

日射を考慮した非定常温熱気流解析手法の開発

ー非定常熱伝導解析機能の組み込みと住宅への適用ー

森川 泰成^{*1} 大黒 雅之^{*2} 佐藤 康弘^{*1}

Keywords : Outside insulation, CFD, Unsteady analysis. Simulation

外断熱, C F D, 非定常解析, シミュレーション

1. はじめに

筆者等は、これまで、定常状態を仮定した日射・放射・対流連成解析手法を開発し、屋外の温熱環境解析に適用してきたが、更に表面温度の解析精度を向上させ、壁体等の蓄熱効果を考慮していくためには、非定常熱伝導を同時に解析する必要がある。また、建築に

おける省エネルギーや快適性向上のためには断熱性・気密性能の評価が重要であり、壁体への蓄熱を伴う住宅内の非定常な熱的挙動の評価が重要となる。

以上のような背景から、本報では、屋外の温熱環境解析手法に新たに非定常解析機能を組み込むと共に、住宅への適用を試みた結果を報告する。

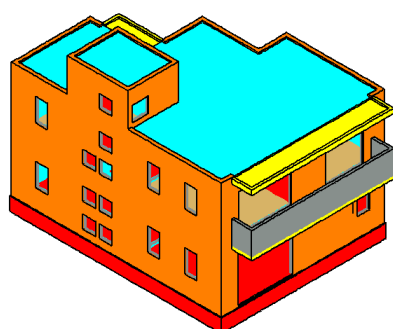


図-1 住宅モデル
Fig.1 House model

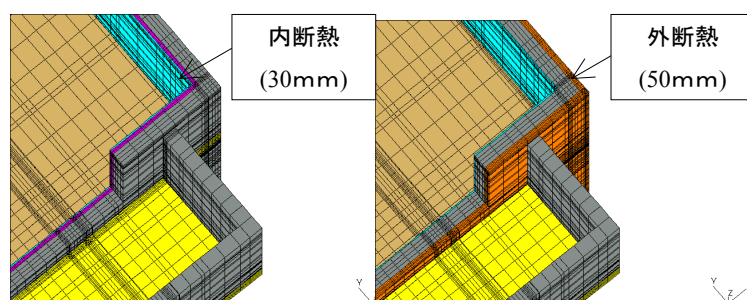


図-3 断熱材の位置
Fig.3 Location of insulation material

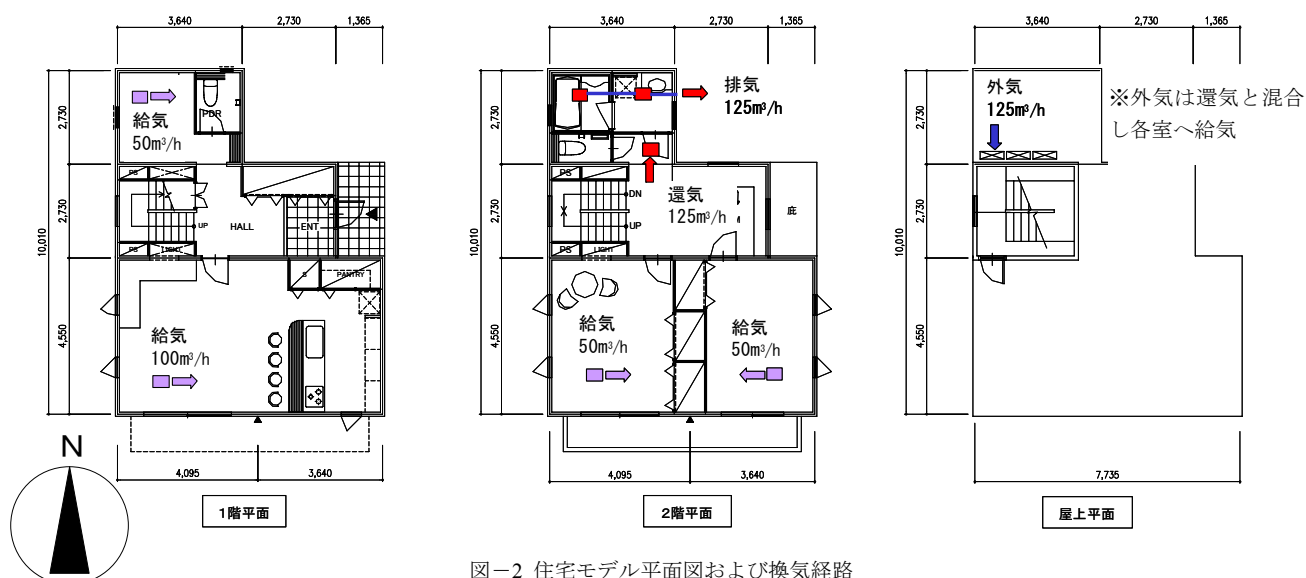


図-2 住宅モデル平面図および換気経路
Fig.2 Concrete house plan and ventilation system

*1 技術センター 建築技術開発部 ニューフロンティア技術開発室

*2 技術センター 建築技術研究所 環境研究室

2. 非定常熱伝導解析機能の組み込み

解析には文献 1 の屋外温熱環境解析手法を用いた。本解析手法は日射・対流・伝導の連成解析による屋外環境解析のために開発されたものである。その構成は短波・長波の相互反射をラジオシティーにより解析し、対流や熱伝導を考慮して外壁の表面熱収支を解くことにより、表面温度分布を求めることができる日射解析部分と、その結果を境界条件とする非構造格子による流体解析部分の 2 つよりなる。

本報では、住宅の非定常解析を行うため、上記プログラムの日射解析部分に非定常熱伝導解析機能を組み込んだ。以下に非定常熱伝導および表面の熱収支式を示す。

1) 熱伝導方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_d C_d T_d) = \frac{\partial}{\partial x_n} \left(k \frac{\partial T_d}{\partial x_n} \right) + s_e$$

