

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：17201

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05539

研究課題名（和文）ウェアラブル放射計と数値解析による屋外での人体の受熱放射量の把握と人体モデル化

研究課題名（英文）Quantitative Model for Simulating Exposure of Solar and Long-wave Radiations to Human Body in Urban Space

研究代表者

中大窪 千晶（Nakaohkubo, Kazuaki）

佐賀大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：30515143

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、屋外空間において放射環境の評価を行う上で必要となる人体モデルについて、実測と数値解析の両面から都市空間内の放射環境を明らかにし、その結果を基にモデル化の検討を行った。具体的には、都市街区での放射環境を広い範囲で把握するための移動測定手法を開発した。その上でウェアラブル放射計を開発し、人体が受ける日射・長波長放射量を測定を行った。さらに、都市空間において人体の各部位の日射・長波長放射量を算出する数値解析方法を構築し、感度解析によって、都市を構成するパラメータや人体形状の違いが、人体が受ける放射量を明らかにした。その結果を基に、屋外の放射環境を評価するための人体モデル化の検討を行った。

研究成果の概要（英文）：In this study, we studied a quantitative model to simulate the exposure of solar and longwave radiations to a human body in an urban space. First, we developed a measuring device for thermal radiation field by moving observation and wearable device for measuring radiation exposure to the human body. Then, the thermal radiation field in several urban blocks and the radiation quantity on the human body were measured by those instruments. Then, we developed a simulation method for analyzing the thermal radiation quantity. Using this method and changing some calculation conditions for parametric analysis in 3D-CAD, we ascertained the differences in thermal radiation exposures received by the human body in several urban blocks. Finally, the weight coefficient of the model for calculating the level of thermal radiation received by the human body was determined from the results of both field measurement and numerical analysis.

研究分野：建築環境工学

キーワード：放射環境 人体モデル ウェアラブル 数値解析 快適性 移動測定

1. 研究開始当初の背景

社会的に熱中症などの屋外の熱環境の悪化が叫ばれる中、屋外の放射環境の測定や予測する研究が行われている。その中で、都市形状を詳細に再現し、日射・熱放射環境を予測評価する数値解析手法が開発されてきている。一方で、屋外において熱放射の人体への影響を評価するための人体モデルは、室内用のモデルを流用している場合が多く、屋外に熱環境を議論していくためには、人体モデルを新たに構築することが必要であると考えた。そのためには、測定による都市空間の放射環境の把握や人体の各部位が受ける放射量の把握を行うとともに、数値解析によるパラメトリックスタディ等の結果を踏まえながらモデル化を進めていくことが重要である。

2. 研究の目的

本研究は、屋外空間において放射環境の評価を行う上で必要となる人体モデルについて、実測と数値解析の両面からモデル化の検討を行うことを目的とする。具体的には、まず、都市空間の放射環境を広範囲に把握するための移動測定方法と人体が受ける日射・長波長放射量を測定するウェアラブル放射計の開発を行い、街区での放射環境の特徴の把握と人体が受ける放射量を明らかにする。その上で、都市空間内で人体が受ける日射量・長波長放射量を詳細に再現するための数値解析方法の構築を行い、それを用いた感度解析によって、都市を構成するパラメータや人体形状の違いが、人体が受ける日射量・長波長放射量を与える影響を明らかにする。実測、数値解析の両面から得られた結果から、屋外の放射環境を評価するための人体モデル化の検討を行う。

3. 研究の方法

3.1 都市空間の放射環境把握のための移動計測方法の開発

都市空間内の日射・長波長放射量を測定においてはこれまで、多くの研究がなされているが、その多くは、都市空間内の限られた点での定点測定で行われており、都市空間内の平均放射温度分布の把握などは行われてこなかった。一方で、気温測定などでは定点測定だけではなく移動測定などの手法によって都市空間の広範囲の気温測定を行っている。そこで、都市空間内の日射量・長波長放射量を把握するために、移動測定を行うための放射計の開発を行った。以下に、具体的な概要を示す。

移動測定で放射量を測定するためには、移動中にその地点の放射量を取得できる時定数の短い測定が必須となる。また、人体が受ける放射量を捉えるためには、日射と地表面からの長波長放射量といった波長の異なる電磁波を取得できるセンサーを必要とする。そこで、まず、時定数の短い日射量、長波長

