

# 気流・温度シミュレーションを活用した住宅省エネ機能の可視化

山本 泰寛 野村 太一郎

## Visualization of House's Energy Saving Features Using Thermal Simulation

Yasuhiro Yamamoto and Taichiroh Nomura

環境配慮住宅の省エネ機能の定量的評価に対し、気流・温度シミュレーションを使うことでその効果を可視化した。その可視化のために、電気電子機器製品開発で培った熱解析技術を応用した住宅向けシミュレーション・モデルを構築し、住宅の気流・温度解析に必要な要素技術を新たに開発した。さらに、住宅の省エネ機能の1つである暖気蓄熱をシミュレーション・モデル上で表現する手法を考案した。このシミュレーションにより、蓄積された暖気を放流した際の室内温度の経時変化の可視化が可能となり、省エネ性能の効果確認の有効性を示すことができた。

The quantitative effect of eco-friendly house's energy-saving features has been visualized using thermal simulation. A thermal simulation model of a house was constructed by using thermal analysis technology based on E&E product development. Then, an input method for the partial storage of heat from sunlight was designed into the thermal simulation model. Finally, temporal changes in room temperature were visualized using thermal simulation.

Key Words & Phrases : 気流・温度シミュレーション, 熱解析技術, 可視化  
thermal simulation, thermal analysis technology, visualization

### 1. はじめに

省エネに配慮した住宅では、高断熱な基本構造に加えて、太陽光発電、通風、暖気蓄熱、屋内空気循環などさまざまな省エネ性能を取り込み、自然との共生に配慮したパッシブ型環境配慮住宅の設計と建築、さらに実証実験によるこれらの機能の検証が行われている[1][2]。このように実際に住宅を建築し実証実験で確認する活動に先立ち、気流シミュレーションを使い、建設予定地域の季節ごとの風向きを考慮した住宅の屋内外通風設計とその影響予測への取り組みも始まっている。シミュレーションでの検討により、家屋を建築する以前に影響・効果を可視化することができるため、有効な設計手法を的確に反映でき、有用性が高い。さらに、このような取り組みを通じてシミュレーションの範疇を室内温度変化の可視化へと拡大し、環境配慮性能として広範にとらえることも求められている [3] [4]。

筆者らは、電気電子機器に対する気流・温度シミュレーションを活用した社内外製品設計支援実績、ならびにデータセンターへの気流・温度シミュレーションによる空調負荷制御ソリューションを有しており [5]、既存の

熱解析技術を住宅の気流・温度シミュレーションに応用した。

本論文は、製品熱設計技術とデータセンター熱解析技術をもとに、新たに住宅の熱解析に必要な物性値定義方法や初期条件適用方法などの技術開発を行い、シミュレーション・モデルに展開することで住宅の省エネ性能を可視化し、気流・温度シミュレーションのスマートハウス実践のためのツールとしての有効性を示すものである。

### 2. 住宅向けシミュレーション・モデルの構築

住宅向けシミュレーション・モデルを構築するにあたり、前提となる対象省エネ機能と環境条件の取りまとめ、実際の形状作成とモデリング方法の検討、各形状に対する材料物性値の付与、解析計算に使うメッシュ調整を適用した。

#### 2.1 対象省エネ機能の選定

積水ハウス株式会社（以下、積水ハウス）様により設計された実証実験住宅に備えられた以下の2つの省エネ機能について、温度シミュレーションにより効果を可視化した事例を示す。

提出日:2011年5月9日 再提出日:2011年9月15日

### (1) ヌック

建物1階の日だまり部屋(ヌック)を活用し、冬季の暖房機能を補う機能である。昼間は外部からの日射を取り込み、居室空間と仕切ることによって熱をためる。日没後にヌックと1階リビングの間仕切りを外すことでヌックにたまった暖気をリビングへ放出する。

### (2) サーキュレーション

住宅内の温度差を低減し、冬季の高齢者のヒート・ショック事故の抑制につなげる機能である。住宅北側にある1階洗面所と2階の小屋裏をダクトで結び、昼間の日射を小屋裏に蓄熱し、日没後に小屋裏から洗面所に向けて暖気を強制送風することで、暖房を使わずに脱衣所の温度上昇を図る。

