

平成 21 年 6 月 20 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）  
 研究期間：2007 年度 ～ 2008 年度  
 課題番号：19860058  
 研究課題名（和文） 空調システムにおける省エネ運転・診断ツールの実装に関する研究  
 研究課題名（英文） Research on installation of the operation and diagnosis tool for energy conservation in air-conditioning system  
 研究代表者 住吉 大輔 (Daisuke Sumiyoshi)  
 独立行政法人 建築研究所・環境研究グループ・非常勤研究支援職員  
 研究者番号：60432829

研究成果の概要：空調システムの不具合を検知・診断する「フォルト検知診断」と制御上の各種設定値を状況に応じて適切なものにする「空調システム運用の最適化」の機能を併せ持つ、省エネ診断ツールの開発・改良に取り組んだ。開発したツールについて小規模実験施設での実験・シミュレーションによる解析を通して改良を実施した。特に最適化の機能については、大学施設における実システムへの導入を実現し、実用段階において容易に導入可能で、かつ省エネ効果が得られることを明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,310,000	0	1,310,000
2008 年度	1,040,000	312,000	1,352,000
総計	2,350,000	312,000	2,662,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築環境・設備

キーワード：省エネルギー、建築環境・設備、最適化、フォルト検知、シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

空調システムを長期にわたって使用していくと、建物用途の変更や機器の増減による内部発熱の大幅な変化、機器の劣化や不具合等が発生する。その際に、状況に応じた設定変更が実施されることは稀であり、不具合についても発見が遅れる・発見できないまま非効率な運転を継続するといった状況が目立つ。

こうした状況を改善するためには、「フォルト検知・診断」「最適化」といった機能を持つツールを開発し、実際の空調システムに実装可能なツールへと改良することが必要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、フォルト検知診断と運用の最適化の 2 つのコミッショニング手法を統合し、BEMS (Building Energy Management System、現在ほとんどのビル空調システムに導入されている) と組み合わせ、空調システムの運用段階において省エネルギーを実現する省エネ運転・診断ツールを開発することである。

ここで、各ツールの概要と統合後のイメージを示す。

## (1) フォルト検知診断ツール

フォルト検知・診断ツールは、空調システムの運用段階で発生するフォルト（不具合）

を迅速に検知するためのツールである。フォルトがあると空調システム全体の電力消費量や熱源機器の電力消費量、室内温度が、フォルトのない正常状態の値から変動する。この変動値を分類・整理することにより、フォルトに関連する原因と結果を結びつけるフロー図が作成できる(図 1)。すなわち、シミュレーション値を正常値とみなして、それからの実際の変動値に沿ってフローを進めれば、不具合のある箇所を空調システム全体から絞り込むことができる。

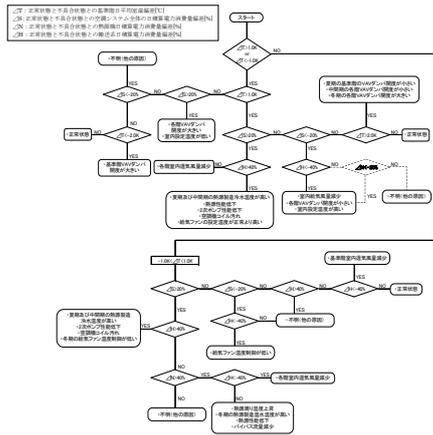


図1 プロトタイプのフォルト検知診断ツール(フロー図形式)

(2)運用の最適化ツール

運用の最適化ツール(図 2)は、気象や内部発熱の予測値を入力とし、空調システムシミュレーションに基づいて、給気温度設定値や熱源出口水温設定値といった各種の制御設定値の最適値を算出する。最適化を評価する指標は、電力消費量と室温制御状態の複合的な評価関数とした。本研究では、予測誤差を考慮した新たな最適化手法を提案している。すなわち、過去一定期間における予測誤差の出現頻度に応じて、予測値に予測誤差を加減した数種類の仮想負荷に対する最適化計算結果を重み付けして評価するものである。

