

慶應型共進化住宅における環境シミュレーションの整合性検証

高城冬悟

慶應義塾大学大学院 政策メディア研究科2年 池田靖史研究室

概要

本研究では環境シミュレーションの温熱シミュレーション数値と実際の住宅における室内温度実測値との整合性を検証した。どのように実測値とシミュレーション値を比較し、精度検証を行うかという比較手法の検討と比較検討による誤差の傾向分析をすることが目的である。どのような時にシミュレーションにおいて誤差が出やすいかということを検証することで、環境シミュレーションの有用性を把握するとともに、設計段階や利用段階における環境シミュレーションの適用可能性を探ることが本研究の目指すところである。

環境シミュレーションと実測値との比較をし、その傾向を統計的に分析しながら、段階的に設定を加えていくことで、誤差傾向を探っていく。本研究では環境シミュレーションである Design Builder を用いて、熱収支解析を行うエネルギーシミュレーションと CFD 解析による2つのシミュレーションを連携させながら、検証を進めた。本研究では CFD 解析による環境シミュレーションの有用性と整合性検証のための解析方法を提示した。

1-1. 研究背景

近年、建築業界では、コンピューターの普及により、様々な解析シミュレーションを行うことができるようになってきた。解析シミュレーションを用いることにより、風や熱や光などの環境を可視化し把握することができ、たとえば、設計段階では、建物自体への風の影響や周辺環境へ及ぼす風環境の変化を検証したり、夏のときの温度分布や、どのように風が入ってくるのかを視覚的にチェックすることで、環境面での建物のデザインの最適化を図っている。

特に近年では、省エネルギーやエコロジーへ向かう世界的なトレンドが生まれ、イニシャルコストとランニングコストの比較など、多くの解析結果を検証しながら、より効果的な省エネの建築物を目指す動きが強まっている。こうした、省エネを目指す企業の対外的アピールの重要性も増し、そのアピールを視覚的に行えるシミュレーションへのニーズも拡大しているといえる。

シミュレーションを使えば、たとえば煙突の排熱が外気取り入れ口にどれだけ影響があるのかなどといった、今までは見えなかった、わからなかったものを数値化して見ることができる。設計者が自分の手で解析ソフトを使い、温度だけでなくいろいろな指標を設計にフィードバックできるようになれば、設計支援ツールとして設計段階での利用が期待される。しかし、環境シミュレーションでは、境界条件の違いによって結果が大きく変わるため、本当にシミュレーションの値が正しい結果であるかということの検証が重要となる。シミュレーションの精度はまだ粗く、現段階では大型建築のほうが有効であり、住環境レベルの設計ツールとしてどのようにして精度を担保するかが早急な課題だと考えられる。また、設計段階のみならず、実際に

設計された空間が環境的に意図されたものになっているかを検証することも重要な課題である。

1-2. 研究目的

温熱環境シミュレーションの実践的利用を図るため、住宅における実測値に対してシミュレーション方法の差異を比較することで、設定変化による誤差傾向と補正効果について明らかにする。本研究では環境シミュレーションの温熱シミュレーション数値と実際の住宅における室内温度実測値との整合性を検証する。どのように実測値とシミュレーション値を比較し、精度検証を行うかという比較手法の検討と比較検討による誤差の傾向分析をすることが目的である。どのような時にシミュレーションにおいて誤差が出やすいかということを検証することで、環境シミュレーションの有用性を把握するとともに、設計段階や利用段階における環境シミュレーションの適用可能性を探ることが本研究の目指すところである。

1-3. 研究意義

シミュレーションの設定変化による誤差傾向と補正効果を検証することで温熱環境シミュレーションがどのくらいの精度をもち、どのような時に環境シミュレーションが役立つのかを明らかにする。これは、設計者や専門家だけでなく、一般のユーザーレベルでも使えるような環境シミュレーションの利用に寄与することができる。

2-1. 研究方法

本研究では、温熱環境シミュレーションソフトである Design Builder を用いる。Energy Plus による日射

取得や熱収支の計算によって得られる建物の境界条件を用いることで、CFD（数値流体力学：Computational Fluid Dynamics）により、建物内外の空気の流れ、温度分布をシミュレーションできる。Energy Plusはゾーン同士および外部からの熱収支を計算するため、その結果はゾーン（部屋）ごとの出力となる。ゾーン内のある特定の箇所の温度を精度よく予測するためにはCFDによる解析が必要となる。本研究では、Energy Plusによるゾーンごとの温度・時間変化のシミュレーションとCFD解析によるセンサーポイントのシミュレーションの2つのシミュレーションを扱う。

