

住宅の蓄熱性能評価と暖冷房負荷に及ぼす影響

Relation between Heat Capacity Index and Heating and Cooling Load for the Residential Buildings

西澤繁毅*

1. はじめに

筆者らは住宅省エネルギー基準における蓄熱性能評価の合理化に向けてこれまで検討を行ってきた。

住宅の躯体をはじめとした熱容量が増大することで、室温の平準化に伴い熱負荷の削減が見込まれることは定性的にはこれまでも理解されてきている。一方、大きな熱容量を抱えることで、暖冷房開始時に大きな熱負荷が生じ、室温が安定するまでに時間を要することも同様に言及されている。蓄熱性能が建物のエネルギー消費構造や室内温熱環境に及ぼす影響は、断熱性能や日射取得性能、暖冷房の運転方式等と深く関わっており、「高断熱」「日射取得大」「大熱容量」の特徴を持ついわゆる「パッシブソーラーハウス」や「高断熱」「日射取得大」「小熱容量」の場合に発生が懸念されるオーバーヒートといった定性的に言及される特徴で一般的に理解されているものと考えられる(表1)。

この中で、断熱性能については熱損失係数(Q値)や平成25年住宅省エネルギー基準⁽¹⁾で導入された外皮平均熱貫流率(U_A 値)で定量的に評価され、日射遮蔽性能については夏期日射取得係数(μ 値)や冷房期の平均日射熱取得率(η_A 値)による定量的な評価がこれまでに行われてきた。一方、熱容量については、現行の住宅省エネルギー基準では、暖房エネルギー消費に及ぼす熱容量の影響を評価する際に、床面積あたりの蓄熱部位の熱容量について

170 kJ/(m²K)を閾値とした二値評価にとどまっております。建物の熱容量が持つ影響の詳細かつ合理性をもった評価ができているとは言いがたい。

とは言え、建物の持つ熱容量の定量的な評価指標が存在していないわけではなく、ISO 13786 “Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods”⁽²⁾として有効熱容量の計算方法が規定され、国内でも学術的な検討は進められている状況にある⁽³⁾。しかし、国外を見ても有効熱容量を指標として蓄熱性能評価を省エネ基準等に導入している事例は確認できていない。これは有効熱容量指標の計算が断熱性能や日射遮蔽性能の指標に比べて複雑であることもあるが、建物の蓄熱性能がエネルギー消費構造や室内温熱環境に及ぼす影響を把握できていないことも一因である考えられる。

以上の背景から住宅省エネルギー基準における蓄熱性能評価の合理化に向けて検討を進めている。本稿では、ISO 13786で計算方法を規定されている有効熱容量を住宅省エネ基準の中での指標としてどのように位置づけられるかを整理するとともに、有効熱容量がエネルギー消費構造に及ぼす影響を検討している状況についてまとめている。

2. 有効熱容量とは

建物の躯体が持つ熱容量のうち、室温や外気温の変動に追従して吸放熱に寄与する部分は躯体全体の一部分であり、その温度変動による吸放熱に寄与する部分の熱容量を有効熱容量として定義している。例としてコンクリートの厚い壁で考えると、空間の温度変動に追従して吸放熱に寄与するのは温度変化が生じる表面近傍のごく薄い部分であり、表面から

表1 熱容量に関係した一般的な特徴

| 断熱性能 | 日射取得/遮蔽性能 | 熱容量 | 一般的な特徴 |
|------|-----------|------|---------------------|
| 高断熱 | 日射取得大/遮蔽小 | 大熱容量 | → いわゆる「パッシブソーラーハウス」 |
| | | 小熱容量 | → オーバーヒートにより室温上昇 |
| | 日射取得小/遮蔽大 | 大熱容量 | → 小容量熱源機による連続空調運転 |
| | | 小熱容量 | → 間歇空調運転向き |

