

第5章

実大規模による空調効率向上のための空調計画に関する検討

5.1 はじめに

第4章では、実大規模の仮想サーバ室を想定した実大実験室実験により、既往研究にて提案しているトレーサガス実験法を用いることにより、実空間において機器排気による再循環率測定が可能である点を確認した。

本章では、第2章にて仮想サーバ室を想定したCFD解析による検討結果から得られた知見に基づき、実大規模のデータセンターを想定して、再循環率と風量比の関係、機器吸込み温度と風量比の関係、空調効率と風量比の関係を明らかにするために比較検討を行う。これらの検討結果から得られた知見により、データセンターの空調効率を更に向上させるために、実務上において効率的に計画や運用が可能となる空調計画の手法について検討する。

5.2 データセンターの市場動向

5.2.1 データセンターの動向

近年、IoT やビッグデータ、AI などの新たな技術である ICT の推進によって、身近なインターネット接続機器であるスマートフォンの普及に見られるように、国内におけるデータセンターの全体市場²⁷⁾として、図 5.1 に示すように増加傾向にある。特に、クラウドサー

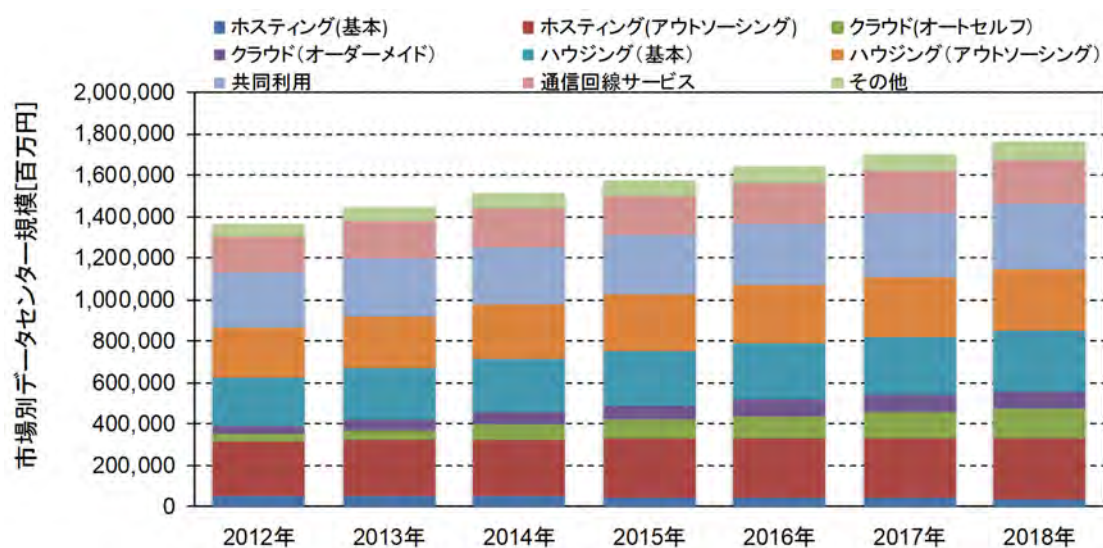


図 5.1 国内におけるデータセンターの全体市場²⁷⁾

ビス利用や仮想化など、運用の複雑化によるシステム運用のアウトソーシングに関するニーズの拡大や BCP 需要の増加、金融機関向けの共同利用サービスが拡大している点が市場全体の拡大に起因している。また、図 5.2 に示す国内における地域別市場規模の推移²⁷⁾によれば、国内の主要企業が首都圏に集中していることから、関東エリアが全体の約 60%を占めている。データセンターの種類として、アクセスが良好なビル型と呼ばれる都心型データセンターや、郊外の大規模な土地に複数の平屋建てを構築する郊外型データセンター以外に、コンテナ型データセンターなどが挙げられるが、都心型データセンターが国内における最も占有率や設備投資率が高いが、この理由としては図 5.2 に示す地域別市場規模から容易に判断できる。

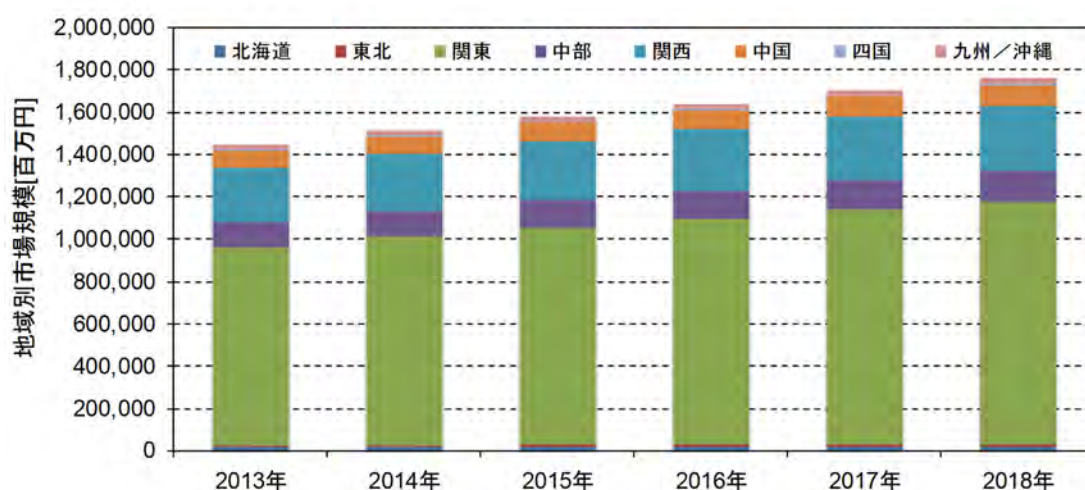


図 5.2 国内における地域別市場規模²⁷⁾

5.2.2 サーバ室面積の動向

国内における 2013 年以降に建設、あるいは建設計画があった新設データセンターのサーバ室面積²⁷⁾について図 5.3 に示す。2013 年、2014 年のデータセンター1 棟あたりの平均サーバ室面積は 2013 年では約 2,100m²、2014 年で約 3,700m² と増加傾向にある。特に、データセンター内には複数のサーバ室を所有している構成が一般的であるため、図 5.2 に示すように国内において最も占有率や設備投資率が高い都心型データセンターを対象として、3 階建の 2 サーバ室/1 フロアの構成となるデータセンター¹⁶⁾を想定した場合、2013 年、2014 年におけるサーバ室面積は 2013 年で約 351m²/室・フロア、2014 年で約 617m²/室・フロアと推定できる。ただし、新設されたデータセンターの大半が、竣工当初から全サーバ室がフル稼働にて運用されることは少ないことから、将来的にデータセンター1 フロアあたりのサーバ室面積が飛躍的に拡大していくことは想定出来ないため、2013 年、2014 年データに基づき

推定されたサーバ室面積より、今後のデータセンターにおけるサーバ室面積は各年度の推定面積に概ね近い傾向を示すと考えられる。

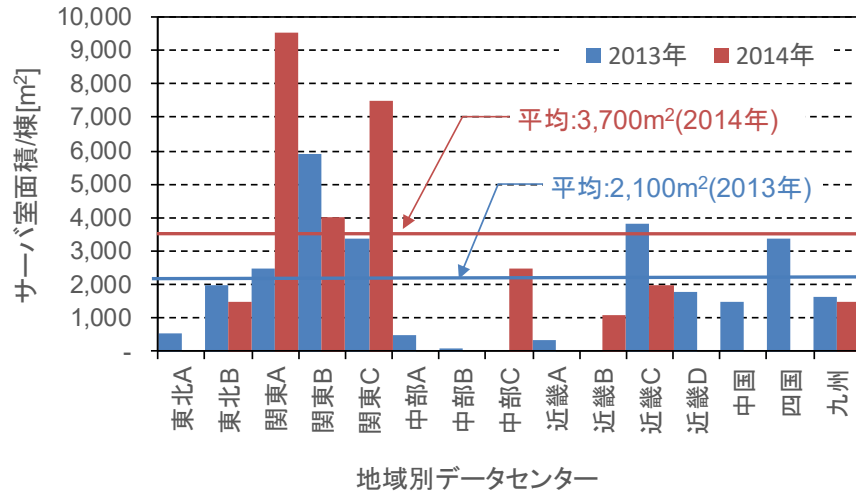


図 5.3 国内における新設データセンターのサーバ室面積²⁷⁾

5.2.3 機器電カスペックの動向

図 5.4 に国内における電カスペック(実効電力量)別のデータセンター規模推移²⁷⁾を示す。年々、高密度、超高密度型のラック負荷が増加傾向にあるが、各年度における全体の約 90% は低密度～中密度対応のデータセンターが多い。すなわち、将来的には 6kVA/ラック以上の高負荷仕様が今後、増加傾向になると予想されているが、多くのデータセンターにおいては、2kVA/ラック～6kVA/ラックの負荷仕様にて、これまでと同様な負荷運用がなされていくことが確認できる。

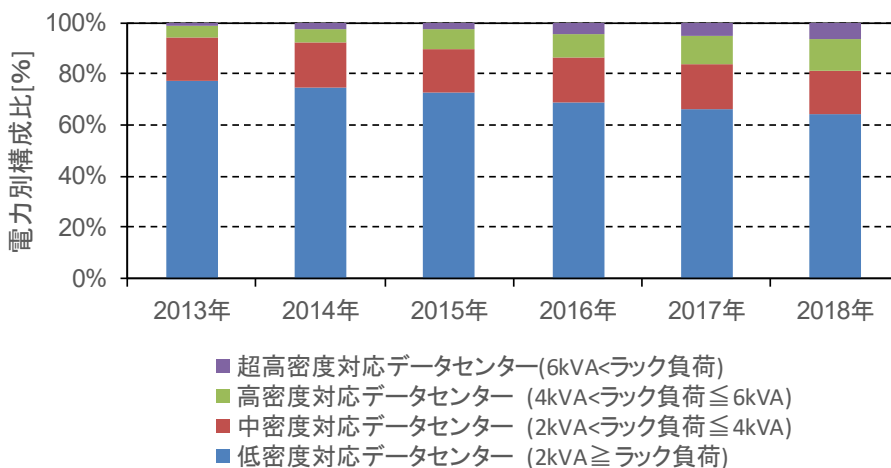


図 5.4 国内における電カスペック別データセンター²⁷⁾

5.2.4 建築的規制

データセンター用設計規格である TIA-942¹⁶⁾では、サーバ室を構成する上での建築的規制を示している。特に、サーバ室の天井高さは最低 2.6m 以上、ラックから天井までの空間にはスプリンクラーの設置を求めているため、設置スペースとしては 460mm 以上の空間を要することになる。また、空調空気を供給し、機器の吸込み側となるコールドアイルや機器の排気側となるホットアイルの通路幅は、ラックの開閉スペースやメンテナンス通路として、ある程度のスペースを確保しておくことが望ましい。例えば、一般的に多く採用されている 19 インチラックのラック幅は 600mm~800mm、フリーアクセスフロアの二重床パネルの規格サイズとしては、450mm×450mm~600mm×600mm のパネルが多く採用されているため、各アイルの通路幅は設計計画と対応しながら十分なスペースを確保しておく必要がある(推奨として、二重床パネルを 2 枚設置する場合、0.9m 以上は最低でも必要である)。

以上より、図 5.5 に示すサーバ室の建築的規制としては、サーバ室の高さが約 3.1m 以上を有した空間構成とする必要がある。

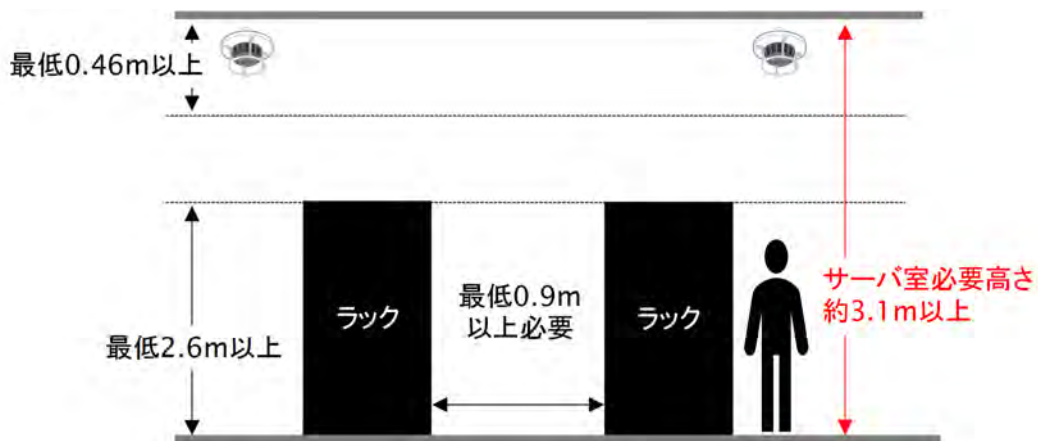


図 5.5 サーバ室の建築的規制の概要

5.3 解析概要

図 5.6、図 5.7、図 5.8 に実大規模のデータセンターモデル、図 5.9 に各モジュールの配置、表 5.1 に解析条件を示す。解析モデルは、第 2 章にて検討した天井吸込口がホットアイル側にある天井チャンバ方式で、コールドアイル側にある二重床の床下から室内上部へ給気を行う、データセンターで広く用いられている二重床冷却方式以外に、機器排気面側に天吊り型空調機を設置した整流装置を有する局所空調方式と、近年、セキュリティ面からファシリテイエリアと ICT 機器の管理エリアを分離した壁吹出方式^{28),29)}の 3 モデルを想定した。なお、建築的制限や負荷条件は、5.2 節に示す国内におけるデータセンター市場動向の調査結果に基づき、機器発熱量は定格 4kW/ラック(機器稼働率: 50%)、6kW/ラック(機器稼働率: 75%)とし、サーバ室全体のラック数は計 240 ラック/室とした。また、第 2 章、第 4 章にて検討した 6 ラックを 1 モジュールとして取り扱うこととする。

流入・流出条件として、空調総風量が機器総風量と等しい条件を定格条件とし、風量比 V/V_m を用いて検討を行う。解析条件として、第 3 章、第 4 章にて検討した解析条件と同様に、空調吹出し温度は 0°C 固定にて解析を行った。なお、解析モデルでは実空間において大小問わず見られる漏気発生面などは忠実に再現できない部分があるため、漏気や放射の影響は考慮せず、壁面は断熱条件にて解析を行った。また、機器排気による再循環率を求めるにあたり、これまでの解析条件と同様に、各機器の排気面にて濃度 1 のパッシブスカラーを定量発生させ、各機器の吸込み面に到達する再循環量を合計することで実験結果と比較可能な再循環率を算出した。また、解析モデルの対称性を考慮し、解析モデルは全体の 1/2 モジュールサイズで検討を行い、対象とするモジュールは計 20 モジュール(全体としては、計 40 モジュール)、ラック数は計 120 ラック/室(全体としては、計 240 ラック/室)を対象とした。

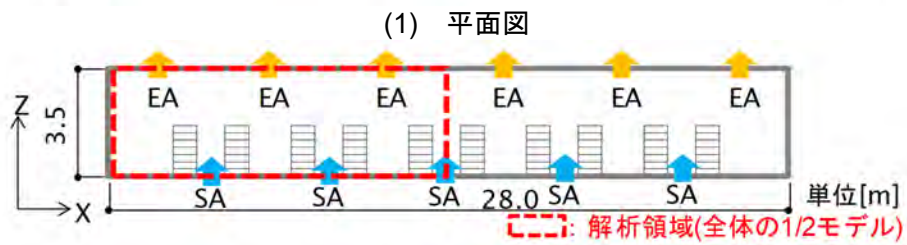
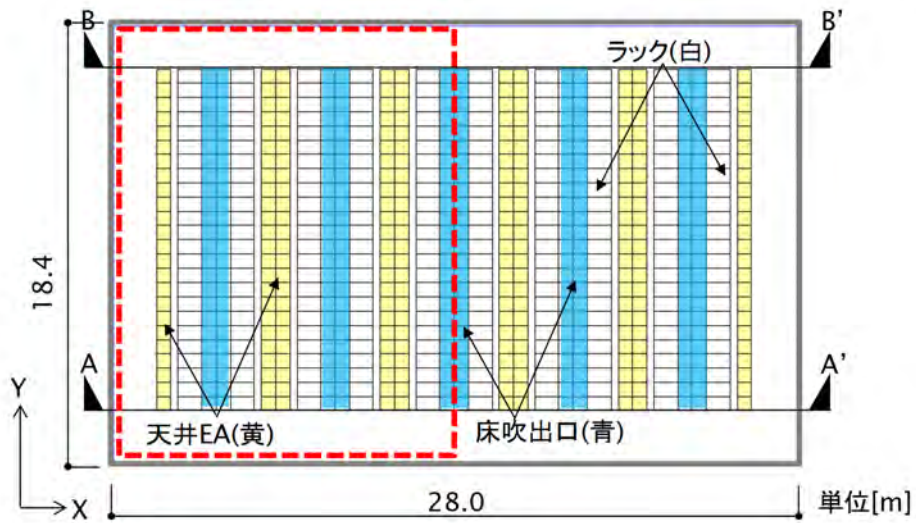


図 5.6 解析モデル(従来方式)

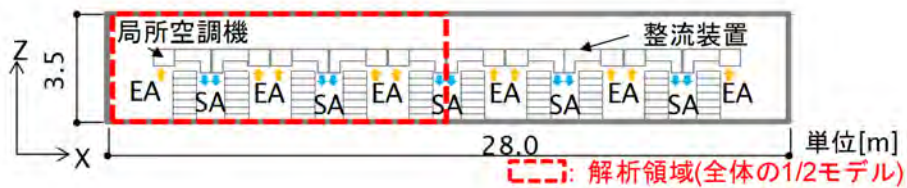
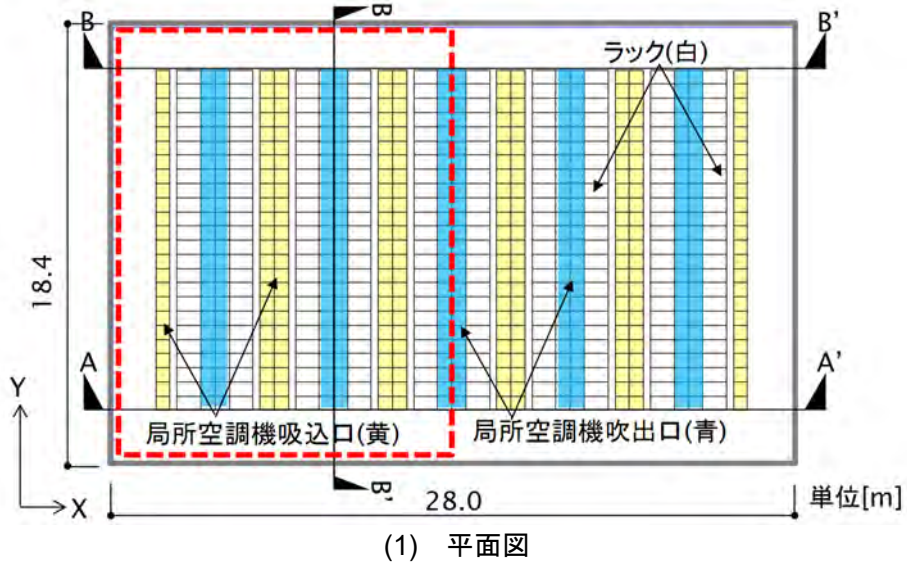


図 5.7 解析モデル(局所空調方式)

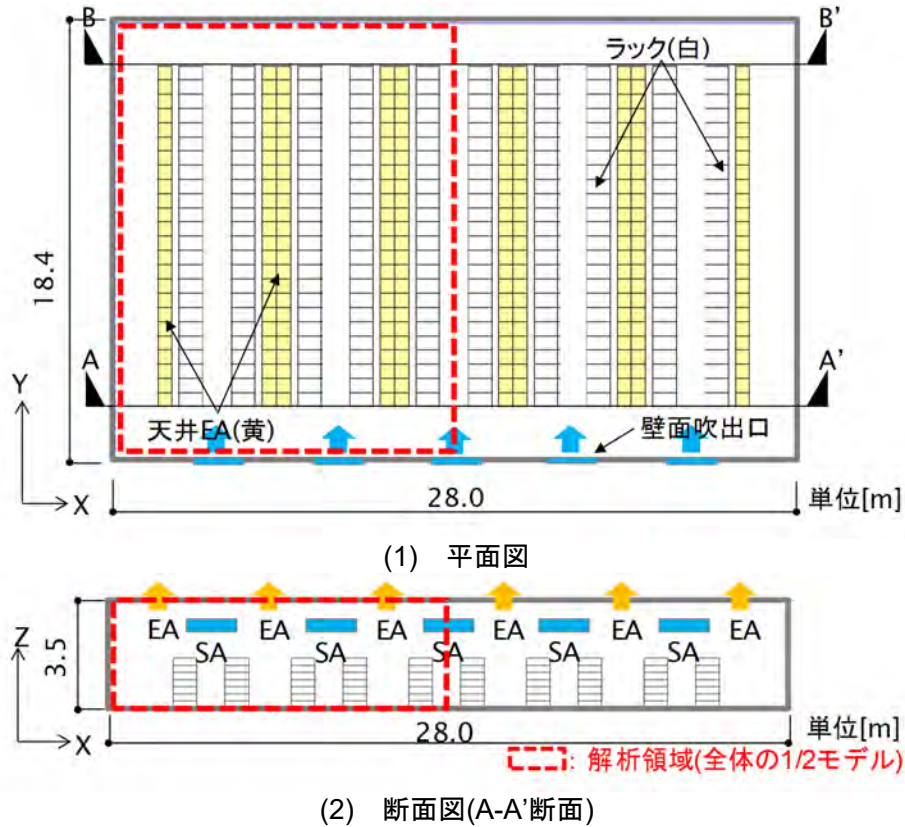


図 5.8 解析モデル(壁吹出方式)^{28),29)}

表 5.1 解析条件^{28),29)}

解析領域	1/2 モデル : 34.7[m](x)×16.8[m](y)×4.7[mm](z)
乱流モデル	標準 $k-\varepsilon$ モデル
差分スキーム	一次風上差分
解法	SIMPLE
壁面境界条件	一般化対数則
流入・流出条件	機器吸込面 : 0.6×0.3[m], $U_{in}=0.4583[m/(s \cdot 台)]$ (1,3,5,7 段目) (稼働率:50%)
	機器排気面 : 0.6×0.3[m], $U_{out}=0.4583[m/(s \cdot 台)]$ (1,3,5,7 段目) (稼働率:50%)
	従来方式 : 吸込面0.6×0.6[m],吹出し面0.6×0.6[m] : $U_{in}=0.9166[m/(s \cdot 台)]$, $U_{out}=0.9166[m/(s \cdot 台)]$ (稼働率:50%)
	局所空調方式 : 吸込面0.6×0.6[m],吹出し面0.6×0.3[m] : $U_{in}=0.9166[m/(s \cdot 台)]$, $U_{out}=1.8332[m/(s \cdot 台)]$ (稼働率:50%)
壁吹出方式	: 吸込面0.6×0.6[m],吹出し面2.5×1.0[m] : $U_{in}=0.9166[m/(s \cdot 台)]$, $U_{out}=6.336[m/(s \cdot 台)]$ (稼働率:50%)
発熱・冷却条件	機器発熱量 : 4[kW/ラック], 120[ラック/室] (稼働率 : 50%)
	: 6[kW/ラック], 120[ラック/室] (稼働率 : 75%)
	空調吹出温度 : 0°C吹出温度固定

