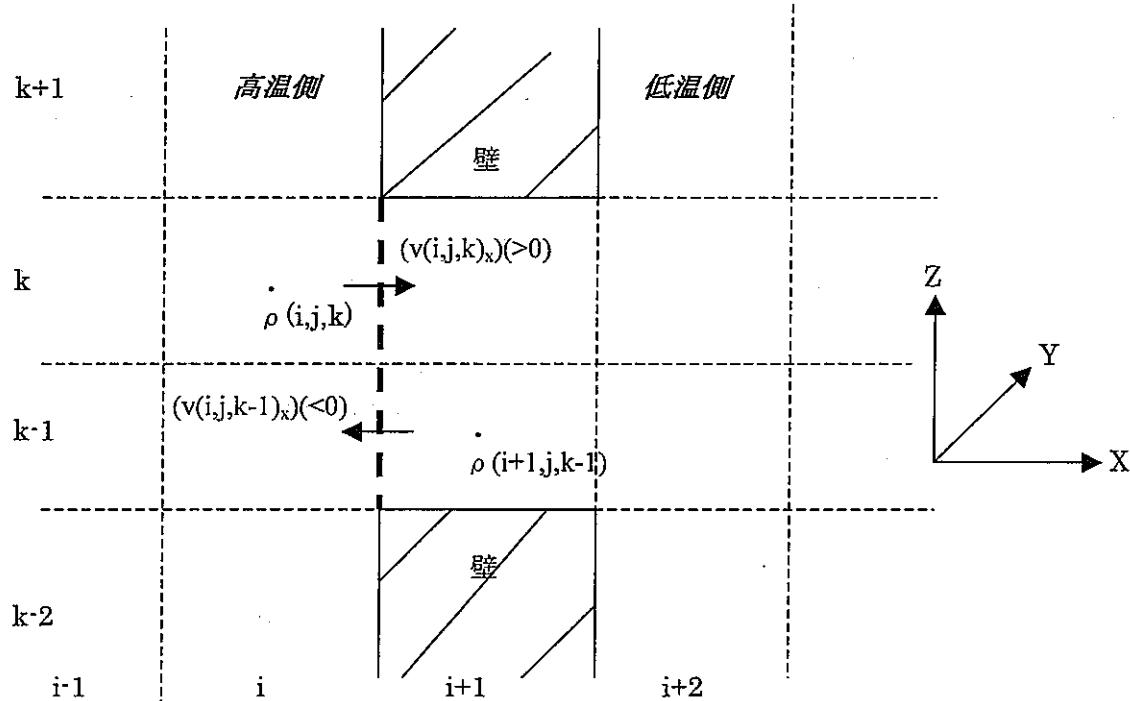
AQUA-SF は燃焼現象においても偏在化による空間分布の影響が生じる。SPHINCS では評価できない特徴である。

参考文献

- [1]高田考,山口彰,”多次元ナトリウム燃焼解析コード AQUA-SF の開発と検証”,
JNC TN9400 2000-065,(2000)
- [2]山口彰,田嶋雄次,”SPHINCS コードのスプレイ燃焼モデルの開発と検証”,
JNC TN9400 99-059,(1999)
- [3]W.G.BROWN et al., ”Natural Convection through Rectangular Openings in
Partition-1 Vertical Partitions”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.5 pp.869～868
(1962)
- [4]日本機械学会,”伝熱工学資料 改訂第四版”,p.68, (1986)

付録 1.AQUA-SF における対流通気量算出方法

本研究における AQUA-SF の対流通気量は、開口部と高温部屋との境界面を単位時間内に通過する質量流量と定義している。



AQUA-SF はスタガードメッシュを用いているため、速度定義点はセルの境界、密度定義点はセル中心となる。質量通気量を出す際の密度は、対流項の空間差分に 1 次風上を用いていることから風上側のセルの値を用いる。算出コードの概略を以下に示す。

```

do i, j, k
  if i = i
    if (vx(i, j, k) > 0) then
      G1 = ρ(i, j, k) · vx(i, j, k) · Δy · Δz
    else
      G2 = ρ(i+1, j, k) · vx(i, j, k) · Δy · Δz
    endif
  enddo

```

ここで、G₁: (高温側→低温側)の質量通気量 [kg/s]、G₂: (低温側→高温側)の質量通気量 [kg/s]、ρ: ガス密度 [kg/m³]、v: 流速 [m/s]、添え字 x:X 方向成分を示す。定常状態では G₁=G₂ である。

付録 2.AQUA-SF におけるナトリウムプール入力設定

4 章のプール燃焼解析において用いた、AQUA-SF によるナトリウムプールの設定において工夫した部分を解説する。

4 章でのプール燃焼は、時刻 0 秒からナトリウムプールが存在すると仮定している。しかし、AQUA-SF は有限時間の間にナトリウムを注入するという設定方法しか対応していない。そのため、本解析では最初の 1 秒間ですべての液体ナトリウムを注入するという操作を行うことにより、ほぼ初期状態からプールが存在する状況を模擬した。

