

# 模型実験とCFDシミュレーションによる ソーラーチムニーの最適な形状に関する検討

鍋島 佑基<sup>\*1</sup> 宋 城基<sup>\*2</sup>

自然換気に最適なソーラーチムニーの形状を調べるために、模型実験とCFDシミュレーションにより検討を行った。その結果、チムニー水平断面積が8 m<sup>2</sup>まではチムニー水平断面積の増加に伴って換気量は増加するが、それ以上の水平断面積では換気量は増加しないことが分かった。また、排気口面積が5~10 m<sup>2</sup>以上になると換気量はほとんど増加しないことが分かった。換気量が増加しなくなるチムニー水平断面積に対する排気口面積の断面積比はチムニー水平断面積が8 m<sup>2</sup>以下の場合1.2~2で、8 m<sup>2</sup>以上の場合0.7~1.2であった。また、アスペクト比が1:4、1:2、1:1のうち、1:4の換気量が最も多く、断面形状は細長い方が換気に有利であることが分かった。これらの結果から最適なチムニー形状は水平断面積8 m<sup>2</sup>、排気口10 m<sup>2</sup>、断面積比1.2、アスペクト比1:4であることが分かった。

キーワード：自然換気・ソーラーチムニー・CFD・チムニー形状・アスペクト比・排気口面積・模型実験

## はじめに

近年、地球温暖化やエネルギー問題が盛んに取りざたされ、環境負荷の削減や省エネルギーへの関心が高まっており、さらなる省エネルギー化、エネルギーの有効活用が注目されている。このような背景から、建築物の高気密化が進められたが、高気密化は室内空気質の維持が困難になる側面がある。そこで建築物の環境負荷を削減しつつ室内空気質を制御し、熱的快適性を確保するために太陽熱を利用したソーラーチムニー等の自然エネルギーを積極的に利用する動きが活発になっている。このソーラーチムニーに関する研究は、実験、実測、シミュレーションによる性能評価を中心に研究成果の報告がなされている。趙ら<sup>1),2)</sup>は北九州市立大学国際環境工学部校舎（以下、北九大）に導入されたソーラーチムニー（以下、チムニー）について、その設計時にチムニー水平断面積が5 m<sup>2</sup>以下、チムニー水平断

面のアスペクト比が1:2と1:3の場合において、流出口に対する排気口の面積比、チムニーの高さが換気量へ及ぼす影響について夏季を想定して検討した。その結果、チムニーの水平断面積が増加すれば換気量が増加し、チムニー水平断面のアスペクト比1:3がより多くの換気量を確保できるという結果を示した。徳永ら<sup>3)</sup>は火災時の駅舎内煙流動性状の把握のため、模型実験により検討した結果、チムニー水平断面積は16 m<sup>2</sup>から32 m<sup>2</sup>に大きくしても換気量は変わらないことを示した。宮崎ら<sup>4)</sup>はオフィスビルディングに導入された太陽光発電と一体化したエアフロー型チムニーについて、外気流入口の大きさとチムニーの幅が換気量に及ぼす影響をCFDシミュレーションによって検討し、チムニーの幅が0.2mより大きくなっても換気量は増加しないことを示した。一方でCFDシミュレーションによる自然換気の再現性に関する研究もある。Liuら<sup>5)</sup>は自然換気の再現シミュレーションに際し、複数の乱流モデルによる

\*1 豊橋技術科学大学 学生会員

\*2 豊橋技術科学大学 正会員

シミュレーション結果の比較を行った。その結果、温度差による換気シミュレーションは2方程式乱流モデル( $k-\epsilon$ 乱流モデル)が適していることを確認している。その他にも、換気量をより多く確保するために、チムニーの取り付け角度や幅について検討した研究<sup>6)~8)</sup>やPCMを組み込んでチムニーの換気量の増加を図った研究<sup>9)</sup>などチムニーの自然換気に関する様々な研究<sup>10)~14)</sup>が行われている。しかし、これら既往の研究は趙らのようにチムニー設計に重要なチムニー水平断面積、チムニー開口部、チムニー高さなどを総合的に評価していない。また、既往の研究から一定のチムニー水平断面積までは水平断面積の増加に伴って換気量が増加し、それ以上では換気量は増加しないと示しているが、趙らは5 m<sup>2</sup>以上のチムニーについて検討していない。

そこで、本研究では北九大に設置されたチムニーを研究対象モデルにし、1/20の縮小模型による中間期における煙突効果の再現実験を行った。そして同実験を実大再現したCFDシミュレーション計算モデルが実現現象を再現できたか確認したうえで、再現できたCFD計算モデルを用いてチムニー水平断面積が2.8 m<sup>2</sup>から18 m<sup>2</sup>までのチムニーについてチムニー水平断面の縦横比(以下、アスペクト比)、排気口面積と換気量の関係、チムニー水平断面積に対する排気口面積の面積比(以下、断面積比)と換気量の関係を総合的に評価し、換気量をより多く確保できる最適な形状について検討した。ここで、今回の最適なチムニーの形状検討にはシャフト高さ(建物高さ)と流出口面積およびチムニー内側表面温度は固定した場合におけるものである。