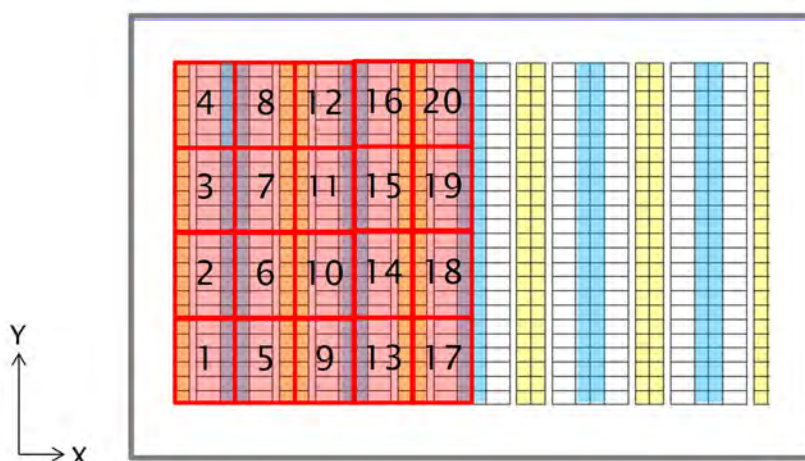


図 5.9 各モジュールの配置

5.4 空調方式別の空間温度分布

図 5.10～図 5.13 に空調方式別における機器稼働率=50%、75%時の水平断面温度分布、図 5.14～5.17 図に空調方式別における機器稼働率=50%、75%時の鉛直断面温度分布を示す。なお、風量比による影響を確認するために、 $V/V_m=0.8$ 、 1.0 、 1.2 の条件を用いて比較検討を行う。また、各温度分布の描写断面については、機器排気による再循環率が高くなると推定される、ラック上端部(水平断面の FL+2.1m)、サーバ室の端部となるラック設置の両端部(鉛直断面の A-A'断面もしくは B-B'断面)を基本的な比較断面とし、それ以外に FL+1.0m の水平断面を採用した。

従来方式の空間温度分布として、機器吸込み側の領域であるコールドアイルには概ね空調空気が供給されていることから、空調吹出し温度に近い温度分布を示すが、ラック両端部やラック上端部においては、機器排気面から高温排気による再循環などの影響を受けて機器吸込み温度が高くなる領域が見られ、風量比が小さくなるにつれてその傾向は顕著になる。同じ風量比において機器稼働率が高くなると、機器負荷を処理する冷熱量が小さいことから、全体的にサーバ室内の温度は高温へシフトする傾向がある。

局所空調方式においては、機器排気面近傍の天井部に空調機の吸込み口、機器吸込み面近傍の天井部に空調機の吹出し口があるため、機器の稼働率を問わず、風量比が $V/V_m=1.0$ 以上の場合、各水平断面、鉛直断面ともに機器吸込み側のコールドアイルが効率的に空調されていることが確認できる。一方、風量比が $V/V_m=1.0$ 未満の場合、サーバ室端部にあるラック両端部から機器排気による再循環の影響を受けて、機器吸込み温度が高くなる領域も見られる

一方、壁吹出方式については、従来方式や局所空調方式とは異なり、ラック端部、特に、空調吹出口から近いラック端部において、機器稼働率や風量比によらず、コールドアイルの

空間温度が水平断面、鉛直断面ともに高くなる傾向を示す。この理由として、壁吹出方式は従来方式や局所空調方式に対して、空調機からの吹出し気流速度が速いため混合換気・空調方式に見られるようにサーバ室全体を掻き混ぜながら空調を行っていることが主な原因の一つとして考えられる。すなわち、空調機の吹出口から近いラック端部においては、空調機の吹出気流により機器から排気された高温空気が誘引され、その結果、機器から排気された高温空気が空調機吸込み側にて効率的に排気されず、機器吸込み側へ再循環したために機器吸込み温度が高温となり、結果として、空調機の吹出し温度から大きく乖離する傾向となったと思われる。また、本解析モデルのように、ホットアイルのキャッピングを行わない壁吹出方式では、適切な吹出し口のレイアウトや吹出気流について十分に検討する必要があると考えられる。

以上より、各空調方式の機器吸込み温度による温度上昇の原因として、空調機の吹出し温度や気流速度、もしくは吹出し口や吸込み口のレイアウト以外に、第2章にて検討した機器排気による再循環による影響など、様々な要因による影響を受けている可能性があると考えられる。その結果、このような空間温度分布からの熱的評価では機器吸込み温度の温度上昇の解明について十分に評価することが困難であると思われる。すなわち、第2章～第4章までに検討を行ってきた機器排気による再循環率と風量比の関係、機器吸込み温度と風量比の関係、空調効率と風量比の関係について、実大規模の空間を対象として明らかにする必要があると考えられる。

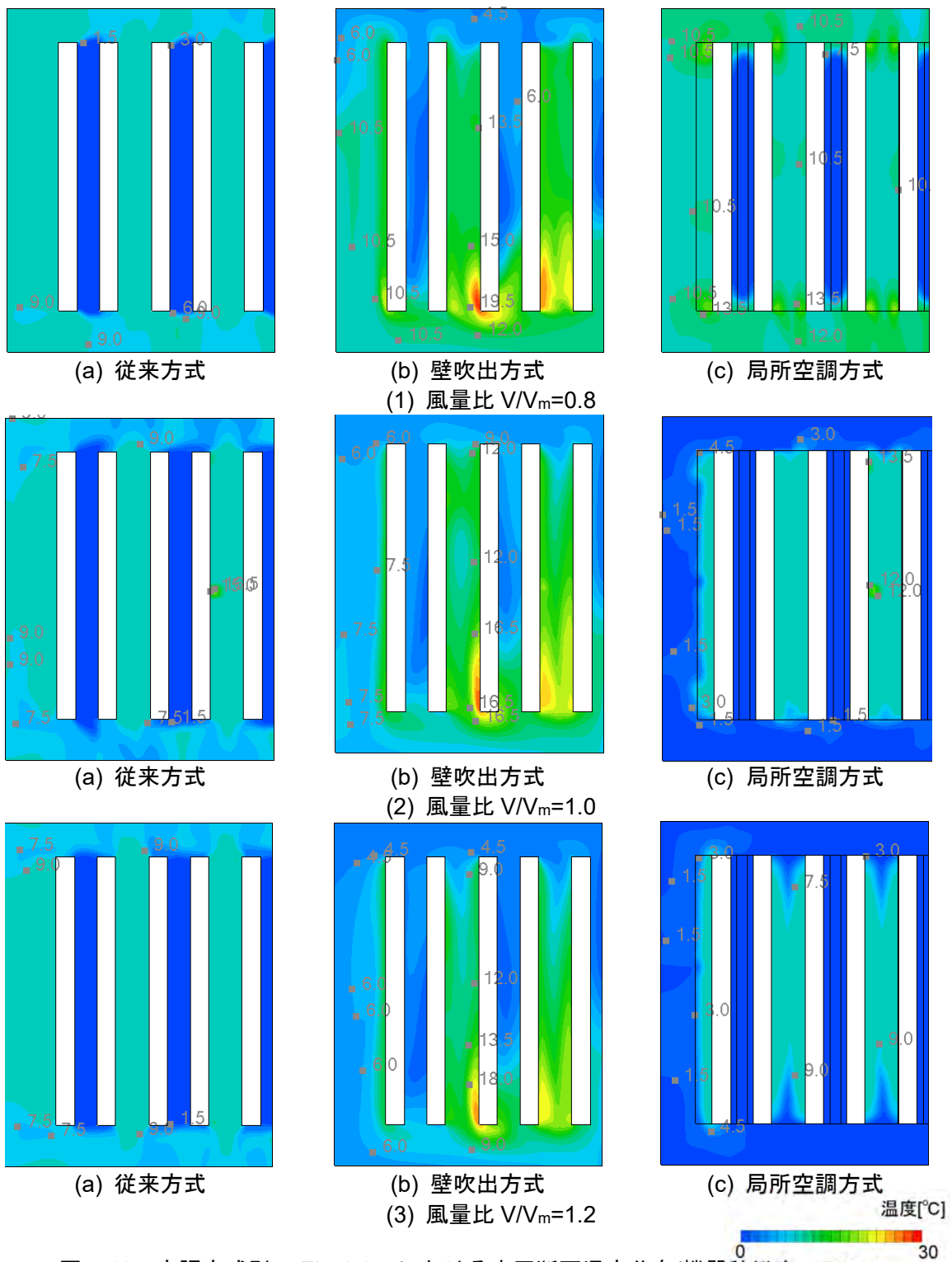


図 5.10 空調方式別の FL+1.0m における水平断面温度分布(機器稼働率 : 50%)

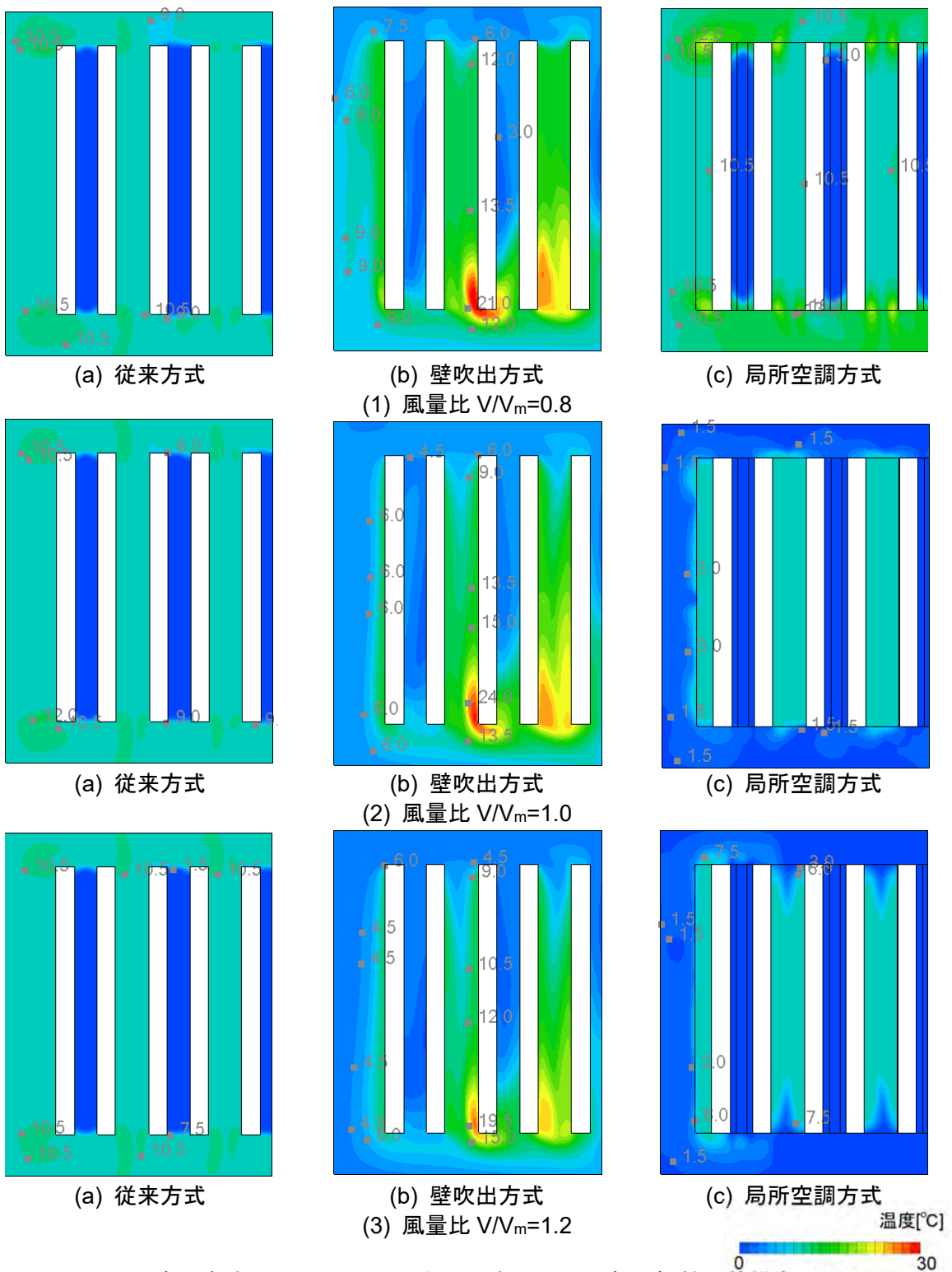


図 5.11 空調方式別の FL+1.0m における水平断面温度分布(機器稼働率 : 75%)

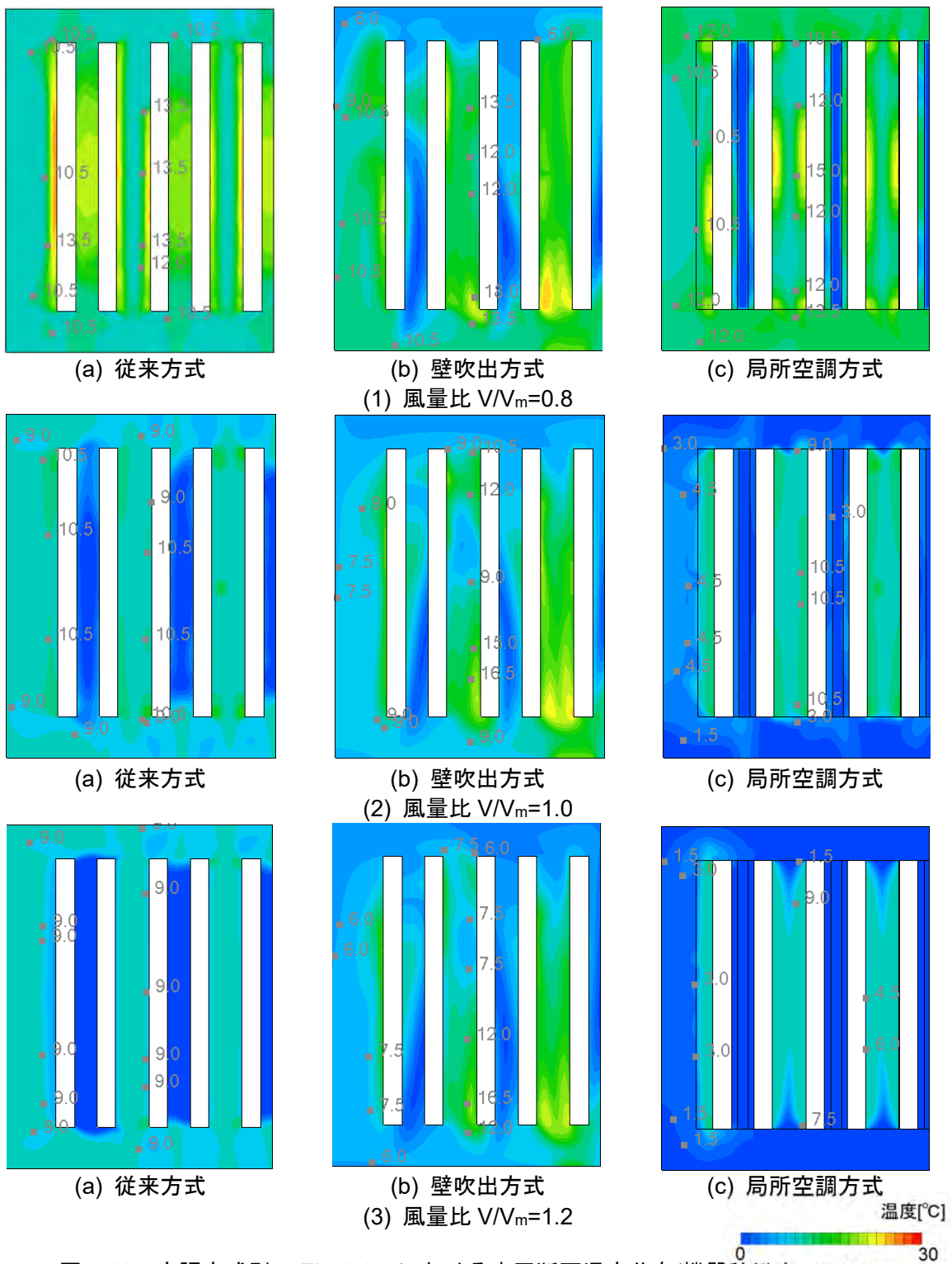


図 5.12 空調方式別の FL+2.1m における水平断面温度分布(機器稼働率 : 50%)

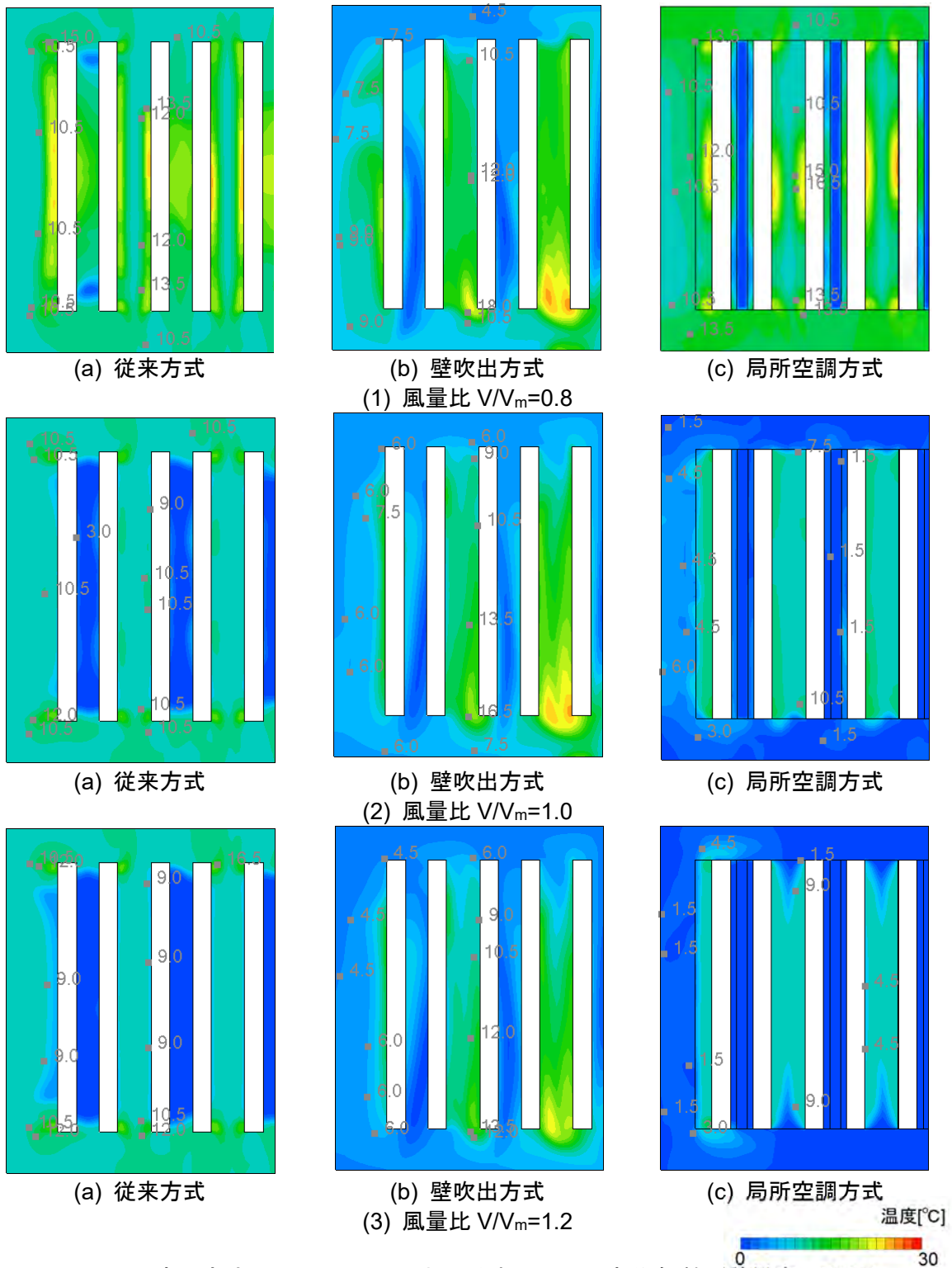


図 5.13 空調方式別の FL+2.1m における水平断面温度分布(機器稼働率 : 75%)

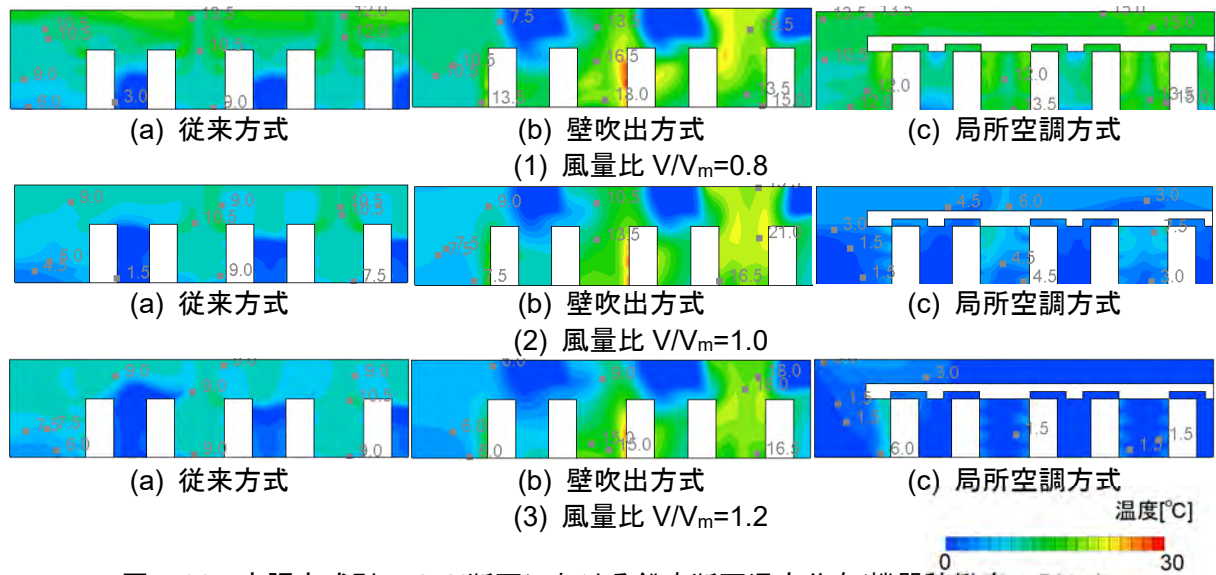


図 5.14 空調方式別の A-A'断面における鉛直断面温度分布(機器稼働率 : 50%)

