

住空間シミュレーションシステムにおける熱流体プログラム実装技術

Implementation Technology of Thermal Fluid Program in Housing Environment Simulation System

吉 田 学

要 約 住空間シミュレーションシステムでは屋内・屋外問わず、建物のあらゆる部分の意匠を正確に表現しリアルに具現化することができ、作り手と住まい手の相互理解を深め快適で楽しい生活シーンを演出できる。窓の換気による風の流れや、冷暖房器具による室内の温度変化は、窓や冷暖房器具の配置計画に必要な情報となり、意思決定をするために視覚的にわかりやすい表現が求められている。

本稿では、住空間シミュレーションシステムにおける風向シミュレーションを実装するに至った目的と実際に現場で利用することを踏まえた機能や要件に関する考察を、実現方法を交えて報告する。

Abstract The housing environment simulation system can express the design of every part of building precisely and realistically indoors as well as outdoor, and can stage the comfortable and pleasant life scene including mutual understanding between home builder and dweller. The wind flow by window ventilation and the indoor temperature change by cooling and heating device act as the necessary information to plan arrangement of devices, and the system require visually easy-to-understand expression for users' decision-making.

This paper reports the purpose of implementation of wind direction simulation in the housing environment simulation system and considerations about the function and requirements for use of the system in building site by presenting implementation methods.

1. はじめに

建築分野では、建物や構造物などの建築物の立体を平面図・立面図・断面図、あるいはパース図などの図面として表現し、それにより建築物を施工していく。技術者の専門領域に応じて、意匠、構造、設備などの図面群が存在し、それらの図面を作成するソフトウェアが建築 CAD (Computer Aided Design: コンピュータ支援設計) である。建築 CAD のレベルも 2 次元製図をするだけのものから、より専門的な検討、解析、シミュレーションなどを含んだ高度なレベルまで存在する。日本の建築分野でよく利用されている Jw_cad は 2 次元 CAD であるのに対し、日本ユニシスグループの建築 CAD “DigiD” は、3 次元モデルを作成するモデリング機能を軸とし、その 3 次元モデルをベースに営業段階から施工までの住宅業務全般をサポートした精度の高い一貫システムであり、3 次元住宅 CAD システムと言ってもよい。

契約時点で形のない物売る注文住宅建築ビジネスは、住宅供給側の設計意図が施主に伝わりにくく、日々図面やカタログ、口頭説明を尽しても、完成物件を見た施主から 100 パーセントの満足を引き出すのは大変難しい。図面やカタログから完成を想像するのは、設計者だけが

身につけた特殊な能力だからである，幸せな住宅とは，施主のさまざまな思いが実現され，設計の専門知識による的確なアドバイスが反映された住宅と考えられるが，ほとんどの施主は住宅設計の経験がないため，漠然と持っているイメージを要望として伝えることができない．この要望を引き出すためにも住宅設計に興味を持っていただくことが第一であり，立体的な竣工イメージを施主に見せる3次元プレゼンテーションシステムは，それに必要不可欠なツールとなっている．

日本ユニシスグループは1982年よりDigiDの販売を開始したが，3次元プレゼンテーションシステムについては，

- 提案プランを実際に近い形で見ることができる．
- 生活しているような雰囲気を体験できる．
- 「住み心地」を判断できる．
- 楽しい住まいづくりに施主を参画させる「楽しさ」を演出できる．

のコンセプトをもって開発を続け，2004年に住空間シミュレーションシステム“AIREALMEISTER”として販売を開始した．

本稿では，2章で住空間シミュレーションシステムの特徴について，3章では風の流れや温度変化を表現した風向シミュレーションについて述べる．

2. 住空間シミュレーションシステム

本章では住空間シミュレーションシステム AIREALMEISTER の概要と，開発コンセプトを実現する手法についての概要を述べる．

2.1 AIREALMEISTER の概要

提案プランを実際に近い形で見られるように，DigiDでモデリングした精緻な3次元モデルを AIREALMEISTER のシーンと呼ぶ仮想空間に取り込み，表示する．その際に，屋根（瓦，スレート）や外壁（吹付け，タイル），屋内に至っては床（フローリング，コルク），壁（クロス，板貼），天井（クロス，板貼）など施工上仕上げが施される物体には現物パーツの写真画像を貼り付け，更に光沢やザラツキ，透過などのパラメータを与えて材質感を表現する．敷地には車や植栽を表現すると同時に背景の調和も必要となる．

