

3次元熱橋の定常時温度分布の計測および数値予測に関する研究

市村朋昭¹・小原聡司

Study on Experiment and Numerical Analysis of the Temperature Distribution of 3-Dimensional Thermal Bridges under the Steady State

Tomoaki ICHIMURA¹ and Satoshi OBARA

(Received September 30, 2004)

Abstract On thermal bridge which occurs the three-dimensional heat flow, numerical analysis and experiment were carried out, and their temperatures were compared. The software TB3D/FDM was used in calculation of the temperature distribution. The experiment was carried out at the artificial meteorological rooms which have indoor and outside space, and test specimen was set on the parting wall.

Surface heat transfer coefficients of the tested 3-dimensional heat-bridge wall were deduced from the results of obtained surface temperature by carefully experiment, and they were used in the simulation by TB3D/FDM. The experiment reproduced the indoor and outside space in two artificial meteorological rooms, and test specimen was installed in the parting wall.

As the result, there was a large temperature differences at the inner surface near the part of steel were crossed, and they were larger than that of the other part of surface.

The possibility of the problem of the 1-dimensional handling of the heat flow for the inner cavity air on walls used at TB3D/FDM was shown.

Keywords [Thermal Bridge, 3-Dimension, TB3D/FDM, Simulation, Experiment]

1 研究目的と背景

平成12年3月、新省エネ基準が次世代省エネ基準¹⁾となり、壁体の熱貫流率 K の強化に伴い、 K 値に大きな影響を及ぼす熱橋についても値を適切に見積もる必要が生じてきた。そこで、二宮らにより3次元伝熱解析ソフトウェア TB3D/FDM²⁾が開発されたが、その精度は未だに確認されていない。TB3D/FDMでは中空層に対して、厚さを熱抵抗で除した値を仮想の熱伝導率(以下、仮想熱伝導率)として与えるが、現在は単純に壁厚方向の中空層厚さを除した値を用いているため、実際の熱伝導率とは異なる値を与えていることになる。従って熱流方向が異なれば中空部抵抗は変化し、計算結果にも影響すると考えられる。そこで本研究では、TB3D/FDMの計算精度をより高めるような仮想熱

伝導率の整備を試みたいと考える。その前段階として、簡易な2~3次元熱橋構造の壁体モデルを用いて実験と計算より温度分布を求め、両者を比較することで、TB3D/FDMにおける現在の仮想熱伝導率の与え方が適当であるか判断した結果を報告する。

2 TB3D/FDM 概要

TB3D/FDMは設計支援、性能判定を目的に作られた3次元差分法による定常伝熱(透湿)計算プログラムである。しかし、計算に用いる中空部抵抗は2次元計算と同様の概念に基づいて与えられており、熱流が複雑になると考えられる3次元熱流において、計算精度が保たれているかは明らかにされていない。

3 温度計測方法と熱伝達率への換算方法

3.1 熱環境工学実験室と使用試験体の仕様

本研究に使用する熱環境工学実験室の平面図、立面図、断面図を図1に示す。この装置は、屋内環境室と屋外環境室の2室に分かれており、各室温度を個別に制御することができる。また、屋内外ともに風速や温度分布の均質化を図る送風機を備えている。実験室内の空調及び送風機は屋外の操作盤と風速コントローラにより調節が可能である。

また、実験に使用した試験体の概要を表1に示す。試験体Aは合板を主材とした風速測定試験体、Bはガラス、断熱材を用いた表面熱伝達率導出試験体、Cは合板、石膏ボード、C型鋼を用いた温度分布測定試験体である。D~FはA~Cにそれぞれ張出部を取り付けたもので、Gは試験体Fの張出部厚を150mm変更したものである。

3.2 実験室内の風速分布測定

本研究では、人工気象室の界壁に DANTEC 社製 54N10 マルチチャンネル風速計のセンサー部分のみを設置し、風速分布の測定を行った。この風速計は、最大6点まで同時に自動測定できるので、測定者による外乱や読み取り誤差がなく、測定値の信頼性が高い。

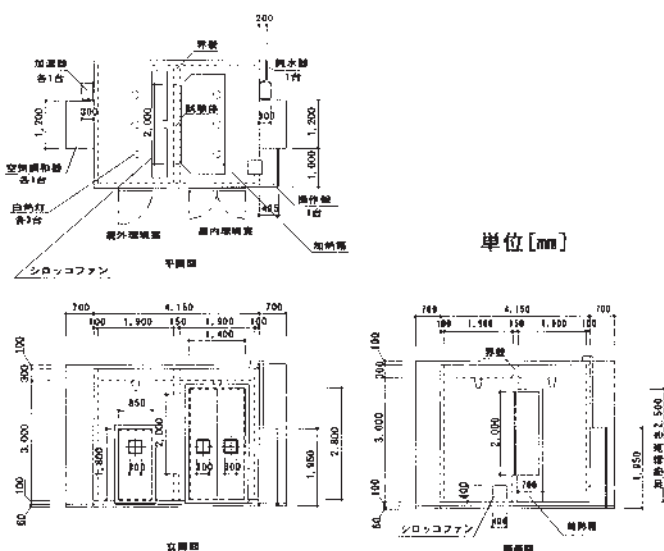


図1 熱環境工学実験室平・立・断面図

表1 試験体概要

試験体名称	種別	目的用途	主材
A	2次元熱橋壁体	風速測定	合板
B		表面熱伝達率導出	ガラス、断熱材
C		温度分布測定	合板、石膏ボード、C型鋼
D	3次元熱橋壁体	風速測定	合板
E(図3)		表面熱伝達率導出	ガラス、断熱材
F(図5)		温度分布測定	合板、石膏ボード、C型鋼
G	3次元熱橋壁体 (張出部厚 $\phi=150$)	温度分布測定	合板、石膏ボード、C型鋼