ここで、
 ρ_d : 密度, T_d : 壁体内部温度, C_d : 比熱, k : 熱伝導率, S_e : エネルギーソース

2) 表面の熱収支式

$$J_s + J_l + q_c + q_d = 0$$

ここで、 J_s は短波放射で受け取る熱量, J_l は長波放射収支, q_c は対流により空気に伝わる熱量, q_d は非定常熱伝導により壁内部に伝わる熱量であり、以下の式となる。

$$J_s = a(S_{dir} + S_{sky} + \sum_{j=1}^n f_{ij} S_j)$$

$$J_l = \varepsilon(L_{sky} + \sum_{j=1}^n f_{lj} L_j) - \varepsilon \sigma T_w^4$$

$$q_c = \alpha(T_w - T_a)$$

$$q_d = - \left(k \frac{\partial T_d}{\partial x_n} \right)$$

ここで、
 J_s : 短波放射受熱量, J_l : 長波放射収支, q_c : 対流熱, q_d : 伝導熱, S_{dir} : 直達日射, S_{sky} : 天空日射, S_j : 相互反射による短波ラジオシティー, L_{sky} : 大気放射, L_j : 相互反射と熱放射による長波ラジオシティー, a : 短波吸収率, ε : 長波吸収率 (= 長波放射率), f_{ij} : 形態係数, T_w : 表面温度, α : 対流熱伝達率, T_a : 表面近傍空気気温

表—1 壁体構成
table.1 Wall materials

部位	部材*	厚さ(mm)	部位	部材	厚さ(mm)
屋上 (共通)	モルタル	15.0	壁 外断熱	断熱材1	50.0
	断熱材2	50.0		PC	120.0
	PC	150.0		PB	9.5
	空気層	70.5	壁 内断熱	PC	120.0
	PB	9.5		断熱材1	30.0
バルコニー (共通)	PC	120		PB	9.5

*上から下に外から内の順

表—2 壁体物性値
table.2 Material properties

部材	比熱(J/kgK)	熱伝導率(W/mK)	密度(kg/m³)
モルタル	800	1.5	2000
コンクリート(PC)	880	1.33	1991
プラスターボード(PB)	840	0.6	1950
断熱材1	1000	0.043	16
断熱材2	1000	0.028	28
空気層の熱抵抗: 0.11(m²K/W)、室内側熱伝達率: 9.31(W/m²K) 日射反射率: 0.346(屋上) 0.716(外壁)、長波放射率: 0.90(共通)			

