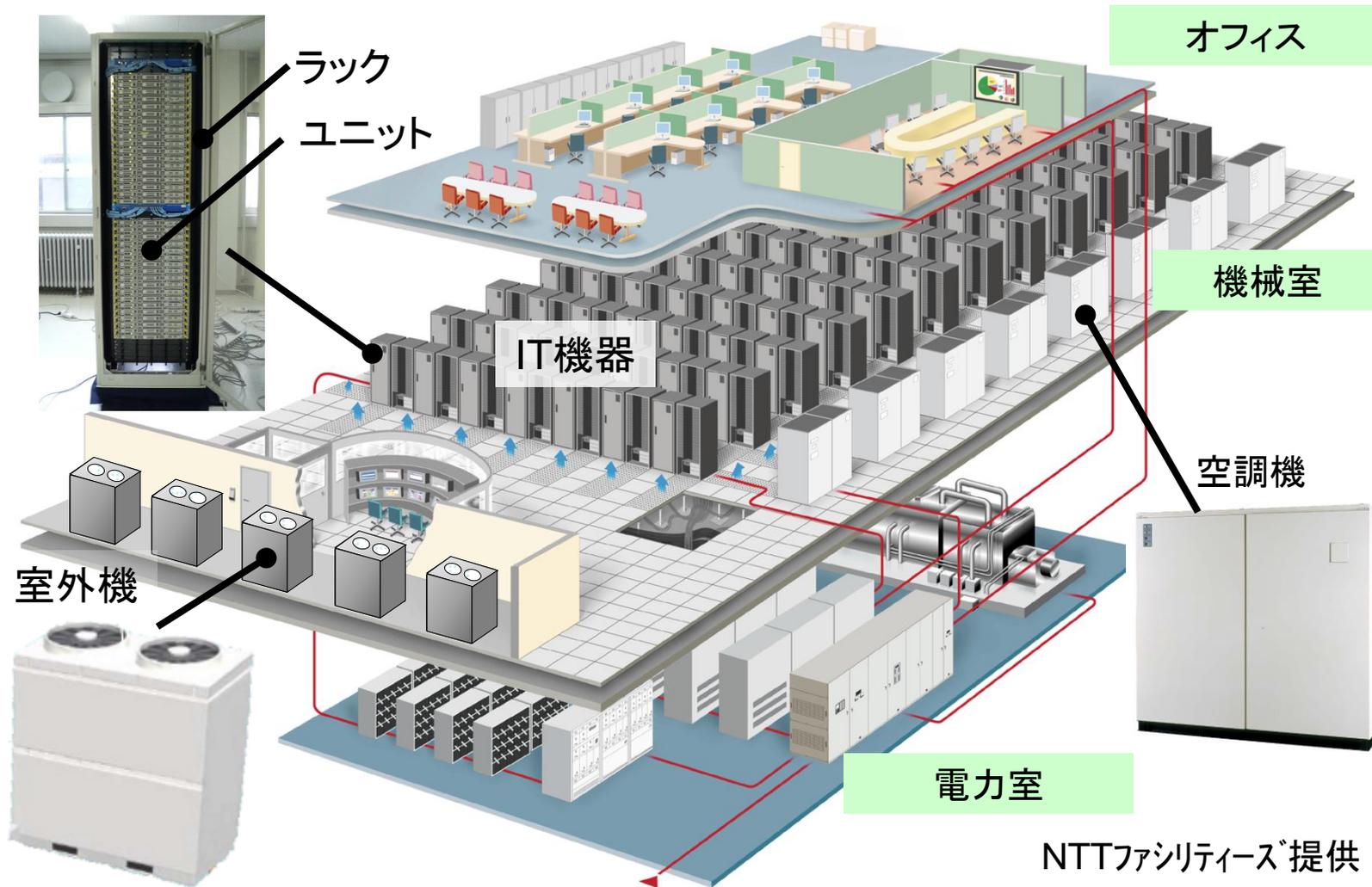


**2014年 日本建築学会賞(論文)受賞業績の紹介**  
**高発熱機械室の空調方式に関する一連の研究**

**北海道大学 大学院工学研究院**  
**羽山 広文**

- **情報通信サービスの普及**
  - 電話(即時伝達能力)+電子計算機(情報処理能力)を融合したインフラが整備
  - PCや携帯端末を用い「いつでも、どこでも、何でも、誰でも」  
⇒ 「ユビキタス社会」の構築
- **情報通信サービスの基幹設備 ⇒ データセンタ(DC)**
  - 高発熱のIT機器が大量設置 ⇒ 高発熱機械室
  - 室内発熱密度 1kW/m<sup>2</sup>超え ⇒ 年間を通じた冷却
  - エネルギー多消費型施設 ⇒ 空調設備の省エネルギー化
  - 空調設備の停止 ⇒ 室温上昇 ⇒ サービス停止 ⇒ 社会混乱
- **DC ⇒ 高発熱機器が設置された生産施設への応用**



|      |                 |                           |
|------|-----------------|---------------------------|
| 発熱密度 | 一般的なオフィス        | 50~150 W/m <sup>2</sup>   |
|      | 情報通信機械室 (IT機器室) | 300~2000 W/m <sup>2</sup> |

- **主眼項目：**

**高発熱機械室を対象とした空調方式に関し**

- **室内温熱環境の適正化(機器の適正な動作を保証)**
- **空調設備の高効率化(省エネルギー化)**
- **空調設備の信頼性確保(サービスの安定提供)**

- **検討項目：**

- **機器冷却特性を考慮した空調方式**
- **集中設置される室外機の適正配置**
- **空調設備の信頼性評価**
- **生産施設の置換換気方式への適用**

## ● 序章：研究の背景と目的

## ● 第1章：当該研究分野や隣接分野の発展状況の概説

## ● 第2章：機器冷却特性を考慮した空調方式

- 空調気流方式の適用領域の把握、○ 発熱に対応した気流分配設計方法、○ 機器の発熱量に対応した空調方式、○ 機器の再循環を考慮した空調方式の高効率化、○ 再循環を考慮したIT機器の冷却特性評価

