

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25282089

研究課題名(和文) 時空間的な人の流れに着目した施設の配置・運営モデルの開発と事例研究への展開

研究課題名(英文) Flow-based facility location and scheduling problems and their applications

研究代表者

田中 健一 (Tanaka, Ken-ichi)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授

研究者番号：90408724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,600,000円

研究成果の概要(和文)：都市における人の流れに着目し、施設の配置場所とサービス提供時間帯を同時に最適化する数理モデルを構築し、鉄道網上での配置分析を行った。具体的には、(1) 終業後の帰宅途中に施設へ立ち寄りサービスを受ける状況において早く帰宅できるほど望ましい点を考慮したモデル、(2) サービス提供時間帯のどこかで一定時間以上立ち寄ればよいモデル、(3) サービス提供時間を可変とした拡張モデル等を提案した。さらに、オリンピック開催期間中の観戦客輸送に関わる数理モデル、ネットワークを段階的に改変するための数理モデルなど、時間軸を幅広い視点で捉え、理論と事例研究の両面から様々な研究を行った。

研究成果の概要(英文)：We proposed dynamic facility location models that seek locations and opening hours of multiple facilities so as to maximize the volumes of commuter flows that can be accessible to facility services, and applied the models to Tokyo metropolitan railway network using commuter flow data. Concretely, we constructed the following models: (1) a model where multiple coverage levels are considered depending on the arrival time to a destination, (2) a model in which there is a minimum required time for commuters to enjoy the service, and (3) a model where opening hours of facilities are decision variables rather than a fixed constant. In addition, we focused various situations where the temporal dimension is a critical factor, and constructed mathematical models to evaluate the effects of shuttle bus system on visitors' traffic flow to the Tokyo Bay zone during the 2020 Tokyo Olympics, and problems for designing network infrastructures by considering the time horizon.

研究分野：オペレーションズ・リサーチ

キーワード：都市工学 施設配置問題 時間軸 数理最適化

1. 研究開始当初の背景

都市や地域において、様々なサービスを提供する施設をどのように配置すべきか、という問題は、「施設配置問題」として古くから研究されてきた。施設配置問題は、空間的な意思決定問題であるが、都市に施設を配置して、それを運営していくためには様々な観点から時間軸を考慮することが重要である。

近年このような観点から、施設配置問題に時間軸を導入する試みもなされているが、数年や数十年という長期的な視点に立った問題が多い。一方で、人々の一日単位の行動に着目した上で、施設におけるサービス提供時間帯を決定する問題は、十分に追求されてこなかった。このような背景から申請者は、就業者が帰宅途中に施設に立ち寄り、一定時間施設サービスを受けることができる人数を最大化する問題を提案した(引用文献1)。

これは、図1の下図のように、就業者が終業後の帰宅途中に施設に立ち寄りサービスを受ける場面を想定し、複数施設の配置場所とサービス開始時刻を同時決定する問題である。どの施設におけるサービスも固定された一定時間提供されると仮定し、退社後に施設に立ち寄り最初から最後までサービスを受け、指定時刻までに帰宅可能な就業者の人数を最大化する問題が扱われている。

この問題において、利用者の施設への立ち寄り方法や、サービスの提供方法を、上記以外の様々な形に設定することで、幅広い現実問題を追求することが可能となる。さらに、現実の鉄道網とその上での通勤移動データへの適用を行うことで、現実の都市における幅広い事例研究に繋げることができる。本研究では、モデルの拡張と事例研究への展開の両面で新しい成果を挙げることを目標として研究を行った。

