

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008 ～2010

課題番号：20360387

研究課題名（和文） リスクを考慮した最適な海上資源物流システムの研究

研究課題名（英文） Optimal logistic systems of natural resources and energy
based on the computer simulation

研究代表者

武市 祥司 (TAKECHI SHOJI)

金沢工業大学・情報学部・准教授

研究者番号：90291319

研究成果の概要（和文）：資源エネルギー・セキュリティを検討することを目的に、鉄鋼石を対象にして、産地港から日本の主要製鉄所に輸送する鉱石運搬船等をモデル化した離散型時間発展的シミュレータを開発した。輸送コストと備蓄量から算出する枯渇リスクを用いて、航路や船団構成を評価することが可能になった。産地と製鉄所を往復するシャトル輸送に、日・豪・南米・欧州を巡るコンビネーション輸送を 3 割程度取り入れる航路や船団が最適であることが判明した。

研究成果の概要（英文）：In order to secure the natural resources and energies for Japan, we developed the logistics simulator with discretized models and time marching method. The simulator has some simulation models such as an ore carrier that transports iron ore by water from the port in a producing country to Japan's iron mills, a sea port with some capacity constraints, a stock yard of the iron mill and so on. The simulator can calculate not only shipping cost but also depleted risk evaluated from the stockpiles of each iron mill, so we can estimate the optimal shipping routes and fleet. Using this simulator, we found that the optimum routes was consisted of 30 % of the Japan—Australia—South America—EU combination route and 70% of the direct shuttle transportations routes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2008 年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2009 年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2010 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
総 計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海上輸送システム，リスク，シミュレーション，最適化

1. 研究開始当初の背景

(1) BRICs に代表される新興国の経済的急成長により、原油や石炭を始めとする様々な資源の需要が増大しているために資源確保が喫緊の課題となっている。例えば、中国の粗鋼生産量は近年急激に増加し、この急激な需要拡大が全世界的にも大きな影響を及ぼすようになったため、鉄鉱石の需要量は急激に上昇し、鉄鉱石の安定確保は急務になっている。安定確保には原産国での発掘量をおさ

えるだけでは不十分であり、輸送も十分に考慮しなくてはならない。なぜなら、海上輸送を担う輸送船の数も不足して、輸送船の船腹需要量が供給量を大きく上回るようになったため、輸送船舶の確保も困難になっている。この輸送船舶の不足から新造船建造の需要が高まり、造船業界は造船ドックには 4～5 年先までの建造予定で埋まるほど好況である。この状況のもと、新造船の建造費用や用船費用は高騰の一途をたどっている。

(2) 現状のような需要増がいつまでも続くことはありえない。船腹需給のアンバランスはやがて解消されて供給過多に陥り、船価が下落する。造船・海運業界の増産方針は、遠くない将来に破綻する事は誰の目にも明らかである。この苦い失敗を造船・海運業界は幾度となく経験してきたにもかかわらず、この方針に異を唱え、合理的な戦略の策定を支援する手段が現状ではほとんどない。この合理的な戦略策定には、将来の資源需要量に応じた適正船腹量を適切に予測し、船舶関連の開発戦略を全世界的かつ俯瞰的な視野から見渡す必要がある。

(3) 既存研究のうち工学的なアプローチを行ったものでは、データベース作成や物流シミュレータ開発などがあげられる。近年、特に急成長する東アジア圏域において海上コンテナ物流を対象として、海上技術安全研究所や東京大学らで研究が行われている。研究分担者である宮田らも、海上輸送シミュレータを構築し、そのシミュレータを用いた海上輸送分析に基づいた日中韓貿易の次世代高速船および東アジア港湾ネットワークの再構築を目的とする研究を実施している。具体的には、アジアの貨物流動ネットワークを数値的に再現し、将来の輸送需要を科学的に予測するシミュレーションシステムと、そこで求められた需要に適合した候補船型と要目を算出する船型開発システムの2つを開発中である。特に前者のシミュレーションシステムでは、計算機上の物流をコンテナ個々のレベルにまで離散化し、その非線形な選択挙動、貨物の流れ、各社の収益変化を時間発展的に解き、新規船の投入による周辺貨物フローの変化、燃料価格が収益に与える影響、出入港の曜日による船社間の競合等が計算機上で再現される事を確認した。