## ● 第3章：集中設置される室外機の適正配置

- 屋上設置された室外機の吸込み温度性状、○ 重層設置された室外機の吸込み温度性状、○ 集中設置される室外機の適正配置計画

## ● 第4章：空調設備の信頼性評価

- 室温変化を考慮した空調設備の信頼性評価、○ 空調機停止後の室温上昇の予測
- 複雑なシステム構成に対応した信頼性評価、○ 信頼性の要因分析と冗長構成の評価

## ● 第5章：生産施設の置換換気方式への適用

- 置換換気される室内の機器排熱が室温分布へ与える影響

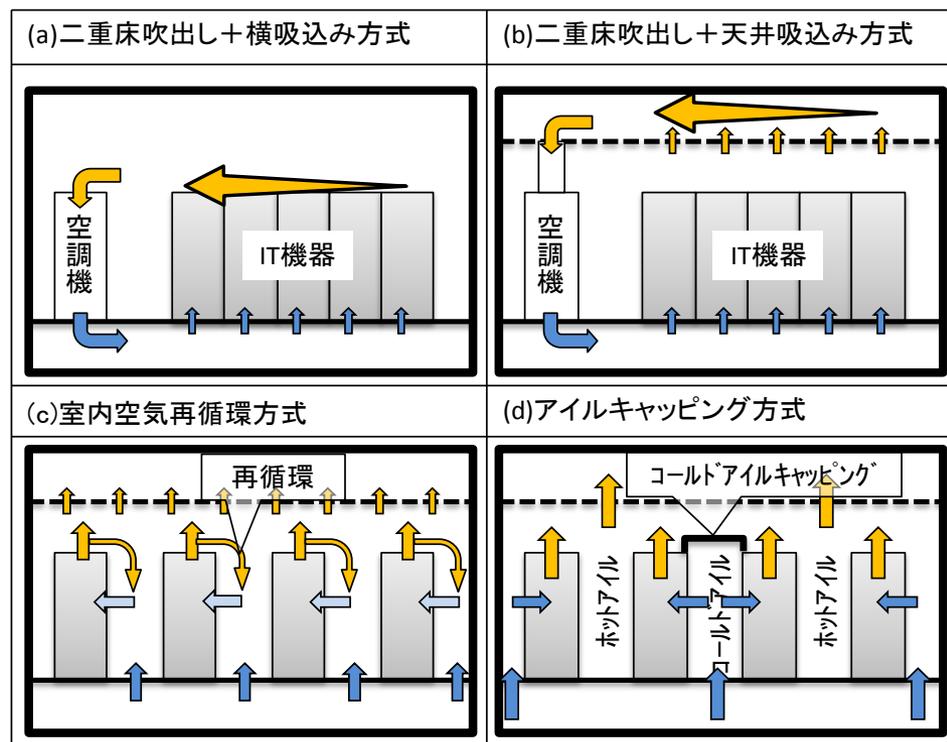
## ● 結：研究の意義・波及効果・今後の展開

## ● 本研究の位置づけ

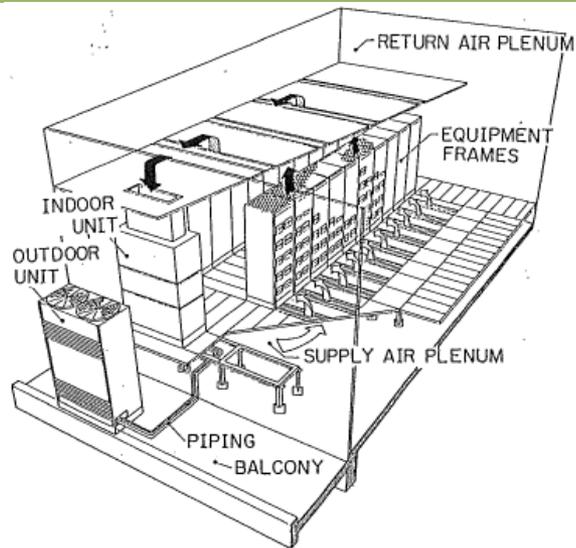
- 空調運転時間が長く年間を通じ冷却が必要
- 室内発熱密度が高く、エネルギー多消費型施設
- 機器の冷却には適正な機器吸込み温度・室温を確保

## ● 課題

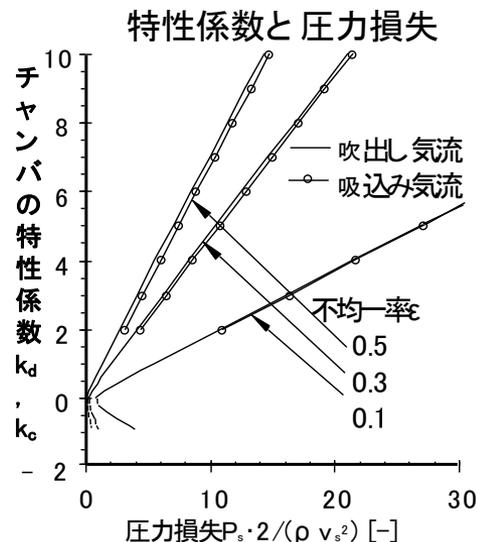
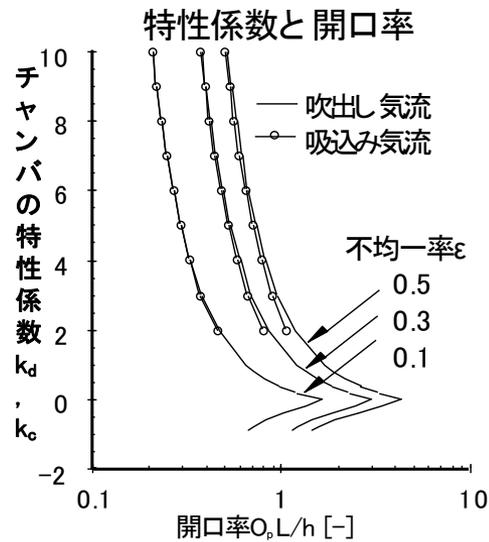
- 空調効率決定の要因究明
- 空気搬送動力の削減法
- IT機器周辺の再循環把握
- IT機器の要求温度条件を  
満たしながら、最少の空調給気量を実現する方法  
の計画・設計方法の確立



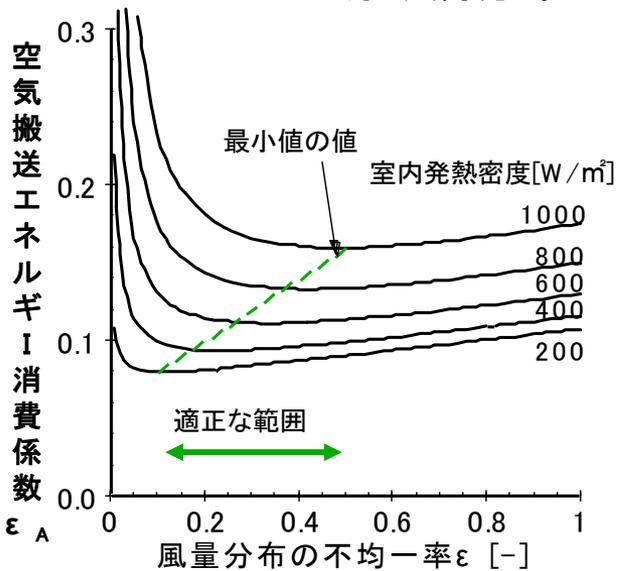
各種空調気流方式論文1)



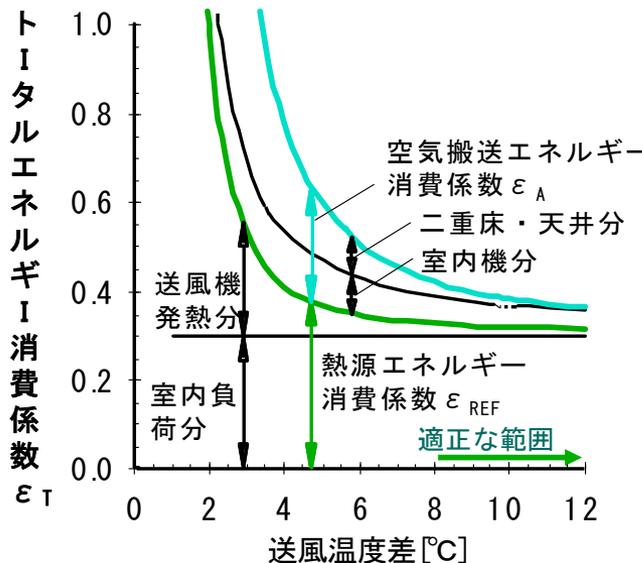
二重床・天井方式論文3)



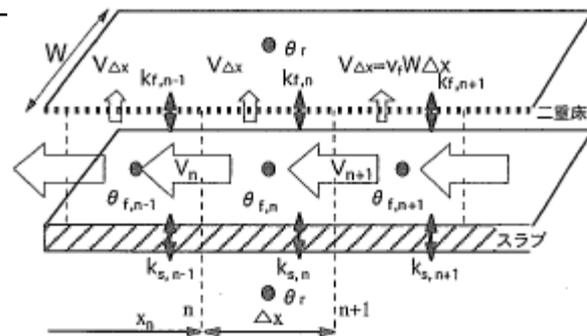
チャンバの特性係数と圧力損失・開口率論文4)