* 国立研究開発法人建築研究所

離れた部分（深奥部）は温度変化が生じず吸放熱に寄与しない部分として残ることをイメージされた。このうちの表面近傍の薄い部分の吸放熱に寄与する熱容量が有効熱容量としてカウントされるということである。また、この例から、変動にかかる時間（周期）も有効熱容量を左右することが理解されると思う。短い周期の変動では表面にごく近い部分の熱容量だけが有効熱容量とされ、長い周期の変動になるにつれ表面から離れた深い部分まで有効熱容量としてカウントされることになる（以上を突き詰めて周期を無限にとばすと有効熱容量はコンクリート壁体全体の熱容量に等しくなる）。

このような有効熱容量を求める計算方法は周波数応答に基づき整理されているが、 U_A 値や η_A 値の計算に比べて複雑な計算が必要となるのは否めない。計算方法の詳細についてはISO 13786⁽²⁾ 及び他の参考文献^(4, 5) を参照されたい。

3. 住宅省エネ基準で考慮する際の注意点の整理

住宅省エネ基準において、建物の蓄熱性能の評価指標として有効熱容量を用いることを想定した際の計算方法、注意すべき点、引き続き検討を要する点を整理している⁽⁴⁻⁶⁾。以下に要点を示す。

- (1) 建物全体の有効熱容量を計算するためには、外皮以外の躯体（室内床や間仕切）についても考慮する必要がある。現状の省エネ基準では U_A 値等の計算を外皮についてのみ行っており、間仕切等の入力を求めている。外皮性能評価に有効熱容量を導入するとした場合に、外皮以外の躯体について詳細な入力を求めるか、入力の簡便化を図るか、デフォルト値設定により入力不要とするかについては今後の検討を要する。
- (2) ISO 13786⁽²⁾ で規定されている有効熱容量には、温度変動位置と吸放熱が影響する位置に対応して、室内側有効熱容量 C_i 、室内側有効吸熱熱容量 C_{Ai} 、有効貫流熱容量 C_T といった複数の有効熱容量が定義されている。省エネ基準で指標として扱う有効熱容量としては、室温変動の緩和に寄与する意味を持つ室内側有効吸熱熱容量 C_{Ai} が適当であると判断している。
- (3) 変動の周期をどう取るのかによって有効熱容量の値は変わってくる。室温変動の緩和という観点に立つとISO 13786⁽²⁾ でも推奨されている日変動に対応（24時間周期）とするのが適当であると判断している。
- (4) 住宅省エネ基準の外皮に関する指標（ U_A 値、

η_A 値）と共通の考え方に拠る必要がある。具体には温度差係数への対応、線熱貫流率設定部位への対応である。温度差係数への対応としては、室温と外気温変動が同期している状況を想定して温度差係数を考慮して計算する方法を整理した⁽⁴⁻⁶⁾。また、線熱貫流率設定部位に関しては、熱橋が有効熱容量算定値に大きく影響しないことを確認している⁽⁴⁾。また、 U_A 値等と同様に外皮表面積で除した、外皮面積あたりの有効熱容量を指標として提示している⁽⁶⁾。

4. 建物モデルと計算の概要

本稿での検討に用いた建物モデルと計算の概要について表2に示す。省エネ基準の検討に用いられている木造戸建住宅モデル⁽¹⁾ に断熱性能4水準、日射取得性能3水準を設定している。気象条件としては、温暖地として省エネ基準における地域区分の6地域、寒冷地として2地域を設定した。

躯体に付加する熱容量は床面にコンクリートを打ち増し設定とすることで対応している⁽⁴⁾。これは、エネルギー消費性能計算プログラム（住宅版）⁽⁷⁾ の蓄熱の利用において「利用する」を選択した際に適用される暖房負荷を算定した条件に準じており、厚さを変化させて熱容量の変更を行っている（なお、住宅省エネ基準において蓄熱性能の有無の閾値となっている $170 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ はコンクリートを床上に 9 cm の厚さで打ち増した状況が相当する）。

暖冷房方式は全館連続暖冷房もしくは居室間歇暖冷房とし、高断熱小熱容量の条件で頻発が懸念される暖房期のオーバーヒートに対しては、 $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上の室温となる場合に 5 回/h にあたる外気を導入する対策を設定した。暖冷房負荷計算には AE-Sim/Heat を使用している。