3. 解析対象

非定常解析の対象とした住宅の概要と平面図を図—1, 2 に示す。断熱材の位置を図—3 に示す。また、壁体構成を表—1 に壁体物性値等を表—2 にまとめて示す。

図—3 および表—1 に示すように側面の壁について外断熱仕様と内断熱仕様の 2 種類の仕様の想定して解析を行った。屋上はいずれも外断熱とした。

また、室内の換気システムとして、一定の外気量 (125m³/h) を 3 階吹き抜けから取り入れ、これを室内の還気と混合し、天井面から吹出す方式の 24 時間換気システムを考慮する。(図—2)

4. 解析概要

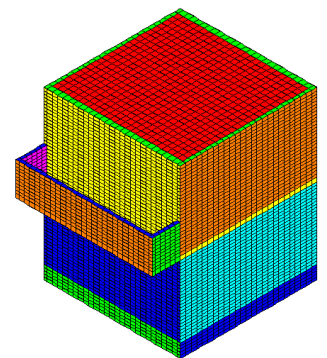
4.1 解析条件

東京における夏季の晴天日を想定して解析を行う。

日射の条件は 8 月 1 日を想定した。

4.2 解析手順

計算対象の住宅は極めて複雑な形状であることから、前述の非定常熱伝導を組み込んだ日射解析による外壁表面温度の検討を行い、その後、この表面温度を条件とした室内の気



図—4 簡易形状モデル
Fig.4 Simplified model

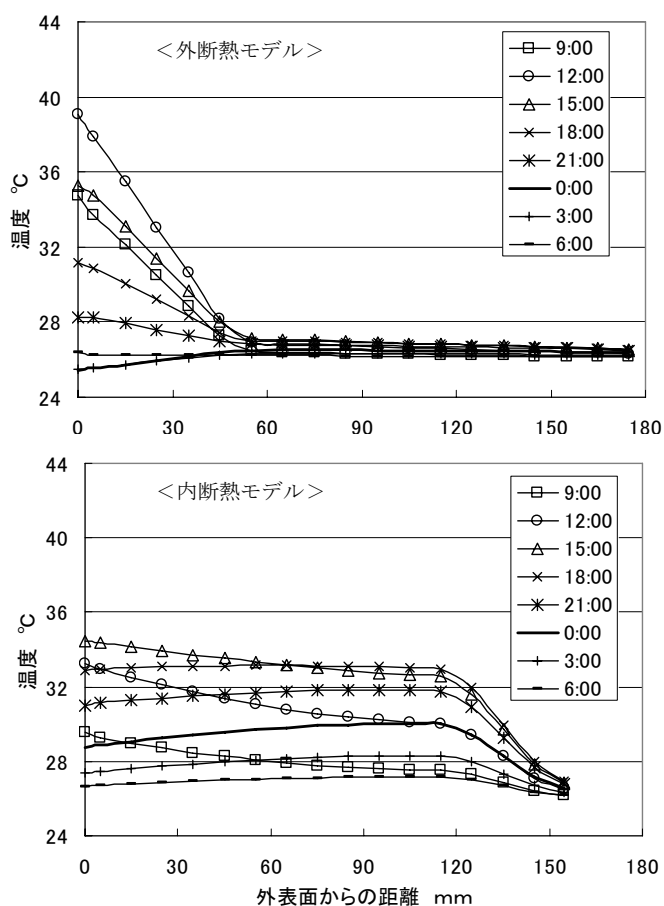


図-5 南面における壁体内部の温度変化

Fig.5 Fluctuations of temperature in walls

流・温熱環境解析を行うという 2 段階に分けた解析を行った。具体的解析手順を以下に示す。

1) 非定常日射解析

図-4 に示す形状を簡易化した住宅モデルを対象とし、非定常の日射解析機能を用いて、外断熱仕様、内断熱仕様での各部材の蓄熱を考慮した非定常解析を行い、外壁の屋外側表面温度の時系列データを算出する。解析は午前 6 時から 48 時間計算し後半の 24 時間分を採用する。室温は 26℃一定とする。

2) 非定常室内温熱環境解析

室温の変化による外壁の屋外側表面温度への影響は比較的小さいと仮定し、1) で算出された外壁の屋外側表面温度を、外壁を含む住宅全体の固体・流体連成解析の境界条件として外壁の屋外側に与え、非定常で外壁内部と室内の空気温度を解析する。解析は午前 6 時から 48 時間分計算を行い後半の 24 時間の結果を採用する。

なお、室内の気流解析における乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた。また、解析に当たり、エアコンや室内の発熱や窓面等での日射の影響は考慮しないこととした。