## 1. 縮小模型実験とCFDシミュレーションの再現性

### 1.1 縮小模型実験

#### (1) 縮小模型の相似則

模型は北九大のチムニーの1/20の縮小模型を作製した。縮小模型の相似条件を満足させるために既往の研究<sup>1)</sup>では以下の相似条件を示した。まず、空気の流れ場に対する相似則に関して式(1)の条件を満たす必要がある。ここに、 $n_1$ は模型縮率、 $n_v$ は空気速度の縮率、 $n_{\Delta\theta}$ は温度差の縮率である。

$$\frac{n_1 n_{\Delta\theta}}{n_v^2} = 1 \quad \dots\dots (1)$$

また、境界条件に対する相似則に関しては式(2)を満足する必要がある。ここに、 $n_k$ は熱貫流率の縮率である。

$$n_v = n_k \quad \dots\dots (2)$$

本模型実験では模型縮率  $n_1$  を 1/20、温度差縮率  $n_{\Delta\theta}$  を 1 としたため、式(1)より空気速度の縮率  $n_v=1/\sqrt{22}$  となり、式(2)から熱貫流率の縮率  $n_k$  も同様に  $1/\sqrt{22}$  となる。実際、他の文献<sup>15)</sup>においても模型実験では空気速度の縮率をあわせることは難しいので、熱貫流率の縮率をあわせて模型

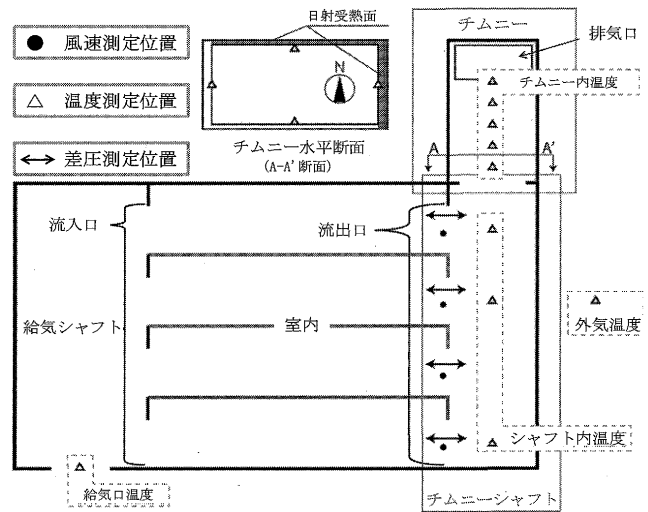


図-1 模型概略図と測定位置及び受熱面位置

表-1 測定項目および測定機器一覧

測定項目	測定箇所	測定点数	使用機器	機器形成
空気温度	チムニー内	5	熱電対	T型熱電対
	シャフト内	3		
	外気	1		
	給気口	1		
	チムニー内壁表面	5		
差圧	各階室内とシャフト内	4	微差圧計	EMR1B1FVD
風速	各階流出口	4	多点式風速計	model 1500
			面状ヒータ	SAMICON230SR
			線状ヒータ	SIL10310
表面温度設定			ボルトスライダ	SK110

表-2 実験ケース

実験ケース	チムニー水平断面積	面積比 排気口/流出口	日射受熱面	チムニー高さ	温度差設定(壁面-外気)
I-1	0.02m <sup>2</sup>	2.74	北面+東面	実寸:8m	北面:5℃ 東面:7℃
I-2	(実寸8m)	0.5			

実験を行っている。そこで本模型実験も同様に熱貫流率の縮率を満足させるようにした。ここで、北九大のチムニーの日射受熱面壁体部分の熱貫流率は 3.513W/(m<sup>2</sup>・K)であるため、模型の熱貫流率は 0.783W/(m<sup>2</sup>・K)となり、これを満足させるために厚さ 50mmの断熱材を模型のチムニー部に施した。

#### (2) 模型実験概要と実験条件

図-1の模型概略図に示すように模型は給気口、給気シャフト、流入口、各階室内、流出口、チムニーシャフト、チムニー、排気口で構成されている。チムニー内壁表面には面状ヒーターを設置し、チムニー内壁表面と外気が設定温度差になるように出力を調整した。チムニー内壁表面の日射受熱面は実際のチムニーと同様に北面と東面のみであり、この面のみに温度設定した。西面と南面はガラス面である。チムニー内壁表面と外気の設定温度差は2006年11月の実測データをもとに設定した。図-1に測定箇所を、表-1に測定項目と測定数および測定機器を示す。空気温度はチムニーシャフト内3点、チムニー内5点、給気口1点と外気1

模型実験とCFDシミュレーションによるソーラーチムニーの最適な形状に関する検討

点を測定し、風速と差圧は各階流出口で測定した。表-2に流出口に対する排気口の断面積比と設定温度差を示す。また、1Fから4Fの流出口の合計面積はおよそ0.012 m<sup>2</sup> (実寸4.68 m<sup>2</sup>)で、1Fは0.006 m<sup>2</sup> (実寸2.34 m<sup>2</sup>)、2~4Fは0.002 m<sup>2</sup> (実寸0.78 m<sup>2</sup>)である。チムニーシャフトおよびチムニーの水平断面積は0.02 m<sup>2</sup> (実寸8 m<sup>2</sup>[2m×4m])である。実験は流出口に対する排気口の面積比は2.74と0.5の2パターンについて行った。

1.2 CFDシミュレーションモデルと計算概要

(1) モデル概要

本シミュレーションは商用「CFD2000 Professional ver5.2」を使用して計算した。図-2にCFDシミュレーションモデルの概略図を示す。モデルは模型実験を実大再現<sup>1)</sup>したもので、各寸法はチムニー水平断面積8 m<sup>2</sup>、チムニー高さ8m、各階高さ4m、シャフト高さ16mである。本計算モデルは室内の一部(チムニーシャフトから1m)と流入口、チムニーシャフト、排気口で構成されており、チムニー一部から計算領域の境界面までに1~3mの空間を設けることで、煙突効果を忠実に再現できるよう配慮した。

(2) 計算メッシュ

計算メッシュは、境界面付近と流出口、排気口付近など空気の流れが複雑になると予想される場所において発散を防ぐため特に細かくメッシュ化した。メッシュ数<sup>2)</sup>はそれぞれX:15、Y:87、Z:15である。