表2 建物モデルと計算の概要

| 地域区分 | 6地域(岡山) | 2地域(岩見沢) |
|--------------------|--|--|
| 住宅モデル | 省エネルギー基準戸建住宅モデル(床面積120.08 m^2) 温暖地モデル(外皮に対する開口部面積比率: 11.4%) | 寒冷地モデル(外皮に対する開口部面積比率: 8.9%) |
| 外皮の断熱性能 (U_A 値) | H4基準相当 ($U_A=1.44 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) H11基準相当 ($U_A=0.87 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) H11基準+ ($U_A=0.56 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) H11基準++ ($U_A=0.39 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) | H4基準相当 ($U_A=0.53 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) H11基準相当 ($U_A=0.45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) H11基準+ ($U_A=0.37 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) H11基準++ ($U_A=0.25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) |
| 日射取得条件 (窓付属品) | 窓付属品なし、レースカーテン、外付けブラインド | |
| 付加熱容量 (付加RC厚さ) | 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120*, 140, 160*, 180, 255[kJ/m 2 K] (0, 0.011, 0.021, 0.032, 0.042, 0.053, 0.063*, 0.074, 0.084*, 0.095, 0.134[m]) | |
| 暖冷房方式 | 全館連続暖冷房, 居室間歇暖冷房 | |
| 暖房時のオーバーヒート対策 | なし あり(26 $^\circ\text{C}$ 以上で5回/hの外気を導入) | |
| 熱負荷計算ソフト | AE-Sim/Heat | |

注:*付は6地域のみ実施

5. 有効熱容量の計算

表2の条件のうち、6地域における有効熱容量の計算結果(図1)から、有効熱容量がどのような特徴を持つのかを説明したい。

図1には、6地域の条件について、24時間周期で計算した外皮表面積あたりの室内側有効吸熱熱容量 C_{Ai} 、有効貫流熱容量 C_T (参考文献5に記載のプログラムにて算定可能)、外皮平均熱貫流率 U_A 、冷房期の平均日射熱取得率 η_{AC} を示している。本稿のようなコンクリートを床に打ち増す想定による熱容量の付加では、厚さが数 cm の範囲では室内側有効吸熱熱容量 C_{Ai} が大きく増加する状況が見られるが、8~10 cm 程度でほぼ頭打ちとなり、それ以上の厚みの増加は熱容量として有効とみなされなくなることが分かる(上述の2. で例示した説明と対応していることを理解いただけるかと思う)。このように、適切な厚さ以上の蓄熱部位の設置は、蓄熱性能の向上として見なされないことになることから、設置する表面積の拡大で対応する方が蓄熱性能向上という意味では有効となる。

また、室内側有効吸熱熱容量 C_{Ai} は断熱の水準にほぼ拠らず、コンクリートの厚さに応じて同程度の値が算出されていることも分かる(図1左、日射取得性能の水準にほぼ拠らないことも確認している)。一方、外皮平均熱貫流率 U_A 、冷房期の平均日射熱取得率 η_{AC} については、外皮として扱われる1階床に敷設したコンクリート厚の違いによる差異が値に現れるものの、影響は極めて小さいことを確認している(図1右)。

以上のように室内側有効吸熱熱容量 C_{Ai} は、断熱性能や日射取得性能に大きな影響を受けずに計算されていることから、建物の蓄熱性能の大小を示す指標となっていることが確認される。

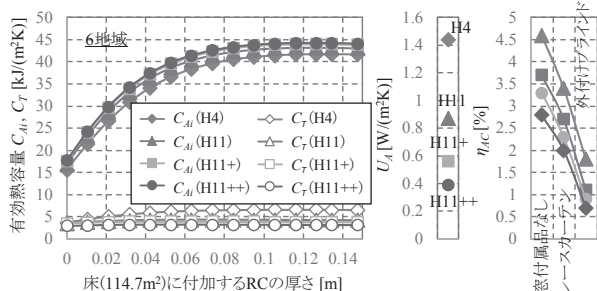


図1 有効熱容量, U_A 値, η_{AC} 値の計算結果 (6地域)

