

外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その158）

解法に応じた自然換気制御の想定法

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part 158)

Assumption of Natural Ventilation Control According to Solution Methods

技術フェロー ○郡 公子（宇都宮大学） 技術フェロー 石野 久彌（首都大学東京名誉教授）
特別会員 村上 周三（建築環境・省エネルギー機構）

Kimiko KOHRI*¹ Hisaya ISHINO *² Shuzo MURAKAMI *³

*¹ Utsunomiya University *² Tokyo Metropolitan University

*³ Institute for Building Environment and Energy Conservation

The thermal effects of natural ventilation in buildings can be estimated by using the implicit solution method in the BEST. This paper proposes the assumption of the control conditions which are necessary for thermal simulations of naturally ventilated spaces based on the explicit solution method. The features of the simulation results obtained by each type of the two solution methods were presented.

1. 序

BEST では、既報で報告したように、風量収支を解かず中世帯位置を仮定する方法を採用することにより、簡単な入力条件で自然換気計算を行う機能を追加し、まず非連成計算において、自然換気の省エネルギー効果や自然換気時の熱環境を評価できるようにした。冷房中の自然換気の可否を含める種々の自然換気許可条件を選択・考慮できることが特徴である。

本報では、連成計算用の自然換気制御条件の導入とそれによる計算結果の特徴、また非連成計算結果との違いを報告する。また、自然換気計算で簡易化のために導入した仮定条件の影響についての検討結果も報告する。

2. 解法に応じた自然換気制御条件の想定法

BEST には、非連成計算（従来の熱負荷計算）と連成計算（自由な機器構成の設備システムと建築との平衡計算）の2種類が用意されている。非連成計算はインプリシット法で解く。即ち、現在の状態値を未知数とする連立方程式を解き、計算時間間隔は、空調開始・停止直後を除き基本的に1時間間隔でよい。連成計算では、空調時間帯はエクスプリシット法で解く。現在の室内状態値を既知として次ステップの室内状態値を求める。5分間隔程度の短い計算時間間隔が必要である。非空調時間帯には計算時間間隔を長く設定できるインプリシット法に切り換え可能である。空調熱量は、インプリシット法では室内温湿度を既知とする方程式を解いて求めるが、エクスプリシット法では制御動作を仮想し、室内状態を設定値に近づける操作量を予測して求める。解法に応じて空調熱量を求めるための想定条件が異なるように、自然換気調整をする場合に、インプリシット法とエクスプリシット法で異なる制御条件を想定する部分がある。

BEST で考慮可能な自然換気許可条件を表1にまとめ

た。表2には、解法に応じて想定する自然換気制御法や自然換気許可判定手順を示した。表1に示した自然換気許可条件のうち、室温の下限値に関しては、解法に応じて換気口の開口率や開放時間を調整する方法を想定する必要がある。インプリシット法では開口率調整を行うものとし、室温を下限値とするための開口率を求めることにした。エクスプリシット法では、換気口開閉操作の保留時間を満たした上で、室温が下限値以上なら開、下限値未満なら閉と調整する方法を想定することにした。

インプリシット法を用いる非連成計算では、各ゾーンに空調機があると仮定するので、計算対象のペリメータゾーン空調機の処理状態により自然換気の許可判定を行うことが可能である。加熱中の自然換気は不許可とし、冷却中の自然換気は可否を選択できる。冷却中の自然換気不許可のケースに対しては、自然換気のみでは室温を冷房設定値以下に保てない場合に自然換気を不許可と判定する。エクスプリシット法の場合、空調機の処理状態を考慮した自然換気許可判定は行わないことにした。自然換気の入力項目が建築側の項目で済むことや、実際の運転で空調機の処理状態を考慮しない場合が多いと予想されることによる。冷房中の自然換気を回避したいケースのために、自然換気を許可する上限室温を導入することにした。エクスプリシット法で解く冷房室温は設定値に対して若干の変動を許容するので、これを勘案して上限室温を設定する必要がある。そのほか、エクスプリシット用の条件として、換気口の頻繁な開閉が空調制御の安定性に影響しないように、開閉操作の保留時間を設けることにした。連成計算では、エクスプリシット法を用いる空調時間帯とインプリシット法を用いる非空調時間帯とで、想