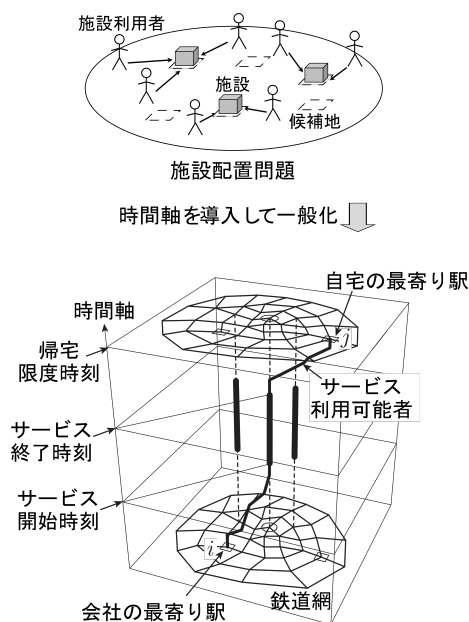


図1: 時間軸を導入した施設配置問題

2. 研究の目的

施設におけるサービス提供を計画する際に、時間軸に着目して需要を捉えることが重要である。本課題では、一日単位の人の流れに着目して、複数施設の配置場所とサービス提供時間帯を同時に決定する問題を考える。こうしたアプローチは、デパートや家電量販店の開店時間帯の決定や、英会話スクールや社会人向けの大学院における時間割作成など、様々な場面で意思決定問題として登場する。一方で、問題規模やモデルの複雑さが格段に増大するため、空間的な側面のみを扱ったモデルと比較し、十分な研究蓄積が存在しないのが現状である。

申請者が取り組んできた施設運営モデルを土台として、様々な状況設定を記述可能な意思決定問題に展開することを目標とする。具体的には、(1)サービス終了後に早く帰宅できるほど望ましい点を考慮したモデル、(2)サービス提供時間帯の中のどこかで一定時間以上立ち寄ればよいモデル、(3)施設におけるサービス提供時間を可変とした拡張モデル等の多様な状況を記述可能なモデルを構築することを目標とした。さらに、提案モデルを現実の鉄道網とその上での通勤流動データに適用し、最適な施設配置駅とサービス提供時間帯を導くことで、現実問題の解決に資する事例分析を行うことを目的とした。

また、時間軸を考慮して人の流れを扱うモデルは幅広い視点に適用可能である。上記のテーマに加え、2020年に予定されている東京オリンピック開催期間中の観戦客輸送に関わる問題を、時空間ネットワークを用いて構築し、理論と事例研究の両面から具体的な提案を行うことを目標として研究を行った。さらに、東京オリンピック開催期間中の宿泊施設の容量が十分であるかどうかに関する分析、および宿泊施設の不足に対する改善策として観戦客が複数の競技を観戦する方策などについて分析を行った。

3. 研究の方法

研究テーマを具体的に追求する手順は以下の通りである。

- A) 解決すべき現実問題を表現する数理モデルを構築する；
- B) 最適化手法を用いて具体的な解決策を提示する；
- C) 地理データを用いて事例分析を行い得られた知見を整理する。

以下、上記の各項目について説明する。

(A)の数理モデル化については、時間軸を考慮した施設配置問題では、施設の配置場所や開始時刻の集合等の意思決定の変数を離散的に捉える。その上で整数計画問題として定式化した。また、時々刻々変化する人の流れを扱う際には、空間的なネットワークに時間軸を導入した時空間ネットワーク上の問題としてモデル化した。

次に(B)について述べる。整数計画問題とし

て定式化された問題は、汎用ソルバーを用いて最適解を得ることを基本とした。問題規模が極めて大きい場合などは、定式化の際に、施設の配置候補地の数、開始時刻の刻み幅、退社時刻の刻み幅などを適宜調節した。得られた最適解の特徴や、その解が優れている点を、視覚的に分かり易い形で提示することを重視して研究を進めた。

提案した数理モデルを用いて、(C)の地理データを用いた分析を行うことを重視した。時間軸を考慮した施設配置問題は、大都市交通センサスがカバーする、首都圏および中京圏の鉄道網データを作成した。さらに、その上での通勤流動データを用いて現実の人の移動に即した事例研究を追求した。

4. 研究成果

本課題の研究成果うち、主要な成果である「主な発表論文等の各雑誌論文の内容と学会発表3」を取りあげて紹介する。

(1) 帰宅可能時刻に着目した複数のカバー水準を持つモデルへの展開（雑誌論文4）

基本モデル（引用文献1）では、施設でサービスを受けた後に決められた時刻までに帰宅可能かどうかのみが問題にされていた。しかし実際には、施設に立ち寄ってサービスを受けた後に早く帰宅できるほど望ましいと考えられる。この状況を模式的に表現したのが図2である（施設数3の例）。図中の左側のフローは左と真ん中の施設のどちらにも立ち寄り可能であるが、真ん中の施設を利用する経路P1を取る方が帰宅時刻の面で有利である。一方で、右側のフローは右側の施設にのみ立ち寄り可能であり、帰宅時刻は経路P1より遅くなっている。そこで、各フローを帰宅時刻に応じて階層化し、早く帰宅できるグループほど大きな重みを付与した拡張モデルを構築した。この一般化により、店舗に立寄る確率を帰宅時刻ごとに異なる値に設定するなどの具体的な応用を追求することができる。