(3) 境界条件

表-3にCFD計算条件を示す。基本条件として、計算モデルはk-ε乱流モデルを用い、体積力を浮力として定常になるまで計算した。境界条件については空気の流入、流出を自然流入(圧力型)とし、日射受熱面を除く全ての壁面を完全断熱とし、受熱面設定温度は表-2の模型実験と同様に設定した。

(4) 計算の収束判定条件

本報で用いたCFD商用ソフトの計算収束判定は、計算領域に任意の計算監視点を定め、その点の残差値が1/1000以下になることで定常・収束を判断する。本報の全計算ケースでは、チムニー内部に3点の監視点を設け、全ての監視点の残差値が1/1000以下になり、さらに残差プロットの曲線が平らである事を確認した。

<sup>1)</sup> 本報は趙ら<sup>1),2)</sup>と同じく縮尺1/20の模型実験と実大スケールのCFDモデルを比較しているが、これは本報が趙らと同様にチムニーとシャフトをCFD計算領域としているためである。また、模型実験は相似則に従い実験を行っており、実験結果を実大換算することによる誤差は生じないと考えられる。さらに、今回の計算では浮力換気によって示される傾向は模型とCFDにおいて一致した。  
<sup>2)</sup> 本報のCFDモデルのメッシュ数は他の研究<sup>12)</sup>と比較しても十分であった。また、メッシュの感度分析によって比較しても計算結果に差は生じなかったことから、現在のメッシュ数が適切であることを確認した。

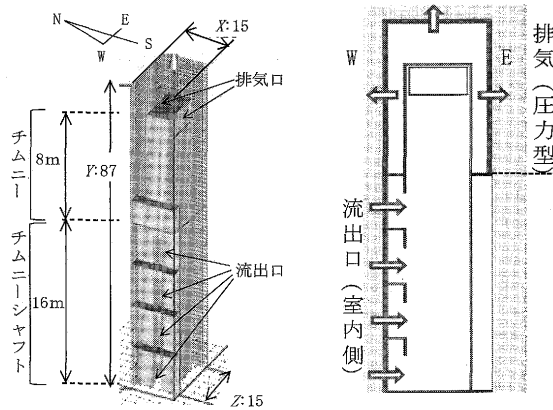


図-2 CFD計算モデル概形(左)と空気の流れ(右)

表-3 CFD計算条件

CFD計算条件	
CFDソフト	CFD2000 Pro. ver5.2
流体モデル	標準k-ε乱流モデル
流体	AIR AS IDEAL GAS(理想気体)
体積力	Buoyancy Force(浮力場)
計算領域流入型	自由流入 (Pressure : 圧力型)
計算領域流出型	
壁面設定	完全断熱

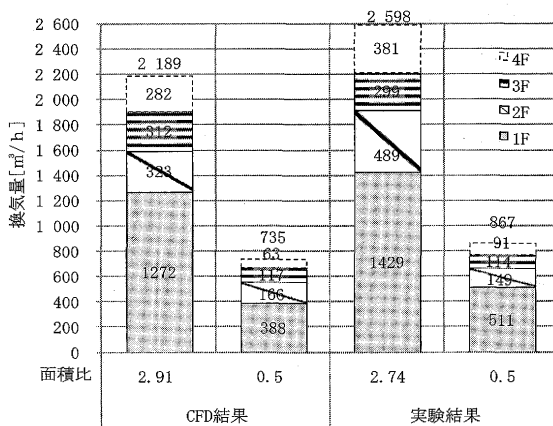
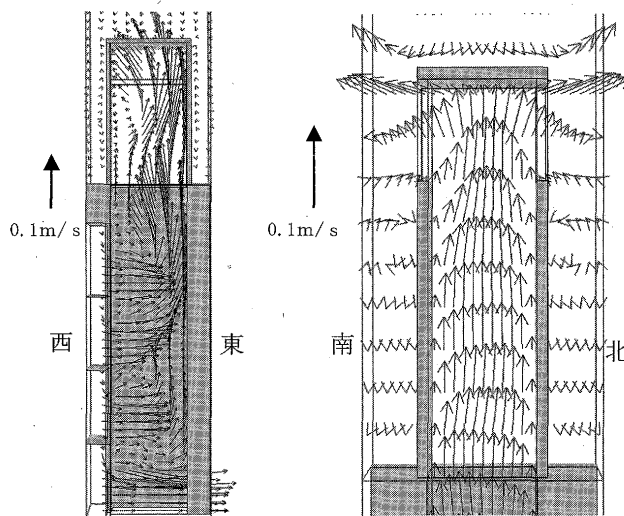


図-3 CFD計算結果と実験結果の比較



(a) 東-西断面図 (b) 南-北チムニー断面図

図-4 面積比2.91におけるチムニー内風速分布

(5) 模型実験との差異

1Fから4Fの流出口の合計面積は実験と同様に4.68㎡であるが、CFD計算モデル化の都合上、流出口に対する排気口の面積比は2.91と0.5であり、実験と若干異なる。

1.3 実験結果とシミュレーション結果

(1) 換気量

図-3に模型実験とシミュレーションの面積比に対する各階の換気量を示す。模型実験結果の流出口に対する排気口の面積比が2.74の時、換気量は2598㎡/hで、面積比が0.5の時は867㎡/hであった。一方シミュレーション結果の面積比2.91の時の換気量は2189㎡/hで、面積比0.5の時の換気量は735㎡/hであった。シミュレーション結果の換気量は模型実験結果より約15%小さかったが、各階換気量は模型実験とシミュレーション共に1階の換気量が最も多く、上層に行くほど小さくなる傾向は同じであった。

