

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18510132
 研究課題名（和文） 群知能を用いたメタヒューリスティックスの効率改善と
 組合せ問題への適用
 研究課題名（英文） IMPROVEMENTS OF EFFICIENCY IN META HEURISTICS WITH SWARM
 INTELLIGENCE AND APPLICATIONS TO COMBINATORIAL PROBLEMS
 研究代表者
 豊田 吉顯 (TOYODA YOSHIAKI)
 青山学院大学・理工学部・教授
 研究者番号：50082839

研究成果の概要：各個体の知能は低いにもかかわらずそれが群れをなしたときに発揮する高度な能力すなわち群知能を用いたメタヒューリスティックス，特に Particle Swarm Optimization と Ant Colony Optimization について，種々の問題に対して解を求めていく過程を明らかにし，効率のよいパラメータ値を調べるとともに，効率改善を行うためのハイブリッド法を提案している．さらには適用範囲を幅広く組合せ問題へ拡張している．

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	690,000	4,090,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：OR

1. 研究開始当初の背景

最適化問題の多くは，問題の規模が大きくなると計算量が膨大になり，非常に高速なコンピュータを用いたとしても，最適解に到達するまでに数年以上かかるものも珍しくない．したがって，それらの問題の最適解を求めることも一般的には難しいと考えられている．

過去十数年，メタヒューリスティックスと呼ばれる近似解法，中でも遺伝的アルゴリズムをはじめとする生態系の進化の過程を用いて最適解の近似解を求めようとする研究が盛んに行われてきた．

我々の研究では，単体としては能力が低く

ても群れとして意外な能力を発揮する生物の知能を最適化に結び付けようと試みるものである．例えば，鳥が魚の群れに集まってくるという能力は，最適値探索問題に利用することができる可能性があるであろうし，蟻が列を成して餌と巣の間を行き来する能力は最短経路問題に利用できる可能性が高い．ここで取り扱う生物の個々の個体の能力は低いため，その動きは単純である．従って，アルゴリズムは簡潔であるが，それらの個々の低レベルの個体が集まったときに思わぬ力を発揮すると考えており，相対的にアルゴリズムを簡潔にまとめることができ，計算時間も短くできる可能性を秘めている．

2. 研究の目的

(1) Particle Swarm Optimization (PSO) の特性と実際問題への適用について

近年、PSO という手法が注目されており、これは群れに属する各個体間で非常に簡単な情報を交換しながら、複数の個体で広域探索を行う方法である。しかしながら、例えば個体が探索領域から飛び出した場合のアルゴリズムや各個体の移動距離等、パラメータ値設定などに未知な部分が多く基礎研究が盛んに行われている段階である。また、現実の問題に適用している文献も散見されるが、ここではPSOが実際にどのような問題に有効に適用できるかについて検証する。

(2) Ant Colony Clustering (ACC) の改善

データクラスタリング問題は、見方を変えれば多次元データのパターン認識として捉えることができる。これまでに用いられてきたクラスタリング手法は多変量解析手法で、多次元の項目を用いたデータの分類はうまくいかないことが分かっている。そこで、本研究では多次元の項目を利用したデータの分類（多次元データのパターン認識）を行うための手法をACCアルゴリズムに有効な改良を加えることで、新しいアルゴリズムを開発することを目的とし、アルゴリズムの効率及び有効性について検証する。

(3) 探索領域内の最適解の位置と探索精度の関係について

最適解が探索領域の中心にある場合には良い解が得られることが多いと考えられるが、探索領域の境界近傍に最適解がある場合には、よい解が見つからないことが多いことが予想される。どのような工夫を取り入れれば最適解に近い解が得られるかについて検証する。

(4) エージェントの数と探索精度の関係

エージェントの数が多いほど得られる解の精度は高くなることが予想されるが、計算時間が長くなる。解を求めるために群れの相互作用やエージェントの機能によってエージェント数をどのように設定すれば効率的になるのかについて検証する。

(5) パラメータ値の設定方法について

PSOはパラメータの値に対してはそれほど敏感ではないことが我々の種々の研究等で明らかになってきているが、それでも探索回数や探索精度を考えるとパラメータ値は問題に応じて変えざるを得ないと考えている。探索効率を上げるためにはパラメータ値をどのように設定するのがよいのかについて検証する。