2-2. モデリング

Design Builderにてモデリングを行った。寸法は実施図面に即してモデリングを行っている。

モデリングと実際の壁パネル工法とは寸法上若干のズレが生じる箇所もあるが、誤差は100mm以内である（天井高さ等にズレはない）。

また、床下の段差部分は実際には合板によって塞がれ、30mmほどの隙間しかない。しかし、CFD解析の予備実験の段階で、空気の流れが確認できなかったため、150mmと補正を行った。

構成部材の設定値については、補足資料1に示す。

2-3. 気象条件設定

現地の気象データが取得できない日時があったことから、本研究では海老名市の気象データを用いる。また、アメダス気象データにはない設定項目は全日一律とした。

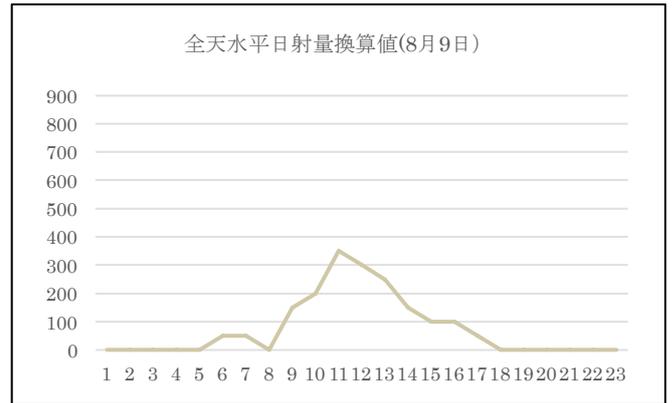
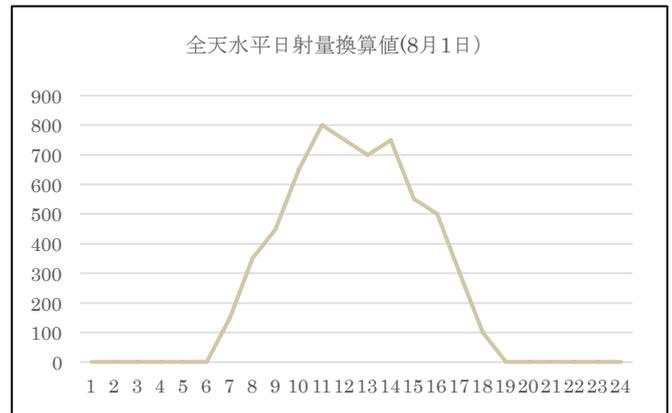
日射に関しては、慶應型共進化住宅の太陽光発電量を参照し、全天水平日射量に換算、それを直達日射量と拡散水平放射量に分離した。以下、その手順を記す。

① 全天水平日射量の算出

全天水平日射量は、設置場所の緯度、季節による太陽高度、パネルの傾斜角及び方位によって変わるが、太陽電池が受ける日射量は傾斜面日射量であるため、太陽光発電量から全天日射量を算出するのは手間がかかる。このため、本研究では簡易的に最大太陽光発電量から全天水平日射量を算出する。

夏の全天水平日射量のおおよその最大値である900W/m²に太陽光発電量最大値を換算し、その倍数だけ、すべての太陽光発電量を等倍する。ここで、発電量＝システム容量×日射量×損失係数（％）と表すことができる。発電ロスは、夏で20パーセントほどであるため、冬（11月・12月分）の全天水平日射量は換算値×0.8として算出した。（図1）