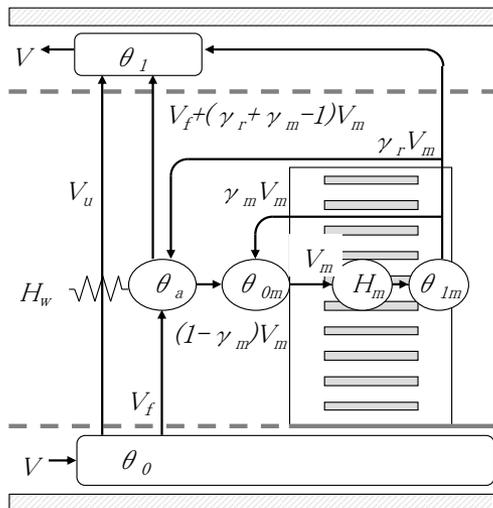
不均一率と空気搬送エネルギー消費係数論文4)



トータルエネルギー消費の評価論文4)

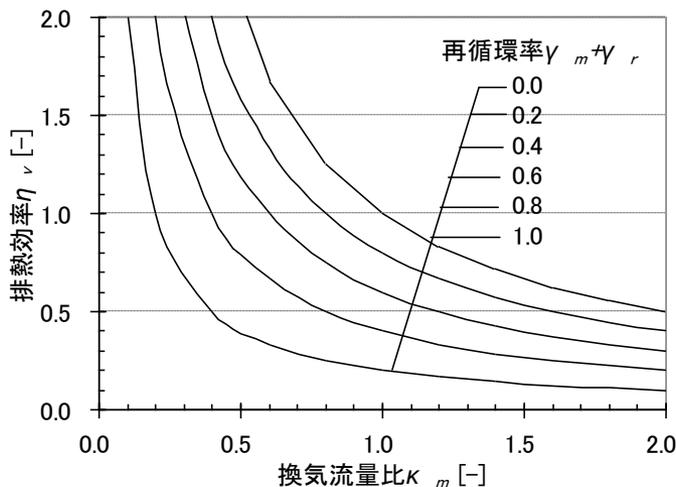


チャンバの熱移動モデル論文5)

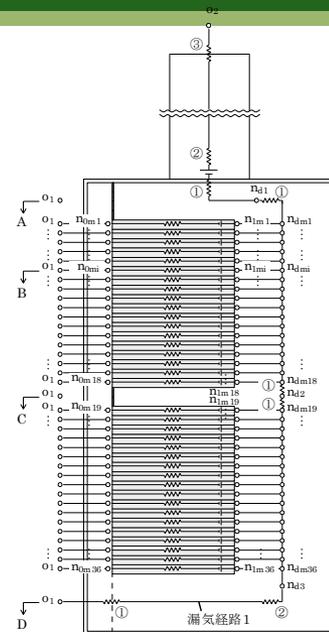


機器冷却モデル論文9)

機器冷却特性の評価指標論文1),9)



換気流量比と排熱効率・再循環比の関係論文9)



ラック周辺の換気回路網モデル論文10)

エネルギー消費量の評価指標論文1),9)

| 評価指標                    | 物理的意味   | 定義式   |
|-------------------------|---|---|
| 換気流量比 $\kappa_m$        | 機器換気量 $V_m$ に対する空調給気量 $V$ の比  | $\kappa_m = \frac{V}{V_m} = \frac{\theta_{1m} - \theta_{0m}}{\theta_1 - \theta_0}, \kappa_m \geq 0$   |
| 排熱効率 $\eta_v$           | 空調給気量 $V$ に対する機器の冷却に有効な風量 $V_f$ の比  | $\eta_v = \frac{V_f}{V} = \frac{V - V_u}{V} = 1 - \frac{V_u}{V} = \frac{\theta_1 - \theta_0}{\theta_{1m} - \theta_0}$<br>$V_f = \eta_v \kappa_m V_m, V_u = (1 - \eta_v) \kappa_m V_m$ |
| 機器吸込み温度差比 $m_{0m}$      | 空調温度差 $(\theta_1 - \theta_0)$ に対する機器吸込み温度差 $(\theta_{0m} - \theta_0)$ の比      | $m_{0m} = \frac{\theta_{0m} - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} = \frac{\eta_v \kappa_m \gamma_m + \gamma_r}{\eta_v (1 - \gamma_m)}$   |
| 再循環温度差比 $m_a$           | 空調温度差 $(\theta_1 - \theta_0)$ に対する再循環温度差 $(\theta_a - \theta_0)$ の比           | $m_a = \frac{\theta_a - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} = \frac{\gamma_r}{\eta_v (1 - \gamma_m)}$  |
| 機器吹出し温度差比 $m_{1m}$      | 空調温度差 $(\theta_1 - \theta_0)$ に対する機器吹出し温度差 $(\theta_{1m} - \theta_0)$ の比      | $m_{1m} = \frac{\theta_{1m} - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} = \frac{\eta_v \kappa_m + \gamma_r}{\eta_v (1 - \gamma_m)}$  |
| 総合再循環比 $\gamma_a$       | 室内再循環比 $\gamma_r$ と機器再循環比 $\gamma_m$ の和                                       | $\gamma_a = \gamma_m + \gamma_r$<br>$\gamma_r = \frac{\kappa_m \eta_v m_a}{m_{0m} - m_a + \kappa_m}, \gamma_m = \frac{m_{0m} - m_a}{m_{0m} - m_a + \kappa_m}$                         |
| SHI (Supply Heat Index) | 空調機から吹出した冷気が装置に吸込まれるまでに上昇した熱量 $\delta Q$ とラックの排気側で上昇した全熱量 $(Q + \delta Q)$ の比 | $SHI = \frac{\delta Q}{Q + \delta Q} = \frac{\gamma_a}{1 + \gamma_a}$   |

| 評価指標                                | 物理的意味   | 定義式  |
|-------------------------------------|---|--|
| 空気搬送エネルギー消費係数 $\varepsilon_{FA}$    | 室内の熱負荷 $H_L$ に対する空調機の空気搬送エネルギー消費量 $E_{FA}$ の比                                   | $\varepsilon_{FA} = \frac{E_{FA}}{H_L}$  |
| 機器の空気搬送エネルギー消費係数 $\varepsilon_{FM}$ | 室内の熱負荷 $H_L$ に対する機器の空気搬送エネルギー消費量 $E_{FM}$ の比                                    | $\varepsilon_{FM} = \frac{E_{FM}}{H_L}$  |
| 熱源エネルギー消費係数 $\varepsilon_{COM}$     | 室内の熱負荷 $H_L$ に対する熱源機器のエネルギー消費量 $E_{COM}$ の比                                     | $\varepsilon_{COM} = \frac{H_L + E_{FA} + E_{FM}}{H_L \cdot COP_{COM}}$  |
| トータルエネルギー消費係数 $\varepsilon_T$       | 各エネルギー消費係数の和  | $\varepsilon_T = \varepsilon_{FA} + \varepsilon_{FM} + \varepsilon_{COM}$  |
| 空調給気量 $V$                           | 機器吸込み温度 $\theta_{0m}$ 、総合再循環比 $\gamma_a$ が換気流量比 $\kappa_m$ の1次関数とした場合の空調給気量 $V$ | $V = \frac{H_L \kappa_m (a \kappa_m + b)}{c_p \rho (\theta_{0m} - \theta_0) \{1 - (a \kappa_m + b)\}}$<br>ただし、 $\gamma_a = a \kappa_m + b$ |

- **発熱密度の大きな機械室を対象に、空調気流方式の適用領域の把握、発熱に対応した気流分布設計法、機器の発熱量に対応した空調方式、IT機器冷却空気の再循環と空調効率の関係、再循環を考慮したIT機器の冷却特性評価を実施**
- **省エネルギーのための許容発熱密度、風量分布の不均一率を用いた空調気流設計、空調給気量の調整機構、IT機器のラック搭載方法を提案**

