

硝子張空間の室内温熱環境簡易 予測用ソフトウェアの開発

— 北海道の戸建住宅における硝子張空間の計画に関する研究 (2) —

DEVELOPMENT OF COMPUTER SOFTWARE FOR SIMPLIFIED SIMULATION OF THERMAL ENVIRONMENT OF GLASSED-IN SPACES

— A study on planning of glassed-in spaces of detached houses in Hokkaido (part2) —

森田謙太郎 — *1 森 傑 — *2

Kentaro MORITA — *1 Suguru MORI — *2

キーワード:

硝子張空間, 戸建住宅, 積雪寒冷地, 温熱環境, シミュレーション予測, ソフトウェア開発

Keywords:

Glassed-in space, Detached house, Snowy cold region, Thermal environment, Simulation prediction, Software development

Computer software for simplified simulation of thermal environment of glassed-in spaces was developed to support planning of those spaces. The software outputs the temperature and the relative humidity of glassed-in spaces after users input the date, the location, the layout of those spaces (dimensions and direction), the specification of surfaces (roof, four walls, and floor), the setting of floor heating and the condition of natural ventilation.

Compared the predicted temperature with the actual measured temperature of a real glassed-in space, it appears that the software is a practical tool for understanding the overall behavior of thermal environment of glassed-in spaces, or for comparing the characteristics of thermal environment of those spaces under different input conditions.

1. はじめに

北海道の住宅は、積雪寒冷な屋外気候を遮断し快適な屋内気候を維持する必要性から、開口部をできる限り小さくして住宅全体を断熱材で包み込むなど内と外を絶縁する考え方が根強く、ガラスを多用することが推奨される状況ではなかった。しかし断熱性能の高い製品が一般に広く普及してきた現在では、北海道の住宅でもガラスを多用する空間（以下、硝子張空間）が屋内気候を保持しつつ屋外気候を享受できる内と外の緩衝空間として有用性を期待される。

先行研究¹⁾において硝子張空間の利用実態を調査した結果、満足度を左右する影響要因として温熱性が示され、夏期と冬期の温熱環境の不具合が硝子張空間の問題点として最も多く指摘された。今後、満足度の高い硝子張空間を設計するためには、計画段階で温熱環境を或る程度予測し、温熱環境の調整手法を検討しておく必要がある。そこで筆者らは硝子張空間の温熱環境として室内気温と室内相対湿度を予測可能で、且つ調整手法として暖房、換気による影響を予測に加味できるソフトウェアを開発した。本稿では本ソフトウェアの内容を説明するとともに、実測値と予測値を比較することで硝子張空間の計画における本ソフトウェアの実用性を検証する。

一般にガラスを多用する空間としてはアトリウムが挙げられるが、アトリウムの温熱環境については現在までに多数の研究が見受けられる。平松ら^{2),3),4)}は実験用実大アトリウムを建設して長期間温熱環境を実測し、自然室温時、冷房時、自然換気時の室内熱収支を統計的に解析してアトリウムの温熱環境構造を明らかにしている。尾関ら^{5),6),7),8)}は室内温熱環境を気流性状の解析に基づき合理的に予測する目的で、実用性の高い壁面間長波長放射解析手法、壁面日射

熱取得解析手法を提示するとともに、CFD、2波長放射連成手法により気流、温度分布を詳細に解析するシミュレーション手法を提示している。絵内⁹⁾、久保田ら¹⁰⁾はアトリウムを上中下の1室3温に分割して温度積層と層間相互換気を想定する非定常解析手法を提示し、実測値との整合度から解析予測の十分な実用性を確認している。佐藤ら^{11),12),13)}は北海道東部の濃霧発生地域において戸建住宅に付設する簡易的なサンルームを実測し、室内熱収支と水分収支を解析してサンルームが隣接居室の温熱環境を改善する効果を指摘している。

既往研究で現在までに得られた知見を踏まえ、本研究では類似ソフトウェアと比較して、できる限り簡易な入力方法と計算方法で硝子張空間の温熱環境を予測するソフトウェアを目指した。具体的には室内気温一様を仮定し^{注1)}、日射と長波長放射の壁面間相互反射、壁面内非定常熱伝導を計算する。一般に計画段階で求められるのは温熱環境の大局的な傾向把握、入力条件の違いによる相対的な性質比較であり、機械的環境制御を想定しない硝子張空間の性格上、実象の精密予測を主眼とせずとも簡易予測で実用性はあると考える。

2. ソフトウェアの概要

本ソフトウェアは汎用性の高いWindows OS上で動作するアプリケーションとして開発した。起動すると図1①に示すGUI(Graphical User Interface)が表示されるので、左側から順に日付、場所を選択し、硝子張空間の寸法と方位を設定する。硝子張空間を先行研究¹⁾の形態的分類で示すように直方体で簡易表現することとして、屋根面、A～D壁面、床面の全6面の境界平面が多層断熱面（不透過性壁体）かガラス面（透過性壁体）かを選択する。右側の床暖房の有

¹⁾ 北海道大学大学院工学研究科 博士課程・修士（工学）
〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目

²⁾ 北海道大学大学院工学研究科 准教授・博士（工学）

¹⁾ Ph. D. Candidate, Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., M. Eng.

²⁾ Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., Ph. D. Eng.

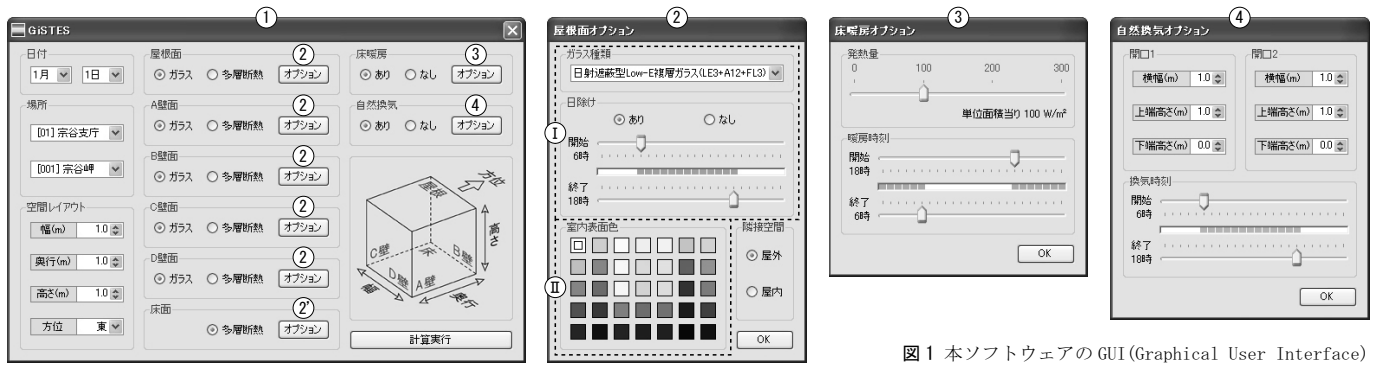


図1 本ソフトウェアのGUI(Graphical User Interface)