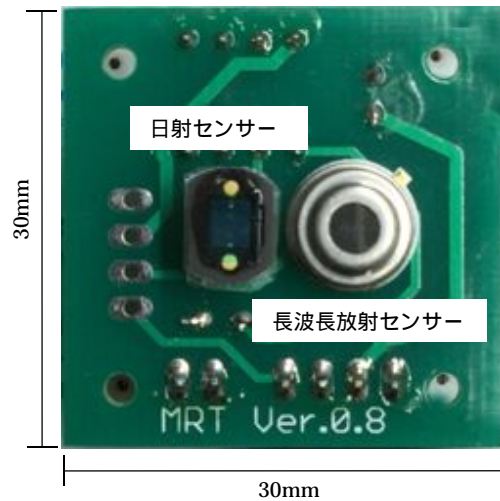


図1. 測定に使用した日射センサーと長波長放射センサー

放射量のセンサーの選定を行った。なお、このセンサーは、後述の通り人体に多数取り付けられるように、軽量で小型なものを選定した。その結果、日射量センサーにはシリコンフォトダイオードを、長波長放射量センサーには、サーモパイルを用いた小型センサーを用いることとした。日射量センサーには、可視域だけではなく、近赤外域の違いを把握できるように、1100nmの波長域まで測定できるセンサーを選定している。実際の太陽放射は5 μ mまでの分光分布を持つが、都市空間内の日射域での分光分布測定を行い、1100nmであれば、都市空間内の日射量の特長を把握できると判断し、同センサーを選定している。

選定した2つのセンサーを3cm x 3cmの基板上の配置し、これを1ユニットとして日射量、長波長放射量の両方を測定するためのセンサー部(図1)とする。各センサーが取得した値は、高精度の日射計、長波長放射計と比較し、回帰式を作成して補正するなどの処理を行っている。日射量センサーについては、直達日射、天空日射だけでなく、都市部の様々な分光特性を持つ反射日射を取得できるかを確認するため市街地空間内で斜面日射等を測定した結果と比較し、その精度の確認を行った。また、長波長放射量センサーについては、放射量を取得する画角が90度と狭く、特に大気のような鉛直方向と水平方向の放射量の差が大きく表れる場合については、周辺気温を用いた回帰式を用いて補正することで十分な精度を確保できることを確認した。

開発したセンサーを5cm x 5cm x 5cmの6面体の各面に設置し、都市空間内の平均放射温度分布を把握するためのプローブ部を開発した。これは、屋外における数値解析において微小六面体を仮定して平均放射温度の算出を行う方法を模したものである。この形において、室内空間と屋外空間において、開発した装置で測定した日射量と長波長放射量から算出した平均放射温度とクローブ球の測定結果から求めた平均放射温度との

比較により測定精度の検討を行った。室内空間では、室温を一定に保った室内において、開発した装置とグローブ球を一時間おきに、交互に同場所に設置し測定を行った。その結果、各々の平均放射温度の値は1 以内の差に収まることを確認した。その上で、屋外空間においてグローブ球と開発した装置の比較を行った。装置は、時間によって日陰が大きく変わらない空が開けた場所に設置している。また、屋外の場合は、室内に比べ時間による放射環境の変化が大きくなるため、時定数の長いグローブ球を20分、時定数の短い開発した装置を3分間、交互に装置を取り替え、比較を行った。その結果、平均放射温度とし1.5 以内の差に収まることから、十分な精度と判断した。

次に、都市空間内の平均放射温度分布を短時間で広範囲に取得できるように、自転車に装着できるように改良を行った。本センサーは、1ms 以下で測定が可能であるため、自転車での移動実測も可能である。一方で、自転車に装着する場合は、自転車や運転者が一方のセンサーの測定範囲に必ず入ってしまうため、適切な測定が難しい。そこで、装置を自転車の前方に設置し、その中で自転車の方向を向いてしまうセンサーを取り外し、自転車後方に設置することとした。また、地面の放射量を測定している面は、自転車のタイヤの温度を測定しないように20度傾け設置している(図2)。この変更により、MRTの測定精度が悪くなることが懸念されるが、相対値を把握する上では十分であると判断した。

