自然換気併用空調システムがもたらす空調負荷削減効果と 室内環境に与える影響の評価

EVALUATION OF THERMAL LOAD REDUCTION AND EFFECT TO INDOOR ENVIRONMENT BY HYBRID VENTILATION SYSTEM

三浦克弘*, 武政祐一*, 吉田治典**

Katsuhiro MIURA, Yuichi TAKEMASA and Harunori YOSHIDA

Hybrid ventilation system executes natural ventilation while operating air-conditioning system. The number of the system appreciation has been increasing, but the change of thermal load by the operation method is not estimated precisely, which leads to less reliability in energy conservation effect. It is also important to consider indoor thermal environment when ventilation openings are located in occupied zone of the building. In this paper, slab temperature of the simulation is compared to the measured value, which shows good coincidence between simulation and measurement. The change of thermal load and indoor environment is evaluated by the simulation, and appropriate operation method is discussed.

Keywords: hybrid ventilation system, thermal load, indoor environment

自然換気併用空調システム, 空調負荷, 室内環境

1. はじめに

地球環境問題を背景に自然エネルギー利用の推進が求められる中、空調における自然換気利用に注目が集まっている。技術的制約のもとで完全空調を前提としていた超高層建築も例外ではなく、最近ではボイドを利用した温度差換気の事例なども見られる²⁾。また、自然換気システムを空調システムと併用して外気を取り入れ、冷房負荷を削減する自然換気併用空調システムを行う建物もある³⁾。しかし、自然換気を併用する空調システムでは実測に基づく負荷削減効果の推定が行われており^{3), 4)}、自然換気許可条件を変更した場合の削減効果などが解析されていないため、省エネルギー効果の比較が十分に行われていないのが現状である。一方、夜間に自然換気を行う建物では建物の躯体重量 (mass level) の違いにより、昼間の室温低下に効果があるとの報告があり⁵⁾、建物の実測結果でもナイトパーージを含む自然換気時に建築躯体であるスラブ温度の低下が報告されている³⁾。ナイトパーージは建築躯体の冷却を行うパッシブな躯体蓄熱冷房利用と考えられ、躯体蓄熱の実測解析によれば躯体蓄熱時における家具の蓄熱量に比べてスラブの蓄熱量は大きい⁶⁾。実際の建物を用いて自然換気を用いた場合の空調負荷の変化を予測するのは内部発熱と外界気象条件を同一にするのがほとんど不可能であるため、シミュレーションは有効な検討手段である。従って、シミュレーションで躯体温度の評価を適切に行えば空調エネルギー削減量の推定が可能になると考えられる。温熱環境の観点から自然換気を見ると、自然換気を室内に取り入れた場合には均質な環境ではなく、時間的・空間的な変化を伴う環境が形成される。換気口の近くでは”自然を感じる”ため、居住者の快適性が向上する可能性がある⁴⁾。一方で、自然風が”ドラフト”となり温熱環境が悪化する懸念もあ

る。対応としては空間の使用目的に応じて自然換気口の設置位置や開口の制御と共に、自然換気許可条件の選択も重要と考えられる。

本論文では、自然換気を非空調時であるナイトパーージと共に空調システムと併用して運用し、冷房負荷の削減を行なう建物における躯体温度の変化を実態調査により示す。次に、スラブ温度の再現性を確認したシミュレーション手法を用いて空調負荷及び室内環境の変化と制御パラメータの関係を分析し、適切なパラメータの検討方法を

図1 建物断面図と屋上風向風速測定位置

本稿は参考文献1における実測結果に新たな解析結果を加筆したものである。

* 鹿島建設株式会社 技術研究所 上席研究員・博士(工学)

** 岡山理科大学総合情報学部建築学科 教授・工博
(京都大学 名誉教授)

Chief Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

Prof., Department of Architecture, Faculty of Informatics, Okayama University of Science, Dr. Eng.
(Prof. Emeritus, Kyoto University)

図2 基準階平面図

図3 基準階断面図

示す。

2 自然換気併用空調システムの実態調査

2.1 建物と空調システムの概要

対象建築物は、東京に建つ事務所・ホテルの複合建築物（鉄骨造）STビルである。STビルは地下4階・地上38階で、自然換気併用空調の対象はそのうち2階から22階までの事務所基準階である（図1）。基準階平面図を図2に、基準階断面図を図3に示す。階高が4.2mである事務所は2フロアで1ユニットを形成しており、中央に「オフィスガーデン」と呼ばれる吹き抜けがある。表1に建物各部位の仕様を示す。各フロアのスラブはデッキプレート（平均厚さ110mm）、外壁はPCカーテンウォールで発泡ウレタン15mmが吹き付けられている。窓ガラスはLow-Eペアガラスで、日射遮蔽にロールスクリーンを用いている。STビルでは15階事務室で12点のスラブ温度を測定している（図2）。温度センサーは測温抵抗体で、デッキプレートを用いた床面の最厚部厚さ方向中央点（床スラブ上面から80mm）に設置している。2フロアを1ユニットとして構成されるオフィスと、中央に配置されたオフィスガーデンに対して、自然換気口を①事務室部分の窓サッシ上部、②上層及び下層エレベーターホール内と③オフィスガーデン床、④オフィスガーデン天井に設置している（図4）。これらの自然換気口は自然換気停止時の気密性を確保するため、高气密ダンパーを設置している。オフィスガーデンは自然換

表1 建物各部位の仕様

	材料	厚さ [mm]
外壁	タイル	23
	PCコンクリート	161
	吹付けウレタン	15
	中空層	
	プラスターボード	22
スラブ	普通コンクリート	110（平均厚さ）
天井板	メタル天井	
窓ガラス	Low-Eペアガラス	

