

非住宅建築物における 外皮性能による温熱環境を考慮した 空調エネルギー評価に関する取り組み

環境研究グループ 主任研究員 赤嶺 嘉彦

目次

- I はじめに
- II 省エネルギー基準における評価の概要
 - 1) 基準制定の背景と変遷
 - 2) 一次エネルギー消費量による評価
 - 3) 非住宅建築物における外皮性能の評価
- III 断熱性能が室内の上下温度分布に及ぼす影響
 - 1) 計算概要
 - 2) 計算結果
- IV 温熱環境を踏まえた空調エネルギー評価に関する検討
 - 1) 検討概要
 - 2) 外皮性能及び空調方式の実態把握
 - 3) 外皮性能及び空調方式による室内の上下温度分布等の解析
- V おわりに
 - 参考文献

I はじめに

省エネルギー基準における非住宅建築物の空調エネルギー消費量の計算においては、室内空間の温熱環境を1点の温湿度で代表させて空調負荷を評価しており、室内の上下温度分布などの温熱環境の影響は考慮されていない。

一方、設計者は、オフィス等における快適な室内温熱環境の実現とともに空調エネルギー消費量を削減するための工夫として、外皮性能を確保することに加えて、室内の上下温度分布等を加味した空調方式を選定しており、その効果を踏まえた空調エネルギー消費量を適切に評価することが望まれる。

ここでは、省エネルギー基準における評価の概要、及び、外皮性

能による暖房時の室内環境の計算結果の例を示した上で、非住宅建築物における外皮性能による温熱環境を考慮した空調エネルギー評価に関する取り組みを紹介する。

II 省エネルギー基準における評価の概要

1) 基準制定の背景と変遷

省エネルギー基準とは、建築物の運用時のエネルギー消費量を削減することを目的として定められた一連の省令・告示等をいう。平成28年4月以前は、「エネルギーの使用の合理化に関する法律」に基づく告示等をさし、平成28年4月以降は、「建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律」及びそれに基づく省令・告示等



図1 一次エネルギー消費量による評価の枠組み (注：住宅の場合、昇降機のエネルギー消費量は対象外)

をさす。

省エネルギー基準の歴史は古く、1970年代のエネルギーショックに起因して日本のエネルギー安全保障の重要性が高まる中、昭和54年に「エネルギーの使用の合理化に関する法律」が制定された。これを受けて昭和55年に制定されたのが、非住宅建築物を対象とした「建築物に係るエネルギーの使用の合理化に関する建築主等及び特定建築物の所有者の判断の基準」や住宅を対象とした「住宅に係るエネルギーの使用の合理化に関する建築主の判断の基準」等の告示である。制定当時は「努力義務」と呼ばれ、この基準を満たさないと建てられない等の「義務」ではなく、あくまで基準に沿った建築物を設計・建設することが推奨されるといった拘束力の無いものであった。その後、何度か基準が改正され、「努力義務」であったのが例えば2,000㎡以上の非住宅建築物に対して評価結果の届出を義務化する等、徐々に強化されていった。

その後、建築物のエネルギー消費量の削減を一層促進するために、非住宅建築物で一定規模以上の建築物の削減を一層促進するために、非住宅建築物で一定規模以上の建築物の省エネルギー基準の適合義務化を含めた「建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律」が平成27年7月に公布され、この法律を受けて、平成29年4月から、2,000㎡以上の非住宅建築物では省エネルギー基準に適合することが義務付けられた (以下、適合義務と記す)。

その後、適合義務の対象となる非住宅建築物の規模が拡大され、令和3年4月から、300㎡以上の非住宅建築物が適合義務の対象となるとともに、300㎡未満の非住宅建築物については、建築士から建築主へ省エネルギー基準への適合性評価の結果を説明することが義務付けられている (以下、説明義務と記す)。

2) 一次エネルギー消費量による評価

平成25年以前の省エネルギー基準では、住宅については断熱と日射遮蔽の性能を評価指標としており、暖冷房や給湯などの設備の性能は全く評価されていなかった。非住宅建築物についても断熱と日射遮蔽の性能に関する指標 (PAL) に加え、個々の設備機器の性能 (効率) は評価されていたものの、建物全体での省エネ性能は評価されていなかった。しかし、設備の省エネ評価が体系的に整備された結果、平成25年の告示改正により、住宅・非住宅建築物ともに、建物全体の一次エネルギー消費量が新たな評価指標とする基準に変更された。

評価方法は、図1に示すように、当該建築物の空調や給湯、照明等の用途ごとに一次エネルギー消費量を計算し、その合計が、別途計算する基準値を下回っていれば良いという枠組みとなっている。設備ごとの合計値での比較であるため、例えば空調によるエネルギー消費量が基準値を上回っていても、照明や給湯など他