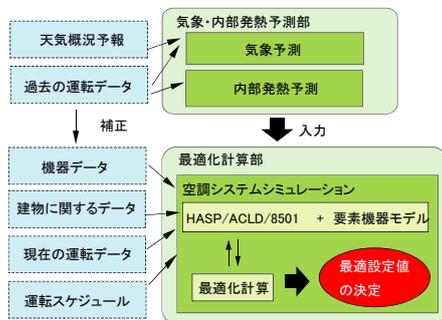


図2 運用の最適化ツールの概要

(3)省エネ運転・診断ツール

図 3 に本研究で想定する省エネ運転・診断

ツールの概要を示す。運転データを BEMS より取得し、まずフォルト検知・診断を実施してシステムにフォルトがないことを保証し、その後、運用の最適化を実施する。ここにフォルト検知・診断ツールと最適化ツールを統合するメリットの一つがある。フォルトが存在する状態で最適化を実施することは、最適化計算のベースとなるシミュレーションが実現象を捉えない可能性があり、逆効果となる可能性もある。

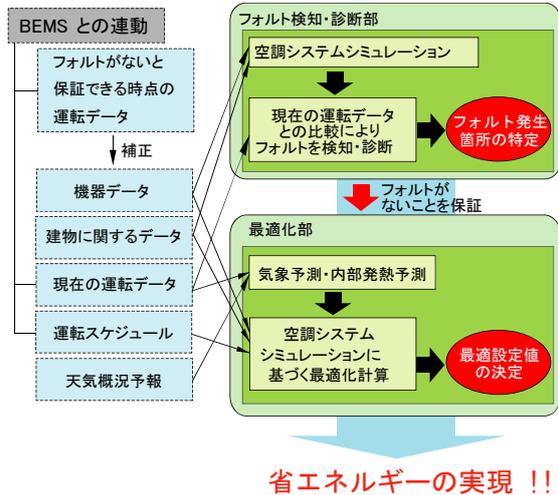


図3 省エネ運転・診断ツールの概要

3. 研究の方法

研究開始段階までに、フォルト検知診断、運用の最適化ともに小規模実験施設を対象としたプロトタイプツールを完成させており(前章で紹介)、これらを統合し、より大規模な建物への適用を行うことでツールを一般ビルに適用できるよう変更を加える。

研究は主に次の3段階に分け進める。

(1)小規模実験施設での実験による各ツールの効果の検証

フォルト検知診断ツール、最適化ツールともプロトタイプツールでの実験を実施する。

(2)フォルト検知診断ツール、最適化ツールの完成と統合

フォルト検知診断ツール、最適化ツールとも実測の結果を反映して改良を行う。特にフォルト検知診断ツールに関しては、検討が十分ではなくこのままでは不具合を特定できない可能性が高いため、別の形式への変更も検討する。

(3)省エネ運転・診断ツールの一般ビルへの適用効果の検討

一般的なオフィスビルを対象建物を変更して、開発したツールの効果をシミュレーションにより検証する。

なお、当初の研究計画では以上の3手順を予定していたが、研究途中で最適化ツールを

実際に使用されている大学施設に導入する機会を得たため、実装し、その効果を検証することができたため、実装結果についても併せて報告する。

#### 4. 研究成果

本研究においては、研究の方法に示した手順に従い、省エネ運転・診断ツールの基盤となるフォルト検知診断ツール、および空調システム運用の最適化ツールの開発・改良、および、実験と実装による省エネ効果の把握を行った。

##### (1) フォルト検知診断ツールの改良

空調システムに不具合が発生するとシステム全体の電力消費量や熱源機器の電力消費量、室内温度が、正常状態の値から変動する。改良ツールでは、想定するすべての不具合項目について不具合進行の度合いに応じたシミュレーションを行い、その結果を空調時間帯の基準階室内温度、空調システム全体日積算電力消費量、熱源機日積算電力消費量の偏差を軸とした3次元空間にプロットする。そして実際の運転結果による点とすべての不具合項目の点との距離を計算し、最も小さいものを可能性が高い不具合項目と判断する。ツールの概念図を図4に示す。

