

有孔ダクト天井を用いた自然換気システムの設計手法に関する研究 (その3) 緩和法を用いた換気回路網計算によるシャフト内排熱利用効果に関する検討 Design Method of Natural Ventilation System with Perforated Metal Duct Ceiling (Part3) Influence of Waste Heat Utilization in Shaft using Flow Network Calculation with Relaxation Method

○若狭 弥保 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学)
小林 知広 (大阪大学) 桃井 良尚 (福井大学)
田中 宏明 (日建設計) 藤井 拓郎 (日建設計)
守 雅俊 (日建設計) 崔 ナレ (大阪大学)

Miho WAKASA^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Tomohiro KOBAYASHI^{*1} Yoshihisa MOMOI^{*2}

Hiroaki TANAKA^{*3} Takuro FUJII^{*3} Masatoshi MORI^{*3} Narac CHOI^{*1}

^{*1} Osaka University ^{*2} University of Fukui ^{*3} Nikken Sekkei Ltd.

Installing natural ventilation system in high-rise buildings helps us to save energy consumption of heating, ventilation and air conditioning (HVAC). In this study, we propose to provide two ventilation shafts of the building with waste heat from cogeneration system in order to enhance the effect of buoyancy-driven ventilation. To estimate the effect, we create flow network calculation model with relaxation method and examined the best way of the distribution rate of waste heat by using the model.

1. はじめに

一般的なオフィスにおいて換気空調にかかる消費エネルギーは全体の約 50% に及び¹⁾、自然換気導入による大きな省エネルギー効果が期待されている。しかし多くの自然換気口開放条件では 15℃ 程度が下限値と設定されるが、コールドドラフトによる快適性への影響が懸念される²⁾。また、間仕切壁などの室をまたぐ部分では、換気経路の確保の為自然換気用の欄間やパスダクトが必要となる³⁾。本研究では下面部がパンチングメタルで構成された角ダクトを室の天井空間に設置し、ダクト内を新鮮外気が通過することで水平方向の換気経路を確保するシステムを提案する。しかし本システムでは、換気経路内で生じる抵抗が一般的な自然換気システムと比べて大きく換気量が減少する可能性がある。そこで換気量の促進を図って、重力換気を行うシャフト内にコージェネレーションで生じた排熱を投入する。本報では自然換気口～室内給気面の合成有効開口面積の算定手法及び緩和法を用いた熱・換気回路網計算手法の提案を行う。

2. 自然換気システム概要

研究対象とする自然換気導入建物では、風力とシャフト内の浮力を換気駆動力としており、下記に挙げる 2 つのシステムを導入予定である。

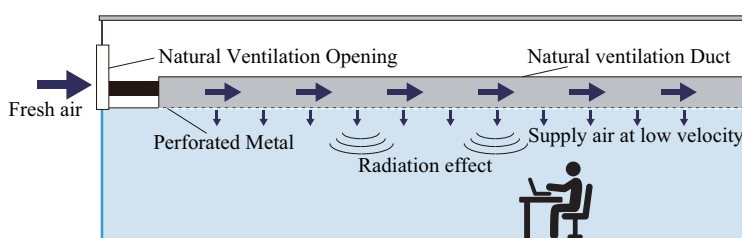


Fig. 1 System of natural ventilation

2.1 自然換気用ダクト

自然換気システムと自然換気用ダクトの概念図を Fig.1 に示す。自然換気口から給気された新鮮空気は有孔ダクトを通して室の奥まで運ばれる。自然換気用ダクトの下面部はパンチングメタルで構成されているため、新鮮空気はこの開孔から室内に低風速で給気される。本