の用途で消費を削減すれば、合計値が下回る限り基準をクリアできることが特徴的である。

非住宅建築物の省エネルギー基準における適合義務や説明義務では、この一次エネルギー消費量のみによって評価することとしており、空調エネルギー消費量の計算において、建物の断熱性能や日射遮蔽性能（以下、外皮性能と記す）が考慮されるため、後述する外皮性能については規制の対象とはなっていない。

3) 非住宅建築物における外皮性能の評価

省エネルギー基準では、適合義務や説明義務などの規制措置の他に、省エネ性能向上のための設備については通常の建築物の床面積を超える部分を不算入とする容積率特例を認める性能向上計画認定という誘導措置が設けられている。

誘導措置においては、一次エネルギー消費量の基準値が規制措置よりも厳しく定められているとともに、外皮性能の基準が設けられている。この外皮性能の指標が PAL*（New Perimeter Annual Load、屋外周囲空間の新熱負荷係数、読み方：パルスター）である。

PAL*は、次の式 (1) で表される。

$$PAL^* = \frac{Q_p}{A_p} \quad (1)$$

ここで、

Q_p ：屋内周囲空間の年間熱負荷。単位は MJ/年。

A_p ：屋内周囲空間の床面積の合計。単位は m^2 。

である。

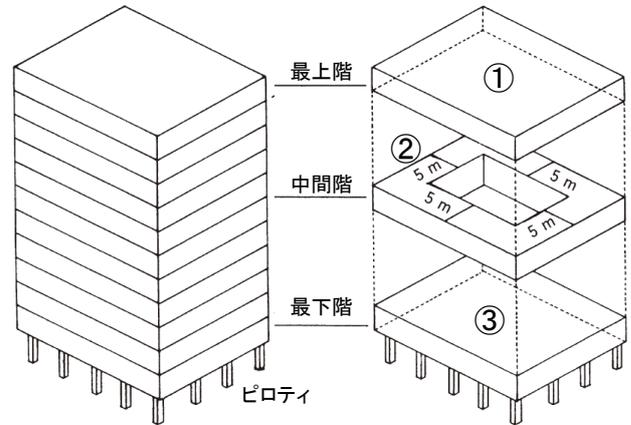
屋内周囲空間とはペリメーターゾーンに相当するものであり、外壁、窓、屋根等を通して外界の気象条件の影響を強く受ける建築物の内部空間のことである（図 2）。

年間熱負荷 Q_p は、建物及び室用途毎に仮定された内部発熱や外気導入量、年間空調時間の条件、及び、地域の区分ごとに定められた気象条件の下で算出される年間の暖房空調負荷と冷房負荷の合計である。

この PAL* の値が、建物用途及び地域の区分ごとに定められた基準値以下であれば性能向上計画認定の基準に適合したと判断される。

PAL* は、非住宅建築物の外皮性能の総合指標としてほぼ唯一のものとなっているが、上記のとおり、PAL* は暖房空調負荷と冷房空調負荷を単純に合計したものを屋内周囲空間全体で平均化された数値であるため、窓面積率の大きな室や最上階の室など、特に屋外条件の影響を受けやすい室における外皮性能の良否、空

調設備のエネルギー効率への影響、室内温熱環境への影響については個別に検討する必要がある。



- ① 屋根の直下階の屋内の空間
- ② 各階の外気に接する壁の中心から水平距離が 5m 以内の屋内の空間
- ③ 外気に接する床の直上の屋内の空間

図 2 PAL* の算出対象である屋内周囲空間

III 断熱性能が暖房時の室内の上下温度分布に及ぼす影響

省エネルギー基準における空調エネルギー消費量や PAL* は、外皮性能の違いによる室内の温度分布を考慮せずに計算されている。しかしながら、暖房時では、外壁や窓面における下降冷気流、いわゆるドラフトが足下付近の温度を低下させて温熱快適性を損なうとともに、上下温度分布を考慮せずに算出された暖房負荷を上回る暖房負荷が実際には発生することが懸念される。また、上下温度分布の解消のためには室内の空気を攪拌する必要があり、そのために、より多くの空調吹出し風量を要し、暖房負荷では評価されない空調エネルギー消費量の増加要因となることも危惧される。

そこで、ここでは数値流体解析（Computational Fluid Dynamics、以下、CFD と記す）を用いて、外壁の断熱性能、空調吹出し風量が上下温度分布に及ぼす影響について示す。

1) 計算概要

暖房時における室内温度気流分布の解析領域を図 3 に示す。解析領域は、間口 6m、奥行 6m、天井高 3m で 1 面のみを外壁とした単室であり、一面のみを外壁とし、外壁以外の壁・床・天井面は熱流が生じないものとした。天井面の外壁側にラインディフューザーを想定した吹出口（2 か所）、室奥側に吸込口（2 か所）を配置している。なお、状況を単純化するために、室内の内部発