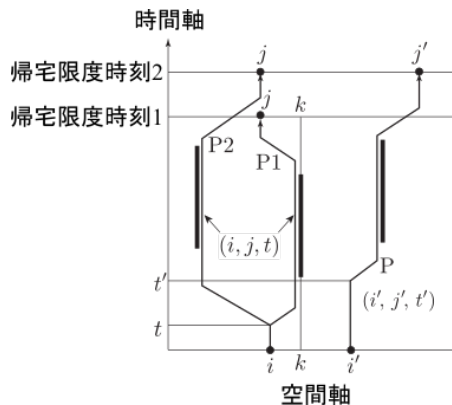


図2: 帰宅時刻に応じた重み付け

帰宅時刻に応じた階層をもつ提案モデルを、整数計画問題として定式化した。さらに、大都市交通センサスが対象とする中京圏の

駅集合をもとに鉄道網データを作成し、通勤移動の実績データを用いてフローデータを作成し、鉄道駅に施設を配置する問題を様々なシナリオで解いた。分析結果から、帰宅時刻の違いによる重みの変化に応じて、早く帰宅可能なフローの割合が異なることなどの新しい知見を得ることに成功した。

(2) 一定時間の立寄りを考慮した一般化モデル（雑誌論文3）

基本モデル（引用文献1）では、施設に立ち寄り最初から最後までサービスを受けて初めて意味がある対象が想定されていた。そうしたサービスの例として、コンサートや講義が挙げられる。一方で、デパートや家電量販店において買い物をする場合や、スポーツジムを利用する場合など、施設が開いている時間帯に一定時間以上立ち寄ることができれば十分である場面も多い。そこで、立ち寄り可能者の定義を拡張し、図3の右図のように、施設サービスが提供されている c 時間の間の a 時間の立寄りでサービスが受けられる状況を記述する発展モデルを提案した。

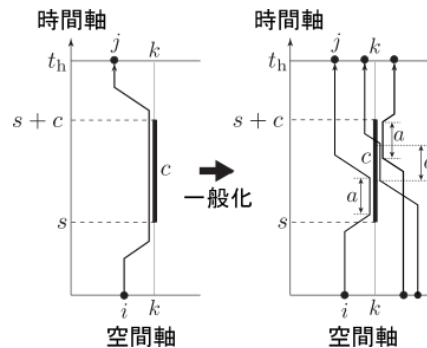


図3: 一定時間の立寄りを考慮した一般化

このモデルを整数計画問題として定式化した。さらに、通勤フローデータを用いて首都圏鉄道網上の配置分析を行った。大都市交通センサスから、会社の最寄り駅を出発する時刻（退社時刻）の分布を作成した。各移動者が移動の起点駅（会社の最寄り駅）を出発する時刻がこの分布に従うと仮定して、出発駅、到着駅、退社時刻の値ごとのフロー量のデータを作成した。

図4に施設を一つだけ配置した場合の結果を示す。図4は新宿駅に施設を配置した場合に、サービスの開始時刻ごとに施設に立ち寄り可能なフロー量を示したものである。施設のサービス時間帯は3時間とし、3時間フルでサービスを受ける必要がある場合（基本モデルと同一の設定）、2時間45分以上滞在できればよい場合、2時間30分以上滞在できればよい場合の3通りの結果を示している。また、立ち寄り可能者の条件を満たすための帰宅時刻（帰宅限度時刻）は午後11時と設定している。図から分かる通り、サービス開始時刻に応じて立ち寄り可能者数が大きく異なる