(6) ダイナミック問題の解法の開発

世の中に現れる問題の多くは、時々刻々と変化するパラメータを持った問題が多く存在する。例えば、電力の最適送電システムやパケット通信の最適化などは、時々刻々と環境が変化しているため、これまでに用いられてきた手法を適用するには、毎回環境が変化した後の問題を最初から解かなければならない、という大きな問題があった。そこで、本研究では環境が変化しても変化した時点の状態から問題（例えば、送電線が切断された場合には、その地点から他のルートを見つける問題に相当する）を解くことによって、これまでの情報を有効利用して改善解を求めるアルゴリズムをAntColony Optimization (ACO)、Ant System (AS)の汎用性を利用し、ダイナミック問題（動的問題）に対応できる有効なアルゴリズムを開発することを目的とし、アルゴリズムの効率及び有効性について検証する。

3. 研究の方法

平成18年度は群れの構造のデザインや群れを構成するエージェントの相互作用についての検証し、群知能を適用する問題に応じた群れの構造に関する研究を行う。さらに、群知能を用いた探索アルゴリズムの構築を行うとともに、エージェント（個体）に実装させる機能に関する研究を行い、ベンチマークテストを行って得られた結果を既存の手法と比較するためのベンチマーク関数の選択とその評価を行う。さらに、考案した探索アルゴリズムに基づいたソフトウェアを開発し、ベンチマーク関数を用いて種々のシミュレーションを行う。また、線形計画問題、0-1計画問題への適用を実現させ、開発する方法の実用性についても検討する。

平成19年度においては、前年度の研究成果を踏まえて、実際の問題に適応すべく研究を進める。すなわち、①配送問題や集荷問題といった実社会における問題を調査し、それらの問題のモデル化・定式化を行う。また、どのような群れ構造が問題解決に有効であるか否かの評価を行い群れ構造を決定する。それに基づいた群知能を用いたアルゴリズムを構築する。②実問題の特性及び群れ構造の特性を考慮したエージェントの機能とその相互作用に関する研究を行う。さらに考案したアルゴリズムに基づいたソフトウェアを開発して、種々のシミュレーションを行う。

最終年度は、研究目的の達成を目指して、平成18年度及び平成19年度の研究成果をもとに、群知能を用いたメタヒューリスティックメソッドを確立した上で、その適応分野を明らかにするために研究成果の統合を図る。さらに、例えばGenetic Algorithm (GA)と群知能 (ACOやPSO等)を組合せたハイブリッドシステムを研究し、大域的探索手法

と組合せることによって、局所解に陥った場合の探索範囲の効率的な移動や探索効率の改善に関する研究を各分担者の協力によって進めていく。このことにより、探索領域と探索精度の関係、探索回数と探索精度の関係、エージェント（個体）の数と探索精度の関係などに関して、新たな知見を得るべく研究を進める。さらにジョブショップスケジューリング問題やデポ問題などを例にとりて実際問題への適用可能性を検証する。

4. 研究成果

(1) メタヒューリスティクスそのものの性格を明らかにし、改善を行った。

① 近傍探索ルーチンを用いた PSO アルゴリズムの改良

これまでの研究から、PSO は一般に、エージェントの位置情報とその移動方向を決定するベクトル2つからなる、非常にシンプルで効率のよい探索法であるとの評価が与えられている。しかしながら、PSO の探索効率を上げるためには、PSO と局所探索アルゴリズムを組み合わせたハイブリッド探索法が必要とされており、そこで我々はハイブリッドアルゴリズムを開発した。この手法では、(a) PSO によって各世代における各エージェントの位置を求める、(b) エージェントの近傍により良い解があるか否かを探索し、良い解が見つければさらにその先の探査を繰り返す。 (c) 良い解が見つからなければ PSO の広域探索に戻る。そして(a)~(c)の過程を繰り返す。

6 種類のテスト関数 (Sphere 関数, Rosenbrock 関数, Griewank 関数, Shekel's foxholes 関数, Six hump camel back 関数及び Step 関数) に対して近傍探索ルーチンを用いたハイブリッド PSO を適用して、その有効性を確認した。