## ● 本研究の位置づけ

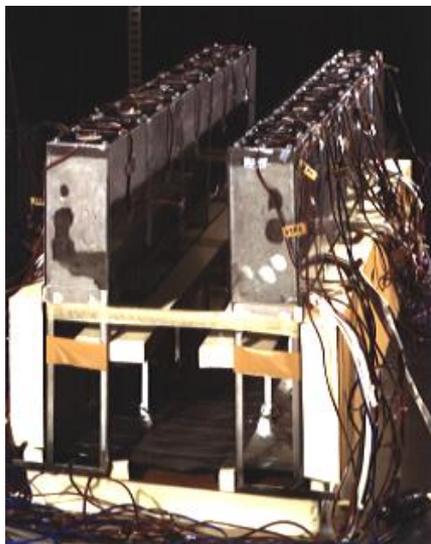
- DCの空調機 ⇒ 利用形態の多様化・増設撤去 ⇒ パッケージ化
- 屋上・ベランダの集中設置 ⇒ 排気の再循環 ⇒ 室外機吸込み温度の上昇
- 空調機の冷却能力の低下、空調効率の低下、冷媒圧力上昇による空調機停止

## ● 課題

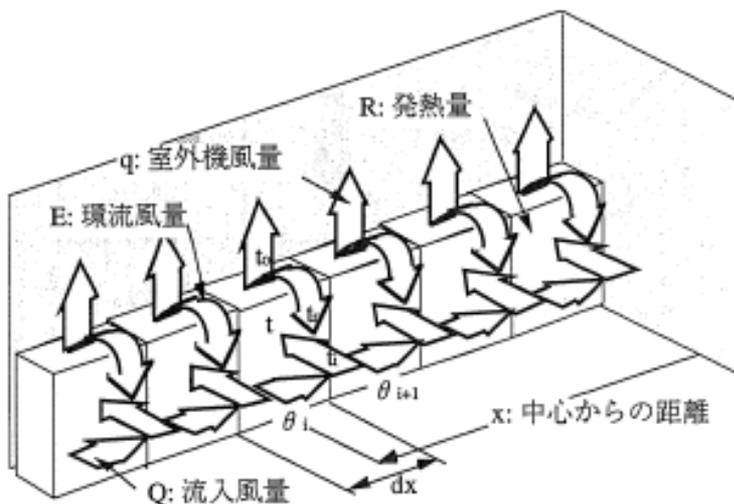
- 空調機室外機周囲の排気再循環の要因究明
- 屋上設置・重層設置の特性
- 吸込み温度上昇を抑制した適正配置計画



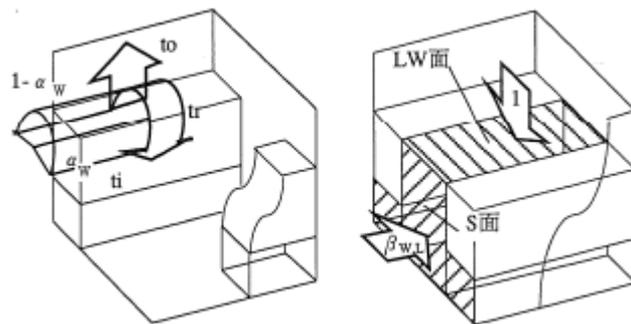
空調機室外機の設置例 撮影：羽山広文



室外機模型実験の様子論文11)

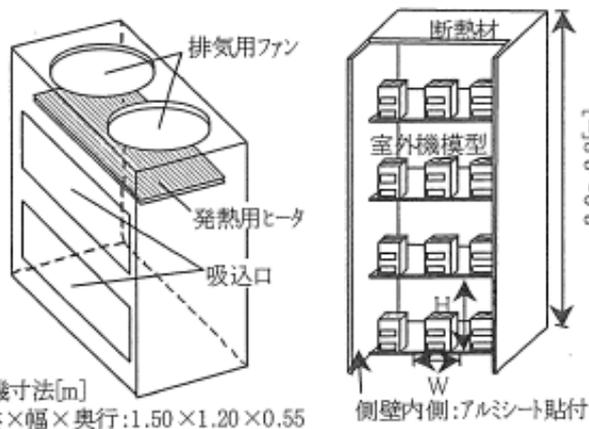


室外機の熱移動モデル論文11)



$$t = \frac{\alpha_w R L W}{\beta_{w,L} S K_u} \log_e \left( \frac{L}{x} \right) + t_f$$

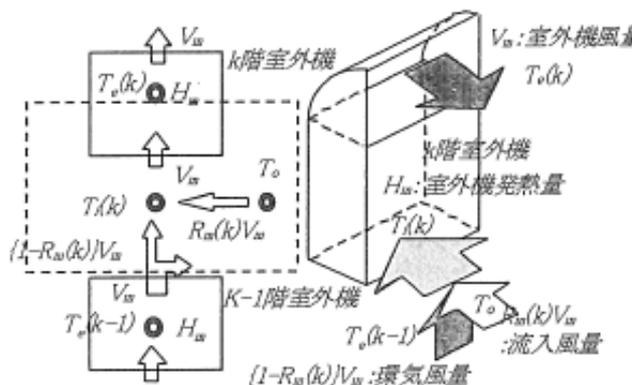
室外機吸込み温度の予測式論文11)



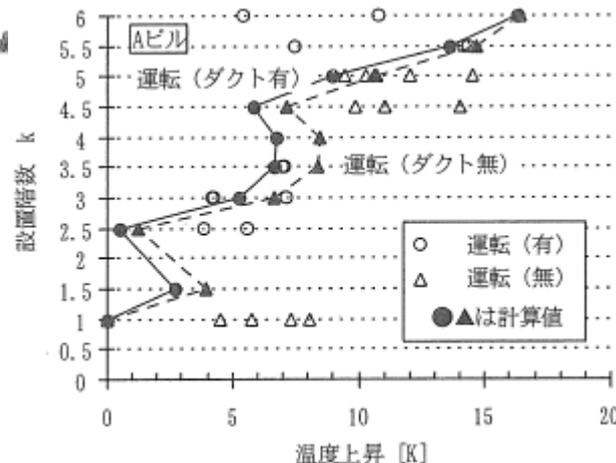
実機寸法[m]  
高さ×幅×奥行: 1.50×1.20×0.55

側壁内側: アルミシート貼付

重層設置の模型実験論文13)



室外機の熱移動モデル論文13,14)



実測と予測の比較論文14)

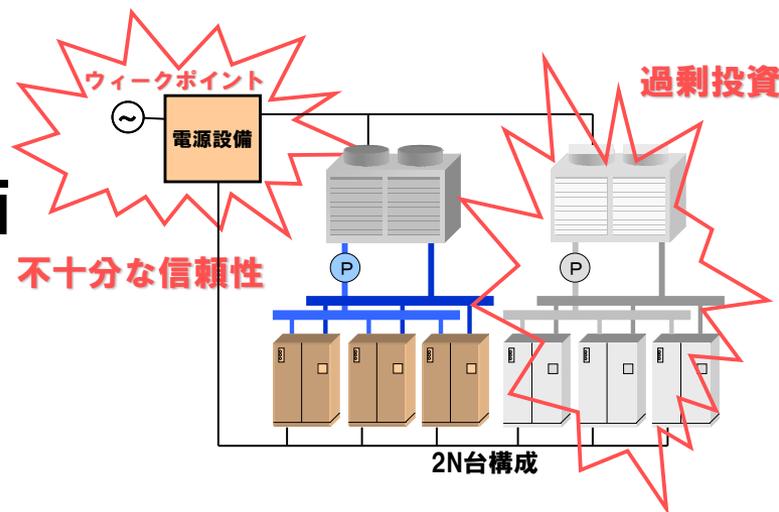
- **空調機室外機の高温排気の再循環による空調機の能力および効率低下を抑制するため、屋上設置あるいはバルコニーなどの重層設置された室外機の吸込み温度上昇を実測、実験により把握**
- **室外機の設置条件から吸込み温度を予測する簡易計算モデルを提案し、さらに吸込み温度上昇の許容値から架台の高さ、設置台数、架列間隔などの設計方法を確立**