※1 D~Gは壁厚を除いてほぼ同一形状である。

※2 A~Cは張出部を除いてそれぞれD,E,Fとほぼ同一形状である

3.3 高精度の温度測定方法

3.3.1 空気温度及び表面温度測定手法

一般に界壁の表面温度及び空気温度は、熱電対(サーモカップル)によって測定される。今回の測定では、比較的安価で入手しやすく測定温度範囲も常温範囲であるT型熱電対0.2mm, 0.3mm ϕ を使用し、必要に応じて使い分けた。

3.3.2 冷接点方式

ロガーに内蔵されている電圧・温度変換機能を使うと、基準温度がロガー本体温度となるため、変換過程で精度が追求できない。そこで、氷水(=0℃)時の熱起電力(0 μ V)を基準とする冷接点方式を導入した(図2)。

3.3.3 起電力から温度への換算

出力された結果は、JIS熱電対起電力表(表2)を用いて電圧から温度に換算した。換算にあたって表1をもとに、予想される温度範囲を5℃毎に7つに分け、それぞれ1次回帰式を用いる方法を採用し、温度換算を行った。(式(1))

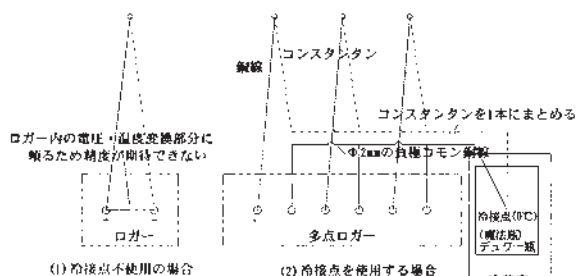


図2 冷接点使用時と不使用時の配線

表2 JIS熱電対起電力表
(銅-コンスタンタンのT型熱電対)

t℃	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
-200	-5.603	-5.753	-5.889	-6.105	-6.105	-6.181	-6.232	-6.258		
-100	-3.378	-3.656	-3.923	-4.177	-4.419	-4.648	-4.865	-5.069	-5.251	-5.439
(-) 0	0	-0.383	-0.757	-1.121	-1.475	-1.819	-2.152	-2.475	-2.788	-3.089
t℃	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
(+) 0	0	0.391	0.789	1.196	1.611	2.035	2.467	2.908	3.357	3.813
100	4.277	4.749	5.227	5.712	6.204	6.702	7.207	7.718	8.235	8.757
200	9.286	9.82	10.36	10.905	11.456	12.011	12.572	13.137	13.707	14.281
300	14.86	15.443	16.03	16.621	17.217	17.816	18.42	19.027	19.638	20.252
400	20.896									

$$t = 2.455 \times 10^{-2} V + 6.431 \times 10^{-1} \quad (V \geq 992) \quad (t \geq 25)$$

$$t = 2.464 \times 10^{-2} V + 5.579 \times 10^{-1} \quad (992 > V \geq 789) \quad (25 > t \geq 20)$$

$$t = 2.5 \times 10^{-2} V + 2.750 \times 10^{-1} \quad (789 > V \geq 589) \quad (20 > t \geq 15)$$

$$t = 2.528 \times 10^{-2} V + 1.172 \times 10^{-1} \quad (589 > V \geq 391) \quad (15 > t \geq 10)$$

$$t = 2.558 \times 10^{-2} V + 1.166 \times 10^{-2} \quad (391 > V \geq 195) \quad (10 > t \geq 5)$$

$$t = 2.564 \times 10^{-2} V + 3.520 \times 10^{-1} \quad (195 > V \geq 0) \quad (5 > t \geq 0)$$

$$t = 2.592 \times 10^{-2} V + 2.333 \times 10^{-3} \quad (0 > V \geq -269) \quad (0 > t \geq -7)$$

ここで、 t : 温度[℃]

$$V: \text{熱電対起電力} [\mu V] \quad (1)$$

4 表面熱伝達率の導出方法

屋内側表面熱伝達率 α_i 、屋外側表面熱伝達率 α_o は次式で求められる。

$$\alpha_i = C_{eps} \frac{\theta_{si} - \theta_{so}}{\theta_i - \theta_{si}} \quad (2)$$

$$\alpha_o = C_{eps} \frac{\theta_{si} - \theta_{so}}{\theta_{so} - \theta_o} \quad (3)$$

ここで、 C_{eps} ：発泡ポリスチレンの熱コンダクタンス [W/(m²·K)]