その結果、すべての関数でオリジナルの PSO を適用するよりは非常に良好な解または同等の解を求めることが可能であった。特に Sphere 関数, Rosenbrock 関数, Griewank 関数においてはオリジナルの PSO よりは非常に良好な結果を得ることができた。

② ACC の改善

現在、多くの会社では顧客の情報や試験結果などが膨大なデータベースとして保管されている。我々がそれらを有効活用するためには、データの構造や関係性を見つけ出す方法や知りたい情報を効率よく探し出す方法などがなくてはならない。それを実現する1つの方法として、データを分類するためのクラスタ分析があり、この方法は有効であるといわれている。しかしながら、一般的なクラスタ分析手法では、多次元情報を持ったデータを、自然なクラスタに分けることが難しい

場合が多い。そこで Lumer らは、新たなクラスタ分析手法として、生物の知恵ともいえる群知能を応用した ACC という手法を提案した。ACC では、蟻が仲間の死骸を一箇所に集めるという習性をアルゴリズムに利用しており、従来のクラスタ分析手法にはなかった特徴を数多く備えている。

Lumer らによって提案された ACC アルゴリズムは、次の欠点を持っている。

- (a) クラスタリング精度にばらつきが生じる。
- (b) クラスタリング完了までに膨大な時間がかかる。

これらの欠点を解決するために、蟻エージェントの動作を多様化し、個々の蟻エージェントに広域的な情報を与えるなどの改善手法が研究されている。しかしながら、個々の蟻エージェントに知能を与えてしまえば、群知能の特性が失われてしまうことになる。そこで、我々はアルゴリズムの基本動作から見直して、彼らの提案したアルゴリズムを改善する必要があると考えた。

データ量の増大に対処しきれない、分類精度が安定しない、などのクラスタ分析手法の限界を乗り越えるために、蟻の群知能を用いたクラスタ手法である ACC に改良を加え、従来の欠点を克服することができた。提案するアルゴリズムは、蟻エージェント動作の効率化 (人工蟻エージェントの動きをできるだけ自然界に存在する蟻の動きに似せることによって、蟻エージェントの無駄な動きを削減し、それによりアルゴリズムの改良を試みた)、クラスタの凝縮など様々な改善を施しており、クラスタリング速度・精度とも飛躍的に向上した上、データ量が理論上無制限に扱えるようになった点も大きな成果である。

③ エージェントが探索領域外へ出た場合の戻り位置 (点)

最適解や最良解が探索領域の境界に近い位置にある場合は、エージェントが探索領域を飛び出してしまう場合が多発する。遺伝的アルゴリズムでいえば、致死遺伝子となる。この場合、探索領域を飛び出したエージェントを探索領域のどの位置に引き戻すかによって、その後の探索効率や求まる解の精度に影響が出る。そこで以下のような4つの方法を考案し、それぞれの有効性を数値実験によって検証した。

- (a) 探索領域の中のランダムな点にエージェントを配置する。
- (b) 探索領域外に出た時点でのエージェントの位置から最も近い探索領域境界上の点に配置する。
- (c) エージェントが探索領域外に出た時に探索領域境界を横切った点に配置する。
- (d) 探索領域外に出た時点でのエージェントの位置と探索領域境界と線対称の位置

にある探索領域内の点に配置する。

また、引き戻し位置を変更することによって、次世代の個体の位置を計算するための移動ベクトルについても2つの考え方を提唱している。

(イ)引き戻した位置を用いて移動ベクトルを計算する。

(ロ)探索領域外に出た点を基準とし、引き戻した位置までの移動ベクトルを計算する。

4つの引き戻し方法と2つの移動ベクトル計算方法をそれぞれ組み合わせ、8つの組み合わせについて Sphere 関数, Rosenbrock 関数, Griewank 関数, Shekel' s foxholes 関数, Six hump camel back 関数及び Step 関数に適用して、その有効性を確認した。