無、自然換気の有無を選択して計算実行すれば、当該日の室内気温、室内相対湿度、屋外気温、屋外相対湿度、水平面全天日射量の1時間値がCSVファイルで出力される。境界平面のオプションでは図1②が各面ごとに表示され、多層断熱面を選択した場合は破線部①、ガラス面を選択した場合は破線部①がグレー表示される。ガラス種類は先行研究¹⁾の事例で実際に使用されていた単板ガラス、複層ガラス、三重ガラス、日射取得型Low-E複層ガラス、日射遮蔽型Low-E複層ガラスの5種類から選択し、日除けを有とする場合(半透過性壁体)は日除けの開始時刻と終了時刻を設定する。室内表面色はカラーパレットに示す35色から建材に最も近い色を選択する。最後に当該境界平面を挟んで隣接する空間が屋外か屋内かを選択して境界平面のオプションを終了する。床暖房のオプションでは図1③が表示される。単位面積当りの発熱量、床暖房の開始時刻と終了時刻を設定して床暖房のオプションを終了する。自然換気のオプションでは図1④が表示される。開口は2箇所を基準とし、1箇所の場合は開口を分割して2箇所と見なし寸法を設定する。自然換気の開始時刻と終了時刻を設定して自然換気のオプションを終了する。

以上の内容をまとめると、GUI上で利用者が直接入力する内容は図2に示す手操作入力の項目となり、計算実行時にメモリに記憶される。計算入力とファイル入力の項目はプログラム上で行う。日付から通日を計算し、場所ごとに用意されたファイルから通日に応じてデータが抽出されメモリに記憶される。緯度、経度などを含む気象データは拡張アメダス気象データ¹⁴⁾を使用し、北海道内の気象観測所162地点の標準年データ1年分を1時間値で用意している。長期積雪期間は同地点の根雪情報¹⁵⁾から設定している。

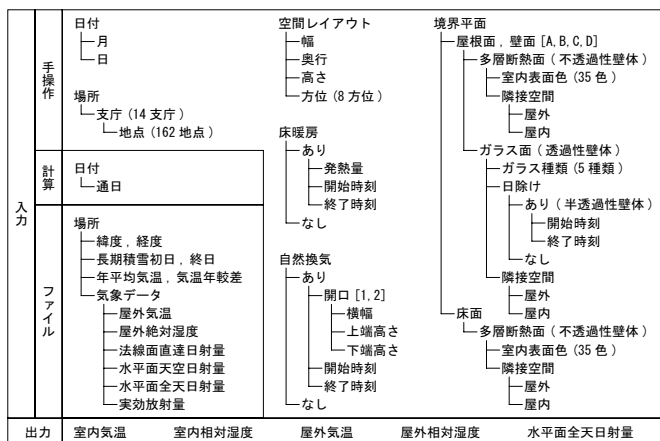


図2 本ソフトウェアの入出力項目

3. 温熱環境の計算方法

本ソフトウェアにおける硝子張空間の室内気温の計算方法を以下に説明する。硝子張空間の場合、透過性壁体から室内に入射した日射がそのまま熱取得とはならず、入射した日射が直接、若しくは壁面間相互反射により屋外に射出される場合を考慮して計算する必要がある。本稿では日射熱取得の計算方法に重点をおいて説明する。

3-1. 日射熱取得の計算

初めに、計算簡易化のため境界平面の基準仕様を或る程度設定しておく。一般に北海道の高断熱高気密住宅は北海道建築指導課の仕様準ずる施工法が想定されるため、不透性壁体の断面構成は同課の技術資料¹⁶⁾を参照して図3に示すように設定している。透過性壁体の断面構成は、戸建住宅において最も一般的な在来木造工法の主構造と一体的に施工できる利点を考慮し、軸組を方立と兼ねた木アルミ複合サッシを設定している。透過性壁体はガラスの光学特性とサッシの軸組特性も考慮する。光学特性に関してはメーカーの技術資料¹⁷⁾を参照し、5種類のガラスについて入射角特性を考慮しつつ層間多重反射を計算して表1に示す透過率、反射率、吸収率の近似式を求めた。透過性壁体は定常計算とするため、各層の吸収量

断面 (1/20)	節点	材料	厚さ mm	熱抵抗 m ² ·K/W	熱容量 J/m ² ·K	熱伝導率 W/m·K				
不透性壁体	壁		7	長尺カラー鉄板 アスファルトルーフィング 構造用合板	0.3 0.089 12	10632 0.110 0.150	45.000 0.110 0.150			
			6	通気層	30	0.075	0	-		
			-	透湿防水フィルム	0.2	-	-	-		
			5	軟質繊維板 (シーリング)	12	0.207	4680	0.058		
			4	中空層	300	5.510	20569	0.140		
			-	防湿気密フィルム	0.2	-	-	0.040		
			3	押出法ポリスチレンフォーム保温板	30	1.071	848	0.028		
			2	通気層	18	0.075	0	-		
			1	窯業系サイディング	14	0.078	14640	0.180		
			7	窯業系サイディング	14	0.078	17934	0.180		
			6	通気層	18	0.075	0	-		
			-	透湿防水フィルム	0.2	-	-	-		
			5	構造用合板	12	0.080	8580	0.150		
			不透性壁体	床		4	木材 吹込用ガラスウール断熱材	100 300	2.192 5.510	13169 20569
-	防湿気密フィルム	0.2				-	-	-		
3	押出法ポリスチレンフォーム保温板	30				1.071	848	0.028		
2	通気層	18				0.075	0	-		
1	窯業系サイディング	14				0.078	14640	0.180		
7	窯業系サイディング	14				0.078	17934	0.180		
6	通気層	18				0.075	0	-		
-	透湿防水フィルム	0.2				-	-	-		
5	構造用合板	12				0.080	8580	0.150		
透過性壁体・半透過性壁体	木アルミ複合サッシ					サッシ	アルミサッシ	1.5	-	-
						通気層	34	0.075	-	-
						木材	(80.5)	0.575	-	-
						通気層	100	0.070	-	-
						日除け	シェード	0.5	-	-
			単板 (FL3)	3	0.003	5.6	3.9			
			複層 (FL3+A12+FL3)	18	0.181	2.7	2.3			
			三重 (FL3+A12+FL3+A12+FL3)	33	0.359	1.9	1.6			
			日射取得型 Low-E 複層 (FL3+A12+LE3)	18	0.363	1.8	1.6			
			日射遮蔽型 Low-E 複層 (LE3+A12+FL3)	18	0.461	1.6	1.4			
			ガラス	アルミサッシ	1.5	-	-			
			通気層	34	0.075	-	-			
			木材	(80.5)	0.575	-	-			
			通気層	100	0.070	-	-			

