

多様な住宅空調設備を評価するための 暖冷房負荷計算の開発

環境研究グループ 主任研究員 三浦 尚志

目次

- I はじめに
- II 研究の背景
 - 1) 省エネのためのシミュレーション
 - 2) 暖冷房負荷計算の困難さ
 - 3) 暖冷房負荷を計算する利点 1（多様な設備方式の評価）
 - 4) 暖冷房負荷を計算する利点 2（室温の提示）
 - 5) 建築研究所で開発している暖冷房負荷計算
- III 暖冷房負荷計算とは
 - 1) 暖冷房負荷を決定する熱取得と熱損失
 - 2) 暖冷房負荷を低減させる技術
 - 3) 外皮平均熱貫流率と平均日射熱取得率を超えた評価
- IV 建築物省エネ法における暖冷房負荷計算
 - 1) 計算方法
 - 2) 疑似的に計算する方法を採用した経緯
- V 開発中の暖冷房負荷計算の概要
 - 1) 全体像
 - 2) 開発している要素
 - 3) 成果の公表
- VI まとめ
- VII 注釈

I はじめに

住宅の暖冷房エネルギー消費量予測に不可欠な暖冷房負荷計算を建築研究所では新たに開発している。本発表では、新たに暖冷房負荷計算を開発する狙い・意義・概要について報告する（以下、単に「負荷計算」と言った場合は「暖冷房負荷計算」のことを指す）。

II 研究の背景

1) 省エネのためのシミュレーション

住宅をはじめとする建築物のエネルギー消費量の削減が、近年

ますます重要になっている。住宅のエネルギー消費量を削減するには、設備の使用時間を減らすなどのすまい方の工夫が重要であるのは言うまでもない。加えて、同じすまい方でもエネルギー消費量が少なくなるような設計段階からの家づくり、つまり断熱や日射熱の取得・遮蔽に配慮した外皮設計・高効率な設備の選定が重要である。

建設前段階から適切な外皮設計・設備選定を行うためのキーポイントは、シミュレーション（コンピューターを駆使したシミュレ

ーションから簡単な手計算レベルを含む)を活用し、エネルギー消費性能を予測することである。

設計段階におけるエネルギー消費性能予測に最も活用されてきたのが、国が評価方法を定めた建築物省エネ法である。建築物省エネ法に基づく評価方法と計算プログラムが建築研究所で公開されており^{注1・注2}、この計算プログラムを使用して適切な省エネ設計を行うのが一般的である。

建築物省エネ法以外にも、日照シミュレーションや防露シミュレーション、建築物省エネ法とは異なる評価方法・評価軸を持った省エネ評価プログラムが存在し、それらのシミュレーションプログラムは設計段階で適宜使用されている。

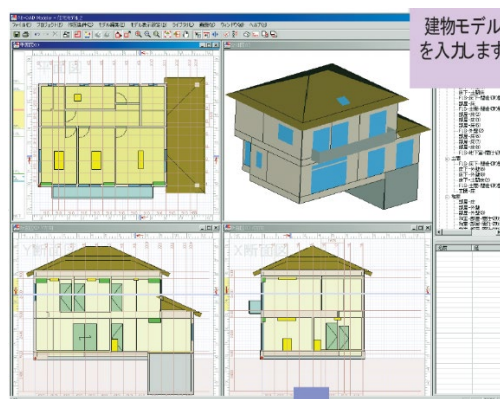


図1 暖冷房負荷計算の入力インターフェースの例

2) 暖冷房負荷計算の困難さ

さて、暖冷房のエネルギー消費量(消費電力量やガス・灯油消費量)を適切に予測するためには、負荷計算を行うことが欠かせない。暖冷房負荷とは暖房負荷と冷房負荷をまとめた呼び方であり、暖房負荷とは暖房時(冬)に部屋を暖かく保つために必要な加熱量であり、冷房負荷とは冷房時(夏)に部屋を涼しく保つために必要な除去熱量である。

暖冷房負荷を計算するためには、壁・屋根・開口部など(これらを総称して「外皮」または「外皮の部位」と言う。)の面積を正しく入力し、かつそれら外皮同士、及び外皮と間仕切りの位置関係を入力するなど、非常に多くの入力項目を必要とするのが一般的である。これらを間違い無く手作業で入力するのは困難なため、開発・公開されている暖冷房負荷の計算プログラムを見ると、何らかのビジュアル的に入力可能なインターフェースを備えていることが多い(図1)。将来的に3次元CADやBIMが普及しCAD入力項目と暖冷房負荷の入力項目が連携し、設計データからワンクリックで負荷計算の入力項目を作成できるような時代が来ることが望ましいが、現段階の設計実務者における3次元CADの普及率あるいはデータ連携の度合いに鑑みると、負荷計算の入力項目をすべて適切に入力することは非常に難易度が高く一部の実務者を除けば現実的ではないと言える。

3) 暖冷房負荷を計算する利点1(多様な設備方式の評価)

建築物省エネ法では、暖冷房負荷を削減するための外皮性能の指標として、外皮平均熱貫流率(UA値)・暖房期の平均日射熱取得率(η AH値)・冷房期の平均日射熱取得率(η AC値)が用いられる。外皮平均熱貫流率とは住宅の保温性能を表す指標であり、室内外温度差が1度の時に流出する外皮面積当たりの熱流量を表す。この値が小さいほど保温性能が良いといえる。暖房期の平均日射熱取得率とは暖房期つまり冬期の日射熱の取得性能を表す指標

であり、この値が大きいほど日射を取り入れやすく、暖房負荷が減ることになる。冷房期の平均日射熱取得率とは冷房期つまり夏期の日射熱の遮蔽性能を表す指標であり、この値が小さいほど日射を遮ることができ、冷房負荷が減ることになる。

このように、暖冷房負荷を減らすための指標として、建築物省エネ法では、外皮平均熱貫流率(UA値)・暖房期の平均日射熱取得率(η AH値)・冷房期の平均日射熱取得率(η AC値)が使われてきた。これらの指標は、設計時において断熱仕様や開口部仕様を決定する際の判断に大いに役立つ。また、何らかの負荷計算シミュレーションを活用した際にも、その結果の解釈を行い設計へフィードバックさせるためには、これらの指標に精通しておくことが必須であると言える。

住宅にはLDKや寝室・子供室など複数の居室がある。これらの部屋ごとに暖冷房負荷が発生し、その暖冷房負荷を処理する設備、例えばエアコンやFF暖房機などが設置されている場合、エネルギー消費量計算を各部屋に設置された設備ごとに行うことができる。一方で、近年多少流行している様々な試み(床下空間を効果的に用いた暖房方式やダクト式セントラル空調など1つの設備で複数の部屋を暖冷房するような暖冷房方式・全熱交換機やデシカント空調による湿度の評価もふまえた暖冷房負荷の削減・同時給排換気設備など)のように換気負荷を減らす試み・日射熱取得を積極的に活用した躯体の蓄熱利用などを見ると、暖冷房負荷の多寡に影響を与える暖冷房・換気設備は多様化している。これらの設備を適切に評価するためには先に挙げた3つの指標(外皮平均熱貫流率(UA値)・暖房期の平均日射熱取得率(η AH値)・冷房期の平均日射熱取得率(η AC値))のみでは評価として不十分である。多様な暖冷房・換気設備による暖冷房負荷の削減を評価するためには、従来の指標だけではなく、暖冷房負荷を計算し、評価指標と

