

窓の断熱・遮熱性能評価の現状と課題 ～窓・ブラインド周りの熱気流性状を中心に～

Current Status and Issues of Thermal Performance Evaluation of Windows

～ With a Central Focus on Thermal and Airflow Properties around Glazing and Shading Devices ～

永田 明寛（首都大学東京）

Akihiro Nagata (Tokyo Metropolitan University)

キーワード：ブラインド(Blind)，ガラス(Glass)，自然対流(Natural convection)，
粒子画像流速測定法(PIV)，数値流体力学(CFD)

1. はじめに

窓やドアなどの開口部の熱性能は壁に比して一般に劣るため、開口部からの熱流出入は建物全体の熱流出の大きな割合を占めるとされる。そのため、開口部の熱性能を把握することは極めて重要である。このこと自体は広く認識されていたが、残念ながら日本の窓の熱性能は長らく欧米より遅れをとっていた。また、熱性能の評価法自体も国際的な水準には達していない時代が続いていた。しかしながら、その状況はこの数年で大きく変化してきている。各社から従来より格段に断熱性能を増した製品が相次いでリリースされ、最先端のフラッグシップモデルは国際的にも引けを取らない水準である。窓の熱性能評価法も概ね整ってきており、遮熱性能の試験方法に関しては JIS が元になって ISO 化されるに至っている。

本報では評価法に関する現状と課題について概観した後、課題の一つである窓まわりの対流熱伝達率に関する検討結果や、ブラインド等の付属物がある場合にガラス・ブラインド間中空層と室空気間の換気量・熱流量に関する検討結果について報告する。

2. 窓の熱性能評価規格の現状と課題

窓は、グレーディング（ガラス）とフレーム（サッシ）及びブラインド・シャッター等の付属物によって構成される。窓の断熱性能は熱貫流率で、遮熱性能は日射取得率で表される。窓の断熱性能評価に関しては従来の試験法(JIS A4710)に加えて計算法の JIS 規格(JIS A2102)が 2011 年に整備され、遮熱性能評価に関しても独自の成果を加味した計算法 JIS 規格(JIS A2103)及び試験法に関する JIS 規格(JIS A1494)が 2014 年に整備された。この試験法に関する規格は日本主導で 2017 年に ISO 化された(ISO 19467)。表 2.1 及び表 2.2 に窓の断熱性能・遮熱性能・エネルギー性能に関する規格を示す。

筆者が本格的に窓の熱性能評価に係わり出したのは 2009 年からで、(社)日本建材・住宅設備産業協会における JIS A2102 の原案作成に参加してからである。JIS A2102 の原案作成の際、熱貫流率の試験による結果と計算による結果が整合するかどうかの問題となった。特に標準サイズの試験体以外による検証事例が不足していたためである。そこで、2010 年に大サイズ(1690W×2070H)、標準サイズ(1690W×1370H)及び小サイズ(1690W×570H)の 3 つのサイズの FIX 窓（普通ペアガラス）に対して、アルミ、アルミ樹脂複合、樹脂、木の 4 種のサッシとの組み合わせ 12 ケースについて JIS A4710 に基づき断熱性能試験を実施した。試験結果と計算結果と比較したところ、標準サイズに関しては高い精度で一致しているが、小サイズや大サイズでは若干の乖離がみられた^{1),4)}。誤差要因としては熱伝達率などの境界条件がまず考えられたので、その影響を検討するために後述の標準試験体を作成し¹⁾、6 つの試験機関でラウンドロビンテストを実施した²⁾。また、JIS 化に際し日本と異なるディテールであるということで削除されたシャッターや ISO 10077-1 には含まれていないが ISO 15099 にはあり不整合が生じているロールスクリーンの断熱性能の試験を実施した^{3),5)}。なお後者は更に佐久間らによって詳細な検討がなされている⁶⁾。規格には含まれていないが窓と躯体の間の熱移動も場合によっては無視できないことが宮澤ら⁷⁾によってわかっていたが、鉄骨造の住宅を対象に検討し、躯体と

表 2.1 窓の断熱性能・遮熱性能・エネルギー性能規格

部位	断熱性能（熱貫流率）		遮熱性能（日射熱取得率）		エネルギー性能
	計算法	試験法	計算法	試験法	計算法
窓全体	JIS A2102-1 窓・ドア ISO 12631 (JIS 化予定) カーテンウォール	JIS A4710 一般 JIS A1492 出窓	JIS A2103 (ISO 15099 の JIS 化 ではなく独自規格) ISO 15099	JIS A1493 ISO 19467 (日本がリーダー となり ISO 化) 人工太陽・垂直入射	ISO 18292 (JIS 化予定)
ガラス	JIS R3107	ISO 10291 GHP ISO 10293 HFM	JIS R3106 日射熱取得率等の計算	JIS R3106 分光透過率等の測定	
フレーム	JIS A2102-2	EN 12412-2			
フィルム	JIS A5759 製品規格だが熱貫流率・遮蔽係数の試験法の記述有				
日除け			ISO 52022-1 簡易法 ISO 52022-3 詳細法	JIS A1422 簡易法、現場測定 JSTM K6101 人工太陽	

表 2.2 窓の断熱性能・遮熱性能・エネルギー性能規格一覧

規格番号	年	タイトル	備考（対応 ISO）
JIS A1422	2015	日除けの日射遮蔽係数簡易試験方法	
JIS A1492	2006	出窓及び天窓の断熱性試験方法	ISO 12567-2
JIS A1493	2014	窓及びドアの熱性能-日射熱取得率の測定	(ISO 19467)
JIS A2102-1	2011	窓及びドアの熱性能-熱貫流率の計算-第 1 部：一般	ISO 10077-1
JIS A2102-2	2011	窓及びドアの熱性能-熱貫流率の計算-第 2 部：フレームの数値計算法	ISO 10077-2
JIS A2103	2014	窓及びドアの熱性能-日射熱取得率の計算	
JIS A4710	2015	建具の断熱性試験方法	ISO 12567-1
JIS A5759	2008	建築窓ガラス用フィルム	
JIS R3106	1998	板ガラス、類の透過率・反射率・放射率・日射取得率の試験方法	ISO 9050
JIS R3107	1998	板ガラス類の熱抵抗及び建築における熱貫流率の算定方法	ISO 10292
ISO 10291	1994	Glass in building -- Determination of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing -- Guarded hot plate method	
ISO 10293	1997	Glass in building -- Determination of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing -- Heat flow meter method	
ISO 12631	2017	Thermal performance of curtain walling -- Calculation of thermal transmittance	JIS 化予定
ISO 15099	2003	Thermal performance of windows, doors and shading devices -- Detailed calculations	
ISO 18292	2011	Energy performance of fenestration systems for residential buildings -- Calculation procedure	JIS 化予定
ISO 19467	2017	Thermal performance of windows and doors -- Determination of solar heat gain coefficient using solar simulator	リーダー：日本
ISO/IEC 29341-19-1	2011	Information technology -- UPnP Device Architecture -- Part 19-1: Solar Protection Blind Device Control Protocol -- Solar Protection Blind Device	
ISO 52022-1	2017	Energy performance of buildings -- Thermal, solar and daylight properties of building components and elements -- Part 1: Simplified calculation method of the solar and daylight characteristics for solar protection devices combined with glazing	
ISO/TR 52022-2	2017	Energy performance of buildings -- Thermal, solar and daylight properties of building components and elements -- Part 2: Explanation and justification	
ISO 52022-3	2017	Energy performance of buildings -- Thermal, solar and daylight properties of building components and elements -- Part 3: Detailed calculation method of the solar and daylight characteristics for solar protection devices combined with glazing	
EN 12412-2	2003	Thermal performance of windows, doors and shutters. Determination of thermal transmittance by hot box method. - Part 2: Frames	
JSTM K6101	1995	人工太陽による窓の日射遮蔽物（日除け）の日射熱取得率及び日射遮蔽係数試験方法	建材試験センター規格