生活しているような雰囲気を体験させるために，歩き回る，見渡す・見上げる・振り返るといった人間動作を取り入れたウォークスルーがマウスやタッチパネル，あるいはゲームコントローラーにより操作できる．また，所在地や季節，時間による太陽位置計算を施した直射表現と天空光による日中表現や，夜間の照明パターン表現など，一日の変化をリアルに表現でき，時計は秒針含めシーン内の時間を常にさしていることでも臨場感のある雰囲気を体感できる．

住み心地をわかっていたいただくために，「休日に投函される住宅用広告」にあるような建物の断面表現をダイナミックに移動させ，3次元的な空間把握が理解しやすい表現ができる．また，実際に居住する成人や子供あるいは車椅子を利用する人の目線で空間を動き回ることができ，廊下の中や床の段差による障害がないかを確認できる．

部屋に置きたい家具があれば実際に配置することができる．配置したときの部屋全体のイメージの確認ができると同時に，部屋内の移動のしやすさも理解できる．その他に，ドアを開ける，照明を点灯する，テレビをつける，車を走らせるなどのアニメーションを豊富にプリセッ

トしているため、ゲーム感覚で「楽しい」生活シーンを演出できる。

2.2 開発コンセプトを実現する手法

注文住宅建築では、一般的にハウスメーカーや工務店の提案する標準仕様を基にプランの打ち合わせを行い、請負契約した後にプランの微調整や仕様を決める。ほとんどの工務店ではモデルハウスやショールームをもっていないため、プランの打ち合わせにはカタログやメーカーのショールームなどを利用する。主な打ち合わせ事項は以下の内容で、AIREALMEISTERを利用して最終確認まで行うことができる。

- 設備機器（キッチン、バス、洗面の種類と色）
- 外部仕様（屋根材、外壁材、玄関ドア、サッシの種類と色）
- 内部仕様（床材、壁紙、ドアの種類と色）
- 収納、造作
- コンセント

また、いくつかのシミュレーション機能により、実際に建物を建てたときの事前検証をすることができる。AIREALMEISTERには次の三つのシミュレーション機能を実装している。

- 昼光シミュレーション（陽当たり図、等時間照度図、等時間日照図、日影図）
- 照明計画シミュレーション（照度図、輝度図）
- 風向シミュレーション（風向、温熱）

昼光シミュレーションでは、近隣住宅をモデリングすることにより、近隣住宅の影響による陽の入り具合や、北側住宅への日影の影響を確認することができ、敷地内の建物位置や間取りを決定することができる。照明計画シミュレーションでは、食事をするダイニングテーブルの天板や、本を読むリビングのソファを照らす照明が適正な明るさになっているか、テレビのモニタが太陽や照明、あるいはそれらが家具に反射して見づらくないかを検証できる。風向シミュレーションでは、窓の換気による風の流れを可視化して窓の配置を検証することができる。また、熱要素を追加し、部屋の高い位置に集まった暖かい空気を拡散させるためにシーリングファンを取り付ける効果や、あるいは外気が寒いときに夜から朝にかけ部屋の温度低下を抑制するための熱損失の低いサッシや断熱材の効果も事前に確認できる。

3. 風向シミュレーション

風向シミュレーションは、住まいを建てる地域と敷地周辺の風の特性を把握し、風の流れの検証をとおして効果的な通風が得られるプランニングに生かすための設計支援と、風の流れをビジュアルに表現してプレゼンテーション効果を上げる営業支援を目的として開発した。図1にあるように風向シミュレーションは、「格子作成」「解析実行」「可視化データ作成による結果表示」から構成される。まず、設計支援のみを利用するユーザ向けにDigiDでの開発を進め、その後プレゼンテーション表現のできるAIREALMEISTERに発展させ営業支援向けに開発し、DigiDとAIREALMEISTERの両方で同一の解析結果を共有できるようにした。