## 2.2 シミュレーション・モデルの作成

今回は、汎用熱解析シミュレーターであるIcepak [6]を使ってモデリングならびに計算を実施した。2.1で述べた省エネ機能を可視化するには、家1軒を丸ごとシミュレーションする必要があった。積水ハウス様より受領した3Dイメージ図ならびに2次元の建物平面図をもとに、解析空間上に当該住宅全体をモデル化した。このとき、屋内の通風や部屋の間仕切りといった省エネ機能を可視化するために必要なオブジェクトをシミュレーション・モデル内に作り込んだ。シミュレーション・モデルを図1に示す。

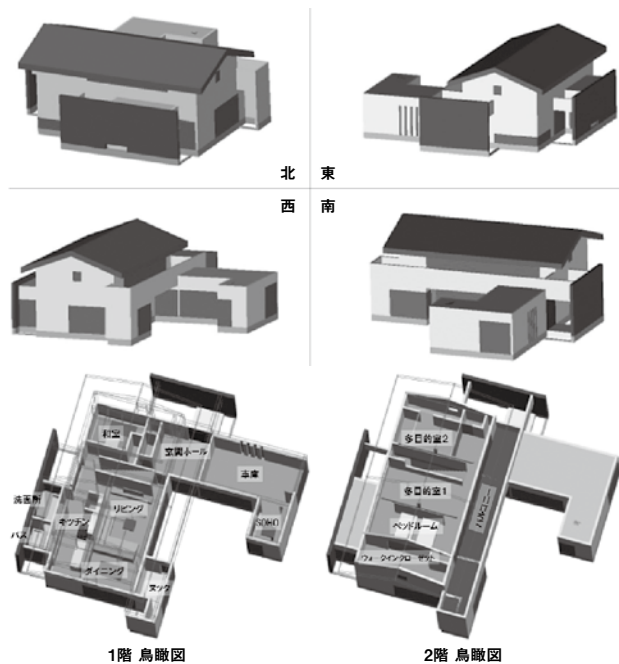


図1. シミュレーション・モデル

## 2.3 簡略化を考慮したモデリング

シミュレーション・モデルは、隅々まで細かくモデリング

し過ぎてしまうと、モデルが煩雑で扱いにくくなると共に、解析計算用にシミュレーター内で作られるメッシュと呼ばれる格子構造が必要以上に細かくなり、計算時間の浪費につながる。モデルの詳細さやメッシュの細かさに起因する解析計算時間と解析結果の精度とのバランスを取り、解析時間を適正にしつつ精度を確保することは、気流・温度シミュレーションの有用化に不可欠である。そこで、筆者らがこれまでの開発設計支援、ソリューション導出支援で実施してきた、簡略化を考慮したモデリングを適用した。これにより、①シミュレーション・モデルの規模(モデルの詳細さ)、②メッシュの細かさと解析時間、③結果の精度の3つのバランスを考慮して解析時間を適正に保ったまま期待される解析結果を算出する。

通常、われわれが扱う電気電子機器では実機測定や検証時間より短時間で計算結果を算出することを念頭に置いているため、解析時間を2時間以内に抑えられるシミュレーション・モデル作成を目安にしている。参考までに、比較的大型のラックマウントサーバーが0.7m×0.5m×0.4m程度の大きさであり、このシミュレーション・モデルのメッシュ数は100万メッシュ以下に抑えられている。しかしながら、今回は家1軒のモデリングで、大きさは18m×18m×7.5m程度であった。したがって解析を要する空間サイズが大きくなり、必然的にメッシュ数も多くなった。そこで、解析時間の目安を12時間以内と定義した。これは、当日夕方までにモデリングを完了し、夜間に解析計算を実施した上で翌日朝には結果を確認するサイクルに基づいて決定した。