の間の線熱貫流率は木造の場合と同様の結果となること、窓フレームと下地材のごく一部の接触状況の扱いによって計算結果が大きく異なることを明らかにした⁸⁾。遮熱性能やエネルギー性能に関してはJIS原案作成委員会に参加はしていたが直接担当はしていないため本報では触れないが、文献^{9), 10)}に日射スペクトルの問題などについてまとめているので興味があれば参照されたい。

3. 窓の断熱性能評価時の境界条件

窓の断熱性能は、ある環境におかれた状態を想定することによってはじめて決まる。周辺環境が異なる場合は値が変わるため、性能値を表示する場合には境界条件に十分留意する必要がある。例えば、単板ガラスではガラス自体の熱抵抗は実際上無視できる程度であるため、その熱抵抗のほとんどは内外の熱伝達抵抗で決まる。窓の断熱性能試験法 JIS A 4710 では室内側と室外側の表面熱伝達抵抗の和が $0.165 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ と定められているが、室内側と室外側の個々の値は示されていない。しかし、熱伝達抵抗の和が一定であっても熱貫流率は室外側熱伝達抵抗の値に影響を受けるし、そもそも窓面内の熱伝達抵抗分布の影響も存在する。計算法規格 JIS A2102 では室内側熱伝達抵抗 $0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 、室外側熱伝達抵抗 $0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ と与条件として与えられており、室内側入隅部で $0.20 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ と修正されるだけである。30年近く前に表面熱伝達率分布を検討するため、10mm厚の亚克力板の両面に310mm角の熱流センサー20枚ずつを貼った標準試験体を用い国内の試験設備を有する8機関においてラウンドロビンテストが実施されている¹¹⁾。しかしながら、当時とは試験設備が異なることから改めてラウンドロビンテストを行った。基本的には既往研究を踏襲し、両面に20枚ずつ300mm角の熱流センサーを貼っているが、断熱性能を上げLow-Eペアガラスとし樹脂フレーム(PVC)の中に収めた標準試験体を製作した(図3.1)。この標準試験体を2011年8月17日から10月31日の間に①(財)ベターリビングつくば建築試験研究センター、②(財)建材試験センター、③(財)日本建築総合試験所 試験研究センター、④YKKAP(株)、⑤三協立山アルミ(株)、⑥(株)LIXIL、の6機関(順不同)に持ち回し、ラウンドロビンテストを行った。標準試験体以外のデータには各試験所のデータロガーで計測されるものも含まれるため誤差の補正を行っている。多くの結果が得られているが、ここでは図3.2に示すように対流熱伝達率には鉛直分布がかなりあり、それに関連して熱貫流率にも鉛直分布が生じている(図3.3)ことを示すに留める..

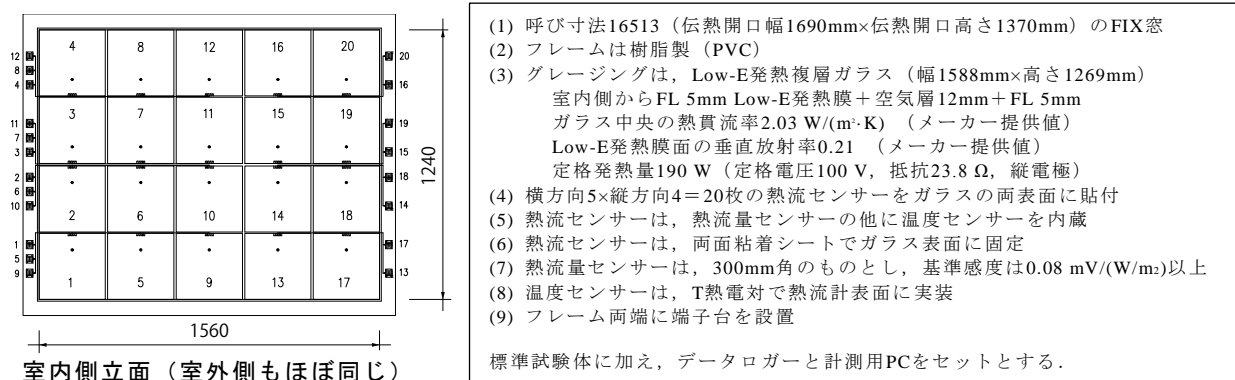


図 3.1 標準試験体概要

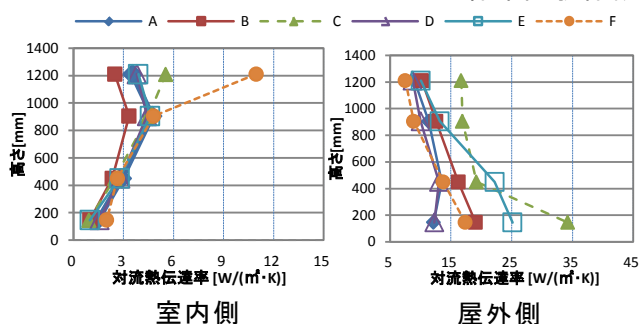


図 3.2 対流熱伝達率の鉛直分布

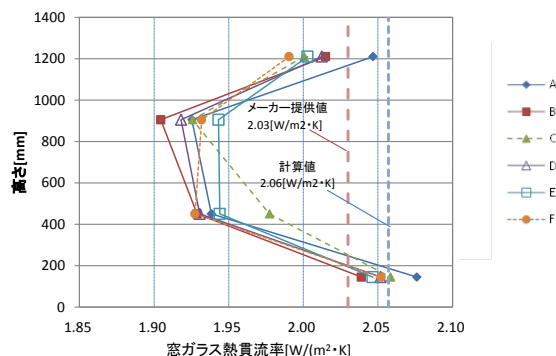


図 3.3 熱貫流率の鉛直分布

4. 窓・ブラインド周りの熱気流性状

4.1 はじめに

ブラインドのような付属物を含めた窓の熱性能評価については、窓と付属物の中空層と室内の換気による熱の移動が重要になる。この熱移動の計算方法の規格に ISO15099 があり、グレーディング複合体周り（ガラスと付属物）について実験と計算の比較¹²⁾⁻¹³⁾が行われているが、温度分布に差異が生じる結果となっている。本研究は、この差異がブラインドの形状が熱・気流性状に与える影響と捉え、夏季条件において気流可視化実験と CFD (Computational Fluid Dynamics, 数値流体力学) による解析を利用し、その影響を明らかにすることを目的とする。

ブラインド周辺の自然対流による熱の移動については、林らの研究¹⁴⁾や稲沼らの研究¹⁵⁾で定式化されている。これらの計算モデルは夏季条件において、風速の駆動力は煙突効果であり、ブラインド下部からガラス-ブラインド間へ流入し、ブラインド上部から室内側へ流出するという流れが仮定されている。また、近年の CFD 解析の発展に伴い、武政ら¹⁶⁾はブラインド周辺を対象として低 Re 型 $k-\epsilon$ モデルを用いた解析を行い、対流熱伝達率を予測している。