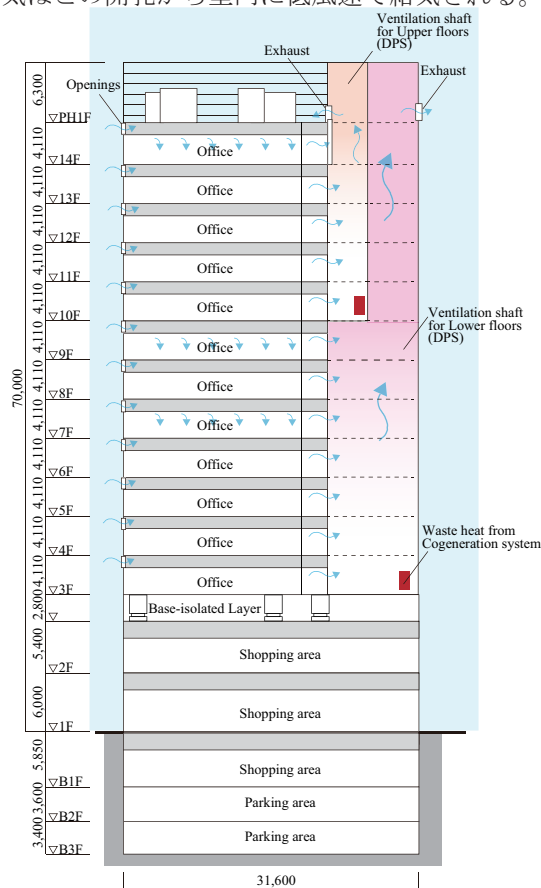


Fig.2 Schematic of target building

システムのメリットは主に3つ挙げられる。

- ・ドラフトリスクの抑制による自然換気可能期間の拡大
- ・冷却されたパンチングメタルからの放射による快適性
- ・間仕切り壁のある室空間でも自然換気の導入可能

2.2 シャフト内排熱利用

コージェネレーションシステムから生じる排熱をシャフト内下部に投入し、重力換気を促進する。

2.3 建物概要と換気経路

本システム導入予定の建物概要図を Fig.2 に示す。自然換気口から導入された外気は、有孔ダクトから微気流で室内へ給気される。排気は天井面に設置された排気用パネルから行われ、天井チャンバーからパスダクトを通してシャフトへと誘引される。シャフトは壁で隔たれて低層階・高層階用に二つに分離しており、3～9階では低層階用シャフト、10～13階では高層階用シャフトから排気が行われる。シャフトから室内への空気の逆流を防ぐため、14階の排気は単独ダクトから行われる。

3. 自然換気口～室内給気面までの有効開口面積

対象とする自然換気システムでは、自然換気口から自然換気用ダクトのパンチングメタルを通じて室内へ給気が行われるため、有効開口面積の算出を行う必要がある。Fig.3 に自然換気口～室内給気面までのアイソメ図を示す。自然換気口と自然換気用ダクトの間には大梁の梁貫通、小梁との干渉回避のため、曲がりのある直径 350 mm の円形の接続用ダクトが存在している。Fig.3 の自然換気口～接続用ダクトで生じる圧力損失 Δp_i は Table

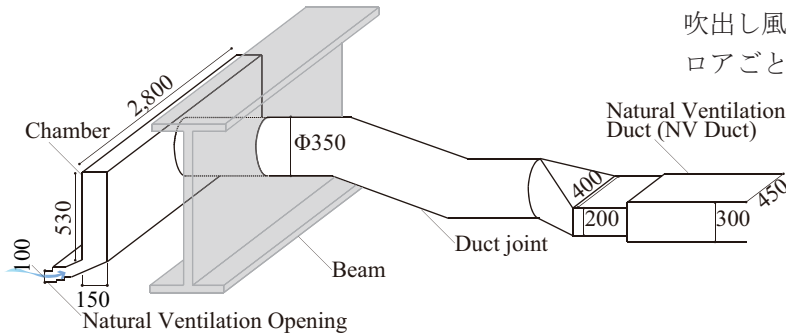


Fig.3 Natural ventilation opening, duct joint, and natural ventilation duct (mm)

Table 1 List of resistance and pressure loss factor (ζ)

Type	Site	Symbol	ζ
Birdproofing net, Inflow	Opening	ζ_1	1.2
Friction 1	Opening, Chamber	ζ_2	0.026
Friction 2	Duct joint	ζ_3	0.15
Bent 1	Opening → Chamber	ζ_4	0.40
Bent 2	Chamber → Duct joint	ζ_5	0.83
Bent 3	Duct joint	ζ_6	0.13
Bent 4	Duct joint	ζ_7	0.13
Extension 1	Opening → Chamber	ζ_8	0.11
Extension 2	Chamber	ζ_9	0.51
Extension 3	Duct joint → NV Duct	ζ_{10}	0.29
Reduction 1	Chamber → Duct joint	ζ_{11}	0.87
Reduction 2	Duct joint	ζ_{12}	0.028

1 に示す 12 点が考えられる^{4),5)}。これらの合計 Δp_{all} は、 ζ 、流量 Q 、密度 ρ 、断面積 A_i を用いて以下の式で表される。

$$\Delta p_{all} = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \zeta_i \cdot \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{A_i} \right)^2 \quad (1)$$