θ_{so} ：屋内側壁体表面温度 [°C]

θ_{si} ：屋外側壁体表面温度 [°C]

θ_o ：屋内側空気温度 [°C]

θ_i ：屋外側空気温度 [°C]

C_{eps} を求めるため必要な発泡ポリスチレンの熱伝達率 λ [W/(m·K)] は、

$$\lambda = 0.000197 \times \theta_m + 0.037635 \quad (4)$$

なお、 θ_m は室内外表面の平均温度[°C]である。

5 2次元熱橋を用いた実験方法の妥当性の検証

3次元壁体実験に先立ち、2次元の簡易な構造の熱橋壁体を用いて、3.3に示した温度計測方法、熱伝達率換算方法を実際に使用した場合の妥当性を検証することにした。3.2に示した方法を用いて、風速分布を測定し、壁体表面温度及び空気温度を3.3に示した方法で測定した。ここで得られた結果をもとに、(2)、(3)式により表面熱伝達率を算出した。計算結果を表3に示す。その結果をTB3D/FDM

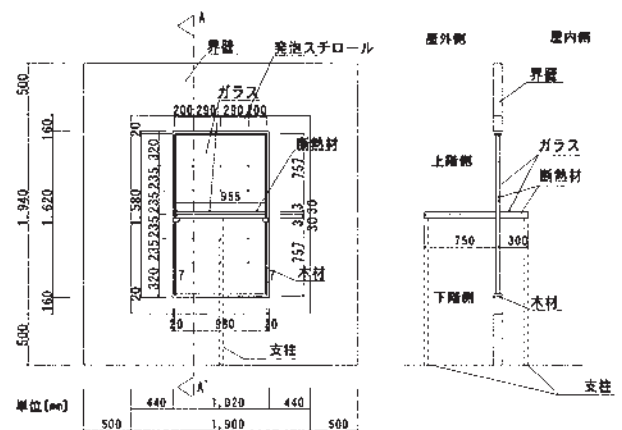


図3 3次元熱橋ガラス試験体(試験体E)