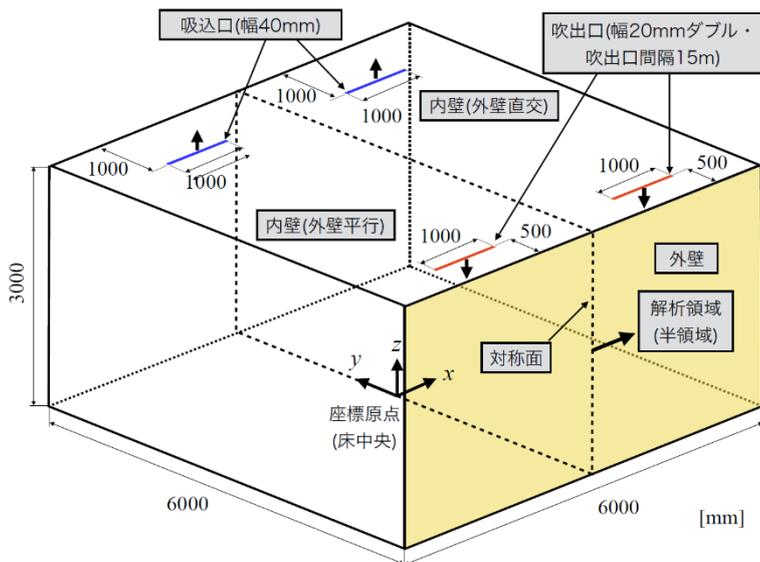


図3 室内解析領域

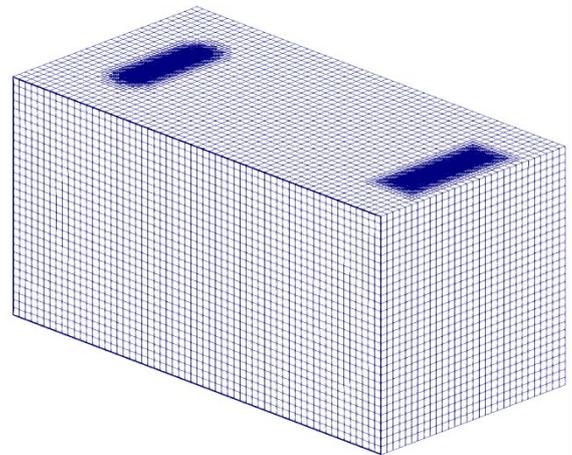


図4 解析格子

熱、及び、外気導入はないものとした。

解析条件を表1に示す。時間的に定常的な流れ場を解析対象とするため、時間定常解放とした。ただし、解析領域が対象であるため、全領域の熱流体定常解析を行うと、対称面を中心に振動してしまい、定常解を求めるのが非常に困難になるため、対称面から半領域のみを解析することとした。解析格子の概要を図4に示す。

表1 解析条件

ベースソルバ	OpenFOAM-1612+, BuoyantSimpleFoam
格子数	約194万
格子分割幅	ベース100mm、吹出・吸込口近傍1.56mm
床・天井レイヤ	第一格子厚さ1.56mm、拡大率1.2、5層
乱流モデル	k- ω SSTモデル
壁関数	Spalding 則による壁関数[1]
解法	SIMPLE法(定常解法)
移流項スキーム	速度TVD系 Limited linear、乱流量一次風上
流入境界条件	吹出風量規定(一様分布・鉛直下向き) 乱れの強さ30%、乱流長さスケール1.5mm
流出境界条件	法線方向勾配無し(自由流出)
熱境界条件	外壁は相当外気温度・熱貫流率設定、その他は断熱
放射熱伝達	形態係数モデル*。放射面素約500

* 対称面を考慮して形態係数を算出した上で、総和則を完全に満たしながら相反則をほぼ満たすようにするために、直接交換面積の対象化を行った[2]。

解析ケースを表2に示す。外気温度は0°Cとした。外壁の熱貫流率4条件(断熱性能の高いものから順に0.5、1.0、2.0、4.0 W/(m²K))、吹出風量4条件(1時間あたりの吹出し風量[m³/h]を室容積[m³]で除した換気回数[回/h]として、2、5、8、11回/h)の計16条件とした。

設定室温は23°Cとした。吹出温度を0.1°C刻みで変化させて解析し、室全体の平均温度が概ね23°Cとなるとききの吹出温度を表3に示す。

表2 解析ケース

外気温度	0°C
熱貫流率	0.5、1.0、2.0、4.0 W/(m ² K)
吹出風量	2、5、8、11回/h

表3 吹出温度

	吹出風量 [回/h]			
	2	5	8	11
	吹出温度 [°C]			
熱貫流率 [W/(m ² K)]				
0.5	25.9	24.2	23.7	23.5
1.0	28.8	25.3	24.4	24.0
2.0	34.5	27.6	25.9	25.1
4.0	46.0	32.2	28.8	27.2