して活用する設計（設備選定）を行う必要があると言える。

4) 暖冷房負荷を計算する利点2（室温の提示）

負荷計算は、室温を適切に保つための負荷（暖房時においては加熱量、冷房時においては除去熱量）を計算するのが主目的ではあるが、付随して、暖冷房を行わない場合の室温も計算される。暖冷房を行わない時の室温を特に自然室温と言う場合がある。

起居時・就寝時を含むすべての時間、居室・非居室を含むすべての空間を暖冷房するのであれば、ここで挙げる自然室温の計算は不要である。しかし、就寝時は暖冷房を停止あるいは弱める、非居室は暖冷房しないなど、時間的・空間的に部分的な暖冷房を行うことが一般的である。その場合、躯体性能の良さを感じるの、例えば冬期の明け方起居時の最低温度や、夏期日中の最高温度であったりする。

設計の現場において施主に外皮性能の良い住宅を購入あるいはそこに建設費を払って頂く売り言葉として、ZEH（ゼロ・エネルギーハウス）、G1～G3^{注3}や断熱等級^{注4}などの外皮性能を表す言葉が並んでいる。これらは、建築物省エネ法で定められている指標、エネルギーに対してはBEI（Building Energy Index）、断熱性能については外皮平均熱貫流率（UA値）や冷房期の平均日射熱取得率（ η AC値）で定義がされている。

現在の省エネの重要性や光熱費の高騰などから、ひと昔前よりは省エネに費用をかける時代にはなったが、より訴求力を持たせるためには、外皮平均熱貫流率（UA値）等の専門的な言葉ではなく、冬場の起居時の最低室温や、夏場の日中の最高室温といった、一般の方がより親しみのある言葉で施主に説明するべきであろう。その意味で、負荷計算を行い、暖冷房負荷と同時に室温が計算できるメリットは非常に大きい。

5) 建築研究所で開発している暖冷房負荷計算

設計実務者が負荷計算を活用することは、入力項目が多く、現状で使用しているCAD等の設計ツールの状況を見ると、非常にハードルが高いことを述べた。一方で、暖冷房負荷計算を活用すると、多様な暖冷房・換気設備が評価できること、自然室温が計算できること、躯体性能向上の利点をより分かりやすく伝えることができることなど、メリットが多いことも述べた。

建築研究所で開発している暖冷房負荷計算法は、計算エンジンとして既存の計算手法をベースにしつつ、入力項目を非常に少なくすることで、設計実務者が容易に入力可能なツールを開発することを目指している（図2）。

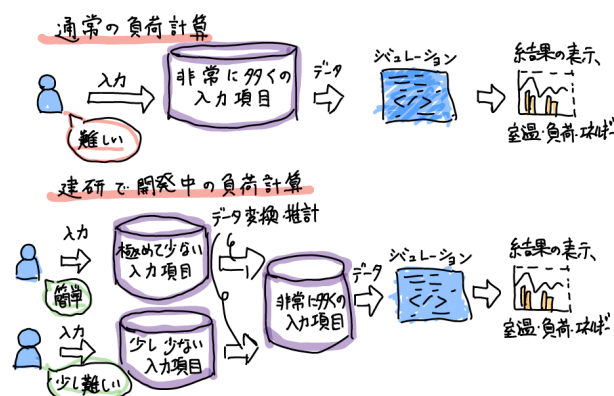


図2 建研で開発中の負荷計算と従来の負荷系との入力項目の違い

負荷計算のシミュレーション自体は既往の知見を活用しながら構築しているため、従来の負荷計算ソフトとできることの違いは多くはない（とはいえ、従来の負荷計算ソフトよりも多様な設備・設計手法・居住者の行動を評価できるように多少ロジックを追加している。この点は後述する。）。開発中のプログラムの最大の特徴は入力項目の少なさである。もちろん、負荷計算に必要な入力項目が非常に多いのにはそれなりの必要性があるからであり、それを省略するという事はそれだけ計算結果が粗くなってしまいうことを意味している。ここは求められる計算結果の精緻さと入力の手間の増加とのバランスだと割り切り、計算結果に多大な影響を与えないようなパラメータは入力項目から削除し、使用者が意識しないプログラム側で推計することにした。

入力項目としては、「極めて少ない」と「少し少ない」と「非常に多い（従来の負荷計算と同じ程度の項目数）」の3段階を想定している。「極めて少ない」は、建築物省エネ法において外皮性能として最低限入力しないといけない項目（外皮平均熱貫流率（UA値）・暖房期の平均日射熱取得率（ η AH値）・冷房期の平均日射熱取得率（ η AC値）及び気象条件や床面積など）を想定している（図3）。「少し少ない」は、建築物省エネ法において外皮性能を計算する入力シートの入力項目を想定している。外皮性能を計算する方法は、CADと連携したもの、CADのようなインターフェースを持つもの、表計算をベースとしたものなど、様々なツールが用意されているが、図4に一例として建築研究所が公開している外皮計算シートを示す。外皮計算では、外皮の全ての部位における断熱性能を入力することになるが、負荷計算にはさらに蓄熱性能（熱容量）や間仕切り情報、換気経路などの情報が必要となるため、これらの情報は何らかの推計手法により補完した上で負荷計算が行われることになる。

III 暖冷房負荷計算とは

本節では暖冷房負荷の計算方法を説明する。

1) 暖冷房負荷を決定する熱取得と熱損失

暖冷房負荷は室内が取得する熱と損失する熱を計算することから始まる。取得する熱が損失する熱を上回る場合は室温が上がり、取得する熱が損失する熱を下回る場合は室温が下がる。取得する熱と損失する熱の種類を図5に示す。これらの熱の移動は、室外条件(気温や日射量など)や居住者のスケジュールなどに依存するため、時々刻々に解いていく必要があり、手計算でできる範囲を超えている。従って、計算プログラムを活用して計算することになる。

取得する熱が損失する熱を上回ると室温が上がっていき不快になるため、一定の範囲で室温を涼しく保つためには、エアコン等の設備を用いて強制的に室内から室外に熱を移動させてやらねばならない(除熱)。この熱の量を冷房負荷と言う。一方、損失する熱が取得する熱を上回ると室温が下がっていき不快になるため、一定の範囲で室温を涼しく保つためには、エアコン等の設備を用いて強制的に室外から室内に熱を移動、あるいはFF暖房設備など燃料を燃焼させて熱を発生させる等しいといけ(加熱)。この熱の量を暖房負荷と言う。

もし仮に暖冷房負荷を発生させなければ、熱取得または熱損失の程度に応じて室温が上下する。これを単純化した式で書くとな次のようになる。

$$C_T \cdot T = C_L \cdot L + C_C$$

ここで、 T は室温ベクトル(単位:°C)を表し、 L は暖冷房負荷ベクトル(単位:W)を表す。部屋の数を N とするとこれらは $N \times 1$ の縦ベクトルで表される。その他の係数 $C_T \cdot C_L \cdot C_C$ は躯体の性能、換気量、室内の発熱、外気の状態などによって決定される値(ベクトル)である。ここで、室温 T と暖冷房負荷 L が未知数である。室温 T を目標温度(設定温度とも言う。)に適当に決めてあげればそれを満たす暖冷房負荷 L が求まる。あるいは暖冷房をしない、つまり暖冷房負荷 L を0(ゼロ)とすれば室温 T が求まる。このように暖冷房負荷の計算を行うと付随的に室温が求まる。