図3 境界平面の基準仕様

表1 ガラスの光学特性

入射角の負の場合	τ_{Di} (透過率・直達)	τ_{Dd} (透過率・拡散)	屋外	室内	τ_{Doi}		τ_{doi}		
					直達	拡散	直達	拡散	
FL3	τ_{Di}	τ_{Dd}	屋外	室内	直達	$2.9353 \cos^2 \theta - 3.7725 \cos^2 \theta + 2.1475 \cos^2 \theta - 0.4513 \cos^4 \theta$	直達	0.7792	
					拡散	$1 - 3.6134 \cos \theta + 5.6175 \cos^2 \theta + 4.2524 \cos^3 \theta - 1.2653 \cos^4 \theta$	拡散	0.1506	
	μ_{Dio}	μ_{Ddi}	室内	屋外	直達	$0.6781 \cos \theta - 1.9050 \cos^2 \theta + 2.1049 \cos^3 \theta - 0.8140 \cos^4 \theta$	直達	0.0702	
					拡散	$1 - 3.6134 \cos \theta + 5.6175 \cos^2 \theta + 4.2524 \cos^3 \theta - 1.2653 \cos^4 \theta$	拡散	0.1506	
	FL3 + A12 + FL3	τ_{Di}	τ_{Dd}	屋外	室内	直達	$1.1968 \cos \theta + 1.2194 \cos^2 \theta - 3.1922 \cos^3 \theta + 1.5190 \cos^4 \theta$	直達	0.6370
						拡散	$1 - 2.4433 \cos \theta - 2.2261 \cos^2 \theta + 0.5884 \cos^3 \theta + 0.0604 \cos^4 \theta$	拡散	0.2287
μ_{Dio}		μ_{Ddi}	室内	屋外	直達	$0.5195 \cos \theta - 1.2655 \cos^2 \theta + 1.2977 \cos^3 \theta - 0.4834 \cos^4 \theta$	直達	0.0715	
					拡散	$1.1968 \cos \theta + 1.2194 \cos^2 \theta - 3.1922 \cos^3 \theta + 1.5190 \cos^4 \theta$	拡散	0.6370	
FL3 + A12 + FL3 + A12 + FL3		τ_{Di}	τ_{Dd}	屋外	室内	直達	$0.9729 \cos \theta - 2.8598 \cos^2 \theta + 3.2285 \cos^3 \theta - 1.2629 \cos^4 \theta$	直達	0.0891
						拡散	$0.4488 \cos \theta + 2.7334 \cos^2 \theta - 4.3509 \cos^3 \theta + 1.8137 \cos^4 \theta$	拡散	0.5301
	μ_{Dio}	μ_{Ddi}	室内	屋外	直達	$1 - 2.1244 \cos \theta - 1.7575 \cos^2 \theta + 0.4891 \cos^3 \theta - 0.0329 \cos^4 \theta$	直達	0.2778	
					拡散	$0.5764 \cos \theta - 1.2967 \cos^2 \theta + 1.2707 \cos^3 \theta - 0.4618 \cos^4 \theta$	拡散	0.0903	
	FL3 + A12 + LE3	τ_{Di}	τ_{Dd}	屋外	室内	直達	$0.4488 \cos \theta + 2.7334 \cos^2 \theta - 4.3509 \cos^3 \theta + 1.8137 \cos^4 \theta$	直達	0.5301
						拡散	$1 - 2.1244 \cos \theta - 1.7575 \cos^2 \theta + 0.4891 \cos^3 \theta - 0.0329 \cos^4 \theta$	拡散	0.2778
μ_{Dio}		μ_{Ddi}	室内	屋外	直達	$1.2826 \cos \theta - 3.6855 \cos^2 \theta + 4.0988 \cos^3 \theta - 1.5869 \cos^4 \theta$	直達	0.1229	
					拡散	$1.0125 \cos \theta + 0.9206 \cos^2 \theta - 2.5343 \cos^3 \theta + 1.2132 \cos^4 \theta$	拡散	0.5260	
LE3 + A12 + FL3		τ_{Di}	τ_{Dd}	屋外	室内	直達	$1 - 2.4219 \cos \theta - 2.3630 \cos^2 \theta + 0.8108 \cos^3 \theta - 0.0347 \cos^4 \theta$	直達	0.2541
						拡散	$0.5727 \cos \theta - 0.7844 \cos^2 \theta + 0.4996 \cos^3 \theta - 0.1289 \cos^4 \theta$	拡散	0.1465
	μ_{Dio}	μ_{Ddi}	室内	屋外	直達	$0.5838 \cos \theta + 0.5408 \cos^2 \theta - 1.4813 \cos^3 \theta + 0.7107 \cos^4 \theta$	直達	0.3040	
					拡散	$1 - 2.0667 \cos \theta - 2.5935 \cos^2 \theta + 1.4962 \cos^3 \theta - 0.3444 \cos^4 \theta$	拡散	0.4353	
	μ_{Dio}	μ_{Ddi}	室内	屋外	直達	$1.3314 \cos \theta - 2.8033 \cos^2 \theta + 2.6586 \cos^3 \theta - 0.9396 \cos^4 \theta$	直達	0.2362	
					拡散	$0.5838 \cos \theta + 0.5408 \cos^2 \theta - 1.4813 \cos^3 \theta + 0.7107 \cos^4 \theta$	拡散	0.3040	
μ_{Dio}	μ_{Ddi}	室内	屋外	直達	$1 - 2.0667 \cos \theta - 2.5935 \cos^2 \theta + 1.4962 \cos^3 \theta - 0.3444 \cos^4 \theta$	直達	0.4353		
				拡散	$0.3074 \cos \theta - 0.6604 \cos^2 \theta + 0.6316 \cos^3 \theta - 0.2262 \cos^4 \theta$	拡散	0.0520		
μ_{Dio}	μ_{Ddi}	室内	屋外	直達	$1.0125 \cos \theta + 0.9206 \cos^2 \theta - 2.5343 \cos^3 \theta + 1.2132 \cos^4 \theta$	直達	0.5260		
				拡散	$1 - 2.4219 \cos \theta - 2.3630 \cos^2 \theta + 0.8108 \cos^3 \theta - 0.0347 \cos^4 \theta$	拡散	0.2541		
μ_{Dio}	μ_{Ddi}	室内	屋外	直達	$0.9689 \cos \theta - 2.7943 \cos^2 \theta + 3.1392 \cos^3 \theta - 1.2272 \cos^4 \theta$	直達	0.0954		
				拡散					