4.2 実験の概要

実験装置の概要を図 4.1 および表 4.1 に示す。ガラス、ブラインド及び冷却板を一定の間隔で配し、ガラスと冷却板以外の面は断熱処理してある。特に撮影面に関しては真空ガラスを用いて、中央断面でできるだけ二次元的な性状を示すようにしている。ガラスには金属膜、ブラインドの各スラットにはニクロム線を貼っており、通電することで日射熱吸収による発熱を模擬できる。冷却板はアルミ 3mm の一枚板で、背部に沿わせたチューブにチラーからの冷水を流し温度調整している。気流可視化については、PIV(Particle Image Velocimetry, 粒子画像流速測定法)を用い、非接触で二次元断面の気流性状の把握と風速を求める。可視化に用いる粒子には蒸発による潜熱への影響をなくすため、油性のものを使用する。温度と熱流測定には T 型熱電対と熱流センサー (T 型熱電対内蔵) を用いる。温度熱流測定点の位置を図 4.2 に示す。撮影断面の気流への影響を考慮し、熱電対、熱流センサーは中心を外している。なお、ブラインドをアルミパネルに置き換えた平行平板モデルで予備実験し、DNS(Direct Numerical Simulation) database¹⁷⁾⁻¹⁹⁾の結果と比較し妥当性を検証している^{23),24)}。実験では、ブラインドのスラット角は 45°としている。ブラインドのディテールを図 4.3 に示す。

4.3 実験結果

ガラスとブラインドの温度条件を変えて夏季条件²⁵⁾ case S1～S3 及び冬季条件²⁹⁾ case W1～W4 の実験を行った。実験条件と撮影条件を表 4.2 に示す。各撮影点における撮影開始前 10 分間の平均温度分布を図 4.4、熱流量の分布を図 4.5 に示す。熱流の方向は外部から試験体内へ方向を正としている。各条件の PIV 解析の結果を図 4.6 に示す (位置①：最上部、位置③中間部、位置⑤最下部、の結果を示している)。各高さによる気流性状は以下の通りとなった。

位置①最上部：case S1 では室内側からの流入気流がガラス面で下降する。case S2, S3 ではガラス面に沿って上昇した気流がブラインド面で下降および室内側へ流出する。case W1, W4 では室内側からブラインドを通り抜けて流入する気流がガラス面に沿って下降する気流と再びブラインド側に移動する気流に分かれ渦のような気流が発生している。case W2, W3 ではブラインド付近で上昇する気流がガラス側に移動しガラス面に沿って下降している。

位置③中間部：ブラインド付近ではすべての条件で上昇している。ガラス付近では case S2, S3 で上昇、case S1, W1～W4 で下降している。ブラインド周辺部ではブラインドのスラットに沿って室内側との流入出をする複雑な動きが確認できる。

位置⑤最下部：case S1～S3 でブラインド最下部から流入した気流がガラス面に沿って上昇する。case W1～W4 で逆にガラス面に沿って下降した気流がブラインド最下部から流出する。

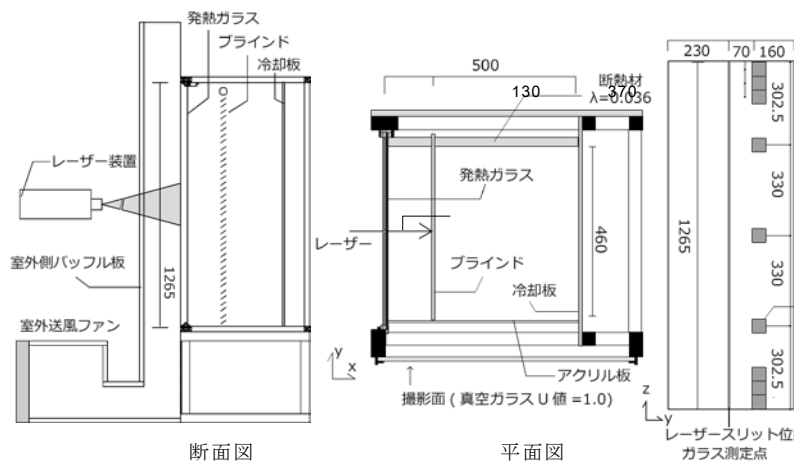


図 4.1 実験装置概要

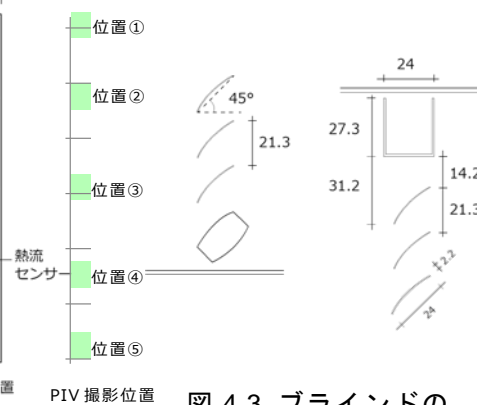


図 4.2 測定

図 4.3 ブラインドの詳細

表 4.1 測定機器

測定項目	測定機器	
表面温度	熱電対	T 型熱電対 (線径 0.2mm)
空気温度	データロガー	江藤電気 CADAC3
熱流量	熱流センサー	江藤電気 M55A
気流可視化	トレーサー	Antari HZL-1 (油性ヘイズリキッド)
	レーザー	DANTEC RayPower 2000 (波長=532nm)
PIV 解析	CCD カメラ	① DANTEC SpeedSence (case S1-3) ② 東芝テリー BU238MCF (case W1-4)
	ソフトウェア	DANTEC Dynamic Studio

表 4.2 温度条件と撮影条件

case		温度[°C]			PIV 撮影条件	
		G	B	P	時間[s]	速度[fps]
case S1	G < B > P	30	35	25	30	100
case S2	G > B > P	35	30	25	20	150
case S3	G = B > P	30	30	25	20	150
case W1	G < B < P	20	25	30	60	75
case W2	G < B = P	20	25	25	60	75
case W3	G < B > P	20	25	20	60	75
case W4	G ≪ B ≪ P	15	30	45	60	75