ここでダクト内を通過する風量と密度が一定であるから Q を左辺へ移項すると、流量 Q と圧力差 Δp_{all} の関係は

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\zeta_i}{A_i^2}}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p_{all}} \quad (2)$$

よって合成有効開口面積 αA は以下で表すことができる。

$$\alpha A = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\zeta_i}{A_i^2}}} \quad (3)$$

ダクト平面図を Fig.4 に示す。17 個の自然換気用ダクトが存在し、接続ダクトの長さや曲がりにはダクトごとに異なるため、パターン分けを行って計算した。計算結果より、自然換気口 1 つあたりの自然換気口～接続用ダクト流量係数は平均 0.35 (有効開口面積 0.098 m²) となった。自然換気用ダクトの有効開口面積は上記の計算手法で求めることは困難である。そこで既報⁶⁾ で構築した一列法と呼ばれる回路網計算手法を用いたダクト内の吹出し風量分布を求めるモデルにより各ダクトの室内外差圧と換気量の関係を求めて有効開口面積を求め、これを並列結合して 1 フloor ごとの有効開口面積を求めた。その結果、吹出し風量分布が均一となり、換気量が最大となる 1 フloor ごとの有効開口面積は 1.53 m² と算定された。計算

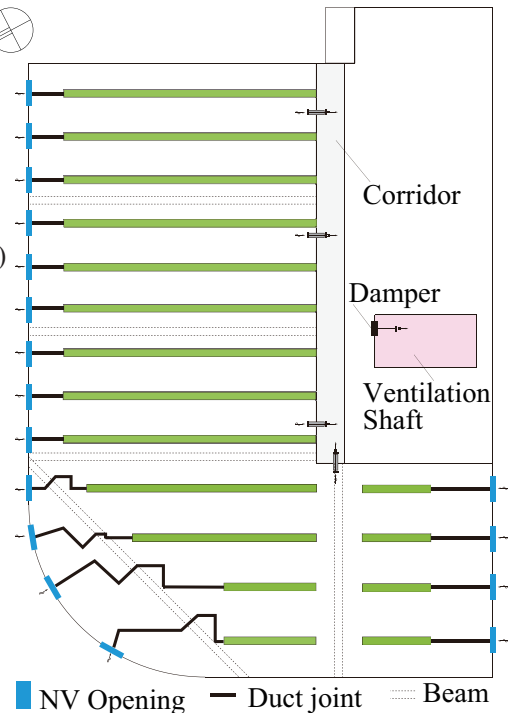


Fig.4 Plan of NV ducts

手法は既報⁶⁾を参照されたい。1フロアの実開口面積の合計4.76 m²で除した流量係数は0.32となり、計算上自然換気用ダクトにより流量係数が10%減少した。

4. 緩和法を用いた換気回路網モデル

4.1 ガウスザイデル法

連立方程式の近似解は反復法を使用した収束計算により求めたが、収束の安定性とプログラミングの簡便性から、緩和法の一つであるガウス・ザイデル法を用いた。ガウス・ザイデル法とは、計算時点までに得られた最新の近似解によって、次の近似解を計算し、収束を早める方法である。例えば、Fig.5の場合、矢印の順に計算を行う場合節点P(i,k)のj+1回目の近似解P(i,k)^{j+1}を得るとき、周囲の枝で繋がれた4点を用いて計算するが、節点P(i,k+1)とP(i+1,k)ではj回目の近似解を用いる一方で、P(i-1,k)とP(i,k-1)では既にj+1回目の計算が終了しているため最新の近似解を用いてP(i,k)^{j+1}の計算を行う。

4.2 換気回路網計算モデル

研究対象建物のモデルをFig.6に示す。低層用・高層用シャフトで換気経路が完全に分離していることから、二つのモデルを作成して計算を行う。フローチャートをFig.7に示す。各室の圧力、温度を仮定し、流量収支計算を行って圧力を修正した後、熱量収支計算を行って温度を修正する。全ての室の流量・熱量収支が収束判定