こうして定義した目標値に合致するように、解析結果に大きく影響しない居室間の天井高あわせや家具類の形状簡略化などを行い、メッシュ数を約180万メッシュに抑えたシミュレーション・ベースモデル(以下ベースモデル)を完成させた。

## 2.4 材料物性値の検討

作成したベースモデルで温度変化を見るためには、すべての建築部材に対して熱伝導率、重量比熱、比重といった材料特性の定義が必要である。しかしながら、家の外壁、床、屋根といった要素は複数の部材の組み合わせで構成されている。これら複数の部材をすべてモデルに取り込むことは、モデリング工数ならびにメッシュ生成、解析計算のいずれにおいても非効率なため、要素単位で代表物性値を定義し、モデルに適用することとした。代表物性値は、積水ハウス様よりご提示いただくことのできた値ならびに建材の物性値はそのまま適用し、部材重量比熱は、構成部材個々の材料物性値と部材厚みに

起因する体積比より、式1にて求めた。こうして定義した物性値一覧を表1に示す。

部材重量比熱=容積比熱×1000/比重×体積比(式1)  
(ただし、部材重量比熱 [J/kg・K], 容積比熱 [kJ/m<sup>3</sup>・K], 比重 [kg/m<sup>3</sup>])

表1. 構造部材の物性値一覧

適用箇所	厚み (mm)	熱伝導率 (W/mK)	熱抵抗 (m <sup>2</sup> K/W)	重量比熱 (J/kg・K)	比重 (kg/m <sup>3</sup> )	部材構成
外壁	157.5	0.0667	<b>2.3625</b>	1262.9	252.2	*サイディング外壁 *高性能グラスウール 16K *石膏ボード
間仕切り壁	145.0	0.7121	0.2036	1213.9	129.3	*石膏ボード(x2) *空気層
最下階床(洋室)	161.0	0.0432	<b>3.7260</b>	1258.5	101.8	*フローリング材 *フォームポリスチレンBII *合板
最下階床(和室)	199.0	0.0534	<b>3.7260</b>	1925.5	112.2	*フローリング材 *フォームポリスチレンBII *合板
中間階床	396.0	0.2042	1.9396	545.7	478.1	*フローリング材 *ALC *グラスウール 10K *石膏ボード(x2) *パーティクルボード
最上階屋根	462.5	0.1137	<b>4.0694</b>	1119.3	147.8	*屋根材 *空気層 *石膏ボード *合板 *高性能グラスウール 16K
最上階被土屋根	582.5	0.1029	5.6600	916.8	369.7	*土 *空気層 *石膏ボード *合板 *高性能グラスウール 16K
室内建具	50.0	0.3279	0.1525	1335.2	108.0	*合板(x2) *空気層
玄関ドア	50.0	0.5551	0.0901	482.0	626.4	*スチール(x2) *空気層
ヌック床	180.0	1.6311	0.1104	864.8	2316.7	*大理石 *コンクリート *モルタル
防犯合わせ複層ガラス	23.0	0.1188	<b>0.1936</b>	766.4	978.3	*防犯合わせガラス *低ガラス *空気層
太鼓貼り障子	42.0	0.3405	0.1233	989.0	35.7	*障子紙(x2) *空気層

## 2.5 メッシュ・サイズの調整

2.3で述べた簡略化モデリングの考慮事項である計算時間の浪費を避けつつ精度を確保するために、建物部分にはメッシュを細かく切り、建物外はメッシュを粗めに設定できるローカル・メッシュ機能を活用した。ローカル・メッシュのイメージを図2に示す。建物部分のメッシュ・サイズは1辺250mmより小さくなるように設定した。ここで1辺250mmという目安値は、建築関係の設計時に定尺として考慮される数値として、積水ハウス様よりインプット頂いた数値である。