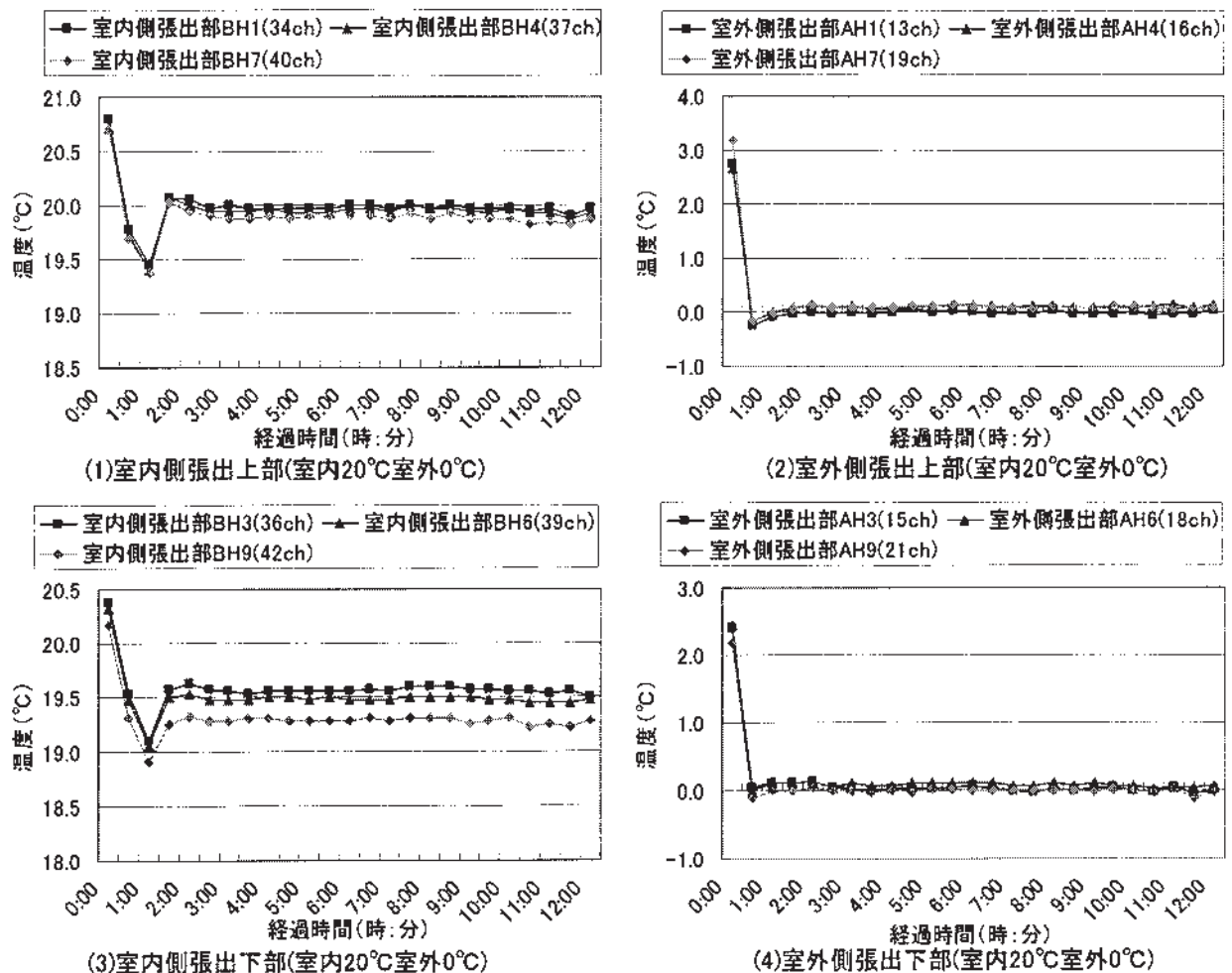


図4 3次元熱橋ガラス試験体張出部における温度分布

の2次元モデル解析版であるTB2D/FDMに設定し、2次元シミュレーション計算を行った。また、内部にC型鋼を有する2次元熱橋試験体を用いて温度を測定した。両者を比較した結果を表4に示す。実験値 t_e , t_a と計算値 T_e , T_a を比較してみると、最大で1℃強の差となった。シンプルな形状の2次元熱橋モデルであるが、表面の風速・熱伝達率分布は完全に均一ではない。TB2Dでは各面1~2つつしか表面熱伝達率を設定できないため、実験とシミュレーションではこの程度の差が生じることを前提にしなければならない。

表3 2次元熱橋壁体における熱伝達率導出結果

	壁体全体	壁体中央部のみ
屋内側表面熱伝達率 α [W/(m ² ·K)]	12.29	11.93
屋外側表面熱伝達率 α_o [W/(m ² ·K)]	18.39	18.65

表4 2次元熱橋壁体における計算値と実験値

		計算値(°C)T	実験値(°C)t	温度差T-t
屋内側	壁体中央部	3.5	2.38	1.12
	壁体全体	3.5	2.16	1.34
屋外側	壁体中央部	14.8	14.93	-0.13
	壁体全体	14.9	15.43	-0.53

6 3次元熱橋における温度分布計測とシミュレーション

3次元熱橋壁体では形状が複雑になる分、壁体表面の風の流れがより複雑になり風速分布や熱伝達率が2次元とは異なる。従って、2次元壁体と同様に風速分布および表面温度を測定し、熱伝達率を導出しなおすことが必要である。

6.1 3次元熱橋壁体近傍の風速測定実験

本測定に使用する試験体は試験体Aの中央部に合板で作成した張出部を取り付けたもの(試験体D)

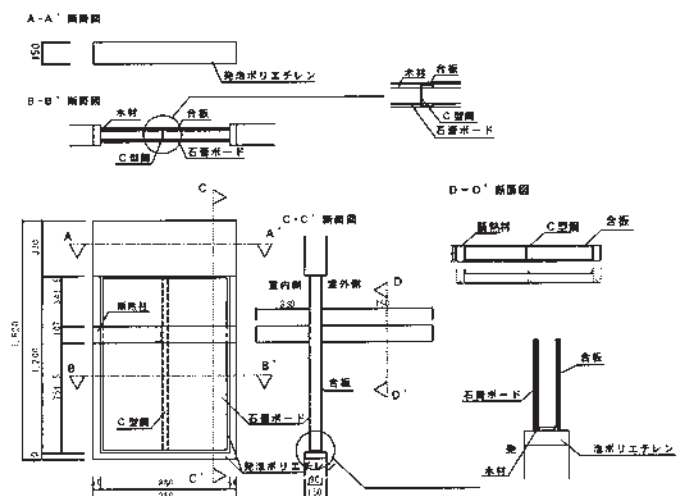


図5 3次元熱橋試験体(試験体F) 単位[mm]

である。張出部の上下にはそれぞれセンサー設置用に10cm×10cmの穴を設けており、界壁面に加えて、張出部近傍の風速も測定した。

測定の結果、界壁部の傾向は2次元壁体とほぼ同様であるが、屋内側下部及び屋外側上部は張出部の影響を受け、風速が極端に小さくなっていた。

6.2 熱伝達率導出実験

この測定においては、使用する試験壁体は試験体Bの各面中央に厚さ30mmの断熱材2枚を3mm厚ガラスで挟んだ4層の材を取り付けた試験体Eを使用した(図3)。当初は夏季に測定を行ったが、消費電力の制限から設定温度を非現実的に設定せざるを得なかったため、冬季に再実験を行い、その場