(2) 面積比と換気量の関係

実験では流出口に対する排気口の面積比が2.74から0.5になると換気量は減少する傾向を示したが、シミュレーション結果もこれと同様の傾向を示した。

以上のことから今回のCFDシミュレーション計算モデルは模型実験を再現できており、実現象の検討には十分であると考えられる。

(3) 計算領域内の流れ場

図-4(a)に面積比2.91における東西方向の垂直断面図を示す。チムニー内の風速は、東側が速く西側が遅くなっていた。また、各階室内の流出口からシャフト内部に空気が流入しており、風速は1Fが最も速く、上階に行くほど遅くなっていた。図-4(b)にチムニー部周辺の南北方向における垂直断面図を示す。チムニー内の風速は中央部で速く、壁面付近では遅かった。また、排気口の上部ではチムニーから外へ空気が流出しているが、排気口の下部では外からチムニーへ空気が流入しており、排気口付近での空気の流入が自由に行われていることが確認できた。

今回のモデルは排気口から計算領域境界面までの距離が1mと短く、排気口からチムニー外への排気が阻害されることが考えられるが、排気口周辺の境界面において流速は減少しておらず、排気はスムーズに行われていることを確認した。

2. シミュレーションによる最適形状の検討内容

チムニーの換気量に影響するチムニー水平断面積とアスペクト比、排気口面積、断面積比の関係を調べるため、以下の3点について検討した。

(1) チムニー水平断面積と換気量の検討

換気量を最大限に確保できるチムニー水平断面積についてアスペクト比毎に検討した。図-5に全ケースの形状と水

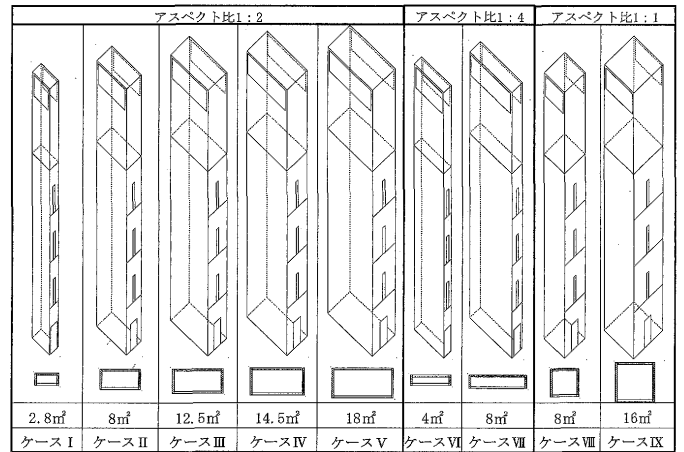


図-5 CFD計算モデル形状

表-4 CFD計算ケース

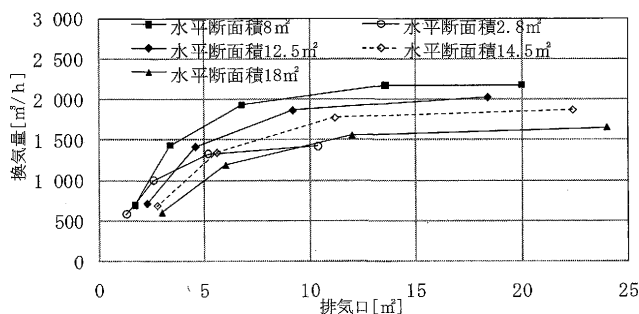
ケース	アスペクト比	チムニー 水平断面積[㎡]	排気口[㎡]	断面積比 (排気口/水平断面積)
case1-1	1:2	2.8㎡ (1.3×2.6)	10.4	3.71
case1-2			5.2	1.86
case1-3			2.6	0.93
case1-4			1.3	0.46
case2-1			20	2.50
case2-2		8㎡ (2×4)	13.6	1.70
case2-3			6.8	0.85
case2-4			3.4	0.43
case2-5			1.7	0.21
case3-1			12.5㎡ (2.5×5)	18.4
case3-2		9.2		0.74
case3-3		4.6		0.37
case3-4		2.3		0.18
case4-1		14.5㎡ (2.7×5.4)		22.4
case4-2			11.2	0.77
case4-3	5.6		0.39	
case4-4	2.8		0.19	
case5-1	18㎡ (3×6)		24	1.33
case5-2		12	0.67	
case5-3		6	0.33	
case5-4		3	0.17	
case6-1		1:4	4㎡ (1×4)	13.6
case6-2	6.8			1.70
case6-3	3.4			0.85
case6-4	1.7			0.43
case7-1	8㎡ (1.4×5.7)		21	2.63
case7-2			10.5	1.31
case7-3			5.3	0.66
case7-4	2.6	0.33		
case8-1	1:1	8㎡ (2.8×2.8)	14.6	1.83
case8-2			9.7	1.21
case8-3			4.9	0.61
case8-4			2.4	0.30
case8-5			1.2	0.15
case9-1		16㎡ (4×4)	13.6	0.85
case9-2			6.8	0.43
case9-3			3.4	0.21
case9-4	1.7	0.11		

平面形状を示す。アスペクト比1:2についてはチムニー水平断面積2.8㎡、8㎡、12.5㎡、14.5㎡、18㎡の5ケース、アスペクト比1:4についてはチムニー水平断面積4㎡、8㎡の2ケース、アスペクト比1:1についてはチムニー水平断面積8㎡、16㎡の2ケースの計9ケースについて検討した。