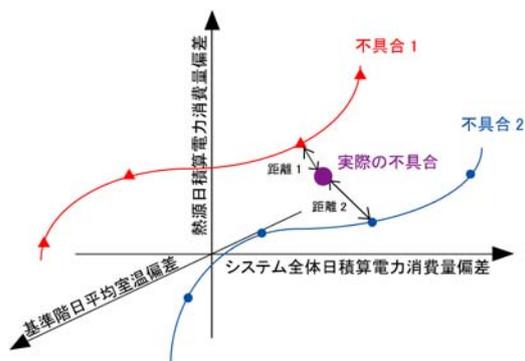


図4 改良したフォルト検知診断ツールの概念図

##### (2) 小規模実験施設での実験による各ツールの効果の検証

九州大学筑紫キャンパスに位置するHVAC&R実験解析システム(以下、実験棟)を対象に実験を行った。対象は小規模であるが、建築一般に広く導入されている空調システム(エアハンドリングユニットを使用した中央供給方式)となっている。実験棟の外観を写真1に、建物概要を表1に、空調システム図を図5に示す。



図4 HVAC&R 実験解析システム外観

表1 建物概要

所在地	福岡県春日市(九州大学大学筑紫キャンパス)
用途	実験棟
建築面積	35.84m <sup>2</sup>
延床面積	107.53m <sup>2</sup>
階数	地下1階、地上2階
高さ	軒高6.15m、1階階高2.70m
構造	壁式鉄筋コンクリートパネル造(階段室は木造)

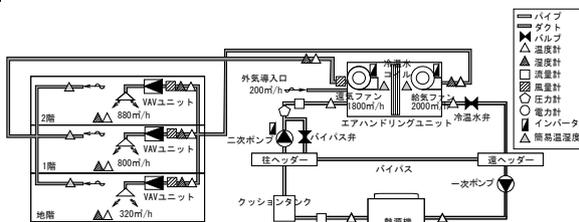


図5 空調システム図

##### ① フォルト検知・診断ツール

フォルト検知・診断ツールの効果を検証するため、実験棟において実際に不具合を発生させ、ツールによって検知する実験を行った。一般的によく見られる3つの不具合項目(室内設定温度不全、給気ファン温度制御不全、熱源製造冷温水温度不全)について項目ごとに2日ないし3日間実験を行い、次の実験への影響をなくすため、不具合項目を切り替える際には1日以上助走運転を行った。

ツールによる検知結果を表2に示す。表にはツールにより可能性が高いと判断された上位3つの不具合項目番号を示している。3ケース延べ8回不具合を発生させ、うち7回は最も可能性が高い不具合として検知された。残りの1回も2番目に可能性が高い不具合として検知することができ、手法の有効性を確認できた。

表2 ツールによる不具合検知結果

実験した不具合項目	月日	実験値から不具合項目までの距離		
		1位	2位	3位
①室内設定温度不全(26→24℃)	8月4日	⑭(0.12)	⑭(0.19)	⑭(0.21)
	8月5日	⑭(0.11)	⑭(0.15)	⑭(0.17)
	8月6日	⑭(0.10)	⑭(0.09)	⑭(0.11)
⑨給気ファン温度制御不全(16→19℃)	8月9日	⑨(0.03)	②(0.06)	⑦(0.07)
	8月10日	⑨(0.12)	⑭(0.20)	⑪(0.22)
②熱源製造冷温水温度不全(7→12℃)	8月13日	⑨(0.04)	②(0.08)	②(0.12)
	8月14日	②(0.05)	②(0.07)	⑨(0.09)
	8月15日	②(0.14)	②(0.17)	②(0.25)

番号は検知された不具合項目を表す。網掛けは正しく検知されたものである。

##### ② 空調システム運用の最適化ツール

最適化ツールの効果を確認するため、実験棟において夏季と冬季に実験を行った。変更を行う設定値は、給気設定温度、熱源冷温水出口設定温度、2次ポンプ吐出設定圧力の3点である。最適化計算では、あらかじめ用意

した設定値の選択肢から評価値が最小となる組み合わせを総当り法で算出する。

夏季実験結果を図6に示す。空調時日平均外気温度と評価値の関係から空調時日平均外気温度が高いほど通常運転に比べ、最適化運転の評価値が向上していることが分かる。空調時日平均外気温度が32.5℃の時には、評価値が14%程度向上している。また、冬季の実験では空調時日平均外気温度が11℃の時に評価値が19%程度向上する結果を得ている。