値を満たすまでこれを繰り返す。例えば、Fig.8において、隣り合う室(i-1, k)から室(i, k)へ流入する流量Q_{i-1,k}は、(流入を正とする)

$$Q_{i-1,k} = \text{sgn}((P_{i-1,k}^{j+1} - \rho_{i-1}^{j+1} \cdot g \cdot h_{(i-1,k),E}) - (P_i - \rho_i \cdot g \cdot h_{(i,k),W})) \cdot \alpha A_{(i,k),W} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_{i-1,k}^{j+1}} |(P_{i-1,k}^{j+1} - \rho_{i-1}^{j+1} \cdot g \cdot h_{(i-1,k),E}) - (P_i - \rho_i \cdot g \cdot h_{(i,k),W})|} \quad (4)$$

となり、定常状態では室(i,k)で流量収支が成り立つから、以下の式E(P_i^{j+1})が成立するはずであり、これが成立するシャフト内圧力P_iを二分法により求める。

$$E(P_{i,k}^{j+1}) = \sum Q_{i,k} = Q_{i-1,k} + Q_{i+1,k} + Q_{i,k-1} + Q_{i,k+1} = 0 \quad (5)$$

同様に室(i-1, k)から室(i, k)へ流入する熱量H_{i-1,k}は、

$$H_{i-1,k} = (\text{sgn}(Q_{i-1,k}) + 1)/2 \cdot c_p \cdot \rho_{i-1,k}^{j+1} \cdot Q_{i-1,k} \cdot T_{i-1,k}^{j+1} - (\text{sgn}(Q_{i-1,k}) - 1)/2 \cdot c_p \cdot \rho_{i,k} \cdot Q_{i-1,k} \cdot T_{i,k} \quad (6)$$

となり、シャフトi内で熱量収支が成り立つから、

$$E(T_{i,k}^{j+1}) = \sum H_{i,k} = H_{i-1,k} + H_{i+1,k} + H_{i,k-1} + H_{i,k+1} = 0 \quad (7)$$