その結果、探索領域外へエージェントが飛び出したときの戻り位置としては、(b)の探索領域外に出た時点でのエージェントの位置から最も近い探索領域境界上の点に配置または、(c)探索領域外に出た時点でのエージェントの位置と探索領域境界と線対称の位置にある探索領域内の点に配置する方法が有効であることが分かった。また、移動ベクトルについて言えば、(イ)の引き戻した位置を用いて移動ベクトルを計算する方法が有効であることも分かった。これらの方法を組み合わせることによって、最適解や最良解が探索領域の境界に近い位置にある場合においても PSO を適用できることが検証できた。

④近傍探索ルーチンの適切なパラメータ

(1)①の近傍探索アルゴリズムを付加したハイブリッド PSO アルゴリズムにおいては、各種パラメータの値が求まる解の精度に大きな影響を与えることがわかっている、そこで、パラメータ値が求めた解にどのような影響を与えるのか、パラメータ値の組み合わせを変化させてその影響を検証したものである。

変化させるパラメータ値としては、PSOアルゴリズム中の移動ベクトル T_{ij+1} を求める際の c_1 、 c_2 及び $|T_{ij+1}|$ の最大移動量 $|v|$ である。

$$T_{ij+1} = wT_{ij} + 2c_1(Q_i - P_{ij}) + 2c_2(B - P_{ij}),$$

$$\text{If } |T_{ij+1}| > |v| \text{ then } |T_{ij+1}| \leftarrow |v|.$$

また、近傍探索アルゴリズムにおいては各個体から近傍探索する距離 d についてである。

4種類の代表的なテスト関数 (Sphere 関数, Rosenbrock 関数, Shekel' s foxholes 関数及び Step 関数) に関して近傍探索アルゴリズムを付加したハイブリッド PSO アルゴリズムを適用した。

その結果、Sphere関数においては、 c_1 と c_2 の値が小さめの値、最大移動量 $|v|$ が大きめの値、近傍探索距離 d が小さめの値の組み合わせのときに、良い解を得られることが分かっ

た。

Rosenbrock関数では、 c_1 と c_2 の値はあまり影響せず、最大移動量 $|v|$ が大きめの値、近傍探索距離 d が小さめの値の組み合わせのときに、良い解を得られることが分かった。

Shekel' s foxholes関数においては、 c_1 と c_2 の値が小さめの値、最大移動量 $|v|$ が小さめの値、近傍探索距離 d が非常に小さい値の組み合わせのときに、良い解を得られることが分かった。

Shekel' s foxholes 関数においては、最大移動量 $|v|$ が解に及ぼす影響が最も大きいことが分かった。

Step関数においては、標準的なPSOとハイブリッドPSOでは得られる解に大きな差はなかった。 c_1 と c_2 の値の組み合わせがどのようなものであっても、最大移動量 $|v|$ と近傍探索距離 d は0.5がもっとも良い解を導き出すことが分かった。

(2)メタヒューリスティックスの応用に関する研究

①多次元ナップサック問題

多次元ナップサック問題を解いて正確な解を求めようとすると、問題の規模が大きくなるにしたがって、計算時間が膨大になる。また、大規模な問題に対して常に最適解が必要であるわけではない。我々はメタヒューリスティックスの代表的な方法の1つであるPSOを本問題に適用した。しかしながら、PSOでは実数空間においてエージェントの位置が定義されるので、多次元ナップサック問題ではそのままの形では探索領域内でのエージェントの位置は表現できない。そこで、0-1整数空間と実数空間を行き来しながらPSOを適用するアルゴリズムを提案し、その有効性を検証した。Senju-Toyodaの提案した60 Proposals, 30 Restrictionsの2つ問題に対して我々の開発した方法を適用した。

制約がより厳しい問題では、Senju-Toyodaの開発した方法より我々の開発したPSOを適用した方法の方がやや良い最良解が得られることが分かった。制約がやや緩い問題においては、Senju-Toyodaの開発した方法と同様な最良解が得られた。

PSOを多次元ナップサック問題に適用した文献は今まではあまり目にする事はなかったが、我々の提案した方法によって、PSOの多次元ナップサック問題への適用の可能性を示した。

②ダイナミック問題の解法の開発

蟻の群れ行動は巣(コロニー)を維持するために行われており、それを維持していくために最重要なタスクから優先的に、しかも限られた労働資源の中から最適な資源配分を行い対処していく必要がある。しかし全体を