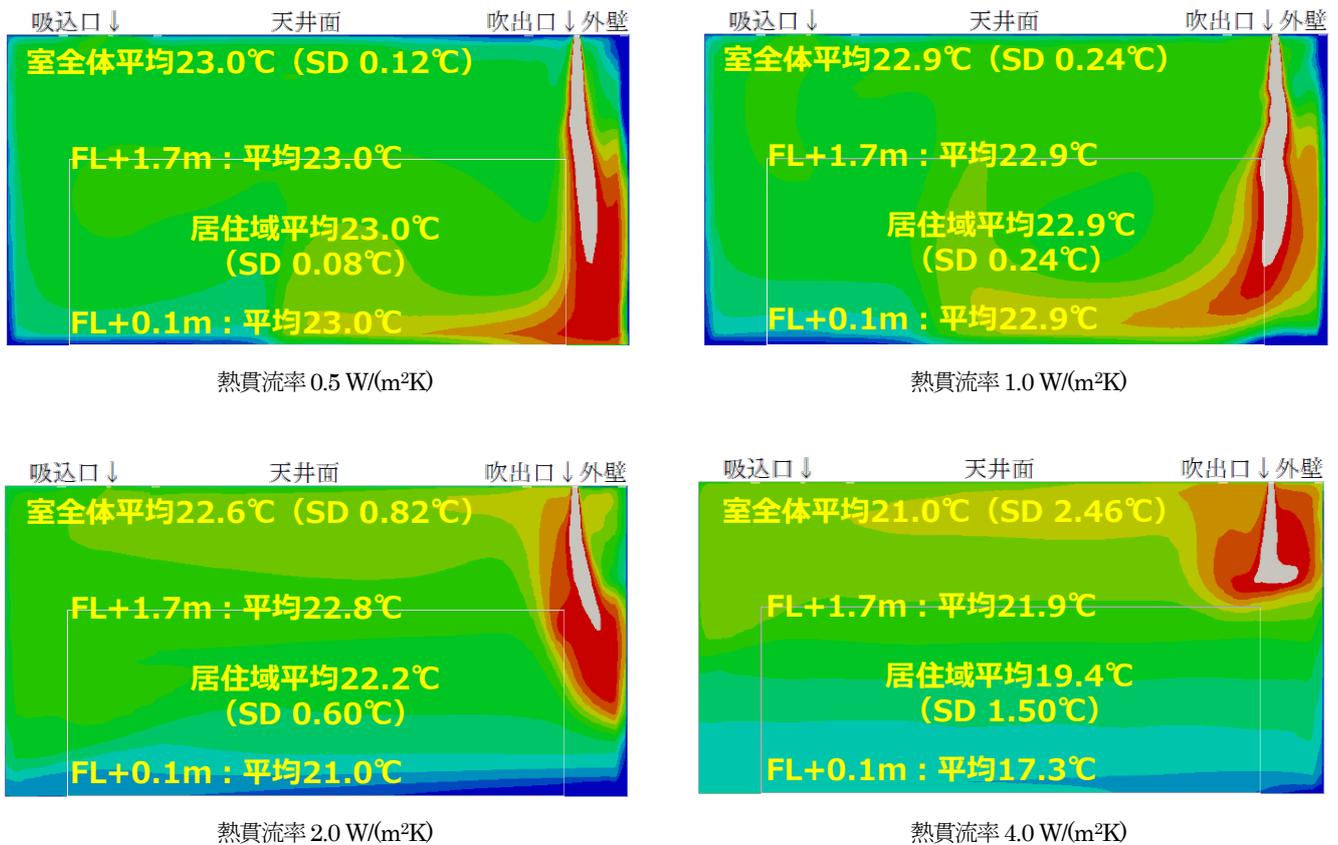


図5 吹出風量5回/hにおける吹出口・吸込口中央鉛直断面の温度分布

2) 計算結果

吹出風量が5回/hのときの各ケースの吹出口・吸込口中央鉛直断面の温度分布を図5に示す。

断熱性能が最も高い(熱貫流率が最も小さい)0.5 W/(m²K)のケースでは、室全体平均気温と居住域(ここでは、周壁から300mm内側の床から1,700mmまでの空間とした)の平均気温が同じ23.0°Cとなっており、床上100mmと1,700mmの温度差も見られず、均一な温熱環境が形成されている。断熱性能が悪くなるにしたがって温度分布が大きくなるものの、1.0、2.0 W/(m²K)のケースも同様に比較的均質な温熱環境が形成されている。