躯体の熱性能を表す指標のうち、外皮平均熱貫流率(UA値)はこれらの熱のやり取りのうち、「①壁や屋根などを伝わって入ってくる熱」「⑥壁や屋根などを伝わって出ていく熱」に影響を与える。一方、暖房期または冷房期の平均日射熱取得率($\eta_{AH} \cdot \eta_{AC}$ 値)は、「①壁や屋根などを伝わって入ってくる熱」「②窓から入ってくる日射」「⑥壁や屋根などを伝わって出ていく熱」に影響を与える。暖房期(冬期)は室内外の温度差が大きいので暖房負荷低減には外



図3 建築物省エネ法に準拠した一次エネ計算プログラム中の外皮に関する入力項目画面

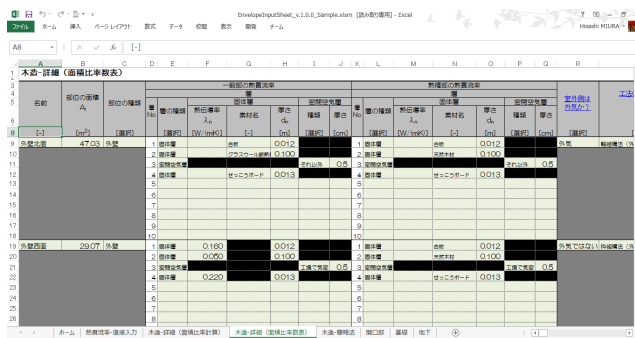


図4 建築研究所が公開している外皮計算シート

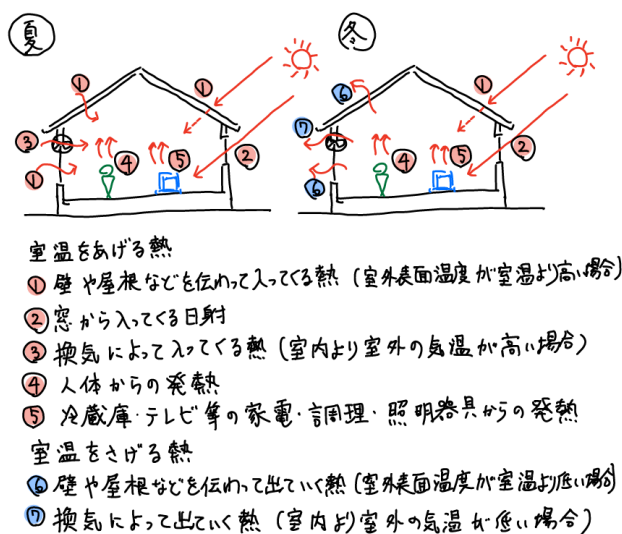


図5 熱負荷に影響を与える熱の流れ

外皮平均熱貫流率を小さくすると共に暖房期の平均日射熱取得率を大きくすることが有効である。一方で、冷房期（夏期）は室内外の温度差が小さいので外皮平均熱貫流率の重要度は小さく、冷房負荷低減には専ら冷房期の平均日射熱取得率を小さくすることが有効である。そこで、建築物省エネ法に基づく外皮基準は伝統的にこれらの指標（外皮平均熱貫流率と冷房期の平均日射熱取得率）で判断されてきた^{注5}。

2) 暖冷房負荷を低減させる技術

暖冷房負荷を低減させる技術を図6に示す。図6は自立循環型住宅への設計ガイドライン^{注6}で挙げられている省エネに資する15の要素技術の中から暖冷房負荷低減に関係するものを抜粋した。これらの要素技術は暖冷房負荷を減らすために前述した熱取得あるいは熱損失を増減させる技術である。厳密には暖冷房設備の方式によっても体感温度や湿度が変わるなど暖冷房負荷の増減に影響を与えるため、ここに含めた。また、ここに挙げた技術以外にも熱交換型換気の導入や照明・家電発熱の低減なども影響を与える。

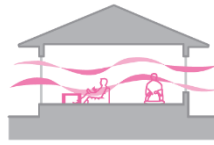
3) 外皮平均熱貫流率と平均日射熱取得率を超えた評価

建築物省エネ法で採用されている外皮性能を表す指標、外皮平均熱貫流率（UA値）及び暖房期または冷房期の平均日射熱取得率（ η_{AH} 値・ η_{AC} 値）は、前述した要素技術の一部を評価しているに過ぎない。

例えば、日射遮蔽技術と日射熱の利用はどちらも重要な技術であり、冬のことを考えて日射熱を最大限に利用するように設計上配慮しつつも、そのままだと夏は室温が上がりすぎるためブラインドやルーバー等の開口部の付属部材を活用して適切に日射を遮蔽することが鍵である。時期によって開口部まわりの日射熱の取得・遮蔽を行うことが重要であると言える。自然風の利用についても、窓を開けると室内外の空気が適切に入れ替わるように設計することはもちろんのこと、室外の温度が上昇する夏の日中などではあまり効果が得られないため、適切なタイミングで窓開けを行うことが重要である。こういった居住者の操作といった設計指標化しにくいような項目はシミュレーションを行って評価することになる。

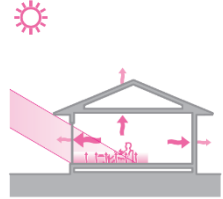
もちろん、断熱や日射取得・遮蔽は外皮設計の基本でありかつ最も重要な要素であり、設計順序として、最初に断熱・日射取得・日射遮蔽性能に配慮することが重要である。その上でさらに暖冷房負荷削減を行うには、外皮性能を表す指標では表わされない多様な技術の評価することが重要であり、そのためには負荷計算を行い暖冷房負荷の多寡を指標とすることが鍵となる。

01 自然風の利用・制御 (3.1)



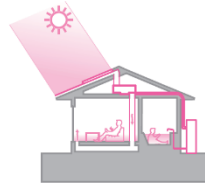
- 手法1 通風経路上の開口部面積の確保
- 手法2 卓越風向に応じた開口部配置
- 手法3 高窓の利用

04 日射熱の利用（太陽熱の利用・1）(3.4)



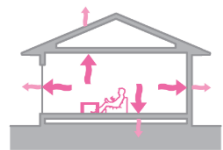
- 手法1 窓付属部材による日射熱取得への影響をなくす
- 手法2 蓄熱容量を調整する
- 手法3 暖房期の日射熱取得量を大きくする

05 屋根空気集熱式ソーラーシステム（太陽熱の利用・2）(3.5)



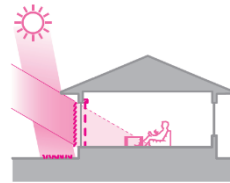
- 手法1 システムの適正な計画
- 手法2 給湯への熱利用
- 手法3 24時間換気との連動機能の付加
- 手法4 搬送動力源として太陽光発電の利用