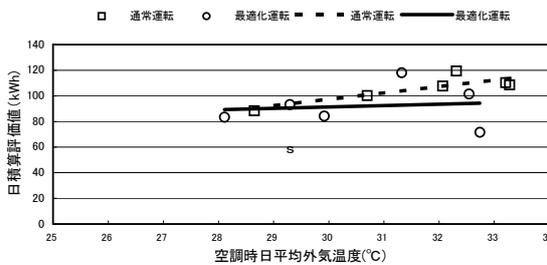


図6 空調時日平均外気温度と日積算評価値の関係 (夏季実験結果)

### (3)一般ビルへの適用効果の検討

開発した最適化ツールを中規模事務所ビルに適用した際の効果について明らかにするため、実在のオフィスビルを対象にシミュレーションモデルを構築し検討を行った。対象建物の概要と空調システム図を表3、図7に示す。計算対象期間は1995年の2月(冬季)、8月(夏季)、10月(中間季)とし、以下のケースについて検討する。

表3 建物概要

所在地	大分市金池2丁目
主要用途	事務所 (地域電力供給基幹ビル)
敷地面積	6561m <sup>2</sup> (うち建築面積2088m <sup>2</sup> )
延床面積	29939m <sup>2</sup>
階数	地下2階 地上11階 棟屋2階
構造	地下2階 地上11階 棟屋2階
竣工	地上部 コンクリート充填鋼管構造 地下部 SRC造 RC造

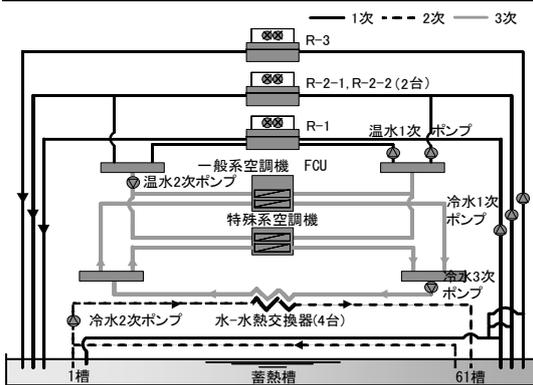


図7 空調システム図

caseA : 通常運転を行うケース。

caseB : 予測誤差がないと仮定し、実際の負荷を入力とする最適化計算を実施し、設定値を決定したケース。

caseC : 気象予測を行い、それを入力とする

最適化計算によって設定値を決定したケース。

caseD : 本研究で提案する予測誤差を考慮した最適化手法を用いるケース。過去2週間の誤差分布を算出し、予測負荷が出現した誤差を含むと考え補正した数点の負荷に対して最適化計算を実施し、評価値を出現頻度で加重平均して設定値を決定する。

計算結果として図8に各ケースの評価値の比較を示す。図には各ケースのcaseAに対する削減率を記入している。最も評価値の削減率が大きいのはcaseBであるが、予測には必ず誤差が伴うので実際には実現できないケースである。caseDのcaseAに対する削減率は、2月が11.2%、8月が12.1%、10月が5.1%であり、全ての月で削減効果が確認された。caseDのcaseCに対する削減率は、2月が-0.1%、8月が1.9%、10月が1.3%であり、予測誤差を考慮することで、夏季や中間季にやや最適化効果が向上することが確認された。ただし、今回の検討では内部発熱予測を行わずに正值を入力したため、誤差が小さく、caseDの最適化効果が低く見積もられた可能性がある。