となるシャフトi温度T_iの近似解を二分法で求める。

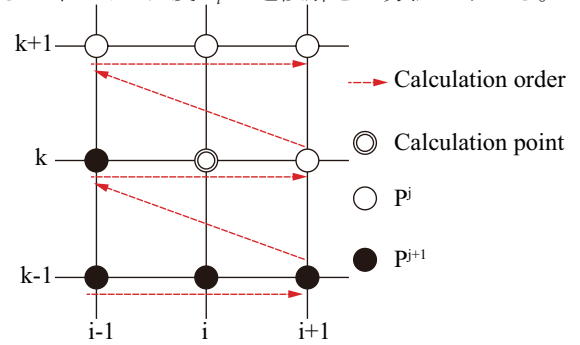


Fig.5 Schematic of Gauss - Seidel method

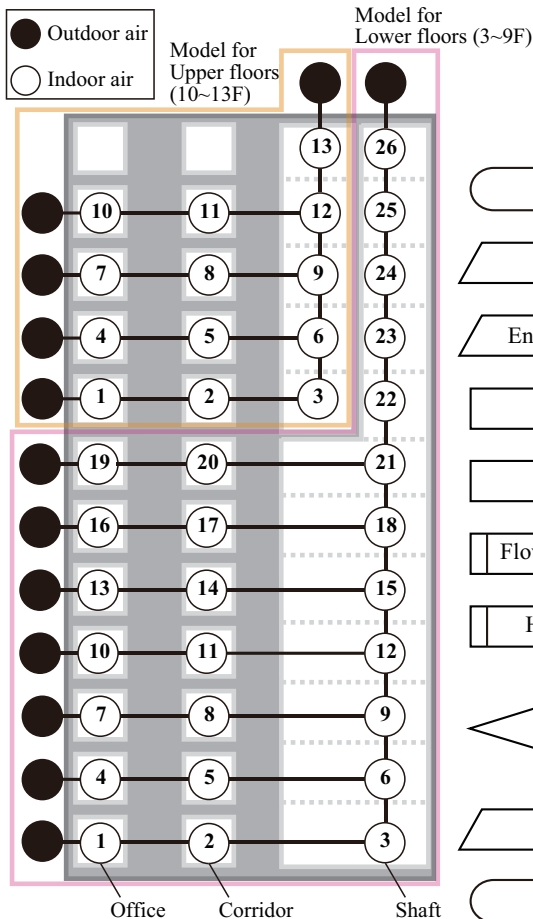


Fig.6 Network calculation model

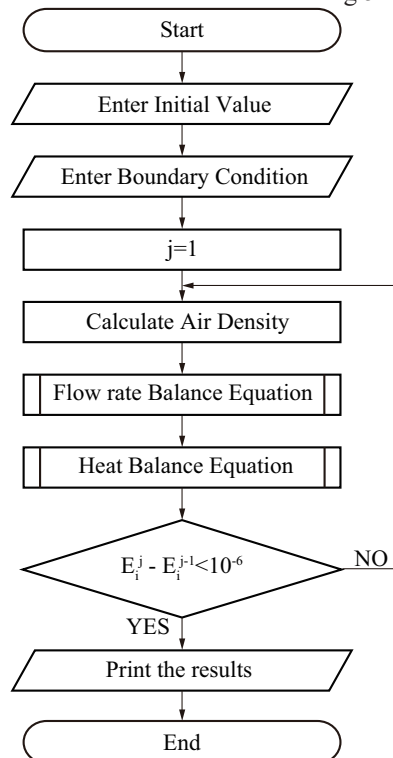


Fig.7 Flowchart of network calculation

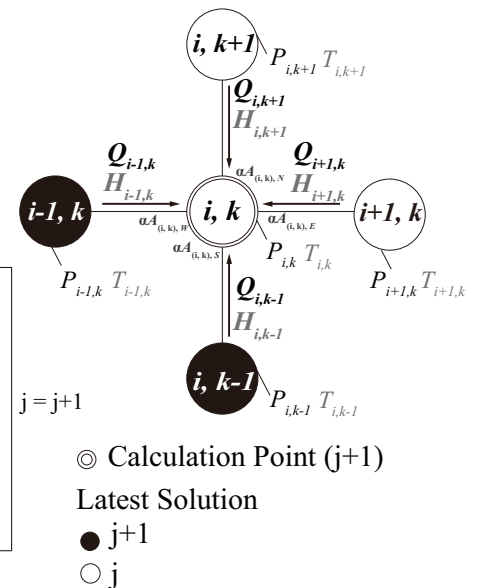


Fig.8 Calculation example

なお、室 (i,k) 内の空気密度 $\rho_{i,k}$ は温度 $T_{i,k}$ を用いて以下の式で求められる。

$$\rho_{i,k} = \frac{373.25}{273.17 + T_{i,k}} \quad (8)$$

4.3 計算条件

境界条件、開口条件を Table 2,3 に示す。外気温 18℃、無風条件とした。排熱量は合計 130,000W とし、発熱量は執務室で 1フロア当たり 10,120W とした。計算条件を Table 4 に示す。低層・高層用シャフト投入する排熱の割合を変化させ、排熱を行わない場合との比較検討を行った。排熱投入は各シャフト内の 3 階、10 階の床面高さで行うこととする。

4.4 計算結果

各階換気量を Fig.9 に示す。シャフト内への排熱利用により、3 階・10 階の室内換気量が大きく増加する。排熱利用を行う場合、各階換気量の分布が大きくなるため、上層階のハイブリッド空調の採用や下層階の排気ダンパーの開度調整など、各階で最適制御を行うことが省エネルギー性能向上に繋がると考えられる。また、排熱投入を行わない Case1 と比較して総換気量が最大となる

Case3 では約 30% の換気量の増大が予測された。

5. まとめ

本報では、有孔ダクト天井を用いた自然換気システムにおける有効開口面積の算定手法及び緩和法を用いた換気回路網計算手法の提案を行った。得られた知見に示す。

・シャフトを含む換気回路網計算による自然換気量予測にも緩和法の適用が可能である。

・シャフト内への排熱投入により換気量が促進される。

今後は風力が各階換気量分布に与える影響の把握や室内気流性状の予測を行う予定である。

Table 2 αA of openings

$\alpha A_{inlet} [m^2]$	1.53
$\alpha A_{pass} [m^2]$	0.80
$\alpha A_{damper} [m^2]$	0.71
$\alpha A_{exhaust, lower} [m^2]$	4.45
$\alpha A_{exhaust, upper} [m^2]$	4.45

Table 3 Boundary condition

Outside Temperature [°C]	18
Wind	Windless
Specific heat [J/kg · °C]	1,006
Heat generation (Office)[W/floor]	10,120
Heat generation (Total Waste Heat)[W]	130,000