表5 計算値と実験値の比較

区分	CH	CH名称	温度(°C)	20031222	
				実測温度(°C)	温度誤差(°C)
断熱材区側	A1	西側上段	4.6	3.63	-0.97
	A2	西側下段	2.7	1.44	-1.26
	A3	中央上段	5.1	3.51	-1.59
	A4	中央下段上部	3.175	2.72	-0.46
	A5	中央下段中部	3	2.31	-0.69
	A6	中央下段下部	3	1.49	-1.51
	A7	東側上段	4.6	3.98	-0.62
	A8	東側下段	2.7	1.89	-0.81
断熱材区側	AH1	奥上部	2.4	3.20	0.80
	AH2	奥鋼材上部	3.8	6.41	2.61
	AH3	奥鋼材下部	3.6	0.66	-2.94
	AH4	奥下部	1.7	0.49	-1.21
	AH5	中央上部	0.3	0.41	0.11
	AH6	中央鋼材上部	0.3	1.11	0.81
	AH7	中央鋼材下部	0.2	1.60	1.40
	AH8	中央下部	0.1	0.21	0.11
	AH9	前上部	0.25	0.07	-0.18
	AH10	前鋼材上部	0.2	1.71	1.51
	AH11	前鋼材下部	0.1	1.44	1.34
	AH12	前下部	0.1	0.03	-0.07
	AH13	一般部上部	0.3	0.30	0.00
	AH14	一般部下部	0.1	0.15	0.05
断熱材区側	B1	西側上段	15.6	17.54	1.94
	B2	西側下段	13.2	15.01	1.81
	B3	中央上段	15.1	16.33	1.23
	B4	中央下段上部	12.85	14.06	1.21
	B5	中央下段中部	12.65	13.82	1.17
	B6	中央下段下部	12.6	15.00	2.40
	B7	東側上段	15.6	16.94	1.34
	B8	東側下段	13.2	14.92	1.72
	BH1	奥上部	17.3	18.55	1.25
	BH2	奥鋼材上部	15.4	14.40	-1.00
断熱材区側	BH3	奥鋼材下部	15.1	12.77	-2.33
	BH4	奥下部	16.5	16.31	-0.19
	BH5	前上部	19.6	19.21	-0.39
	BH6	前鋼材上部	19.35	18.02	-1.33
	BH7	前鋼材下部	19.2	17.48	-1.72
	BH8	前下部	19.25	19.21	-0.04
	BH9	一般部上部	19.5	19.49	-0.01
	BH10	一般部下部	19	18.71	-0.29