の様子が見て取れる。望ましい開始時刻は午後7時前後である。また、立寄り可能者数は、必要な立寄り時刻に大きく依存する。サービスを受けるのに必要な時間が15分短縮されるだけで、サービス利用可能者が大幅に増加することが分かる。この結果は、商業店舗におけるサービス提供を考える上で重要である。また、公共的なサービスを提供する場面においても、待ち時間やサービス時間の僅かな短縮が、効率性に大きな効果があることが示唆される。

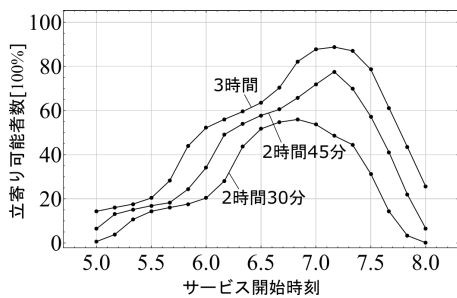


図4: 新宿駅におけるサービス開始時刻ごとの立寄り可能者数

次に複数施設を同時配置する場合の最適解を示す。施設のサービス時間帯を3時間、立寄り可能者は退社後に施設に立寄りサービスを受け午後11までに帰宅可能な者とする。図5は、施設を3か所に配置する際に、(a)3時間の立寄りが必要な場合、(b)(3時間のうちの)2時間45分の立寄りが必要な場合の最適配置駅を示している。

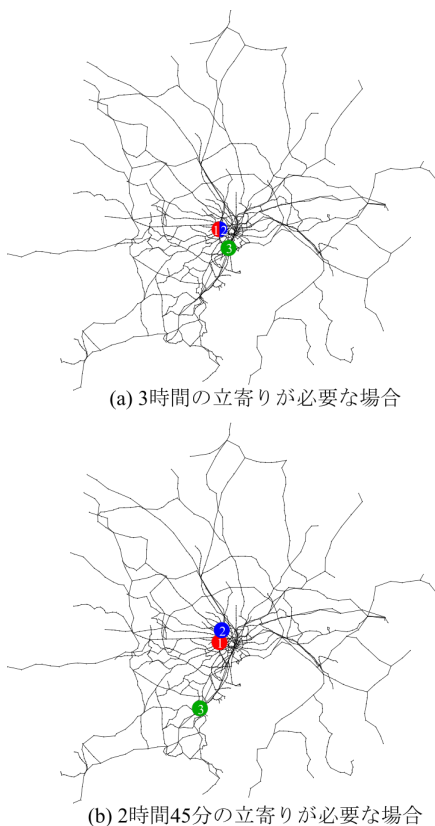


図5: 最適配置結果の比較

最適解における施設サービスは、図5(a)では、(新宿, 午後7時), (新宿, 午後7時半), (品川, 午後6時半)の3か所に配置されている。新宿駅において開始時刻の異なるサービスを2か所に展開するのがよいという結果は大変興味深い。新宿駅は複数の路線が乗り入れる大規模駅であり、集客力が極めて大きいことを示している。もう一つの駅は品川駅であり、都心の大規模駅にサービスを集中される結果となった。図5(b)は、(新宿, 午後7時), (池袋, 午後7時半), (横浜, 午後7時半)の3か所となっている。図5(a)と比較して、新宿駅の施設数が1つである点、都心からやや離れた横浜駅が選択されている点で、サービスをより分散させた方が望ましいことが判明した。図4では、サービスを受けるために必要な施設への立寄り時間が15分短縮するだけで、サービス利用可能者が大幅に増大することをみた。図5(b)の場合も同様に、立寄り時間を短縮させることで施設の集客力が増大するため、サービス展開を時空間的に分散させる方が望ましいと解釈できる。

以上の成果は、複数のサービス拠点の提供場所と開始時刻を求める最適化モデルとしての新規性を有している点に加え、現実の大規模な鉄道流動データに基づき事例研究を行った点で、海外の研究も含めてユニークな成果であると考えられる。さらに新しいモデル化の可能性の検討を進め、実データへの応用について研究を進めていく予定である。

(3) 東京オリンピック開催期間における宿泊施設の需給バランスの評価と宿泊施設不足に対する改善策(雑誌論文1, 2)