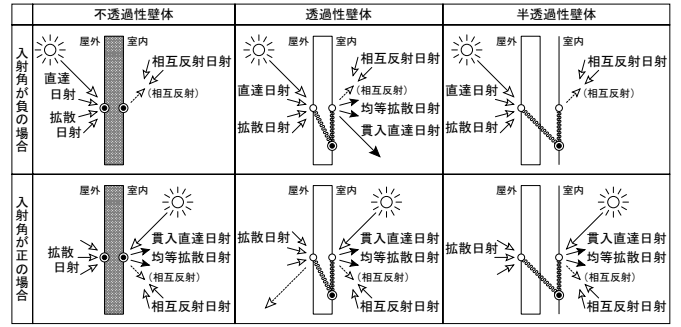


図5 日射の入射分類

は層間の熱抵抗に応じて室内表面の吸収量に換算している。軸組特性に関してはまず基準となる形状を設定する。先行研究¹⁾の事例から硝子張空間の平均的規模を求め、幅4m×奥行4m×高さ3mを標準寸法として建築基準法の木造建築物規定を参照し、図4に示す軸組形状を設定した。軸組を軸測投影法により作図し、軸組本体と間隙との面積比から間隙率を規定する。便宜上屋外側から見る場合の間隙率はガラス部分の面積に対する間隙の面積とし、室内側から見る場合の間隙率はサッシ全体の面積に対する間隙の面積とする。

次に、境界平面の日射吸収量を計算する。各境界平面に入射する直達日射量は、法線面直達日射量に太陽光線の入射角余弦を乗じて計算する。入射角余弦は太陽光線の方向余弦¹⁸⁾と境界平面法線の方向余弦から求める^{注2)}。各境界平面に入射する拡散日射量は、水平面天空日射量に天空に対する形態係数を乗じた値、及び水平面全天日射量に地面反射率と地面に対する形態係数を乗じた値の和で計算する。地面反射率は長期積雪期間は0.7、それ以外は0.2とする。

境界平面法線が常に室内側を向くと仮定すると、図5に示すように入射角が負の場合は屋外側から直達日射と拡散日射が入射する。不透過性壁体に入射した場合、直達日射と拡散日射は一部が屋外表

面に吸収される。透過性壁体に入射した場合、直達日射は大部分が透過し(貫入直達日射)、一部がサッシ内反射により均等拡散的に室内側に射出され(均等拡散日射)、一部が屋外表面と室内表面に吸収される。拡散日射は大部分が透過し(貫入拡散日射)、一部が均等拡散日射として室内側に射出され、一部が屋外表面と室内表面に吸収される。半透過性壁体に入射した場合、直達日射と拡散日射は一部が屋外表面と室内表面に吸収される。入射角が正の場合は室内側から貫入直達日射が入射し、屋外側から拡散日射が入射する。不透過性壁体に入射した場合、貫入直達日射は一部が室内表面に吸収され、残りが均等拡散日射として室内側に射出される。拡散日射は一部が屋外表面に吸収される。透過性壁体に入射した場合、貫入直達日射は一部が均等拡散日射として室内側に射出され、一部が屋外表面と室内表面に吸収される。拡散日射は大部分が貫入拡散日射、一部が均等拡散日射として室内側に射出され、一部が屋外表面と室内表面に吸収される。半透過性壁体に入射した場合、貫入直達日射は一部が室内表面に吸収され、残りが均等拡散日射として室内側に射出される。拡散日射は一部が屋外表面と室内表面に吸収される。ここで貫入拡散日射は均等拡散日射と同等に扱うこととして図5に示すすべての場合について、射出された均等拡散日射が硝子張空間の室内表面間で相互反射した成分(相互反射日射)が室内側から入射し、透過性壁体から屋外に透過する以外は室内表面に吸収される。尚、透過性壁体と半透過性壁体では定常計算とするため、屋外表面の吸収量は壁体内の熱抵抗に応じて室内表面の吸収量に換算する。

不透過性壁体の日射吸収量は入射量に室内表面、屋外表面の日射吸収率を乗じて計算する。室内表面の日射吸収率は黒色、白色、明るい緑色の日射吸収率¹⁹⁾を基準として彩度と明度を段階的に変化させ、図1②のカラーパレット上段から順に0.26、0.38、0.50、0.67、0.84で設定した。色相の違いで差はないとした。屋外表面の日射吸収率は室内気温への影響が比較的小さいので一様に0.50で設定した。

透過性壁体の日射吸収量は以下の手順で計算する。透過性壁体に入射した直達日射はサッシとガラスの表面積に応じて分配され、サッシの日射吸収率0.45、ガラスの日射吸収率 μ_{Doi} で吸収され、ガラスの日射透過率 τ_{Doi} で透過する。透過した直達日射は図6①に示すように室内に β_{Doi} 、軸組間方向の木材面に $0.9587 - \beta_{Doi}$ 、屋外方向の木材面に0.0413が入射する。木材に入射した日射は反射率0.10で反射し吸収率0.90で吸収される¹⁹⁾。図6②に示すように屋外方向の木材面で反射した日射は全てガラスに入射し、軸組間方向の木材面で反射した日射は形態係数に応じてガラスに0.4360、対向する木材に0.1280、室内に0.4360が入射する。ガラスに入射した日射は