07 断熱外皮計画 (4.1)



- （断熱材厚、開口部仕様、取合い部気流止めの措置、防露対策など一手法を設定していません）

08 日射遮蔽手法 (4.2)



- 手法1 開口部の日射遮蔽手法
- 手法2 屋根の日射遮蔽手法
- 手法3 外壁の日射遮蔽手法
- 手法4 その他の日射遮蔽手法

09 暖冷房設備計画 (5.1)



- FF式（強制給排気式）暖房機
- 手法1 高効率機器の採用
- ルームエアコンディショナー
- 手法1 高効率エアコンの採用
- 手法2 適切な機器容量の選定（暖房のみ）
- 手法3 扇風機・天井扇の利用（冷房のみ）
- 温水暖房
- 手法1 高効率の温水暖房機の採用
- 手法2 配管の断熱
- 手法3 放熱面積の確保（床暖房のみ）
- ダクト式セントラル空調機
- 一手法を設定していません

図6 暖冷房負荷低減に資する要素技術

IV 建築物省エネ法における暖冷房負荷計算

1) 計算方法

建築物省エネ法における暖冷房負荷の計算において評価される項目は表1のとおりである。

これらの項目を評価するために、表1の説明欄にあるように何段階かに設定し、これを掛け算的に（パラメトリックに）市販の暖冷房負荷計算ソフトウェア^{注7}を用いて予め負荷計算を行った。ただし、この方法だと計算結果が離散的にしか得られない。例えば断熱性能であれば、4つの断熱レベル（昭和55年省エネ基準相当、平成4年省エネ基準相当、平成11年省エネ基準相当、平成11年省エネ基準を超えるレベル）の計算結果しか得られない。平成4年省エネ基準相当の断熱性能と平成11年省エネ基準相当の断熱性能の間にあるような断熱性能の計算結果は存在しない。この場合、平成4年省エネ基準相当と平成11年省エネ基準相当の2つの計算結果を線形補間（按分）することで計算することとしている（図7）。

2) 疑似的に計算する方法を採用した経緯

負荷計算の際に、評価したい住宅の躯体性能に応じて予め計算された負荷計算結果を組み合わせるという意味で、純粋な意味では建築物省エネ法における一次エネ計算プログラムで熱バランスを解いた負荷の計算を行っているとはいえない。

なぜこのような方法を採用したのかというと、当時、一次エネ計算プログラムを開発するにあたって、負荷計算の高速化の検討が不十分で、一方で、住宅トップランナー基準の普及など一次エネ計算プログラムのアクセス数の増大が見込まれたことから、サーバー負荷などを考慮した結果、負荷計算をなるべく高速に行う必要があったからである。当時（開発時の2010年ごろ）は断熱性能と日射熱取得性能がきちんと評価することが必須条件であり、今日のように、例えばエアコン1台で住宅全体を暖冷房する方法や床下空間を活用する方法など、暖冷房方式が多様化していなかった。そのため、断熱性能や日射熱取得性能等を説明変数、暖冷房負荷（実際は時々刻々・部屋ごとなのでそれ自身がベクトル）を目的変数とする近似式を作成することによって、計算速度を優先させたとも言える。

しかし、先述したとおり、多様な暖冷房換気設備方式を評価するニーズが増えたことにより、今回改めて、負荷計算の導入を検討することになった。その際、以前導入する際にハードルとなった計算速度については、計算速度を出すために部屋や協会を計算結果に甚大な影響を与えない程度に集約して計算回数を削減する取り組みを行っている（後述）。

V 開発中の暖冷房負荷計算の概要

現在、開発している負荷計算の概要を記す。

1) 全体像

開発している暖冷房負荷計算はデータの流として上流側と下流側のプログラムで構成される（図8）。

上流側のプログラムは、前述した通り、少ない入力パラメータから負荷計算に必要なパラメータを生成する部分である（図9）。少ない入力パラメータとしては、最も入力が簡単な方法として、現在建築物省エネ法の一次エネルギー計算プログラムで入力が必須とされている項目、次に入力が簡単な項目として外皮の計算に必要な外皮の一般的な性能（断熱材の種類や厚さ等）と開口部のカタログ性能、およびそれらの部位の面積などの項目の2つのレベルを想定した。この上流側のプログラムは、現在、国交省からの補助金^{注8}と、それに採択された事業者と建築研究所との共同研究で開発を進めている。

表1 建築物省エネ法における暖冷房負荷計算で評価される項目

項目	説明
空調機の運転モード	居住者の在・不在に応じて運転の発停を行うか、及び非居室を暖冷房するか否かによって、「全館連続運転」、「居間歇運転」、「居室連続運転」の3つの運転モードが設定されている。
断熱水準	4つの断熱レベル（昭和55年省エネ基準相当、平成4年省エネ基準相当、平成11年省エネ基準相当、平成11年省エネ基準を超えるレベル）
熱交換器	有無
日射熱取得	3つの日射遮蔽レベル（遮蔽物なし、レースのカーテン相当、外側ブラインド相当）
通風（自然風の利用）	なし、換気回数5回/h相当、換気回数20回/h相当
蓄熱	有無

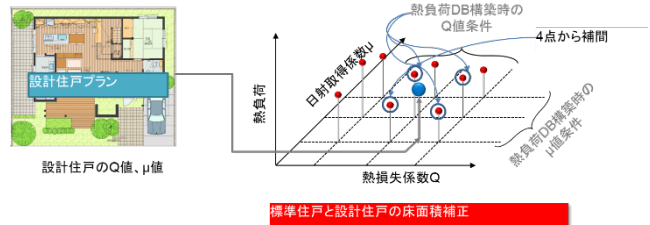


図7 予め計算された負荷計算結果を補間（按分）するイメージ

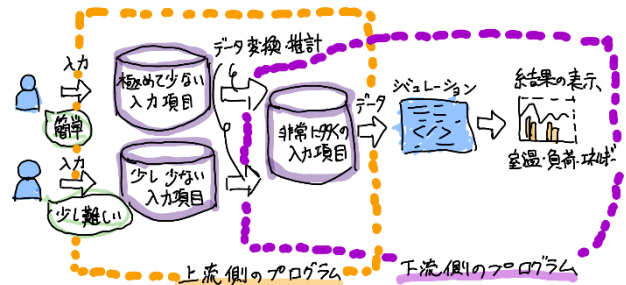


図8 上流側・下流側のプログラム

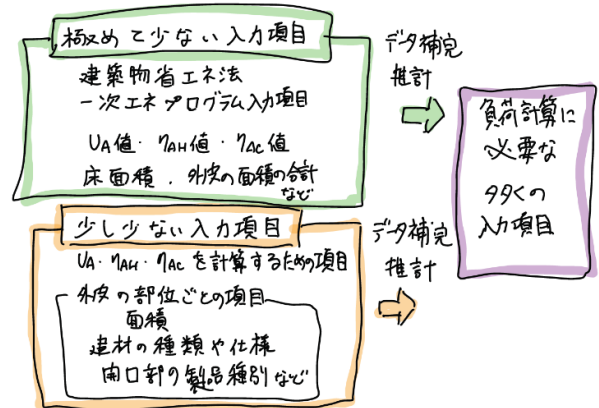


図9 上流側プログラムのデータの入出力

下流側のプログラムは、上流側プログラムで作成された入力項目をもとに暖冷房負荷を計算する部分である。ただし、既存の暖冷房負荷計算よりも少々アレンジしている。こちらのプログラムは別のプロジェクト^{注9}で作成された。次節以降では、今回アレンジした項目の主なものについて概要を記す。なお、一口に既存の暖冷房負荷計算といっても様々なものがあり、評価できる項目に差があるため、既存の暖冷房負荷計算プログラム全てがここに掲げる内容を実装していないという意味ではないことは承知頂きたい。