表2 自然換気口の開口面積

場所	実開口面積 [m ²]	有効開口面積 [m ²]
オフィスガーデン（天井・床合計）	1.10	0.433
EVホール（上層・下層合計）	15.12	0.861
天井プレナム内（全事務室合計）	9.70	1.934
2フロア合計	25.92	3.228

図4 自然換気口設置位置

図5 オフィスガーデン自然換気口断面図

気を居室内に取入れて風を感じることができるようにしている。一方、事務室は自然換気による温熱環境の変化を少なくするために窓サッシ上部から取り入れた外気を天井プレナム内に開放して天井プレナム内で空調機の還気と混合しており、間接的に自然換気を利用している。自然換気口の開口面積を表2に示す。

また、居住域に設置されるオフィスガーデンとエレベーターホール自然換気口には消音エルボーを設けている。図5にオフィスガーデンに設置した自然換気口の断面図を示す。

自然換気システムは①実行条件と②ダンパ開度テーブルを組み合わせて制御を行う。実行条件は空調負荷の削減を目的として温度やエンタルピーの判定条件とドラフトの発生や雨水の降り込みを判断する条件を合せて、①外気温度②外界風速③外気エンタルピー④外

気露点温度⑤降雨の5つの条件を用いている。一方、居住者近傍に位置し自然換気により流入する外気が「ドラフト」と見なされる懸念があるエレベーターホールとオフィスガーデンの自然換気口では、外気温度と外界風速をパラメータとするテーブルを用いてダンパーの開度調節を行う。

基準階における空調ゾーニングは吹き抜けとなっているオフィスガーデンと独立した空調システムとし、各フロアの事務室の空調システムはインテリアシステムとペリメータシステムに分割している。基準階長辺方向のペリメータシステムは柱型空間内部に縦型のファンコイルユニット(FCU)を設置し、短辺方向にはペリカウンター内にFCUを設置している。一方、インテリアシステムは各フロアで8台の空調機を外壁部の柱型空間に設置している(図2)。表3に空調機とFCUの仕様と台数を示す。インテリアシステムの吹出方式は冷房に用いる天井吹出を基本とし、暖房の立ち上げ時に床吹出に切り替える。オフィスガーデンは天井吹出口により空調を行い、自然換気時には、オフィスガーデンの温湿度およびCO₂濃度に応じて空調機が自動的に停止する。

本建物の自然換気併用空調システムは①自然換気により室の冷房負荷を削減する自然換気システムと②削減された冷房負荷を除去する空調設備の2つを同時に運転する。自然換気は空調設備の運転に係らず実行し、非空調時は建物の冷却を行う。従って、図6に示すように自然換気併用空調時と、非空調時には事務室の自然換気の流れは異なる。自然換気併用空調時は天井プレナムを空調レタンチャンバとして用いるので自然換気口を開放することで、還気と外気の混合により外気取り入れ量を増やすのと同じ効果が生じる。但し、空調機は独立して外気を取り入れており、プレナム内部の風量収支を考えると流入と流出は等量となる。従ってプレナム内部でも自然換気が生じる。一方、非空調時は天井プレナムと事務室間に天井のレタンスリットを介した空気の移動が生じる。従って、天井プレナム内に流入した外気は事務室を冷却した後、他の天井プレナム内換気口やオフィスガーデン開口を通して外部へと流れる。

3. 自然換気によるスラブの温度変化

3.1 外界気象条件

図7に2003年5月から2004年5月まで、屋上で測定した各月毎の外気温度と風速の平均値を示す。東京管区気象台の外気温度平年値(1971年～2000年)⁷⁾と比較すると「冷夏暖冬」であり、特に2003年7月の外気温度22.7℃は平年値25.4℃に比べ3℃近く低い。屋上で測定した風速は1.8m/s～2.4m/sで年間を通して大きな違いはなく、同期間の気象台年間平均風速(3.3m/s)と比べても低い^{注1)}。図1に示す建物の南角部に風向風速計を設置したため、北西から北東方向の外界風速に対してはSTビル自身の軒部で生じる剥離の後流内に風向風速計が入ることになる。また周囲には高さ192m～215mとSTビルよりも高い超高層建物がある。従って、屋上の風速は周囲建物とSTビル自身の影響を受けていると考えられる。

3.2 自然換気制御パラメータ

自然換気の許可条件には当初、①外気温度(15℃以上、26℃以下)、②外界風速(8m/s以下)、③外気エンタルピー(52kJ/kg以下)、④外気露点温度(16℃以下)、⑤降雨(なし)を用いていた。2004年4月中旬より外気温度が低い場合にも比較的ダンパ開度を大きく開ける設定に変更し、2004年5月中旬以降は外気温度下限値を12℃に変更し

表3 空調機とファンコイルユニットの仕様

	空調機		ファンコイルユニット	
	インテリアシステム	オフィスガーデンシステム	縦形	ペリカウンター
冷房能力[kW]	12.2	28	4.3	1.2
暖房能力[kW]	6.9	9.0	3.2	1.7
送風量[m ³ /h]	3,150	5,920	1,400	680
外気量[m ³ /h]	500	860	0	0
台数[-]	16	1	16	32

空調が天井レタンチャンバ方式となっており、天井プレナム内で外気と還気が混合する。

(a) 自然換気併用空調時

天井スリットから降下する夜間の冷気により建物に蓄冷する。

(b) 非空調時

図6 天井プレナム内換気口の自然換気の流れ

図7 実態調査期間の外界気象条件(屋上)

表4 オフィスガーデン・エレベーター(EV)ホール換気口ダンパ開度

(a) 2003年5月～2004年4月15日

オフィスガーデン /EVホール[%]		風速移動平均値(m/s)			
		0.0～1.9	2.0～3.9	4.0～5.9	6.0～8.0
外気温度℃	15.0～16.9	20/10	20/10	20/10	20/10
	17.0～18.9	50/20	50/20	50/20	50/20
	19.0～20.9	70/50	70/30	70/30	70/30
	21.0～22.9	100/75	100/50	100/50	100/50
	23.0～26.0	100/75	100/50	100/50	100/50