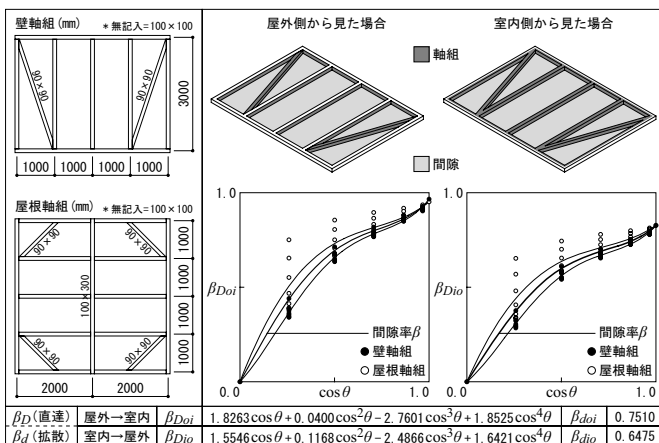


図4 サッシの軸組特性

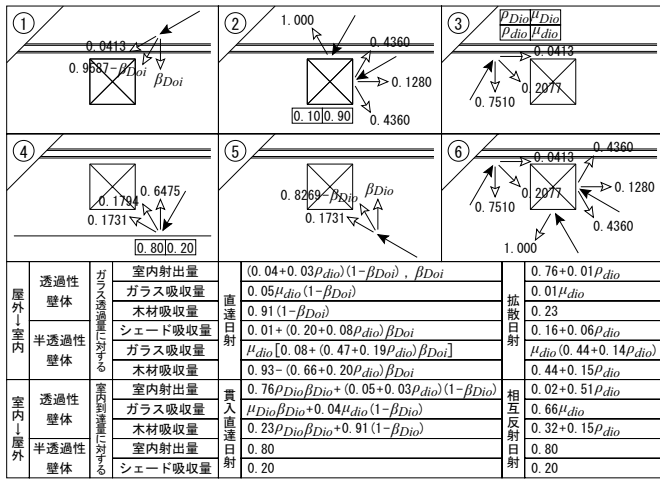


図 6 サッシ内反射の計算内容

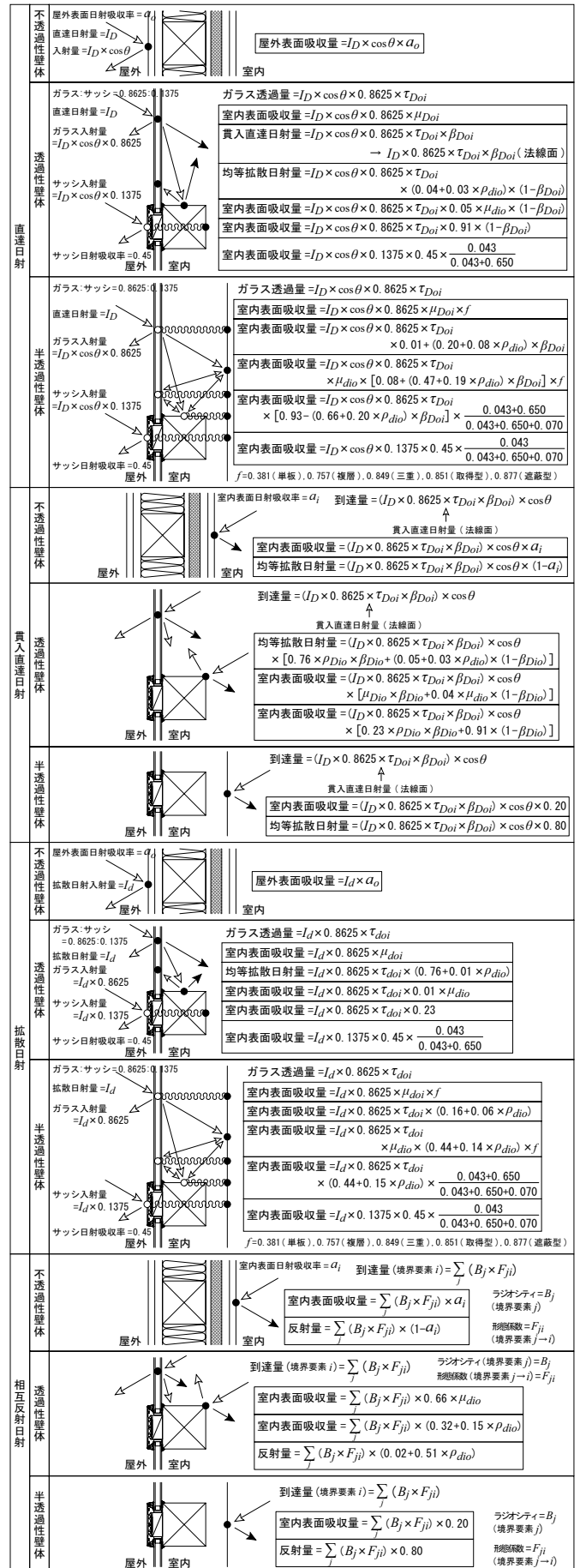
反射率 ρ_{dio} で反射し吸収率 μ_{dio} で吸収される。ガラスで反射して室内方向に再入射する日射は図 6 ③に示すように室内に 0.7510、軸組間方向の木材面に 0.2077、屋外方向の木材面に 0.0413 が入射する。以降は反射と吸収について計算を繰返し、室内射出量、ガラス吸収量、木材吸収量の総和を求める。半透過性壁体の場合は、図 6 ①～③で室内に入射する日射がシェードの反射率 0.80 で反射し吸収率 0.20 で吸収される。シェードで反射した日射は図 6 ④に示すようにガラスに 0.6475、軸組間方向の木材面に 0.1794、室内方向の木材面に 0.1731 が入射する。以降は反射と吸収について計算を繰返し、シェード吸収量、ガラス吸収量、木材吸収量の総和を求める。拡散日射については τ_{Doi} 、 μ_{Doi} 、 β_{Doi} を τ_{doi} 、 μ_{doi} 、 β_{doi} に置き換えて同様に計算する。透過性壁体に入射した貫入直達日射は、図 6 ⑤に示すようにガラスに β_{Dio} 、軸組間方向の木材面に 0.8269- β_{Dio} 、室内方向の木材面に 0.1731 が入射する。ガラスに入射した貫入直達日射は反射率 ρ_{Dio} で反射し吸収率 μ_{Dio} で吸収される。図 6 ⑥に示すように室内方向の木材面で反射した日射は全て室内に入射し、ガラスで反射した日射、軸組間方向の木材面で反射した日射は図 6 ②～③と同様の内容で入射する。以降は反射と吸収について計算を繰返し、室内射出量、ガラス吸収量、木材吸収量の総和を求める。相互反射日射については ρ_{Dio} 、 μ_{Dio} 、 β_{Dio} を ρ_{dio} 、 μ_{dio} 、 β_{dio} に置き換えて同様に計算する。

以上の計算内容を総合して、直達日射、貫入直達日射、拡散日射に対する日射吸収量と均等拡散日射射出量、及び相互反射日射に対する日射吸収量と日射反射量を図 7 に一覧で示す。

日射吸収量の計算手順は、初めに直達日射、貫入直達日射、拡散日射の入射量から第一吸収量、均等拡散日射射出量を計算する。次に均等拡散日射射出量からラジオシティ法²⁰⁾で相互反射日射の最終的な入射量を求めて第二吸収量を計算し、第一と第二を総和する。但し、貫入直達日射は透過してきた境界平面ごとに入射量が異なるので、同一境界平面上でも日射吸収量、均等拡散日射射出量に分布が生じる。そこで本ソフトウェアでは境界平面を 8 × 8 分割した境界要素を単位として、日射を含む全ての熱取得計算を行う注³⁾。