6. 負荷計算結果の分析

表2の条件について暖冷房負荷計算を行った結果を分析した結果から、有効熱容量が暖冷房負荷に及ぼす影響について示す。

6.1 オーバーヒート対策の影響の確認

本稿の計算では、断熱性能、日射取得性能が高く、熱容量が小さい場合は、日射により室温が上昇し、適切な室内環境とならない(表1)ことが予想されることから、暖房期に26℃以上で排熱換気を行うオーバーヒート対策を導入した計算を行っている(表2、このオーバーヒート対策は室温が26℃を越え耐えられなくなった居住者が窓を開けて熱気を排出する行為を想定している)。

温暖地(6地域)においてオーバーヒート対策を導入することで増加する暖房負荷の比率を示した図2では、多くのケースでオーバーヒート対策導入による影響は数%程度の暖房負荷増に留まっており、室温が26℃以上となり排熱換気を行わざるを得ない状況が発生する時間はそれほど多くはないことが確認される。一方で、断熱性能、日射取得性能が高いいくつかのケースでは、有効熱容量が小さくなるにつれ暖房負荷が増大する傾向が見られ、居室間歇運転で5%超、全館連続運転で10%超の暖房負荷増となるケースが生じていることが分かる。このことから断熱性能と日射取得性能が共に

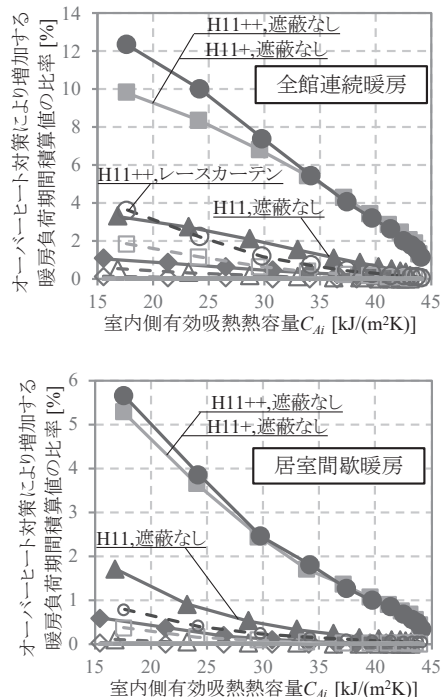


図2 オーバーヒート対策により増加する暖房負荷比率 (6地域)

高い住宅においては、取得した多大な日射熱を蓄えるための熱容量を適切に確保することが、暖房負荷の削減と適切な室内温熱環境の両立の要点であることを示すものと言える。

本稿の以下の検討には、極端な室温の上昇が生じるのは温熱環境上相応しくないとし、暖房負荷についてはオーバーヒート対策ありの結果を用いて分析を行っている。

6.2 暖房負荷期間積算値に及ぼす影響

図3, 4に、6地域 の居室間歇運転と2地域 の全館連続運転における室内側有効吸熱熱容量 C_{Ai} と暖房負荷の期間積算値の関係を示す。

暖房負荷の期間積算値に対しては、断熱性能が支配的な影響を、日射取得性能が二次的な影響を持つことが確認される。一方で、有効熱容量が及ぼす影

響は比較的軽微に留まっていることが分かる(図3)。また、暖房運転の違いについては、両地域とも全館連続運転することで居室間歇運転に比べて約2倍の負荷となることが確認されている。

室内側有効吸熱熱容量 C_{Ai} と暖房負荷期間積算値の関係について、コンクリートによる熱容量付加のない状態を基準として増減比として確認すると、温暖な6地域では、断熱性能、日射取得性能が高い場合に、熱容量増大による暖房負荷削減効果が高く現れることとなり、最大で25%程度の削減となっている(全館連続運転においてはより顕著となり最大で3割程度の削減となる)。一方、日射取得性能が低い場合には、熱容量増大による負荷削減効果は小さく、居室間歇暖房時には5%程度ではあるが逆に暖房負荷が増加する状況が確認される(図4上)。

寒冷な2地域では、温暖地と同様の傾向は見られるものの、熱容量増大による暖房負荷への影響は温暖地より限定的である。全館連続運転の場合でも最大7%程度の削減にとどまる結果(図4下)となっており、温暖地の方が熱容量増大による負荷削減効果を発揮しやすいことがうかがえる。