※ TB3D分割位置とはch位置に該当するシミュレーション計算時の格子位置であり、実際の座標とは異なる。

※ 実測温度は定常時のデータ30個の平均値とする。

※ 温度誤差について、誤差が1℃以上あるものはセルを着色してある。

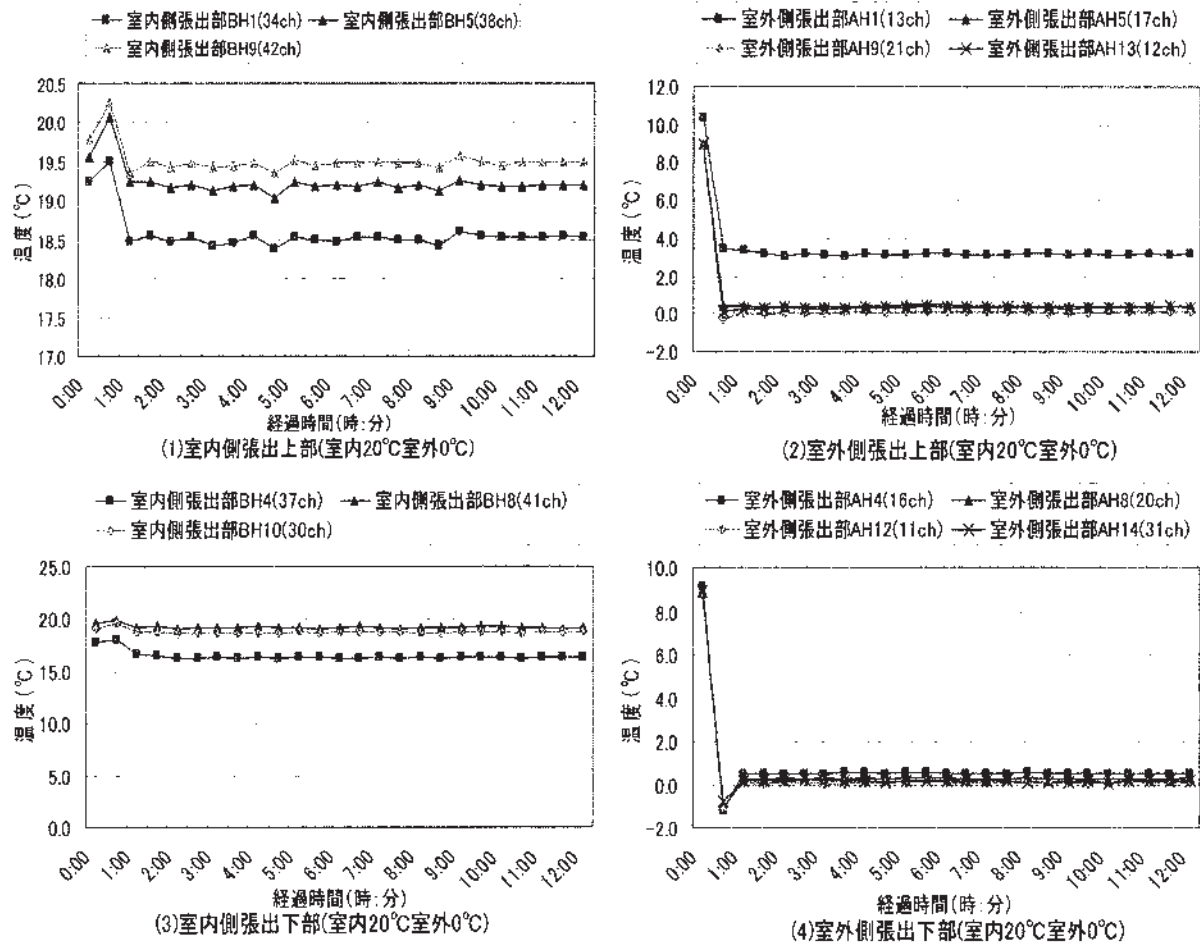


図6 3次元熱橋試験体張出部における温度分布

表5 3次元熱橋壁体における熱伝達率導出値

	上階部	下階部
屋内側表面熱伝達率 α [$W/(m^2 \cdot K)$]	12.38	8.49
屋外側表面熱伝達率 α [$W/(m^2 \cdot K)$]	12.47	19.82

合の測定条件は屋内側風速コントローラ目盛り3(風速分布0.1m/s~0.9m/s)・設定温度20℃、屋外側は風速コントローラ目盛り5(風速分布0.5m/s~5.0m/s)・設定温度0℃とした。測定結果の一部を図4に示す。実験開始後約2時間以降、壁体各部の表面温度は各室ごとにほぼ一定の結果が得られていた。3次元熱橋壁体では、2次元熱橋壁体と異なり、屋内外とも張出部で区切られた上下2箇所、風速が大きく異なるため、別々に熱伝達率を算出する必要があると考えた。そこで、張出部の上階側と下階側でそれぞれ熱伝達率を算出した。計算結果を表5に示す。

6.3 3次元熱橋壁体表面温度測定実験

3次元熱橋壁体実験に使用する壁体は、試験体CにC型鋼を水平方向に直角に貫通させ、両側に合板の張出部を設置したもの(試験体F)である(図5)。張出部の両側端には側面からの熱流侵入を防ぐた

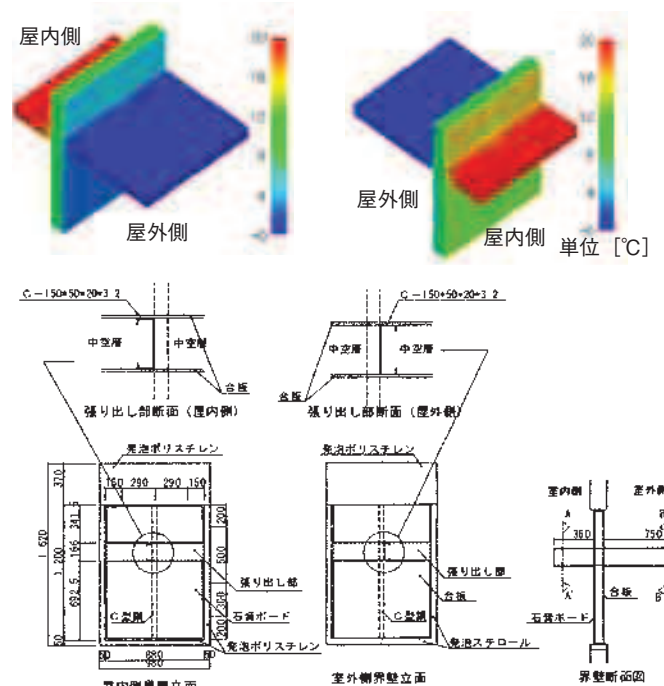


図8 3次元熱橋試験体(試験体G)