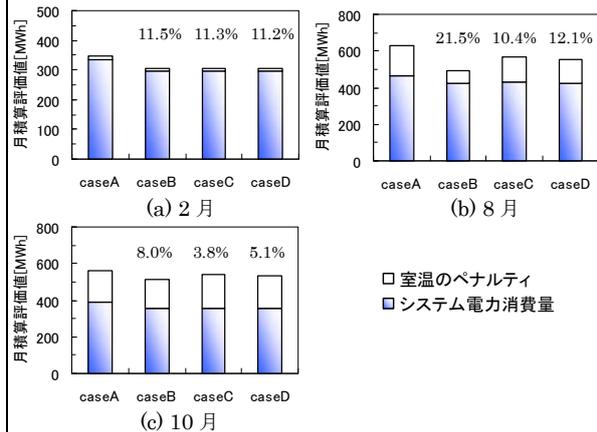


図8 各ケースにおける評価値の比較

### (4)最適化ツールの実装

開発した空調システム運用の最適化ツールを改良し、R大学で実際に使用されている建物の熱源システムに実装した結果を示す。対象システムは、定格冷凍能力が2408.7kWのガス吸収式冷温水機が3台あり、それぞれに対して開方式冷却塔と冷却水ポンプ、冷温水ポンプが付随している。ここでは、検討を簡単にするため2次側は切り離し、1次側の設定値のみを最適化した。また、非蓄熱システムであるため負荷の予測は行わず、過去1時間の熱負荷がその後の1時間も同様に発生するものと仮定し、1時間ごとに設定値の最適化を行った。操作対象とした設定値は、冷却塔出口冷却水設定温度と冷却塔出入口冷却水設定温度差であり、空調熱源システムの1次エネルギー消費量が最小となる組み合わせ

せを求める。最適化運転は2008年8月1日～9月19日に行い、空調時間帯は8:00～19:30とした。最適化による省エネルギー効果を求めるために、従来運転として2007年8月1日～9月19日のデータを用いて比較を行った。9月1～19日の積算1次エネルギー消費量を図9に示す。また、2次側負荷とシステムCOPの関係を図10に示す。2008年9月は2007年9月に比べ、ガス消費量が7.9%、冷却水ポンプ電力消費量が30.2%、冷却塔ファンの電力消費量が25.3%、全1次エネルギー量が9.9%削減された。図10の2次側負荷率とシステムCOPの関係から最適化運転時は2次側負荷率にかかわらずシステムCOPが高く安定しているが、従来運転時は2次側負荷率が約20%以下になると急激に性能が落ちている。従って、2次側負荷が小さいほど最適化効果が大きい結果となった。気象条件および稼動した熱源機器と運転時間が同じ日を選び、運転データを比較した(表4)。熱源COP、システムCOPともに向上がみられ、最適化ツールによる省エネ効果が実証された。

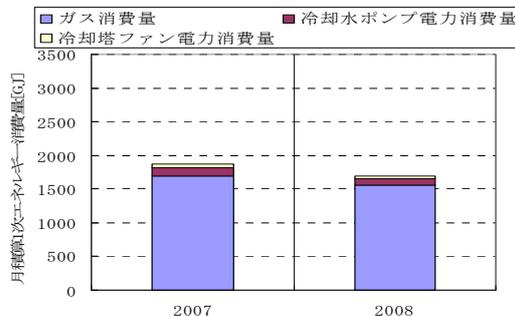


図9 最適化実験結果(月積算1次エネルギー消費量, 9月)

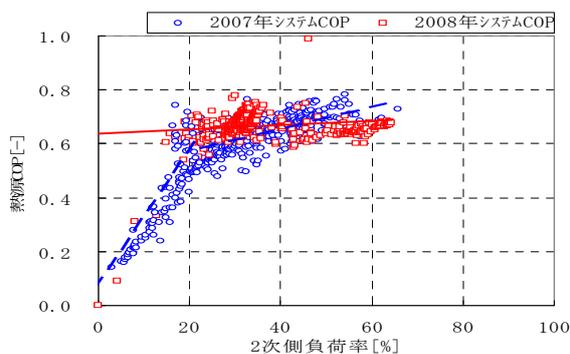


図10 2次側負荷とシステムCOPの関係

表4 最適化運転結果と通常運転結果の比較

	2007年		2008年	
	9月16日	9月4日	9月29日	9月8日
運転方法	通常運転	最適化運転	通常運転	最適化運転
熱源機器	R1	R1	R2	R2
熱源COP	0.7	0.8	0.6	0.9
システムCOP	0.6	0.7	0.5	0.7
2次側負荷[GJ]	40.5	59.0	20.2	55.7
外気湿球温度[°C]	25.6	24.9	17.3	21.7
ガス消費[GJ]	1391.6	1808.6	784.2	1648.7
消費電力[kW]	1454	1059	888	1065

## (5)まとめ

本研究では、省エネ運転・診断ツールの基盤となるフォルト検知診断ツール、および空調システム運用の最適化ツールの開発・改良、および、実験と実装による省エネ効果の把握を行った。

フォルト検知診断ツールについては、実験によりフォルト検知が十分に可能であることを示した。ただし、フォルトには様々な種類があり、実験項目としたフォルトはごく限られたものであるため、今後も研究を続け、対象を拡張していくことが重要である。