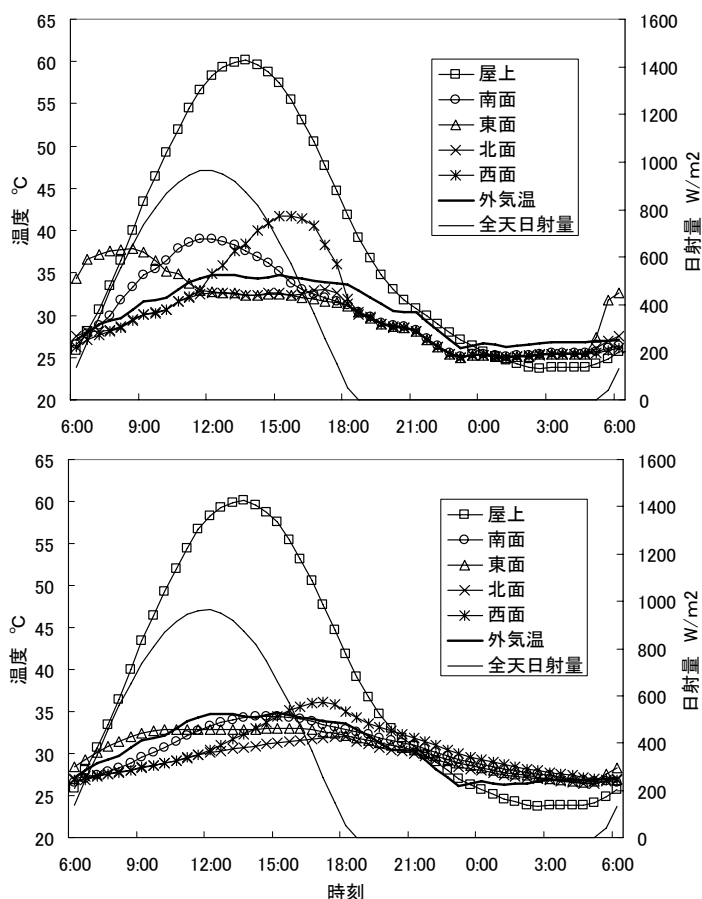


図-6 外壁の表面温度変化

Fig.6 Surface temperature fluctuations

5. 解析結果

5.1 非定常日射解析の結果

図-5 に南側外壁の非定常計算結果を示す。外断熱の場合、外表面温度は内断熱の場合にくらべて高いことが伺える。内部の温度分布からも判るように、外断熱は外側が断熱されているため、吸収した日射熱は壁体内部伝わりにくく、断熱材内部に大きな温度勾配が生じる。伝導率は小さいため表面熱収支における伝導成分は小さく、対流熱伝達と長波放射による屋外への放熱量が相対的に大きくなっていると考えられる。

図-6 にその他の方位における表面温度の計算結果を示す。屋上はいずれも外断熱のため、60℃まで上昇している。他の方位は外断熱は日射の当たる時刻当たりピークがあり、内断熱より高温となっている。内断熱は外断熱よりややピークが遅れる傾向がある。

以上の結果は外断熱と内断熱の特徴を良く捕らえており、妥当な結果と考えられる。

5.2 非定常室内温熱環境解析の結果

図-7 に 2 F の平均室温およびプラスターボードの平均温度の変化を示す。

外断熱と内断熱では温度挙動に違いが生じており内

断熱では外断熱と比較して室内側プラスターボードの温度が時間とともに上昇する傾向にある。また、室温も若干ではあるが、外断熱の方が低く保たれる傾向にある。このメカニズムは以下のように考えられる。

いずれの断熱方式においても室内温度は主に高温の外気取り入れによって15時頃には32℃程度まで上昇しその後18時頃までほとんど低下しない。一方、プラスターボードは27～28℃程度であり、この間は高温の室内空気によってプラスターボードが加熱されることとなる。このとき、内断熱ではプラスターボードの直ぐ外側に断熱材があるため壁体内部へは熱が伝わりにくく、プラスターボードの温度が上昇すると考えられる。外断熱でも同様に加熱されるが、コンクリートの熱容量が大きいので、温度の上昇が比較的小さい。