G: ガラス, B: ブラインド, P: 冷却板

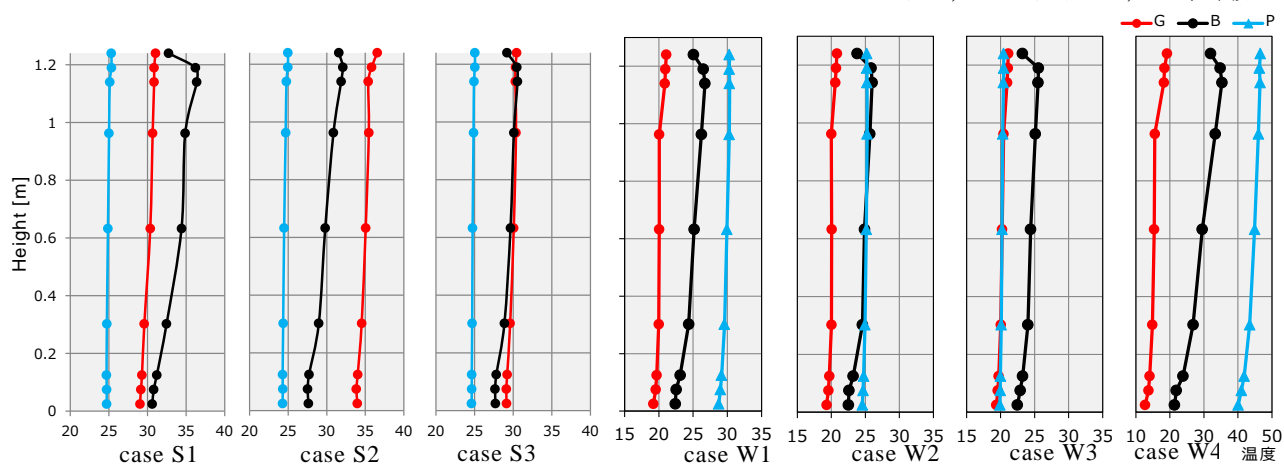


図 4.4 温度の鉛直分布位置

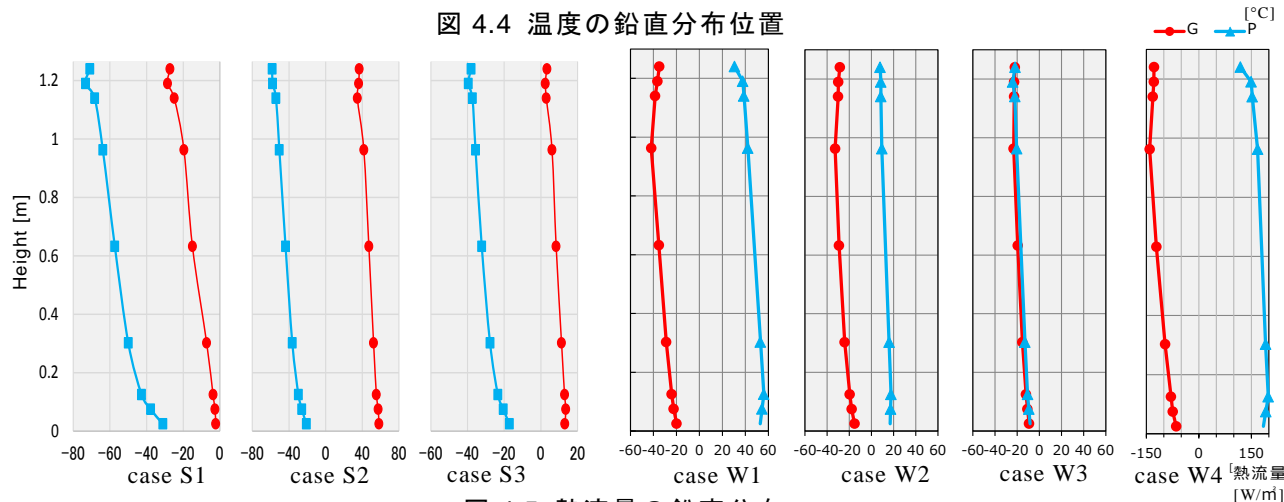


図 4.5 熱流量の鉛直分布

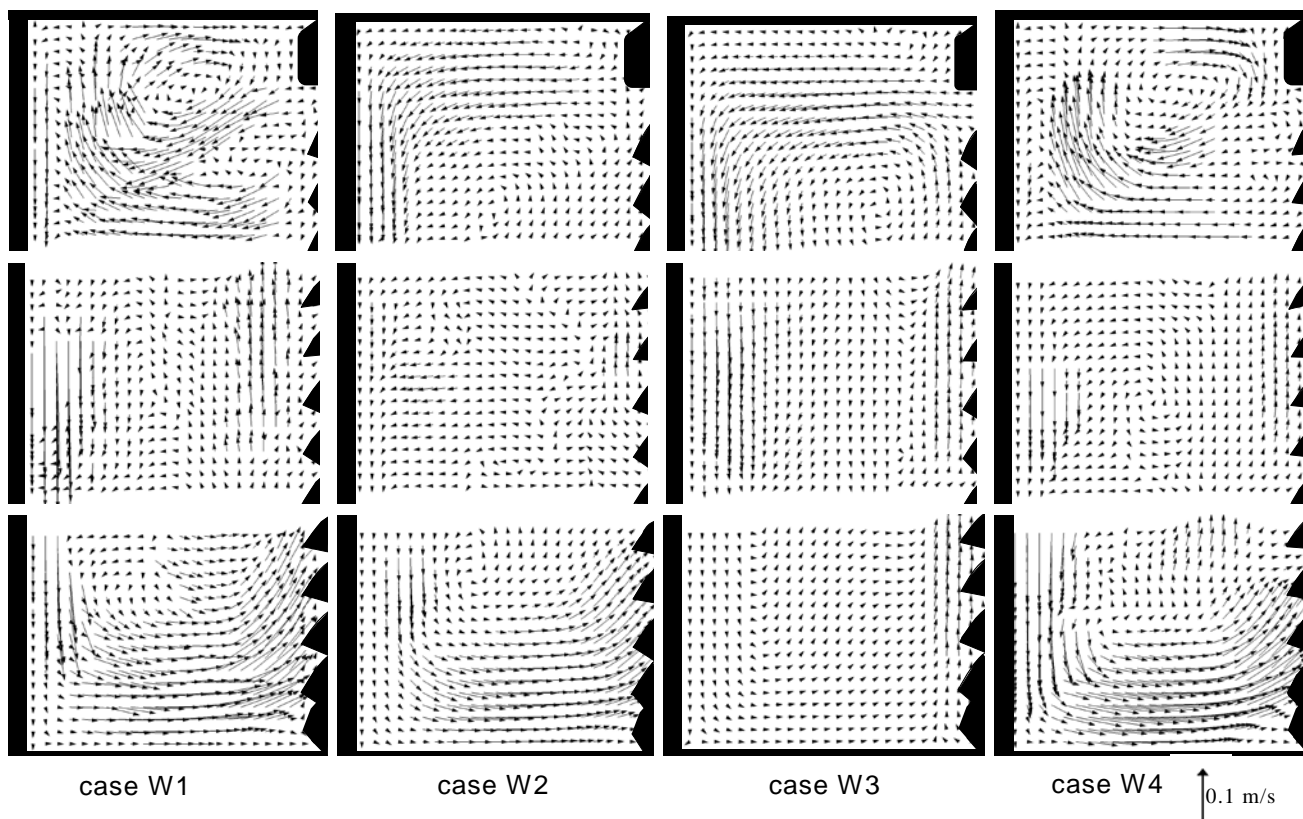
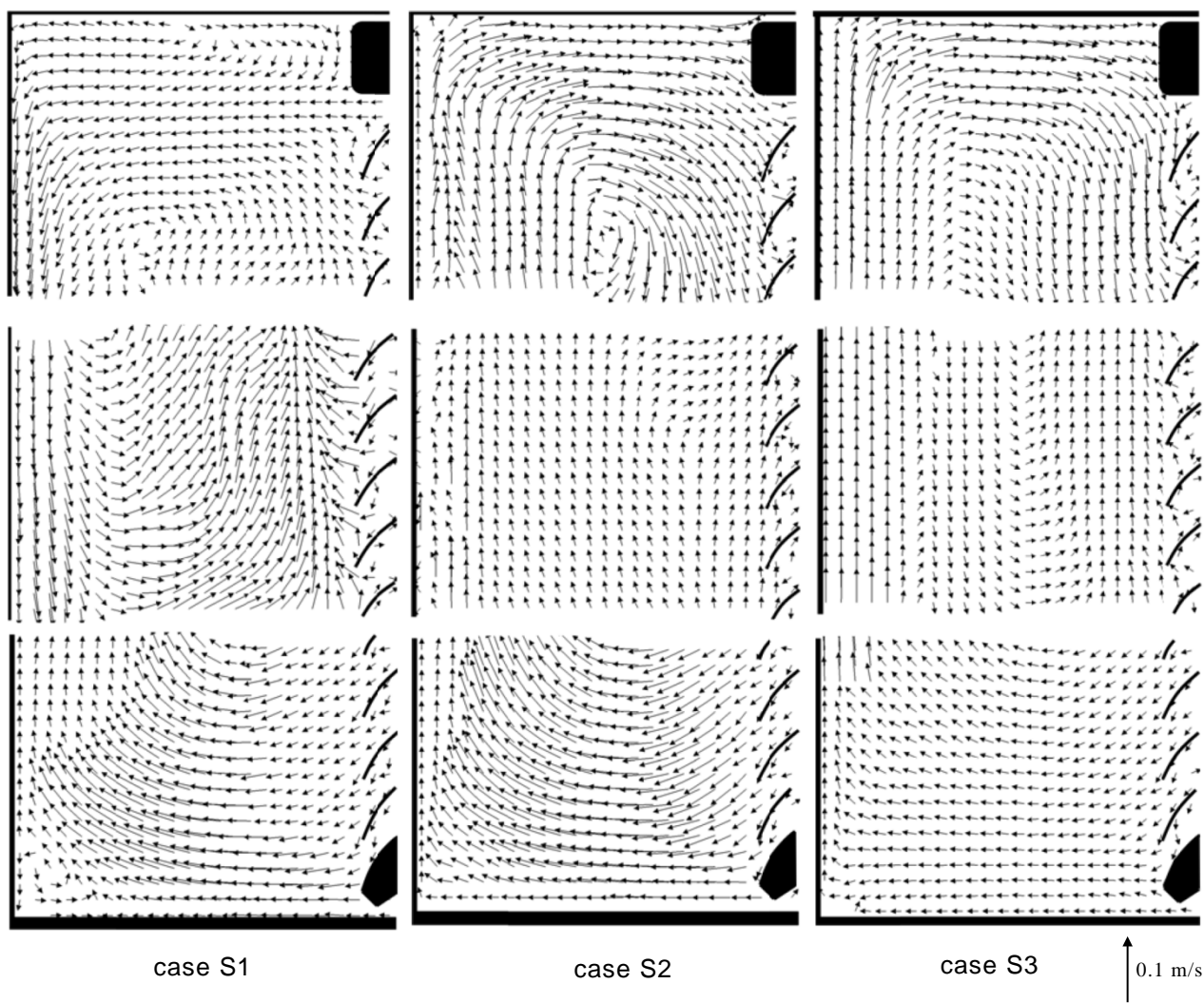