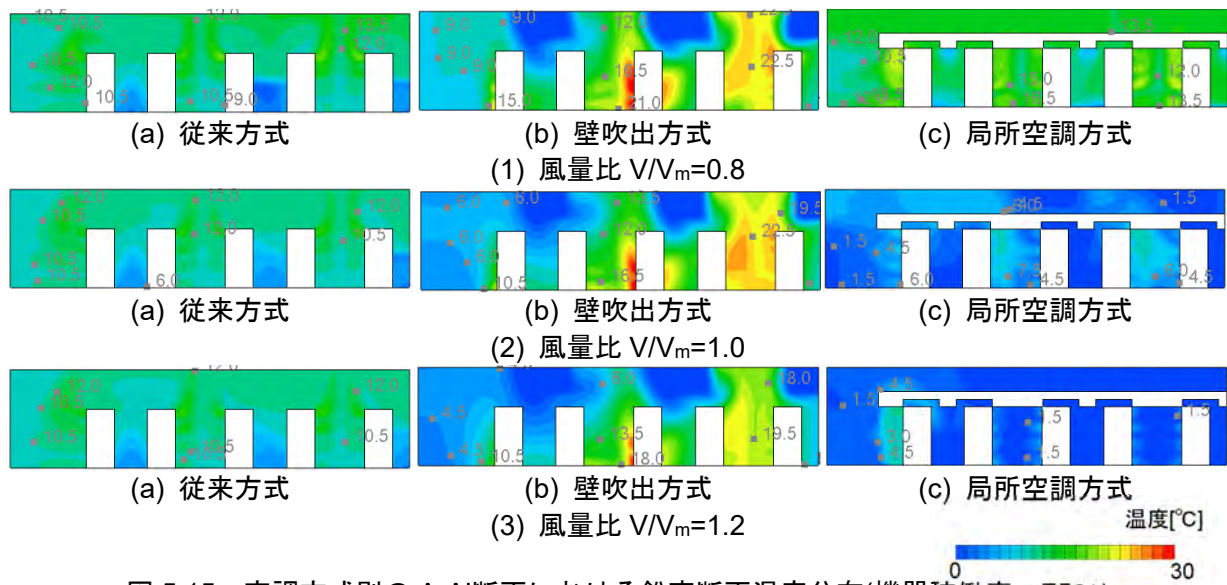


図 5.15 空調方式別の A-A'断面における鉛直断面温度分布(機器稼働率 : 75%)

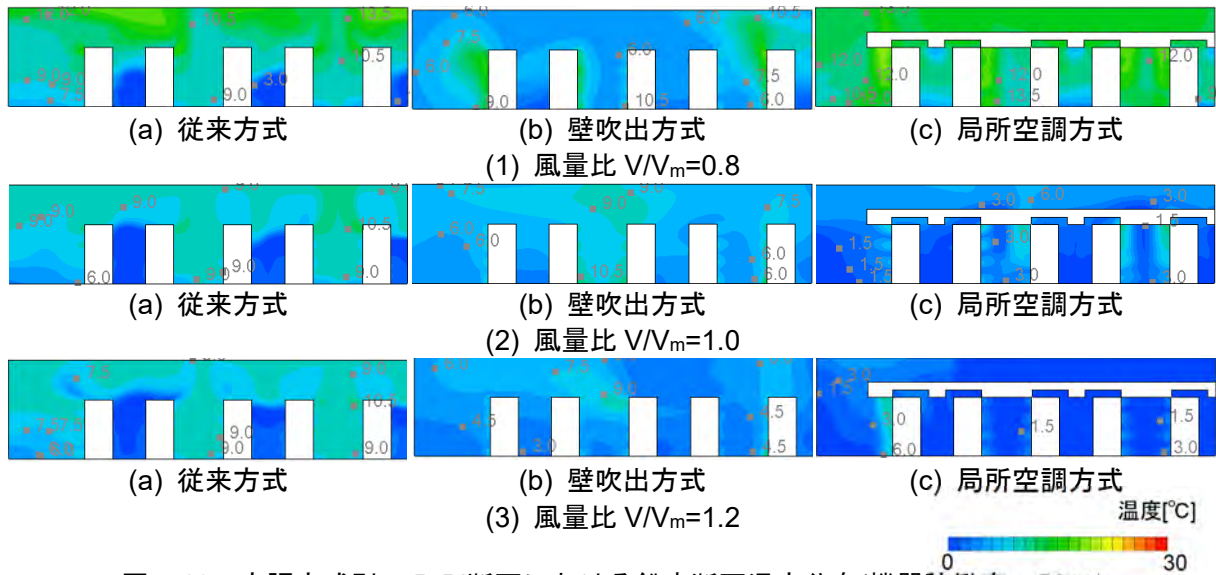


図 5.16 空調方式別の B-B'断面における鉛直断面温度分布(機器稼働率 : 50%)

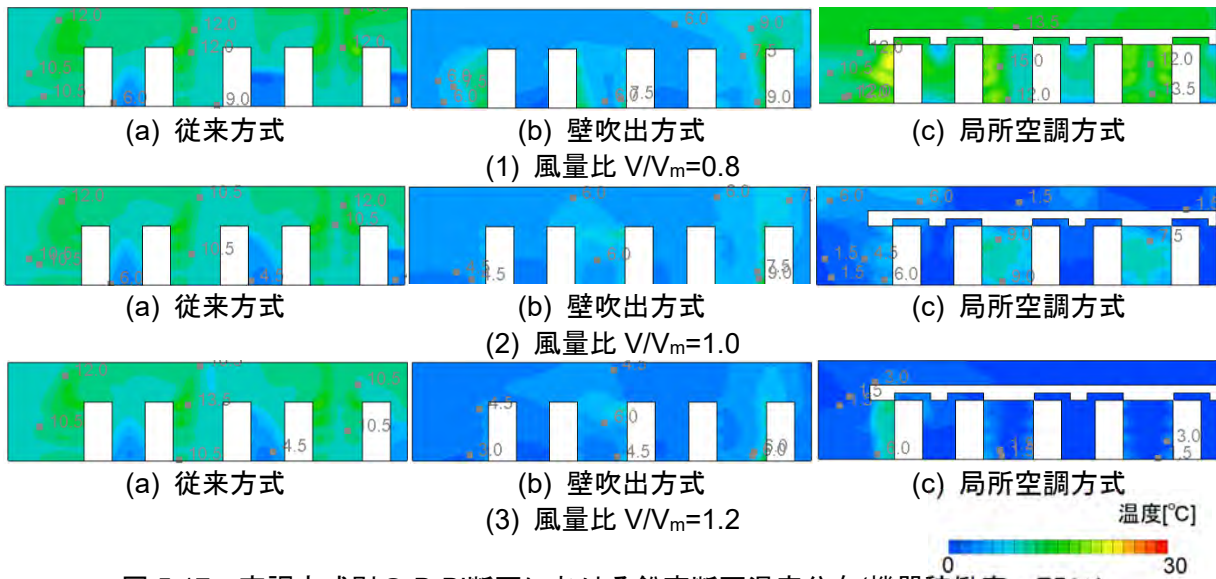


図 5.17 空調方式別の B-B'断面における鉛直断面温度分布(機器稼働率 : 75%)

5.5 再循環率と風量比の関係

5.5.1 平均再循環率と風量比

図 5.18、図 5.19 に機器稼働率が 50%、75%における各モジュールの平均再循環率と風量比の関係を示す。なお、第 2 章、第 4 章にて検討した 6 ラックを 1 モジュールとして取り扱い、計 20 モジュールの平均再循環率と風量比の関係を示す。各モジュールの配置については、図 5.9 を参照されたい。

機器稼働率=50%時において、従来方式や局所空調方式の再循環率と風量比の関係は、各モジュールにおいて風量比の増加に伴い、平均再循環率が減少傾向を示す。特に、風量比が $V/V_m=0.8$ の場合において平均再循環率が約 1.5%と最も大きい。風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合、平均再循環率は概ね 0%と、ほとんど再循環していないことが確認できる。これは、5.4 節にて上述した空間温度分布の傾向と合致する。一方、壁吹出方式の場合、従来方式や局所空調方式と同様に、各モジュールにおいて風量比の増加に伴い再循環率は減少傾向を示すが、各モジュールによって風量比の増加に伴う再循環率の減少傾向や再循環率の値が異なる。特に、サーバ室端部に配置されたモジュールとそれ以外のモジュールによって傾向が異なり、サーバ室端部で、かつ空調機の吹出し口に近いモジュールでは他のモジュールに比べ再循環率が大きい傾向がある。この理由として、空調機の吹出し口が近いことから、他のモジュールに比べ空調機の吹出気流による影響を直接受けているからと思われる。また、壁吹出方式による再循環率は従来方式や局所空調方式の再循環率に比べ全体的に大きく、特に、サーバ室端部に配置され、空調機の吹出口に近いモジュール 9、モジュール 13 の再循環率は大きい。この理由として、壁吹出方式は混合換気・空調方式のようにサーバ室全体を掻き混ぜながら空調を行っていることが原因の一つとして考えられる。その結果、壁吹出方式の再循環率は他の空調方式による再循環率と大きく乖離している。

機器稼働率=75%時では、機器稼働率=50%と同様な傾向を示し、従来方式や局所空調方式では、各モジュールによる大きな差異は小さく、風量比の増加に伴い減少傾向を示す。一方、壁吹出方式の再循環率は、他の空調方式に比べ全体的に再循環率が大きく、特に、サーバ室端部に位置し、かつ空調機の吹出し口に近い配置となるモジュール 9 やモジュール 13、モジュール 17 での再循環率が大きい。これらに該当するモジュールでは、風量比 $V/V_m=1.1$ もしくは $V/V_m=1.2$ 以上の場合に再循環率の減少傾向が顕著になるが、これは空調機気流の影響を直接受けやすいモジュールの配置にあるためと考えられる。

以上より、機器の稼働率によらず、壁吹出方式は他の空調方式に比べ全体的に再循環率が大きく、空調機の吹出し口近くに配置されるラックを対象に、再循環率の減少傾向が顕著となる風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合、再循環率が抑制され空調効率が多少、向上すると考えられる。しかしながら、さらに機器排気による再循環の効率的な抑制手法の一つとして、例えば、ホットアイルキャッピングを併用する等、抜本的な対策が必要であると考えられる。

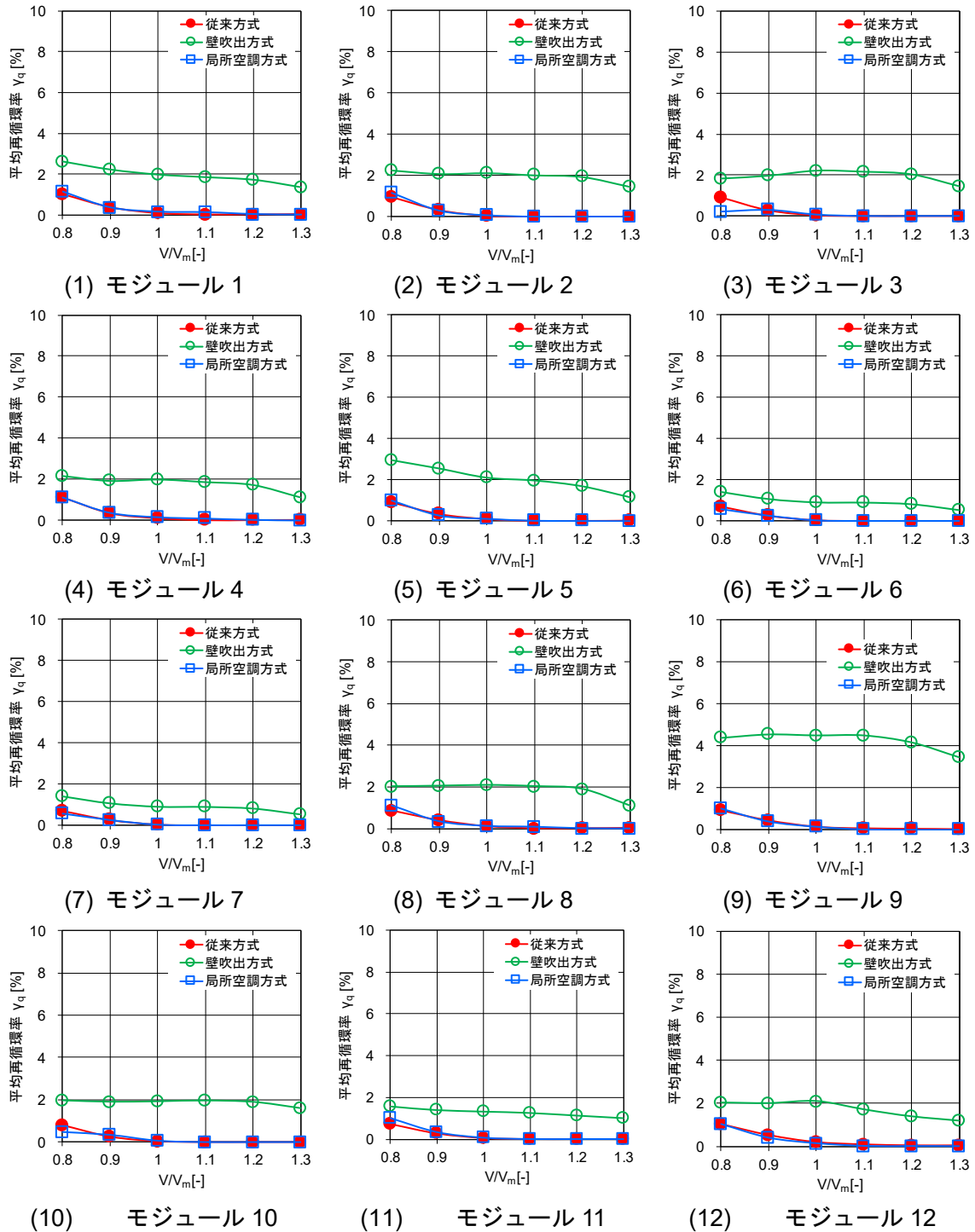


図 5.18 平均再循環率と風量比の関係(稼働率: 50%)

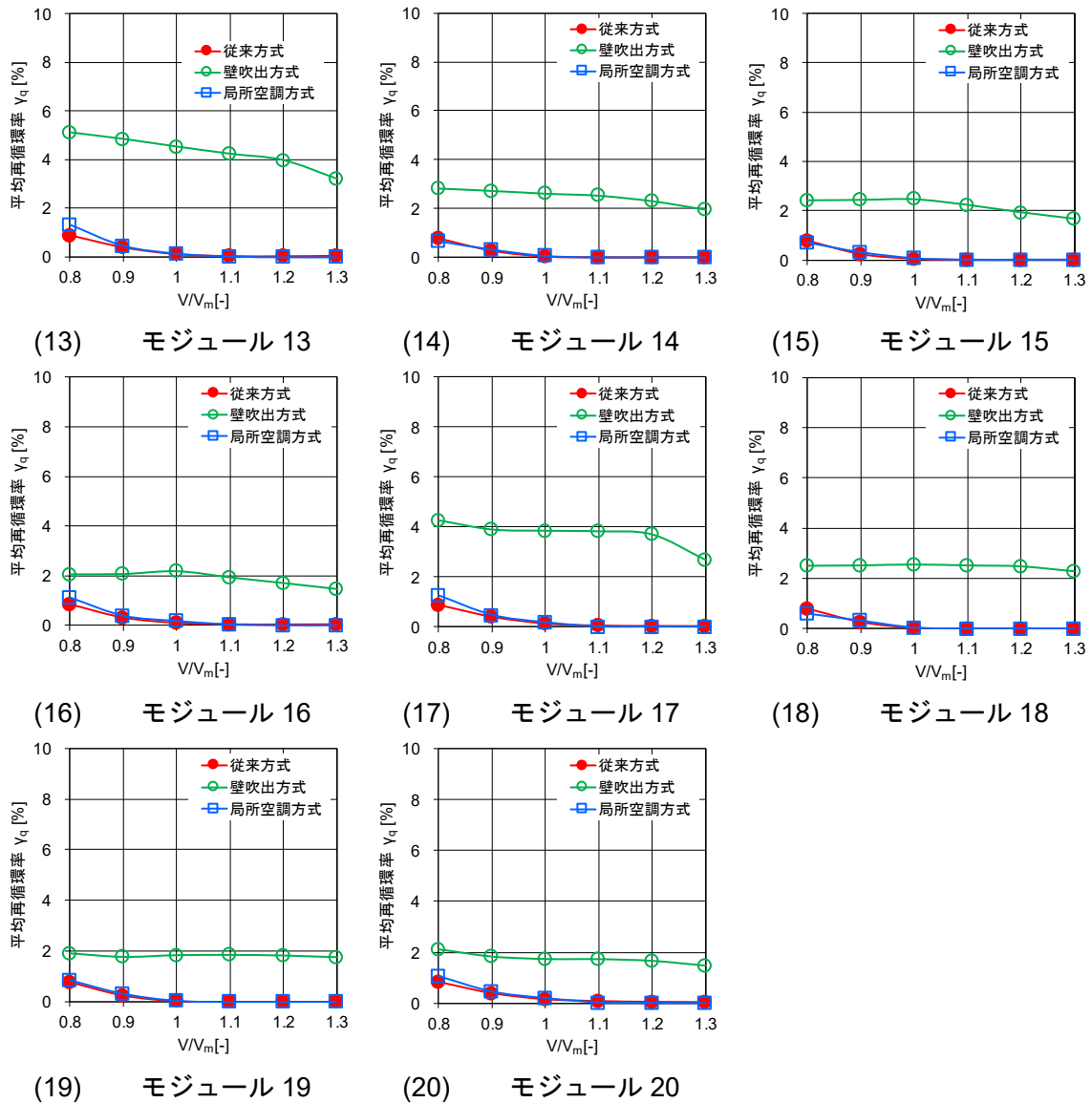


図 5.18 平均再循環率と風量比の関係(稼働率 : 50%)

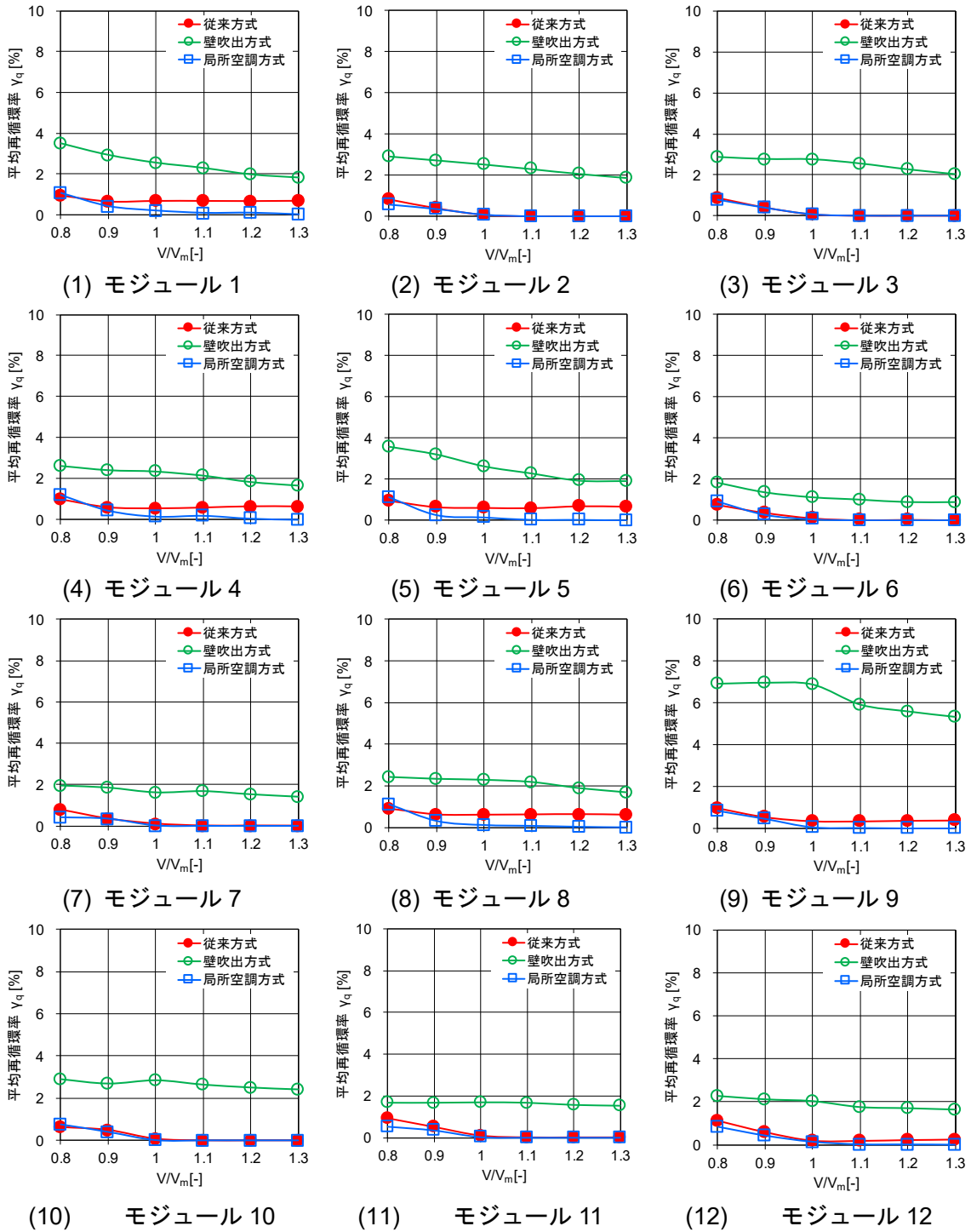


図 5.19 平均再循環率と風量比の関係(稼働率：75%)