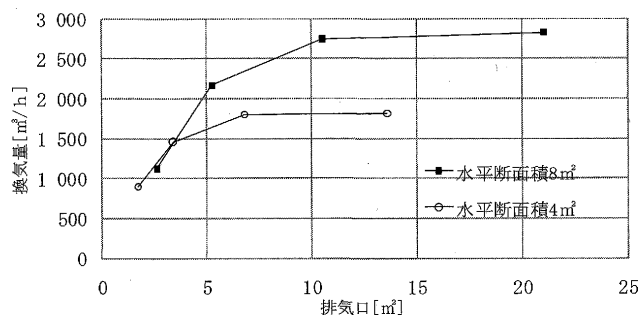
(2) 排気口および断面積比の検討

排気口面積が換気量に及ぼす影響について調べるために、

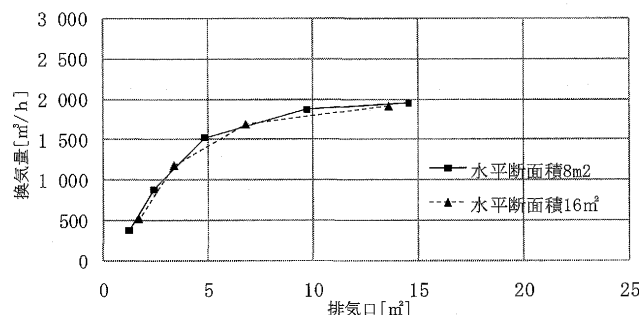
## 模型実験とCFDシミュレーションによるソーラーチムニーの最適な形状に関する検討



(a) アスペクト比 1 : 2



(b) アスペクト比 1 : 4



(c) アスペクト比 1 : 1

図-6 水平断面面積別排気口面積と換気量の関係

各ケースの排気口面積を4~5段階に変化させ、排気口面積と換気量の関係を検討した。室内からの総流出口面積は全ケース共通で4.68 m<sup>2</sup>に固定した。排気口は北面と南面の2面で、排気口面積はケース毎に異なる。また、チムニー水平断面面積に対する排気口の有効な面積について検討した。以下、「排気口面積/チムニー水平断面面積」を断面積比と定義する。ケースごとの断面積比及び排気口面積は表-4に示す通りである。

## (3) アスペクト比の検討

アスペクト比が換気量に及ぼす影響を検討するため、チムニー水平断面面積8 m<sup>2</sup>におけるアスペクト比別の断面積比と換気量の関係を調べ、最適なアスペクト比と最適な排気口面積について検討した。

表-4にCFDシミュレーションの計算ケースと計算条件を示す。日射受熱面は全ケースでチムニー北面と東面とし、ケース毎に日射受熱面の総面積（以下、受熱面積）は異なる。また、日射受熱面の設定温度は模型実験と同様とした。

北九大に設置されているチムニー同様にチムニー高さは8 m、総流出口面積は4.68 m<sup>2</sup>で、全ケース共通とした。

## 3. シミュレーション結果

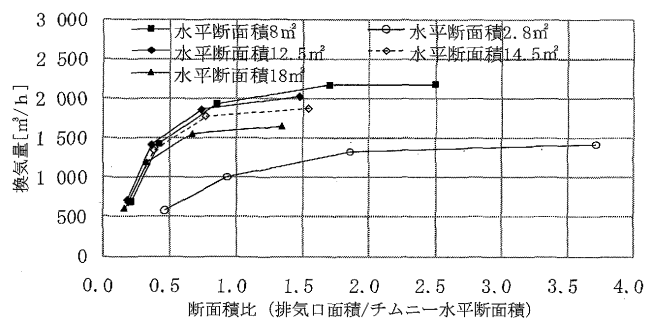
## 3.1 チムニー水平断面面積別、排気口面積と換気量の関係

## (1) アスペクト比 1 : 2

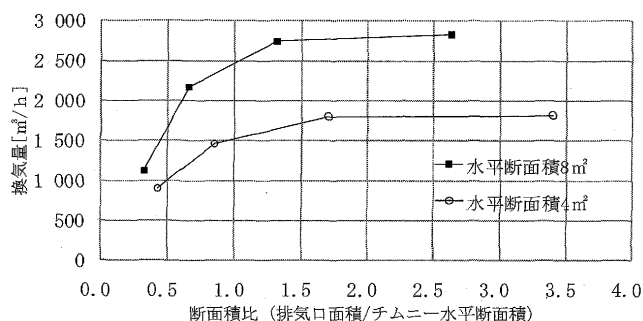
図-6(a)にアスペクト比1:2におけるチムニー水平断面面積別の換気量と排気口面積の関係を示す。全体の傾向として排気口面積が増加すると換気量は増加するが、ある排気口面積以上からは増加しないことを示した。また、チムニー水平断面面積が2.8 m<sup>2</sup>の場合では、排気口が5.2 m<sup>2</sup>以上になると換気量が1400 m<sup>3</sup>/hからほとんど増加しなくなった。チムニー水平断面面積が8 m<sup>2</sup>の場合では、排気口が10 m<sup>2</sup>以上になると換気量が2200 m<sup>3</sup>/hからほとんど増加しなくなった。また、チムニー水平断面面積が2.8 m<sup>2</sup>から8 m<sup>2</sup>まではチムニー水平断面面積の増加に伴って換気量も増加する傾向を示した。これは、チムニー水平断面面積が増加すると受熱面積が増加し、空気抵抗は小さくなるためと考えられる。また、この傾向は5 m<sup>2</sup>以下において実験を行った趙らの結果「チムニー水平断面面積が増加すると換気量が増加する」と一致する結果であった。

ところが、チムニー水平断面面積が12.5 m<sup>2</sup>の場合では排気口が9.2 m<sup>2</sup>まで、チムニー水平断面面積が14.5 m<sup>2</sup>の場合では排気口が11.2 m<sup>2</sup>まで、チムニー水平断面面積が18 m<sup>2</sup>の場合では排気口が12 m<sup>2</sup>まで換気量は増加するが、排気口面積がこれ以上になると換気量は増加しない結果であった。また、チムニー水平断面面積が8 m<sup>2</sup>から18 m<sup>2</sup>まではチムニー水平断面面積が増加しても換気量は増加せず、減少する傾向であった。この理由としてはチムニー水平断面面積が8 m<sup>2</sup>以上の場合、チムニー水平断面面積に対して受熱面積の割合が小さく、そのためチムニー内部への伝熱が少なくなり、換気量が減少したと考えられる。このことから、チムニー水平断面面積が12.5 m<sup>2</sup>以上のチムニーはチムニー水平断面面積が増加しても換気量が減少することが分かった。また、これは16 m<sup>2</sup>以上のチムニーについて検討した徳永らの結果「チムニー水平断面面積を大きくしても換気能力が向上するとは限らない。」と一致する結果であった。