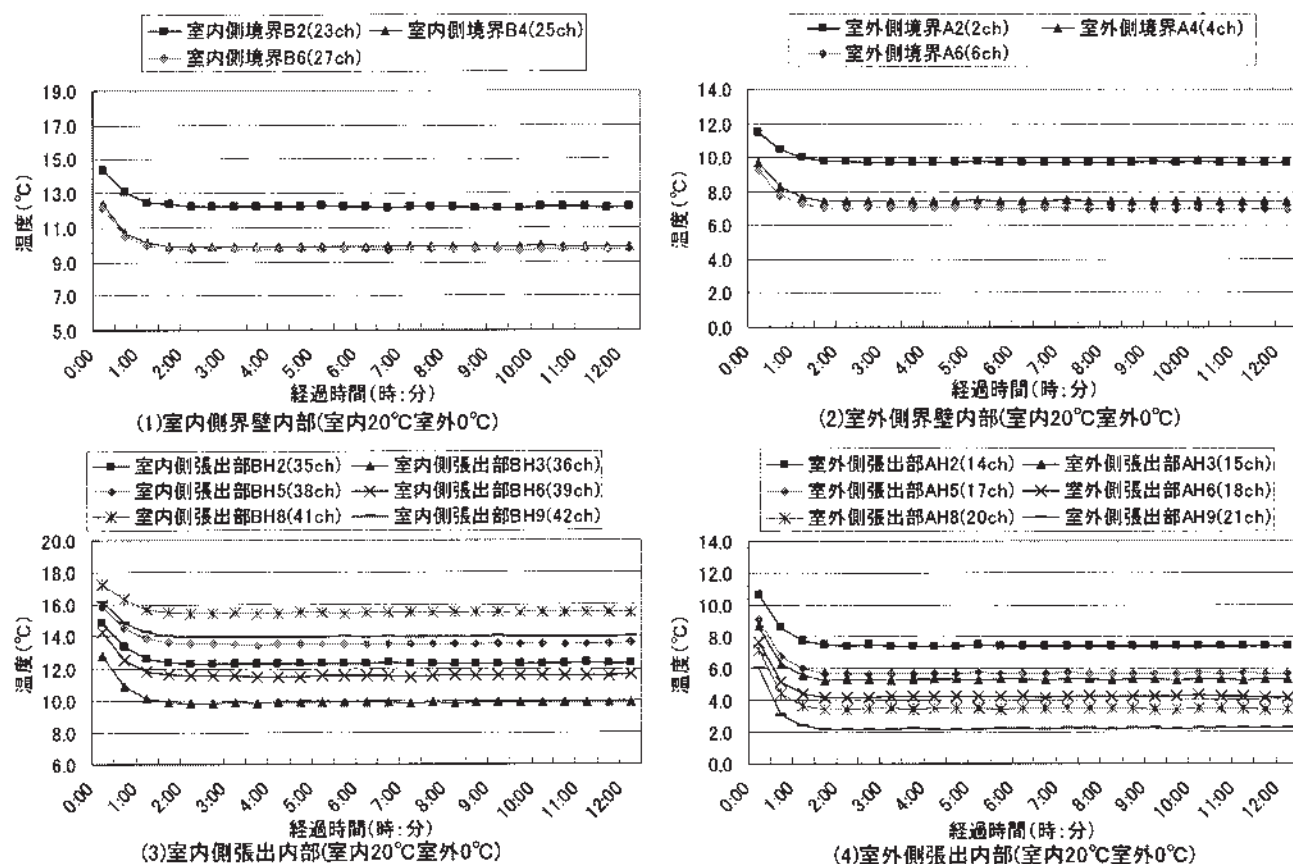


図9 3次元熱橋試験体内部における温度分布

め 50mm 厚断熱材が貼り付けられており、合板表面と内部の C 型鋼表面(中空部表面)に熱電対を貼付している。測定条件は 6.2 に準ずる。測定結果の一部を図 6 に示す。温度分布は全体的に良くまとまっていたが、一部測定点では同じ高さの他の測定点に比べ、1~2℃程度のずれが生じていた。屋外側も温度分布に関しては同様の傾向がみられた。

6.4 3次元定常伝熱計算と実験値の比較

6.2 で得られた熱伝達率を TB3D/FDM 内で用いる値として使用し、表面及び内部の各点の温度を求めた。図 7 に計算で得られた温度面コンターを示す。界壁部の中心は温度が低く熱橋の影響が認められるが、張出部の中央から先端にかけては熱橋の影響はほぼないといえる。また、図 5 の各測定点に相当する位置の温度を抽出し、実験値と比較をした(表 5)。比較の結果、一部の測定点では 2~3℃程度の差がある一方、ほとんどの測定点においては 1℃前後の差に収まった。今回の簡易な構造の 3次元熱橋壁体における TB3D によるシミュレーション計算による結果は良く一致し、界壁上の熱橋から離れた部位については 5 節における 2次元壁体とほぼ同程

度の結果(実験値と 1℃前後の差)が得られた。しかし、張出部の熱橋近傍の部位や中空層内部の鋼材表面の測定点については計算値と実験値の差が大きかった。このことから中空部仮想熱伝導率の取扱いが適切でない事が考えられる。しかし、壁体表面においても部位によって温度差の大きい部位があるのは、実験では風速及び熱伝達率の分布にムラが生じているのに対し、TB3D の仕様では屋内外 2 つずつまでしか表面熱伝達率の設定ができないということの不十分さを示している可能性もある。

7 張出部の中空層が異なる場合の温度分布計測とシミュレーション

前節での実験により、TB3D のシミュレーションに問題がある可能性を指摘したが、1 タイプのみの実験では結論を出す事はできない。そこで、6.3 の試験体 F と同様の構造であるが、張出部内部に位置する水平材の厚さ(張出部中空層厚)を変更して同様の実験を行った。