表1 自然換気許可条件

- 解法によらない共通条件 (スケジュール)
 - 1)自然換気期間・時間帯 (0) (外界条件)
 - 2)外気温度 \geq 下限値 (-1)
 - 3)外気相対湿度 \leq 上限値 (-2)
 - 4)外気露点温度 \leq 上限値 (-3)
 - 5)屋外風速 \leq 上限値 (-4) (室内条件)
 - 6)室温 \geq 下限値 (-5)
 - 7)室温>外気温 (必須) (-6)
 - 8)室内エンタルピ>外気エンタルピ (-7)
- インプリシット法の条件
 - 9)空調機で加熱非要求 (必須) (-8)
 - 10)空調機で冷却要求でも可 (-9)
- エクスプリシット法の条件
 - 11)室温 \leq 上限値 (-11)
 - 12)換気口状態の継続時間
>操作保留時間 (15分) (必須) (-12)

*()内の数値は条件に対応する識別番号

【注記】1)連成計算の場合、空調時間帯はエクスプリシット法、非空調時間帯はインプリシット法で計算できる。この場合、自然換気制御の想定法も解法と同時に切り換えられる。2)インプリシット法での許可条件にある空調機の冷却加熱とは、ペリメータゾーン空調機のこと。3)BESTでは、各時間ステップの結果出力で、自然換気の許可状態、不許可の理由(条件識別番号)がわかる。

表3 基準計算条件

気象	EA標準年気象データ (仙台)
自然換気	(自然換気スケジュール) 換気期間：4-11月、換気時間：24時間 (自然換気許可条件) 下限外気温：15°C、上限外気相対湿度：90%、 上限外気露点温度：空調時19°C、 上限屋外風速：10m/sec 下限室温：空調時24°C・非空調時22°C (建物) 8階建て(軒高32m)、計算対象室2階 (換気口) 単位外皮長さあたり有効開口面積： 0.005 m ² /m
ゾーン	・室：中間階ペリメータ・インテリア2ゾーン断面 (室奥行き10m、ペリメータ奥行き5m、階高4m) ・窓：Low-E複層ガラス・内側明色ブラインド、 窓面積率70% ・内部発熱 (最大)：照明10W/m ² 、機器15W/m ² 、 在室者0.15人/m ²
空調	・空調時間8:00-22:00(室使用9:00-22:00) ・冷房設定室温：夏期(6-9月)28°C、 中間期(4・5・10・11月)26°C

定する自然換気制御条件が多少異なることになる。

3. 解法に応じた自然換気想定法の違いの影響解析

連成計算と非連成計算における自然換気制御の想定法の違いを数値計算で確認した。計算条件を表3及び表4のAに示す。仙台の8階建てビルの2階にあるオフィスを計算対象とし、自然換気許可条件を満たせば、4~11月の空調時・非空調時とも自然換気を行う。湿度・潜熱計

表2 解法と自然換気制御の想定法の特徴

- インプリシット法
 - ・自然換気許可判定手順
 - ①スケジュール・外界条件上の許可判定、②全ゾーン非自然換気と仮定して室内状態を計算して第1段階の室内条件上の許可判定、③自然換気許可ゾーンの換気口開口率を100%として室内状態を計算して、下限室温、空調熱処理上の許可判定、④室温を下限値とする開口率計算・自然換気許可判定
 - ・自然換気と空調の関係

自然換気のみで、下限室温 \leq 室温 \leq 冷房設定室温を満たす場合は、空調機で冷却しない。冷房中の自然換気を禁止する場合、自然換気のみで冷房設定室温に保てなければ、自然換気を停止して空調機で冷却を行うものとする。また、空調機で加熱処理中は、室温が下限値以上でも自然換気を行わない。
 - ・下限室温に対する操作

開口率100%とすると室温が下限値を下回る場合は、開口率調節により室温を下限値に保つものとする(開口率は、実際の運転での換気口の開放時間率に相当すると考える)。また、室温下限値は、冷房設定室温でもそれより低くてもよい。
- エクスプリシット法
 - ・自然換気許可判定手順
 - ①スケジュール・外界条件上の許可判定、②既知である室内状態値を用いた判定
 - ・換気口開閉操作