(b) 2004年4月16日～5月31日

オフィスガーデン /EVホール[%]		風速移動平均値(m/s)			
		0.0～1.9	2.0～3.9	4.0～5.9	6.0～8.0
外気温度℃	15.0～16.9	50/10	50/10	50/10	50/10
	17.0～18.9	70/20	70/20	70/20	70/20
	19.0～20.9	100/50	100/30	100/30	100/30
	21.0～22.9	100/75	100/50	100/50	100/50
	23.0～26.0	100/75	100/50	100/50	100/50

図 8 スラブ温度の変化 (2003 年 6 月～2004 年 5 月 ST ビル)

図 9 スラブ温度日平均値と外気温度日平均値の関係 (ST ビル)

た (表 4)。

3.3 スラブ温度の変化

図 8 に 15 階西側事務室 (基準階平面図左側) と東側事務室 (同右側) で 2003 年 6 月 1 日から 2004 年 5 月 31 日に測定した 6 点ずつのスラブ温度平均値の時間変動を示す。測定間隔は 10 分である。それぞれのスラブ温度の間に大きな違いは見られない。2003 年 12 月末にはスラブ温度が 20°C となっており、年末年始休暇の影響と考えられる。自然換気実行時間が長い 2003 年 10 月と 2004 年 5 月にはスラブ温度が一旦低下している。

自然換気併用冷房の実測結果によればナイトパーズの影響によるスラブ温度低下は時間変動により説明されるが、自然換気併用冷房冷房時にはスラブ温度は低下をせずに上昇しており、ナイトパーズを含む自然換気併用冷房時のスラブ温度低下を時間変動で説明するのは困難である³⁾。しかし、室温よりも低い外気を自然換気で取り入れた効果は本来ならば大きく上昇するはずのスラブ温度があまり上昇しないなど、時間平均値に自然換気の効果が見れると考えられる。本論文では測定期間で 1 時間以上空調を行った日を抽出し、スラブ温度のすべての測定点における日平均値を算出して自然換気実行の有無により比較をおこなう。

測定結果の比較の前にスラブ鉛直方向の温度測定点数について考察を行う。鉛直方向スラブ温度測定点数とスラブ蓄熱量の関係についてスラブ上下表面温度の平均値 (2 点) で算出したスラブ蓄熱量は、鉛直方向に 2 等分した境界面を加えた 3 点の平均もしくは 4 等分にした境界面 (3 面) を加えた 5 点の平均で算出した蓄熱量よりも大きいとの報告があり⁸⁾、スラブ延長方向の温度測定点数は平均温度の算出に影響を与える。本建物では鉛直方向一点でスラブ温度を測定しているため、躯体蓄熱を行う建物において躯体蓄熱時に空気を吹き付けるスラブ領域 A と空調機レタン口があるスラブ領域 B で鉛直

方向温度測定点数を替えた場合の日平均温度の違いを比較した^{注 2)}。鉛直方向で中央 1 点を用いて算出したスラブ温度日平均値は 3 点を用いて算出した場合とほとんど等しく、スラブ温度を鉛直方向 1 点で測定しても日平均値の算出は可能だと判断した。

図 9 に外気温度とスラブ温度の関係を示す。自然換気を実行した日は 10 分間隔で測定した BEMS データに一回以上記録がある日としている。自然換気実行の有無により近似直線を求めると、自然換気を実行した日はスラブ温度が約 0.5°C 低い。すなわち、ST ビルでは自然換気を行うと建築躯体であるスラブ温度が低下すると言える。

4. 自然換気併用空調による負荷削減効果の推定

ST ビルの実態調査により、自然換気実行時にスラブ温度が低下していることからナイトパーズを含む自然換気が空調負荷の削減に寄与していると推定できる。しかし、実際の建物では外界気象条件と内部発熱が異なるために制御パラメータを変えた場合の自然換気による空調負荷削減効果を示すことは困難である。以下ではシミュレーションを用いて自然換気併用空調による空調負荷削減効果を推定する。

4.1 シミュレーション手法

本論文のシミュレーションでは空間内を「ブロック」と呼ぶ小空間に分割して、①ブロックと壁体間の対流熱伝達、②壁体表面における放射熱伝達、③ブロック間の熱、水分と空気の移動、④壁体内の熱伝導を考慮した温度と湿度の非定常計算を行い、各ブロックで熱量収支、水分収支と風量収支を求める⁹⁾。壁体の蓄熱量と熱伝導による熱流は前進差分 (時間刻み 4 分) を用いた 1 次元非定常熱伝導計算により評価し、接するブロックとの対流熱伝達を計算する。ブロック間境界では熱移動係数、空調及び自然換気による熱の移動が生じる。シミュレーションではブロック間の熱移動が自然換気と熱移動係数の両方で生じるため、熱移動係数はオフィスガーデンを構成するブロック②～④でのみ取り扱い、熱流方向にかかわらず 2.3 W/m²・K (=2 kcal/m²・°C) とする。熱流が下向きとなりブロック間の混合が生じる場合は上下のブロック間で温度差換気による空気の移動が生じる様に換気回路網でモデル化を行う。同様に、水平方向のブロック境界で生じる熱移動も自然換気と空調気流による空気の移動が生じるものとする。放射熱伝達は閉空間における総合放射を線形式を用いて取り扱う。但し、内壁表面間の形態係数ではなく、閉空間内の平均放射温度に対して各面が放射熱伝達を行うものとする¹⁰⁾。