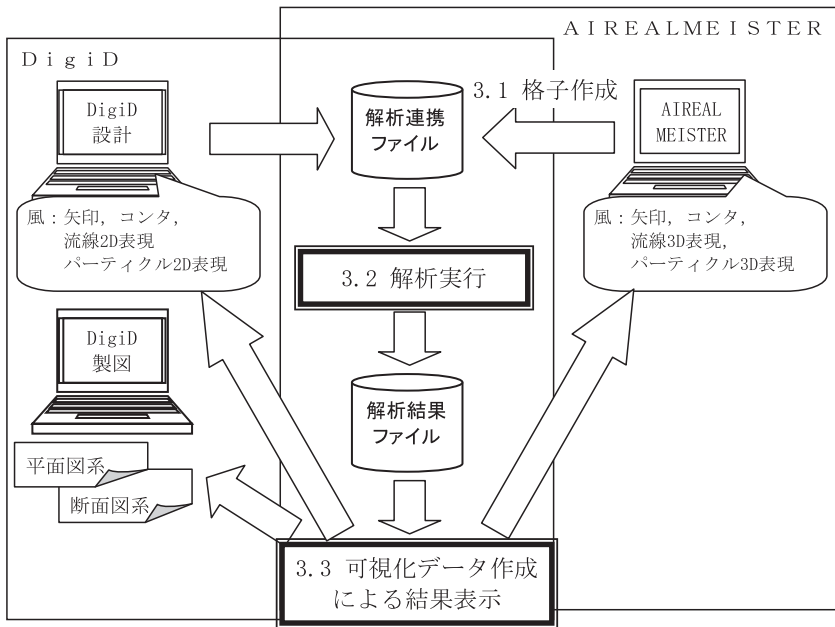


図1 風向シミュレーションのアプリケーション構成

3.1 格子作成

解析のために図2のような6面体を格子状に組み合わせて3次元モデルシーン全体を構成することにより住宅環境にて風向モデルを構築する。6面体のそれぞれの面には、風を通さない障害物となる面なのか風が流れる空間を意味する面なのかを定義する。図2の6面体の面③(南面)は風を通さない障害物、面①②④⑤⑥は風が流れる面を表している。

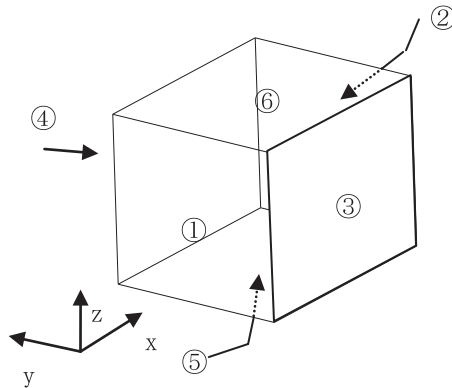


図2 6面体

解析ソルバの性能をいかに引き出すかはこの6面体を組み合わせた格子の精度に大きく左右される。格子の種類には数多くあるが、「構造格子」と「非構造格子」に分類できる。構造格子とは4角形(正方形・長方形・台形)や6面体が上下左右に規則正しく並ぶ構造を持った格子である。これに対して非構造格子とは主に3角形や4面体、あるいは3角柱や4角錐などの

多面体で構成される格子である。また、構造格子と非構造格子をミックスしたハイブリッドな格子も使われている。3次元流体解析での解析精度は一般に4角形や6面体などの構造格子の方が高いとされているが、規則正しく格子が並ぶために複雑な空間、例えば車のエンジンルームなどには格子を刻みにくいという欠点がある。反対に非構造格子は3角形などの多面体で空間を埋めるので、複雑な形状にも柔軟に対応できる格子が刻みやすいというメリットがある。それぞれに一長一短はあるが、どの格子タイプを使用するとしても、最も重要なのは障害面と空間がはっきりと区別できる「品質の良い格子」を刻むこととなる。

住宅メーカーが扱う空間の最小単位は部屋であるが、建物全体の風の流れを検証する場合の空間は家一棟の3次元空間となる。敷地の樹木や隣家など障害物の影響による風の流れを検証する場合は、3次元空間の間口、奥行、高さもそれぞれ大きくなり、大きさが数倍程度になると格子の数は数倍の3乗に及ぶため解析時間がとてもかかることになる。このため、格子を刻むときには、重要な流れをとらえる箇所では格子を細かく品質よく、あまり重要ではない箇所では格子を比較的粗くして、若干の品質低下を許容することも必要となる。その流れの中で最も重要な箇所は床や壁、天井など建物の躯体となる面や、ドアや家具などの配置部品の面となる。