2) 開発している要素

① 室内の表面温度

現行の建築物省エネ法は作用温度が一定となるように評価されている^{注10}ため、住宅の暖冷房エネルギー消費量の評価は室温だけではなく人間の温冷感に影響を与える壁、床、窓、天井などの表面温度も重要である。従来の多くの負荷計算は室温をベースに計算されている。特に壁等の計算でよく使用される応答係数法では熱流を求める場合が多いが、本プログラムでは直接、室内側の表面温度を計算できるように修正した^{注11}。これにより、より作用温度や放射暖房の評価、室内に透過した日射の計算などが精緻・容易に評価可能となった。

② 放射空調の評価

放射空調は暖冷房器具の高温・低温部分が露出している暖冷房設備の分類で、放射パネル暖房や床暖房がこれに分類される。放射空調から出た熱の半分程度は部屋の空気温度を上げるために使われるが、残りは壁や天井等の室内側の壁や床などの表面、室内の家具に吸収される(図11)。これらの放射の熱のやりとりを次式のように精緻に計算できるようにした。

$$C_{OT} \cdot T_{OT} = C_{Lc} \cdot L_c + C_{Lr} \cdot L_r + C_c$$

ここで、 T_{OT} は作用温度ベクトル(単位:°C)を表し、 L_c は対流暖冷房負荷ベクトル(単位:W)、 L_r は放射暖冷房負荷ベクトル(単位:W)を表す。部屋の数 N とするとこれらは $N \times 1$ の縦ベクトルで表される。その他の係数 $C_{OT} \cdot C_{Lc} \cdot C_{Lr} \cdot C_c$ は躯体の性能、換気量、室内の発熱、外気の状態などによって決定される値(ベクトル)である。未知数が3つあるが、放射と対流の放熱割合を暖房設備の種類に応じて決めることで、放射暖房の放熱量の対流成分と放射成分を計算することができる。

③ 地盤からの損失(ペリメータ部分)の評価

建築物省エネ法では地盤のペリメータ部分の熱損失は線熱損失係数(単位:W m⁻¹ K⁻¹)で表され、計算方法は概ね3つに分類される。最も詳細な計算方法(2次元熱流を精緻に解く方法)は建築研究所からWEBプログラムとして公開されている(図12)^{注12}。

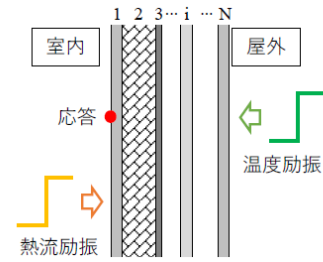


図10 室内側の表面温度を解く応答係数法

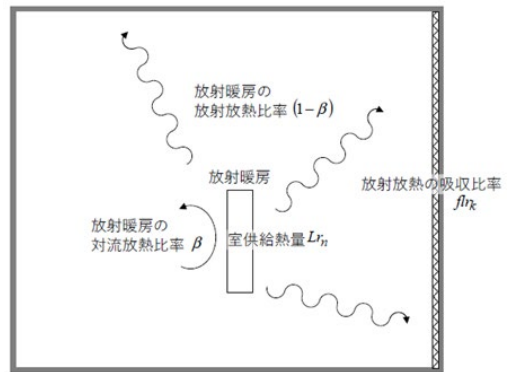


図11 放射暖房の放熱量の評価

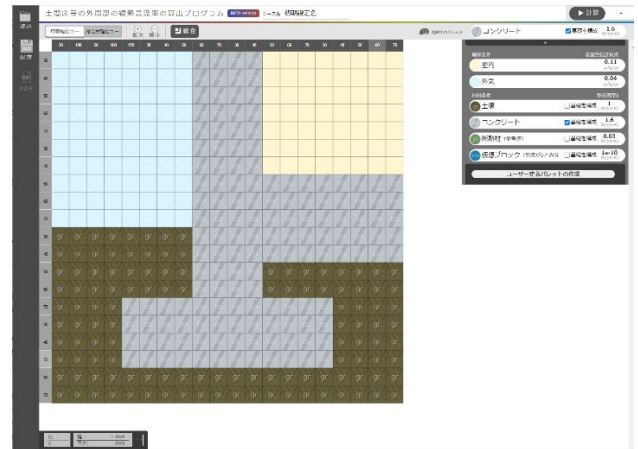


図12 土間床等の外周部の線熱貫流率の算出プログラム

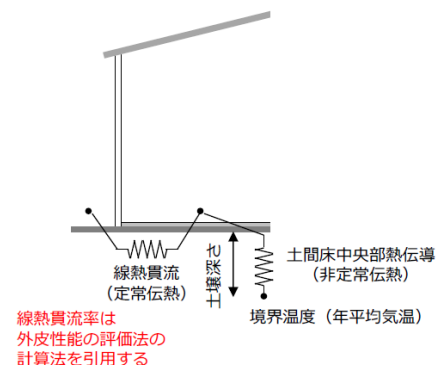


図13 土間床の熱損失に関する計算モデル

この係数は定常熱損失を表す指標であるが、地盤の熱容量は特に大きいため熱の伝わり方は遅れる。これらを表した指標のひとつに吸熱・貫流応答という指標があるが、これらを線熱損失係数から推定する方法を作成し評価方法に組み込んだ。また、ペリメータ部分を除く地盤中央部分についても地盤底部の温度を年平均温度とおくことで解いている (図 13)。

④ 作用温度の計算

室内側の壁・床・天井等の表面温度や放射暖房の影響や後述する湿度を直接計算することができるため、居住者の作用温度を直接計算できかつ負荷の計算時に設定することも可能である。

図 14 は現行の建築物省エネ法で想定されている居住者への形態係数であり、靴を履かないこと (足からの伝熱)、座位が中心であることを考慮し、床の形態係数を大きめに設定していることが分かる。

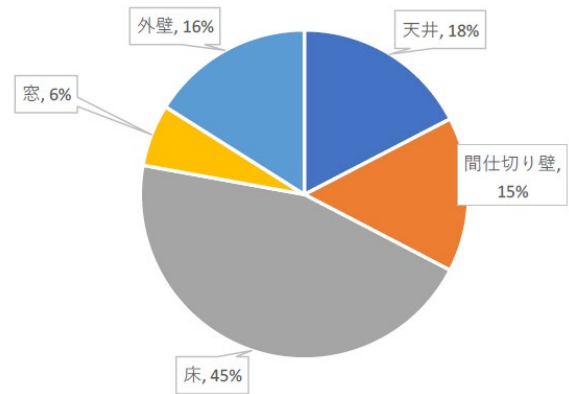


図 14 作用温度を求めるにあたっての居住者への形態係数

⑤ PMV の計算

④の作用温度の計算をさらに進めて、PVM の計算もできるようにした。PMV (Predicted Mean Vote : 予測温冷感申告) とは温冷感を表す指標であり、作用温度に加えて湿度や居住者の活動量や着衣量、居住者周囲の風速を評価できる。採用している計算方法自体は作用温度で動いているため、湿度や着衣量等の条件から作用温度を逆算 (図 15) することで計算を可能としている。