4.2 建物のモデル化

オフィスガーデンを含む 2フロア 1 ユニット (床面積: 上層 1673m²、下層 1852m²) をモデル化する。図 10 にモデル化を行った対象空間の平面図と断面図を示す。図中の数字がブロック番号である。オフィスガーデンは上下方向に 3 分割するが、各階にある事務室はそれぞれ一つのブロックとする。事務室の床下空間は独立したブロックとして扱い、天井プレナムは大梁を隔てて別のブロックとする。これに各階コア部の 2 ブロックを加えた計 31 ブロックに分割する。シミュレーションではブロックの境界となる梁、天井と OA 床は蓄熱量を持つ壁体として扱い、ブロック内の温度、および各壁面の表面温度は一樣とする。モデルの建築仕様は表 1 に基づき、窓は Low-E ペアガラス、外壁の断熱材は発泡ウレタン 15mm とする。スラブは実際の建物に用いている捨て型枠デッキプレートスラブと単位面積当た

(a) 平面図

(b) 断面図

図 10 シミュレーションモデルのブロック構成

りの熱容量が等しい厚さ110mmのコンクリートスラブとする。メタル天井は吸音材を含めた熱抵抗と熱容量が等しくなるように材料と厚さを選定する。壁体仕様と物性値を表5に示す。シミュレーションに用いた各種の対流熱伝達率を表6に示す。室内放射熱伝達率は $4.7\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、屋外側総合熱伝達率は $17.4\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とする。放射熱伝達を考慮する閉空間として、オフィスガーデンを構成するブロック②～④のみをまとめて1つの閉空間と扱い、他のブロックは、それぞれを1つの閉空間とする。

計算対象空間の上階と下階の建築仕様と使用状態は対象空間と同じとする。室内の蓄熱要素である家具や書類なども壁体として扱い、家具は鋼、書類は紙として床面積当たりの熱容量を与える¹¹⁾。

4.3 自然換気システムのモデル化

自然換気による空気の流れは床下とコアを除く各ブロックに接点に対応させて図11に示す換気回路網を構成し算出する。ブロック間の温度差換気は垂直面と水平面のいずれでも生じるものとし、ブロック間開口を単純開口と見なして流量係数を0.65を用い、有効開口面積を求め、節点を結ぶ枝の抵抗を算出する。但し、開口面積の大きなオフィスガーデン内とオフィスガーデン～事務所間ではブロック間開口を等分して面積の等しい二つの枝を設けて、二つのブロック間で生じる空気と熱の混合を評価する。また、外部開口に対しては表2に示す有効開口面積を用いる。消音エルボーの抵抗係数は縮小模型(縮率1/2)を用いて測定した値を用いている。また、オフィスガーデンとエレベーターホールのダンパー開度(100%が全開)に対応する圧力損失はメーカーで測定した流量と圧力損失の関

表 5 シミュレーションモデルの壁体と物性値

壁体	材料	熱伝導率 [W/m・K]	容積比熱 [kJ/m ³]	厚さ [mm]
外壁	プラスターボード	0.17	1029	22
	中空層			
	発泡ウレタン	0.029	47	15
	PCコンクリート	1.5	1900	161
	タイル	1.3	2008	23
梁	吹付岩綿	0.051	1004	60
	鋼	45.0	3619	50
	吹付岩綿	0.051	1004	60
	プラスターボード	0.17	1029	22
間仕切壁	中空層			
	プラスターボード	0.17	1029	22
スラブ	普通コンクリート	1.4	1933	110
天井板	プラスターボード	0.170	1029	22
	岩綿吸音板	0.064	335	22
OA床	カーペット	0.080	318	7

表 6 シミュレーションに用いた室内側対流熱伝達率

	熱伝達率 [W/m ² ・℃]	熱流方向
垂直面(室内壁面、梁窓面など)	4.7	—
水平面 (室内床面や天井板上面・下面など)	4.7	上向き
	2.3	下向き

図 11 各ブロックに対応する換気回路網

図 12 ダンパー開度と流量係数の関係

表 7 風圧係数表

	外部口番号	風向(4:東、8:南、12:西、16:北)															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
天井内空間	43,56	-0.3	-0.39	-0.41	-0.41	-0.48	-0.53	-0.34	-0.3	-0.29	-0.26	-0.51	-0.55	-0.47	-0.41	-0.28	-0.27
	44,57	-0.38	-0.28	-0.33	-0.4	-0.51	-0.4	-0.24	-0.18	-0.08	-0.1	-0.33	-0.52	-0.52	0.13	0.85	0.48
	45,58	-0.29	-0.38	-0.38	-0.41	-0.52	-0.59	-0.4	-0.2	0.02	0.08	-0.08	-0.44	-0.45	-0.43	-0.27	-0.28
	46,59	-0.28	-0.36	-0.38	-0.39	-0.5	-0.54	-0.4	-0.28	0.32	0.07	0.23	-0.11	-0.35	-0.48	-0.31	-0.29
	47,60	-0.23	-0.13	-0.02	-0.02	0.07	0.07	-0.04	-0.04	-0.01	-0.43	-0.32	-0.38	-0.33	-0.34	-0.25	-0.26
	48,61	-0.17	0.01	0.15	0.18	0.34	0.38	0.18	0.05	0.05	-0.3	-0.32	-0.37	-0.31	-0.28	-0.27	-0.28
	49,62	-0.13	0.1	0.25	0.3	0.5	0.57	0.33	0.12	0.03	-0.23	-0.32	-0.4	-0.31	-0.25	-0.31	0.29
	50,63	0	0.24	0.33	0.35	0.58	0.75	0.6	0.22	-0.01	-0.16	-0.32	0.41	-0.28	-0.25	-0.35	-0.38
	51,64	0.06	0.29	0.32	0.27	0.61	0.66	0.58	0.2	-0.04	-0.14	-0.32	-0.43	-0.29	-0.25	-0.33	-0.46
	52,65	0.1	0.34	0.29	0.14	0.3	0.37	0.37	0.11	-0.06	-0.13	-0.32	-0.45	-0.29	-0.23	-0.31	-0.54
	53,66	0.37	0.4	-0.04	-0.29	-0.72	-0.41	-0.25	-0.16	-0.08	-0.11	-0.31	-0.51	-0.31	-0.04	-0.1	0.03
	54,67	0.03	0.08	-0.13	-0.22	-0.59	-0.45	-0.26	-0.16	-0.09	-0.12	-0.31	-0.53	-0.37	0.05	-0.12	-0.14
O G	55,68	-0.07	0.17	0.34	0.41	0.58	0.77	0.57	0.19	0.01	-0.19	-0.33	-0.43	-0.29	-0.25	-0.35	-0.35
EPS	56,69	-0.3	-0.39	-0.41	-0.41	-0.48	-0.53	-0.34	-0.3	-0.29	-0.26	-0.51	-0.55	-0.47	-0.41	-0.28	-0.27