図 4.6 PIV 解析結果（二次元断面風速ベクトル）

4.4 CFD 解析の概要

シミュレーションソフトウェアに OpenFOAM 2.3 を用い CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を実施した。事前に 3 次元 LES(Large Eddy Simulation)と 2 次元各種乱流モデルを比較し最も精度が高かった $k-\omega$ SST モデルを採用し²⁴⁾、PISO 法による非定常解析 (URANS: Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes) 結果を平均化することとした²⁰⁾⁻²²⁾。

4.5 夏季条件における実験結果と CFD 解析の比較

夏季条件における実験結果を元に、ガラス、ブラインド、冷却板の温度を境界条件として与えて CFD による解析を実施した²⁶⁾ (したがって、放射とは連成していない)。CFD 解析結果の温度分布を図 4.7 にスカラー風速分布を図 4.8 に示す。また、実験と CFD 解析の中空層中央 (ガラス-ブラインド間) 及び室内中央 (ブラインド-パネル間) における上下温度分布を比較したものを図 4.9 に示す。ブラインド温度が高い case S1 ではブラインドに沿って気流が蛇行しつつ上昇する様子が再現できている。ガラス温度が高い case S2 については、ガラス-ブラインド間に流入した気流が、ガラスに沿って上昇し、上部から室内側へ流入することがわかった。また、ブラインドに沿って流れる気流もわずかに確認された。case S3 については、ガラスとブラインドの両側で上昇していることがわかった。温度分布をみると case S1 と case S3 では、ブラインドに沿って蛇行する気流がブラインド周辺の温度分布に影響を与えていることがわかる。

実験値と CFD 解析の結果を比較すると、case S1 と case S3 ではガラス-ブラインド間の空気温度は概ね一致するが、室内側の上部での温度が実験値と CFD では差異が生じ、CFD 解析の結果が高くなっている。case S2 では、ガラス-ブラインド間の下部の空気温度で実験値よりも CFD 解析が低く、室内側上部では実験値よりも高い温度となっている。この温度の差異は試験体の天井・床、撮影面などガラス、ブラインド、冷却板以外の面での熱の流出入があったためだと考えられる。実験値と CFD 解析の結果を比較すると、case S1 と case S3 ではガラス-ブラインド間の空気温度は概ね一致するが、室内側の上部での温度が実験値と CFD では差異が生じ、CFD 解析の結果が高くなっている。

4.6 スラット角を変えたケーススタディ

これまでの結果からブラインドに沿って上昇する気流はスラット間を通り抜けながら蛇行する挙動を示す。そこで、このブラインドを蛇行する上昇気流がスラット角度によってどのように影響を受けるのか 2 次元モデルによる CFD 解析によるスタディを行う。図 4.10 に計算モデルを示す。冷却板を下降する気流の影響が少ないように、ガラスと冷却板の距離は 2,000mm 離れた。スラット角度は 0° (水平)、15°、30°、45°、60°、75°とした。実際は放射・対流のバランスにより上下温度差が生じるが、今回は一定の表面温度を与えた。夏季条件²⁷⁾においてはガラス温度 30°C、ブラインド温度 35°C、冷却板温度 25°C、冬季条件³⁰⁾においてはガラス温度 10°C、ブラインド温度 15°C、冷却板温度 20°Cである。解析メッシュを図 4.10 に示すようにすべてのスラット角度でレイヤー層は成長率 1.2 で境界面第一セル長さは 0.5mm 以下になるように 3 層作成した (15°と 30°の図は省略)。夏季条件の温度分布を見てみると、スラット角度が 0°だ中央高さ付近での混合が大きくなり上部と下部の温度勾配がきつくなるが、スラット角度が大きくなるほど室内側で高さ方向の温度勾配が緩くなっている (図 4.11)。同じく夏季条件のスカラー風速分布から、スラット角度については、0°と 45°で風速プロファイルにあまり差は見られないが、60°、75°と比較すると角度が大きくなるにつれて、ブラインド付近を上昇する気流の蛇行の幅が少なくなり、75°ではブラインドに沿うように上昇していることがわかる。

換気量と熱流量について、CFD による結果と ISO 15099 に従って計算した結果を比較した^{28),31)}。図 4.13 にモデルと記号を示す。換気量に関して (図 4.14, 図 4.16)、ISO ではスラット角度が大きくなるほど単調に減少しているが、CFD では冬季条件で 15°で極大値を示している。CFD と ISO の換気量の大小は、夏季条件では CFD の方が大きく、冬期条件では ISO の方が大きくなっている。熱流量に関して中空層・室内空間それぞれについて整理すると (図 4.15, 図 4.17)、CFD と ISO で大きく異なっ