6.3 暖房負荷期間最大値に及ぼす影響

図5, 6に、6地域 の居室間歇運転時のLDと2地域 の全館連続運転における暖房負荷期間最大値について室内側有効吸熱熱容量 C_{Ai} との関係を示す。

暖房負荷の最大値については、居室間歇運転時のLDでは、2地域, 6地域ともに有効熱容量の増大とともに大きく低下する状況が確認でき、全館運転時に比べて顕著に現れていた(図5)。また、最大暖房負荷の削減の割合は、日射取得性能が高いほど大きくなることが確認された(図6)。図3, 4に示した積算負荷とあわせて考えると、断熱性能、日射取得性能が高いケースでは、熱容量を確保することで積算負荷、最大負荷がともに減少することから、適切な容量選定により小容量の空調熱源機を導入することで効果的に省エネにつなげることが可能と考えられる。一方、断熱性能と日射取得性能が低いケースでは、熱容量が増大することで温度が平準化され暖房開始時に現れる最大負荷は抑制されるものの、熱損失は躯体に蓄熱された分も含めて累進し、積算負荷としてはそれほど抑制されない(間歇運転時は逆に増大する)ことになると捉えられる。

6.4 冷房負荷期間積算値に及ぼす影響

図7, 8に、6地域 の居室間歇運転、全館連続運転における室内側有効吸熱熱容量 C_{Ai} と冷房負荷の期間積算値の関係を示す。

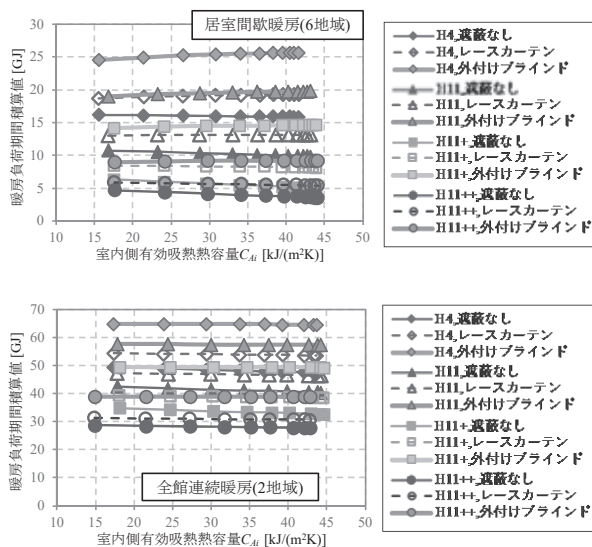


図3 期間積算暖房負荷(6地域間歇, 2地域連続)

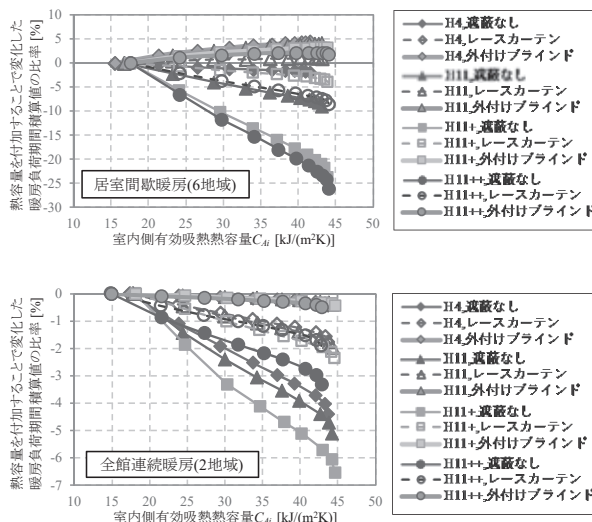


図4 期間積算暖房負荷削減比(6地域間歇, 2地域連続)

冷房負荷の期間積算値に対しては、日射取得性能が支配的な傾向を示すことが確認され、断熱性能による差異は暖房に比べると大きくない。また、有効熱容量については軽微な影響に留まっている。冷房運転の違いについては両地域とも全館連続運転することで居室間歇運転に比べて1.5～2倍程度の負荷となっていた(図7)。