3-2. 長波長放射熱取得の計算

屋外表面の長波長放射熱取得は一般に式 1 で示される。また、室内表面の長波長放射熱取得は、放射熱交換係数²¹⁾の概念を用いて室内表面温度の 4 乗項を線形近似化すると式 2 で示される。



$$P_o = \alpha_{ro}(T_{out} - T_{so}) - \epsilon_o F_s P_e \dots (1) \quad P_i = -\alpha_{ri}(T_{si} - \sum_j \Phi_{ij} T_{sj}) \dots (2)$$

n : 境界要素総数 (-) P_e : 実効放射量 (W/m²) α_{ri} : 室内表面放射熱伝達率 (W/m²·K)
 F_s : 天空に対する形態係数 (-) T_{out} : 屋外気温 (°C) α_{ro} : 屋外表面放射熱伝達率 (W/m²·K)
 P_i : 室内表面長波長放射熱吸収量 (W/m²) T_{si}, T_{sj} : 室内表面温度 (°C) ϵ_o : 屋外表面放射率 (-)
 P_o : 屋外表面長波長放射熱吸収量 (W/m²) T_{so} : 屋外表面温度 (°C) Φ_{ij} : 境界要素間放射熱交換係数 (-)

Φ_{ij} は室内表面 i から室内表面 j へ長波長放射で伝達される熱流の比率を示す。 Φ_{ij} の計算に用いる室内表面放射率は、不透過性壁体と半透過性壁体の場合は一般建材の 0.9、透過性壁体の場合はガラス 0.9、木材 0.6 としてサッシ内反射を考慮し 0.8 とする。 ϵ_o は不透過性壁体の場合は一般建材の 0.9、透過性壁体と反透過性壁体の場合はガラス 0.9、サッシ 0.2 として屋外の表面積比から 0.8 とする。 α_{ri} は全境界要素の T_{si} について絶対温度平均を \bar{T}_{si} として、各境界要素の自身に対する放射熱交換係数に $4\sigma\bar{T}_{si}^3$ を乗じて計算する¹⁸⁾。

3-3. 室内気温の計算

日射熱取得と長波長放射熱取得の影響を考慮すると、各境界要素に対する屋外相当温度は式 3、室内相当温度は式 4 で示される。

$$T_{eo} = T_{out} + \frac{I_o - \epsilon_o F_s P_e}{\alpha_o} \dots (3) \quad T_{ei} = \frac{\alpha_{ci} T_{im} + I_i + \alpha_{ri} \sum_j \Phi_{ij} T_{sj}}{\alpha_i} \dots (4)$$

T_{ei} : 室内相当温度 (°C) α_{ci} : 室内表面対流熱伝達率 (W/m²·K)
 I_i : 室内表面日射吸収量 (W/m²) T_{eo} : 屋外相当温度 (°C) α_i : 室内表面総合熱伝達率 (W/m²·K)
 I_o : 屋外表面日射吸収量 (W/m²) T_{in} : 室内気温 (°C) α_o : 屋外表面総合熱伝達率 (W/m²·K)

隣接空間が屋内の場合は T_{eo} を 19.5 ~ 25.5°C とする^{注 4)}。床面の隣接空間が屋外の場合は T_{eo} をスラブ下 3m の地中温度とし、0.5m ごとに節点を加え日平均気温を室内境界条件として 1 年間の助走計算を行う。 α_{ci} は Wilkes の実験値を鉛直面 3.5W/m²·K、水平面上向 5.8W/m²·K、下向 2.2W/m²·K を基準として T_{si} と T_{in} の差により近似³⁾、 α_o は 23W/m²·K とする。 T_{eo} と T_{ei} を用いて各境界要素の室内表面温度を不透過性壁体は式 5、透過性壁体と半透過性壁体は式 6 で計算する。

$$\frac{T_m - T_m^*}{\Delta t} = \frac{2}{C_m + C_{m+1}} \left(\frac{T_{m+1} - T_m}{R_{m+1}} - \frac{T_m - T_{m-1}}{R_m} + q_m \right) \dots (5) \quad \begin{cases} T_0 = T_{si}, T_1 = T_{ei} \\ T_M = T_{so}, T_{M+1} = T_{eo} \\ (m = 0, 1, 2, \dots, M) \end{cases}$$

$$T_{si} = \left(1 - \frac{K}{\alpha_i} \right) T_{ei} + \frac{K}{\alpha_i} T_{eo} \dots (6) \quad \begin{matrix} T_m^* : \text{節点 } m \text{ の温度 (}^\circ\text{C)} \\ q_m : \text{節点 } m \text{ の発熱量 (W/m}^2\text{)} & C_m : \text{節点 } m-1, m \text{ 間の熱容量 (J/m}^2\text{·K)} & T_m^* : \text{ } \Delta t \text{ 前の節点 } m \text{ の温度 (}^\circ\text{C)} \\ t : \text{時間 (s)} & R_m : \text{節点 } m-1, m \text{ 間の熱抵抗 (m}^2\text{·K/W)} & K : \text{平均熱貫流率 (W/m}^2\text{·K)} \end{matrix}$$

式 5 では図 3 に示す節点間の熱抵抗と熱容量を用いて、非定常熱伝導方程式を差分法で離散化している。各節点ごとの連立方程式を行列演算で解き T_m を求め T_0 が T_{si} となる。床暖房が有の場合は床面に q_m に発熱量を加える。式 6 では図 3 に示す平均熱貫流率を用いて、定常熱伝導計算で T_{si} を導出している。得られた全境界要素の T_{si} を式 7 で示される室内空気熱平衡式に代入して室内気温を計算する。

$$\sum_j A_j \alpha_{ci} (T_{in} - T_{si}) = C_a V (T_{out} - T_{in}) + Q_g + Q_l \dots (7)$$

A_j : 表面積 (m²) Q_g : 室内発生顕熱の対流成分 (W)
 V : 隙間風量, 自然換気量 (m³/s) C_a : 室内空気の容積熱抵抗 (J/m³·K) Q_l : 空調機顕熱負荷 (W)

C_a は条件に関わらず一定とし、常温 20°C、常湿 65%、常圧 101.325kPa を基準に 1215J/m³·K とする。 Q_g は 0 とし^{注 5)}、硝子張空間は機械的環境制御を想定しないので Q_l も 0 とする。式 7 の右辺第 1 項は換気による熱取得であり、自然換気を無とする場合は趙ら²²⁾ が示す換気回数算出法^{注 6)} を用いて隙間風量を式 8 で計算する。

$$v = \frac{[0.80 + 0.021(T_{in} - T_{out}) + 0.0002(T_{in} - T_{out})^2] V}{3600} \dots (8)$$

$$v_{出} = \frac{8\alpha\omega [p + \eta_l(\gamma_{out} - \gamma_{in})]^{\frac{3}{2}}}{3(\gamma_{out} - \gamma_{in})} \dots (9) \quad v_{入} = \frac{8\alpha\omega [p + \eta_b(\gamma_{out} - \gamma_{in})]^{\frac{3}{2}}}{3(\gamma_{out} - \gamma_{in})} \dots (10)$$