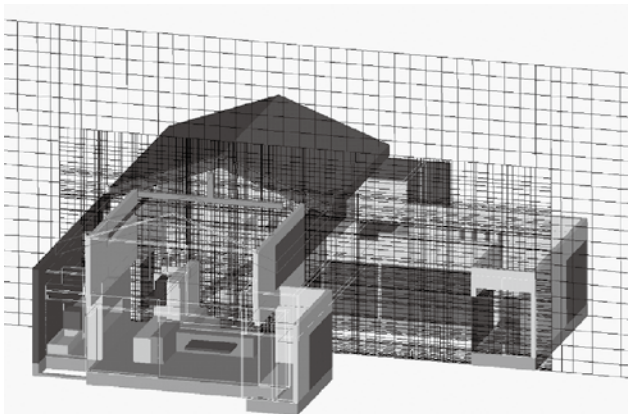


図2. ローカル・メッシュ

## 3. 2段階シミュレーション手法の適用

2.1で選定した省エネ機能をシミュレーションするには、

事前に特定の空間に暖気が蓄積された条件が必要となる。しかしながら、通常のシミュレーションでは、解析空間上の温度は一定値を定義するため、特定の空間に周囲温度と異なる温度を設定することができない。そのため、シミュレーションの初期条件として暖気蓄熱の状態を再現することが困難だと分かった。

そこで、事前に解析空間上に暖気が蓄積された状態を初期条件として定義するために、2段階シミュレーションによる解析手法を考案した。

これは、結果の可視化に必要な蓄熱後の暖気放流シミュレーションに先立ち、解析条件を作り込むための事前シミュレーションを実施し、その解析結果を暖気放流シミュレーションの初期条件として付加するものである。

2段階シミュレーションの手順は次の通りである。まず、事前シミュレーションで暖気蓄熱空間に日射相当の熱量を適用した定常解析を実施して解析結果を取得し、この結果をファイル化して保持しておく。次に暖気放流シミュレーションに必要なモデル上のパラメーター変更を適用する。この状態で解析に移るが、このときの初期条件に先ほどファイル化した事前シミュレーション結果を追加条件として取り込むことで、特定空間に暖気が蓄積された状態でのシミュレーションが可能となる。なお、暖気放流シミュレーションでは、時間経過に伴う温度変化によって効果を確認する必要があるため、非定常解析でシミュレーションを実施した。

ここで、定常解析とは時間が十分経過した後の運動量や温度などの物理量の時間変化がほとんど無い状態(定常状態)での物理量を求めるための計算を指す[7]。また、非定常解析とは時刻0の状態から開始して、運動量や温度などの物理量が時間的に変化する状態(非定常状態)を求めるための計算を指す[8]。

## 4. シミュレーションへの適用

2.で述べたベースモデルに対し、各機能における解析シナリオを積水ハウス様との協業にて定義した。そして、3.で述べた2段階シミュレーション手法を適用し各シナリオ下でのシミュレーションを実施した。

### 4.1 ヌック

#### 4.1.1 環境条件の定義

季節は冬季を想定し、外気温を5.8℃とした。屋外通風条件は北の風3.6m/sとした。外気温ならびに風速風向データは、気象庁のWebサイト[9]で公開されて

おり、実証住宅が建築される横浜市の2月の気象データをもとに設定した。

2段階シミュレーション手法を用いて、まず「ヌック内に暖気を蓄積するためのシミュレーション（以下、ヌック暖気蓄積シミュレーション）」を実施した。次に、ヌック暖気蓄積シミュレーション結果を初期条件に付加し、「ヌックとリビングの間仕切りを開放した時のリビング・ダイニングの経時温度変化シミュレーション（以下、ヌック暖気開放シミュレーション）」を実施した。

「ヌック暖気蓄積シミュレーション」では、ヌックを閉め切り、南側の高断熱ペアガラスを介した日射流入相当の熱量を適用し、ヌックへの蓄熱を定常解析で計算した。「ヌック暖気開放シミュレーション」では、室内空調機器が稼働していない状態でヌックとダイニングの間仕切りを解放し、蓄積した熱気をダイニングとリビングに放流した。このとき、時間経過に伴う温度変化を確認するため、非定常解析による計算を実施した。図3にヌックのモデル定義を示す。