● **本研究の位置づけ**

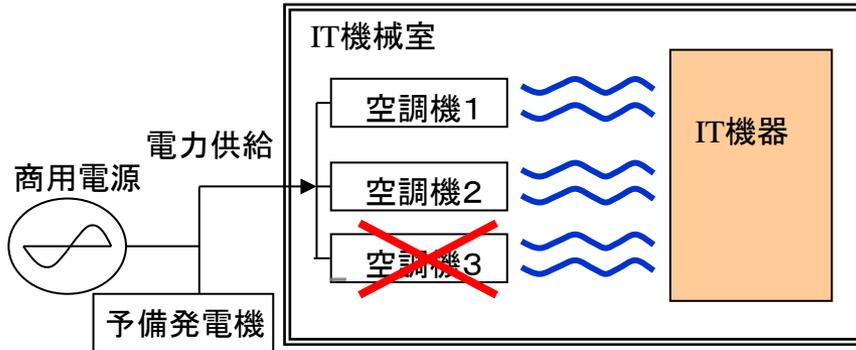
- **定常解析:信頼性工学の一般的手法で解決 ⇒ 過剰設計 ⇒ 経済性、スペース効率の悪化**
- **非定常解析:空調設備の故障パターン毎の室温変化の考慮が困難**

● **課題**

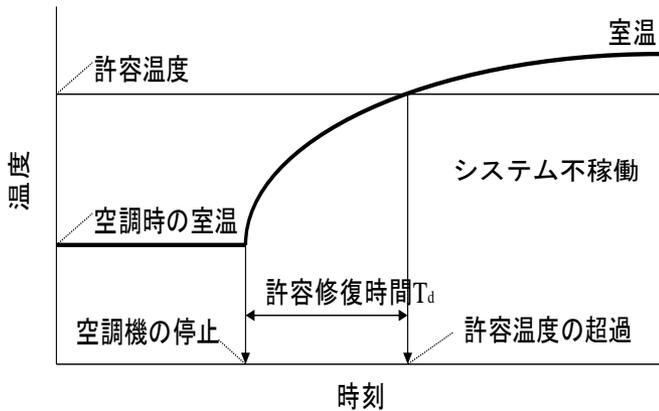
- **室温変化を考慮した空調設備の信頼性評価**
- **空調機停止後の室温上昇予測**
- **複雑なシステム構成の信頼性評価**
- **信頼性の要因分析と冗長構成評価**
- **一定の信頼性を確保しながら、経済的でスペース効率の良い空調設備の設計の実現**



不稼働率 =  $\frac{\text{許容室温の超過時間}}{\text{全運転時間}}$

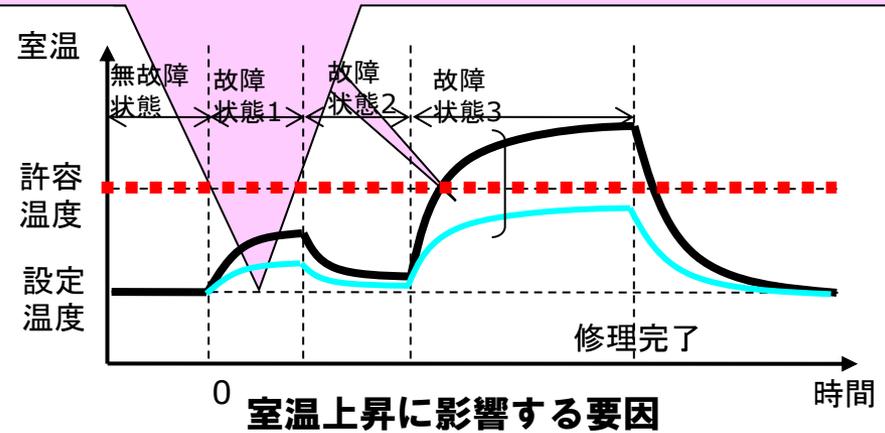


空調システムの構成 (例)



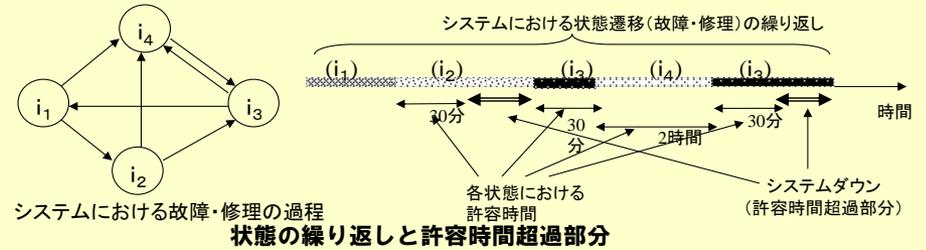
空調機停止後の室温とシステム不稼働 (論文16)

温度上昇は故障装置台数と建物条件、気象条件に依存



室温上昇に影響する要因

■ システムの故障・修理の挙動  
故障・修理の経過をマルコフ過程でモデル化



不稼働率 = 許容室温を超える時間の割合

$$U_T = \sum_{c=1}^n \lambda_c \text{MTRR}_c \exp\left(-\frac{T_c}{\text{MTRR}_c}\right)$$

$\lambda_c$  : 故障状態c の発生頻度

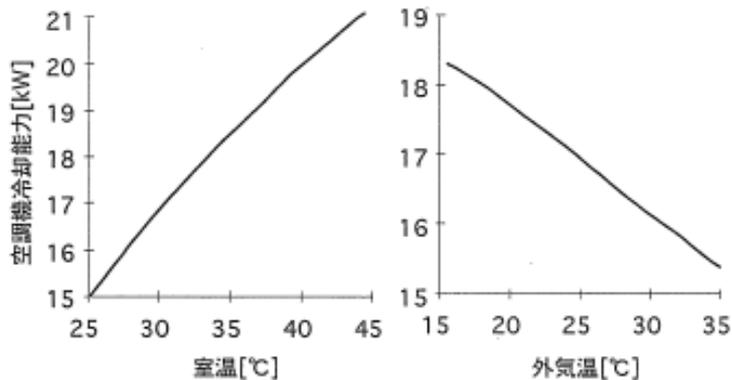
$\text{MTRR}_c$  : 故障状態c の平均修理時間

$T_c$  : 故障状態c における許容室温を超えるまでの時間 (許容修理時間)

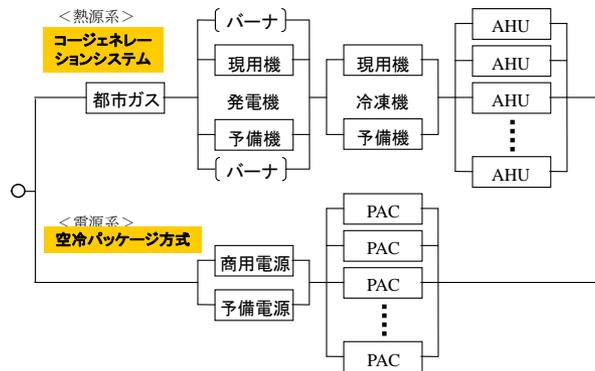
■ 室温上昇の過程

- ・ 気象条件
- ・ 機器の能力特性 (外気温度、室内温度)
- ・ 建物や蓄熱槽の熱容量

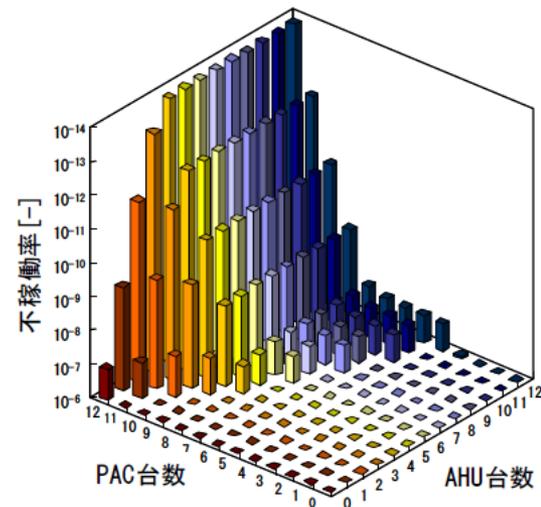
空調機停止後の室温とシステム不稼働 (論文16)