AQUA-SF におけるナトリウムプールの設定。入力ファイル input.dat 抜粋。

```

&DATA
(中略)
NEND=4,
TVAL=0.0      , 1.0      , 1.01    , 3600.0  ,  } ナトリウム注入に用いる過渡関数定義
FVAL=1.0      , 1.0      , 0.0     , 0.0     ,
(中略)
&END
&POOL
IFPOOL=3, IHTFL=21, HYDFL=3.0D0, FFL0=0D0,
EEP=0D0, EEF=0D0, RELAXPL=0.8D0, EPAPL=5.0D-3, } プール燃焼データセット
HPMAX=1.0D-2, HPMIN=1.0D-2, IPLBUG=0,
&END
(中略)
POOL          8   13   8   13   1   1   1   1
GNAP  8.332D0  8   13   8   13   1   1   1   1 } 内部セル初期化カード
TMS   500D0   8   13   8   13   1   1   1   1
&END

```

注) 内部セル初期化カードの各変数内容

POOL : プールの存在範囲

GNAP : ナトリウム注入量 [kg/s/m²] = 漏洩率 [kg/s] / プール面積 [m²]

TMS : プールの初期温度とプールの範囲 [°C]

注入するナトリウム総重量は、体積が $3 \times 3 \times 0.05 = 0.45 [\text{m}^3]$ で、温度 500°C での液体ナトリウム密度が 832.2 [kg/m³] であることから、 $832.2 [\text{kg}/\text{m}^3] \times 0.45 [\text{m}^3] = 374.49 [\text{kg}]$ である。

374.49 [kg] のナトリウムを面積 $3 \times 3 [\text{m}^2]$ の受け皿に 1 秒間で注入する。ナトリウム注入量変数 GNAP と時間依存の過渡関数を設定し、両者の積が注入速度となるように設定する。

(1) ナトリウム注入量変数 GNAP を $374.49 [\text{kg}] / 1 [\text{s}] / (3 \times 3) [\text{m}^2] = 41.61 [\text{g}/\text{s}/\text{m}^2]$

(2) 0~1 秒までが 1 で、その後は 0 であるような過渡関数を設定

(1) と (2) の積が注入速度となることから、1 秒後の累積注入量は設定したい全ナトリウム総量 374.49 [kg] となる。ここで、内部セル初期化カード 2 行目の最後の番号は、namelist DATA にて宣言する過渡関数の番号であり、上記 &DATA にて示した過渡関数を指定している。

ナトリウムプールが正しく設定されたかは、計算セル上のプール組成量 WPNA 変数の値で確認した。WPNA 変数は、印刷オプション NTHPR において出力変数種を 56 とすると output.dat に出力される。4 章の解析体系の場合、プールエリアは一辺 0.5[m] の等間隔メッシュであることから、各セルのプール面積は $0.5 \times 0.5 = 0.25 [\text{m}^2]$ となる。これらの各セルにおいて、1 秒時点のナトリウム量が $41.61 [\text{g}/\text{s}/\text{m}^2] \times 1 [\text{s}] \times 0.25 [\text{m}^2] = 10.4025 [\text{kg}]$ となつていれば正しく注入されたことを示す。

付録 3.SPHINCS におけるナトリウムプール及び構造材の入力設定

4 章のプール燃焼解析において用いた、SPHINCS によるナトリウムプールと構造材の設定において工夫した部分を解説する。

SPHINCS では、プールと床構造材を、円形形状を仮定した温度計算を行うリングモデルとして取り扱う。以下にインプットファイルの該当部分抜粋を示す。

入力ファイル sphinxs-inp.txt 抜粋

```

&POOL
 IDPOOL(1)=1, プール燃焼を考慮するかのフラグ
 POLDTEM(1)=773.15D0, 初期温度
 POLSOR(1)=374.49D0, 初期質量
 PAMAX(1)=9.0D0, プール面積
 ISMALL=1 プール以下の温度計算にリングモデルを用いるフラグ
 &END
 (中略)
 &MESH
 THICKL=0.010, RAMDL=38.3000, CPL=690.00, RHOL=7700.0, 構造体第一層目の物性値宣言
 THICKU=0.100, RAMDU=0.10000, CPU=1300.0, RHOU=180.00, 構造体第二層目の物性値宣言
 NBUN=2,
 RR(1)=0., 1.69256, 1.69257, } 径方向分割設定
 TLINI=323.15, 構造体初期温度
 LMESH=1, 軸方向分割数
 THICKB=1.000,
 RAMDB=1.70,
 CPB= 960.0,
 RHOB=2300.0, } 構造体第三層目の物性値宣言
 &END

```

4 章で設定したプールと構造材の断面形状は正方形である。しかし、本研究における SPHINCS による解析は一次元モデルを仮定しているため、燃焼面積が一致していれば形状が異なっていても、解析結果に影響を与えることはない。よって、SPHINCS でのプールと構造材は、AQUA-SF での断面積 $9[m^2]$ に相当する半径 $1.69257[m]$ の円形とした。

リングモデルでは、高さ方向だけではなく、設定した円柱を径方向に分割することにより、径方向の温度分布を求める機能がある。今回は一次元を仮定しているため、径方向の分割数は 1 分割が望ましい。しかし、1 分割は機能制限上設定できないため、2 分割とした。但し、2 分割目の径方向厚さを $1.69257 - 1.69256 = 0.00001[m]$ と非常に薄く設定することにより、2 分割目の影響をほとんど無視できるようにした。温度などの解析結果は 1 分割目の値で代表させた。