室内側有効吸熱熱容量 C_{Ai} と負荷削減の比率との関係について確認すると、温暖な6地域では、暖房時と比べて熱容量増大による負荷への影響は小さくなっており、全館連続運転で7%程度、居室間歇運転で4%程度が最大の削減幅となっている。また、日射取得性能が高い場合には、居室間歇運転を行うと熱容量の増大とともに若干負荷が増大する状況が

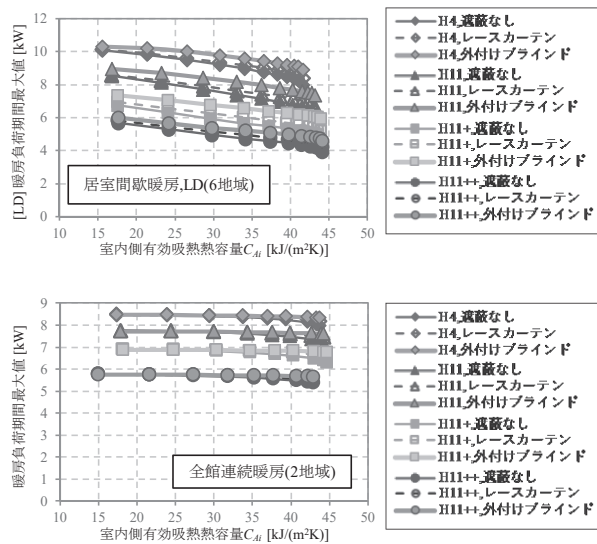


図5 暖房負荷期間最大値 (6地域間歇LD, 2地域連続)

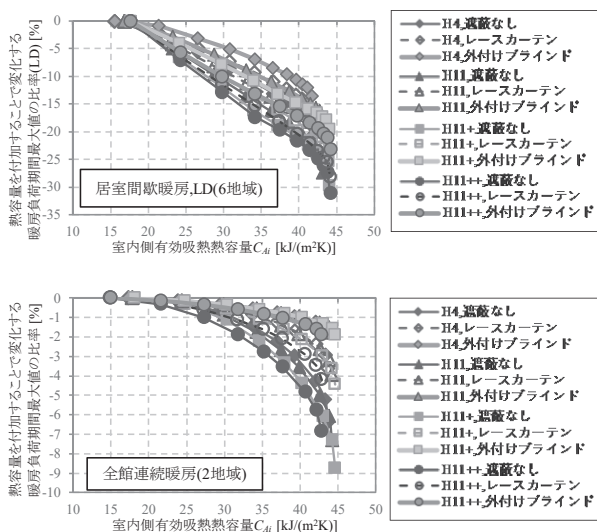


図6 暖房負荷期間最大値の削減比 (6地域間歇LD, 2地域連続)

確認される(図8)。一方、寒冷な2地域では、冷房負荷自体がそもそも小さい状況の中ではあるが、熱容量増大による冷房負荷削減効果は温暖地より大きく現れ最大で25%程度の削減となっていた。

6.5 冷房負荷期間最大値に及ぼす影響

図9, 10に、6地域の居室間歇運転、全館連続運転における室内側有効吸熱熱容量 C_{Ai} と冷房負荷の期間最大値の関係を示す。

冷房負荷の最大値については、日射取得性能が高い(日射遮蔽性能が低い)ケースを中心に熱容量増大により最大負荷が減少しており暖房と同様に温度平準化による影響が現れている(図10)が、図7, 8をあわせて見ると、日射取得性能が高い(日射遮蔽性能が低い)ケースは、熱容量増大による期間積算負荷の削減効果が小さいケースとなっており、暖