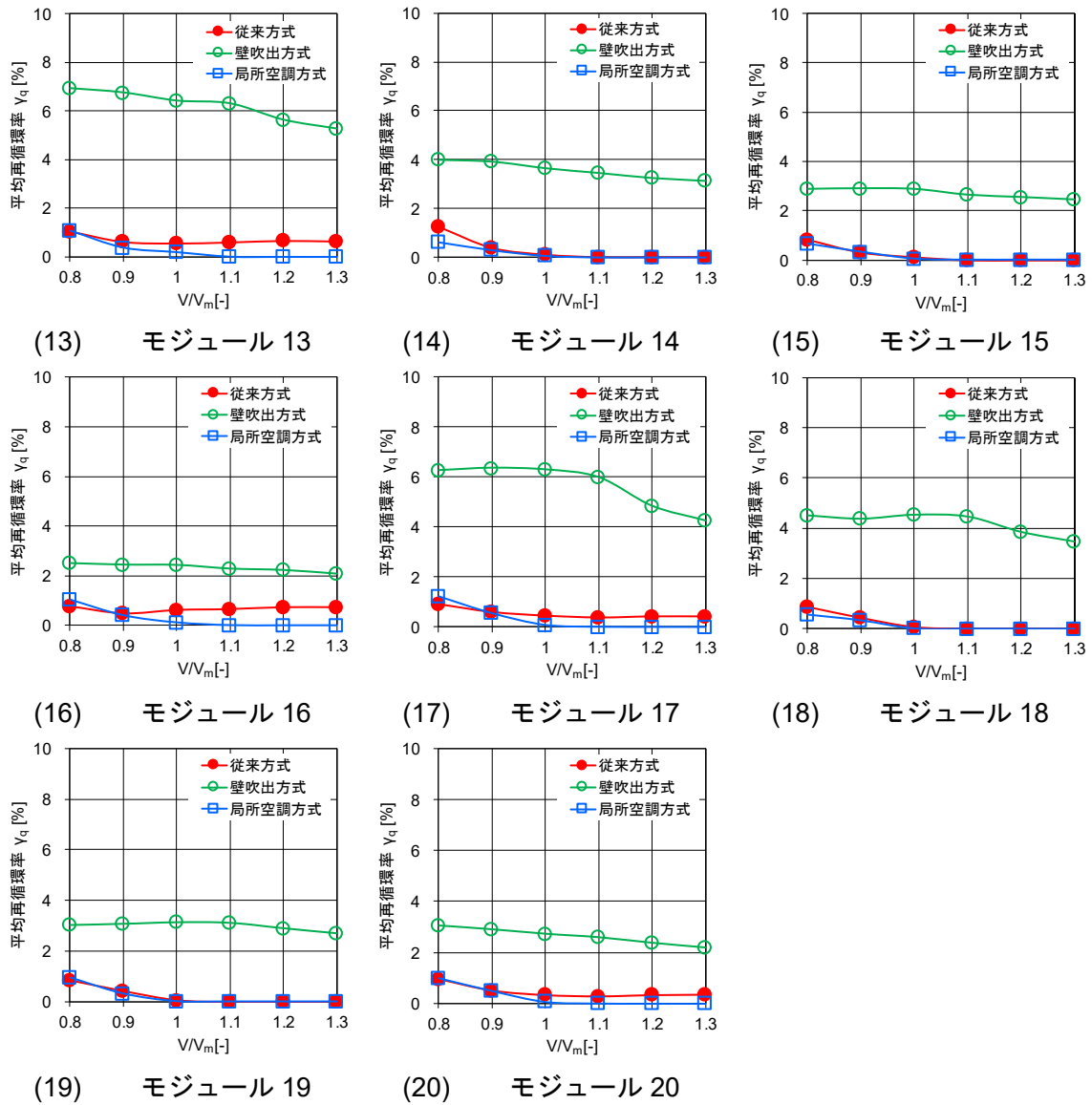


図 5.19 平均再循環率と風量比の関係(稼働率 : 75%)

5.5.2 最大再循環率と風量比

図 5.20、図 5.21 に機器稼働率が 50%、75%における各モジュールの最大再循環率と風量比の関係を示す。

機器稼働率=50%時において、各空調方式の最大再循環率と風量比の関係は、各モジュールにおいて風量比の増加に伴い、再循環率は減少傾向を示す。特に、局所空調方式の再循環率が全体的に小さく、風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合、最大再循環率が概ね 0 程度と各モジュールによる差異は小さく、再循環率を効率的に抑制可能な点が確認できる。一方、従来方式では、風量比 $V/V_m=1.0$ 以下の場合、最大再循環率は風量比の減少に伴い増加傾向を示し、特に、風量比 $V/V_m=0.8$ の場合に最大再循環率が他の空調方式に比べ大きく、サーバ室端部のモジュールより、それ以外のサーバ室中央部に配置されるモジュールにて顕著な傾向を示す。この理由として、サーバ室の中央部に配置されるモジュールでは、機器から排気された高温空気がラック上部より再循環している影響が大きいことが考えられる。また、壁吹出方式においては、他の空調方式に比べ風量比の増加に伴う再循環率は緩やかな減少傾向を示す。特に、サーバ室中央部に配置されたモジュールでは、風量比の増減によらず、最大再循環率と風量比の関係は概ね似た傾向を示すが、一方、サーバ室端部に配置し、空調機の吹出口に近いモジュールでは、ラック端部からの再循環を効率的に抑制できてないため、他のモジュールに比べ比較的に最大再循環率が大きく、風量比 $V/V_m=1.2$ 以上の場合、風量比の増加に伴い再循環率の減少勾配が大きくなる傾向を示す。特に、モジュール 9、モジュール 17 において、その傾向が顕著となる。

機器稼働率=75%時では、機器稼働率=50%と同様に、各空調方式の最大再循環率と風量比の関係は、各モジュールによって風量比の増加に伴い再循環率は減少傾向を示す。特に、局所空調方式の再循環率が全体的に小さく、風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合、最大再循環率を大幅に抑制することが可能で、各モジュールによる差異は小さい。壁吹出方式においては、各モジュールで風量比の増加に伴い、安定した緩やか減少傾向を示す。特に、サーバ室端部、かつ空調機の吹出し口に近いモジュールにて最大再循環率が大きくなる傾向を示し、モジュール 9 ではその傾向が顕著となる。一方、従来方式においては他の空調方式に比べ、サーバ室端部に配置されたモジュールでは風量比の増加に伴い、再循環率は緩やかな減少傾向を示し、風量比 $V/V_m=1.0$ 以上の場合、最大再循環率による差異は小さい。一方、サーバ室の中央部に配置されたモジュールでは、平均再循環率と風量比の関係と同様に、風量比の増加に伴う再循環率の減少傾向が顕著となる。特に、風量比 $V/V_m=1.0$ 未満の場合、他の空調方式に比べ再循環率が大幅に大きいのが、風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合、局所空調方式と同様に、最大再循環率が概ね 0 程度と小さく、機器排気による再循環率を効率的に抑制できると考えられる。

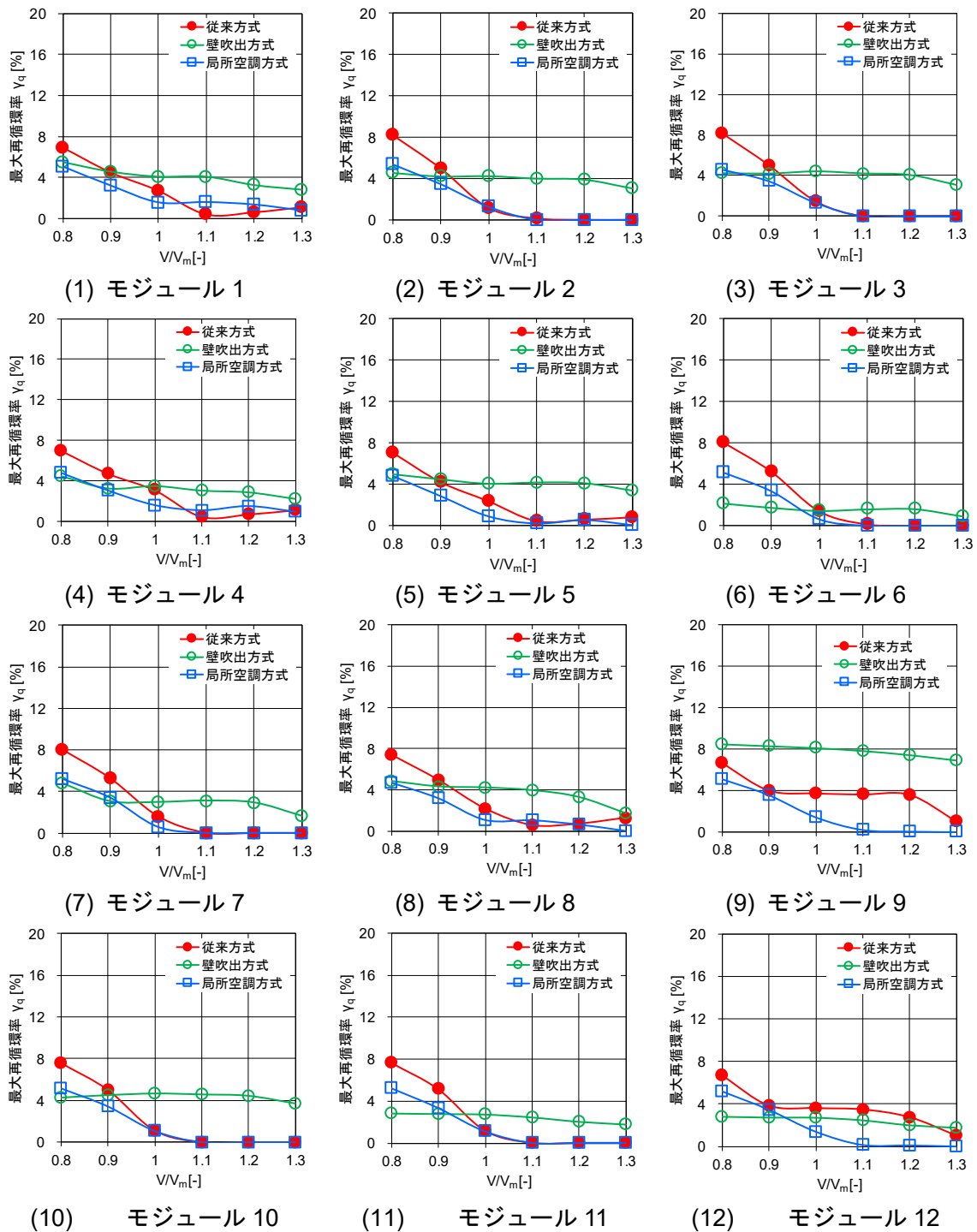
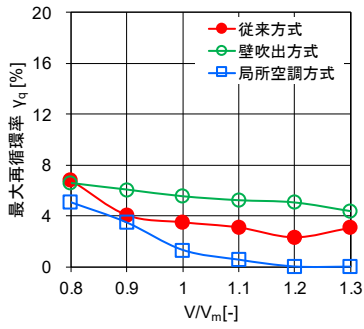
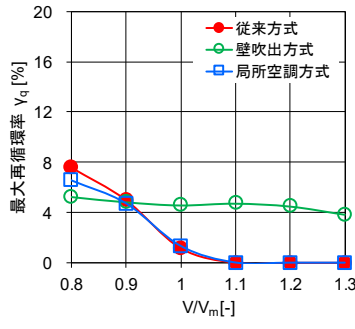


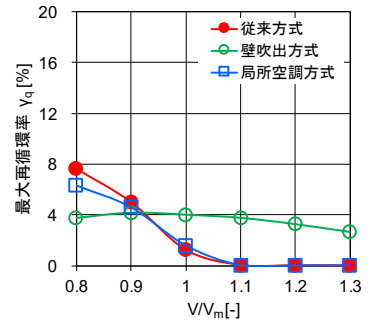
図 5.20 最大再循環率と風量比の関係(稼働率：50%)



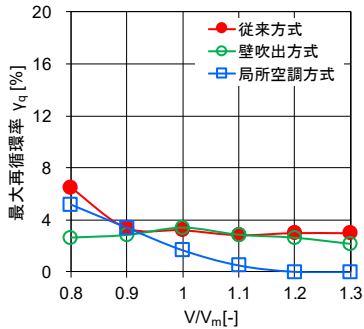
(13) モジュール 13



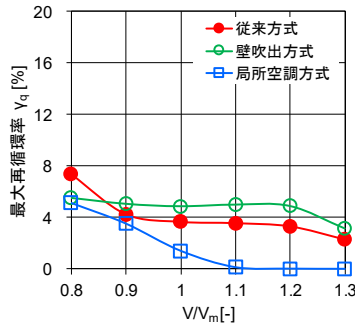
(14) モジュール 14



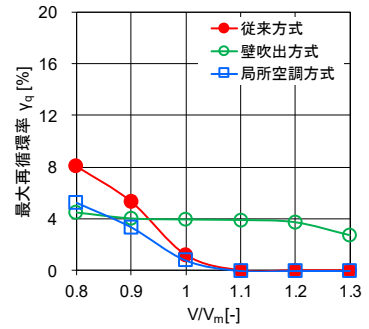
(15) モジュール 15



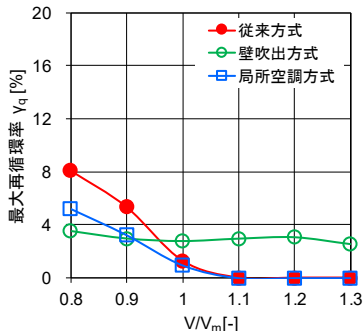
(16) モジュール 16



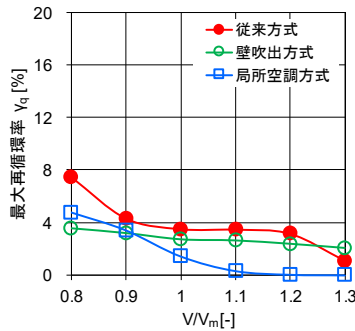
(17) モジュール 17



(18) モジュール 18



(19) モジュール 19



(20) モジュール 20

図 5.20 最大再循環率と風量比の関係(稼働率 : 50%)

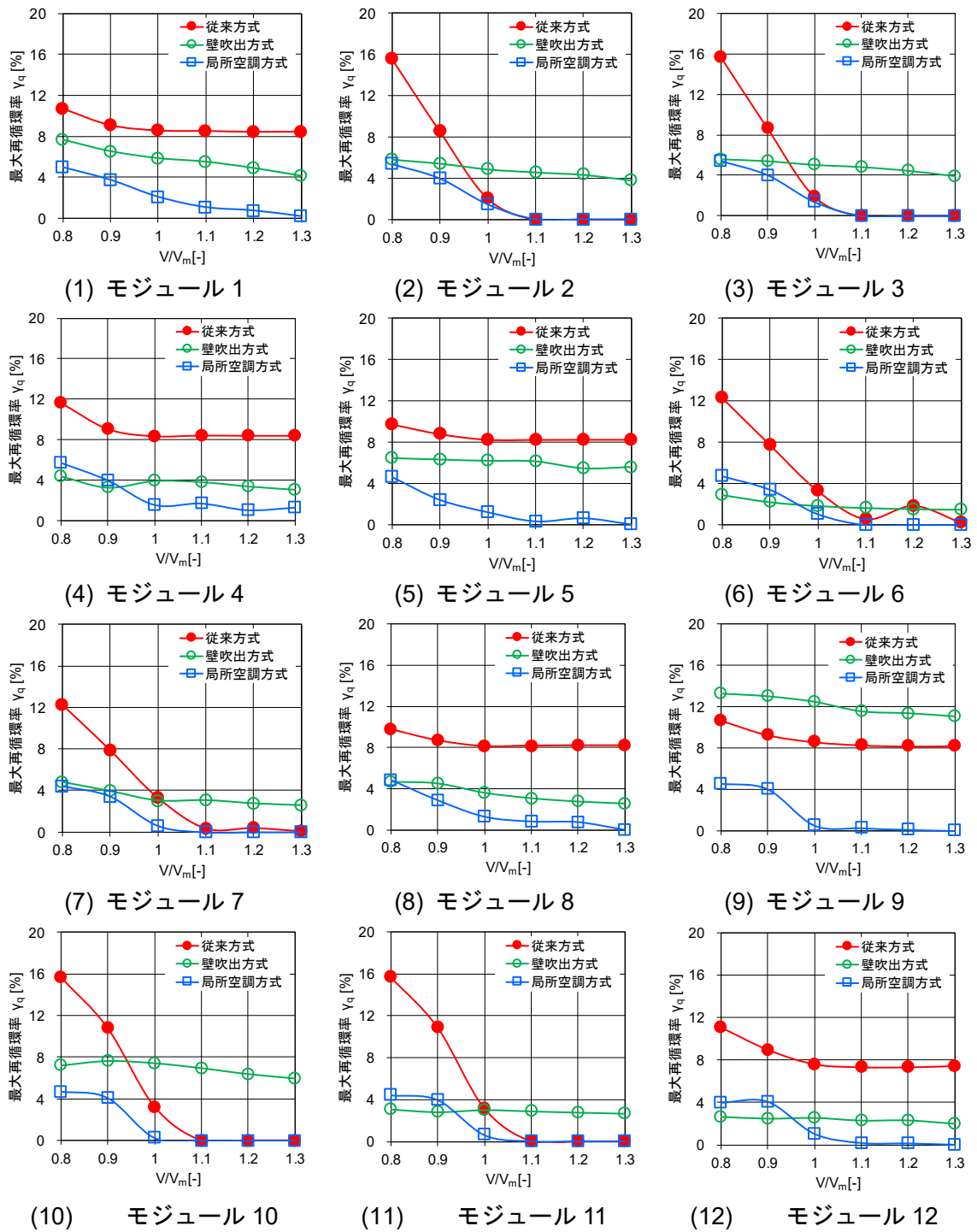
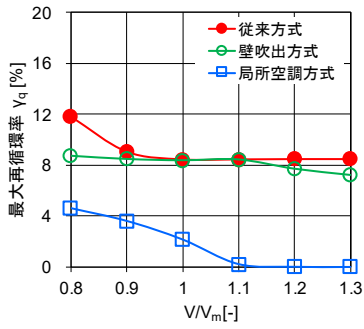
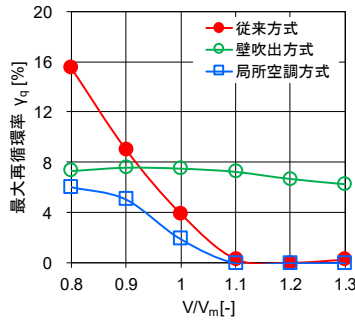


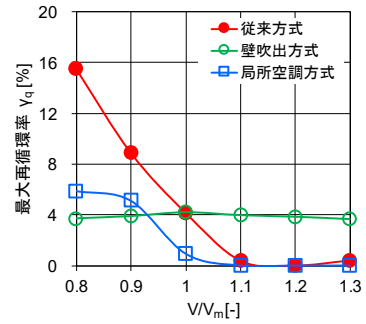
図 5.21 最大再循環率と風量比の関係(稼働率：75%)



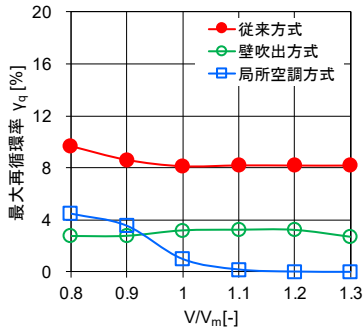
(13) モジュール 13



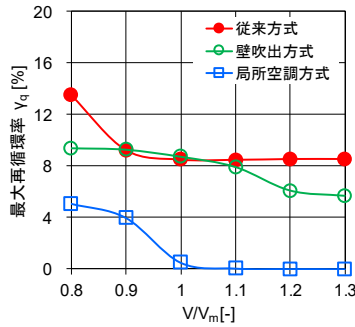
(14) モジュール 14



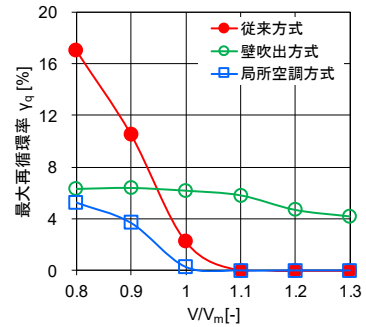
(15) モジュール 15



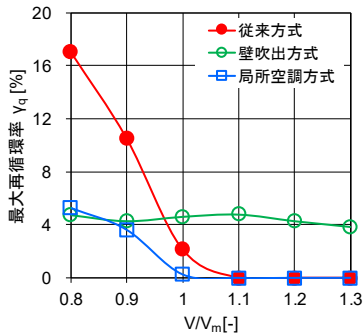
(16) モジュール 16



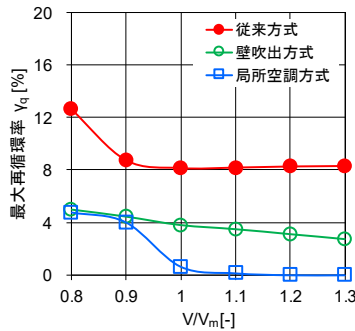
(17) モジュール 17



(18) モジュール 18



(19) モジュール 19



(20) モジュール 20

図 5.21 最大再循環率と風量比の関係(稼働率 : 75%)

5.6 機器吸込み温度と風量比の関係

5.6.1 機器吸込み平均温度と風量比

図 5.22、図 5.23 に機器稼働率が 50%、75%における各モジュールの機器吸込み平均温度と風量比の関係を示す。各モジュールの配置については、図 5.9 を参照されたい。

機器稼働率=50%時において、5.5 節に上述した平均再循環率と風量比の関係と同様に、従来方式と局所空調方式では、機器吸込み平均温度と風量比の関係は風量比の増加に伴い、機器吸込み平均温度が減少傾向を示し、各モジュールによる差異は小さい。特に、風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合、機器吸込み平均温度の低温化が可能である。一方、壁吹出方式では、他の空調方式に比べ機器吸込み平均温度は全体的に高く、風量比の増加に伴い緩やかな減少傾向を示す。特に、サーバ室端部に位置し、空調機の吹出し口に近いモジュールでは、機器吸込み温度が他のモジュールに比べ高い傾向を示し、モジュール 9 ではその傾向が顕著となる。この理由として、空調機の吹出気流により機器から排気された高温空気が誘引され、空調機の排気口にて効率的に排気されず、機器吸込み側に再循環しているためと考えられる。また、壁吹出方式における空調機の吹出し口に近いモジュールでは、風量比 $V/V_m=1.2$ 以上の場合、風量比の増加に伴い再循環率の減少勾配が大きくなる傾向を示す。