一方で、断熱性能が最も低い4.0 W/(m²K)のケースでは、吹出温度を高くしても、温かい空気が天井付近に滞留するため、室全体平均気温が21.0°Cと設定室温23°Cに達しない。また、居住域平均気温は19.4°Cとさらに低い温度となっている。床上100mmと1,700mmの温度差は4.6°Cとなっており、ASHRAEやISOで推奨されている3°Cよりも大きくなっている。

吹出風量5回/hのときの吹出温度を見ると、0.5 W/(m²K)のとき24.2°C、1.0 W/(m²K)のとき25.3°Cとなっており(表3)、断熱性能が高いほど、同じ吹出風量でも低い吹出温度で均一な室温を維持できている。

各ケースの室中央の垂直温度分布を図6に示す。吹出風量が最も小さい2回/hのケースでは、断熱性能が最も高い0.5 W/(m²K)のケースでも上下温度差が発生している。逆に吹出風量が最も大きい11回/hのケースでは、断熱性能が最も低い4.0 W/(m²K)のケースでも上下温度差の発生が抑制されている。これは、吹出風量が多いほど、室内の空気が攪拌されるためである。このように、上下温度差の発生の抑制には、断熱性能だけでなく空調設備側の吹出風量の確保にも配慮が必要となる。

このように、本解析結果から断熱性能と空調エネルギー消費量の関係について、以下のことが言える。

- 同じ吹出風量の条件では、断熱性能の向上により上下温度分布の発生を抑えることができる。例えば、断熱性能が低いと居住域の気温が低くなり、設定温度を上げることで室

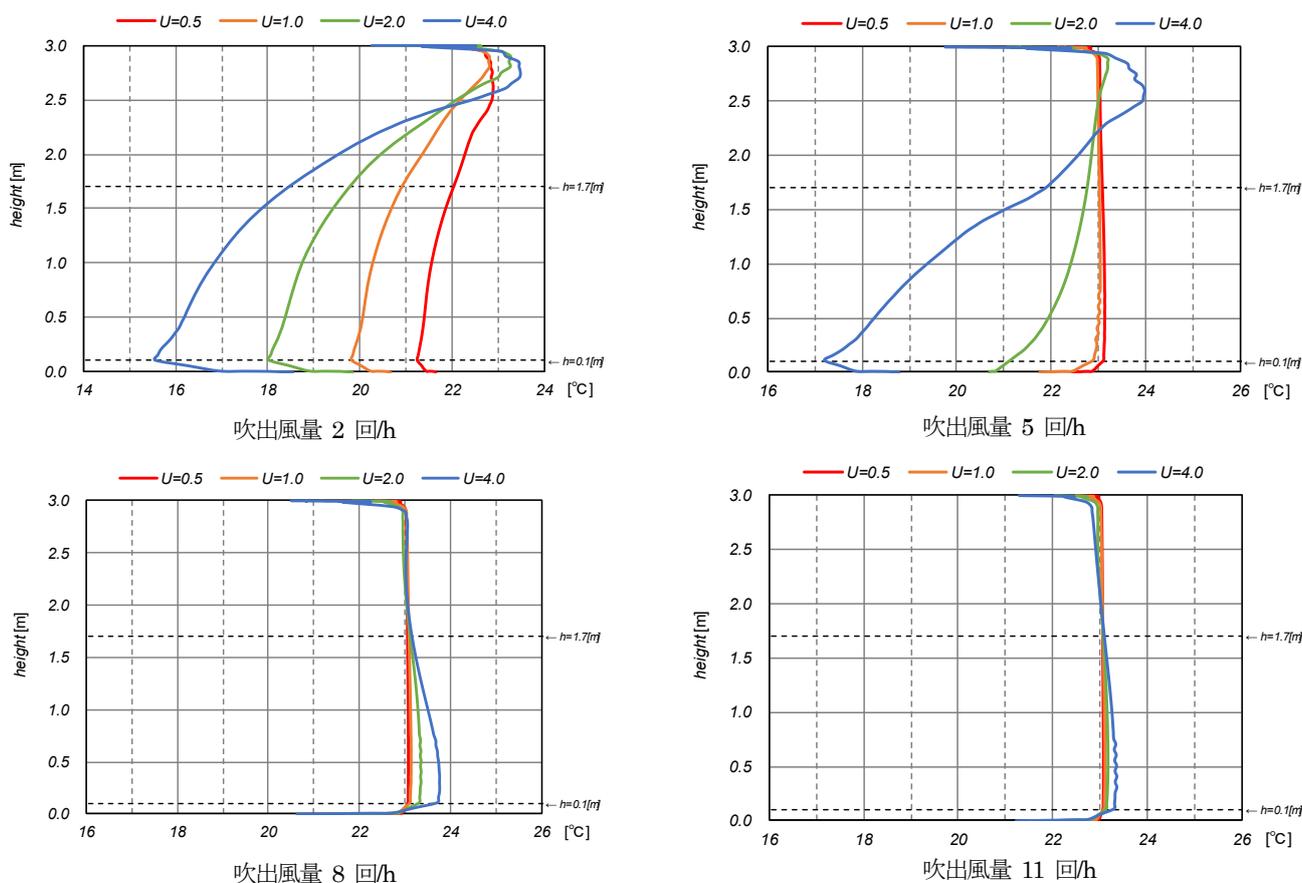


図6 室中央の鉛直温度分布

への投入熱量を増やさなければならなくなり、熱源のエネルギー消費量の増加を招く。

- 同じ断熱性能の条件では、吹き出し風量を増やす（例えば5回/hから8回/hなど）ことにより、上下温度分布の発生を抑えることができる。ただし、吹き出し風量を維持することは上下温度分布を抑制するために有効であるが、空気搬送動力は増加することになる。

IV 温熱環境を踏まえた空調エネルギー評価に関する検討

III章に示したとおり、室内の温度分布は外皮性能及び空調方式の影響を強く受ける。そのため、設計者は、室内の温熱環境の実現とともに空調エネルギー消費量を削減するための工夫として、外皮性を確保することに加えて、室内の上下温度分布等に加味した空調方式を選定している。しかしながら、このような工夫を省エネルギー基準では十分に評価できていないことから、温熱環境を考慮した空調エネルギー評価の検討を行っている。ここでは、