東京2020オリンピック・パラリンピック招致委員会によれば、19日間のオリンピック開催期間中に780万人の一般観戦客を見込んでいる(チケットの販売予定枚数に基づく)。観戦客数のピークとなるのは7月31日であり、この1日で約70万人が何らかの競技を観戦する。チケットの販売計画では20%を国外向けとしているので、7月31日には14万人の外国人観戦客が存在することになる。これらの外国人観戦客のほとんどは競技場からあまり遠くない宿泊施設に滞在することが予想されている。

一方、近年の外国人観光客の増加に伴い、日本各地の宿泊施設の稼働率は高止まりしており、増加する宿泊需要に対して供給が追いついていない。このような状況において、オリンピック期間中の観戦客の宿泊需要に応えることが可能なかどうかを、宿泊施設に関する空間データと数理モデルを用いて評価した。

まず、首都圏の1都3県(埼玉県, 千葉県, 東京都, 神奈川県)を対象として、Web予約を主体としたある旅行会社が取扱っている宿泊施設(所在地と総客室数)のデータを収集した。収集したデータの宿泊施設数は2,459であり、総客室数は226,852である。さ

らに、国土数値情報の「宿泊容量メッシュデータ」の3次メッシュ集計における収容人数と室数を利用して、3次メッシュごとの客室当たりの収容人数を算出し、この値をそれぞれの宿泊施設の客室数に乗じることで、宿泊施設ごとの推定収容人数を求めた。その結果、推定収容可能人数は379,891人であることがわかった。

次に、立候補ファイルに基づいて、競技場の立地と総座席数、および競技スケジュールを把握し、「ある日時に、ある競技場で行われる競技の観戦客がどの宿泊施設を利用するのか」ということを決定するモデルを構築した。その結果、全体の観戦客の20%（この値は外国人観戦客に一致する）が、競技観戦の前日から3泊の宿泊を希望した場合、8月1日に需要のピークを迎え、宿泊者数は35万人を超えることが明らかになった。この値は、1都3県の全宿泊施設の推定収容人数にほぼ匹敵するので、外国人観戦客以外は宿泊できないことになる。当然、首都圏外に在住している国内の観戦客やオリンピックとは関連のない宿泊客の需要があると考えられるので、現状の宿泊施設では需要を賅うことはできないだろう。

ところで、外国人観戦客は競技観戦と観光を行うために3連泊するとしているが、もし滞在期間中に一人の観戦客が複数の競技を観戦するとしたら、全体の宿泊需要を抑えることになる。このことに着目し、どれだけの観戦客が2競技を観戦すれば、すべての宿泊を希望する観戦客が宿泊可能になるのかについて分析した。

はじめに、各競技日の観戦客の20%（外国人観戦客数に相当）が一つの競技を観戦して3連泊するという仮定のもとで、宿泊できない観戦客が存在するかどうかについて考える。また、移動負担を考えて、観戦客は移動時間が90分以内となる宿泊施設のみを利用すると仮定する。移動手段には新幹線を除く鉄道を仮定し、競技場および宿泊施設と駅までの間は徒歩移動とする。首都圏にある35競技場（=需要点）から90分以内に到達可能な宿泊施設（=供給点）は1,486施設であり、その推定収容人数は308,624人である。この試算によれば、7月30日からの3日間と、8月7日に宿泊できない観戦客がいることが明らかになった。そこで、これらの宿泊できない観戦客を0とするために必要な2競技観戦客を数理モデルによって求めた。その結果、35,075人が2競技を観戦すれば、全員が宿泊できることが明らかになった。これらの結果を踏まえると、宿泊需要を平準化するために、競技スケジュールを見直したり、チケット販売枚数を制限するあるいは販売方法を工夫する（具体的には、複数競技観戦チケットの導入）などを検討することが必要であると言えるだろう。

(4) 2020年東京オリンピックにおける東京ベイゾーンの競技会場への観戦客誘導計画（学会発表3）

2020年に開催が予定されている東京オリンピック・パラリンピックでは、内陸部の「ヘリテッジゾーン」と臨海部の「東京ベイゾーン」を中心に競技が行われる。オリンピック開催期間中は、多数の観戦客の移動需要による混雑が予想される。特に臨海部の会場への移動は交通手段が限られており、渋滞が生じないように十分に対策を検討しておく必要がある。そこで、主要な鉄道駅から会場周辺へ直通バスを導入する状況を考え、導入効果を記述する数理モデルを構築し、様々なシナリオの下で計画を評価した。