図1. 全天水平日射量換算値

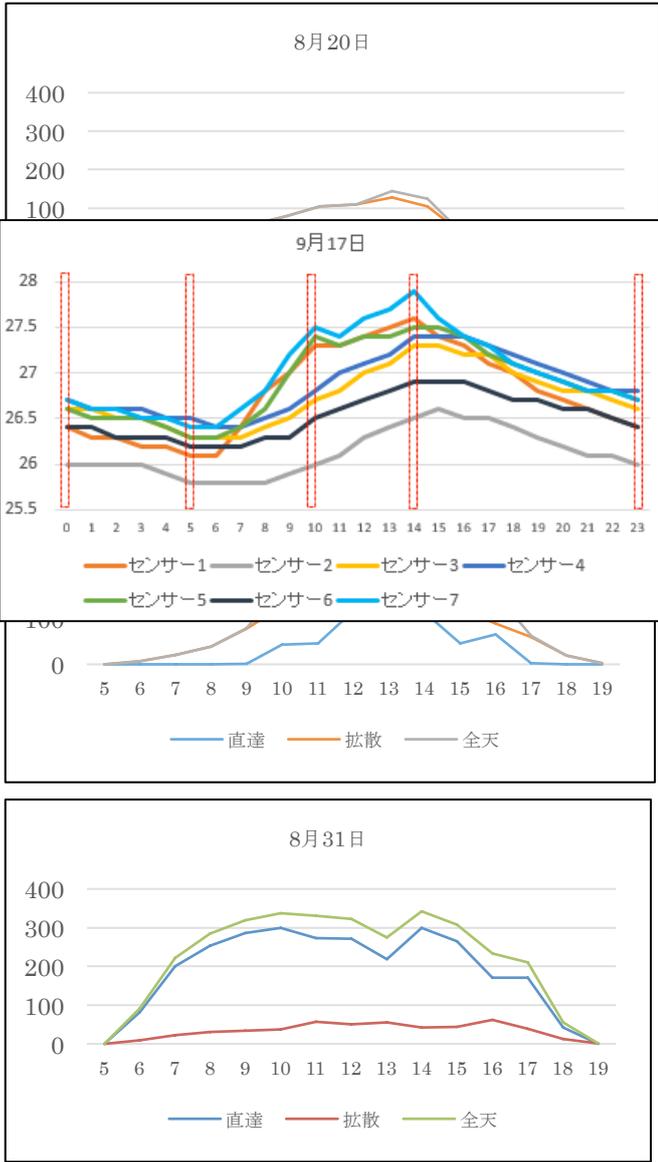


② 直達日射量と拡散水平放射量の算出

全天水平日射量は直達日射量と拡散水平放射量に分けられるが、全国的にこれらの数値を計測しているデータはないため、札幌市の過去の全天水平日射量における直達日射量と拡散水平放射量の割合の平均値を算出し、その割合値を太陽光発電量から換算した全天水平日射量に当てはめた。

札幌市の8月と10月における全天水平日射量における直達日射量と拡散水平放射量の割合の傾向を分析し、日の最大全天水平日射量によって直達日射量と拡散水平放射量の割合の傾向が異なることから、全天水平日射量の日最大値が0以上300未満の場合、300W/m²以上800W/m²未満の場合、800W/m²以上の場合で1日の時間ごとの平均割合値を算出した。図2（縦軸＝日射量 [0.01 MJ/m²]、横軸＝時間）はその3パターンを表しており（全天水平日射量の日最大値が0以上300未満 [8月20日]、300W/m²以上800W/m²未満の場合 [8月21日]、800W/m²以上の場合 [8月31日]）、全天水平日射量の日最大値が0以上300W/m²未満の場合、直達日射量はほぼ0になり、全天水平日射量と拡散水平放射量はほぼ等しくなる。全天水平日射量の日最大値が300W/m²以上800W/m²未満の場合、朝方は拡散水平放射量が多く、正午すぎに直達日射量が増え始める。全天水平日射量の日最大値が800W/

図2. 直達日射量と拡散水平放射量の割合傾向



m2 以上の場合、直達日射量の割合がほぼ 8 割近くを占める。
 ここで割り出した、1 日の全水平日射量における直達日射量の割合を示す。

	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時
1	0.19	0.22	0.25	0.29	0.31	0.25	0.34	0.38
2	0.28	0.64	0.75	0.77	0.74	0.75	0.66	0.57