その検討の一部を紹介する。なお、本検討は、国土交通省の建築基準整備促進事業、課題番号 E13「非住宅建築物における室内の温熱環境を踏まえた空調エネルギー消費量評価手法に関する検討（令和1～2年度。事業者：(株)日本設計総合研究所、(株)OCAEL。事業者と建築研究所が共同研究を締結して実施）」のもと行われたものである。

1) 検討概要

温熱環境を踏まえた空調エネルギー消費量の評価手法の開発に当たり、以下の検討を実施した。

イ) 外皮性能及び空調方式の実態把握

設計実務者等へのヒアリング（設計事務所2社、ゼネコン5社）、設計図書の収集を行い、ロ)の解析で使用するパラメーター（外皮性能、空調方式）を地域、建物用途及び建物規模別に収集・整理。

ロ) 外皮の熱性能及び空調方式による室内の上下温度分布等の解析

外皮の熱性能及び空調方式による暖房時及び冷房時における室内の上下温度分布等を CFD によって把握。上下温度分布等の温熱環境に及ぼす影響を整理し、空調エネルギー消費量の評価手法を検討。

検討対象とした建物用途は、事務所、ホテル、学校、老健施設とした。なお、ここでは事務所に関する結果を紹介する。

2) 外皮性能及び空調方式の実態把握

事務所について、有効な図面調査の件数は 28 物件（温暖地 23 件、寒冷地 5 件）であった。規模別に見ると、5,000m²未満が 9 件と最も多く、50,000m²を超える物件が 4 件あった（図 7）。最も古い物件が 2015 年、最も新しいものが 2021 年の物件となっている（図 8）。

外皮の熱貫流率は、温暖地の平均が 0.86 W/(m²K)、寒冷地の平均が 0.65 W/(m²K)であった（図 9）。

窓の熱貫流率は、温暖地の平均が 2.22 W/(m²K)、寒冷地の平均が 2.06 W/(m²K)であった（図 10）。また、外壁面に対する窓面積率は、平均で 0.45 となっており、比較的窓面積が大きい物件が多く見られた（図 11）。

空調方式（熱源）については、中央式が 8 件、個別式が 17 件、中央個別併用が 3 件となっていた（図 12）。吹出口について（図 13）、インテリア部分はアネモが最も多く、次いで天井カセットの採用が多く見られた。また、ペリメーター部分はラインディフューザーが最も多く、次いでアネモが多く採用されていた。