建物を設計する上で基準となる基本寸法がある。日本の住宅建築にて最も多く使用されるモジュールは910mmの尺モジュールだが、1000mmのメートルモジュールを採用している大手ハウスメーカーも少なくない。AIREALMEISTERでは6面体の基本サイズをこのどちらかのモジュールにあわせ、6面体のそれぞれの面に障害物を投影することで簡易に効率の良い格子を作成するようにした。しかし、約30cm幅のスイング窓が納まる幅の狭い開口部に基本サイズの6面体を作成すると、窓の位置によって開口と判断されない場合が発生する。このような重要な流れをとらえる箇所では開口部の幅より小さな6面体を作成すると風が流れる面が設定される。つまり、910mmをNとした場合、 $N/4$ 以下の幅の格子を部分的に作成しないと検証ができないことから、6面体を作成する最小サイズを $N/4$ の長さとした。図3は実際に格子化したモデルを建物中心位置で切断したものである。左は屋外からの屋内の眺め、右は屋内のリビングルームからキッチンの眺めで、家具がモジュール幅に揃わないため大きさの異なる格子に刻まれていることがわかる。どちらも障害面に色と輪郭線をつけていて、空間となる面は表現しないため、視覚的に何があるかが確認できる。

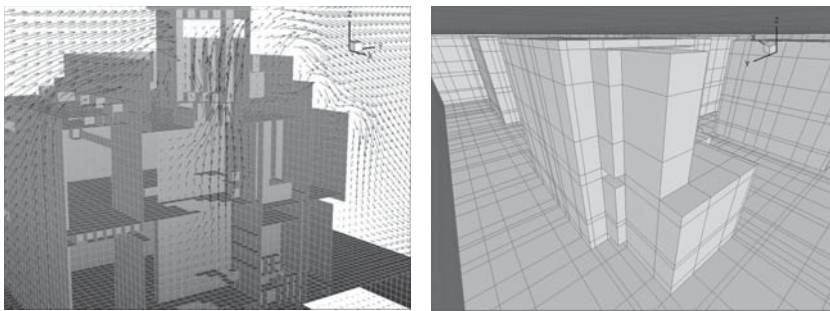


図3 建物の格子表現

建物には、屋根面のように斜めになる躯体も存在する。建物内部にも階段の天井や、斜めの壁も存在する。斜めの障害物は図4のように階段状の障害面を6面体に設定する。その他に、

遠くから見ると障害面に見えるが風を通すような物もある。樹木の生い茂る葉の部分や欄間、カーテンがそれにあたる。多数の細孔をもつ面を意味する「ポラス」という情報を図5のように6面体に定義し、風の流れる割合を0～1.0の範囲で登録できるようにした。

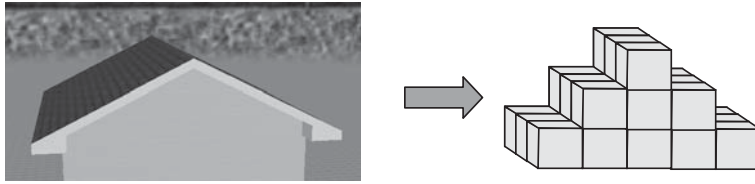


図4 斜めの障害物の格子表現

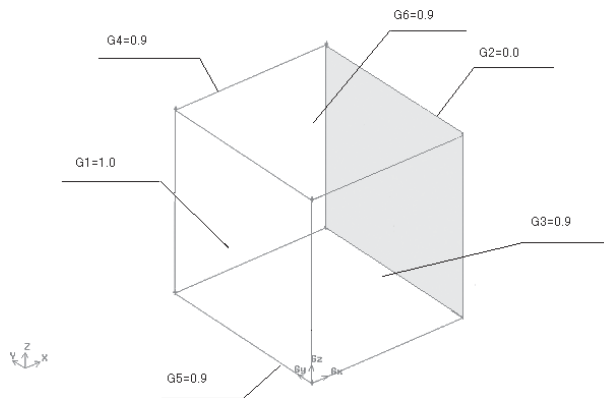


図5 ポーラスの面積の透過率指定

解析時間を早めるために、建物と敷地を別の空間に作成し、敷地空間の格子の大きさを建物の格子の大きさの倍として、建物より粗い敷地の流体解析を別に行うようにした。この場合、建物を一つの障害物と捉え、建物部分は「ソリッド」という情報を持たせ風を通さない格子と位置づけた。一方、建物空間の格子は建物の外周から5N分拡張した空間を余分に取り、その最外周の境界面にあたる面への風の流入情報（風の向き、速さ）は敷地空間の解析結果を引き継ぐこととした。