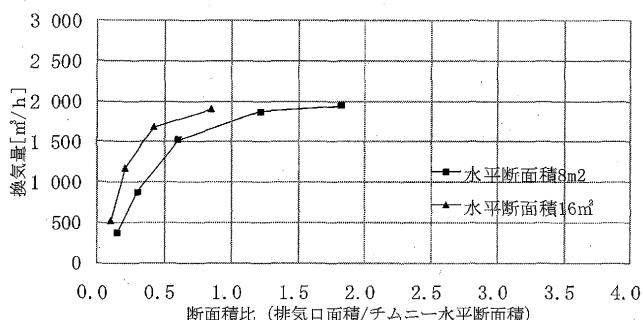
以上のことからチムニー水平断面面積8 m<sup>2</sup>以下の場合、換気量はチムニー水平断面面積の増加に伴って増加するが、排気口面積が5~10 m<sup>2</sup>以上になると換気量がほとんど増加しなくなることが分かった。また、チムニー水平断面面積が8 m<sup>2</sup>以上の場合、換気量はチムニー水平断面面積が増加すると減少し、排気口面積が10~13 m<sup>2</sup>以上になると換気量がほとんど増加しなくなることが分かった。従って、アスペクト比が1:2においてチムニー水平断面面積は8 m<sup>2</sup>が最適な大きさで、排気口面積は10 m<sup>2</sup>程度が有効であることが分かった。



(a) アスペクト比 1:2



(b) アスペクト比 1:4



(c) アスペクト比 1:1

図-7 水平断面積別断面積比と換気量の関係

## (2) アスペクト比 1:4

図-6(b)にアスペクト比 1:4 におけるチムニー水平断面積別の換気量と排気口面積の関係を示す。チムニー水平断面積が 4 m<sup>2</sup>の場合、排気口が 6.8 m<sup>2</sup>以上になると換気量が 1 800 m<sup>3</sup>/h からほとんど増加しなくなった。また、チムニー水平断面積が 8 m<sup>2</sup>の場合、排気口が 10.5 m<sup>2</sup>以上になると換気量が 2 800 m<sup>3</sup>/h からほとんど増加しなくなった。このことから、チムニー水平断面積が 4 m<sup>2</sup>から 8 m<sup>2</sup>に増加すると換気量は増加することがわかった。この傾向はアスペクト比 1:2 におけるチムニー水平断面積 8 m<sup>2</sup>以下の場合と一致した。

## (3) アスペクト比 1:1

図-6(c)にアスペクト比 1:1 における換気量と排気口面積の関係を示す。チムニー水平断面積が 8 m<sup>2</sup>から 16 m<sup>2</sup>に増加しても換気量はほぼ同じであり、チムニー水平断面積が 8 m<sup>2</sup>、16 m<sup>2</sup>両方ともに排気口面積が約 10 m<sup>2</sup>以上で換気量がほとんど増加しなくなった。これは、チムニー水平断面積

が 16 m<sup>2</sup>のチムニーは 8 m<sup>2</sup>に比べてチムニー水平断面積に対する受熱面積の割合が約 0.7 倍小さくなるが、チムニー内の空気抵抗も小さくなるため、これらのバランスによってチムニー水平断面積が大きくなっても換気量が減少しなかったと考えられる。

## 3.2 チムニー水平断面積別、断面積比と換気量の関係

## (1) アスペクト比 1:2

図-7(a)にアスペクト比 1:2 における換気量と断面積比の関係を示す。チムニー水平断面積に関係なく、ある一定の断面積比までは断面積比の増加に伴って換気量が増加する傾向を示した。チムニー水平断面積が 2.8 m<sup>2</sup>の場合には他のケースに比べて断面積比に対する換気量の増加が小さく、換気量が増加しなくなる断面積比も他のケースと大きく異なっていた。これはチムニー水平断面積 2.8 m<sup>2</sup>のチムニーはチムニー水平断面積が小さく、チムニー内の空気抵抗が他のケースより大きいためと考えられる。また、換気量が増加しなくなる断面積比は、チムニー水平断面積 2.8 m<sup>2</sup>では断面積比 2 以上、チムニー水平断面積 8 m<sup>2</sup>では断面積比 1 以上、チムニー水平断面積 12.5 m<sup>2</sup>、14.5 m<sup>2</sup>、18 m<sup>2</sup>では断面積比 0.7 以上であった。このことからアスペクト比 1:2 において有効な断面積比は、チムニー水平断面積 8 m<sup>2</sup>以上の場合には断面積比が 0.7~1.2 で、チムニー水平断面積が 8 m<sup>2</sup>以下の場合には断面積比が 1.2~2 であることが分かった。

## (2) アスペクト比 1:4

図-7(b)にアスペクト比 1:4 における断面積比と換気量の関係を示す。チムニー水平断面積 4 m<sup>2</sup>の場合、8 m<sup>2</sup>に比べて断面積比に対する換気量の増加は小さかった。これはチムニー水平断面積が 4 m<sup>2</sup>のチムニーは 8 m<sup>2</sup>より空気抵抗が大きく、受熱面積が小さいためと考えられる。また、チムニー水平断面積 4 m<sup>2</sup>では断面積比 1.7 以上で、チムニー水平断面積 8 m<sup>2</sup>では断面積比 1.2 以上で換気量がほとんど増加しなくなった。このことからアスペクト比 1:4 においてチムニー水平断面積 4 m<sup>2</sup>では断面積比は 1.7 が、チムニー水平断面積 8 m<sup>2</sup>では 1.2 が有効な断面積比であることが分かった。この傾向はアスペクト比 1:2 におけるチムニー水平断面積が 8 m<sup>2</sup>以下の時の傾向と一致した。