管理、指示するような中枢、統治者はコロニーには存在しない。個々の蟻が自分で得ることのできる分散的な情報だけから判断し、他の個体との相互作用を通して、自分で判断することにより、コロニー全体にとって最適と思われるような行動をとるメカニズムがある。この群れの行動での採餌行動と動物的コミュニケーション方法“stigmergy”を合わせたものを最適化問題に応用し、問題解決を図るための手法をACOという。

巡回セールスマン問題に代表される組合せ最適化問題は、一般には問題の定義、構造が静的であるが、実際に最適化を行いたい問題は動的に環境が変化していく場合が多い（古くから利用されているダイクストラ法を適用するには問題が変化するたびに最初から問題を解く必要があるため効率性に欠ける）。そこで蟻の群知能を考えてみると、彼らは時間によって刻々と変化し予想もできないような環境変動に柔軟に対応していくことができる。このことから蟻の群知能を実際の動的な問題に適用し、その有効性を示すことができれば現実問題に貢献できる。

我々は経路が切断されたことが分かった瞬間に、その切断点から蟻エージェントを使ったアルゴリズム Ant Colony System (ACS) を適応し、問題自体が時々刻々変化する動的な問題（例えば、台風などで切断される電力送電線ネットワークシステムなど）にACOに充分適応できることを示した。

③デポ配置問題とハイブリッド化のためのパラメータの検証

クライアントがある地域にランダムに分布していると仮定し、クライアントからデポまでの距離の総和が最小となるようにデポを配置する問題に対して、PSOを用いて解く方法を提案し、得られた解について考察した。以下(a)～(d)までの4種類の問題を解くことのできるPSOアルゴリズムを開発した。

(a) 1つのデポを配置する問題

クライアントまでの距離の総和が最小になるようにデポを配置する。

(b) 複数のデポを配置する問題

クライアントに最も近いデポがそのクライアントを担当することとし、クライアントとデポの距離の総和が最小になるように複数のデポを配置する。

(c) クライアント数の均衡化問題

(b)でデポにクライアントを配置した場合、クライアントは自分に最も近いデポに向かうことになるので、各デポのクライアント数に偏りが生じることになる。各デポのクライアント数を均衡化しないとサービス低下を招くため、クライアント数の均衡化を図る。方法としては、クライアント数が多いデポからクライアント数が少ないデポにクライ

アントを移動させる。ただし移動させる際には、移動距離の最も少ないクライアントを移動させる。そのためには、(イ)まず1つのデポを選択し、どこに配置するのが適切かPSOを用いて求める、(ロ)これを次々と残りのすべてのデポに対して繰り返す。(ハ)すべてのデポが終わったら、最初のデポに戻り、これを繰り返す。(ニ)クライアント均衡化ルーチンを用いてクライアントを均衡化させる。(イ)～(ニ)までを予め定めた世代繰り返す。

数値実験の結果、多くのケースにおいてクライアント数が均衡化された結果が得られている。

(d) 競合デポの配置問題

配達地域には既に複数の競合デポがあり、そこに新しくデポを配置する問題を考える。その場合、クライアントは距離の近いデポを利用するものと仮定し、クライアント数が最も多く獲得できるデポの場所を求める。

数値実験の結果、例えば450クライアントのケースで既に5デポがある場合において、新しいデポをPSOで配置したケースでは、91クライアントを既存の4つのデポから獲得することに成功している。

1 デポ配置、複数デポ配置、クライアント数均衡、競合デポの配置のいずれの問題においても、PSOはある程度適用可能であることが分かった。

(e) クライアント数の均衡化問題におけるパラメータ

クライアント数の均衡化問題におけるパラメータとして以下が重要である。

V : 全体の手順の繰り返し数

S : 各々のデポの位置を求めるPSOアルゴリズムの繰り返し数

V と S の組み合わせが得られる解にどのような影響を及ぼすのかを検証するために、 V と S の組み合わせを(2, 50), (5, 20), (10, 10), (20, 5), (50, 2)及び(100, 1)として検証を行った。