機器稼働率=75%における機器吸込み平均温度と風量比の関係は、機器稼働率=50%と同様な傾向を示し、壁吹出方式では、特に、サーバ室端部に配置され、空調機の吹出し口に近いモジュールにおいて、他のモジュールより機器吸込み平均温度が高くなる傾向を示す。これは、空調機の吹出気流により機器から排気された高温空気が誘引され、空調機の排気口にて効率的に排気されず、機器吸込み側に再循環しているためと考えられる。

以上より、機器吸込み平均温度と風量比の関係は、機器の稼働率によらず、第2章にて検討した結果と同様に、各空調方式において、風量比の増加に伴い機器吸込み平均温度は減少傾向を示す。壁吹出方式においては、混合換気・空調方式のようにサーバ室全体を掻き混ぜながら空調を行っているため、機器の稼働率によらず、他の空調方式に比べ機器吸込み平均温度が高い。特に、空調機の吹出し口に近いモジュールにおいて、風量比 $V/V_m=1.2$ 以上の場合、風量比の増加に伴う再循環率の減少勾配が大きくなる。一方、局所空調方式や従来方式においては、機器の稼働率によらず、風量比の増加に伴い機器吸込み平均温度が減少傾向を示し、風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合、機器吸込み平均温度の低温化が可能である。

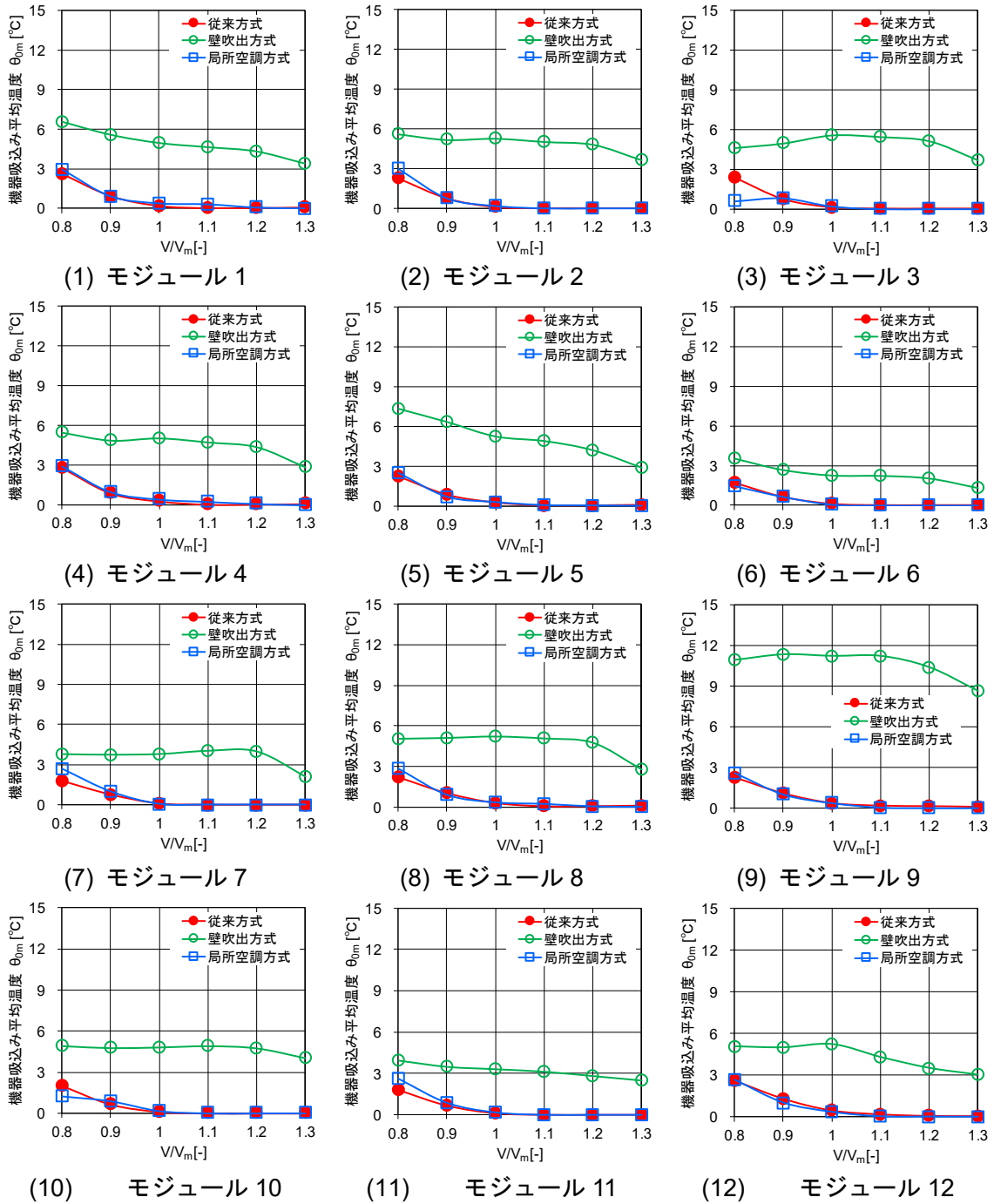


図 5.22 機器吸込み平均温度と風量比の関係(稼働率：50%)

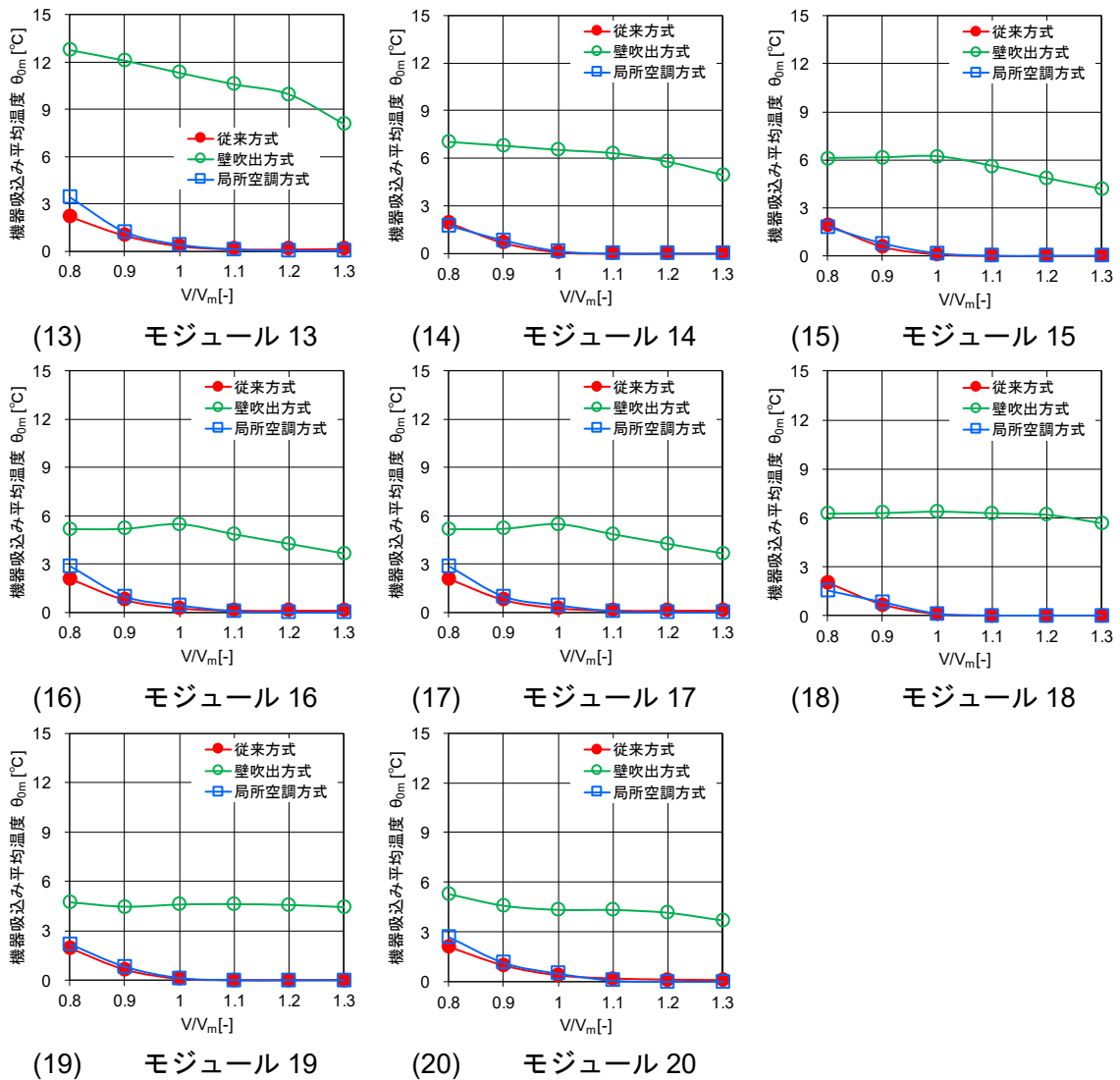


図 5.22 機器吸込み平均温度と風量比の関係(稼働率 : 50%)

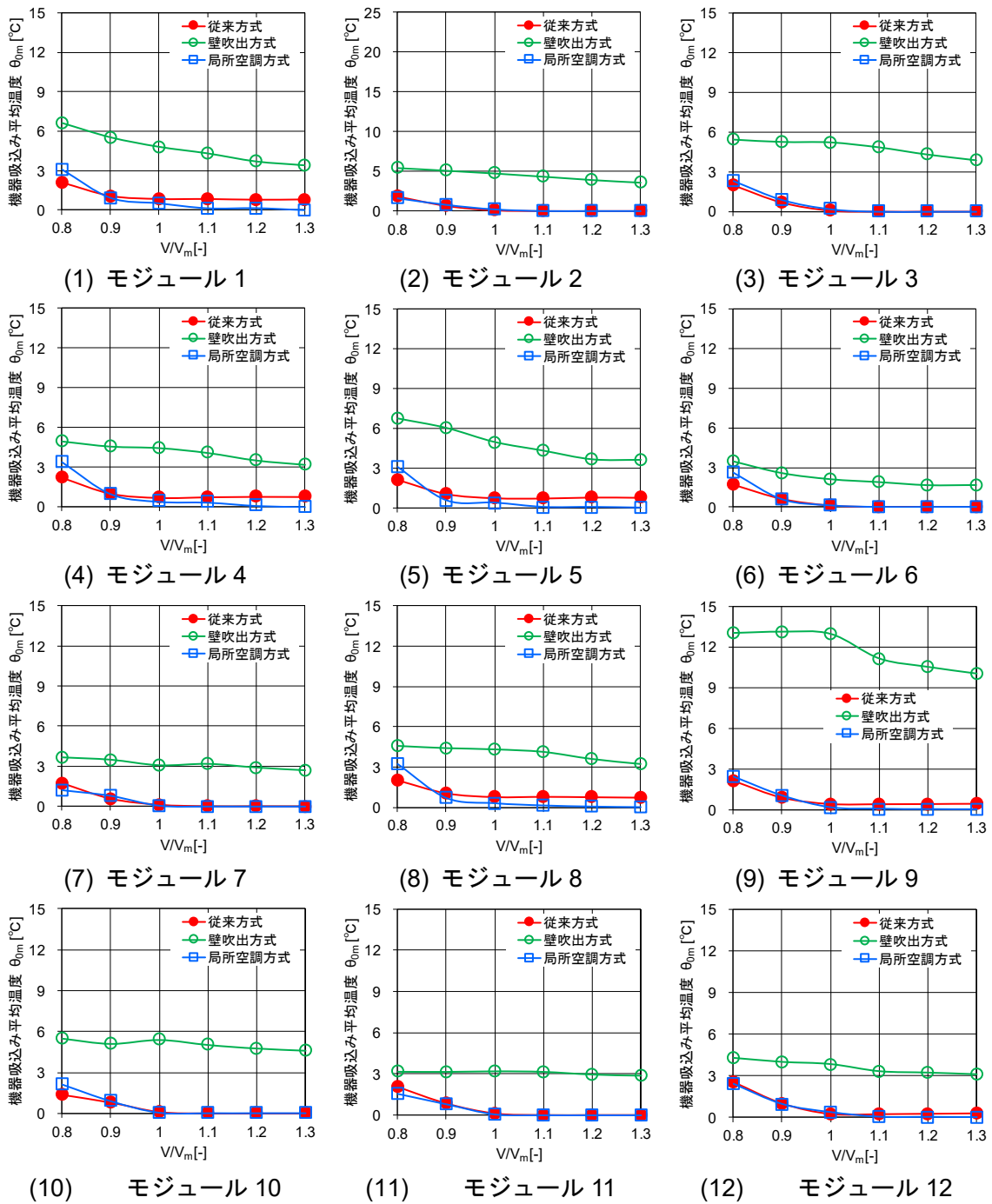


図 5.23 機器吸込み平均温度と風量比の関係(稼働率: 75%)

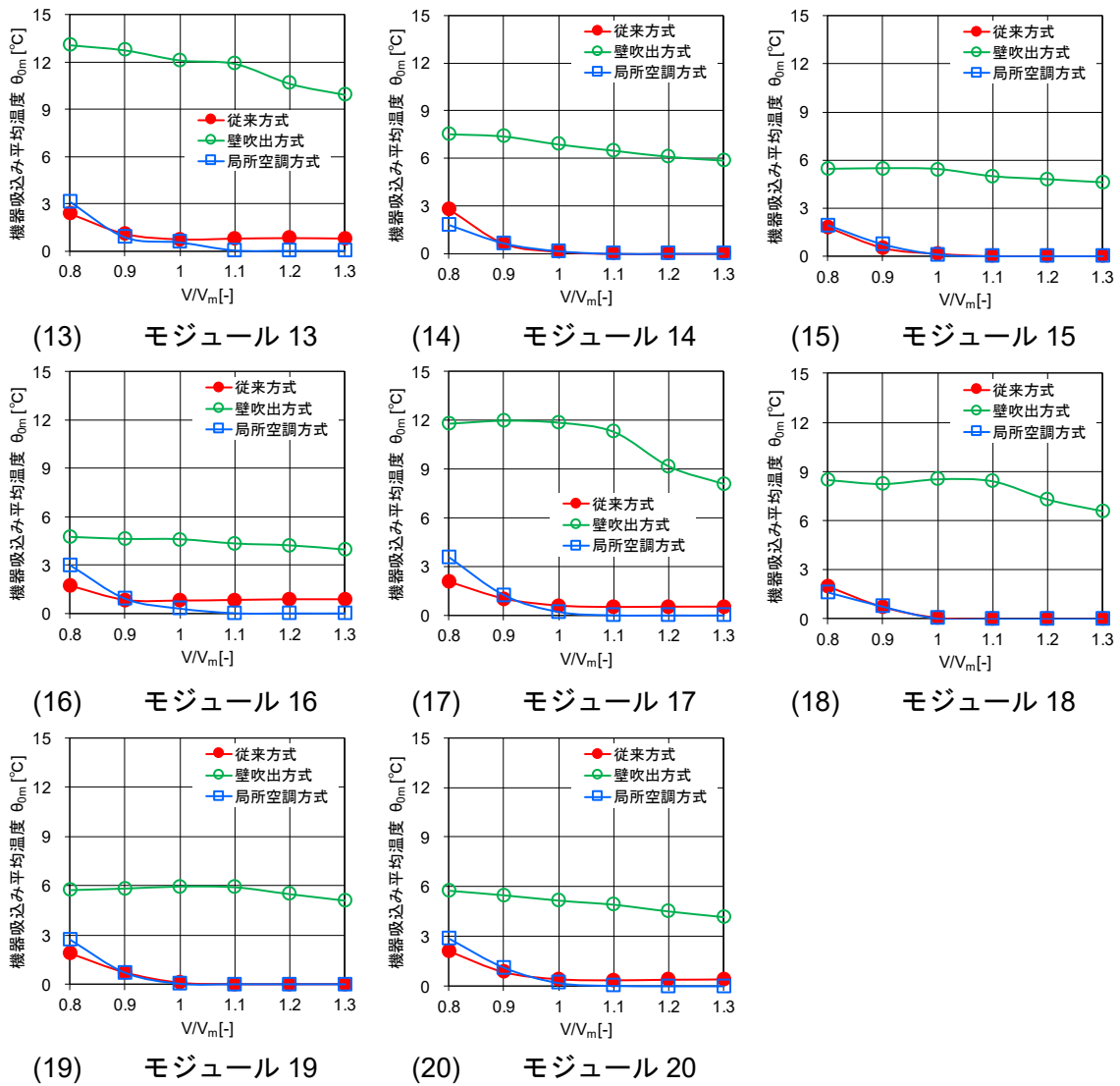


図 5.23 機器吸込み平均温度と風量比の関係(稼働率 : 75%)

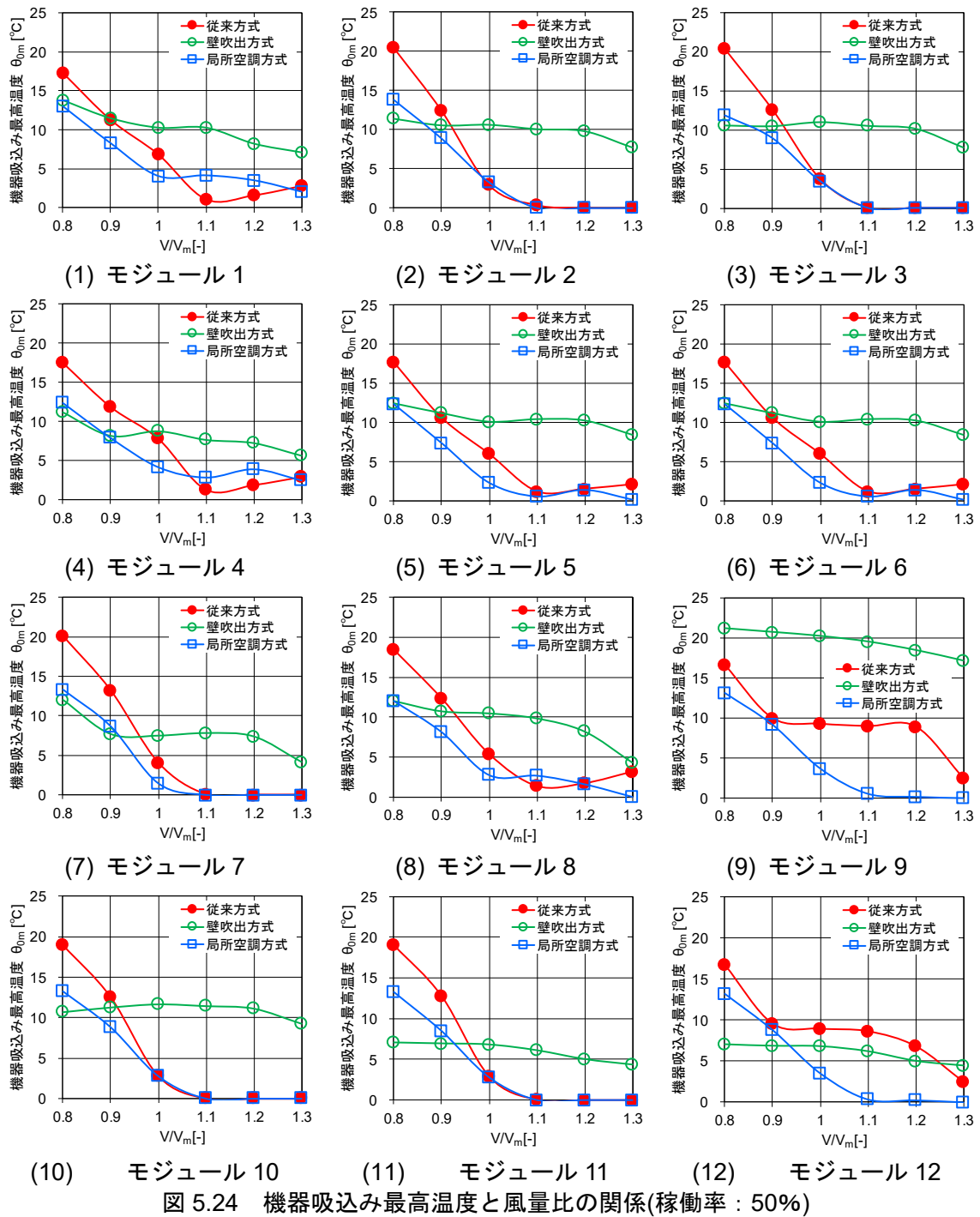
5.6.2 機器吸込み最高温度と風量比

図 5.24、図 5.25 に機器稼働率が 50%、75%における各モジュールの機器吸込み最高温度と風量比の関係を示す。各モジュールの配置については、図 5.9 を参照されたい。

機器稼働率=50%において、5.5 節に上述した、最大再循環率と風量比の関係と同様に、各空調方式の機器吸込み最大温度と風量比の関係は多少の差異はあるものの、風量比の増加に伴い、機器吸込み最高温度が減少傾向を示す。各モジュールによる差異が小さい局所空調方式では、他の空調方式に比べ機器吸込み最高温度を低くすることが可能である。一方、従来方式では、他の空調方式に対して、風量比の増加に伴う機器吸込み最高温度の減少傾向が顕著となり、風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合、機器吸込み最高温度を低く維持することが可能である。特に、サーバ室端部に配置されるモジュールにおいて、風量比 $V/V_m=0.9$ 以上の場合、ラック端部を経由して機器から排気された高温空気の再循環によって、機器吸込み最高温度は十分な低温化が期待できないが、 $V/V_m=1.3$ の場合には機器吸込み最高温度の大幅な低温化が可能となる。壁吹出方式においては、他の空調方式に比べ機器吸込み最高温度はサーバ室全体を混合させるような空調を行っているため全体的に温度は高く、風量比の増加に伴い緩やかな減少傾向を示す。特に、サーバ室端部に配置されるモジュールなどの例外を除けば、風量比 $V/V_m=0.9$ 以下の場合、他の空調方式より機器吸込み最高温度の低温化が可能である。一方、サーバ室端部に配置されるモジュールで、特に、空調機の吹出し口に近いモジュールでは、風量比 $V/V_m=1.2$ 以上の場合、風量比の増加に伴い再循環率の減少勾配が大きくなる傾向を示し、モジュール 9 などで顕著となる。