α : 流量係数 (-) η_b : 縦長開口の下端高さ (m)
 P : 室内圧 (kg/m²) γ_{in} : 室内空気の密度 (kg/m³) η_l : 縦長開口の上端高さ (m)
 V : 室容積 (m³) γ_{out} : 屋外空気の密度 (kg/m³) ω : 縦長開口の幅 (m)

自然換気を有とする場合は縦長開口の通気量計算法²³⁾ を用いて、各開口の流出量を式 9、流入量を式 10 で計算する。 α は 0.65 とする。

各時刻における諸量は式 1 ~ 式 10 を全て満足する必要があるため、 Δt 前の諸量から出発して $T_m, T_{si}, T_{so}, T_{im}$ が収束するまで全式の計算を繰り返す反復法のアルゴリズムを用いる。時間刻みを 6 分間として陽的に解き、初期値の影響を除くため 10 日間の助走計算を行う。

4. 実測値と予測値の比較

本ソフトウェアの実用性を検証するため、硝子張空間の室内気温の実測値と予測値を比較した。比較内容は①通常状態、②床暖房状態、③自然換気状態とする。実測値は図 8 に示す北海道旭川市に建設されている実験棟の 15 測定点の平均値とする。予測値はまず実験棟から最も近い気象観測所である旭川地方気象台の気象統計情報を基に、拡張アメダス気象データと同等の計算方法で気象データを用いた。実験棟の床面積、室容積に最も近い寸法を入力し、境界平面の仕様を実験棟に合わせて入力した。床暖房は各日 18 時から翌 8 時までとし、実験棟は床暖房を敷設していないため床置き放射暖房機で代用し、機器容量を床面積で除した値を発熱量として入力した。自然換気は開口 1、2 の 2 箇所を 24 時間開放とし、開口面積に最も近い寸法を入力した。実験棟の本ソフトウェア仕様との相違点は、落雪のため傾斜角 22° の屋根勾配がある、約 1.5 倍の軸組木材量がある、床断面構成が RC 造でなく木造であることが挙げられる。

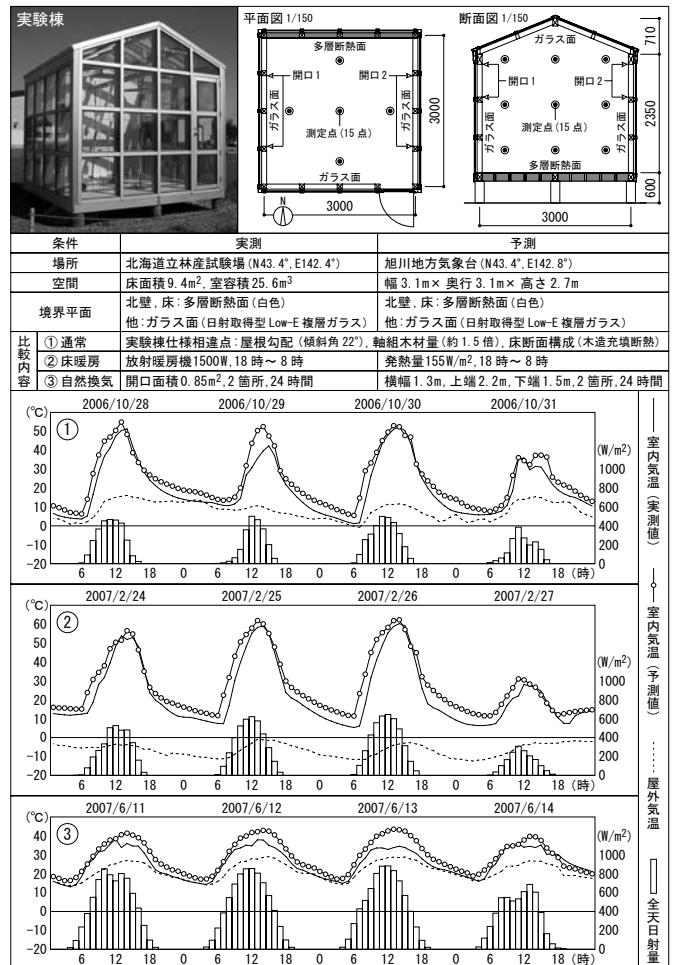


図 8 実測値と予測値の比較内容

①通常状態では実測値と予測値の挙動は全体に良く一致している。夜間に予測値が高い傾向が見られるが、予測では熱容量の大きい床断面構成を設定しているため、蓄熱成分の室内空気への放熱が計上されるためと推察する。②床暖房状態では暖房中も含め挙動は全体に良く一致している。夜間から昼間にかけて予測値が高い傾向が見られるが、同様に蓄熱成分の室内空気への放熱が計上されるためと推察する。③自然換気状態では実測値より予測値が常に高い傾向が見られるが、測定時の平均風速が2.8m/sで、温度差換気のみで計算した予測より実際の通気量が多いためと推察する。何れにせよ大局的な傾向把握、相対的な性質比較という観点で見ると、本ソフトウェアの予測結果は計画段階における有効な資料となり得ると考える。

5. まとめ

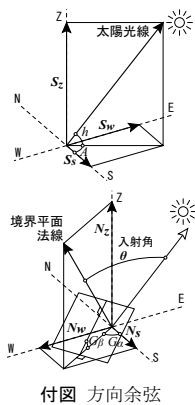
硝子張空間の室内気温と室内相対湿度、及び暖房、換気による環境調整の影響を簡易予測するソフトウェアを開発した。実測値と比較検証した結果、本ソフトウェアは温熱環境の大局的な傾向把握、入力条件の違いによる相対的な性質比較が可能であり、特に計画段階において有用と考える。尚、本稿は「平成17年度北海道大学π型フロントランナー研究（研究費支給）」の研究成果の一部である。