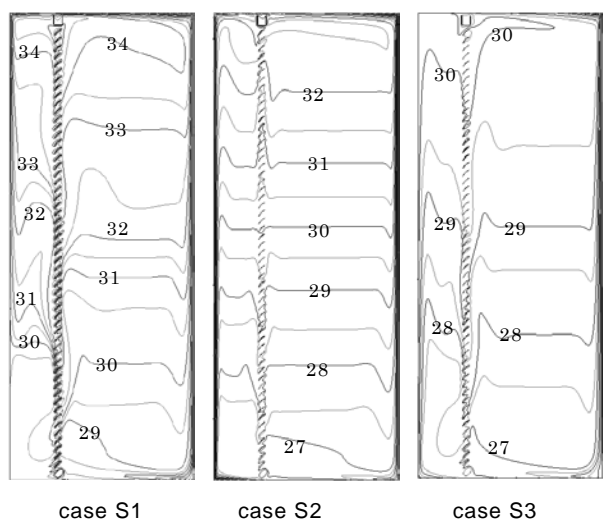


図 4.7 温度分布 [°C]

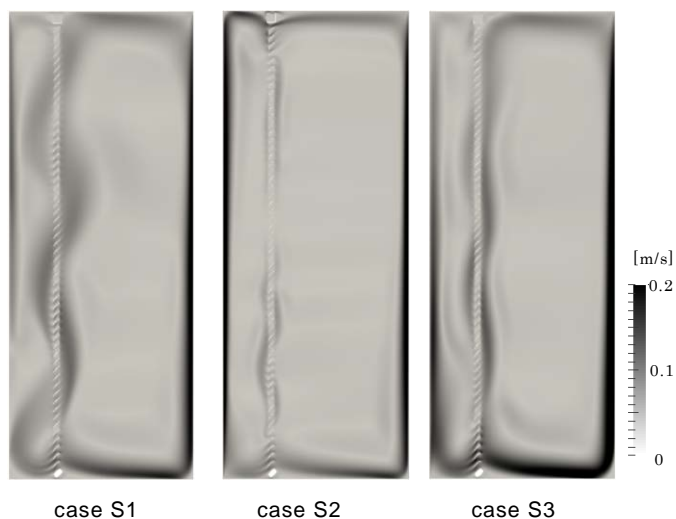


図 4.8 スカラー風速分布

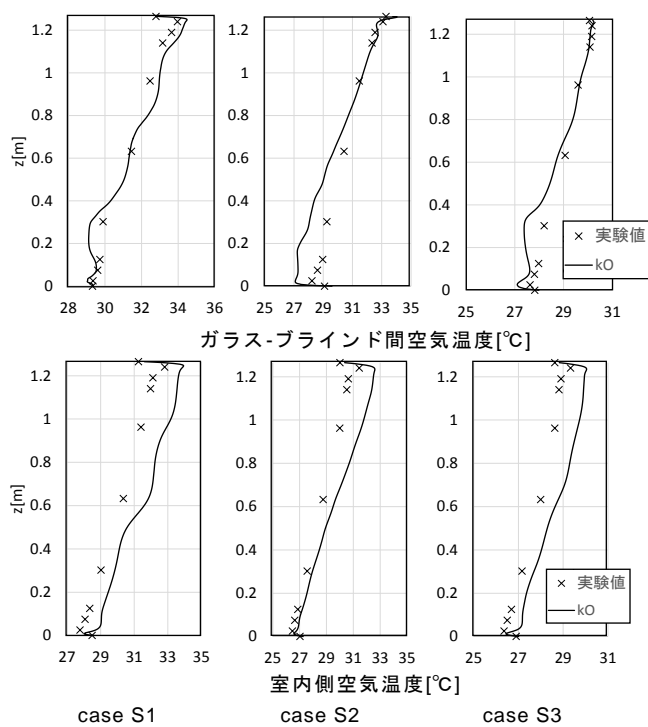


図 4.9 実験とCFD解析の上下温度分布比較

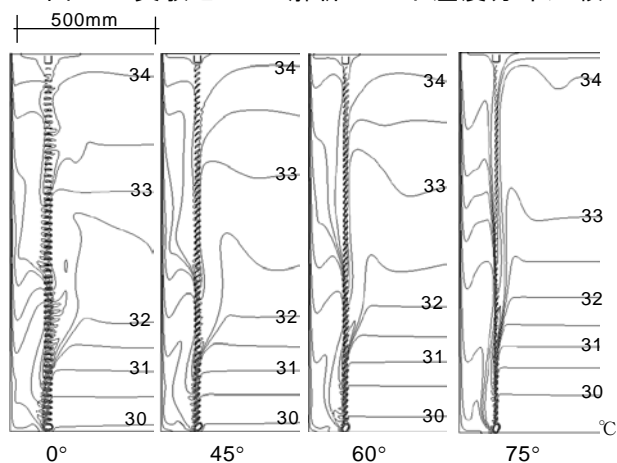


図 4.11 温度分布（夏季条件） [°C]