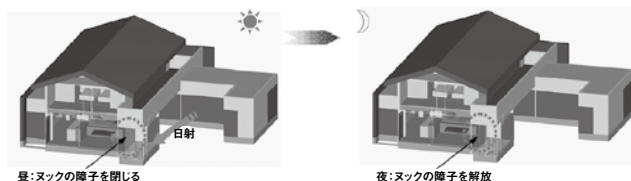


図3. ヌックのモデル定義

#### 4.1.2 解析結果

間仕切り解放後、ヌックの熱気はダイニング、リビング、キッチンへと広がっていき、それに伴いダイニング・テーブル付近で約4℃の温度上昇を確認することができた。これにより、ヌックで蓄熱した熱気を開放することで居住空間の温度上昇に貢献することが確認できた。図4にヌックの解析結果の可視化イメージを示す。

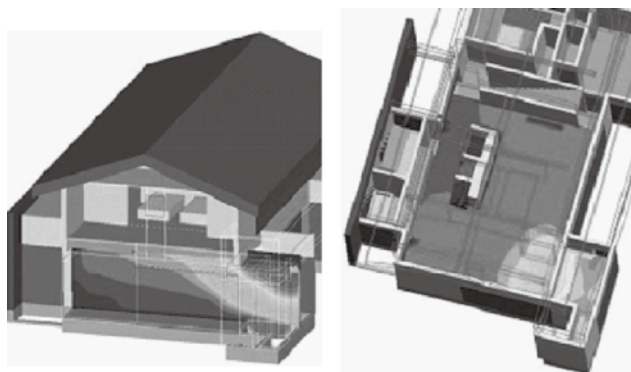


図4. 温度分布可視化イメージ(ヌック)

## 4.2 サーキュレーション

### 4.2.1 環境条件の定義

想定環境が同じであったため、外気温と屋外通風条件は、4.1.1と同様の条件を設定した。

サーキュレーションの機能確認でも2段階シミュレーション手法を活用した。具体的には「2階小屋裏内に暖気を蓄積するためのシミュレーション（以下、2階暖気蓄積シミュレーション）」を実施し、この結果を初期条件に付加して、「サーキュレーション用のファンを稼働させることでダクト内に強制的な風の流を作った場合の洗面所の経時温度変化シミュレーション（以下、ファン稼働シミュレーション）」を実施した。図5にサーキュレーションのモデル定義を示す。

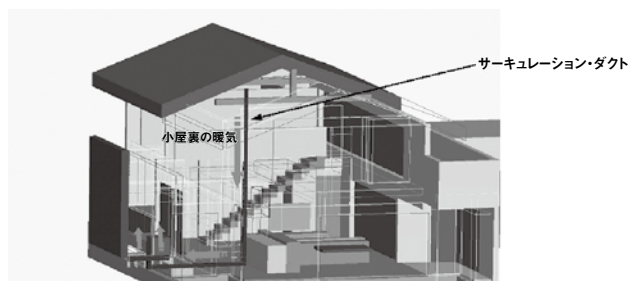


図5. サーキュレーションのモデル定義

### 4.2.2 住宅断熱性能の見もりと反映

4.2.1で述べた「2階暖気蓄積シミュレーション」で蓄積される暖気の温度は、ファン稼働直前の温度であることが望ましい。サーキュレーションの稼働開始時間として19:30頃が想定されており、2月の日照時間を考慮すると、この時点で日没から2時間程度経過していると考えられる。そこで、まず昼間の日射による蓄熱を考慮したシミュレーションを実施したところ、サーキュレーション吸気口温度が約27℃になった。このシミュレーション結果と計算で求めた日没直前の推定温度を比較した。気象庁のWebサイトより温度データと日射データを取得するとともに、太陽高度と家の作りから日射長ならびに日射量を求め、そこから日中の温度上昇値と熱損失量を推定した。その結果、こちらも日没直前の想定室温が約27℃となり、シミュレーション結果とほぼ同じ結果が得られた。