1=全水平日射量の日最大値が 300W/m2 以上 800W/m2 未満の場合

2=全水平日射量の日最大値が 800W/m2 以上の場合
 ※全水平日射量の日最大値が 0 以上 300W/m2 未満の場合は、直達日射は 0 とする。

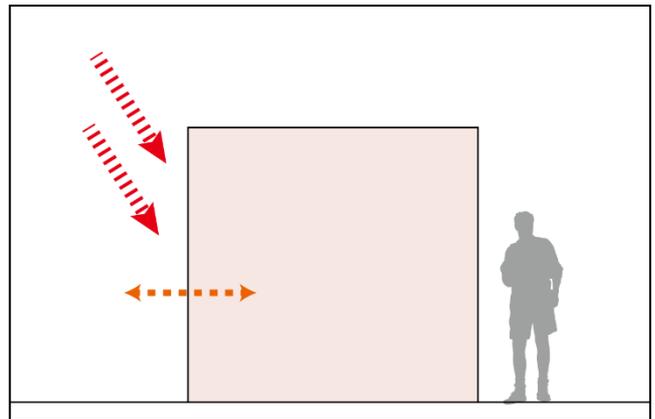
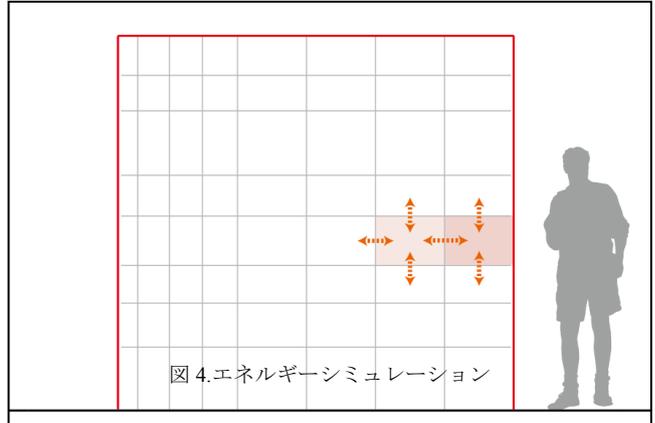
上記の表の数字を、①で換算した全水平日射量に乘算することで、シミュレーション期間（8 月～12 月）の全水平日射量・直達日射量・拡散水平放射量を簡易に算出した。

2-4. 温熱センサー設置位置
 補足資料 2 に実測センサー位置を示す。

2-5. 検証手順

図 5. CFD 解析

図 4 は Energy Plus によるエネルギーシミュレーション



外気温や日射等による各ゾーン（部屋）の熱収支を計算し、ゾーン全体の空気温度を計算する。図 5 は CFD 解析による計算の概念図である。Energy Plus のエネルギーシミュレーションによって得られた表面境界温度を用いて、メッシュ分割されたセル間の熱移動の方程式を解くことにより、7 時の温度を計算する。セルの数が多ければ多いほど（メッシュ分割数が多いほど）精度が高くなるが、計算時間が長くなる。

エネルギーシミュレーションでは、時間推移のゾーンごとの空気温度をシミュレーションできるため、取得したほぼ全日毎時間ごとの実測値（8 月～11 月まで）との比較を行う。一方、CFD 解析では、ある時間の表面境界条件をインポートし、シミュレーションを行うため、1 日の中の特定の時間を任意に指定しなければならない。指定する時間は実測値に基づき、温度変化（上

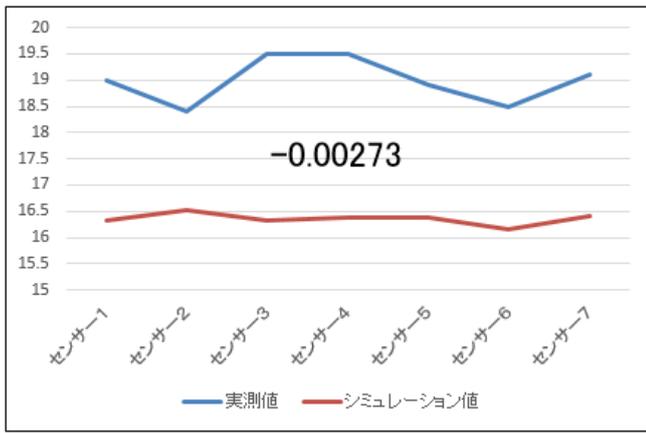


図 9. 相関関数

	時刻	相関係数
9月24日	0	0.70
	6	0.66
	9	0.84
	13	0.79
	23	0.70
10月5日	0	0.33
	5	0.23
	10	0.33
	14	0.15
	19	-0.10
	23	-0.18