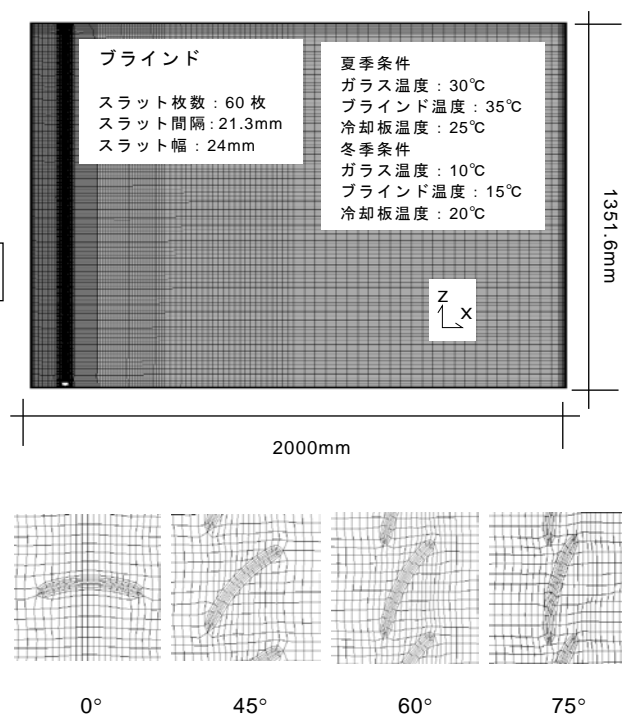


図 4.10 計算モデル・メッシュ概要

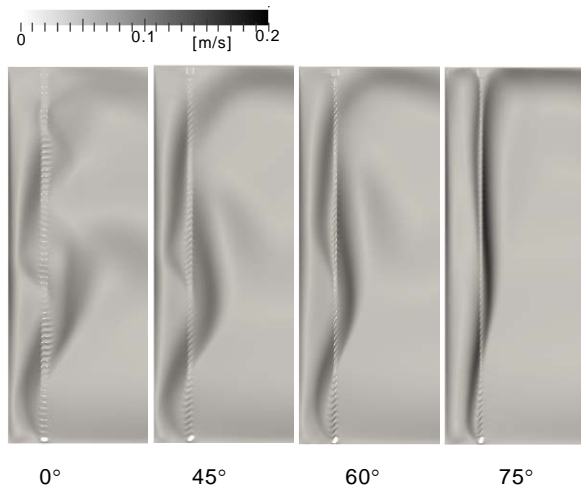


図 4.12 スカラー風速分布（夏季条件）

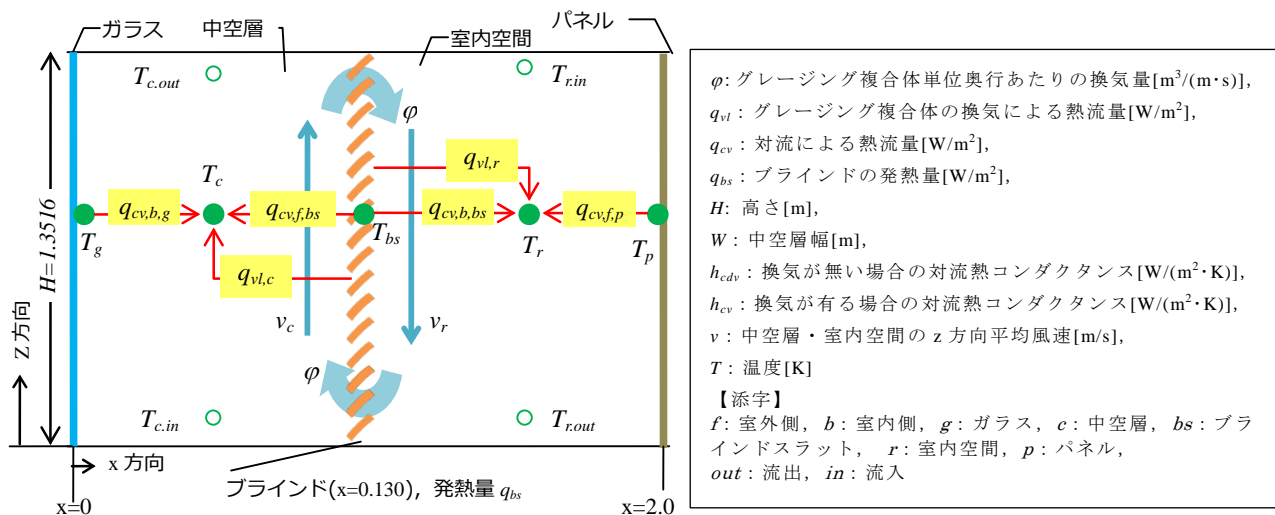


図 4.13 モデルと記号

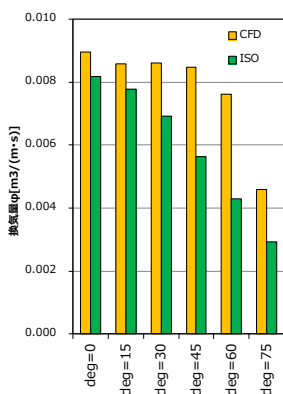


図 4.14 換気量(夏季条件)

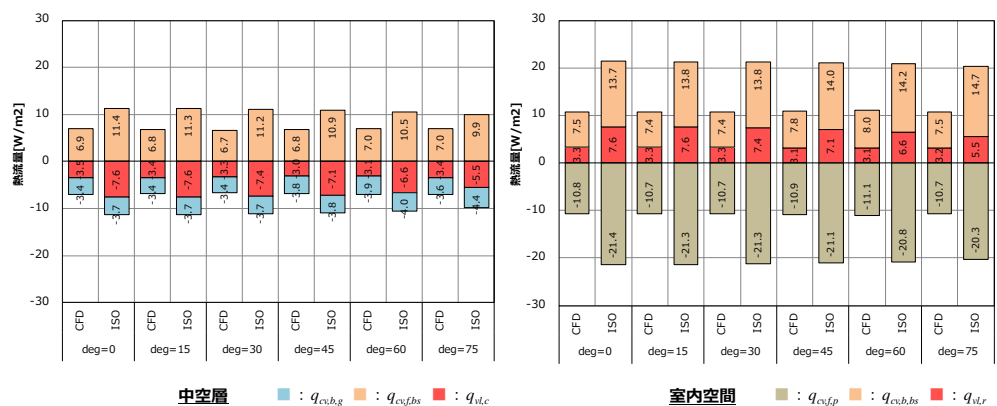


図 4.15 熱流量(夏季条件)

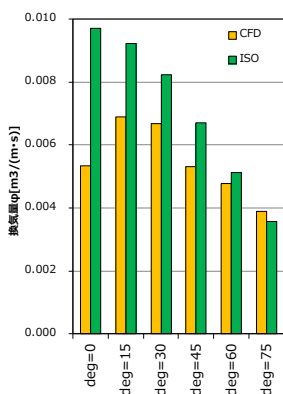


図 4.16 換気量(冬季条件)

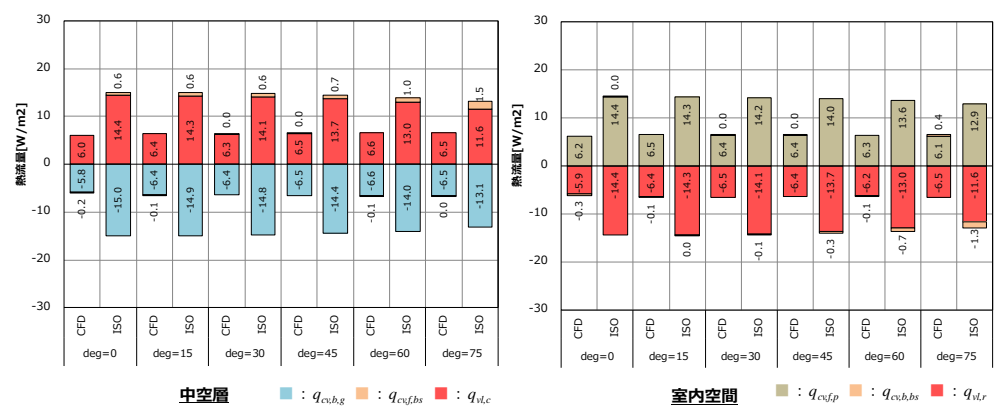


図 4.17 熱流量(冬季条件)

ている。夏季条件，冬季条件とも，対流による熱流量 q_{cv} は CFD と比較して ISO の方が大きく，特に室内空間での両者の差が大きい。ISO 計算法での対流熱伝達率の設定についてさらに詳細な検討が必要である。

4.7. まとめ

ブラインド周辺の気流はブラインドに沿って蛇行したり，ガラス面で逆の流れが生じうるなど ISO 15099 の計算法における仮定のように単純ではない。中空層での循環流を仮定する方法について検討中だが^{33),34)}，今後更なる検討が必要である。

謝辞

第3章は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）平成22年度「戦略的国際標準化推進事業／標準化研究開発／窓の熱性能計算方法に関する標準化」委託業務，経済産業省委託平成23年度・平成24年度「窓の断熱性能計算方法に関する標準化」の成果の一部をまとめたものである。委員各位に謝意を表する。また，4章は日本板硝子及びニチペイとの共同研究によるものである。勝亦俊氏（ニチペイ），西川祥子氏（日本板硝子）をはじめ共同研究者に感謝する。