最適化ツールについては、実験・シミュレーションによる効果の検証に加え、実システムへの導入を行うことができた。実装した最適化ツールは現在も稼働中であり、今後もデータ取得と分析を重ねることにより、さらなる改良を図りたい。

また、フォルト検知診断ツールと最適化ツールの統合については、完全な統合には至らなかったが、フォルト検知診断ツールの中でも、機器のフォルト検知については容易に統合可能であることが分かった。まずは、不具合が発生した機器を特定するのではなく、不具合があるかないかを判断することが、フォルト検知ツール実装への第一歩と考える。

最後に、本研究においてツールの実装を実現できたことで、新たな課題も明らかになった。特に重要なのは、シミュレーションベースの手法であるため、多種多様なシステムごとに作り込みが必要となるという課題である。幅広く様々なシステムに適用できるツールとするためには工夫が必要である。現在、こうした問題を解決するため、対象システムを熱源側を中心としたシステムに絞り、ツールの汎用化に取り組んでいる。こうした成果は、研究代表者が所属する空気調和衛生工学会のコミッショニングツール開発小委員会等に反映し、関連研究者と情報を共有しながら、さらなるツール開発を進めたい。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1件)

1) 李 霽憲, 赤司泰義, 住吉大輔, 宮田征門, 松下直幹: 熱源システムのリアルタイム運転最適化手法の開発と実建物への適用, 都市建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要, 査読有, 第15号, pp103-110, 2008年1月

〔学会発表〕(計10件)

1) Daisuke Sumiyoshi et al, Development of Optimization Tool for Air-Conditioning System Operation, International Conference for Enhanced Building

Operations 2008, 2008. 10, ドイツ ベルリン

2) 住吉 大輔 他, 空調システム運用における最適化ツールの導入効果, 日本建築学会大会, 2008 年 9 月 20 日, 広島

3) 金 裁弘 他: 不具合検知・診断ツールの検証及び一般事務所ビルへの導入効果に関する研究, 空気調和・衛生工学会 大会, 2008 年 8 月 29 日, 草津

4) 杉田 匡英 他: 空調システム運用の最適化ツールの開発 (第 6 報) シミュレーションによる中規模事務所ビルへの適用効果, 空気調和・衛生工学会 大会, 2008 年 8 月 27 日, 草津

5) 李 霽憲 他, 空調システム運用の最適化ツールの開発 (第 5 報) 実験による季節別のツール導入効果の検証, 空気調和・衛生工学会 大会, 2008 年 8 月 27 日, 草津

6) 金 裁弘 他: 空調システムにおける不具合検知・診断ツールの改良と検証, 日本建築学会九州支部研究発表会, 2008 年 3 月 2 日, 熊本

7) 住吉 大輔 他: 空調システム運用の最適化ツールの開発 (第 3 報) 空調システムシミュレーションモデルのパラメータ同定と精度検証, 空気調和・衛生工学会 大会, 2007 年 9 月 14 日, 仙台

8) 和田 晃史 他: 空調システム運用の最適化ツールの開発 (第 4 報) 最適化ツール導入効果の検討, 空気調和・衛生工学会 大会, 2007 年 9 月 14 日, 仙台

9) 住吉 大輔 他: 空調システム運用の最適化ツールの開発 その 3 シミュレーション精度の検証とツールの効果, 空気調和・衛生工学会九州支部学術研究発表会, 2007 年 5 月 30 日, 福岡

10) 金裁弘 他: 空調システムにおける不具合検知・診断ツールの実験による検証, 空気調和・衛生工学会 九州支部学術研究発表会, 2007 年 5 月 30 日, 福岡

[図書] (計 1 件)

1) 住吉大輔 他: 技報堂出版株式会社, 臨床建築学 ―環境負荷低減のための建物診断・維持管理技術―, 2008 年, pp30-46(共著, 担当部分)

(1) 研究代表者

住吉 大輔 (Daisuke Sumiyoshi)

独立行政法人 建築研究所・環境研究グループ・非常勤研究支援職員

研究者番号: 60432829

研究協力者

赤司 泰義 (Yasunori Akashi)

九州大学・大学院人間環境学研究院・准教授