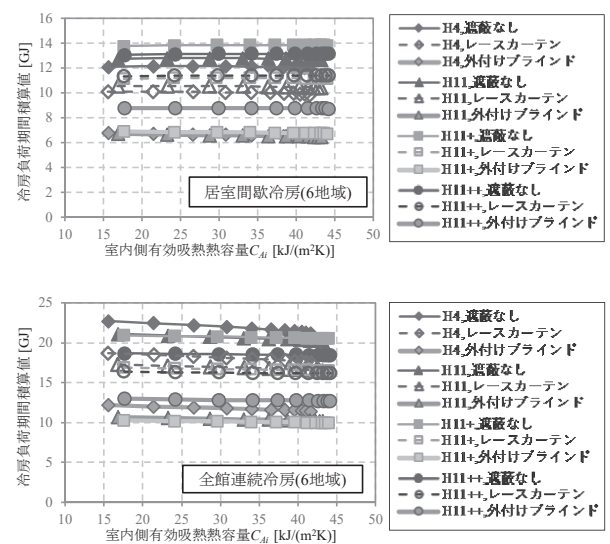


図7 期間積算冷房負荷 (6地域間歇, 連続)

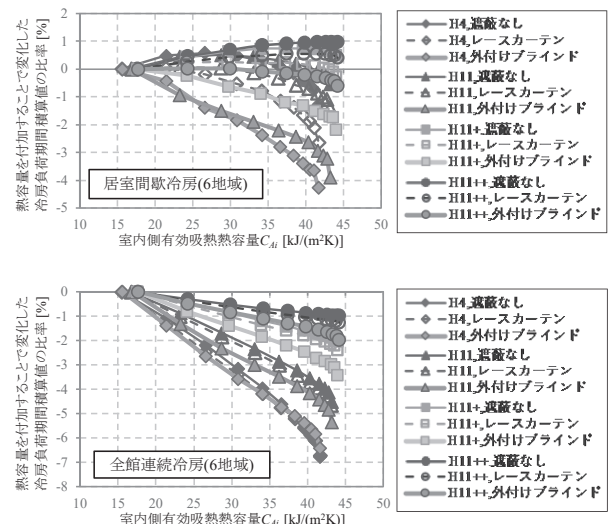


図8 期間積算冷房負荷削減比 (6地域間歇, 連続)

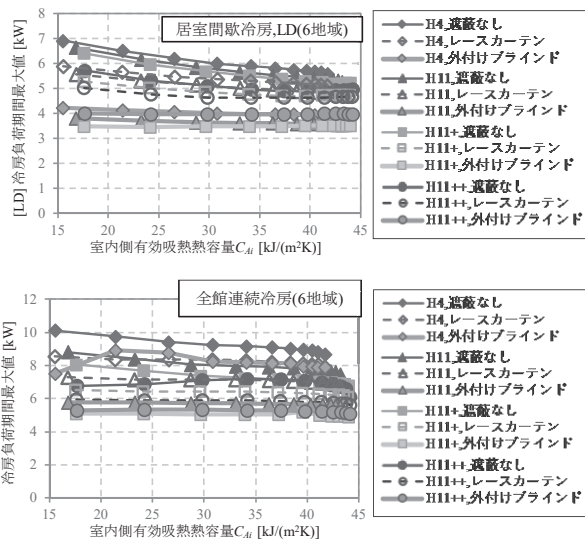


図9 冷房負荷期間最大値 (6 地域間歇 LD, 連続)

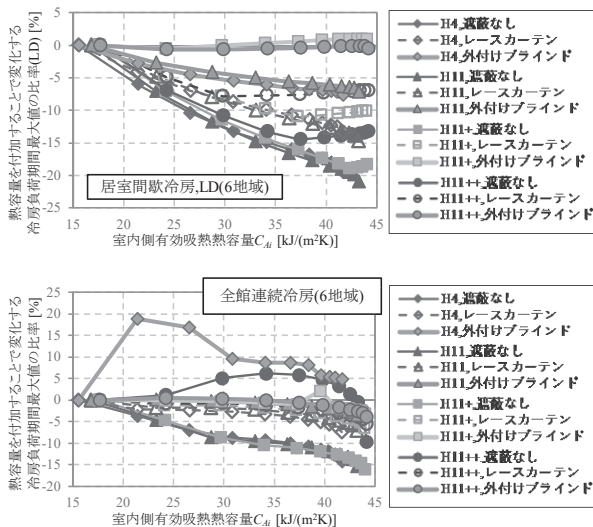


図10 暖房負荷期間最大値の削減比 (6 地域間歇 LD, 連続)