機器稼働率=75%時における機器吸込み最高温度と風量比の関係は、機器稼働率=50%時と同様に、各空調方式において、風量比の増加に伴い機器吸込み最高温度は減少傾向を示す。局所空調方式は、各モジュールによる差異が小さく、安定的に機器吸込み最高温度の低温化を図ることが可能である。一方、壁吹出方式において、風量比の増加に伴い緩やかな減少傾向となるが、特に、サーバ室端部に配置され、空調機の吹出し口に近いモジュールでは、他の空調方式に対して機器吸込み最高温度が高く、モジュール 9 で顕著となる。一方、これ以外のサーバ室端部や中央部に配置されるモジュールの機器吸込み最高温度は、風量比 $V/V_m=0.8$ の場合、他の空調方式に比べ低温化することができる。従来方式において、他の空調方式に比べ、サーバ室中央部に配置されたモジュールでは、風量比の増加に伴い機器吸込み最高温度の減少傾向が顕著となる。一方、サーバ室端部に配置されたモジュールでは風量比の増加により、再循環率は緩やかな減少傾向を示し、 $V/V_m=0.9$ 以上の場合、機器吸込み最高温度による差異は小さく、十分な低温化が期待できないと言える。

以上より、機器の稼働率や各空調方式による差異は多少あるものの、風量比 $V/V_m=1.2$ 以上とすることで機器吸込み最高温度の低温化が可能と考えられる。



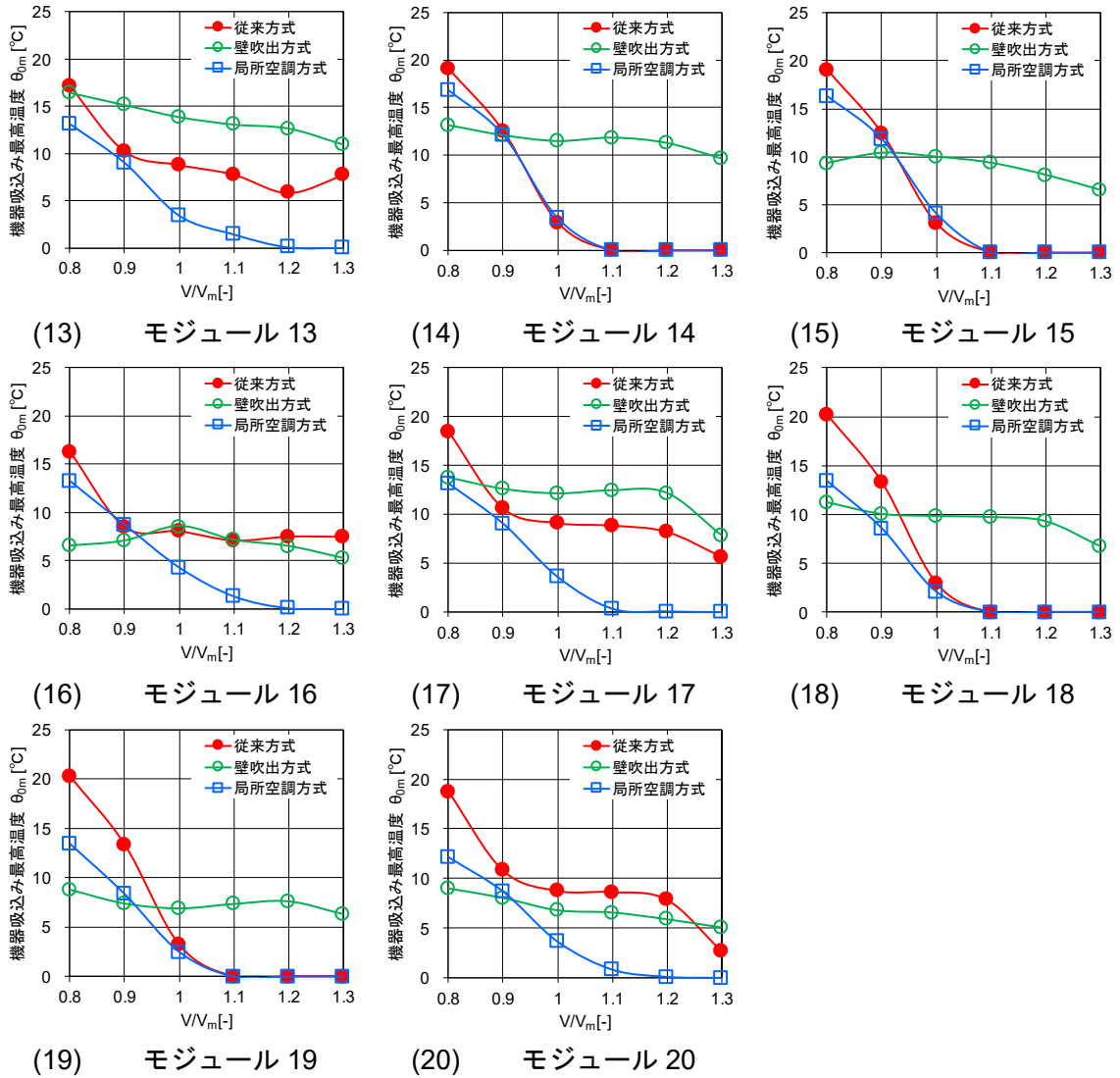


図 5.24 機器吸込み最高温度と風量比の関係(稼働率: 50%)

第5章 実大規模による空調効率向上のための空調計画に関する検討

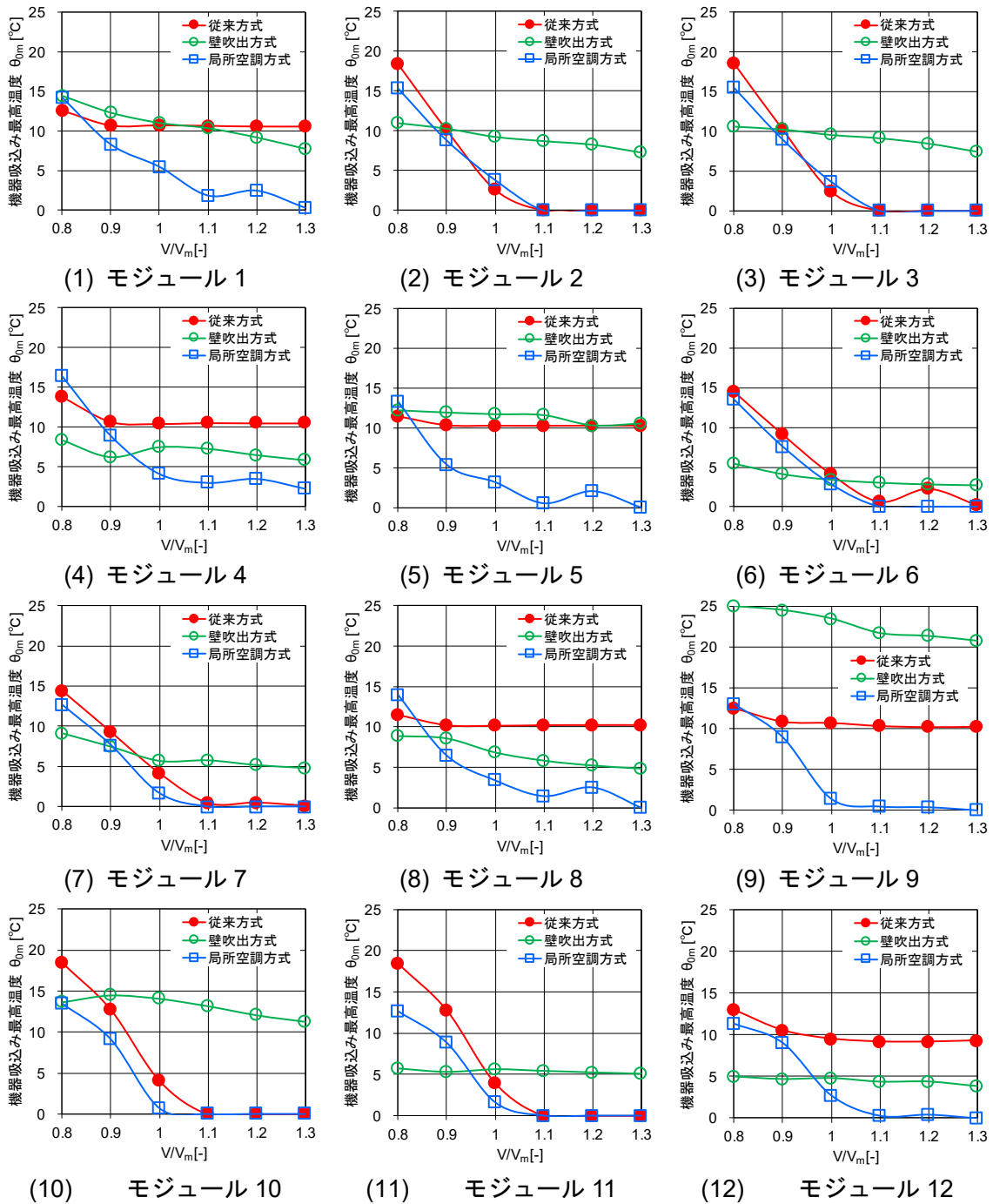
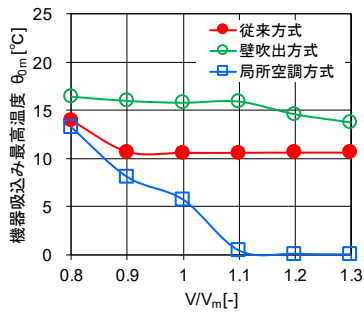
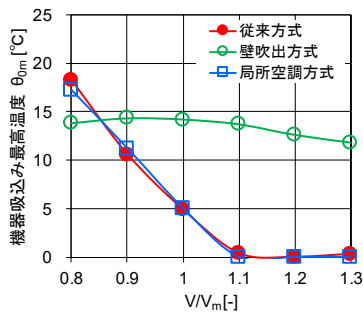


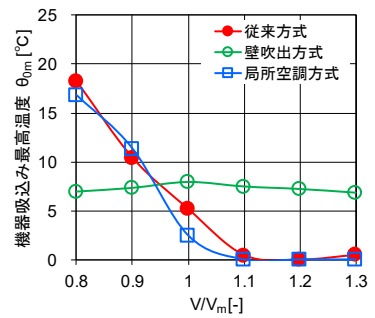
図 5.25 機器吸込み最高温度と風量比の関係(稼働率 : 75%)



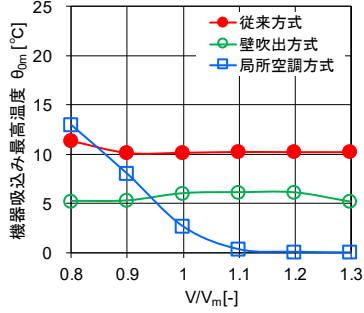
(13) モジュール 13



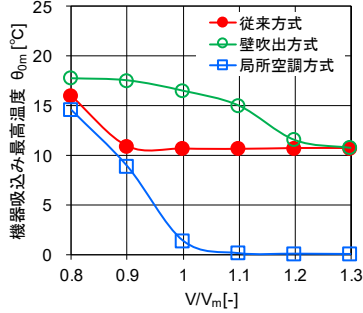
(14) モジュール 14



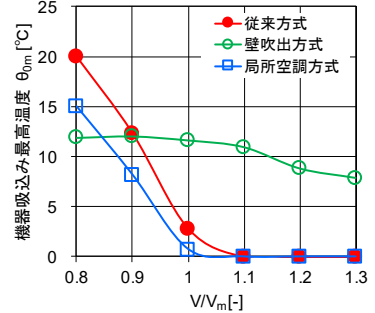
(15) モジュール 15



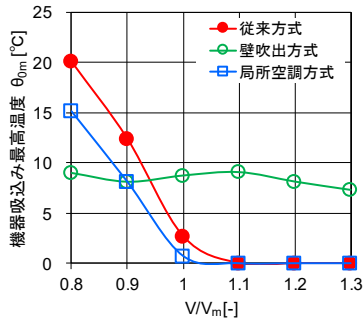
(16) モジュール 16



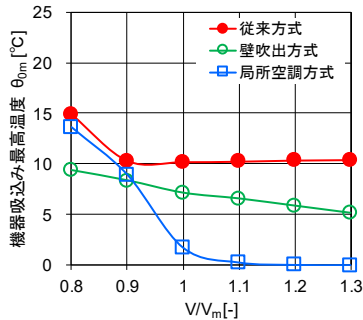
(17) モジュール 17



(18) モジュール 18



(19) モジュール 19



(20) モジュール 20

図 5.25 機器吸込み最高温度と風量比の関係(稼働率 : 75%)

5.7 空調効率と風量比の関係

これまでの知見により、再循環率と風量比の関係や機器吸込み温度と風量比の関係については、第2章で検討した小規模な空間を対象として、風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合、各空調方式による差異を小さくすることが可能であることが確認された。また、5.6節までに上述した検討結果より、実大規模を想定した空間を対象として、機器の稼働率や各空調方式による差異は多少あるものの、風量比 $V/V_m=1.2$ が空調効率を向上させる上での効率的なポイントであることが示唆された。このようなことから、実務の設計や運用時において、再循環率や機器吸込み温度を効率的に抑制できる風量比の関係について明らかにする必要がある。

そこで、空調効率と風量比の関係を明らかにするために、対象モデルとして従来方式、局所空調方式、壁吹出方式の3モデルを対象とし、サーバ室内側(二次側)と熱源側(一次側)を対象としたエネルギー消費量の試算を行う。試算条件として、サーバ室のエネルギー消費量は空調風量として消費される搬送エネルギー分を考慮して検討を行う。ここで、搬送用エネルギー消費量の算出方法として、近年、データセンターで導入傾向が多いECファン³⁰⁾の定格消費電力を用いて検討を行う。一方、熱源側のエネルギー消費量はポンプなどの補機類は考慮せず、熱源機器のみを対象として試算を行う。ここで、熱源用エネルギー消費量の算出方法として、近年、データセンターで導入傾向が多い空冷チラー³¹⁾を用いて、定格COP=6.3の条件にて、機器吸込み最高温度による上昇分を冷却するために必要な冷熱量について、5.6節にて得られた、機器吸込み最高温度と空調風量を用いて算出した。図5.26、図5.27に機器の稼働率別に6ラック分を対象とした1モジュール、サーバ室の半分である120ラックを対象とした20モジュール、サーバ室全体の240ラックを対象とした40モジュールにおける機器の稼働率別の空調効率と風量比の関係について示す。なお、各空調方式において、機器吸込み最高温度が顕著に高いモジュールを対象とし、機器稼働率=50%時において、従来方式ではモジュール2、壁吹出方式ではモジュール9、局所空調方式ではモジュール14、一方、機器稼働率=75%時において、従来方式ではモジュール19、壁吹出方式ではモジュール9、局所空調方式ではモジュール14にて試算を行う。

図5.26、図5.27より、1モジュール、20モジュール、40モジュールの空調効率と風量比の関係において、搬送用エネルギー消費量は空調方式によらず、風量比の増加に伴い増加傾向を示す。一方、熱源用エネルギー消費量については、従来方式と局所空調方式で風量比の増加に伴い減少傾向を示すが、一方、壁吹出方式においては、機器吸込み温度が他の空調方式に比べ非常に高いことから、風量比の増加に伴い増加傾向を示す。以上より、搬送用エネルギー消費量と熱源用エネルギー消費量を組み合わせた空調効率と風量比の関係は、従来方式と局所空調方式において、機器稼働率によらず、風量比が $V/V_m=1.1$ にて空調効率が最大となる。一方、壁吹出方式においては、風量比が $V/V_m=0.8$ にて空調効率が最大となるが、この理由として、壁吹出方式は他の空調方式とは異なり、空調機の吹出気流速度が速いことから、混合換気・空調方式のようにサーバ室全体を掻き混ぜながら空調を行うため、他の空

調方式より機器吸込み最高温度が非常に高く、風量比の増加に伴う機器吸込み最高温度の低温化があまり期待できないことが原因の一つとして考えられる。すなわち、熱源用エネルギー消費量は、機器吸込み最高温度による上昇分を冷却するために必要な冷熱エネルギーとして算出しているため、従来方式や局所空調方式のように、機器吸込み側を効率的に空調可能な空調な場合、風量比の増加に伴う機器吸込み最高温度の低温化により、熱源用エネルギー消費量は風量比の増加に伴い、大幅なエネルギー消費量の削減が期待できる。一方、壁吹出方式のように、サーバ室全体を掻き混ぜながら非効率な空調を行う場合、風量比の増加に伴い機器吸込み温度の低温化が十分に期待できないことから、機器吸込み最高温度の温度上昇分を冷却するために必要なエネルギー消費量、つまり、熱源用エネルギー消費量が風量比の増加に伴い増加したために、風量比が $V/V_m=0.8$ にて空調効率が最大となったと推察される。

以上より、機器吸込み温度と風量比の関係から、設計段階において空調効率を予測可能であり、運用段階では適切な操作ポイントを判断することが可能であることが期待される。

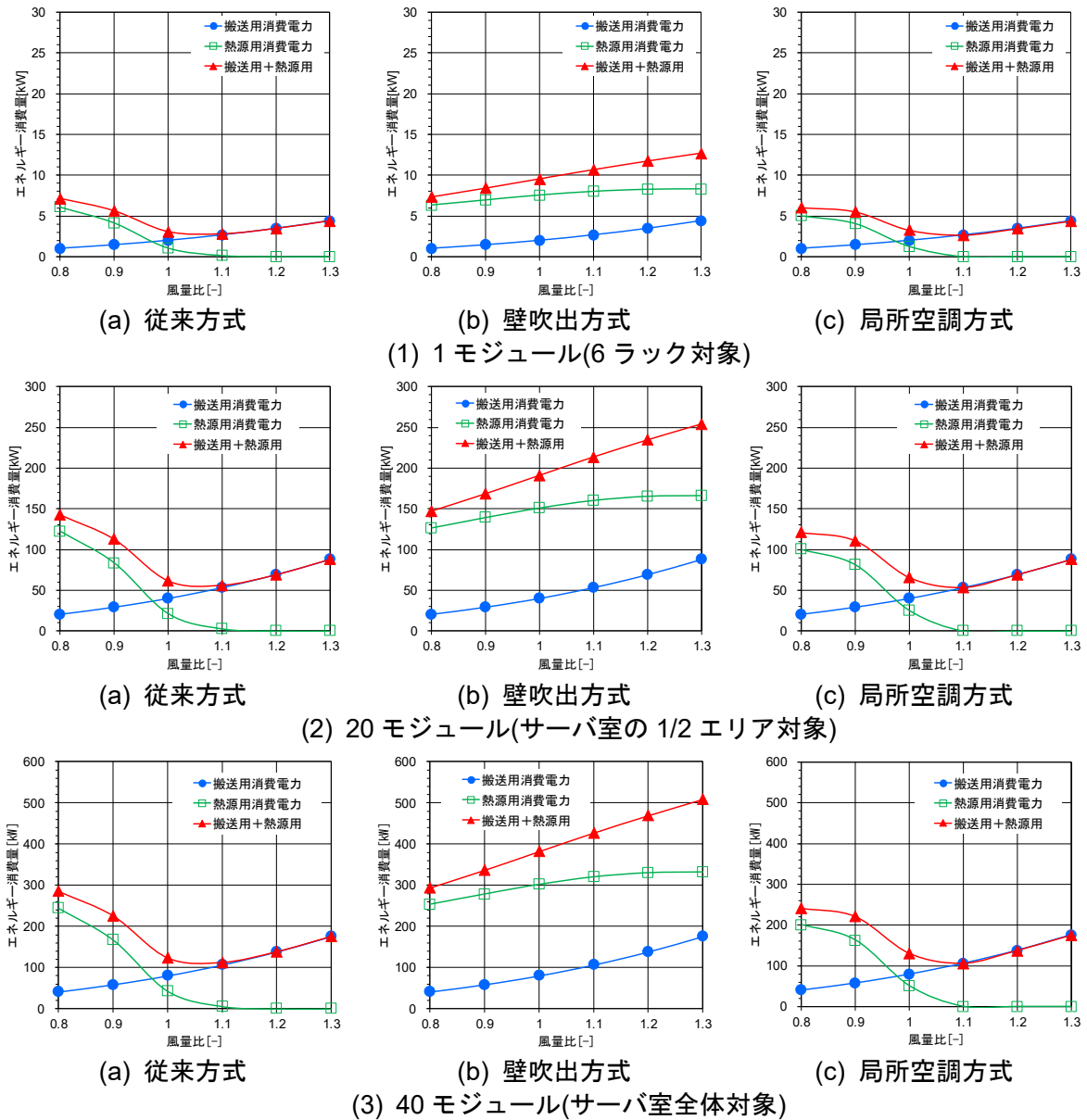


図 5.26 空調効率と風量比の関係(機器稼働率 : 50%)