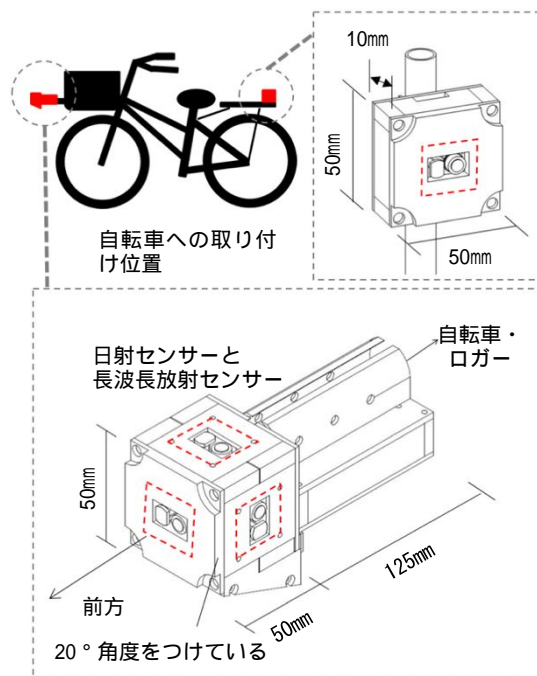
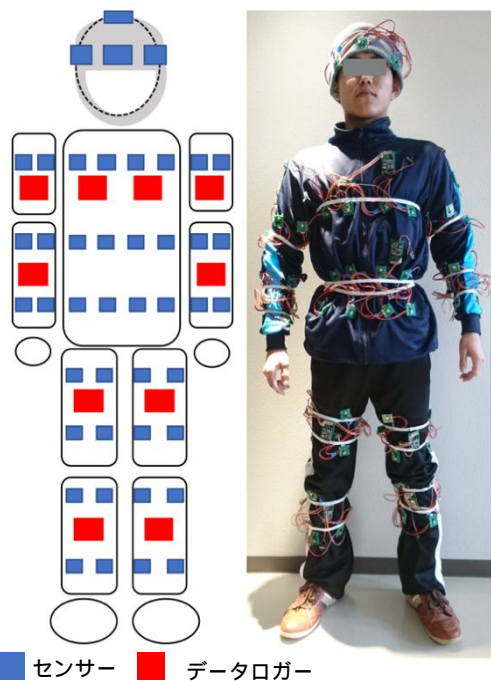


図2. 移動測定のための自転車を用いた平均放射温度測定装置

3.2 日射量・長波長放射量を測定するウェアラブル放射計の開発

人体の各部位の日射量・長波長放射量を把握するために人体に装着するウェアラブル放射計の開発を行った。前節の移動測定の際に作成した日射、長波長放射センサーを服に縫い付け、人体の各部位に入射する放射量を行うことを可能にした。人体の装着方法については、部位毎バンドなどでの固定する方法も検討したが、繰り返し装着する際にセンサーとロガーの間で断線等が生じるなどの問題があったため、服に縫い付けることとした。ただ、夏期においては、測定者に対してかなりの熱負荷を掛けることとなり、この点については、今後の改良を加えていきたい。センサーの測定位置は、頭部に6点、前腕と上腕に6点ずつ、胴体前方に12点、胴体後方に12点、脛、腿に8点ずつの87点設置した(図3)。各部位毎に小型のロガーを設置し、センサーから送られてきたデータを取得する。センサーとロガーは、服についているため、そのまま移動することが可能である。



■ センサー ■ データロガー

頭部	7点	計7点
腕部	片腕12点	計24点
胴体	前面12点背面12点	計24点
脚部	片足16点	計32点
合計		87点

図3. ウェアラブル放射計

3.3 数値解析を用いた人体の日射量・長波長放射量分布の把握

屋外の放射人体モデルの検討を行うために、数値解析による人体の日射量・長波長放

射量分布算出手法の構築を行う。その上で、前述のウェアラブル放射計での測定結果との比較により計算精度の検証を行う。さらに、

パラメトリックスタディを行い、人体モデルの検討を行う。

人体の日射量・長波長放射量分布の数値解析を行うためには、大気から人体に直接到達する日射量や大気放射量の算出と、都市空間において建物や地面で反射吸収をくり返し、人体に到達する日射量と長波長放射量を分けて考える必要がある。そこで、図4に示すように、街区内の放射量の解析を行った上で、人体が受ける日射量・長波長放射量の解析を行う。