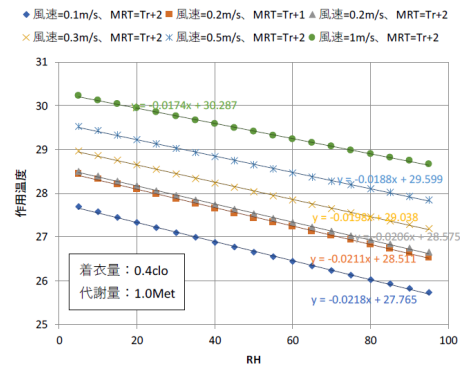


図 15 要求された PMV からの作用温度への変換例

⑥ 成り行きの湿度計算

全熱交換器やエアコンによる除湿と湿度が冷房負荷に与える影響を評価するために、湿度計算のモデルを組み込んだ。通常は湿度 (相対湿度または絶対湿度) が設定された値になるように負荷計算を行われ、そこで生じた負荷を特に潜熱負荷と言う。それに対して加熱・除熱を行う負荷を特に顕熱負荷と言う。住宅の冷房で一般的なエアコンでは、除湿量は除熱量に応じて決まるため、室内の湿度を制御することはできない。その意味で、室内の湿度を設定して負荷計算をするのは間違いである。開発中の計算方法ではエアコンの除湿モデル (図 16) ^{注13}を組み込んで成り行きの湿度が計算できるようにした。

⑦ 室内相互放射の計算

室内の壁や床・天井同士はそれぞれ放射により熱のやりとりを行っている。ある壁とある壁がどの程度熱の交換を行うかを計算するにはその影響度合いを表す形態係数の計算が欠かせない。形態係数は部屋の壁などの配置によって決まる。CAD などの図面データがあれば形態係数を精緻に計算することができるが、計算が非常に複雑になるため、従来の負荷計算では簡易的な方法が用いられてきたが、今回はより厳密な方法に修正した ^{注14}(図 17)。

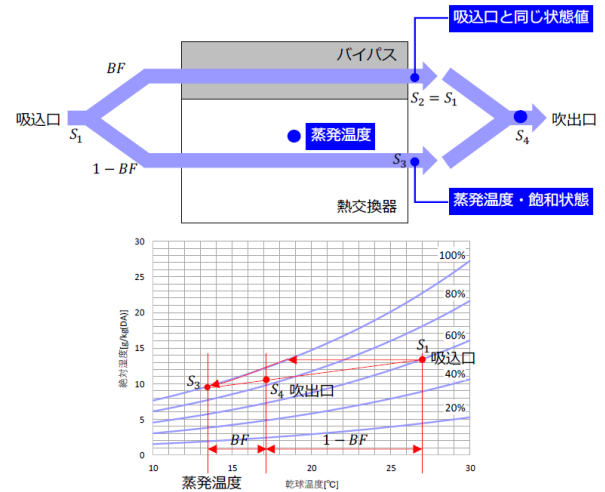


図 16 エアコンの除湿モデル

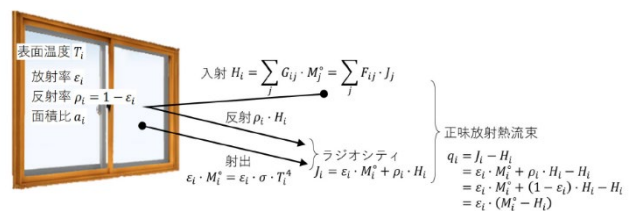


図 17 自己形態係数を生じさせない取り組み

⑧ すきま風の計算

建築物省エネ法は新築の住宅を対象としており、合板や剛床の普及等により大幅に気密性能が向上したことや、審査・検査上の手間から気密性能やそれに応じて発生するすきま風は評価されていない。しかしやはり、すきま風は暖冷房負荷に与える影響は大きく、特に第1種換気など室内外差圧が小さい場合には暖冷房負荷に与える影響は大きいと、計算に組み込んだ。ただし気密性能を表す指標であるC値は現場計測しないと分からない指標であり、設計段階でその値を入力することは不可能である。そこで、UA値と構工法から簡易的に推定する方法を既往文献^{注17}から作成した(図18)。また、C値からすきま風を推定するにあたり、隙間面積を高さ方向に既往文献^{注6}を参考に(例えば壁・床・天井等の取り付け部などに)振り分け、圧力バランスの計算を解くことによって換気方式に応じた近似式(図19)を作成した。

⑨ 窓の表面温度の計算

室内の作用温度を計算するには窓の表面温度の計算が欠かせない。特に冬の窓の表面温度は壁などの他の部位よりも低いので、放射環境を悪化させる原因にもなるし、室内温度の上下温度分布の形成要因の主なものには窓等からのコールドドラフトやすきま風であるため、窓の表面温度は精緻に解くことにした。一般的に窓性能は日射熱取得率(η 値)で表される。 η 値とは日射の窓を透過してきた熱と、日射が一旦窓に吸収され室内側に再放射された熱の合計である。しかし窓の表面温度の計算は吸収日射量のうちの再放射熱分が効く。窓の日射熱取得率(η 値)を算出する過程で日射透過率は計算されているはずであるが一般的な窓メーカーカタログには記載されていない値であるため、設計実務者が入手可能な情報である日射熱取得率から日射透過率を推定する方法を構築した(図20)。

⑩ 換気量の制御

換気量が暖冷房負荷に与える影響は大きい。換気は換気設備による全般換気や台所や風呂などの局所換気も重要ではあるが、室間換気(例えばLDKから廊下への空気移動)の評価も重要である。特に、1つの熱源で多数の部屋を暖冷房する方式(例えば、ダクト式セントラル空調や空気集熱式太陽熱利用設備など)を適切に評価する場合は室間換気をきちんと評価しないといけない。また、廊下などの非居室の温度を計算するためにも室間換気の評価は重要である。ただし設備によっては、これらの空気移動量は循環ファンで制御されているため、暖冷房負荷などのフィードバックとして時々刻々、室間空気移動量を入力できるような評価枠組みを構築した(図21)。