次に、日没後2時間経過時点での室温低下を求めるために、換気や建物自身の放射による熱損失量を算出し、熱損失による日没後の温度低下を毎時2℃弱と推定した。この結果をもとに、サーキュレーション吸気口温度が日没直後の温度から4℃程度低い23℃になるようシミュレーション・モデルを調整した。このようにシミュレーション



温度シミュレーションを活用し、シミュレーションを用いたアセスメントにより、外部環境と建物省エネ性能および構造との関係を把握し、よりよい設計へつなげていく方法を確立すること、さらに省エネ機能をはじめとする設計の効果を可視化し、住宅メーカー様自身の価値を訴求する手段を獲得する活動につなげていきたいと考えている。

## 謝辞

本プロジェクトの機会を与えていただき、かつシミュレーション・モデル作成の条件定義、シナリオ定義に対してご助言ならびに情報提供を賜りました積水ハウス雨宮様、藤岡様に深謝いたします。

## 参考文献

- [1] 積水ハウス「観環居」  
<http://www.sekisuihouse.co.jp/snpj-kankankyo/>
- [2] 環境配慮型住宅「大船スマートハウス」実証実験  
[http://kaden.watch.impress.co.jp/docs/news/20110511\\_444688.html](http://kaden.watch.impress.co.jp/docs/news/20110511_444688.html)
- [3] 3次元熱流体解析ソフト  
[http://www.env-simulation.com/jp/sn\\_ana/index\\_2.html](http://www.env-simulation.com/jp/sn_ana/index_2.html)
- [4] 建築解析オンライン動画ギャラリー  
[http://www.cad-japan.com/special/analyze\\_movie/movie\\_list.html](http://www.cad-japan.com/special/analyze_movie/movie_list.html)
- [5] 沼田祈史, 岡村英幸, 佐々木秀樹, 野村太一郎: IBM プロフェッショナル論文 “シミュレーションによるデータセンターのエネルギー改善,” ProVISION, No.56, pp.65-70 (2008).  
[http://www.ibm.com/ibm/jp/provision/no56/pdf/56\\_paper1.pdf](http://www.ibm.com/ibm/jp/provision/no56/pdf/56_paper1.pdf)
- [6] ANSYS Icepak: <http://icepak.jp/>
- [7] CAE用語集: CDAJ:  
<http://glossary.cdaj.co.jp/01000050/s03000/000826.html>
- [8] CAE用語集: CDAJ:  
<http://glossary.cdaj.co.jp/01000050/s05000/000863.html>
- [9] 気象庁 過去の気象データ検索: [http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec\\_no=46&prec\\_ch=%90\\_%93%DE%90%E%9C%A7&block\\_no=47670&block\\_ch=%89%A1%951&year=&month=&day=&view=](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=46&prec_ch=%90_%93%DE%90%E%9C%A7&block_no=47670&block_ch=%89%A1%951&year=&month=&day=&view=)
- [10] 放熱, 事後対策の進め方: <http://www.kumikomi.net/archives/2007/08/28heat.php?page=9>



日本アイ・ビー・エム株式会社  
システム開発研究所  
テクノロジー・ソリューション開発  
アドバイザー H/W デベロップメント エンジニア

山本 泰寛 Yasuhiro Yamamoto

### [プロフィール]

1998年, 日本IBM入社. 機構設計エンジニアとしてデスクトップPC, ノートブックPC, ブレードサーバー製品開発に従事. 2007年から熱設計エンジニアを兼務. 熱流体シミュレーションを活用し, 多数のお客様製品の熱解析, 熱設計を担当.

[yasyama@jp.ibm.com](mailto:yasyama@jp.ibm.com)



日本アイ・ビー・エム株式会社  
システム開発研究所  
テクノロジー・ソリューション開発  
シニア H/W デベロップメント エンジニア

野村 太一郎 Taichiroh Nomura

### [プロフィール]

1983年, 日本IBM入社. 半導体生産技術, コンポーネント信頼性技術業務等に従事. 2000年から大和サーマルラボ立ち上げに参画し, 現在ではテクノロジー・ソリューション開発グループに所属している.

[ji04364@jp.ibm.com](mailto:ji04364@jp.ibm.com)