まず、筆者らが開発した3D-CAD対応熱環境シミュレータを計算アルゴリズムに基づき、都市空間における建物や地面表面の受熱日射量と表面温度の再現方法について構築を行った。この手法では、建物や地面などの地物を3D-CAD上に再現したデータから20cm均等間隔に計算質点を作成し、その計算空間内で、熱収支、非定常1次元熱伝導方程式を解くことで、表面温度分布を算出している。本手法では、建物や地面から人体が受ける反射日射量と長波長放射量の算出するために、この手法の計算過程から得られる値を取得する。具体的には、熱収支計算の途中で算出している、各計算質点での直達日射量、天空日射量、反射日射量と表面温度の値をあらかじめ計算し、計算質点の座標データとともに格納する。

人体の放射受熱量分布の算出に関しては次の通りである。まず、対象となる都市空間と人体形状を再現した3次元モデルを作成する。人体のポリゴン毎に日射量・長波長放射量の計算を行う。直達日射量はレイトレーシング法を用い、都市空間内の建物や地面等のポリゴンと、人体の各ポリゴンの中心から太陽位置に射出した探索線との交点計算を行い、建物等のポリゴンとの交点がなかった場合に、太陽位置と気象データ、人体のポリゴンの向きから直達日射量を算出する。天空日射、反射日射量、長波長放射量については、マルチレイトレーシング法を用いて算出を行う。人体の各ポリゴンの中心に半球を仮定し、ポリゴンの中心からその半球を等形態係数になるように分割した面の中心を通るように探索線の向きを設定する。この探索線が、建物等の表面との交点を持つ場合は、交点に位置に合わせて、前述の事前に計算した直達日射量、天空日射量、反射日射量と建物の材料の持つ反射率から人体が受ける反射日射量を、表面温度と材料の持つ放射率から長波長放射量を算出する。探索線が、建物等のポリゴンとの交点を持たない場合は、探索線の向き毎に天空輝度分布と大気放射量を算出する。これの積算値を半球の分割数で除すことで、人体の各部位の受熱日射量本来的な部位の測定情報を入力することで、十分な精度が得られたため、そちらを採用した。なお、人体の各部位の測定情報は人体の寸法データベースを用いて作成している。

この計算方法を用いて、前述のウェアラブル

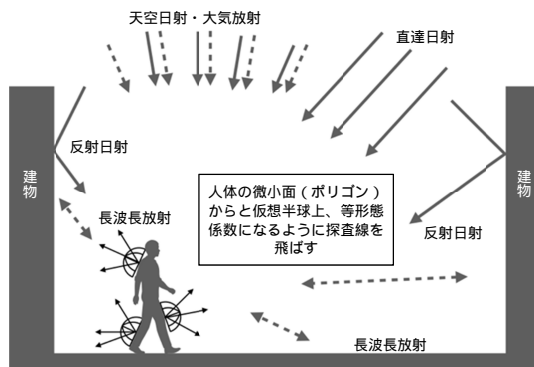
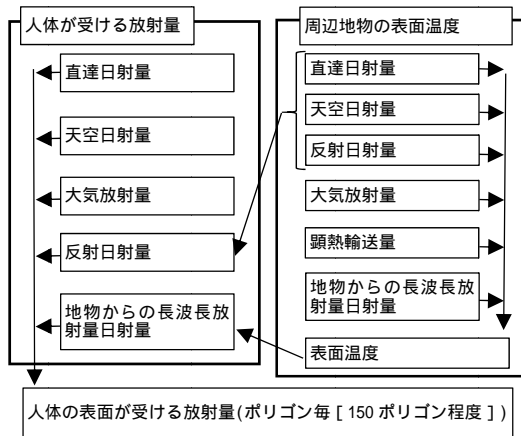