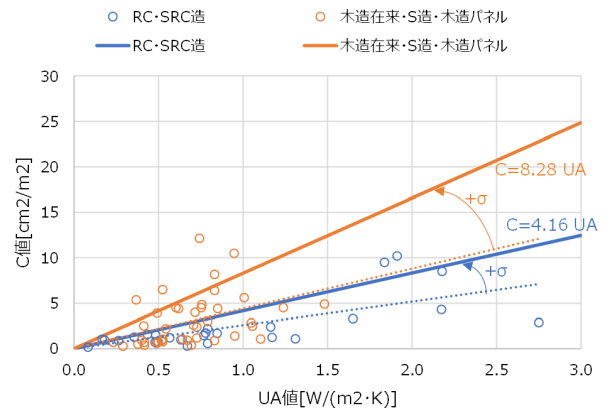


図18 UA値からC値を推定する近似式

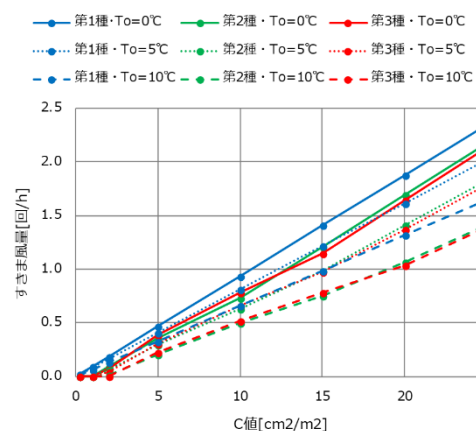


図19 C値からすきま風を推定した結果

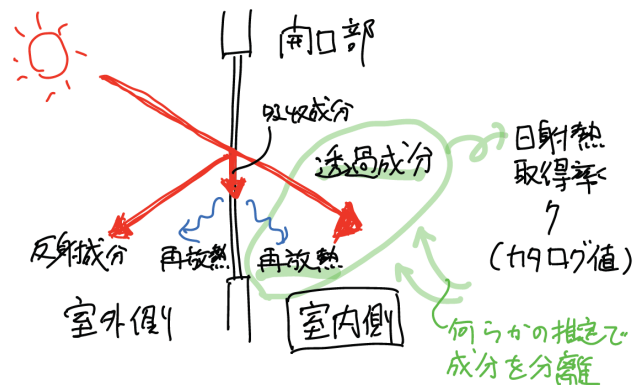


図20 日射熱取得率の成分の分離

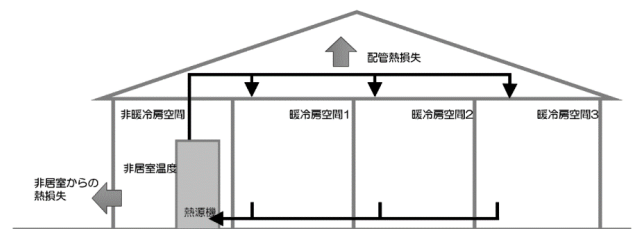


図21 ダクト式セントラル空調の空気の流れ

⑪ 備品等の室内の熱容量を動的に評価

暖冷房運転停止時の室温変動は、部屋の熱容量が効く。部屋の熱容量は部屋の空気や躯体に加え、家具等の備品の影響も大きい。そこで、家具等の熱容量を設定できるようにした。将来的に熱容量が動的に変動する潜熱蓄熱材などが評価できるように配慮し、この計算は応答係数法ではなく、備品等の熱容量を1質点としておき、差分法で解くことにした(図22)。

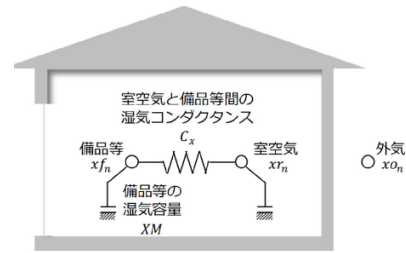


図22 室内の備品等の熱容量モデル

⑫ 窓開け換気の計算

内部発熱や日射熱取得のため室外よりも室内の方が温度が高くなる傾向にあるが、効果的に窓開けをすることで冷房負荷を減らすことができる。ただし窓開けのタイミングを間違えると効果的に冷房負荷を減らすことができないため、居住者の窓開け・冷房の発停のタイミングをどう決めるかが重要である。この窓開けのタイミングを詳細に制御できるような評価方法を組み込んだ(図23)。

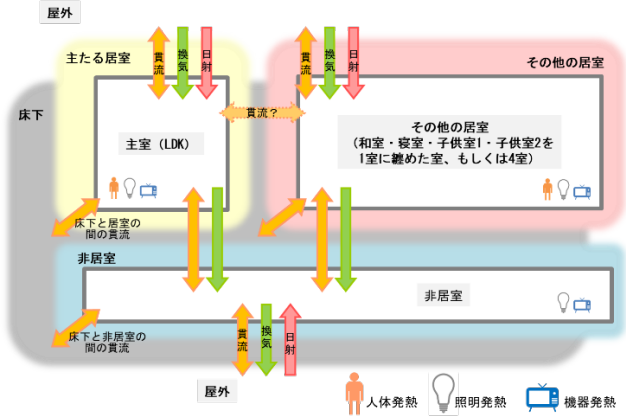


図23 室数を単純化したモデル

⑬ 計算の高速化

本項目は①～⑫までの評価ロジックとは少し狙いが異なるが、計算の高速化にも配慮した。一般的に計算時間は時間的・空間的な計算点数の増加とともに増える。建築物省エネ法の一次エネ評価の入力が、主たる居室・その他の居室・非居室の3つのゾーンであることから、負荷計算を精緻に多数室で計算したところで精度は上がらないと判断し、負荷計算も主たる居室・その他の居室・非居室の3つのゾーンに、床下を利用する設備に配慮して床下空間の合計4ゾーンで計算するようにしている。

3) 成果の公表

開発した負荷計算の計算結果の例を図24に示す。主に、暖冷房負荷や室内温湿度が計算できるが、それ以外にも付随して様々な部位の熱の流れや表面温度などが分かる。図では例として温湿度や暖冷房負荷を表したが、それ以外にも、室内表面温度や家具の温度、作用温度など、様々な値が計算できるため、単にエネルギーを予測するための計算を超えた利用が可能であると考えている。

開発中のプログラムのソースコードや計算方法を記した仕様書は、すべてホームページ上で公開する予定である。現在、一部を建築研究所のgithubサイトで公開中である(図25・図26)^{注18}。今回開発している暖冷房負荷は、主目的として設計実務者が気軽に使用できることをターゲットとしている。しかし、将来的にはCADやモデリングツールとの連携をしたいと考えており、そのために、開発した負荷計算のロジックとプログラムは全てオープンソースで開発し、誰でも(商用目的も含めて)利用可能なツールとして今後公開していきたいと考えている。

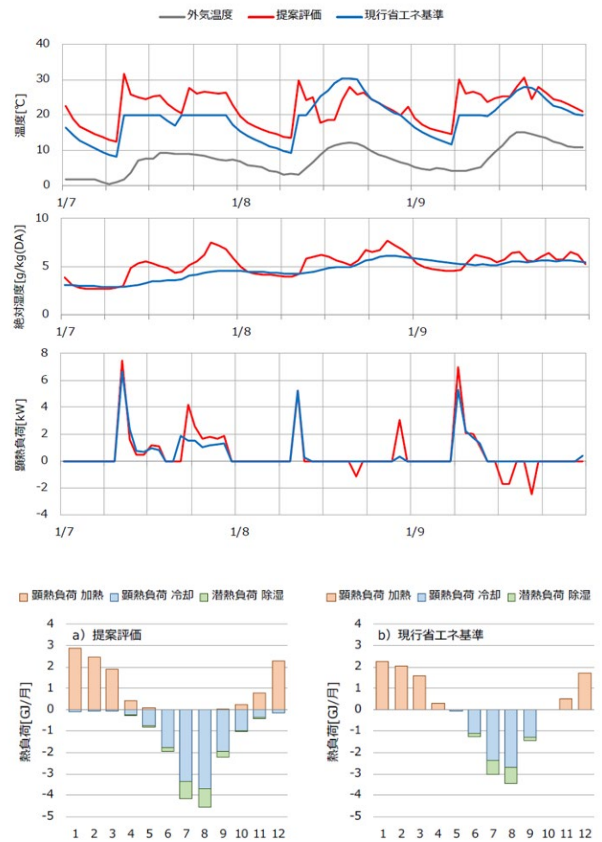


図24 計算結果の例(上図: 代表日3日のステップごとの計算結果・下図: 暖冷房負荷の月積算地)