図 10. 一時刻の相関関数の算出

3-1. 検証結果

図 10 はエネルギーシミュレーションの日変化差分値の検証結果であるが、エネルギーシミュレーションは

	スペース2	スペース1	ダイニング	スペース3	洗面所	床下
0	-2.29	-1.55	-2.42	-2.37	-2.43	-3.19
1	-2.4	-1.73	-2.61	-2.39	-2.51	-2.89
2	-2.42	-1.92	-2.69	-2.51	-2.59	-2.9
3	-2.6	-2.07	-2.9	-2.59	-2.61	-2.81
4	-2.68	-2.33	-3.03	-2.78	-2.73	-2.82
5	-2.75	-2.46	-3.25	-2.84	-2.74	-2.73
6	-2.61	-2.32	-3.28	-2.69	-2.81	-2.75
7	-2.59	-0.94	-3.04	-1.9	-2.57	-2.76
8	-2.53	1.43	-2.5	-1.14	-2.42	-2.77
9	-2.08	3.57	-1.85	-0.4	-2.11	-2.77
10	-1.44	4.44	-1.24	0.15	-1.89	-3.96
11	-0.9	3.72	-0.66	0.38	-1.78	-5.15
12	-0.3	2.79	-0.42	0.46	-1.29	-5.02
13	0.05	2.34	-0.27	0.34	-0.73	-6.49
14	-0.03	1.96	-0.22	0.09	-0.56	-5.85
15	-0.59	1.38	-0.43	-0.44	-0.93	-7.12
16	-1.06	0.88	-0.68	-0.89	-1.37	-4.99
17	-1.23	0.58	-0.76	-1.12	-1.54	-4.96
18	-1.21	0.35	-0.82	-1.19	-1.64	-4.54
19	-1.31	0.07	-1.01	-1.3	-1.65	-4.32
20	-1.44	-0.12	-1.15	-1.52	-1.77	-4.11
21	-1.82	-0.7	-1.58	-1.88	-1.91	-3.6
22	-1.88	-0.88	-1.86	-1.95	-2.04	-3.5
23	-2.1	-1.22	-2.06	-2.17	-2.17	-3.51

図 10. エネルギーシミュレーションによる日変化差分値

熱収支変動が大きいことがわかる。シミュレーション上ではスペース 1 の熱収支が住宅の中で最大であり、温度変化が一番大きくなっている。また、床下温度のシミュレーション値が低い傾向である。地面境界の床下断熱の設定方法により床下の温度は変化するため、今後検討する必要がある。

図 11 は 8 月～11 月のエネルギーシミュレーションの日平均の変化を表したものである。ピンク色は床下を表しているが、床下は 8 月～11 月にかけて差分値は徐々に小さくなっている。室内の差分値は夏はシミュレーション値の方が高く、冬はシミュレーション値のほうが低くなっている。

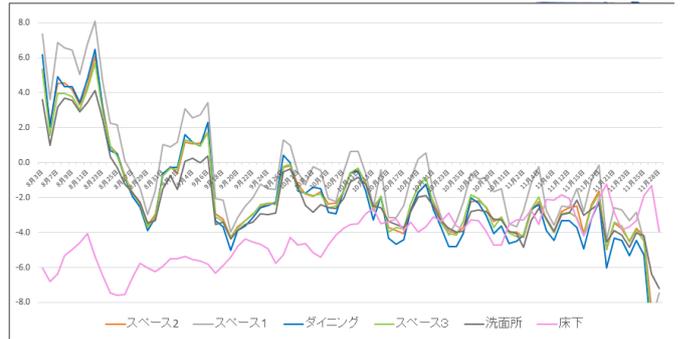
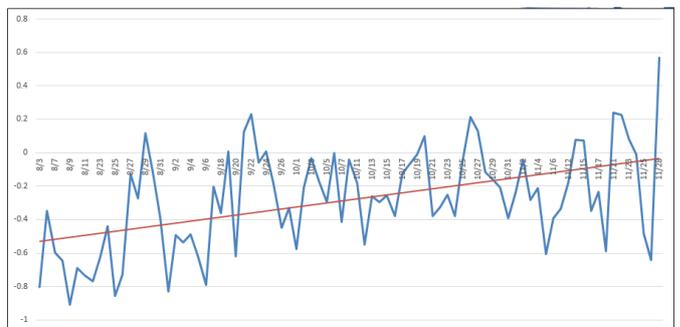


図 11. 日平均の変化グラフ

図 12 はエネルギーシミュレーションによる温度分布の精度を表すが、エネルギーシミュレーションでは温度分布の精度は期待できないといえる。これに対し、図 13 は CFD 解析時の温度分布精度である。大きく、精度が改善されているが、冬にかけては、精度が低くなっ