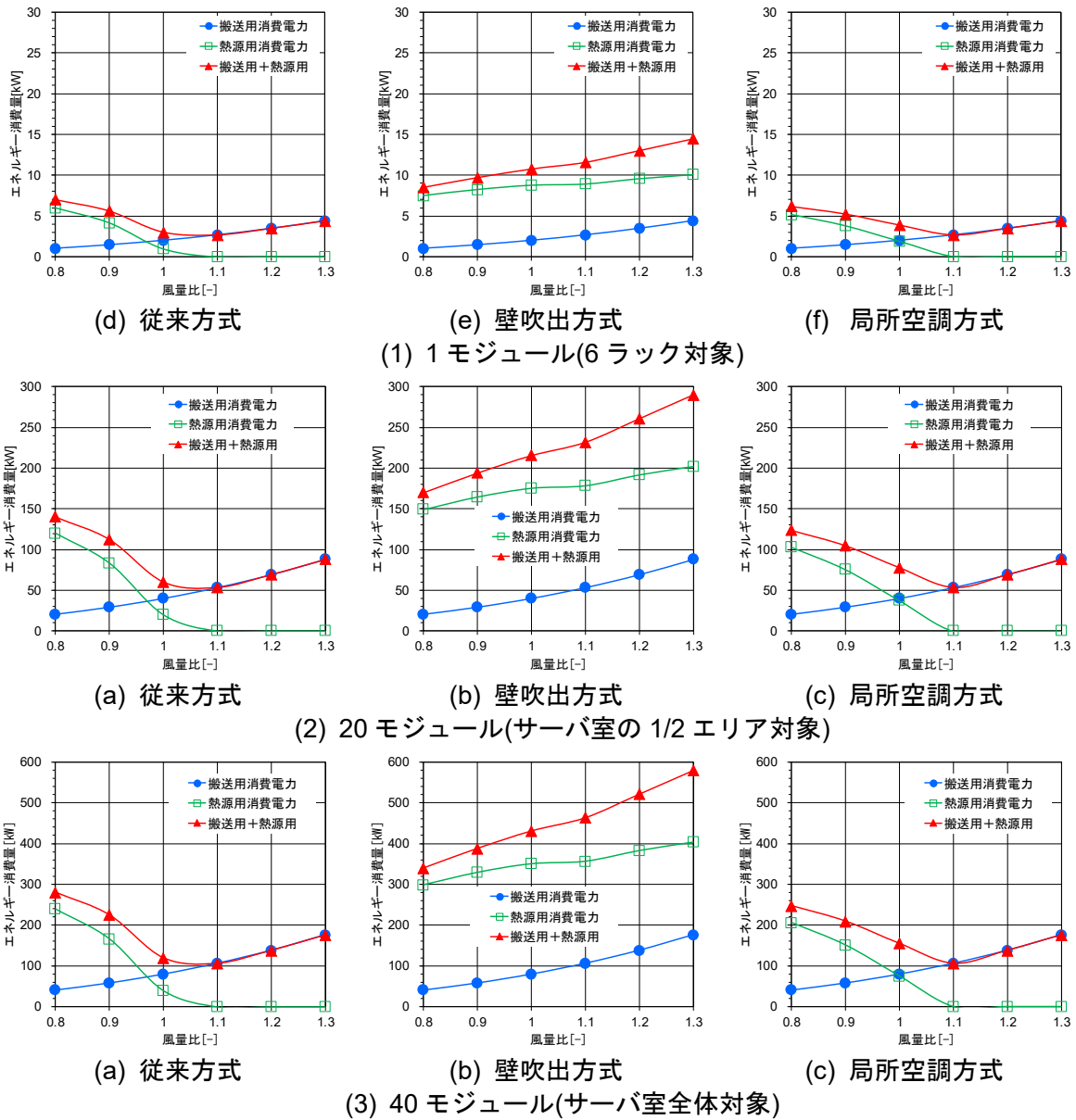


図 5.27 空調効率と風量比の関係(機器稼働率 : 75%)

5.8 空調計画手法の提案

これまでの知見より、従来方式と局所空調方式では風量比 $V/V_m=1.1$ 程度とすることで空調効率が効果的に向上できる点を確認した。一方、壁吹出方式では風量比 $V/V_m=0.8$ 程度の場合、空調効率の向上に期待できるが、そもそも本解析モデルのように、ホットアイルチャンバを構築せず、混合換気・空調方式のようにサーバ室全体を空調する場合、他の空調方式に比べ機器吸込み最高温度の低温化が期待できない場合、例えば、第一に、機器排気側をホットアイルキャッピングによる構築や、空調の吹出し口や吸込み口のレイアウト変更、空調による吹出気流速の改善など、機器吸込み温度の低温化に向けた抜本的な対策が必要であると考えられる。

データセンターの空調計画に関する設計や運用上の課題として、設計段階ではラック単位の負荷情報しか入手できないことにより、空調風量と ICT 機器の風量とのアンバランスにより、空調効率が低下することが挙げられる。また、運用段階では管理側の運用方法次第では設計時の計画内容と異なることにより、状況によっては空調の運用方法や空調計画を見直す必要が生じる場合もあり得る。このような課題に対して、実務において効率的に計画・運用を実施することが重要であり、この結果、更なる空調効率の向上に繋がると考えられる。

そこで、以下に示すように、これまでに得られた知見に基づき、適切に利用可能な条件、不適切な条件を整理し、実務上で効率的に計画・運用するための基礎的資料として提案する。

提案(1)：本論文にて得られた知見を利用するにあたり、データセンターの設計規格から大きく逸脱しない、一般的なデータセンターを対象とする。具体的には、天井高さは 3.1m 以上を確保すること、ラック間はメンテナンス用スペースとして十分なスペースを確保し、ラックの配置は機器吸込み側と機器排気側に分離して配置していること。

提案(2)：設計段階において従来方式や局所空調方式を計画する場合、設計時に入手可能なラック台数や負荷の情報により機器風量 V_m (例えば、機器の吸排気温度差である $\Delta T=10^\circ\text{C}$ などを用いる)を設定し、風量比 $V/V_m=1.1$ を用いることで必要な設計風量 V を推定可能である。

提案(3)：設計段階において、従来方式や局所空調方式とは異なる、サーバ室全体を空調する方式を採用する場合(例えば、本研究で検討した壁吹出方式のようなモデルを採用する場合)、機器排気側をホットアイルキャッピングの構築により空調効率を改善させ、さらには空調の吹出し口や吸込み口のレイアウト、空調の吹出気流速の影響による空調効率の低下が起因していないかなど、事前に CFD 解析などによって確認を行う。

- 提案(4)：従来方式を採用する場合、機器稼働率を問わず、サーバ室端部に配置されるラック端部よりラック上部から機器排気の再循環による影響が大きい場合、例えば、天井面について等を設置することで改善する可能性もある。ただし、機器排気側や機器吸込み側のどちらかをキャッピングしている場合は、この限りではない。
- 提案(5)：局所空調方式を採用する場合、サーバ室の端部や中央部に配置されるラックに対する機器排気の再循環による影響の差異は小さいことから、提案(2)に示す風量比を原則、適用することで高効率な運用が可能である。
- 提案(6)：運用段階において、各空調方式を採用した際に、提案(3)～(5)に関連する課題が発見された場合、各提案内容に即して対応をすること。
- 提案(7)：運用段階において、サーバ室内の各ポイントの空間温度を測定した場合、サーバ室の端部または中央部に配置されるラックを対象として、本研究にて得られた知見である、再循環率と風量比の関係、機器吸込み温度と風量比の関係から、調整すべき空調風量の目安について、適切な操作ポイントを予測することが可能である。

5.9 まとめ

本章では、実大規模のデータセンターについて3種類のモデルを想定し、再循環率と風量比の関係、機器吸込み温度と風量比の関係、空調効率と風量比との関係について明らかにするために検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 実大規模によるデータセンターを想定して、従来方式、局所空調方式、壁吹出方式の3モデルを用いて検討を行った結果、再循環率と風量比の関係、機器吸込み温度と風量比の関係については、第2章にて検討した結果と同様に、各空調方式における多少の差異はあるものの、風量比の増加に伴い、減少傾向を示す。
- (2) 特に、最大再循環率や機器吸込み最高温度において、従来方式ではサーバ室の端部ではなく中央部に配置されたラックの上端から機器排気による再循環の影響が大きく、風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合、再循環率と機器吸込み温度ともに小さくすることが可能である。一方、局所空調方式では、サーバ室に配置されるラックの配置に関係なく、他の空調方式に比べ再循環率と機器吸込み温度ともに小さくすることが可能で、特に、風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合に顕著となる。壁吹出方式においては、風量比の増加に伴い緩やかな減少傾向となるが、特に、サーバ室端部に配置され空調機の吹出し口に近いラックにおいて、機器吸込み最高温度が高くなる傾向があり、また、他の空調方式に比べ全体的に機器吸込み温度が高い傾向がある。
- (3) 本解析モデルの壁吹出方式のように、サーバ室全体を空調する方式を採用する場合、機器排気側によるキャッピングの構築、空調の吹出口や吸込口のレイアウトの変更、空調の吹出気流の改善など、機器吸込み温度の低温化に向けた抜本的な対策が必要である。
- (4) 1モジュール(6ラック対象)、20モジュール(サーバ室の1/2エリア対象)、40モジュール(サーバ室全体対象)の空調効率と風量比の関係において、各空調方式における搬送用エネルギー消費量は風量比の増加に伴い増加傾向を示す。一方、熱源用エネルギー消費量について、従来方式や局所空調方式では風量比の増加に伴い減少傾向を示すが、壁吹出方式では風量比の増加に伴い増加傾向を示す。以上より、搬送用エネルギー消費量と熱源用エネルギー消費量を空調効率と風量比の関係は、従来方式と局所空調方式ではラックの配置位置によらず、風量比が $V/V_m=1.1$ にて空調効率が最大となる。以上より、従来方式と局所空調方式のように、機器吸込み温度を効率的に空調可能な空調方式を対象とした場合、機器吸込み最高温度と風量比の関係から、設計段階において空調効率を予測可能であり、運用段階では適切な操作ポイントを判断することが可能である。
- (5) 実務上にて効率的な計画・運用を実施するためには、一般的なデータセンターを対象として従来方式や局所空調方式のような、機器吸込み側を効率的に空調可能とする空調方式を計画・採用し、提案(1)~(7)の内容を原則、遵守することで、更なる空調効率の向上を図ることが可能である。

第 6 章

総 括

第6章

総括

本研究では、データセンターの空調効率を向上させるポイントとして、機器排気面から排出された高温排気を機器吸込み面へ再循環するのを抑制し、空調空気を機器冷却に有効利用することが重要である点、実際の運用ではサーバ室内に設置される機器の稼働率や空調方式が多種多様のため、サーバ室内の空気流動はより一層複雑化される状況が考えられる。そこで、第2章では機器排気による再循環率の評価法の検討、第3章と第4章では再循環率測定法の検討、第5章では実大規模による空調計画の検討について試みた。本章では、本研究を通じて得られた結果や知見についての総括と、今後の課題についてまとめる。

第1章では、本研究の背景と目的、および本研究に関連する既往研究についてまとめ、本論文の意義と位置づけを明らかにした。

第2章では、データセンターにおいて機器を運用管理する上で重要となる機器吸込み温度に着目し、空調効率と機器排気による再循環率の関係について検討を行った。具体的に検討を進めるにあたり評価モデルや評価指標を提案し、CFD解析による詳細な検討を行った結果、再循環率は風量分配と熱量分配の2種類が想定されるが、この風量分配と熱量分配による再循環率 γ_q 、 γ_m は厳密には等しくないが、概ね一致することを示した。次に、サーバ室のように機器発熱量が圧倒的に大きい環境下では、熱貫流の影響を無視しても室内熱環境に及ぼす影響は小さい点を示した。また、機器の稼働位置と再循環率の関係に関しては、特に機器の稼働位置がラック上部の場合は再循環率が大きく、ラック下部の場合は比較的、再循環率は小さくなる傾向のため適切な機器の稼働位置を考慮する必要がある点が示された。空調方式と再循環率の関係については、局所空調方式による再循環率の抑制効果が大きい。また、機器吸込み温度 θ_{om} と再循環率の関係は、空調機風量 V と機器風量 V_m との比である風量比 V/V_m の増加に伴い、各空調方式において減少傾向を示し、特に、機器吸込み最高温度に関して、風量比 $V/V_m=1.0$ 以下の場合、従来方式と局所空調方式による差異は大きく、一方、風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合、各空調方式において機器吸込み最高温度を概ね一定にすることが可能である点が示された。同様に、風量比と再循環率の関係については、風量比 V/V_m の増加に伴い、各空調方式において減少傾向を示し、特に、最大再循環率と風量比の関係において、風量比 $V/V_m=1.0$ 以下の場合、従来方式と局所空調方式による差異は大きく、一方、風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合、各空調方式において再循環率を概ね一定にすることが可能である点が示された。

第3章では、機器排気による再循環率を実空間において測定可能とするために、既往研究にて提案されたトレーサガス実験法について確認し、サーバ室を想定した簡易モデルを想定して、トレーサガス実験法を用いた場合の適用効果について検討を行った。その結果、このトレーサガス実験法は、循環系における室内と循環部にトレーサガスを供給した場合に実現する一定の変化率で上昇・下降する濃度である動的定常濃度を重ね合わせることで、等価な開放系における定常濃度分布と等しくなることから、サーバ室を想定した簡略モデルを用いた場合、循環系の室内発生である機器内にて、一方、循環部発生である空調機内にて正ソースを発生した場合、これらの濃度推移は理論通り、動的定常濃度と呼ばれる単調に増加する濃度推移が確認できた。また、循環系における各ソース発生の非定常濃度データを用いて、空調機吹出し面平均濃度を0、パッシブスカラー発生量 M /循環換気量 Q で基準化し、循環系の各非定常データの室平均濃度の時間変化率、もしくは循環部吸込み濃度の時間変化率が等しい時点を抽出し、非定常データをずらし加算による補正を行って得られる濃度、鉛直断面濃度分布は定常濃度となる一定値を示す点についても確認できた。以上より、倉渕らが提案している実験法を適用し、循環系における各ソース発生の測定を実施することで、ラックに搭載される機器の再循環率を測定することが可能である点が示された。

第4章では、実空間における機器排気による再循環率測定の有効性を明らかにするために、実大規模の仮想サーバ室を対象とした実大実験室実験により検討を行った。既往研究にて提案しているトレーサガス実験法を適用する上で、開放・循環系の評価モデル、測定方法を示した。具体的には、各機器の再循環率を測定する場合、単純な系の実験モデルに基づき各機器を対象とした測定を行い、一方、機器全体による再循環率を測定する場合、各機器を対象とした測定を組み合わせることにより、機器全体による再循環率を測定することが可能である点が示された。実験法を適用する場合の留意点として、データの抽出方法は、循環系の循環部吸込み濃度の時間変化率が等しく、漏気の影響が少ない時点を抽出する必要がある点も確認できた。また、実際に実験法を適用した結果、循環系の室内、循環部ソース発生の濃度推移は多少の変動はあるものの、概ね、実験法の理論通りのように発生量 M /漏気量 q の定常濃度に漸近する濃度推移を示した。循環系における室内、循環部ソース発生の非定常濃度データの差分により得られた濃度推移は、適切な時点でデータを抽出することによって、多少の変動はあるものの、概ね一理論通りの一定の濃度推移を示すことを確認した。異なる測定手順によって得られた開放系と循環系の実験結果である各濃度推移ならびに再循環率は概ね良好に対応している。また、実大実験室モデルを再現した解析モデルを用いた CFD 解析結果と実験結果を比較した場合、機器吸込み面近傍の鉛直断面濃度分布、ならびに機器排気による再循環率についても概ね良好な対応関係が示された。以上より、倉渕らが提案しているトレーサガス実験法を適用する場合、測定方法やデータの取り扱い等には課題はあるが、機器排気による再循環率測定が可能である

点が示された。

第5章では、第2章にて仮想サーバ室を想定したCFD解析による詳細な検討結果により得られた知見に基づき、実大規模のデータセンターを想定して、再循環率と風量比の関係、機器吸込み温度と風量比の関係、空調効率と風量比の関係について明らかにするために比較検討を行った。実大規模のデータセンターである従来方式や局所空調方式、壁吹出方式の3モデルを対象とした場合、第2章にて検討した結果と同様に、各空調方式において風量比の増加に伴い、減少傾向を示す。特に、最大再循環率や機器吸込み最高温度において、従来方式ではサーバ室の端部ではなく中央部に配置されたラックの上端から機器排気による再循環の影響が大きく、風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合、再循環率と機器吸込み温度ともに小さくすることが可能である点を確認した。一方、局所空調方式では、サーバ室に配置されるラックの配置に関係なく、他の空調方式に比べ再循環率と機器吸込み温度ともに小さくすることが可能で、特に、風量比 $V/V_m=1.1$ 以上の場合に顕著となることが示された。壁吹出方式においては、風量比の増加に伴い緩やかな減少傾向となるが、特に、サーバ室端部に配置され空調機の吹出し口に近いラックにおいて、他の空調方式より機器吸込み最高温度が高くなる傾向があるため、機器排気側にてキャッピングの構築や空調機の吹出気流の改善など、空調効率の改善を行うとともに、機器吸込み温度の低下に向けた抜本的な対策が必要であることが確認できた。

また、空調効率と風量比の関係において、1モジュール(6ラック対象)、20モジュール(サーバ室の1/2エリア対象)、40モジュール(サーバ室全体対象)を対象とした場合、各空調方式における搬送用エネルギー消費量は風量比の増加に伴い増加傾向が示された。一方、熱源用エネルギー消費量について、従来方式や局所空調方式では風量比の増加に伴い減少傾向を示すが、壁吹出方式では風量比の増加に伴い、機器吸込み最高温度が他の空調方式より高いため増加傾向が示された。以上より、搬送用エネルギー消費量と熱源用エネルギー消費量を組み合わせた空調効率と風量比の関係は、従来方式と局所空調方式ではラックの配置位置によらず、風量比が $V/V_m=1.1$ にて空調効率が最大となる点が示された。以上より、従来方式と局所空調方式のように、機器吸込み温度を効率的に空調可能な空調方式を対象とした場合、機器吸込み最高温度と風量比の関係から、設計段階において空調効率を予測可能であり、運用段階では適切な操作ポイントを判断することが可能である。

以上より、本論文を通じて得られて知見は上述した通りであるが、現段階ではデータセンターの各空調方式を対象として、データセンターの空調効率を向上させる一つの手法である、機器排気による再循環率に着目した評価法や機器排気による再循環の抑制手法の検討、さらには、実空間における再循環率の測定法の検討、実大規模による空調効率の検討に留まっている。しかしながら、近年、データセンターを取り巻く環境の変化は著しいため、5章にて検討した壁吹出方式などに見られるように、市場ニーズに即した実大規模による更なる詳細な検討、例えば、空気流動の改善手法の一つである、キャッピングやついた

での設置、これら改善手法と各空調方式との組合せによる効果などについては課題として残されている。今後は、ICT 全般やデータセンターの市場動向を踏まえ、今後、必要となる新たな冷却方式の検討や、機器の配置や各空調方式に応じた適切な給排気口のレイアウトなど、サーバ室全体の配置計画も含めた運用計画のあり方について、本研究で得られた知見に基づき、多角的な視点から検討を進めていきたい。また、データセンター全体の空調効率向上を更に向上させるためには、機器の開発側であるベンダーや機器メーカー、設計や施工を行うファシリティ側である建築業者、管理側であるデータセンター事業者など、各部門間で密接に連携し、各部門での課題を一つずつ解決していくことが更なる空調効率の向上に大きく起因すると考えられる。

発表論文・その他

発表論文・その他

1. 査読付き学術刊行物

- 1) Jinya Takeuchi, Takashi Kurabuchi, Hajime Yoshino and Sihwan Lee : Performance comparison of conventional and local computer room air-conditioning systems in data centres by CFD analysis, Indoor and Built Environment, vol. 26, 2: pp. 238-247. , First Published October 17, 2016, <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1420326X16674250>

(参考論文)

- Jinya TAKEUCHI, Takashi KURABUCHI, Hajime Yoshino, Sihwan LEE, Yosuke INOUE : Performance Comparison between Conventional and Local Computer Room Air-Conditioning Systems in Data Centers by CFD Analysis, Ventilation 2015, the 11th International Conference on Industrial Ventilation, Paper ID.163, October 2015

2. 講演（国際会議等）

- 1) Yosuke Inoue, Takashi Kurabuchi, Jinya Takeuchi, and Hajime Yoshino : Study of Efficiency of HVAC systems based on Optimization of Server Practical Form in Data Center by CFD, CLIMA 2016, –Proceedings of the 12th RHEVA World Conference, Paper No.394, May 2016
- 2) Hirotaka Kakehashi, Takashi Kurabuchi, Sihwan Lee, Hajime Yoshino, and Jinya Takeuchi : Optimized Prototype of Data Centers with Hybrid Ventilation Systems Based on Computational Fluid Dynamics Analysis, Ventilation 2015, the 11th International Conference on Industrial Ventilation, Paper ID.14, October 2015
- 3) Jinya TAKEUCHI, Takashi KURABUCHI, Hajime Yoshino, Sihwan LEE, Yosuke INOUE : Performance Comparison between Conventional and Local Computer Room Air-Conditioning Systems in Data Centers by CFD Analysis, Ventilation 2015, the 11th International Conference on Industrial Ventilation, Paper ID.163, October 2015 Jinya Takeuchi, Takashi Kurabuchi, Hajime Yoshino, Sihwan Lee, and Yosuke Inoue : COMPARISON BETWEEN CONVENTIONAL AND LOCAL COMPUTER ROOM AIR-CONDITIONING SYSTEMS IN DATA CENTER BY CFD, ICR 2015, the 24th IIR International Congress of Refrigeration, August 2015
- 4) Kentaro Kobayashi, Takashi Kurabuchi, Sihwan Lee, and Jinya Takeuchi : Using natural ventilation with water mist sprayers for data center energy conservation, Indoor Air 2014, the

13th International Conference of the Indoor Air Quality and Climate, July 2014

- 5) Jinya Takeuchi, Takashi Kurabuchi, Hajime Yoshino, Sihwan Lee, and Aya Takeuchi : Energy Conservation Effect in Data Centers with Hybrid Ventilation System, Part 1 Application and Estimation Method Based on Thermal Stratification Efficiency and Calculation for Energy Consumption, CLIMA 2013, –Proceedings of the 11th world congress and 8th international conference on IAQVEV, Paper ID.0897, June 2013
- 6) Aya Takeuchi, Takashi Kurabuchi, Hajime Yoshino, Jinya Takeuchi, and Sihwan Lee : Energy Conservation Effect in Data Centers with Hybrid Ventilation System, Part 2 Estimation of Evaporative Cooling Effect and CFD Analysis of Micro Environment in Data Centers, CLIMA 2013, –Proceedings of the 11th world congress and 8th international conference on IAQVEV, Paper ID.0518, June 2013