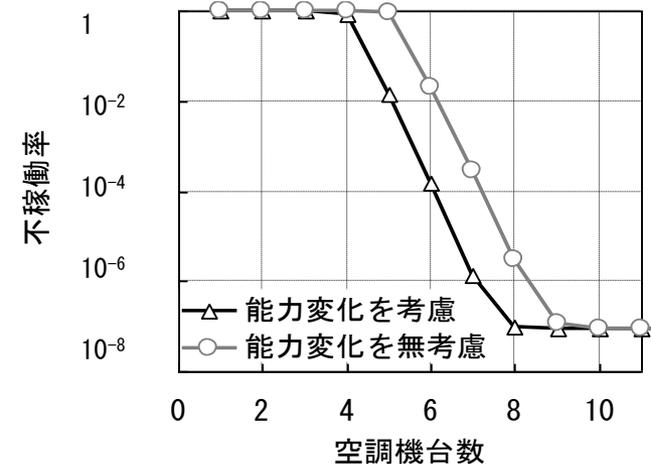
温度による空調機冷却能力の変化の例論文16)



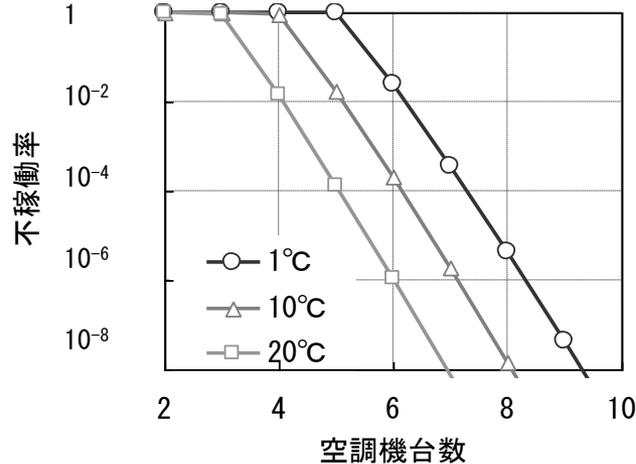
熱源系空調機を含んだシステムの構成例論文18)



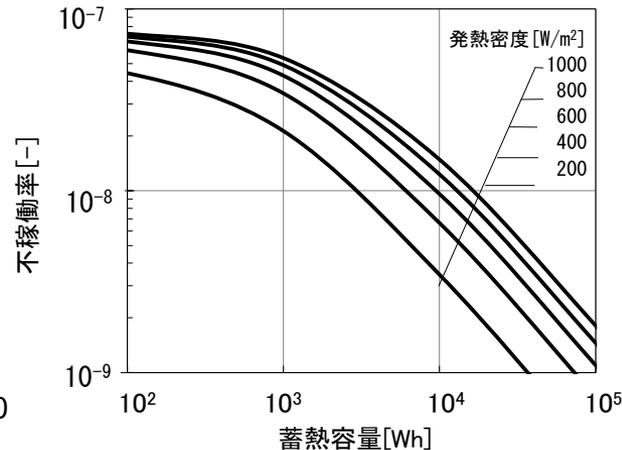
PACとAHUの台数熱と不稼働率の値論文18)



空調機の冷却能力変化を考慮した場合のシステム不稼働率論文18)



許容温度上昇を変化させた場合のシステム不稼働率論文18)



有効蓄熱容量・発熱密度と不稼働率の関係論文19)

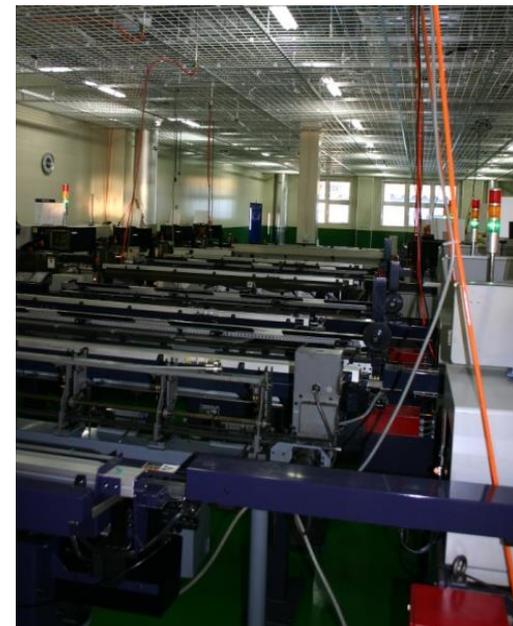
- **空調システムを構成する各機器の容量、台数、故障率、平均修理時間、温度変化による能力特性変化などのデータから、IT機器の許容温度を超過する事象の発生確率の評価方法を提案**
- **空調システムの脆弱な個所を明確にし、バックアップ機器の効果も勘案して信頼性の確保しながら経済的な機器構成を実現する信頼性設計方法を確立**

## ● 本研究の位置づけ

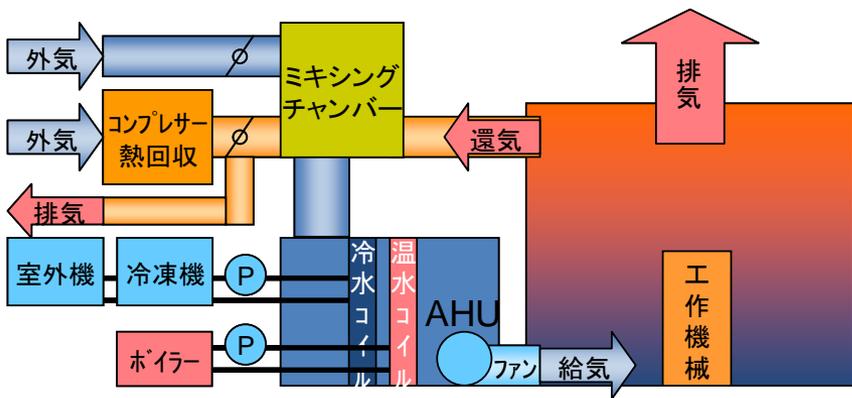
- 置換還気方式は換気効率が高く欧州を中心に普及
- 発熱源から熱対流の影響の検討例は多いが、強制ファンによる排気の検討例は少ない
- 室内の工作機械の発熱量が高く、工作機械からオイルミストが多量に飛散する環境へのDC用空調方式の適応