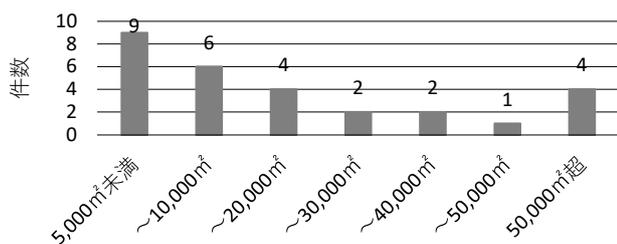


図 7 建物規模別の調査物件数（事務所）

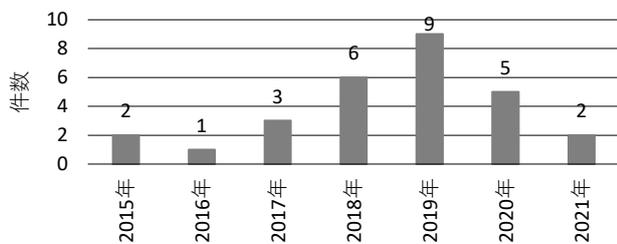


図 8 竣工年別の調査物件数（事務所）

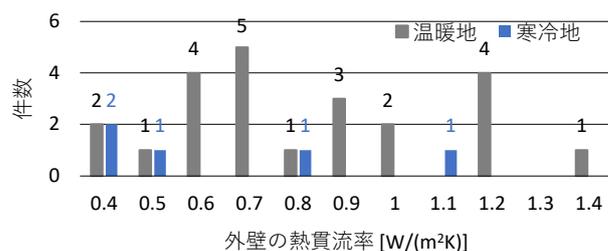


図 9 外壁の熱貫流率別の調査物件数（事務所）

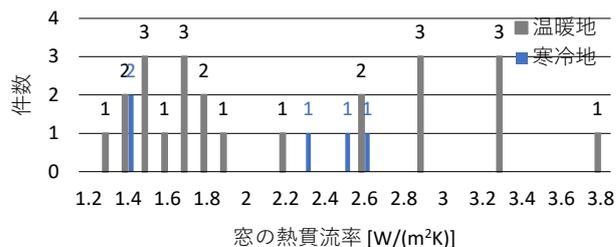


図 10 窓の熱貫流率別の調査物件数（事務所）

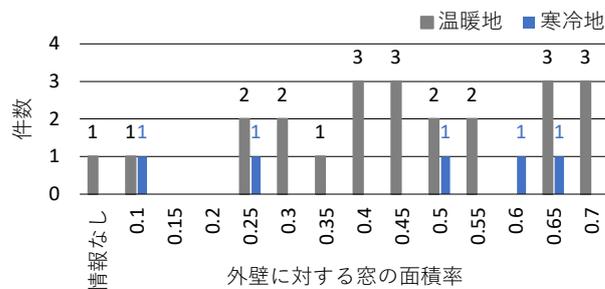


図 11 外壁に対する窓の面積率別の調査物件数（事務所）

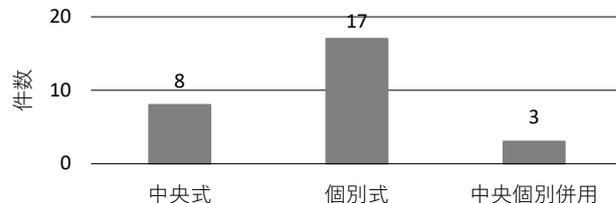


図 12 空調熱源方式別の調査物件数

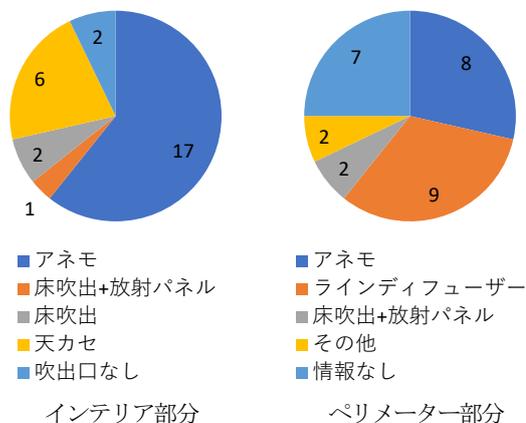
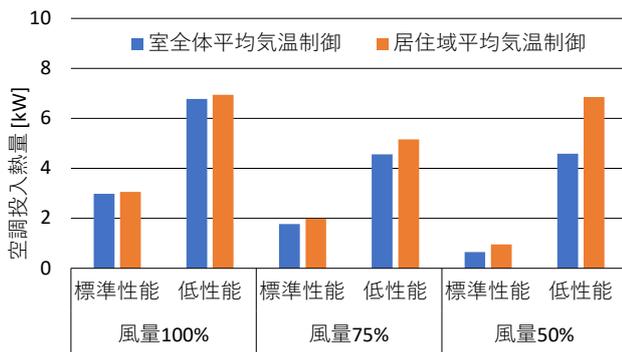
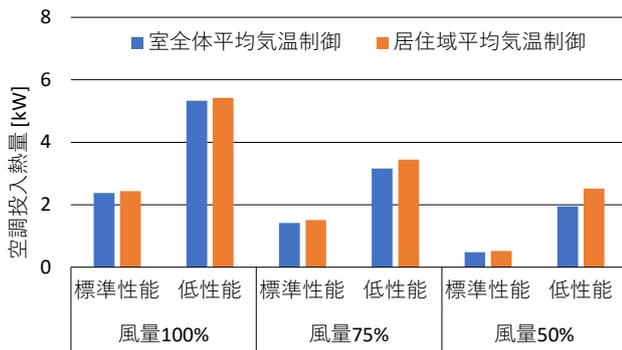