注)OG: オフィスガーデン

係から求めた流量係数(図12)を用いて式(1)に従い算出する。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q}{3600 \alpha S} \right)^2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで ΔP : 圧力損失 [Pa]
 ρ : 空気の密度 [kg/m³]
 Q : 風量 [m³/h]
 α : 流量係数 [-]
 S : 開口面積 [m²]

自然換気の許可条件は図13に従って判断し、許可条件は①外気温度(上限値及び下限値)、②外界風速(上限値)、③外気エンタルピー(上限値)、④外気露点温度(上限値)、⑤外気相対湿度(上限値を降雨条件の代りに用いる)とする。オフィスガーデンのダンパー開度(表4(a)に従って変化させる。STビルのような超高層建物では外壁面の風圧力の評価が重要となる。換気計算に用いる風圧力は、風洞実験により求めた13階の風圧係数(屋上高さ171mの風速で無次元化)に屋上高さにおける外界風速を掛け合わせて評価する(表7)。

外壁隙間量は、等面積の自然換気口として換気回路網に組み込み、外壁を通した隙間風を算出する。測定により隙間量は、1.25cm²/m²～1.67cm²/m²と推定されたため¹²⁾、外壁全体(面積1559m²)の隙間量を求め実開口面積(25.92m²)との比率を算出して表8に示す。この比率は単純開口と見なした隙間の有効面積と実開口面積の比率であるため、流量係数に相当する数値である。シミュレーションでは外壁隙間量の最大値と実開口面積の比率である0.01を自然換気を行わない場合の開口流量係数として用いて隙間量を評価している。

4.4 空調システムのモデル化

空調機は各事務室とオフィスガーデンの5系統とする。シミュレーションに用いた空調機能力を表9に示す。吹出風量は定風量とする。事務室の吹出位置は天井、吸込位置は天井プレナムの各ブロックとする。オフィスガーデンの吹出位置と吸込位置はいずれもブロック②の天井面である。排気は吸込口が設置されているブロックで行う。吹出温度は制御対象とするブロックの温度と設定温度を用いたPI制御により算出し上下限値を与える。本論文のシミュレーションは年間計算を行うため、吹出空気状態の計算は簡略的に行い、参考文献13を参考にして冷房時の吹出空気相対湿度が90%～95%の中間値である93%を上回る場合に除湿するものとする。

4.5 計算条件

(1) 気象条件

図 13 自然換気制御ロジック

表 8 外壁隙間量(有効面積)と自然換気口実面積との関係

	最小値	中央値	最大値
単位面積あたりの隙間量[cm ² /m ²]	1.25	1.45	1.67
外壁全体の隙間量[m ²]	0.195	0.226	0.260
換気口実面積との比率[-]	0.0075	0.0087	0.0100

表 9 シミュレーションに用いた空調機能力

	事務室	オフィス ガーデン	コア
冷房能力[kW]	75.4	28.0	2.9
暖房能力[kW]	53.8	9.0	2.3
送風量[m ³ /h]	12600	5920	862
外気量[m ³ /h]	1960	860	0
台数	4	1	2

シミュレーションには2003年5月～2004年5月に屋上で測定した風向風速をのぞく気象条件を使用し、2003年5月のデータは予備計算とする。気温、湿度、全天日射量、風向、風速の測定値を空気調和・衛生工学会の標準気象データ書式に変換して用いるが、絶対湿度は松尾の式¹⁴⁾、日射量の直散分離にはErbsモデル¹⁵⁾、長波放射量の算出にはBruntの実験式¹⁶⁾と月平均雲量平年値¹⁷⁾を用いる。屋上で測定した風速は前出のように年間の平均が小さく、周辺の建物と本建物自身の影響を受けていると考えられたため、東京管区気象台の測定結果を用いて屋上高さ(171m)の外界風速を以下の順序で推定した(図14)。図中の地上における風速プロファイルは地表面の粗度区分により異なり、いずれも都市キャノピー内部となる下

表 10 内部発熱とスケジュール

	平日	土曜日・日曜日	その他 (24h)
使用時間	9時 (空調8時)～21時	14時～19時	
人体発熱	0.1人/㎡	0.05人/㎡	最低1.9W/㎡
機器発熱	6.4W/㎡	2.6W/㎡	
照明発熱	13W/㎡	6.7W/㎡	

表 11 シミュレーションで想定した祝日

2003年	7月	8月	9月	10月	11月	12月
	21	10, 11, 12, 13, 14, 15, 16	15, 23	13	3, 23, 34	23, 30, 31
2004年	1月	2月	3月	4月	5月	
	1, 2, 3, 12	11	20	29	3, 4, 5	