その後、21時には室内温度約30℃、24時には室内温度約27℃にまで低下するが、内断熱・外断熱共に、プラスターボードの温度の変化は小さい。また、24時以降は、内断熱で壁の温度が室温より高くなっている。

5.3 室内温度分布比較

図-8に代表的な時刻の室内温度分布を示す。外断熱と内断熱で温度分布の傾向には大きな差はないが、昼中の15時、朝6時のいずれにおいても、外断熱仕様の方が全体的に室温が低温になる傾向がみられる。

15時の温度分布を見ると、天井からの高温の外気が室内を加熱している様子が判る。また、排気口のある北側の2階の部屋は比較的室温が低くなる傾向にある。今回の条件では、壁により外気が冷やされることになるため、排気側の室温が低下していると考えられる。

6. まとめ

定常状態を仮定した日射・放射・対流連成解析手法に非定常熱伝導解析機能を組み、住宅の簡易モデルに適用した結果、外断熱仕様と内断熱仕様の違いについて妥当な結果を得た。また、屋外側表面温度を条件として住宅内の温熱環境の非定常解析を行い、外断熱仕様と内断熱仕様の熱挙動の違いについて考察した。

謝辞

本報告は国土交通省公募研究の一部をとりまとめたものである。

参考文献

- 1) 大黒雅之, 森川泰成: 街区及び敷地レベルを対象としたヒートアイランド解析評価システムの開発, 大成建設技術センター報 第38号 2005年
- 2) 原山, 吉田他 非定常放射・伝導解析による数値解析と精度検証 非定常な対流・放射・伝導を考慮した3次元の屋外温熱環境予測評価手法の開発 第1報 日本建築学会計画系論文集 第556号 2002年

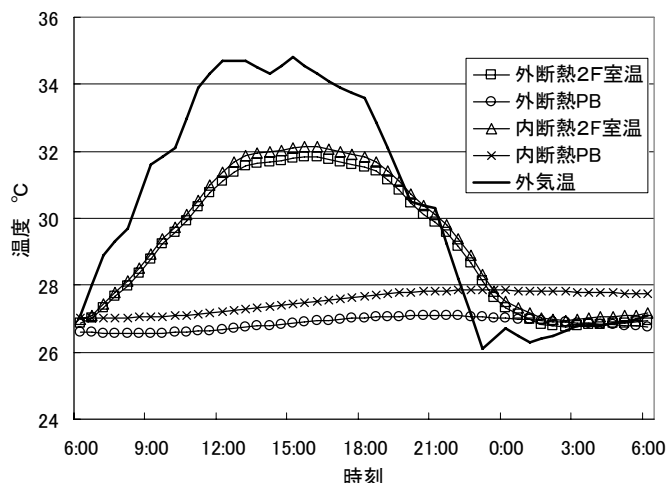


図-7 室温およびプラスターボードの温度変化

Fig.7 Fluctuations of room temperature and PB temperature

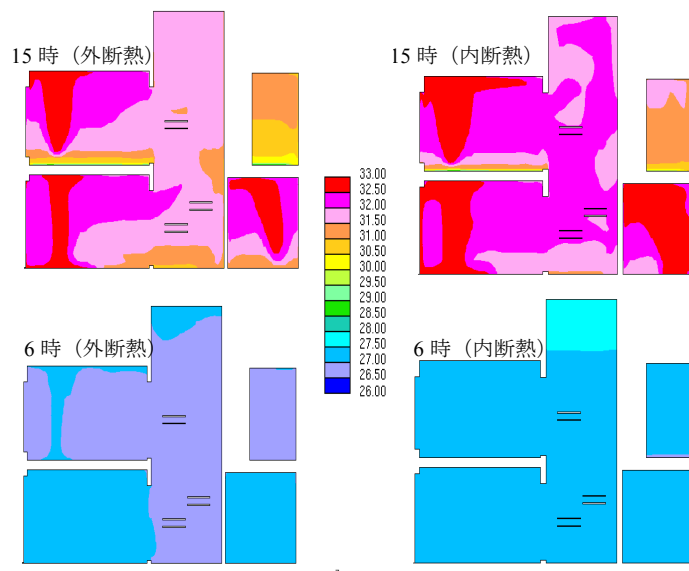


図-8 15時と6時の空気温度分布 (左: 外断熱, 右: 内断熱)

Fig.8 Air temperature distributions (left: outside ins., right: inside ins.)