ていることが確認できる。

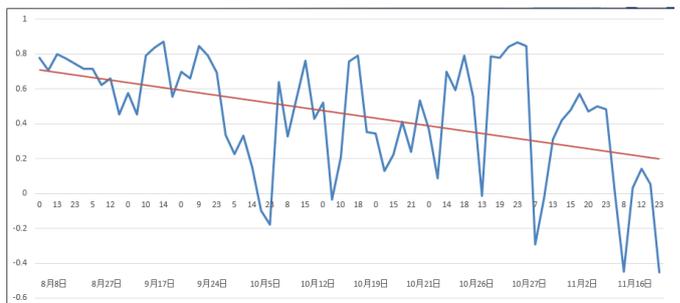


図 12. エネルギーシミュレーションによる温度分布変化

図 13. CFD 解析による温度分布変化

	日変化	日平均	温度分布	時間
E	2.56	2.92	-0.18	5~10分
E+CFD	1.3	2.43	0.45	30分~60分
E(+照明)+CFD	2.19	2.67	0.47	30分~60分
E+CFD(+PS)	1.0	3.02	0.70	30分~60分
E+CFD(+OM)	1.60	1.49	0.16	30分~60分

3-2. 検証結果のまとめ

表 14. 検証結果

表 14 に検証結果の表を示す。E はエネルギーシミュレーション、E+CFD はエネルギーシミュレーション後 CFD 解析を加えたもの、E(+照明)+CFD はエネルギーシミュレーションの段階で照明設定を加え、その後 CFD 解析をかけたもの、E+CFD (+PS) はエネルギーシミュレーション後、PS ヒーターを加味し CFD 解析を行ったもの、E+CFD(+OM) はエネルギーシミュレーション後、OM ソーラーを加味し CFD 解析したものである。数字は日変化と日平均は差分値、温度分布は相関係数を表示している。

表を見ると、日平均に関してはエネルギーシミュレーションと CFD 解析では誤差傾向は変わらないという事がわかる。一方で、日変化に関しては、エネルギーシミュレーションよりも、CFD 解析によるシミュレーションのほうが精度がよくなる事が分かった。また、温度分布に関しても CFD 解析による精度の改善が見られ、特に PS ヒーターを加味した CFD 解析による温度分布精度は高い値を示している。しかし、OM ソーラーを加味した CFD 解析では高い精度は期待できないということがいえるだろう。

4-1. 結論

エネルギーシミュレーションと CFD 解析による誤差傾向を日変化・日平均・温度分布という 3 つの観点から把握することができた。そして、エネルギーシミュレーションのみの場合と、エネルギーシミュレーションと CFD 解析の連携による場合、また、PS ヒーターなどの機器を加味した場合とで、誤差傾向の差異を把握することができた。

4-2. 課題と考察

まず、第一に、今回の研究では CFD 解析によるシミュレーションの解析データ日数が少なく、誤差傾向を把握するにはより多くの日数を解析し、データを取得する必要があるということである。エネルギーシミュレーションは短時間で 24 時間分の計算結果が出るのに

対して、CFD 解析では、手作業で任意のインポート時間を設定しなければならない。このため、CFD 解析では、多くの日数を解析するには莫大な時間がかかる。多くのデータが必要ではあるが、一方でシミュレーション結果の取得にかかる時間とそれを処理する手間という問題がある。

第二に、慶應型共進化住宅では多くの機器を用いているため、シミュレーションがより複雑になるという事である。本研究では、照明、PS ヒーター、OM ソーラーなどの機器 1 つのみを加味しただけであったが、機器 2 つを用いる場合など、より複雑なシミュレーションに対応することが可能であるかどうか、検証することが今後必要であるだろう。

第三に、シミュレーションで知りたいこととその精度およびそれにかかる計算時間の関係についてである。設計段階などで、シミュレーションを用いて知りたいことに対して、どの程度の誤差であればいいのか、ということである。本研究では、誤差傾向を把握する方法を示すことができたが、この誤差傾向をどのように解釈するかはこれから考察せねばならない。

謝辞

本研究を行うにあたり、たくさんの方々にお世話になりました。

池田先生には大学院 2 年間大変お世話になり、研究室ではコンピューショナル建築をはじめ、池田先生の建築に対する考え方の多くを学ぶことができました。慶應型共進化住宅のプロジェクトでは、設計だけでなく、プレゼンテーションや様々な面でご指導いただきました。また、プロジェクトでは多くの先生方・研究員の方々にお世話になりました。ありがとうございました。