表 12 シミュレーションケース

シミュレーション ケース	自然換気	許可条件外気温度 下限値 t_{0min}
NOVENT	なし	—
VENT15	あり	15℃
VENT12	あり	12℃

表 13 シミュレーションケースに用いた自然換気許可条件

外界条件	条件式
外気温度 t_0	$t_{0min} \leq t_0 \leq 26^\circ\text{C}$
外界風速 v_0	$v_0 \leq 8\text{m/s}$
外気エンタルピー h_0	$h_0 \leq 52\text{kJ/kg}$
外気露点温度 t_{dew0}	$t_{dew0} \leq 16^\circ\text{C}$
外気相対湿度 ϕ_0	$\phi_0 \leq 90\%$

図 17 シミュレーションにおける自然換気実行時間

部発熱と室使用時間を表10とする。オフィスガーデンは平日に使用され、発熱は人体0.1人/㎡と照明3W/㎡のみとした。なお、人体発熱は119W/人(顕熱55W/人、潜熱64W/人)とする¹³⁾。

(3) 空調機の制御と運転時間

室温設定値は冷房時25℃、暖房時23℃として、室使用時間に合せて空調を行う。従って、表11に示す祝日以外は空調を行う。

(4) シミュレーションにおける検討ケース

計算を行ったシミュレーションケースを表12、自然換気許可条件を表13に示す。自然換気を行わないケースをNOVENTとして、自然換気許可条件の外気温度下限値(t_{0min})を15℃するケースをVENT15、12℃するケースをVENT12とする。

4.6 換気風量と自然換気実行時間

図17にシミュレーションの各月における自然換気実行時間積算値をSTビル実績値と共に示す。VENT15はSTビルと同じ自然換気許可条件を用いているため、2003年9月を除いて大きな違いはない。年間の自然換気時間はSTビルが85.9日、ケースVENT15が97.9日、ケースVENT12は138.0日である。VENT12は許可条件の外気温度下限

図 14 気象台測定値を用いた外界風速の推定方法(参考文献17に加筆)

図 15 シミュレーションに用いた外界風速推定値

図 16 電力量時刻別平均値

部風速と都市境界層の外となる上部風速は指数則に従わず一定となる。①気象台周囲の粗度区分をVとして風速鉛直分布を仮定し¹⁸⁾、気象台の風速測定値から上部風速を算出する。②風向に応じた立地における粗度区分(ⅢもしくはⅣ)の風速鉛直分布に従い、上部風速から高さ171mの風速を推定する(図15)。外界風速の推定値は屋上の風速測定値より3m/s～4m/s高い。

(2) 室使用条件と空調機運転時間

事務室の使用時間と内部発熱を把握するためにBEMSで測定した照明電力とコンセント電力を整理する。図16に2003年6月～2004年5月の時刻別の照明電力量とコンセント電力量の平均値を平日と週末(土日)に分けて示す。週末にも照明電力が使われており、休日出勤が頻繁に行われていたと思われる。また、夜間でも照明やコンセント電力量はゼロではなく、オフィスの単位面積あたり2W程度の消費電力が見られる。この結果からシミュレーションに用いる内

表 14 シミュレーションの換気風量

	平均値[m ³ /h]	最大値[m ³ /h]
NOVENT	455	2010
VENT15	2813	30044
VENT12	3602	30044

値を変更したため、2003 年 9 月から 2004 年 5 月にかけて VENT15 よりも自然換気実行時間が増えている。

表 14 に 2003 年 6 月 1 日～2004 年 5 月 31 日における各ケースの自然換気風量の平均値と最大値を示す。自然換気許可条件を下げた VENT12 では自然換気実行時間が長くなるために平均値は大きくなるが、最大値は VENT15 とおなじ 30044m³/h である。事務室とオフィスガーデンを合計した容積 (10400m³) に基づく換気回数は 2.9 回/h となる。また、ケース NOVENT における換気風量平均値 455m³/h は隙間風に相当する数値である。同じく事務室とオフィスガーデンの容積に換算すると 0.04 回/h となる。

4.7 年間におけるスラブ温度の変化

(1) 自然換気の有無による比較

測定期間におけるスラブ温度日平均値の実測値と同じ自然換気許可条件を用いている VENT15 における計算値の相関図を図 18 に示す。図中の自然換気の有無は測定結果に基づき分類している。計算値が実測値より低い場合が多いが、実測値の 25℃ から 27℃ の範囲 (8 月 11 日～8 月 17 日) と 21℃ 近辺 (12 月 31 日～1 月 5 日) で計算値が実測値を上回っている。シミュレーションでは 8 月 10 日～8 月 16 日、12 月 30 日～1 月 3 日に空調機を運転していなが、室内に内部発熱を与えているためスラブ温度の計算値に影響を与えたと考えられる。スラブ温度計算値の近似直線の傾きは自然換気を行う場合と自然換気を行わない場合で大きな違いはなく、また自然換気の有無でスラブ温度計算値は実測値より低めに計算される傾向は異ならないと判断できる。図 9 と同様に空調を 1 時間以上行う日を抽出して、上層事務室スラブ温度日平均値を求め、外気温度日平均値との関係を図 19 に示す。各ケースで自然換気を実行する日 (自然換気あり) と自然換気を実行しない日 (自然換気なし) それぞれの外気温度とスラブ温度の関係を表す近似直線を求めて比較を行う。NOVENT の近似直線は自然換気無しのみである。VENT15 と VENT12 では自然換気ありの近似直線は自然換気なしよりも図では下に位置する。VENT15 と VENT12 の自然換気なしは NOVENT に較べて近似直線の傾きが急になり y 切片は小さい。この傾向は VENT15 より VENT12 に顕著である。自然換気ありでも VENT12 が VENT15 よりも、近似直線の傾きが急になり、y 切片が小さくなる。

(2) 実測結果との比較

ケース VENT15 の自然換気実行条件は ST ビルと同じであるが、外気温度が 5～10℃ におけるスラブ温度が ST ビル実測値よりも低い。シミュレーションでは実測した電力量から内部発熱を与えているが、OA フロア内の発熱など建物内の発熱分布と各日の発熱状況は ST ビ