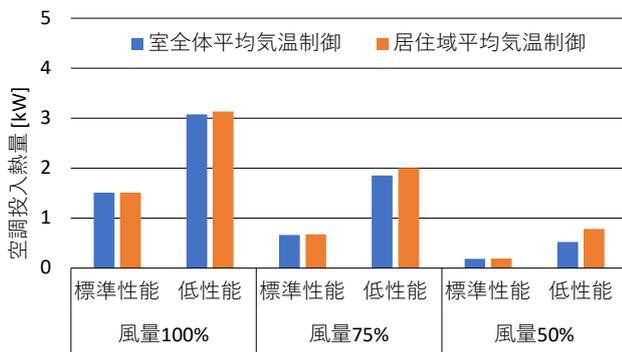
図 13 吹出口の種類別の調査物件数



(a) 熱負荷条件 100%



(b) 熱負荷条件 75%



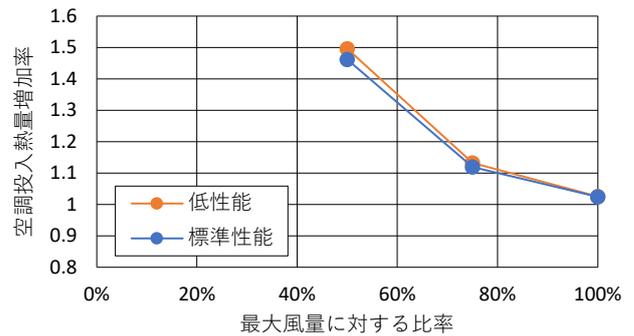
(c) 熱負荷条件 50%

図 16 空調投入熱量 (小規模事務所・寒冷地・暖房)

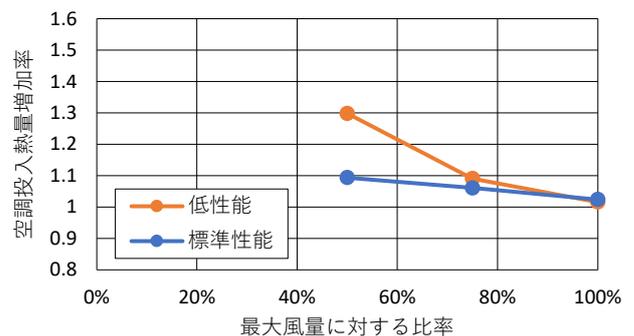
ここでは紙面の都合上、小規模事務所の寒冷地における暖房時の結果しか示していないが、他の建物用途、温暖地、冷房時についても同様の解析を行っている。これらの結果を踏まえて、外皮性能による温熱環境を考慮した空調エネルギー評価手法の開発を行っているところである。

V おわりに

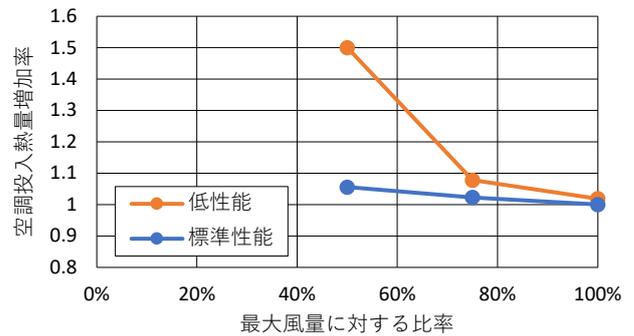
本報では、省エネルギー基準における評価の概要、及び、外皮性能による暖房時における室内環境の計算結果の例を示し、非住宅建築物における外皮性能による温熱環境を考慮した空調エネルギー評価に関する取り組みを紹介した。



(a) 熱負荷条件 100%



(b) 熱負荷条件 75%



(c) 熱負荷条件 50%

図 17 空調投入熱量増加率 (小規模事務所・寒冷地・暖房)

参考文献

- [1] Eugene de Villiers. The Potential of Large Eddy Simulation for the Modeling of Wall Bounded Flows. PhD thesis, Imperial College of Science, 2006.
- [2] 大森、梁、加藤、村上：大規模・複雑形状に対応する対流・放射連成シミュレーション用放射伝熱解析法の開発：第1報-モンテカルロ法をベースとした高精度放射伝熱解析法。空気調和・衛生工学会論文集、Vol.28, No.88, pp. 103-113, 2003.