## (3) アスペクト比 1:1

図-7(c)にアスペクト比 1:1 における断面積比と換気量の関係を示す。チムニー水平断面積 16 m<sup>2</sup>は 8 m<sup>2</sup>に比べると断面積比に対する換気量の増加が大きい。これは 16 m<sup>2</sup>のチムニー内の空気抵抗が小さく、受熱面積が大きいためと考えられる。また、チムニー水平断面積 8 m<sup>2</sup>では断面積比 1.2 以上で、チムニー水平断面積 16 m<sup>2</sup>では断面積比 0.7 以上で換気量の増加が緩やかであった。このことから、アスペクト比 1:1 においてチムニー水平断面積 8 m<sup>2</sup>では断面積比は 1.2 が、チムニー水平断面積 16 m<sup>2</sup>では 0.7 が有効な断面積

## 模型実験とCFDシミュレーションによるソーラーチムニーの最適な形状に関する検討

比であることが分かった。また、この傾向はアスペクト比1:2におけるチムニー水平断面積が8 m<sup>2</sup>以上の時の傾向と一致した。

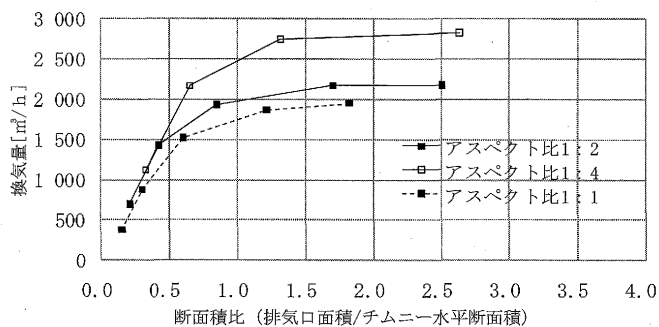


図-8 アスペクト比別、断面積比と換気量 (水平断面積 8 m<sup>2</sup>)

### 3.3 アスペクト比と換気量の関係

図-8にチムニー水平断面積8 m<sup>2</sup>におけるアスペクト比別の断面積比と換気量の関係を示す。同じ断面積比に対して換気量が最も大きいのはアスペクト比1:4、次いでアスペクト比1:2、最も換気量が小さかったのがアスペクト比1:1であった。このことからアスペクト比1:4のチムニーが最も有効であることが分かった。これはアスペクト比1:4のチムニーの受熱面積がアスペクト比1:1のケースの1.26倍、アスペクト比1:2のケースの1.18倍大きいことが原因の一つとして考えられる。また、全てのケースで断面積比1.2以上になると換気量がほとんど増加しなくなった。従って、チムニー水平断面積8 m<sup>2</sup>における適切な排気口面積は10 m<sup>2</sup>程度であることが分かった。

## 4. 結論

自然換気に最適なチムニー形状を調べるために、換気性能に影響を及ぼすチムニー水平断面積、排気口面積、断面積比、アスペクト比について模型実験とCFDシミュレーションにより検討を行った。以下に、得られた知見をまとめる。

- 1) CFDシミュレーションと縮小模型実験との比較の結果、実験の方がシミュレーションより換気量は約1割程度大きかったが、各階換気量は実験とシミュレーションともに1階の換気量が最も多く、上層に行くほど小さくなる傾向を示した。このことから今回のCFDシミュレーション計算モデルは模型実験をよく再現できており、実現象の検討には十分であることが確認できた。
- 2) チムニー水平断面積が8 m<sup>2</sup>以下の場合、チムニー水平断面積の増加に伴って換気量は増加することが分かった。これはチムニー水平断面積が大きくなることで受熱面積が増加し、チムニー内の空気抵抗が小さくなったためと考えられる。

- 3) チムニー水平断面積が8 m<sup>2</sup>以上の場合、チムニー水平断面積が増加しても換気量は増加せず、減少することが分かった。これは、チムニー水平断面積が大きくなることで空気抵抗は小さくなるが、チムニー水平断面積に対する受熱面積の割合は小さくなり、チムニー内部空気への伝熱が少なくなったためと考えられる。
- 4) 以上のことから、最も多くの換気量を得ることができるとチムニー水平断面積は8 m<sup>2</sup>であることが分かった。
- 5) チムニー水平断面積が8 m<sup>2</sup>以下の場合には排気口面積が5~10 m<sup>2</sup>以上で、チムニー水平断面積が8 m<sup>2</sup>以上の場合には排気口面積が10~13 m<sup>2</sup>以上で換気量はほとんど増加しなくなった。このことから一定の排気口面積までは排気口面積の増加に伴って換気量は増加し、それ以上の排気口面積では換気量は増加しないことが分かった。
- 6) チムニー水平断面積に対する排気口の断面積比はチムニー水平断面積が8 m<sup>2</sup>以下では1.2~2以上で、チムニー水平断面積が8 m<sup>2</sup>以上では0.7~1.2以上で換気量がほとんど増加しなくなることが分かった。
- 7) チムニー水平断面積が8 m<sup>2</sup>の場合において、同じ断面積比に対して換気量はアスペクト比1:4、アスペクト比1:2、アスペクト比1:1の順に多い結果であった。このことからアスペクト比1:4のチムニーが最も有効であることが分かった。これはアスペクト比1:4の受熱面積がアスペクト比1:1の1.26倍、アスペクト比1:2の1.18倍大きいことが原因の一つとして考えられる。
- 8) チムニー水平断面積8 m<sup>2</sup>における適切な排気口面積は10 m<sup>2</sup>程度、断面積比は1.2で、これらはアスペクト比に関わらず同じであった。
- 9) 今回のチムニーの最適な形状検討は、シャフト高さとし流出口面積およびチムニー内側表面温度を固定した場合のもので、今後シャフト高さや温度差等を含めた、より総合的な最適形状について検討する予定である。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたって多大な協力、助言をいただいた早稲田大学木村建一名誉教授、北九州市立大学相楽典奏教授、(株)菱和品田宜輝氏および計測データを提供していただいた千代田計装(株)の森利之氏と永末憲治氏、ソーラーチムニーを含め同大学校舎の環境計画設計に関与された(株)日本設計の桂木宏昌氏、模型実験に協力してくれた豊橋技術科学大学土井幸太氏に、ここに感謝の意を表す。この研究の一部は(財)前田記念工学振興財団の研究助成による。