具体的には、現状の時刻表通りに運行する電車を忠実に再現した首都圏鉄道の時空間ネットワークに、直通バスの運行を表現するリンクを加えた拡張モデルを構築した。観戦客は、目的地までの所要時間、競技開始までの待ち時間、電車やバスの乗客数等に応じて、最も望ましい経路選択を行うと仮定した。バスという選択肢が新たに導入されることにより、鉄道利用者の一部がバスを利用することが期待される。

首都圏の主要な20駅を直通バスの出発駅として分析を行った結果、東京駅と新宿駅からの乗車客数が多いことが判明した。また、駅の規模を考慮した上で評価すると、木更津駅は極めて大きな需要があることが判明した。このことは、木更津駅から鉄道を利用して臨海部周辺にアクセスするためには東京湾を迂回するため所要時間が極めて大きいのに対し、東京湾アクアラインを利用可能な直通バスは相対的に極めて優位であることによる。また、直通バスの導入により、臨海部の玄関口である、ゆりかもめの新橋駅における混雑緩和に大きく寄与することなどの知見を得ることに成功した。

<引用文献>

1. K. Tanaka: Maximum flow-covering location and service start time problem and its application to Tokyo metropolitan railway network. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol. 54-4, 2011, pp. 237-258.
5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計4件)
 1. 鳥海 重喜, 稲川 敬介: 東京オリンピック開催時の宿泊需要予測, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 62, 15-21, 2017. (査読無)
 2. 鳥海 重喜: 東京オリンピック開催期間における宿泊施設の需給バランスの評価, 都市計画論文集, No. 51-3, pp. 481-486, 2016. (査読有)

3. K. Tanaka and S. Toriumi: Extension of the maximum flow-covering location and service start-time problem to allow flexible consumption, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* (DOI: 10.1299/jamdsm.2016jamdsm0044), 2016. (査読有)
4. K. Tanaka and T. Furuta: Locations and service start time of flow-covering facilities with multiple coverage levels. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol. 56-3, pp. 177-197, 2013. (査読有)

[学会発表](計7件)

1. 田中 健一, 古田 壮宏, 鳥海 重喜: 鉄道利用者に着目した異なる捕捉水準をもつフロー捕捉型配置問題, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2017 年春季研究発表会, 沖縄県市町村自治会館(沖縄県), 2017 年 3 月 16 日.
2. 山野 壱成, 田中 健一: 電車の車窓から見える広告掲示板の最適配置問題, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2017 年春季研究発表会, 沖縄県市町村自治会館(沖縄県), 2017 年 3 月 16 日.
3. 田中 健一, 鳥海 重喜, 渡部 大輔, 田口 東: 2020 年東京オリンピックにおける東京ベイゾーンの競技会場への観戦客誘導計画, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年秋季研究発表会, 山形大学(山形県), 2016 年 9 月 15 日.
4. 渡部 大輔, 鳥海 重喜, 田口 東: 2020 年東京オリンピックにおけるメインスタジアムへの観戦客誘導計画, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年秋季研究発表会, 山形大学(山形県), 2016 年 9 月 15 日.
5. S. Toriumi: Demand forecasting of both accommodation and transportation for Tokyo Olympic 2020, *INFORMS International Conference 2016*, Hawaii (USA), June 12, 2016.
6. K. Tanaka: Extensions of the maximum flow-covering location and service start time problem based on the maximum time spent in a facility, *International Symposium on Scheduling 2015*, Kobe (Japan), July 5, 2015.
7. 田中 健一: ネットワークの段階的縮小計画のための数理モデル, 第 28 回応用地域学会研究発表大会, 11 月 30 日, 沖縄産業支援センター(沖縄県), 2014 年.

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 健一 (TANAKA, Ken-ichi)
慶應義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号: 90408724

(2)研究分担者

鳥海 重喜 (TORIUMI, Shigeki)
中央大学・理工学部・准教授
研究者番号: 60455441