換気口を開放する場合の開口率は100%とする。また、頻繁な開閉を避けるため開閉操作の最小保留時間(15分)を導入する。
 - ・自然換気と空調の関係

冷房中の自然換気を禁止したい場合は、冷房設定室温より少し低い値の自然換気上限室温を設定する。空調機で冷却開始後は、室温が低下し冷却不要とならない限り自然換気への切換えは起きない。冷房中の自然換気を許可する場合、空調機で加熱を行っていても自然換気を行う。
 - ・下限室温に対する操作

自然換気により室温が下限値を下回ると換気口を閉鎖、その後室温が下限値以上になると換気口を開放する。ただし、換気口操作の最小保留時間は満たすものとする。

表4 解析項目別の計算条件

A 解法に応じた自然換気想定法の違いの影響解析 (自然換気許可条件) 内外エンタルピ差チェック：なし、 冷房中の自然換気不許可のケースのエクスプリシット用上限室温： 夏期27.5°C、中間期25.5°C (ゾーン) 窓方位：北 (空調) 冷房設定室温：夏期(6-9月)28°C、 中間期(4・5・10・11月)26°C、外気導入：なし (計算時間間隔) 空調時間帯は5分、非空調時間帯は主に60分、 空調停止直後は5分間隔
B 簡易化のための前提条件の影響解析 (非連成計算) (自然換気許可条件) 内外エンタルピ差チェック：あり、 冷房中の自然換気：許可 (空調) 設定温湿度と処理：夏期 28°C50%(冷却除湿)、中間期ペリメータ26°C(冷却)、インテリア26°C(冷却)・22°C(加熱)、 外気導入：3.75CMH/m ² (計算時間間隔) 空調時間帯は主に30分、非空調時間帯は主に60分、 空調開始・停止直後は5分間隔

算においては、連成・非連成で、冷却コイル除湿の考え方に違いがあり計算条件を統一できないため、ここでは湿度・室顕熱負荷で比較を行う。

図1に、自然換気下限室温に対する調整の違いを示す。比較のために自然換気なしの結果も加えている。19~22時に下限室温に対する自然換気調整を行っている。連成計算では、換気口の開閉操作保留時間の15分を満たしながら開口率100%、0%を交互に繰り返す。それに対して非連成計算では、開口率の調整がされ、室温は下限値24°C