3. 講演（国内会議等）

- 1) 竹内仁哉, 倉渕隆, 吉野一, 李時桓, 小笠原岳, 落合宏, 竹内綾, 藤間久秀 : 自然換気併用型データセンターにおける省エネルギー効果に関する研究 その1 成層効率を用いた評価モデルの検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 769-770, 2012.9
- 2) 藤間久秀, 倉渕隆, 吉野一, 竹内仁哉, 李時桓, 小笠原岳, 落合宏, 竹内綾 : 自然換気併用型データセンターにおける省エネルギー効果に関する研究 その2 実験室実験による評価モデルの適用と年間消費エネルギーの検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 771-772, 2012.9
- 3) 竹内綾, 倉渕隆, 吉野一, 竹内仁哉, 李時桓, 小笠原岳, 落合宏, 藤間久秀 : 自然換気併用型データセンターにおける省エネルギー効果に関する研究 その3 CFD解析による空調システムの最適化の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 773-774, 2012.9
- 4) 竹内仁哉, 倉渕隆, 吉野一, 李時桓, 小笠原岳, 竹内綾, 落合宏, 藤間久秀 : 自然換気併用型データセンターにおける省エネルギー効果に関する研究 その4 成層効率を用いた評価モデルの適用と年間エネルギー消費量の検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, D-2, 769-770, 2012.9
- 5) 竹内綾, 倉渕隆, 吉野一, 竹内仁哉, 李時桓, 小笠原岳, 落合宏, 藤間久秀 : 自然換気併用型データセンターにおける省エネルギー効果に関する研究 その5 蒸発潜熱効果と CFD 解析による空調システムの最適化検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, D-2, 769-770, 2012.9
- 6) 竹内綾, 倉渕隆, 吉野一, 竹内仁哉, 李時桓, 小林健太郎, 宮島幸夫 : 自然換気併用型データセンターにおける省エネルギー効果に関する研究 その6 成層効率と再帰量による空気流動の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 723-724, 2013.8

- 7) 小林健太郎, 倉渕隆, 吉野一, 竹内仁哉, 李時桓, 竹内綾, 松尾一哉: 自然換気併用型データセンターにおける省エネルギー効果に関する研究 その7 蒸発潜熱冷却のアルゴリズムと基礎実験・数値計算, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 725-726, 2013.8
- 8) 小林健太郎, 倉渕隆, 吉野一, 竹内仁哉, 李時桓, 竹内綾, 松尾一哉: 自然換気併用型データセンターにおける省エネルギー効果に関する研究 その8 CFD解析による蒸発潜熱冷却効果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 727-728, 2013.8
- 9) 竹内仁哉, 倉渕隆, 吉野一, 李時桓, 竹内綾, 小林健太郎, 秦智之, 松尾一哉: 自然換気併用型データセンターにおける省エネルギー効果に関する研究 その9 成層効率と再帰率に基づく空気流動のケーススタディ, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, J-4, 201-204, 2013.9
- 10) 小林健太郎, 倉渕隆, 竹内仁哉, 吉野一, 李時桓, 竹内綾, 秦智之, 松尾一哉: 自然換気併用型データセンターにおける省エネルギー効果に関する研究 その10 実験とCFD解析による水噴霧潜熱冷却効果の検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, J-5, 205-209, 2013.9
- 11) 小林健太郎, 倉渕隆, 吉野一, 竹内仁哉, 李時桓, 梯洋貴, 松尾一哉: データセンターにおけるハイブリッド換気システムの省エネルギー効果に関する研究(その1) CFD解析による自然換気の流入・流出条件のケーススタディ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 859-860, 2014.9
- 12) 梯洋貴, 倉渕隆, 吉野一, 竹内仁哉, 李時桓, 小林健太郎, 松尾一哉: データセンターにおけるハイブリッド換気システムの省エネルギー効果に関する研究 (その2)CFD解析による自然換気導入モデルの最適化検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, C-50, 5-8, 2014.9
- 13) 井上洋輔, 倉渕隆, 吉野一, 竹内仁哉, 李時桓, 梯洋貴, 松尾一哉: データセンタにおける空調効率に関する研究 (その1)CFD解析における空調機捕集率の評価方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 1107-1108, 2015.9
- 14) 竹内仁哉, 倉渕隆, 吉野一, 李時桓, 梯洋貴, 井上洋輔, 松尾一哉: データセンタにおける空調効率に関する研究 (その2)CFD解析におけるサーバ稼働条件を考慮した空調効率の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 1109-1110, 2015.9
- 15) 梯洋貴, 倉渕隆, 吉野一, 竹内仁哉, 李時桓, 井上洋輔, 松尾一哉: データセンターにおけるハイブリッド換気システムの省エネルギー効果に関する研究 (その3)実機サーバのP-Q特性を組み込んだCFDによるついで効果の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 1111-1112, 2015.9
- 16) 井上洋輔, 倉渕隆, 吉野一, 竹内仁哉, 李時桓, 梯洋貴, 松尾一哉: データセンタにおける空調効率に関する研究 (その3)空調方式による空調効率の比較と空調とサーバの運用形態の最適化, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, I-30, 305-308, 2015.9
- 17) 竹内仁哉, 倉渕隆, 吉野一, 李時桓, 梯洋貴, 井上洋輔, 松尾一哉: データセンタにお

- ける空調効率に関する研究 (その 4) 実験室実験による局所空調方式に関する空調効率の検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, I-31, 309-312, 2015.9
- 18) 梯洋貴, 倉淵隆, 吉野一, 竹内 仁哉, 李時桓, 井上洋輔, 松尾一哉: データセンターにおけるハイブリッド換気システムの省エネルギー効果に関する研究 (その 4) 実機サーバの P-Q 特性を考慮した CFD によるプロトタイプモデルの適正化, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, I-35, 325-328, 2015.9
- 19) 竹内仁哉, 倉淵隆, 吉野一, 井上洋輔, 宮嶋舞佳: データセンタの空気流動を考慮した空調効率と機器排気による再循環率に基づく評価法に関する研究 その1 CFD 解析による機器吸込み温度と再循環率との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, 1481-1482, 2016.8
- 20) 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 井上洋輔, 宮嶋舞佳, 李時桓: 空気循環系における動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法 (その 1)理論的背景, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, 921-922, 2016.8
- 21) 宮嶋舞佳, 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 井上洋輔, 李時桓: 空気循環系における動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法 (その 2) CFD によるトレーサガス実験法の妥当性検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, 923-924, 2016.8
- 22) 井上洋輔, 倉淵隆, 吉野一, 竹内仁哉, 宮嶋舞佳, 李時桓: 空気循環系における動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法 (その 3)理論的背景と CFD 解析による実験法検証, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, C-5, 21-24, 2016.9
- 23) 宮嶋舞佳, 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 井上洋輔, 李時桓: 空気循環系における動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法 (その 4)CFD 解析と実験室実験によるトレーサガス実験法の妥当性検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, C-6, 25-28, 2016.9
- 24) 倉淵 隆, 竹内仁哉, 吉野 一, 鳥海吉弘, 宮嶋舞桂, 永繁和也: 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, 737-740, 2017.8
- 25) 永繁 和也, 倉淵 隆, 竹内 仁哉, 吉野 一, 鳥海 吉弘, 宮嶋 舞佳: 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 その 2 CFD 解析によるトレーサガス実験法の妥当性検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, 877-878, 2017.8
- 26) 宮嶋 舞佳, 倉淵 隆, 竹内 仁哉, 吉野 一, 鳥海 吉弘, 永繁 和也: 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 その 3 実験室実験によるトレーサガス実験法の妥当性検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, 879-880, 2017.8
- 27) 竹内 仁哉, 倉淵 隆, 吉野 一, 鳥海 吉弘, 宮嶋 舞佳, 永繁 和也: 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 その 4 データセンタにおける機器排気による再循環率測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II,

881-882, 2017.8

- 28) 永繁 和也, 倉淵 隆, 竹内 仁哉, 吉野 一, 鳥海 吉弘, 宮嶋 舞佳: 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 (その 5) CFD 解析によるトレーサガス実験法の妥当性と空気齢の関係, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, F-33, 129-132, 2017.9
- 29) 宮嶋 舞佳, 倉淵 隆, 竹内 仁哉, 吉野 一, 鳥海 吉弘, 永繁 和也: 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 (その 6) 実験室実験によるトレーサガス実験法検証と汎用センサの応答性, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, F-34, 133-136, 2017.9
- 30) 竹内 仁哉, 倉淵 隆, 吉野 一, 鳥海 吉弘, 宮嶋 舞佳, 永繁 和也: 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 (その 7) データセンタを対象とした機器排気による再循環率測定, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, D-12, 137-140, 2017.9

4. 本論文関係外の学術刊行物 (査読付き)

- 1) 竹内仁哉, 吉野一, 荻田俊輔, 伊藤一秀, 中川則和, 高橋義弘, 近藤靖史: 置換換気方式を導入した食品工場における室内温熱環境の調査研究, 第 1 報—夏期・中間期の室内温熱環境の実態調査と省エネルギー効果の試算, 空気調和・衛生工学会論文集, No.156, 19-27, 2010.3
- 2) 佐々木秀次, 吉野一, 竹内仁哉, 近藤靖史: 一般環境における置換換気に関する研究, (その 1)暖房時における置換換気用ペリメータレスシステムの実験, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 636 号, 201-208, 2009.2
- 3) 長谷川兼一, 源城かほり, 松本真一, 竹内仁哉, 吉野博: 秋田県の戸建住宅を対象とした低負荷型ライフスタイルの省エネルギー効果の実測調査と数値計算による事例的検討, 日本建築学会技術報告集, 第 23 号, 271-274, 2006.6
- 4) 源城かほり, 長谷川兼一, 松本真一, 竹内仁哉, 吉野博: 秋田県の住宅におけるエネルギー消費量と温熱環境の長期実測調査, 日本建築学会技術報告集, 第 23 号, 275-278, 2006.6
- 5) 長谷川兼一, 吉野博, 石川善美, 松本真一, 源城かほり, 竹内仁哉: 熱環境から見た冬期の居住性能に関する地域特性の推移, 東北地方都市部を対象とした 20 年間の変化, 日本建築学会環境系論文集, 第 593 号, 33-40, 2005.7
- 6) 吉野博, 三田村輝章, 尾嶋雅也, 千葉智成, 謝静超, 中村香奈, 松本真一, 長谷川兼一, 源城かほり, 竹内仁哉: 東北地方における住宅 13 戸を対象としたエネルギー消費量の詳細実測調査, 日本建築学会技術報告集, 第 20 号, 147-150, 2004.12

5. 本論文関係外の講演（国内会議等）

- 1) 佐々木秀次, 近藤靖史, 吉野一, 竹内仁哉: 一般環境における置換換気に関する研究, (その2) 冬期暖房実験による二重窓・排気システムの検討, 日本建築学会学術講演梗概集, D-2, 795-796, 2006.9
- 2) 佐々木秀次, 近藤靖史, 吉野一, 竹内仁哉: 一般環境における置換換気に関する研究, (その3) 冬期暖房時における二重窓・排気システムの実験およびCFD解析, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1045-1048, 2006.9
- 3) 三島広之, 近藤靖史, 吉野一, 佐々木秀次, 竹内仁哉: 二重窓・排気システムを利用した置換換気に関する実験, 日本流体力学会年会 2007 講演論文集, 2007.8
- 4) 佐々木秀次, 吉野一, 竹内仁哉, 三島広之, 近藤靖史: 一般環境における置換換気に関する研究 (その4) 外皮負荷が大きい空間への二重窓・排気システムの適用, 日本建築学会 学術講演梗概集, D-2, 1283-1284, 2007.8
- 5) 竹内仁哉, 吉野一, 佐々木秀次, 三島広之, 近藤靖史: 一般環境における置換換気に関する研究 (その5) 冬期暖房実験時の置換換気方式と混合換気方式の実験, 日本建築学会学術講演梗概集, D-2, 1285-1286, 2007.8
- 6) 佐々木秀次, 吉野一, 竹内仁哉, 三島広之, 近藤靖史: 一般環境における置換換気に関する研究 (その6) 冬期暖房時の置換換気方式と混合換気方式の実験およびCFD解析, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 161-164, 2007.9
- 7) 竹内仁哉, 吉野一, 佐々木秀次, 三島広之, 近藤靖史: 一般環境における置換換気に関する研究 (その7) 事務室空間における置換換気—二重窓・排気システムの実用性検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 165-168, 2007.9
- 8) 三島広之, 近藤靖史, 吉野一, 佐々木秀次, 竹内仁哉, 小笠原岳: 一般環境における置換換気に関する研究 (その8) 日射を考慮したCFD解析によるD.V.ペリメータレスシステムの検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 181-184, 2008.8
- 9) 竹内仁哉, 吉野一, 佐々木秀次, 近藤靖史: 一般環境における置換換気に関する研究 (その9) 搬送動力の低減を意図した置換換気用吹出し方法の検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 185-188, 2008.8

6. 委員会活動

- 1) 空気調和・衛生工学会、換気設備委員会、換気性能小委員会、海外研究動向調査WG 委員、2013.4～2014.3
- 2) 空気調和・衛生工学会、換気設備委員会、室内空気質小委員会 委員、2014.4～2017.3
- 3) 空気調和・衛生工学会、換気設備委員会、高効率換気システム小委員会 委員、2016.4～
- 4) 空気調和・衛生工学会、換気設備委員会、室内空気質小委員会 委員、2017.4～

7. 受賞

- 1) 平成 20 年度空気調和・衛生工学会学術講演会 優秀講演奨励賞：一般環境における置換換気に関する研究, (その 9) 搬送動力の低減を意図した置換換気用吹出し方法の検討, 2008.10
- 2) Ventilation2015 Best Paper Award 受賞: Performance Comparison between Conventional and Local Computer Room Air-Conditioning Systems in Data Centers by CFD Analysis, Jinya Takeuchi, Takashi Kurabuchi, Hajime Yoshino, Sihwan Lee, and Yosuke Inoue, Ventilation 2015, the 11th International Conference on Industrial Ventilation, Paper ID.163, October 2015
- 3) Ventilation2015 Most Popular Poster Award 受賞: Optimized Prototype of Data Centers with Hybrid Ventilation Systems Based on Computational Fluid Dynamics Analysis, Hirotaka Kakehashi, Takashi Kurabuchi, Sihwan Lee, Hajime Yoshino, and Jinya Takeuchi, Ventilation 2015, the 11th International Conference on Industrial Ventilation, Paper ID.14, October 2015

参 考 文 献

参考文献

- 1) 総務省：平成 29 年度版 情報通信白書
(<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/pdf/index.html>)
- 2) 総務省：平成 25 年度版 情報通信白書
(<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc112240.html>)
- 3) グリーン IT 推進協議会試算 経産省(2008 年 5 月)
- 4) 総務省：平成 22 年度版 情報通信白書
(www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h22/html/md211000.html)
- 5) ASHRAE. 2011 thermal guidelines for data processing environments expanded data center classes and usage guidance. TC 9.9 White Paper, ASHRAE, Atlanta, USA, 2011.
- 6) 日本データセンター協会：JDCC ファシリティスタンダード
(<http://www.jdcc.or.jp/facility/index.html>)
- 7) 諏訪好英, 土屋貴史：データセンター向け空調気流方式の高効率化を目的とした縮小模型実験, 日本建築学会環境系論文集, 第 77 巻 第 675 号, 365-374, 2012 年 5 月
- 8) 諏訪好英：データセンターにおける空調気流方式の高効率化に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 76 巻 第 663 号, 501-508, 2011 年 5 月
- 9) 山口ら:IT 複合情報処理施設における外気冷房システムの研究, (その 2)外気導入量可変制御を行った場合の省エネルギーシミュレーション, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 465-468, 2011 年 9 月
- 10) 新村浩一, 山下植也:直接型と間接型を組合せたデータセンタ向け外気冷房システムに関する研究, 第 1 報 外気冷房システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.210, 19-25, 2014 年 9 月
- 11) 藤本ら:データセンタ電力利用効率を向上する外気冷房技術の検証, 空気調和・衛生工学会論文集, No.201, 1-9, 2013 年 12 月
- 12) 宇田川ら:データセンターの室内環境条件に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, D-2, 1279-1280, 2011 年 8 月
- 13) ASHRAE. 2011 gaseous and particulate contamination guidelines for data centers. TC 9.9 White Paper, ASHRAE, Atlanta, USA, 2011.
- 14) ASHRAE. PUE(TM): a comprehensive examination of the metric. ASHRAE book. Atlanta: ASHRAE, 2013.
- 15) 羽山ら: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, 721-728, 2009 年 6 月
- 16) TIA-942-2005. Telecommunications infrastructure standard for data centers. Washington, DC: American National Standards Institute, 2005.

- 17) VDI6019: 2009. Engineering methods for the dimensioning of systems for the removal of smoke from buildings, Pt.2. Düsseldorf, Germany: Verein Deutscher Ingenieure, 2009, pp.35-45.
- 18) 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 井上洋輔, 宮嶋舞佳, 李時桓: 空気循環系における動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法 (その1)理論的背景, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, 921-922, 2016.8
- 19) 宮嶋舞佳, 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 井上洋輔, 李時桓: 空気循環系における動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法 (その2) CFDによるトレーサガス実験法の妥当性検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, 923-924, 2016.8
- 20) 井上洋輔, 倉淵隆, 吉野一, 竹内仁哉, 宮嶋舞佳, 李時桓: 空気循環系における動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法 (その3)理論的背景とCFD解析による実験法検証, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, C-5, 21-24, 2016.9
- 21) 宮嶋舞佳, 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 井上洋輔, 李時桓: 空気循環系における動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法 (その4)CFD解析と実験室実験によるトレーサガス実験法の妥当性検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, C-6, 25-28, 2016.9
- 22) 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 鳥海吉弘, 宮嶋舞佳, 永繁和也: 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, 737-740, 2017.8
- 23) 永繁和也, 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 鳥海吉弘, 宮嶋舞佳: 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 その2 CFD解析によるトレーサガス実験法の妥当性検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, 877-878, 2017.8
- 24) 宮嶋舞佳, 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 鳥海吉弘, 永繁和也: 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 その3 実験室実験によるトレーサガス実験法の妥当性検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, 879-880, 2017.8
- 25) 永繁和也, 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 鳥海吉弘, 宮嶋舞佳: 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 (その5) CFD解析によるトレーサガス実験法の妥当性と空気齢の関係, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, F-33, 129-132, 2017.9
- 26) 宮嶋舞佳, 倉淵隆, 竹内仁哉, 吉野一, 鳥海吉弘, 永繁和也: 漏気を伴う空気循環系における動的定常濃度を用いたトレーサガス実験法 (その6) 実験室実験によるトレーサガス実験法検証と汎用センサの応答性, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, F-34, 133-136, 2017.9
- 27) 株式会社富士キメラ総研: データセンタービジネス市場調査総覧 2014年度版, 上巻: 市場編(データセンター市場・関連市場), 2014年2月

- 28) 三野洋介, 柳正秀, 津田晃宏, 松田千怜, 篠田拓也, 楯龍平: データセンタ向けパッケージ空調機の効率向上に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, J-70, 477-480, 2016.9
- 29) 前田健蔵, 松本尚史, 山口さとみ, 三浦克弘, 小野永吉, 篠原正明: データセンター空調システムの省エネルギーおよび信頼性向上技術の開発, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, J-73, 489-492, 2016.9
- 30) ebm-papst Japan 株式会社: EC 遠心ファン RadiPac メーカーカタログ
(http://www.ebmpapst.jp/pdf/RadiPac_US_18_12_201502_J.pdf)
- 31) 東芝キャリア株式会社: ユニバーサルスマート X 特設サイト
(www.toshiba-carrier.co.jp/products/industry/usx.htm)

謝 辭

謝辞

本論文は、筆者が東洋熱工業(株)在職中、ならびに東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻博士後期課程在籍時に行った「データセンターにおける高効率空調システムに関する研究」に関して取り纏めた内容である。

本研究を進めるにあたり、博士課程を通じての指導教官であり、本論文の主査である倉淵隆教授には、終始ご懇切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜り心より感謝と敬意を表します。倉淵隆教授には、建築・環境工学やCFD解析に関する知識以外に、研究のプロセスや考え方、研究に対する姿勢など、数多くのことをご教授頂きました。民間企業の研究者として、データセンターの共同研究に関して、ご相談した際に快く承諾して頂いてから現在に至るまで、企業とは異なる視点で更なる研究の道に身を投じて、ここまでやってこられたのも先生のきめ細かいご配慮、ご指導があったからだと思えます。言葉では表現できない程、深く感謝しております。

また、本論文の審査委員である、東京理科大学の今本啓一教授、郷田桃代教授、長井達夫教授、井上隆教授、吉澤望教授には、ご多忙の中、多大な時間を割いて頂き、活発な質疑、忌憚ないご意見、様々なご助言を頂きました。審査委員の方々のご指導あって、ここに本論文を纏めることができました。心より御礼申し上げます。

大学卒業後、民間企業である前職の東洋熱工業(株)に就職し、技術研究所に配属された当時の上司であり、筆者が博士課程へ進むきっかけを作ってくださいました、吉野一教授(日本工業大学)には、これまでの民間企業で携わってきた研究全般以外に、あらゆる局面において貴重なご助言、ご指導を賜り、深く感謝しております。

データセンターの研究を通じて、共同研究者である、中井康博氏(日本電気(株))、秦智之氏(日本電気(株))、村上氏(三菱重工冷熱(株))、宮島幸夫氏(三菱重工冷熱(株))、村尾和宏氏(三菱重工冷熱(株))、松尾一哉氏(三菱重工冷熱(株))、皆様にも大変お世話になりました。データセンターの研究・開発として、様々な局面に伴い、紆余曲折がありましたが、様々な課題、問題に関して多くの時間を費やし、多くの時間を共有できたおかげで、筆者が本論文を取り纏めることができました。皆様のお力添えがなければ、この研究成果はなし得なかったものであります。また、力不足でご迷惑をお掛けしてしまったことも多分にあつたと思えます。この場をお借りして深くお礼申し上げます。

謝辞

東京理科大学工学部環境工学研究室では、普段より長井達夫教授、田中治講師、鄭新源助教、李時桓助教(信州大学)の皆様には様々な面でお世話になりました。また、博士課程の先輩である鳥海吉弘教授(東京電機大学)、野中俊宏氏((株)LIXIL)には、大学院の受験の時から現在に至るまで大変お世話になりました。いつも気に掛けてくださり、本当に感謝しています。博士課程の同期であった金森美紀氏とは共に苦労し、お互いに励ましあってまいりました。研究当時、東京理科大学の学生であった落合宏氏、藤間久秀氏、竹内綾氏、小林健太郎氏、片岡森重氏、梯洋貴氏、井上洋輔氏、鳥居光輝氏、宮嶋舞佳氏、永繁和也氏、池村尚也氏、川村弾氏、皆様の力添えがなければ、この研究成果はなし得なかったものがあります。ここに記して感謝の意を表します。

前職である東洋熱工業(株)では、会社を辞めて教育・研究の道に進むことのご理解を頂きました上谷勝洋氏、柳原茂氏、技術研究所の所員の皆様、業務上、関係がありました社員の皆様には深くお礼申し上げます。

最後に、筆者を常に陰ながら応援し支えてくれた両親、これまでのいかなる時も見守り、心の支えとなってくれた妻 小百合と息子 悠真、娘 梨恋に感謝の意を記します。

平成 30 年 3 月

竹内 仁哉