謝辞

本研究の実験に多大な御協力を頂いた北海道立林産試験場の平間昭光氏をはじめ関係者各位に対し、記して謝意を表する次第である。

注

- 注1) 戸建住宅の規模では室内気温の上下温度差は比較的小さいと判断している。平松ら²⁾によれば高さ4.5mの場合で上下温度差は0.1～2.9℃である。
- 注2) 方向余弦は付図に示すように南、西、天を正とする南北、東西、天地軸と、太陽光線及び境界平面法線がなす角の余弦である。太陽光線方向の方向余弦は太陽の方位角 A と高度 h から計算し、境界平面法線方向の方向余弦は境界平面の方位角 G_a と傾斜角 G_b から計算する。境界平面への太陽光線の入射角は $\cos\theta = S_N N_s + S_W N_w + S_Z N_z$ で計算する。
- 注3) 境界平面を 4×4 分割、 8×8 分割、 16×16 分割した場合に、境界平面上の貫入直達日射の分布面積について真値との誤差を夏至と冬至で計算した結果、両全日の平均誤差は約5%、3%、1%、各時刻の最大誤差は約10%、6%、3%である。計算時間の増大を考慮して全体平均で3%程度の誤差を許容し、 8×8 分割を妥当と判断している。
- 注4) 佐藤ら²⁴⁾が示す札幌における高性能住宅の昼間室温（夏期25.5℃～冬期21.2℃）と夜間室温（夏期23.6℃～冬期19.5℃）を参照し、隣接室温を昼夜を区別して年周期で正弦波変動させ、相当温度として設定した。
- 注5) 山崎ら²⁵⁾が示す住宅内での活動時間と滞留時間を参照し、硝子張空間における発生顕熱を試算すると、1日の約2/3が非活動時で0、滞留時も人体、機器発熱を合わせて約39Wで室内気温に対する影響は小さいと判断した。
- 注6) 住宅地、外部風速3m/s、気密性能 $7\text{cm}^2/\text{m}^2$ の条件で換気回数を近似した。



付図 方向余弦

参考文献

- 1) 森田謙太郎, 森傑, 奥俊信, 中村和喜: 硝子張空間の建築構成と利用実態の分析, 北海道の戸建住宅における硝子張空間の計画に関する研究(1), 日本建築学会計画系論文集, 第619号, pp. 25～32, 2007.9
- 2) 平松徹也, 原田剛, 加藤信介, 村上周三, 吉野博: 構成部材が自然室温時の室内温熱環境に与える影響に関する検討, 実験用実大アトリウム内の温熱環境解析 その1, 日本建築学会計画系論文集, 第498号, pp. 37

- 3) 平松徹也, 原田剛, 加藤信介, 村上周三, 吉野博: 自然室温における室内温熱環境の統計的解析, 実験用実大アトリウム内の温熱環境解析 その2, 日本建築学会環境系論文集, 第504号, pp. 17～24, 1998.2
- 4) 平松徹也, 原田剛, 加藤信介, 村上周三, 吉野博: 冷房時, 自然換気時における温熱環境の分析, 実験用実大アトリウム内の温熱環境解析 その3, 日本建築学会計画系論文集, 第513号, pp. 23～30, 1998.11
- 5) 尾関義一, 斉藤恒洋, 大柿聡: 複雑な内部形状を有する大規模メッシュ対応型放射伝熱計算手法に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 第62号, pp. 101～110, 1996.7
- 6) 尾関義一, 斉藤恒洋, 尊田嘉之, 大柿聡, 平松徹也: 放射・対流連成解析のための複雑な内部形状, 大規模メッシュに対応する日射熱取得計算手法に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 第66号, pp. 1～11, 1997.7
- 7) 尾関義一, 加藤信介, 村上周三: 実験用実大アトリウム内の熱伝導・気流性状に関するCFD解析, 第1報 CFD・2波長放射連成シミュレーションにおけるサッシュのモデリングに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 第68号, pp. 65～75, 1998.1
- 8) 尾関義一, 加藤信介, 村上周三: 実験用実大アトリウム内の熱伝導・気流性状に関するCFD解析, 第2報 シミュレーション条件の単純化が予測結果に与える影響, 空気調和・衛生工学会論文集, 第69号, pp. 85～95, 1998.4
- 9) 絵内正道: 積雪寒冷型アトリウムの計画と設計, 北海道大学図書刊行会1995
- 10) 久保田克己, 絵内正道, 荒谷登: 積雪寒冷地における透明天蓋空間の温度環境計画, 日本建築学会技術報告集, 第7号, pp. 99～104, 1999.2
- 11) 佐藤彰治, 絵内正道, 横平昭: 濃霧発生地域におけるサンルーム付き住宅の有効性について, その1 湿度性状に及ぼす夏の濃霧と冬の多日射の影響, 日本建築学会環境系論文集, 第581号, pp. 15～20, 2004.7
- 12) 佐藤彰治, 絵内正道, 本間義規: 濃霧発生地域におけるサンルーム付き住宅の有効性について, その2 簡易的なサンルームを付設した既存住宅の夏期の調温調湿効果, 日本建築学会環境系論文集, 第625号, pp. 313～320, 2008.3
- 13) 佐藤彰治, 絵内正道: 北海道における住宅用ガラス被覆付設空間に関する調査, 濃霧発生地域におけるサンルーム付き住宅の有効性について, 日本建築学会技術報告集, 第23号, pp. 211～216, 2006.6
- 14) 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ1981-2000, 鹿児島TL0 2005
- 15) 北海道農業試験場: 北海道の1kmメッシュの根雪情報と表示システム, 北海道農業試験場2001
- 16) 北海道建設部建築指導課, 北海道立北方建築総合研究所: 新しい北方型住宅のつくり方, 北方型住宅技術解説書, 北海道建設部建築指導課2005, 改訂版2009
- 17) 日本板硝子: ガラス建材総合カタログ ガラス技術資料編, 日本板硝子
- 18) 宇田川光弘: パソコンによる空気調和計算法, オーム社1986
- 19) 日本建築学会: 建築設計資料集成1 環境, 丸善1978
- 20) Michael, F.C. and Donald, P.G.: The Hemi-Cube, A Radiosity Solution for Complex Environments, ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'85), Vol.19, No.3, pp. 31-40, 1985.7
- 21) Sparrow, E.M. and Cess, R.D.: Radiation Heat Transfer, Hemisphere Pub. Corp. 1970, augmented edition 1978
- 22) 趙雲, 荏原幸久, 吉野博: 住宅における換気量の簡易予測法, 日本建築学会計画系論文集, 第512号, pp. 39～44, 1998.10
- 23) 日本建築学会環境工学委員会: 換気設計 日本建築学会設計計画パンフレット, 彰国社1957
- 24) 佐藤豊, 郡公子, 石野久彌: 自然室温による日本各地の戸建住宅の熱性能評価に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第573号, pp. 41～46, 2003.11
- 25) 山崎さゆり, 高橋公子: 時間量による生活の類型化, 生活時間からみた行動と滞留空間の対応関係に関する研究 その1, 日本建築学会計画系論文集, 第491号, pp. 67～74, 1997.1

[2009年6月18日原稿受理 2009年11月9日採用決定]