図 18 スラブ温度日平均値の実測値と計算値 (VENT15) の相関

(a) ケース NOVENT

(b) ケース VENT15

(c) ケース VENT12

図 19 外気温度日平均値とスラブ温度日平均値の関係

表 15 自然換気によるスラブ温度日平均値の低下

外気温度	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
VENT15	0.32	0.33	0.35	0.36	0.38	0.39	0.41	0.42	0.44	0.46	0.47
VENT12	0.91	0.89	0.87	0.85	0.83	0.82	0.80	0.78	0.76	0.74	0.72
実測値	0.50	0.50	0.50	0.50	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.52	0.52

単位:℃

と異なると考えられる。自然換気を行う VENT15 と VENT12 の自然換気の有無による二つの近似直線を用いて同じ外気温度に対するスラブ温度日平均値の低下を求め、表 15 に示す。ST ビルでは自然換気により約 0.5℃ スラブ温度が低下する。VENT15 では 0.3℃～0.4℃ スラブ温度が低下しており、実測値に近い。表よりシミュレーションは自然換気の有無によるスラブ温度の違いをよく再現していると言える。また、VENT12 ではスラブ温度の低下が VENT15 よりも大きく 0.7～0.9℃ となる。

4.8 自然換気実行条件による空調機処理熱量と室内環境の違い

自然換気を行う場合の事務室（2フロア 2140.8m²）の空調機処理熱量と室内環境の変化を示す。空調機処理熱量はランニングコストに関係するため設計時には重要である。処理熱量は床面積当たりの数値で示す。

(1) 自然換気による冷房処理熱量の違い

図 20 に各月の冷房処理熱量積算値をケース VENT15 とケース NOVENT で比較して示す。自然換気実行時間が大きい 2003 年 10 月と 2004 年 4 月に削減効果が大きく、各月の削減量は二つのピークを持つ形になる。削減率は 10 月に 66%、4 月に 56% である。

図 21 に年間の処理熱量削減値を冷房（全熱）と暖房（顕熱）にわけて示す。ケース NOVENT の冷房処理熱量を 100% とした時のケース VENT15、VENT12 の削減率はそれぞれ 21% と 24% である。ケース VENT12 は年間の自然換気実行時間が VENT15 よりも約 40% 増えるために冷房処理熱量削減率は大きくなるが、実行時間ほど増加しない。原因は自然換気により空調開始時に室内温度が低下すると、空調設備が室を暖房して、自然換気による冷房負荷削減効果を打ち消してしまうためである。冷房処理熱量と暖房処理熱量の合計値では VENT15 が 182MJ/m²・年であるのに対して、ケース VENT12 は 187 MJ/m²・年と大きくなる。従って、ケース VENT12 は自然換気により室内を過剰に冷却していることになる。

(2) 室内環境の違い

居住域に自然換気口を設けているオフィスガーデンは自然換気の影響を受けやすい。図 22 に自然換気実行時間が大きい 2003 年 10 月と 11 月のオフィスガーデン室内温度（ブロック④温度）の頻度分布を示す。解析対象としたのは各月の平日 9:00～21:00 の毎正時の温度である。ケース VENT12 はケース VENT15 に比べて室内温度の頻度分布が低温側に移動していることが判る。既往の研究によれば自然換気を行う場合に不満足者が生じない室内温度範囲として 23℃～28℃ が上げられており⁴⁾、何れのケースでも温熱環境は大きくは変わらないと考えられる。

(3) 処理熱量と室内環境に関するまとめ

自然換気実行条件の外気温度下限値が異なるケース VENT15（下限値 15℃）とケース VENT12（下限値 12℃）の事務室における空調機処理熱量を比較したところ、ケース VENT12 は冷房処理熱量と暖房処理熱量の合計がケース VENT15 よりも増加し、自然換気による過剰な冷却が行われていると考えられる。どちらのケースも温熱環境に関するクレームの発生は少ないと考えられるため、処理熱量の点でケース VENT15 がケース VENT12 よりも自然換気実行条件としては適していると判断できる。この様に処理熱量と室内環境を合わせて検討すれば温熱環境的に問題の少ない自然換気制御手法における処理熱量削減効果が予測できるため、精度の高いランニングコストの算

図 20 各月における冷房負荷の比較

図 21 各ケースの年間空調負荷積算値

図 22 オフィスガーデン（ブロック④）温度の比較

定が可能となる。

5. まとめ

東京に立地する超高層建物 ST ビルで事務室として用いられている 2 フロアを一組とする基準階に自然換気併用空調を適用し、運用実態を把握した。また、実際の自然換気制御条件と外気温度下限値を 12℃ に下げた条件で自然換気が処理熱量に与える影響と温熱環境の変化を比較した。以下に本論文で得た成果をまとめる。

- (1) 外気温度、外界風速、外気エンタルピー、外気露点温度、降雨の有無を許可条件とした自然換気併用空調システムを ST ビルに適用した。2003 年 5 月～2004 年 5 月の自然換気実行時間は 97.1 日であった。2003 年 10 月と 2004 年 4 月には 20 日以上自然換気が行われており、中間期の自然換気実行時間が大きい。
- (2) 自然換気計算を行う換気回路網を組み合わせた熱環境シミュレーションを行い、実際の自然換気許可条件を用いた場合の事務室スラブ温度と ST ビルの実測値を比較した。シミュレーションでは自然換気を行う場合のスラブ温度が 0.3℃～0.5℃ 低下しており、自然換気により約 0.5℃ 温度が低下する ST ビルの実測結果をよく再現している。これより、自然換気が蓄熱要素に与える影響がシミュレー

ションでは適切に評価されていると言える。

(3) 実測調査時のSTビル自然換気制御条件を用いて処理熱量の削減効果を推定した。自然換気を行わない場合と較べて冷房処理熱量が年間で約21%減少する。許可条件の外気温度下限値を12℃に下げると冷房処理熱量は24%減少するが、暖房処理熱量が増加する。これは自然換気により室が過剰に冷却されるためである。