## 参 考 文 献

- 1) 趙晟佑、木村健一：校舎建築の自然換気システムにおけるソーラーチムニーの性能予測に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第 537 号、pp. 37-42、2001 年 11 月
- 2) 趙晟佑、木村健一：ソーラーチムニーによる性能予測に関する実験研究、空気調和衛生工学会論文集、No81、pp. 11-19、2001 年 7 月
- 3) 徳永英他：模型実験による火災時の駅舎内煙流動性上の把握、日本建築学会環境系論文集、第 616 号、pp. 9-16、2007 年 6 月
- 4) 宮崎隆彦、秋澤淳他：416 太陽光発電一体型ソーラーチムニーの CFD 解析、日本機械学会第 14 回環境工学総合シンポジウム講演論文集、No04-10、pp.380-383、2004 年 7 月
- 5) Pei-Chun Liu, Hsien-Te Lin : Evaluation of buoyancy-driven ventilation in atrium buildings using computational fluid dynamics and reduced-scale air model, *Building and Environment*, 44, (2009), 1970-1979
- 6) Z.D. Chena: An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux, *Building and Environment*, 38, (2003), 893- 906
- 7) K.S. Ong, C.C. Chow: Performance of a solar chimney, *Solar Energy*, 74, (2003), 1-17
- 8) N.K. Bansal: Modeling of window-sized, solar chimneys for ventilation, *Building and Environment*, 40 ,(2005), 1302-1308
- 9) 金子豊、相良和伸、山中俊夫、甲谷寿史、SHARMA Someshwer: PCM を組み込んだソーラーチムニーの換気性能に関する基礎的研究 (その 2) ソーラーチムニーの換気計算モデルの検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp.591-592、2005 年
- 10) Wilson, D.J and I.S. Walker. 1992. Feasibility of passive ventilation by constant area vent to maintain indoor air quality in houses. *Proceeding of Indoor Air Quality '92 ASHRAE/ACGIH/AIHA Conference*, San Francisco. October.
- 11) Qingyan Chen, Weiran Xu: A Zero-equation Model for Indoor Airflow Simulation, *Energy and Buildings* 28(1998), 137-144
- 12) 丁文婷、長谷見雄二、峯岸良和：アトリウム型ソーラーチムニーにおける自然換気と避難経路遮煙の両立可能性 日本建築学会環境系論文集、No. 596、pp. 1-6、2003 年 7 月
- 13) 峯岸良和、長谷見雄二、丁文婷：煙制御機能を持つアトリウム型ソーラーチムニーのゾーンモデルによる自然換気性能予測、日本建築学会系論文集第 580 号、1-7、2004 年 6 月
- 14) 市街地風環境予測のための流体水位置解析ガイドブック-ガイドラインと検証用データ、日本建築学会、2007 年 7 月
- 15) 空気調和衛生工学便覧第 12 版 1 基礎編、空気調和・衛生工学会、pp. 233-239、1995 年 3 月

(平成 21.8.10 原稿受付)

## Study on the Best Form of Solar Chimney by Model Experiment and CFD Simulation by Yuki NABESHIMA <sup>\*1</sup>, Sung-Ki SONG <sup>\*2</sup>

**Key Words:** Natural Ventilation, Solar Chimney, CFD, Chimney Form, Aspect Ratio, Exhaust Outlet, Model Experiment

**Synopsis :** This study examined the best form of the solar chimney for the natural ventilation by the scale down experiment and CFD simulation. As a result, in case of the horizontal cross section of the chimney smaller than 8 m<sup>2</sup>, the ventilation rate has increased when the horizontal cross section of the chimney increases. In case of the horizontal cross section 8 m<sup>2</sup> or more, the ventilation hasn't increased when the horizontal cross section increases. And ventilation rate has hardly increased when the exhaust outlet is more than 5~10 m<sup>2</sup>. Also, in case of the horizontal cross section of the chimney smaller than 8 m<sup>2</sup>,

the ventilation rate has hardly increased when the cross-section ratio of the exhaust outlet to the horizontal cross sections is 1.2~2. In case of the horizontal cross section 8 m<sup>2</sup> or more, the ventilation rate has hardly increased when the cross-section ratio is 0.7~1.2. And the aspect ratio 1:4 has shown maximum ventilation rate in case of 8 m<sup>2</sup> of the chimney horizontal cross section.

From these results, it found that the best form of solar chimney is 8 m<sup>2</sup> of the horizontal cross section, 10 m<sup>2</sup> of the exhaust outlet, 1.2 of the cross-section ratio and 1:4 of the aspect ratio.

(Received August 10, 2009)

\*1 Toyohashi University, Student Member

\*2 Toyohashi University, Member