今回採用した流体解析ソルバは「非構造格子」に対応していなかったが、精度の高い解析を求めたかったため、これら格子作成の手法を採用した。

3.2 解析実行

風向シミュレーションの流体解析ソルバは、株式会社計算力学研究センターの熱気流解析および混合ガス成分移流拡散解析ができる有限体積法による3次元熱流体解析ソルバ“AsteaFlow”^{*1}をベースに、住宅用に共同開発した解析ソルバ「AsteaFlow/H」である。

住宅用に開発した主な機能は、

- 敷地空間の解析結果を建物空間へ継承する機能
- 各階独立格子を用い、格子サイズを階毎に変えても階間の境界部で補正して解析する機能（表1, 図6）

- 風の流れる割合を調整するポーラス機能
- 膨大になる格子数に備えた処理の高速化
- 強制給排気用に、風向、流速、換気扇の有効断面積を基に解析する換気扇モデルであり、換気扇モデル以外は解析時間を大幅に削減する効果を狙って実装したものである。

表1 各階独立格子対応による格子数と解析時間の効果

	対応前		対応後	
	格子数	解析時間	格子数	解析時間
敷地モデル	35464	7	14820	4
建物モデル	101824	55	71552	33

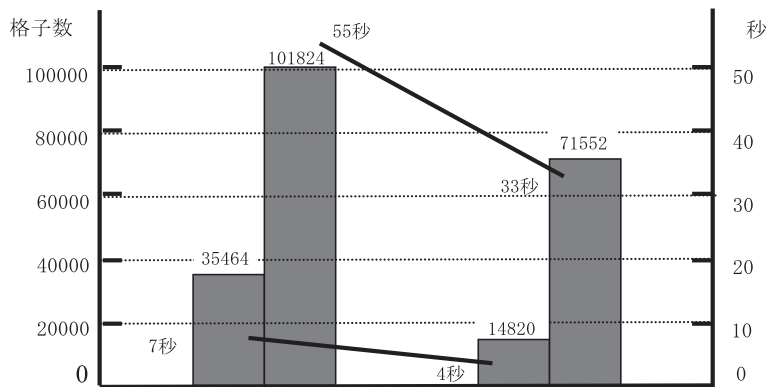


図6 各階独立格子対応による格子数と解析時間の効果

3.3 可視化データ作成による結果表示

流体解析ソルバで計算された格子型データ (UCD) を可視化ライブラリに取り込み、可視化データを作成する。可視化ライブラリは、サイバネットシステム株式会社の汎用可視化ソフトウェア“AVS/Express”を基に、日本ユニシスグループ向けに可視化ロジックを抜き出しカスタマイズされたライブラリである。可視化ライブラリに搭載されている主な機能は以下である。

- UCD 読込
- ベクトル
- 流線
- 粒子追跡
- 線コンタ
- 面コンタ
- 数値データを色データに変換する機能

プランニングにおける検証確認あるいは施主へのプレゼンテーションにおいて、可視化ライブラリから得られる数値解析結果をビジュアルに判りやすい表現にすることはとても重要である。解析結果の表現方法は、

- 矢印表示 (ベクタ)

- 等値面表示 (面コンタ)
- 流線表示 (ストリームライン)
- 粒子表示 (パーティクル)

の4タイプあり、それぞれを単独でも、重ねても表現できるようにしている。

表現内容はそれぞれ異なるが、風の速さを色で表現する方法は共通であり、弱風ほど青く、強風ほど赤く表現している。以下本節にて詳細を説明する。

3.3.1 矢印表示 (ベクタ)