その結果、望ましい結果を受け入れ可能な計算時間内に得るためには、 S の値は V の5倍程度までの値が望まれることが分かった。

④PSOのジョブショップスケジューリング問題への適用と効率改善のためのGAとのハイブリッド化

PSOをジョブショップスケジューリング問題に適用する。PSOとJSSを対応するためにPSOで求めた座標の大小とジョブ番号を関連付けるが、問題の規模が大きくなるとデータの並べ替えに膨大な時間がかかる。又JSS問題に適用する際にPSOは実数空間で探索を行っているため、個体の座標をJSS問題の解であるスケジュールに変換する必要がある。ところが、その変換方法では、PSOの各個体の座標そのものを使うのではなく、各次元の

座標の大きさの順番を使っている。そのため、解の精度はPSOの個体の座標と直接関連していないので、問題のサイズが大きくなると解の精度がかなり落ちてしまう。さらにPSOは局所解に陥ってしまい、大局的な最良解を見つける際に問題となる。これに対して遺伝的アルゴリズム(GA)は解の候補が直接個体の遺伝子として表現され、変換を必要としない。その上GAは大局的な最良解を求めるのに適している。そこで、本研究では、JSS問題をPSOとGAの2つのメタヒューリスティクス探索法で解く際のそれぞれの特徴を分析し、PSOとGAとのハイブリッドヒューリスティクスアルゴリズム(HPG)を開発した。そしてそれをベンチマーク問題並びに現実の問題をモデル化した問題に適用し、この有効性を確認している。

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 1 件)

- ① Fumihiko Yano, Tsutomu Shohdohji, and Yoshiaki Toyoda, “An Improvement of Particle Swarm Optimization with A Neighborhood Search Algorithm”, Industrial Engineering and Management Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 64-71, (2007), 査読有.

[学会発表] (計 1 4 件)

- ① Fumihiko Yano, Tsutomu Shohdohji, and Yoshiaki Toyoda, “Modification of Hybridized Particle Swarm Optimization Algorithms Applying to Facility Location Problems,” Proceedings of The 9th Asia Pacific Industrial Engineering & Management System Conference, (December 5, 2008), Bali.
- ② Jiong Shen, Fumihiko Yano, Tsutomu Shohdohji, and Yoshiaki Toyoda, “An Approach to Multi-Objective Job Shop Scheduling Using Hybrid Particle Swarm Optimization,” The 38th International Conference on Computers and Industrial Engineering, (November 2, 2008), Beihang University, Beijing.
- ③ Yoshiaki Toyoda, Fumihiko Yano, Tsutomu Shohdohji, and Kikuno Kato, “A Simplified Approach to Obtain Preferable Facility Location Using Particle Swarm Optimization,” The 38th International Conference on Computers and Industrial Engineering, (November 2,

2008), Beihang University, Beijing.

- ④ Tsutomu Shohdohji, Natsuki Samura, Fumihiko Yano, Kikuno Kato, and Yoshiaki Toyoda, “An Improvement of Ant Colony Clustering Algorithm Based on Ant Behavior”, The 37th International Conference on Computers and Industrial Engineering”, (October 22, 2007), Alexandria University, Alexandria.
- ⑤ Fumihiko Yano, Tsutomu Shohdohji, Kikuno KATO, and Yoshiaki Toyoda, “An Approach to Multi-Dimensional Knapsack Problems Using Particle Swarm Optimization,” The 7th Asian Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, (December 18, 2006), Asian Institute of Technology, Bangkok.
- ⑥ Tsutomu Shohdohji, Fumihiko Yano, and Yoshiaki Toyoda, “An Approach to Dynamic Problems Using Ant Colony Optimization,” The 7th Asian Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, (December 18, 2006), Asian Institute of Technology, Bangkok.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

豊田 吉顯 (TOYODA YOSHIAKI)
青山学院大学・理工学部・教授
研究者番号：5 0 0 8 2 8 3 9

(2) 研究分担者

正道寺 勉 (SHOHDOHJI TSUTOMU)
日本工業大学・工学部・准教授
研究者番号：1 0 1 1 8 5 9 9
矢野 文彦 (YANO FUMIHIKO)
桜美林大学・総合科学系・教授
研究者番号：0 0 1 8 2 3 9 5

(3) 連携研究者

加藤 菊乃 (KATO KIKUNO)
青山学院大学・理工学部・助手
研究者番号：4 0 4 4 5 1 7 7