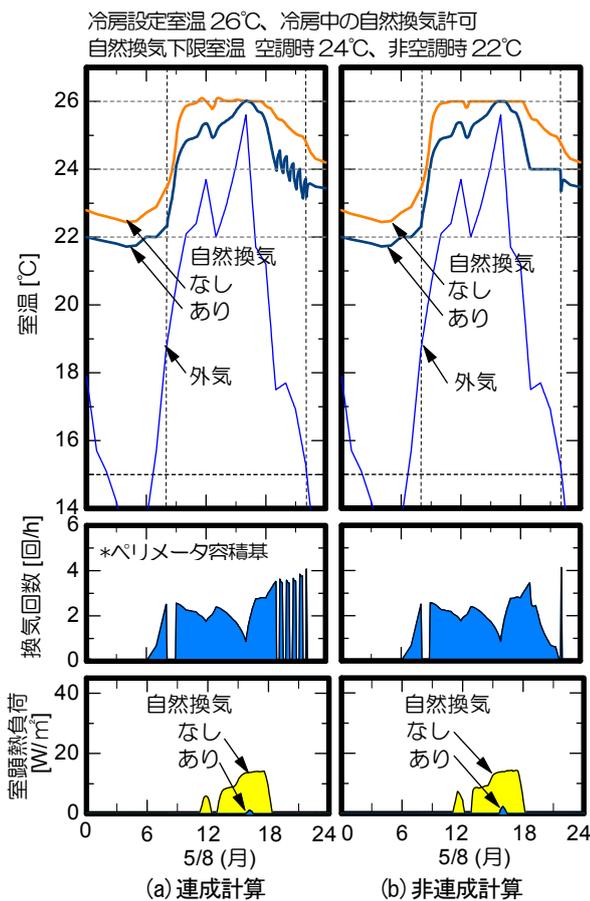


図1 下限室温に対する調整の違い（北）

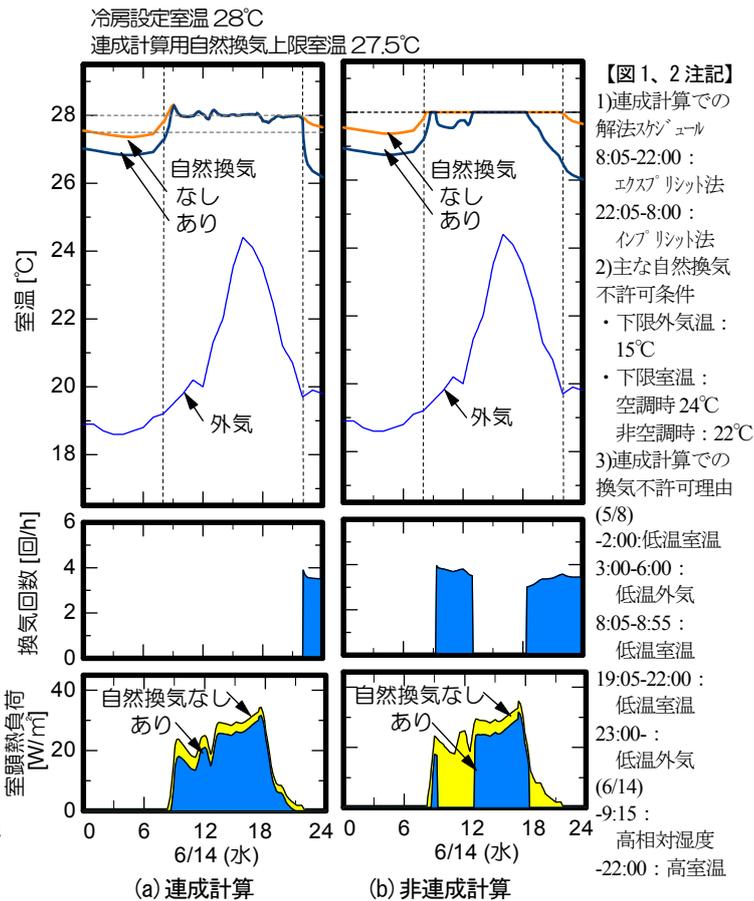


図2 冷房中の自然換気不許可に対する調整の違い（北）

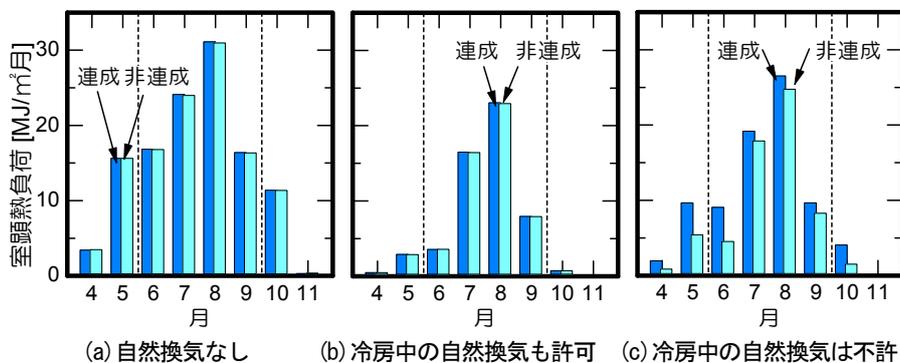


図3 連続・非連続計算と月別負荷（北）

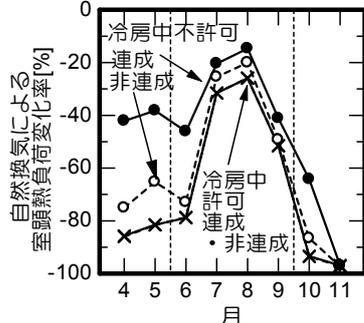


図4 連続・非連続計算と月別負荷変化率（北）

で一定となる。図2は、冷房中の自然換気不許可に対する調整の違いを示したものである。この日は、9:15までは外気相対湿度が上限値以上で自然換気は不許可であった。連続計算では、冷房中の自然換気回避のための自然換気上限室温を冷房設定室温 28°Cより少し低い 27.5°Cと設定した。9:15以降は空調機の冷却により室温が上限値以上に制御されるため、自然換気は許可されなかった。非連続計算の場合は、自然換気の冷却力で十分な場合、空調機での冷却は停止される。その結果、9:20~12:55と18:25以降は自然換気のみで切り換えられている。このように、連続計算では、一旦冷却が始まると、本来は自然換気が可能でもその切り換えはなかなか起きない。室温が冷房設定値より低くなり冷却不要に変わり、さらに自然換気上限室温以下となって初めて自然換気に切り換えられる。これ