解析結果を矢印で表示する。まず、確認したい解析面を X 面、Y 面、Z 面から指定し、位置を指定する。AIREALMEISTER ではクリッピングと呼ばれる断面表現ができるので、たとえば1階床高さ付近の風の状態を確認したい場合は、一階の天井より少し低い高さでシーンをクリッピングし、風向の解析面を床より少し上の位置に指定すればよい。水平面を指定するには Z 面を指定するが、X 面、Y 面を指定すると上下の風の状態が確認できる。

矢印の足は解析面上に等間隔で並び、その位置の風の状態を表示する。見る人が直感的に理解できるようにするため、風の向きは矢印の向き、風の速さは矢印の長さおよび矢印の色で表示している。図7は Y 面を指定して表示した図である。



図7 矢印表示

3.3.2 等値面表示 (面コンタ)

風の速さが 0.0 ~ 1.0m/s, ~ 2.0m/s, …, 5.0m/s より強い、というように風速範囲内ごとの等値面領域を作成し表現する。風の速さは等値面領域の色により表現する。風速範囲を細かく定義するほど、グラデーションのかかった表現になる。図8は図7と同じ位置の面コンタを表示した図である。



図8 面コンタ表示

3.3.3 流線表示 (ストリームライン)

追跡する風の開始位置より t 秒後の移動位置を求め、その位置から追跡を繰り返して、連結した一本の連続線を風の流れる経路として表現する。連結する細かい線は、風の速さに対する色で表現するため、風がどこに流れ、速さがどのように変化するかを確認できる。階間に吹抜けがある建物では上下に移動する風の流れがよくわかる。

t の間隔が短いほど流線が滑らかに表示できるが、追跡する回数が多くなり、表示するまで時間がかかる。 t の間隔が短くても強風であるほど 1 ステップの移動距離が長くなり、3 次元空間の範囲から出るまでの追跡回数が少なくてすむ。一方、弱風であるほど、移動距離が少なく、追跡回数が多くなる。これを解消するために、最低速度の閾値を設け、最低速度以下になったところで表現をしないようにした。

流線の開始面を自邸の風上方向に垂直に仮想設置し、その面上に一定の間隔を空けて開始点を配置して追跡している。仮想設置する面が無限大で風上にあり、その面上に細かく無数の開始点を配置すれば、あらゆる風の通り道に矢印を表現することができる。しかし、可視化処理時間およびメモリの使用量におけるリソースが多量となり、無限個の開始点から計算した結果を間引いて表現するのが現実的である。この場合、風上にある玄関ドアやサッシの開口に風が流れ込む確率が低く自邸内の風の流れが表現できない。これを解消するため、自邸の玄関ドアやサッシの開口面上で風の向きを事前確認し、自邸内に入る風であればその位置に開始点を配置して追跡するモードを追加した。更に開口面から風が発生する表現が不自然なので、風の逆追跡により敷地から自邸に流れる風を表現できるようにした。風下のサッシにおいては風が流れてはいるものの流線の数が少なく表現されない場合があるため、風下の開口面にも開始点を配置し、風の追跡により自邸の外部に流出する風を、風の逆追跡により自邸のどこから風が流れたかを表現できるようにした。

3.3.4 粒子表示 (パーティクル)

流線と同じ仕組みで t 時間単位の風の位置を AIREALMEISTER の移動アニメーションを利用して紙飛行機の動きにより表現する。流線表示と一緒に表現することで、目に見えない風の通り道を楽しく表現できている。風の強さにより紙飛行機の色も変えている。図 9 は流線と次に説明する粒子を重ね合わせてアニメーション表示をキャプチャリングした図である。



図 9 流線表示と粒子表示の重ね合わせ表示

3.4 熱解析&可視化

本章で述べてきた風向シミュレーションは、風の流れのみを解くために、風の向きや風の強さ、床・壁・天井などの障害物を入力条件としていた。

この条件に熱に関する要素を加え、外気を遮断した住空間における熱損失を解析し、断熱材効果のプレゼンテーションや、冷暖房器具による室内の風の流れ、温度分布を表現できるようにした。そのため、初期条件に以下の情報を追加した。なお、熱解析による温度表現は色で表示する。

- 単位時間あたりの外気温 (°C)
- 各部屋の初期温度 (°C)
- 各部屋の隣接情報

外気や他の部屋との境界である床・壁・天井・屋根の断熱材や断熱効果のあるサッシに以下の情報を持たせ、部屋間の熱の受け渡しを解析できるよう格子情報属性を与えた^[2]。