## ● 課題

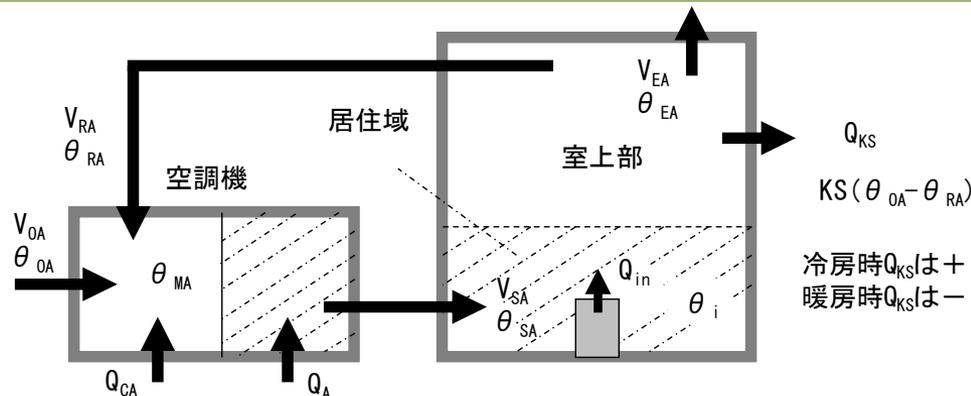
- 排気高さ、風量(換気流量比)が温度成層の高さ、居住域の温度分布の把握
- 実際に稼働している工場内で排気高さを変化させた場合の効果把握



工場内の機器配置 撮影:羽山広文

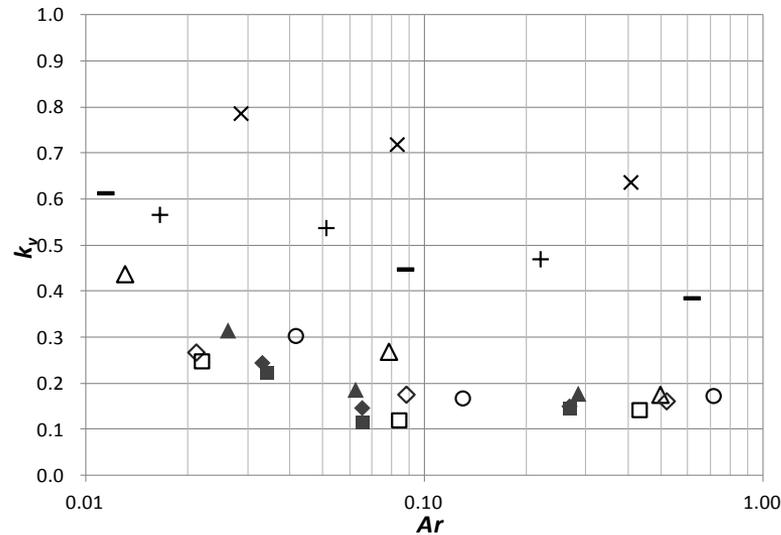


外気冷房併用型置換換気システムの構成



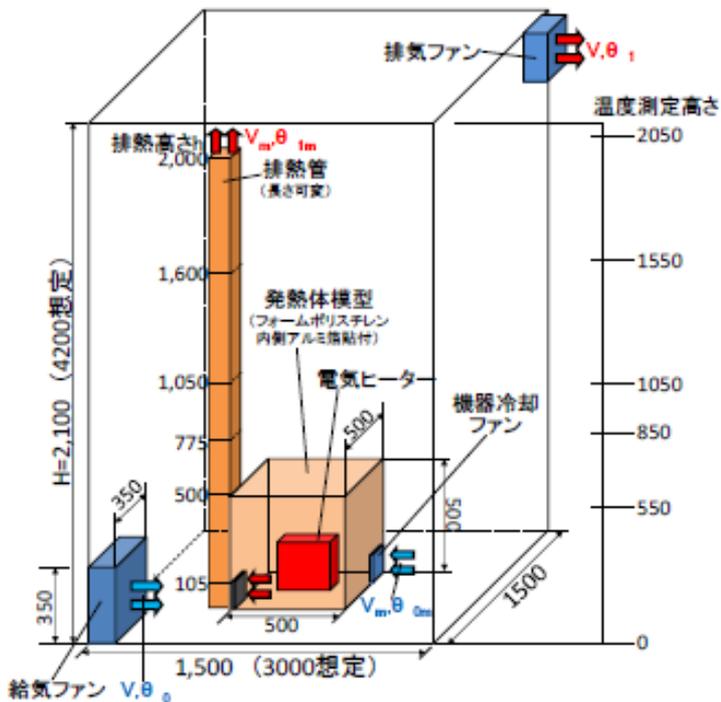
$\theta_{OA}$ : 外気温度 [°C],  $\theta_{SA}$ : 給気温度 [°C],  $\theta_{EA}$ : 排気温度 [°C],  $\theta_{RA}$ : 還気温度 [°C]  
 $\theta_{MA}$ : 混合空気 [°C],  $\theta_i$ : 居住域温度 [°C],  $Q_{CA}$ : コンプレッサ排熱 [kW],  $Q_A$ : 空調負荷 [kW]  
 $Q_{in}$ : 内部発熱 [kW],  $Q_{KS}$ : 建物外皮からの熱貫流 [kW],  $KS$ : 総合熱貫流率(換気除く) [kW/K]  
 $V_{OA}$ : 外気風量 [m³/h],  $V_{SA}$ : 給気風量 [m³/h],  $V_{RA}$ : 還気風量 [m³/h]

## 外気冷房併用型置換換気システムのモデル

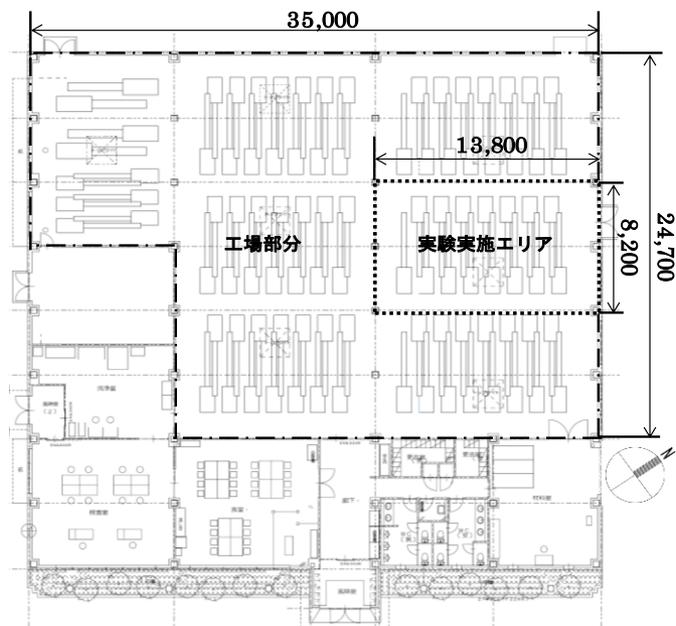


× 210(567W)    + 900(1134W)    - 1000(567W)    Δ 1550(567W)    ▲ 1800(1134W)  
 ◆ 2100(567W)    ◆ 2500(1134W)    □ 3200(567W)    ■ 3200(1134W)    ○ 4000(567W)

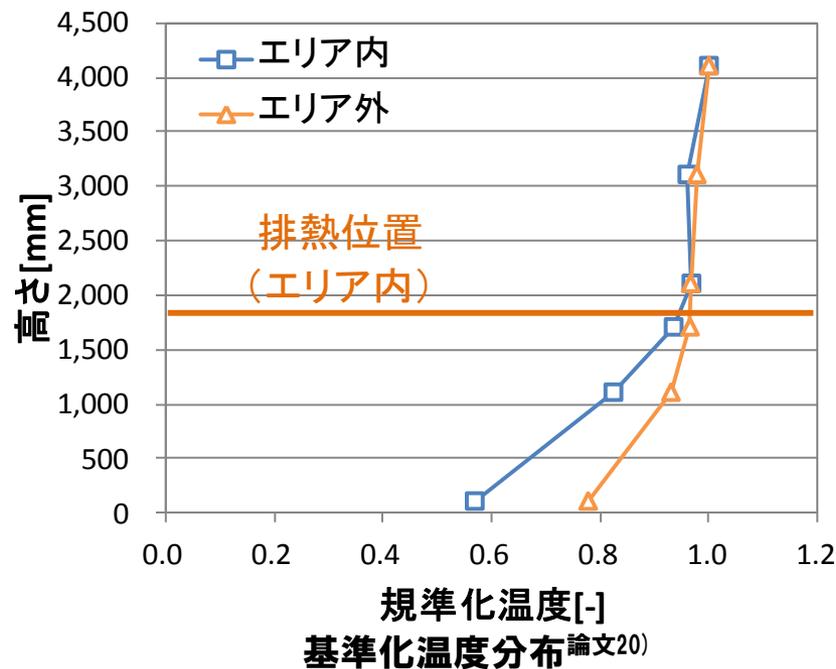
温度差比  $k_T$  と  $Ar$  の関係 論文20)