は、実際の運用でも起きる制御上の限界である。これに対して、非連続計算では理想的な自然換気利用における最大効果を推定して、実際の制御で実現できるわけではない。両者の違いを理解した上での利用が重要である。

図3、4に、月別室頭熱負荷と自然換気によるその変化率を示した。冷房中の自然換気を不許可とするケースでは、連続計算と非連続計算とで月別室負荷に明確な差が生じ、自然換気しない場合に対する負荷変化率の差は月により5~30%である。それ以外のケースでは、連続計算と非連続計算の差はほぼない。

4. 簡易化のための前提条件の影響解析

自然換気計算の簡易化のために、①無風時の中性帯を建物高さの2/3の位置とする、②外部風による室内圧変化は、対象換気口の方角とその反対側の方角の風圧の平均

値とするなどの前提条件を導入した。また、ペリメータゾーンの自然換気の効果は、ゾーン間換気により隣接するインテリアゾーンにも及ぶと想定している。ここでは、中性帯と計算対象ゾーンの位置関係、外部風、ゾーン間換気量に関する感度解析を非連成計算により行った。特記のない計算条件は、表3と表4のBの条件である。

図5に示すように、外部風の影響を考慮するかどうかにより室温や負荷の時別値にはある程度の差が生じる。しかし、図6(a)に示すように、4~11月の積算冷房装置負荷で比較するとその差は小さく、方位差も小さい。計算対象室を中性帯より上の位置に変更すると、図6(b)に示すように、外部風考慮と無視の差は明瞭となり、中性帯に近いゾーンほど差が大きい。ペリメータ・インテリアゾーン間換気量は100CMH/m以上を想定すると、積算冷房装置負

【図5注記】冷房設定温度：夏期28℃、中間期26℃、自然換気下限室温24℃、プロットは4~11月の空調時間帯正時

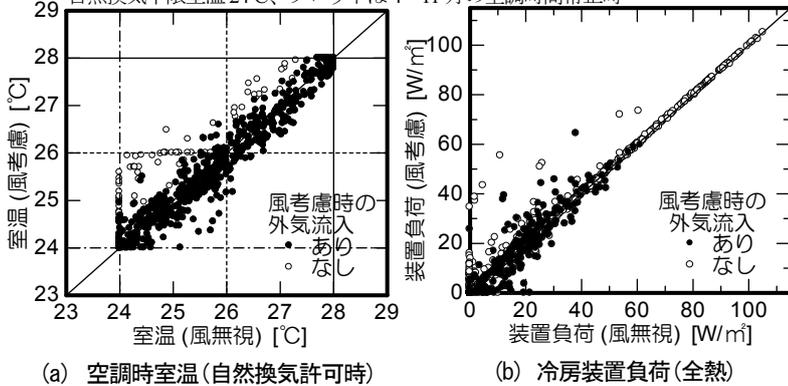


図5 外部風考慮の有無と空調時室温、装置負荷 (南)