7.1 表面温度測定実験

表6 計算値と実験値の比較

区分	CH	CH名称	温度(°C)	20040116	
				実測温度(°C)	温度誤差(°C)
船型断壁体側	A1	中央上段	5.025	4.05	-0.98
	A2	中央上段鋼材部	8.35	9.69	1.34
	A3	中央下段上部	3.3	2.20	-1.10
	A4	中央下段上部鋼材部	6.8	7.47	0.67
	A5	中央下段	3.1	1.89	-1.21
	A6	中央下段鋼材部	6.4	6.97	0.57
	A7	東側上段	4.6	3.71	-0.89
	A8	東側下段	2.7	1.71	-0.99
船型断壁体側	AH1	奥上部	4.5	3.37	-1.13
	AH2	奥鋼材上部	5.7	7.44	1.74
	AH3	奥鋼材下部	5.4	5.28	-0.12
	AH4	奥下部	2.6	1.25	-1.35
	AH5	中央鋼材上部	4.3	5.70	1.40
	AH6	中央鋼材下部	4.05	4.27	0.22
	AH7	手前上部	1.3	1.47	0.17
	AH8	手前鋼材上部	1.6	3.44	1.84
	AH9	手前鋼材下部	1.5	2.24	0.74
	AH10	手前下部	0.8	0.44	-0.36
	AH11	一般部上部	0.7	0.83	0.13
	AH12	一般部下部	0.4	0.30	-0.10
船型断壁体側	B1	中央上段	15.075	16.69	1.61
	B2	中央上段鋼材部	11.525	12.23	0.71
	B3	中央下段上部	12.9	13.83	0.93
	B4	中央下段上部鋼材部	9.8	9.91	0.11
	B5	中央下段	12.625	13.47	0.85
	B6	中央下段鋼材部	9.425	9.76	0.33
	B7	東側上段	15.6	17.14	1.54
	B8	東側下段	13.2	14.84	1.64
船型断壁体側	BH1	奥上部	15	16.95	1.95
	BH2	奥鋼材上部	13.6	12.33	-1.27
	BH3	奥鋼材下部	13.2	9.87	-3.33
	BH4	奥下部	15.1	15.29	0.19
	BH5	中央鋼材上部	15.3	13.57	-1.73
	BH6	中央鋼材下部	15	11.55	-3.45
	BH7	手前上部	18.3	18.30	0.00
	BH8	手前鋼材上部	17.8	15.50	-2.30
	BH9	手前鋼材下部	17.6	14.01	-3.59
	BH10	手前下部	18.1	17.23	-0.88
	BH11	一般部上部	19.3	18.98	-0.32
	BH12	一般部下部	18.9	17.83	-1.07

※ TB3D分割位置とはch位置に該当するシミュレーション計算時の格子位置であり、実際の座標とは異なる。

※ 実測温度は定常時のデータ30個の平均値とする。

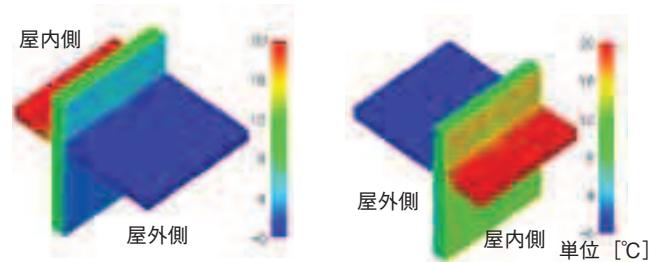
※ 温度誤差について、誤差が1°C以上あるものはセルを着色してある。

本実験には、試験体 F と同種の構造で、張出部内部にせい 150mm の C 型鋼を用いた試験体 G (図 8) を用いる。測定条件は 5.2 に準ずる。

測定結果の一部を図 9 に示す。界壁内部や張出上部の測定点で、他の測定点に比べて約 2~3°C の差が生じているが、概ね、前節の実験と同様の傾向であった。

7.2 3次元定常伝熱計算

TB3D により、伝熱計算を行い、7.1 で得られた実験値との比較を行った。温度コンターを図 10 に示す。張出部の界壁近傍に熱橋の影響が出ているなど前回と同様の傾向がみられた。また、表 6 の温度比較結果を見てみると、やはり中空層内部や界壁周



辺の測定点の差が大きくなる傾向にあった。このことから 5 節で指摘した中空部仮想熱伝導率の取扱いに問題があると考えられる。

8 まとめ

本研究では、TB3D に用いられる仮想熱伝導率の与え方が適当であるかを検証するため、簡易な構造の 2~3 次元熱橋壁体を用いて実験と計算により温度分布を求め、両者を比較する実験を行った。その結果、以下に示す知見を得た。

- 1) 2 次元壁体実験における表面温度分布はほぼ一様な値が得られていたが、表面の風速・熱伝達率分布は完全に均一ではないため TB2D であっても、計算値と実験値を比較すると、およそ 1°C 強の差が生じた。
- 2) 3 次元熱橋壁体の実験値と計算値の比較では、張出部 2 種 (中空層厚 89mm, 150mm) の実験とシミュレーションの温度の違いは、熱橋から離れた測定点では 2 次元モデルと同程度であった。しかしながら、張出部における垂直壁との交差部近くの中空層内部では特に実験値と計算値との差が大きかった事などから、現行の TB3D における値の取扱いに問題が残されている可能性を示した。

謝辞

最後に、本研究を進めるにあたり、試験体製作にあたって実践的な指導・助言・協力をして頂いた奥野守人、黒岩朱美の両技術員に深く感謝いたします。また、鹿児島大学・赤坂研究室から風速測定器を借用しなければ今回の結果はありませんでした。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：住宅の新省エネルギー基準の解説，2002
- 2) リビングアメニティー協会：熱貫流率計算ソフトウェアマニュアル，1999