図4. 人体の受熱放射照度分布の算出フロー

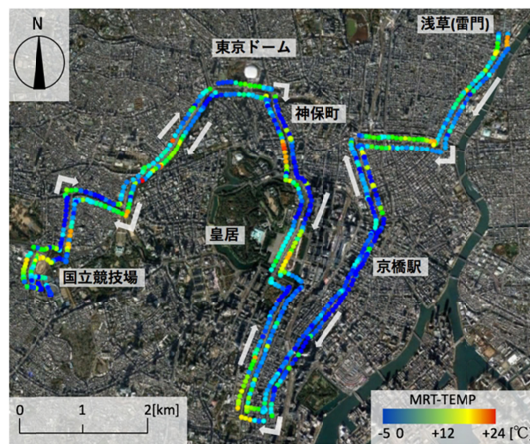


図5. 移動測定による放射環境の調査結果

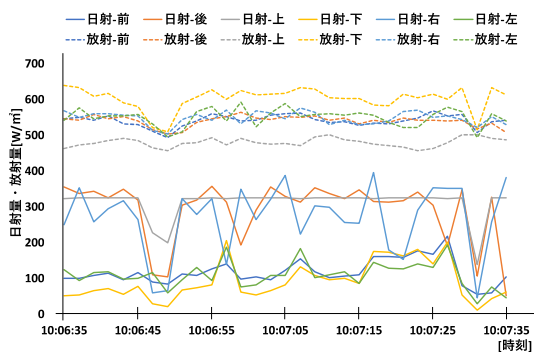


図6. 移動測定による取得した各放射量の変化(一部)

ル放射計での測定状況を再現し、計算結果と比較したところ、各部位において部分的に値が異なる部分は見られたが、傾向としては同程度の結果が得られたこと、また、受熱量分布から、各部位の面積で重み付けをして算出した平均放射温度の値の誤差は、1 程度であったため、十分な精度であると判断した。

4. 研究成果

4.1 都市空間の放射環境把握のための移動計測方法の開発

都市空間で様々な放射環境の違いを把握するために、空間構成が大きく異なる、中高層、中層、低層街区において、自転車による移動測定を行った。図5に中高層街区での測定で得られた平均放射温度分布を、図6に取得した放射量の変化の一例を示す。都市部の街路樹が豊かな地点においては、十分な樹陰が形成されない地点や時間帯では、日射の影響が大きくなり平均放射温度が他の地点に比べて高くなっていることが分かる。その一方で、中高層ビルに囲まれた地点では比較的に日陰が形成され、放射環境としては快適な空間が形成されている箇所もあることが分かる。これらの結果より、都市空間内では様々な要因が複合的に影響し、放射環境を形成していることが明らかとなった。

4.2 日射・長波長放射量を測定するウェアラブル放射計の開発

開発したウェアラブル放射計を用いて、都市街区における人体の受熱量の測定を行った。図7に、中層ビルに挟まれた通りの人体の放射受照量分布を示す。直達日射量や反射日射量、長波長放射量が人体の部位毎の大きく異なり、人体の形状や空間形状、時刻の違いが明確に表れていることが確認できた。このセンサーで取得した結果を踏まえて、以下に述べる数値解析手法の結果との比較検討を行いながら、人体のモデル化の検討を進める。

4.3 数値解析を用いた人体の放射受熱量分布の把握

上記より構築した計算方法を用いて、実在する中高層街区、中層街区、低層街区の街区形状を再現し、歩道上の人体の日射量・長波長放射量を算出し、その傾向を検討した。なお、パラメトリックスタディのため、作成した街区の方位を東西道路、南北道路の2ケースに分けて計算している。

その結果、低層街区の場合、建物による日陰が大きく出ないため日射や地表面からの照り返しを受けて、MRTが高くなる傾向が見られた。中高層街区、中層街区では、日陰において人体上部の放射量が、建物からの放射の影響で部分的に上昇するなどの傾向が見られたが、全体のMRTの結果としては、それほど大きな影響は合っていない。東西道路、南北道路の比較では、東西道路では、太陽高