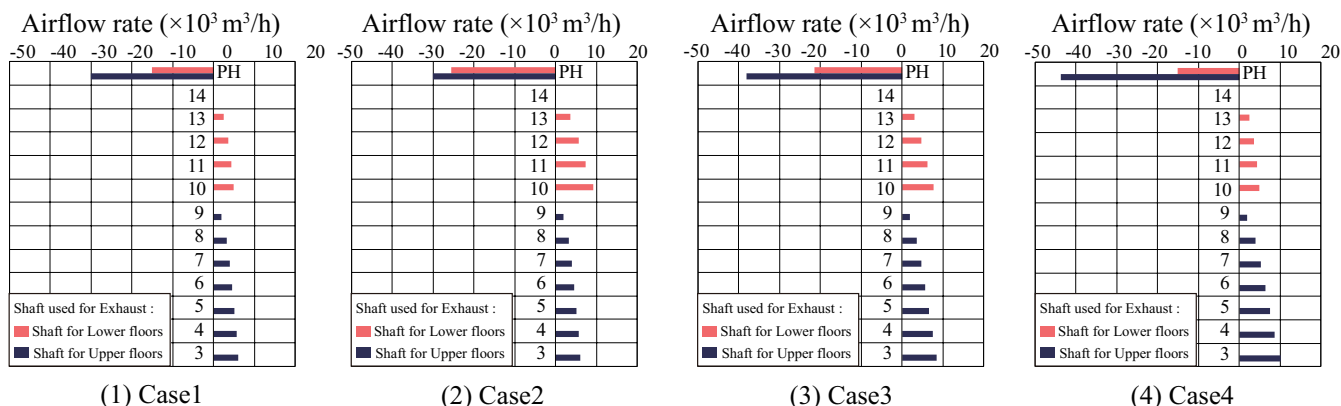


Fig. 9 Airflow rate distribution

Table 4 Calculation condition

	Shaft for Lower floors	Shaft for Upper floors
Case1	0[W]	0[W]
Case2	0[W]	130,000[W]
Case3	65,000[W]	65,000[W]
Case4	130,000[W]	0[W]

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁 省エネルギー対策課：Z E B ロードマップ検討委員会における Z E B の定義・今後の施策など (2015), p.5
- 2) 山本佳嗣, 田辺新一：自然換気システムの換気口開放条件に関する研究 (2016), 日本建築学会環境系論文集, pp.375-384
- 3) 日本建築学会：実務者のための自然換気ハンドブック, 技報堂出版 (2013), pp.41-43
- 4) 空気調和・衛生工学会 空気調和・衛生工学便覧 3 空気調和設備編 p.181
- 5) 石原正雄 建築換気設計 (1969) p.282, 朝倉書店
- 6) 若狭ら (2020) 有孔ダクト天井を用いた自然換気システムの設計手法に関する研究 (その 2) 等分布吹出しとなる開口率分布の計算手法, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, D-21

記号表

Δp_{all}	: 自然換気口～接続ダクトの圧力損失	[Pa]
Δp_i	: 位置 i で生じる圧力損失	[Pa]
ζ_i	: 位置 i の損失係数	[-]
ρ	: 管内を流れる空気密度	[kg/m ³]
Q	: 管内を流れる流量	[m ³ /s]
A_i	: 断面積	[m ²]
αA_{all}	: 自然換気口～接続ダクトの有効開口面積	[m ²]
$P_{i,k}^j$	: 室 (i, k) の床面静圧 (j 回目の計算結果)	[Pa]
$\rho_{i,k}^j$	: 室 (i, k) の空気密度 (j 回目の計算結果)	[kg/m ³]
g	: 重力加速度	[m/s ²]
$h_{(i,k),W}$	: 室 (i, k) の床面から左側開口の高さ	[m]
$h_{(i,k),E}$	: 室 (i, k) の床面から右側開口の高さ	[m]
αA_{damper}	: 排気ダンパーの有効開口面積	[m ²]
αA_{shaft}	: シャフトの有効開口面積	[m ²]
αA_{inlet}	: 自然換気口～室内給気面の有効開口面積	[m ²]
αA_{pass}	: パスダクトの有効開口面積	[m ²]
$\alpha A_{exhaust, lower}$	: 低層用シャフト排気口の有効開口面積	[m ²]
$\alpha A_{inlet, upper}$	: 高層用シャフト排気口の有効開口面積	[m ²]
$H_{i,k}$	: 室 (i, k) へ流入する熱量	[W]
C_p	: 空気の比熱	[J/kg°C]
$T_{i,k}^j$	: 室 i の温度 (j 回目の計算結果)	[°C]
$Sgn()$	: 符号関数 ($() > 0$ のとき +1, $() < 0$ のとき -1)	