房時のように相乗的に省エネ効果を発揮する状況になっていない。

なお、図10で熱容量増大により直線的に最大負荷が減少しない（逆に特異に増加している）ケースもあるが、冷房開始時の潜熱負荷の極度な増大が現れているといった状況が確認されており、建物の蓄熱性能とは直接関与しない潜熱負荷については除外し、顕熱負荷のみでの検討とすると必要があると考えられる。

7. まとめ

住宅省エネ基準の蓄熱性能評価の合理化に向けて検討を進める中で、ISO 13786で計算方法を規定された有効熱容量を住宅省エネ基準の中での指標としてどのように位置づけられるかを整理した結果とともに

に、有効熱容量がエネルギー消費構造に及ぼす影響を検討している状況についてとりまとめた。

まず、住宅省エネ基準の中で、蓄熱性能の評価指標として有効熱容量を用いることを想定した際の計算方法、注意点について整理するとともに、引き続き検討を要する点について確認した。また、室内側有効吸熱熱容量 C_{Ai} が断熱性能や日射取得性能と独立して計算され、建物の蓄熱性能の大小を示す指標となっていることを確認した。

次に、暖冷房負荷計算の負荷計算結果から、住宅の蓄熱性能が暖冷房負荷に及ぼす影響を断熱性能、日射取得性能とあわせて検討した。暖房では断熱性能が、冷房では日射取得性能が負荷に支配的な影響を及ぼしており、蓄熱性能が及ぼす影響は相対的に小さいことが確認された。ただ、その中でも、暖房については、温暖地で断熱性能、日射取得性能が高く、運転時間に連続性がある場合を中心に熱容量増大による負荷削減効果向上につながるということが確認された。また、熱容量増大による室温平準化に伴い最大負荷も抑制されることから、小容量熱源機を導入することで一層の省エネ化が期待できると考えられる。冷房については、暖房時とは逆に、日射取得性能が低いほど熱容量増大による負荷削減効果が高くなった。そもそも冷房負荷削減のためには、支配的な影響を及ぼす日射遮蔽の強化を図ることがまずもって効果的であり、熱容量を増大することで冷房負荷削減効果を上乘せすることが可能ということが確認された。

以上のように、本稿で実施した負荷計算結果については、熱容量の増大が暖冷房負荷に極端に影響を及ぼす状況は確認されなかったが、断熱性能や日射遮蔽を向上することで達成できる暖冷房負荷削減効果を、蓄熱性能の確保により強化できることを確認できた。今後は、省エネに関わる効果に留まらず、温度変動の平準化に伴う室内温熱環境の向上等に及ぼす影響もあわせて検討していきたいと考えている。

8. 参考文献

- 1) 平成25年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説Ⅱ住宅, 連合印刷センター, 2013
- 2) ISO 13786, Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods, 2007
- 3) 例えば, 永田明寛: 部位の有効熱容量・有効湿

- 気容量とその合成, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D2, pp.13-14, 2012
- 4) 西澤他：住戸単位で有効熱容量を算定する方法に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D2, pp.675-676, 2018
- 5) 一次元躯体構成群から有効熱容量を計算するプログラム,
<https://github.com/nishizawashigeki24/Effective-Heat-Capacity> (URL は 2020 年 6 月時点)
- 6) 西澤他：住宅の熱容量が暖冷房負荷に及ぼす影響の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D2, pp.361-362, 2019
- 7) エネルギー消費性能計算プログラム (住宅版),
<https://house.app.lowenergy.jp/> (URL は 2020 年 6 月時点)
- 8) 西澤他：住宅の暖冷房負荷に及ぼす熱容量の影響, 空気調和・衛生工学会大会 (投稿中), 2020

著者略歴

西澤繁毅 (ニシザワ シゲキ)

1999 年 3 月北海道大学大学院工学研究科博士課程修了。同年 4 月独立行政法人建築研究所入所。2014 年 4 月より国立研究開発法人建築研究所環境研究グループ主任研究員。専門は建築環境工学。博士 (工学)。