度の低い時間帯に胴体などの表面積が大きな部分

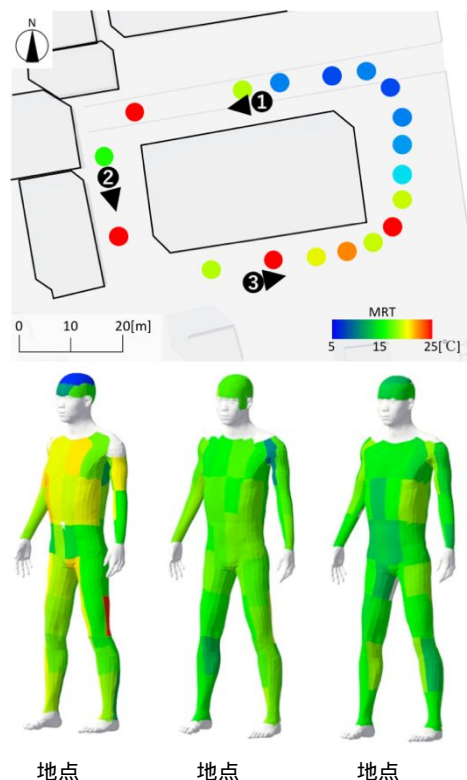


図7 ウェアラブル放射計を用いた測定結果の一例

に日射が当たるため、その影響は日中の日向での影響が現れる一方で、南北道路では、太陽高度の高い時間帯でのMRTの上昇が見られるが、それ以外の時間帯は日陰の時間帯が多く、MRTは大きくならない。日陰内でのMRTは、日射が当たる面からの反射日射量や長波長放射量が、胴体に多く当たる箇所での上昇が見られた。

4.4 屋外空間における熱放射環境評価のための人体のモデルの検討

実測調査と数値解析の結果を基に、人体の放射モデルの検討を行った。人体の放射モデルは微小六面体でのモデル化を前提として、微小六面体の各面の重み付け係数の検討を行った。検討方法は、人体形状を再現したモデルを元に平均放射温度を算出し、その値を正解として、別途算出した微小六面体を受ける各面の放射量を基に各面の重み付け係数を逆算することで算出した。なお、当初、平行光線である直達日射量についても、微小六面体上で同一の重み付け係数でモデル化することを検討していたが、その他の放射量と異なる重み付けを変える必要があったため、従来の放射有効面積を用いて与えることとし、それ以外の放射の各要素に関して重み付け係数の検討を行った。その結果、人体の前方、後方の重みが約0.26、側面が約0.12、上下面が約0.12という結果が得られた。しかし、この結果は、上記パラメトリックスタディで

用いた夏期冬季の中高層街区、中層街区、低層街区の全空間から得られた結果であり、各街区でのばらつきが大きいため、空間の複雑性や気象条件での違いによる検討など、さらなる検討条件の精査が必要であり、この点については今後の研究課題である。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 7 件)

佐田浩輝、中大窪千晶、熊倉永子、2020 年東京オリンピックマラソンコースの温熱環境 その 4 空間形態の違いが熱放射環境に与える影響の把握、日本ヒートアイランド学会第 12 回全国大会、2017 年

岡崎史門、熊倉永子、須永修通、中大窪千晶、2020 年東京オリンピックマラソンコースの温熱環境 その 3 数値解析による選手及び観客 に対する対策効果の検討、日本ヒートアイランド学会第 12 回全国大会、2017 年

Eiko Kumakura, Saeka Yamada, Nobuyuki Sunaga and Kazuaki Nakaohkubo, Thermal Environment of Marathon Course Area at the 2020 Tokyo Olympics, 3rd International Conference on Indonesian Architecture and Planning, 2016 年

佐田浩輝、中大窪千晶、熊倉永子、2020 年東京オリンピックマラソンコースの温熱環境 その 2 往路・復路における熱放射環境の把握、日本ヒートアイランド学会第 11 回全国大会、2016 年

山田冴加、熊倉永子、須永修通、中大窪千晶、2020 年東京オリンピックマラソンコースの温熱環境 その 1 移動計測による道路方位別の比較、日本ヒートアイランド学会第 11 回全国大会、2016 年

佐田浩輝、中大窪千晶、自転車を使用した移動実測のための平均放射温度計の開発、日本建築学会 大会学術講演会、2016 年

中大窪千晶、移動実測のための平均放射温度計の開発、日本ヒートアイランド学会第 10 回全国大会、2015 年

6. 研究組織

(1)研究代表者

中大窪 千晶 (NAKAOKUBO, Kazuaki)

佐賀大学・工学系研究科・准教授

研究者番号：30515143