- 熱伝導率 (W/m・K)
- 比熱 (J/kg K)
- 密度 (kg/m³)
- 厚み (mm)

全ての部屋を対象として熱と風を解析するのは今の PC 性能では負荷が高すぎて現実的ではないため、詳細に解析する部屋を指定するモードや、全体を簡易に解析するモードを必要な場面に応じ選択できるようにした。図 10 はそのイメージ図である。

- Level 0 : 熱計算をせず、風の計算のみ。
- Level 1 : すべての部屋の風と温度を解く。
- Level 2 : 特定の部屋だけ風と温度を解く。
- Level 3 : 風計算をせず、熱の計算のみ。

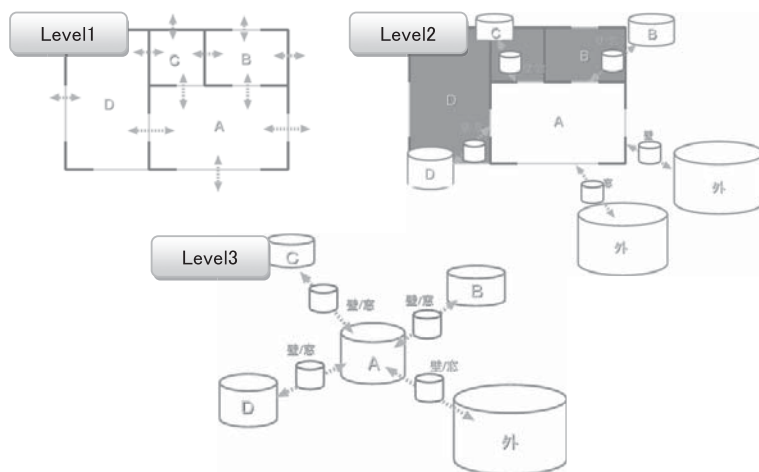


図 10 計算モード

また、熱と風を発生するエアコンやファンヒーター、熱のみを発生するストーブ、ホットカーペット、風のみを発生する扇風機やシーリングファンの、熱や風が発生する格子の面情報に

- 冷暖房器具による温度 (°C) あるいは発熱量 (W/m^2)
- 風の向き・速度 (速度の x 軸成分 U, y 軸成分 V, z 軸成分 W : (m/s))

の属性を追加した. 図 11 ではシーリングファンにより下階に溜まった冷気が拡散されること
がわかる.



図 11 シーリングファンによる部屋温度の効果
(左：シーリングファンなし，右：シーリングファンあり)

4. お わ り に

本稿では，風向シミュレーションを住宅設計や販売に関わる現場で利用するために，格子モデルの作成から可視化にいたるプロセスにどのように取り組んできたかを紹介した. 今後は換気ダクトの3次元モデルを構築し，強制換気による風の流れを検証する給排気設備シミュレーションモデルの実装や，精度の落ちる斜め面の効率的な格子作成を確立させて汎用的な3次元モデルフォーマットから格子モデルを自動生成するツールも作成したい. それにより，住宅建築業務において，住宅供給側とその顧客間でのコミュニケーションがより円滑になり，満足度の高い設計・建築が実現できるよう貢献したい.

-
- * 1 世界的に実用プログラムとして多数実績のある米国国立研究機関の“SOLA”をベースにして，SIMPLE法，不足緩和法等の工夫を導入し，ロバスト（堅牢，安定）性，計算効率に改良を加え，更に特殊法人高圧ガス保安協会と共同で室内燃焼器の不完全燃焼をシミュレート・評価するプログラムとして開発された.

- 参考文献 [1] 「住空間シミュレーションシステム AIREALMEISTER」
<http://digid.excel.co.jp/aireal/index.shtml> (URLの存在確認：2012年10月25日)
[2] 藤井正一，住居環境学入門〈第三版〉，後藤武，彰国社，2005年9月，P49～88

執筆者紹介 吉田 学 (Manabu Yoshida)

1991年日本ユニシス株式会社入社. CAD/CAMシステムのインフラ導入，住宅CADシステムの受託開発ならびに製品開発に従事. 2000年日本ユニシス・エクセリョーションズ(株)に出向. 2012年同社を出向解除となり，現在，製造ソリューション開発部に所属.