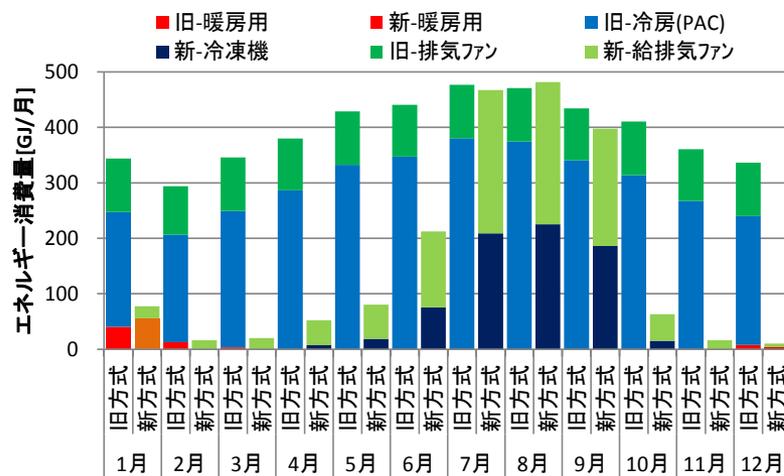
模型実験の概要 論文20)



検討した工場の平面図論文20)



排熱カバー設置の様子論文20)



新旧方式の比較例

- **機器の再循環を考慮した空調設備設計法を応用し、発熱密度の高い工場に置換換気方式を採用して排熱効率の向上を提案**
- **機器からの排気高さと換気効率の関係から、排気条件が居住域温度に与える影響を明確化**
- **機器からの高温排熱の位置を操作することで、機器からの再循環に起因する居住域の温度上昇を抑制し、空調給気量の削減、室温に近い空調給気温度を実現し、搬送動力の低減、外気冷房期間延長による省エネルギー化を実現**

- **通信サービスに求められる要件**
  - 室内の温熱環境の適正化 ⇒ IT機器の適正な動作
  - 空調システムの高効率化 ⇒ 省エネルギー
  - 空調システムの信頼性確保 ⇒ サービスの継続
- **異なる産業分野にまたがる課題を体系的に整理し、実用的な対策と効果を定量的に明らかにした**
- **今後、高発熱な工場の空調方式にも応用が可能**

情報サービスの構築・運用  
(サービス業)

IT機器の設計・製造  
(製造業)

空調システムの設計・建設  
(建設業)

- 1) 羽山広文: データセンタにおける空調システム, 空気清浄, 第49巻第2号, pp.45-52, 2011.7
- 2) Hirofumi Hayama, Masaki Nakao: Air Flow Systems for Telecommunications Equipment Rooms, INTELEC'89, p.8.3, 1989.10
- 3) Hirofumi Hayama, Masaki Nakao, Minoru Sanbe: Airflow Distribution in Telecommunications Equipment Rooms, INTELEC'90, pp.206-212, 1990.10
- 4) 羽山広文: 床吹出し空調システムの高効率化, 日本建築学会技術報告集, 第2号, pp.110-114, 1996.3
- 5) 羽山広文, 木下学, 倉淵隆: アンダーフロア空調システムにおける空調給気の温度分布と熱量分布に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第4号, pp.65-70, 1997.4
- 6) 羽山広文, 中里秀明, 木下学, 倉淵隆: 強制空冷機器を収容した機械室における空調方式の高効率化に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.494, pp.29-36, 1997.4
- 7) Hirofumi Hayama, Masamichi Enai, Taro Mori, Manabu Kishita: Planning of Air-conditioning and Circulation Systems for Data Center, IEICE TRANS. COMMUN., Vol.E87-B, No.12, pp.3443-3450, 2004.12
- 8) Yuki Furihata, Hirofumi Hayama, Masamichi Enai, Taro Mori: The Effect Air-Intake Format of Equipment Gives to Air Conditioning System in a Data Center, IEICE TRANS. COMMUN., Vol.E87-B, No.12, pp.3568-3575, 2004.12
- 9) 羽山広文, 降旗由紀, 森太郎, 絵内正道, 木下学: データセンターの機器冷却特性と空調効率に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No.640, pp.721-728, 2009.6
- 10) 二渡直樹, 羽山広文, 森太郎, 菊田弘輝, 豊原範之: 再循環を考慮したICT機器の冷却特性の予測手法, 日本建築学会環境系論文集, 第687号, pp.409-418, 2013.5
- 11) 羽山広文, 木下学, 山崎大輔, 倉淵隆: 集中設置される空調機室外機の吸込み温度性状の研究, 日本建築学会技術報告集, 第4号, pp.65-70, 1997.3
- 12) 木下学, 羽山広文, 星野康, 阿部正弘, 倉淵隆: 重層設置される空調機室外機の吸込み温度上昇に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第5号, pp.172-177, 1997.12
- 13) 木下学, 羽山広文, 倉淵隆: 多層階に設置される室外機の吸込み温度上昇に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.522, pp.67-73, 1999.8
- 14) 木下学, 羽山広文, 倉淵隆: 多層階に設置される室外機の吸込み温度上昇に関する研究(続報) 室外機の吸込み温度の制御手法である排気用ダクトに関する検討, 日本建築学会計画系論文集, No.541, pp.31-36, 2001.3
- 15) 木下学, 羽山広文, 岡建雄: 空冷パッケージ型空調機室外機の配置計画に関する基礎分析, 日本建築学会技術報告集, 第15号, pp.151-154, 2002.6
- 16) 羽山広文, 大島一夫, 高草木明, 松島修: 空調機停止後の室温変化を考慮した空調設備の信頼性評価に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.507, pp.71-78, 1998.5
- 17) 羽山広文, 木下学, 倉淵隆, 絵内正道: 空調機停止後の発熱分布を考慮した室温上昇に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.543, pp.41-47, 2001.5
- 18) 羽山広文, 阿南陽介, 渡辺均, 林正博, 絵内正道, 森太郎: コージェネレーションシステムを用いた空調システムの信頼性評価法に関する研究 その2 信頼性の要因分析とシステム構成の提案, 日本建築学会環境系論文集, No.584, pp.53-59, 2004.10
- 19) 羽山広文, 阿南陽介, 渡辺均, 森太郎, 木下学: 空調システムにおける信頼性と冗長構成に関する評価, 日本建築学会技術報告集, 第31号, pp.817-822, 2009.10
- 20) 剣持圭佑, 羽山広文, 森太郎, 菊田弘輝, 福島明: 置換換気される室内の機器排熱が室温分布へ与える影響, 日本建築学会環境系論文集, 第677号, pp.591-597, 2012.7

- **本研究は前職のNTTファシリティーズ在職時から着手してきた課題であり、多くの共著者との共同研究によって得られた成果です。**
- **この過程で多くの学会関係者、企業関係者、大学関係者および学生から多大なるご支援を得ました。関係各位へ感謝申し上げます。**