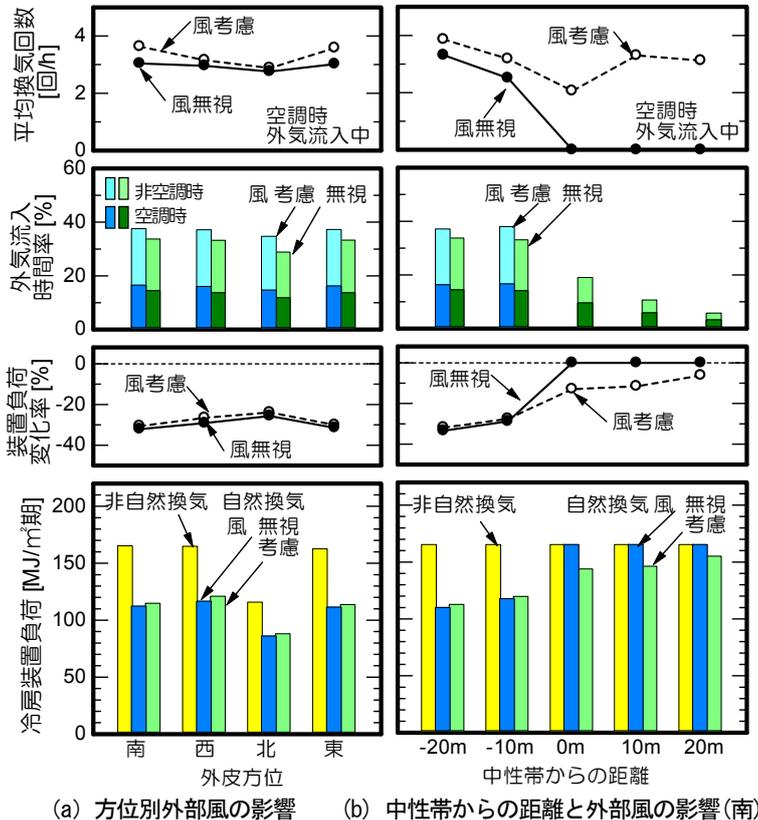


図6 外部風考慮有無と中性帯からの距離の影響解析

荷や自然換気による室温低下の期間平均値は、風量によりそれほど影響を受けないといえる。

5. 結

連成計算による自然換気の計算を可能とした。解法により自然換気制御の想定が異なるので、それを理解した上での利用が重要である。簡易化のために導入した条件の影響も検討した。今後さらに検討を続ける予定である。

【謝辞】

本報の一部の研究は科研費補助金 15K06320 による。また、(一財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BEST コンソーシアム」・「BEST 企画委員会(村上周三委員長)」および専門版開発委員会(石野久彌委員長)、統合化WG(石野久彌主査)の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表すものである。統合化WG名簿(順不同) 主査：石野久彌(首都大学東京名誉教授)、委員：大西晴史(関電工)、木下泰斗(日本板硝子)、工月良太(東京ガス)、郡公子(宇都宮大学)、菰田英晴(鹿島建設)、佐藤誠(佐藤ER)、芝原崇慶(竹中工務店)、新武康(清水建設)、田中拓也(大成建設)、長井達夫(東京理科大学)、二宮秀興(鹿児島大学)、野瀬暁則(大林組)、野原文男、長谷川巖、滝澤総、二宮博史、丹羽勝己、久保木真俊(以上、日建設計)、柳井崇、品川浩一、山本佳嗣(以上、日本設計)、事務局：生稲清久、石田真理(建築環境・省エネルギー機構)

【文献】

- 1) 郡他：建築総合エネルギーシミュレーションツール BEST のための建築シミュレーション法に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.162、pp.9-15、2010.9、2) 郡他：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その130)、(その132)、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp.1-4、9-12、2014.9、3) 郡他：建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発第53報、日本建築学会大会学術講演梗概集、2015.9

【図6、7注記】

- 1) 図示した結果は、4~11月の平均あるいは積算値。 2) 換気回数はペリメータゾーンの容積基準。 3) 中性帯からの距離とは、中性帯を基準としたときの対象ゾーン居住空間(天井より下)の中央高さまでの距離。 4) 冷房装置負荷とは、室負荷と外気負荷を処理するための冷却除湿の負荷。

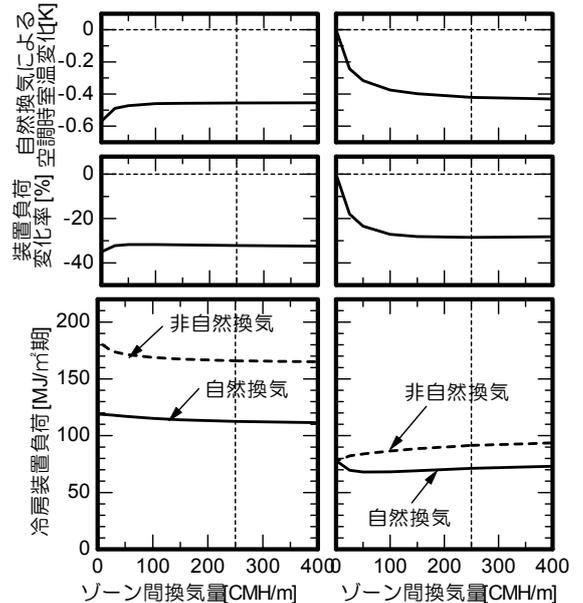


図7 ゾーン間換気量と冷房装置負荷 (南)