参考文献

- 1) 窓の断熱性能実証試験委員会：戦略的国際標準化推進事業／標準化研究開発／窓の熱性能計算方法に関する標準化 平成22年度 成果報告書，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，2011.
- 2) 窓の断熱性能実証試験・ISO化委員会：窓の断熱性能計算方法に関する標準化平成23年度成果報告書，（社）日本建材・住宅設備産業協会，2012.
- 3) 窓の断熱性能実証試験・ISO化委員会：窓の断熱性能計算方法に関する標準化平成24年度成果報告書，（社）日本建材・住宅設備産業協会，2013.
- 4) 木村敏朗・永田明寛・中山哲士・田代達一郎：窓の断熱性能計算規格の検証および実証試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.325-326，2011.
- 5) 于海源・永田明寛・清水則夫・宮澤千頭・佐久間英二：付属物のある窓の断熱性能に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.127-128，2013.
- 6) 佐久間英二・二宮秀典・永田明寛・萩原伸治：窓に付属する日射遮蔽物の断熱性能に関する研究，日本建築学会環境系論文集，82(731)，31-41，2017.
- 7) 宮澤千頭・二宮秀典・田代達一郎，窓と躯体の間の熱伝導が建物の熱性能に及ぼす影響，日本建築学会環境系論文集，Vol. 78, No. 683, pp.17-23, 2013.
- 8) 于海源・永田明寛・菅野晋・高田和則：窓と鉄製窓下地材の間の熱移動に関する研究，空気調和・衛生工学会学術講演会論文集，pp.281-285，2014.
- 9) 永田明寛：断熱・遮熱性能評価に関する規格動向，建材試験情報，Vol.47, pp.2-7, 2011.10.
- 10) 永田明寛：5-5 建築部位の断熱性能・遮熱性能：基礎と評価法，「遮熱・断熱材料の設計、性能評価と応用」，pp.220-229，技術情報協会，2015.
- 11) 武田仁・上田哲夫・清水則夫・倉山千春・小林定教・江口和雄：熱貫流，日本建築学会第20回熱シンポジウム，5-36，1990.
- 12) 勝亦俊，西川祥子，佐久間英二，木下泰斗，二宮秀典：グレーディング複合体の熱性能計算法に関する研究 その1-2，日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.117-120，2013
- 13) 勝亦俊，西川祥子，佐久間英二，木下泰斗，二宮秀典：グレーディング複合体の熱性能計算法に関する研究 その3-4，日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.63-66，2014 12).
- 14) 石倉昌幸，林徹夫，片山忠久，谷本潤，萩島 理：ブラインドを含む窓面伝熱機構の解析 その7 放射と換気の達成シミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.1-2，1999
- 15) 稲沼實，石野久彌：窓面に入射する日射熱移動に関する研究 その1 横型ブラインドのある窓の日射遮蔽係数算定時の日射熱移動モデル式の同定，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.1253-1256，1999
- 16) 武政祐一，倉淵隆，深川裕嗣，加藤正宏：CFDを用いた室内ブラインドの熱伝達に関する研究：低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ 二方程式モデルによる対流熱伝達率の予測，日本建築学会環境系論文集，pp.35-42，2006
- 17) Kiš, P. and Herwig, H.: Natural convection in a vertical plane channel: DNS results for high Grashof numbers, Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung, 50 (7), 957-972, 2014.
- 18) Kiš, P. and Herwig, H.: The near wall physics and wall functions for turbulent natural convection, Int. J. Heat and Mass Transfer, 55, 2625-2635, 2012.
- 19) DNS database : <http://www.tuhh.de/tt/dnsdatabase/dbindex.en.html> (閲覧日 2016.1.24)
- 20) S Kenjereš, K Hanjalic: Transient analysis of Rayleigh-Bénard convection with a RANS model, International Journal of Heat and Fluid Flow, Volume 21, Issue 1, p122, 2000
- 21) 小尾晋之介：RANSモデルの限界と可能性，日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集，p.284，2001
- 22) 小野浩己，酒井孝司，加治屋亮一：Dynamic LES モデルを用いた弱い自然対流流れ場の数値計算 各種 LES モデルの精度検証と格子依存性の検討，空気調和・衛生工学会論文集，pp.29-38，2012
- 23) 勝亦俊・村井雄一・永田明寛・西川祥子・佐久間英二・木下泰斗：グレーディング複合体の熱性能評価法に関する研究 その1 グレーディング複合体周辺の気流可視化実験結果，日本建築学会大会講演梗概集，D-2，pp.21-22，2015.
- 24) 村井雄一・勝亦俊・永田明寛・西川祥子・佐久間英二・木下泰斗：グレーディング複合体の熱性能評価法に関する研究 その2 実験と二次元モデルによるCFD解析との比較，日本建築学会大会講演梗概集，D-2，pp.23-24，2015.
- 25) 勝亦俊・村井雄一・神山輝・西川祥子・永田明寛・佐久間英二・木下泰斗：グレーディング複合体の熱性能評価法に関する研究 その3 温度条件を変えた気流可視化実験結果，日本建築学会大会講演梗概集，D-2，pp.53-54，2016.
- 26) 村井雄一・神山輝・勝亦俊・西川祥子・永田明寛・佐久間英二・木下泰斗：グレーディング複合体の熱性能評価法に関する研究 その4 実験とCFD解析の比較，日本建築学会大会講演梗概集，D-2，pp.55-56，2016.
- 27) 神山輝・勝亦俊・永田明寛・西川祥子・村井雄一・木下泰斗・佐久間英二：グレーディング複合体の熱性能評価法に関する研究 その5 CFD解析によるケーススタディ，日本建築学会大会講演梗概集，D-2，pp.57-58，2016.
- 28) 西川祥子・勝亦俊・村井雄一・神山輝・永田明寛・木下泰斗・佐久間英二：グレーディング複合体の熱性能評価法に関する研究 その6 CFD解析とISO 15099に基づく計算の比較，日本建築学会大会講演梗概集，D-2，pp.59-60，2016.
- 29) 勝亦俊・神山輝・五味勇・西川祥子・永田明寛・佐久間英二・木下泰斗：グレーディング複合体の熱性能評価法に関する研究 その7 冬季を想定した気流可視化実験結果，日本建築学会大会講演梗概集，D-2，pp.425-426，2017.
- 30) 五味勇・神山輝・勝亦俊・西川祥子・永田明寛・木下泰斗・佐久間英二：グレーディング複合体の熱性能評価法に関する研究 その8 CFD解析によるケーススタディ，日本建築学会大会講演梗概集，D-2，pp.427-428，2017.
- 31) 西川祥子・勝亦俊・五味勇・神山輝・永田明寛・木下泰斗・佐久間英二：グレーディング複合体の熱性能評価法に関する研究 その9 CFD解析とISO 15099に基づく計算による換気量・熱流量の比較，日本建築学会大会講演梗概集，D-2，pp.429-430，2017.
- 32) 永田明寛・村井雄一・勝亦俊・西川祥子・佐久間英二・木下泰斗・神山輝：グレーディング複合体近傍の熱・気流性状—PIVによる可視化とCFD解析—，日本建築学会第46回熱シンポジウム，pp.115-120，2016.
- 33) 永田明寛：フレームキャピティの上下温度分布モデリング，日本建築学会学術講演梗概集，D-2，pp.3-4，2013.
- 34) 永田明寛：フレームキャピティの上下温度分布モデリング その(2)DNSデータベースによるパラメータ推定，日本建築学会大会講演梗概集，D-2，pp.57-58，2015.