(4) 自然換気許可条件の外気温度下限値を12℃に変えた場合のオフィスガーデン室内温度の頻度分布を自然換気実行時間が長い2003年10月と11月に実際の許可条件の頻度分布と比較した。下限値を12℃とすると室内温度の頻度は低温側が増えるが、既往の研究における不満足者が生じない室内温度範囲であるため、温熱環境に関するクレームは何れのケースも変わらないと考えられる。

(5) 本論文で示した手法を用いれば処理熱量と室内環境を合わせた検討が可能となるため、温熱環境的に問題の少ない自然換気制御手法における処理熱量削減効果の予測ができる。これにより、適切な運用方法の検討が可能となる。

謝辞

STビルの測定とデータ解析に際しては鹿島建設株式会社建築設計本部平岡雅哉氏にご協力を頂いた。また、外壁に加わる風圧力の推定では鹿島技術研究所 近藤宏二博士ならびに鈴木雅靖博士に御助言を頂いた。記して感謝の意を表す。

注

注1) 風速は30秒周期で測定した過去10回の瞬時値の平均値を10分ごとに記録し、各月ごとにそれらの値を平均して算出した。

注2) 札幌に立地する、躯体蓄熱を行う建物で、2003年5月～2005年4月に図1に示す領域でスラブ温度を測定した²⁰⁾。外部は東面である。躯体蓄熱用吹出口に近く温度分布が大きいスラブ領域Aでは平面的に9ヶ所、スラブ領域Bでは3ヶ所、躯体蓄熱時に空調空気の移動が生じない領域Cでは1ヶ所の測定を行っており、各点では図2に示す断面位置で鉛直方向のスラブ温度分布を測定している。領域Aと領域Bで鉛直方向の測定点数を変えて(中央の1点と、断面の3点)同期間のスラブ温度日平均値を算出した結果を図3に近似曲線と合わせて示す例の点数で算出したスラブ温度日平均値もほとんど同じ値となる。

参考文献

- 1) 三浦克弘, 近藤宏二, 武政祐一, 平岡雅哉: 超高層ビルにおける風力換気を主体とした自然換気併用冷房に関する研究 第四報 実測値に基づく冷房負荷削減効果の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.717-718, 2005.9
- 2) 伊香賀俊治, 中村准二, 近本智行, 目黒弘幸, 三坂育正, 江崎晃: 明治大学ティータワーの空気調和・衛生設備, 空気調和・衛生工学, 第75巻第11号, pp.975-984, 2001.11
- 3) 三坂 育正, 樋口 祥明, 高橋 紀行, 迫博司, 高井啓明, 半澤久: 自然換気・ナイトバージシステムを導入した事務所ビルにおける省エネルギー効果の予測と実測評価, 空気調和・衛生工学会論文集 No.82, pp.39-48, 2001.7
- 4) 細井昭憲, 成田樹昭, 須永修通: 自然通風の温熱快適性に基づく制御方法と省エネルギー効果 自然通風に関する実測研究 その2, 日本建築学会環境系論文集, 第577号, pp.7-12, 2004.3
- 5) Givoni, B.: Effectiveness of Mass and Night Ventilation in Lowering the Indoor Daytime Temperatures. Part I: 1993 Experimental Periods, Energy and Buildings, 28, pp.25-32, 1998
- 6) 石野久彌, 永田明寛, 佐藤豊, 郡公子, 嶋田宣広, 山田祐三, 金政秀: 躯体蓄熱空調を適用した建物の熱環境・熱負荷の性能評価 第5報 室内の熱収支, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.1813-1816, 2003.9
- 7) 文部科学省 国立天文台編 理科年表 第77冊 丸善株式会社 2003.11
- 8) 長仲朗, 渡邊徹雄, 平山昌宏, 藤田尚志: 空気吹付け方式躯体蓄熱空調システムの性能実測(第1報) 実測概要とスラブ熱量変化等の実測結果, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.161-164, 2000.9

- 9) 戸河里敏, 荒井良延, 三浦克弘: 大空間における上下温度分布の予測モデル大空間の空調・熱環境計画手法の研究 その1, 日本建築学会計画系論文報告集, No.427, pp.9-19, 1991.9
- 10) 松尾陽: 2. 熱, 新建築学大系 10 環境物理, 彰国社, 1984
- 11) 石野久彌, 郡公子: 事務所建築における家具類の熱的影響に関する実測・実験研究, 日本建築学会計画系論文報告集 第372号, pp.59-66, 1987.2
- 12) 三浦克弘, 武政祐一, 平岡雅哉: 超高層ビルにおける風力換気を主体とした自然換気併用冷房に関する研究 第二報 超高層建物における竣工前外壁漏気特性の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.1097-1098, 2003.9
- 13) 井上宇市編 空気調和ハンドブック 改訂4版 丸善株式会社, 1996
- 14) 松尾陽: 湿り空気に関する実用的近似関数, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, pp.565-568, 1983.10
- 15) 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ, 2001.1
- 16) 日本建築設備士協会: 空調設備の動的熱負荷計算入門, 1980.3
- 17) 気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) (2008.9.23参照)
- 18) 日本建築学会: 建築物の振動に関する環境性能指針・同解説, 1991.4
- 19) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2004.9
- 20) 三浦克弘, 吉田治典: 寒冷地の躯体蓄熱暖房利用における冬季長期休暇後の運転方法, 日本建築学会環境系論文集, Vol.74, No.640, pp.711-719, 2009.6.

図1 スラブ温度測定位置(平面)

図2 スラブ温度測定位置(断面)

図3 鉛直内測定点数の違いによる日平均温度の比較

(2010年5月10日原稿受理, 2010年10月19日採用決定)