

氏名（本籍）	たけ うち じん や (山形県)
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 969 号
学位授与の日付	2018 年 3 月 19 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	データセンターの空調効率向上を目的とした 空調計画手法に関する研究

論文審査委員	(主査) 教授 倉 渕 隆
	教授 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

論文内容の要旨

本研究では、データセンターの空調効率を向上させる一手法として、サーバ室内の空気流動に着目した場合、ラック内に実装された機器から排気された高温空気が機器吸込み面に再循環する点を抑制することが重要であると考えられるため、実務上において機器排気による再循環率を適切に評価可能な評価法の検討、ならびに実空間において機器排気による再循環率を把握するための実験法の適用効果の検討、空調効率の改善手法について示したものである。

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 y_q 、 y_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易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、各データの差分から得られる濃度、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、倉瀬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変動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、実大実験実験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、実大規模のデータセンタモデルを想定して、第 3 章、第 4 章にて検討した仮想サーバ室モデルを用いた解析結果に基づき、機器排気による再循環率と空調効率の関係について明らかにするために検討を行った。第一に、複数のラックサーバをモジュール化することでモデルの簡略化を図り、実大規模のデータセンタを対象とした場合、機器稼働率が一律にて稼働している条件下を想定した場合、サーバ室の規模や空調系統の給排気口のレイアウト、風量比の差異によって、機器排気による再循環率は大きく影響する点について示された。

第 6 章では、全体の総括と今後の課題と展望について示された。

論文審査の結果の要旨

本論文では、6 名の審査委員にて構成される審査委員会を組織し、提出された学位論文についての審査を行った。

第 1 回目の審査委員会では、冒頭では学力確認のために、学位論文に関連する専門分野について口頭試問を行い、審査委員との質疑応答や協議結果に基づき、申請された学位論文に関連する専門分野について、一定の理解と専門性を有していることを確認した。外国語に関する試問については、申請された学位論文中に参考論文として挙げられてるものが、国際会議 (Ventilation 2015) にて口頭発表され、会場での討論を経て最優秀論文 (Best Paper Award) に選定されたこと、同論文が国際ジャーナル (IBE : Indoor and Built Environment) に推薦され、投稿後に査読者との論文内容の改善に関する通信協議を経て、最終的に採択されたことをもって一定の英語力があると判断し、口答および筆答による諮問のすべてを免除することとした。

本審査としては、学位論文に関する研究の背景や研究の構成、研究のプロセス、研究成果など、論文全般について各審査委員による審査、ならびに申請者との質疑応答を行った。各審査委員との協議では、学位論文の申請に伴う事務手続きに関して適宜確認を

行い、学位論文の内容として研究成果の表現の見直しや、追加検討が必要な箇所について、各審査委員による厳正な審査により指摘がなされた。特に、研究背景についての説明に関して、関連するデータセンター内の空気流動に着目した既往研究例が少ない点を明示するために、既往研究に関する文献レビューの追加や研究フローの見直しを行うこと、また、実大規模を対象とした解析においては、想定した解析モデルの妥当性検討に関する追加調査、本論文の評価指標である再循環率と風量比の関係に関する検討結果に基づき、負荷条件の変更による追加解析、研究成果の妥当性の確認など、各章で検討された研究成果に対して多角的な指摘がなされた。

第2回の審査委員会では、第1回の審査委員会による各指摘事項に対して、申請者が対応した内容を主に審査対象とし、学位論文として全般的に審査を行った。審査委員会での研究内容の説明に当たっては、第1回審査で指摘された、データセンターに及ぼす熱貫流の影響は小さいことから、学位論文説明のプロセスでの説明を若干簡略化すること、逆に本研究の直接の成果とはならないものの、空気循環系を対象とした独創的なトレーサガス実験を実施して成果を挙げていることなどから、その基礎理論についても適切な説明を加えることなどの説明がなされ、了承された。

最終の審査委員会では、これまでの審査委員会による協議事項、指摘事項を十分に反映させた内容に基づき、公聴会を開催した。公聴会による質疑応答の内容を踏まえ、最終審査として審査委員会を実施した。また、最終審査後においては、申請者に対し、学位論文に関連した関連研究の背景や論文の位置付け、論文に関する今後の展開などに関して、各審査委員により多角的な視点から口頭試問による試験を行った。その結果、学位論文の内容、ならびに関連する専門分野に関して精通した理解があり、学位(博士)を授与できる学力と専門性を十分に有していると判断し、合格と判定した。

本論文は、既往研究にて十分な解明がなされていない、データセンター内の空気流動に着目し、空調効率の向上につながる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などを解明したものである。本論文で展開された検討結果に基づき、評価指標である再循環率と風量比を用いることで、一般的なデータセンターの効率的な計画・運用に資する実務上有用な研究成果を挙げていると評価することができる。

よって、本論文が博士(工学)の学位論文として十分に価値あるものと認められる。