VI まとめ

現在開発中の暖冷房負荷計算の特徴、建築物省エネ法や従来の負荷計算ソフトとの関係などを整理した。

表 2 に開発中の負荷計算の位置づけを記した。現在の建築物省エネ法では入力項目が少なく簡単ではあるが多様な技術が評価できない。一般的な暖冷房負荷計算は多様な技術が評価できる一方、入力項目が多すぎて一般的な設計実務者には扱いづらい。

今回開発した暖冷房負荷計算はこれらの利点の両方を兼ね備えている評価を目指している。ただし、少ない入力情報から負荷計算に必要な多くの情報を推測する部分が入るため、計算結果はその分ラフになる。

一方で、負荷計算部分の計算エンジンには、作用温度や放射計算など最新の知見を取り入れて開発した。その内容の一部を紹介させて頂いた。

今後、開発した暖冷房負荷計算が設計実務者にも使用され、暖冷房負荷計算及び自然室温計算が実務でも気軽に活用できるようになることを期待している。

VII 注釈

注 1：建築物のエネルギー消費性能に関する技術情報、

<https://www.kenken.go.jp/becc/index.html>

注 2：住宅に関する省エネルギー基準に準拠したプログラム、

<https://house.lowenergy.jp/>

注 3：一般社団法人 20 年先を見据えた日本の高断熱住宅研究会（通称：HEAT20）が定める外皮性能基準

注 4：住宅性能表示における断熱等級

注 5：寒冷地・準寒冷地（1～4 地域）では外皮平均熱貫流率のみ。蒸暑地（8 地域）では冷房期の平均日射熱取得率のみ。

注 6：一般財団法人建築環境省エネルギー機構（現：一般財団法人住宅・建築 SDGs 推進センター）発行、建築研究所・国土技術政策総合研究所監修、自立循環型住宅への設計ガイドライン（新築版）

注 7：建築環境ソリューションズ：温熱環境シミュレーションプログラム AE-Sim/Heat

注 8：国交省 建築基準整備促進事業 E17「共同住宅の省エネ性能評価における暖冷房負荷モデルの精緻化に関する検討（令和 4～5 年度）」

注 9：国交省 建築基準整備促進事業 E7「住宅における地域性を活かした省エネ技術の評価のための簡易熱負荷計算法の検討（平成 28～30 年度）」

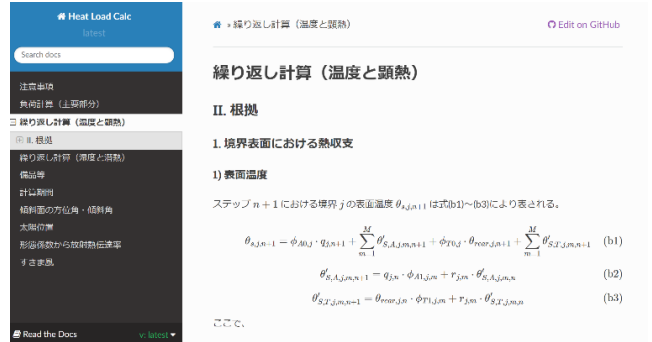


図 25 評価方法を記したドキュメントの公開

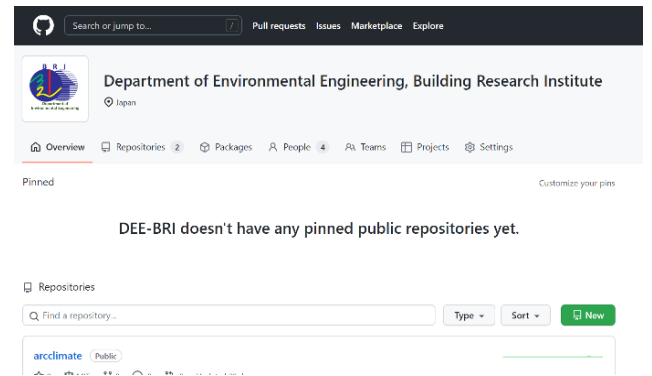


図 26 開発用プログラムの公開

表 2 開発中のプログラムの特徴（まとめ）

		多様な技術を評価できるか	
		できない	できる
複雑さ	複雑		一般的な暖冷房負荷計算 ・入力項目は多い ・計算スピードは遅い ・厳密である ・負荷計算ソフトにもよるが、暖冷房設備の評価はある程度自由に行える
	簡単	現在の建築物省エネ法における方法 ・入力項目は少ない ・計算スピードは速い ・一般的な暖冷房手法を評価するには十分 ・より高度な暖冷房設備や計画には対応できない	今回開発する暖冷房負荷計算 ・入力項目は建築物省エネ法における入力項目と同程度 ・計算スピードは速い ・より高度な暖冷房設備を評価する場合のみ入力項目を増やすことである程度自由に暖冷房設備を評価することが可能 ・入力項目を減らしたため、一般的な暖冷房負荷計算との計算結果には乖離が生じる。

注 10：実際には、暖房時は室温 20℃、冷房時は室温 27 又は 28℃で負荷計算を行ったものに、暖冷房設備の種類や外皮性能等に応じて補正をかけている。注 11：室内の表面温度を応答とするために室内側の励振は熱流とした。

注 12：土間床等の外周部の線熱貫流率の算出プログラム

<https://ground.app.lowenergy.jp/>

注 13：正確にはエアコンの室内機の熱交換器モデル。BF (バイパスファクタ) という概念を用いて、特定の顕熱処理量が発生した場合に自ずと潜熱処理量が決定されるようになっている。

注 14：部位表面間の長波放射計算は室の放射吸収係数を部位の面積比で近似する松尾の提案する方法^{注15}が一般的に用いられ、動的熱負荷計算ソフトの 1 つである HASP や BEST でも実装されてきた。この手法は計算が簡易な反面、自己形態係数が生じることから床暖房など大きな面積を発熱面とするような空調方式での誤差が心配される。そこで今回、永田の提案する簡便でより高精度な手法^{注16}を採用した。

注 15：松尾陽：空調負荷計算におけるふく射熱の取扱い、空気調和・衛生工学 第 59 巻 第 4 号、空気調和・衛生工学会、pp. 5-11、1985.4

注 16：永田明寛：室内長波放射交換の簡易モデリング、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 25-26、2016.8

注 17 日本建築学会：日本の住宅におけるエネルギー消費、2006.10

注 18 評価方法の公開は建築研究所環境研究グループの github サイトを予定している。

<https://github.com/DEE-BRI>