FORUM8 様からは DESIGN BUILDER をご提供いただき、中村さん、今泉さんからはシミュレーションを行うにあたり、たくさんのおアドバイスをいただきました。ありがとうございました。

慶應型共進化住宅を建てるにあたり、バックアップしていただいた企業のみならず、ありがとうございました。さまざまな企業のみならずのご協力の中で、実際に住宅ができるのを目の当たりにし、大きな達成感と社会の中で建築を建てることの大変さを実感しました。

提案書づくりからお世話になりました野方さんをはじめとする事務の方々、ありがとうございました。

慶應型共進化住宅の設計、そしてこの住宅を使って修士論文まで書くことができ、大変充実した大学院生生活を送ることができました。これから、後輩達が研究を引き継ぎ、シミュレーションの精度と利用方法の検

証を進め、慶應型共進化住宅をよりよいものに発展して
 くれることを願っています。

参考文献

- ・『CFDによる建築・都市の環境設計工学』（村上周三 2000）
- ・『1分間隔の室温シミュレーション法の精度検証(システムシミュレーション, 環境工学 II)』（王福林、吉田治典、松本圭司、2006）
- ・『住宅の夏季の熱環境に関する実測とシミュレーションとの比較検討：その2 垂直温度分布の比較』（谷川朗子、石田建一、宇田川光弘、佐藤誠、藤田哲典、木村建一 1997）
- ・『住宅において木材を多用する事が温熱環境と住生活に与える影響に関する研究：その2 内装材の木材使用量の違いによる室内温熱環境シミュレーション(住宅の温熱環境, 環境工学 II, 2012 年度大会(東海) 学術講演会・建築デザイン発表会)』（川村圭、中島裕輔、小濱翔馬、高口洋人 2012）
- ・『CFDによる高断熱高気密住宅の夏期の温熱環境解析』（西澤繁毅、森太郎、絵内正道、羽山広文 1999）
- ・『教室における温熱空気環境の測定と環境改善手法のCFD解析による評価』（劉述照）
- ・『詳細な建物モデルを用いた温熱環境に関するCFD解析：その1 放射冷房時の実験値と解析結果の比較』（加藤聡、泉卓成 2012）
- ・『実験用実大アトリウム内の熱伝達・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』（尾関義一、加藤信介、村上周三 1998）

補足資料 1. 構成材料設定

部位	材料	Conductivity	Special heat	Density	Thickness	U-Value	R-Value
		伝導率	比熱	密度	厚さ	U 値	熱抵抗値
		(W/m-K)	(J/kg-K)	(kg/m3)	(m)	(W/m2-K)	(m2-K/W)
外側壁パネル	断熱材	0.07	1260	50	0.12		
	CLT	0.21	1600	500	0.15		
	合計値				0.27	0.385	2.599

部位	材料	Conductivity	Special heat	Density	Thickness	U-Value	R-Value
		伝導率	比熱	密度	厚さ	U 値	熱抵抗値
		(W/m-K)	(J/kg-K)	(kg/m3)	(m)	(W/m2-K)	(m2-K/W)
室内側壁パネル	CLT	0.21	1600	500	0.15	1.131	0.884

部位	材料	Conductivity	Special heat	Density	Thickness	U-Value	R-Value
		伝導率	比熱	密度	厚さ	U 値	熱抵抗値
		(W/m-K)	(J/kg-K)	(kg/m3)	(m)	(W/m2-K)	(m2-K/W)
大屋根	CLT	0.21	1600	500	0.15		
	断熱材	0.04	1260	50	0.12		
					0.27	0.259	3.854

部位	材料	Conductivity	Special heat	Density	Thickness	U-Value	R-Value
		伝導率	比熱	密度	厚さ	U 値	熱抵抗値
		(W/m-K)	(J/kg-K)	(kg/m ³)	(m)	(W/m ² -K)	(m ² -K/W)
床下基礎	コンクリート	1.6	800	2400	0.25	2.73	0.366

部位	材料	Total solar transmission	Direct solar transmission	Light transmission	U-Value
		日射透過率	直達日射透過率	光透過率	U 値
窓	トリプルガラス (旭硝子フローティングガラス 4 mm+空気層 8 mm)	0.699	0.627	0.739	1.893

補足資料 2. センサー位置