2. 研究の目的

(1) 鉄鉱石を対象とする国際海上資源物流ネットワークのシミュレーションシステムの構築：先行研究で扱ったコンテナ物流のマルチエージェントシステムを拡張し、港間の輸送の概念を取り入れる。資源の中でも、特に鉄鉱石を対象とする理由は次の二つである。第一に、輸出入国の港湾数が比較的少なく、さらに関係する企業や団体の規模が大きいために過去のデータが比較的整備されているために取り組みやすいことである。次に、GDP(Gross Domestic Product)と消費量が相関関係にあるために、将来の予想経済成長率から需要量が推測しやすいためである。

(2) 調達コストと安定調達リスクの定量的評価手法の確立：調達コストは、鉄鉱石の価格、用船費用（含む長期契約、燃料費）、滞

船費用などから構成されたと考え、シミュレーションを用いて、これらの費用を積算する。鉄鉱石の価格は年に一度の協議で決定されることが通例であり、短期的な価格変動が少ないことも、資源物流システムの題材として鉄鉱石を最初に取り上げる利点である。さらに安定調達リスクは、ハザードとなる要因を外的要因と内的要因に区別して検討する。外的要因としては、例えば、中国のさらなる経済成長による需要量の増大などの要因はシナリオとして作成し、このシナリオからシミュレーションの入力条件として与える。内的要因としては、例えば、制御可能な配分がある。鉄鉱石の輸入総量は一定としても、ある製鉄所の鉄鉱石のストックヤードは溢れるほどストックがあるのに、別の製鉄所ではストックが払底してしまい操業ができなくなる可能性がある。たとえ、長期的な視点からは鉄鉱石資源の需給はバランスしていても、短期的な観点からのフローの適正な配分がなされていないければ、このような事態は起こりうる。配船計画を適切に制御することでこの操業不可能となるリスクを回避できる。

(3) 船舶サイズなど輸送船隊を含めた最適物流システムの提案：必要船腹量の算出と船舶サイズなど輸送船隊に特に注目する。必要船腹量を算出して過不足ない船腹量の指針を与えることにより、適正建造量を把握し、過度の不必要な海運市況の乱高下を抑制する。さらに、ある期間に一定量を輸送する場合、船舶を大型化すれば、船腹数を減らせてコストは下がるが、ストック量の変動幅は大きくなりリスクが増大する。船舶を小型化すれば、船腹数が増えコストは上がるが、ストック量の変動幅は小さくなりリスクが減少する。船舶サイズを適正に組み合わせることで船隊を編成し、コストとリスクのバランスした最適物流システムの提案を試みる。

3. 研究の方法

(1) 鉄鋼石の物流需要および海上輸送に関する調査：鉄鉱石の主要輸出国のブラジル・オーストラリア・中国・カナダ等の搬出港湾、日本・欧州等の主要輸入港の年間取扱量等を鉄鋼業界や政府の統計資料から詳細調査した。この際、前記港湾の荷積み・荷下しの能力等も併せて調査した。さらに、鉄鉱石運搬に関する船腹量に関しては、Lloyds Fairplay社等から購入した船舶・運航データベースから現状調査を行った。なお、国内の主要製鉄会社の調達部門担当者へのヒアリングなどを行って、資料調査では不十分な点を補完した。

(2) 資源の海上輸送シミュレータの構築：先行研究で開発された、日中韓を中心とする

東アジア圏域のコンテナ海上輸送を対象としたマルチエージェント・シミュレータを拡張した資源輸送シミュレータを開発した。具体的には、輸送に関する船舶モデルをエージェントとみなしたモデルとして再定義し、さらに設備能力と鉄鉱石備蓄量を考慮できるように港湾モデルを個別に評価できるように再構築した。さらに、船舶モデルではサイズや消費燃料などの属性を設定してシミュレーションの結果として輸送コストを算出できるようにするとともに、日本の主要鉄鋼所の備蓄場での備蓄量の上下限の属性を設定して特に鉄鉱石払底のリスクを算出するための式を組み入れることにより、運搬コストと払底コストの双方を評価できる機能を実装した。

(3) 資源の海上輸送シミュレータを用いた輸送最適化：上記(2)で開発したシミュレータを用いて、特に日本の資源セキュリティすなわち鉄鉱石確保のための知見を得る。

4. 研究成果

(1) 鉄鉱石の海上輸送の現状調査：鉄鉱石貿易における生産者は、オーストラリアとブラジルの2国にある3社だけで世界生産量のうちの8割以上を占める寡占状態である。鉄鉱石輸出国は、オーストラリア、ブラジル、カナダ、インド、南アフリカの輸出上位5カ国に、大西洋地域のチリ、モーリタニア、ベネズエラ、スウェーデンを加えた9カ国の港から、周辺の鉱山との関係を調査のうえ27港を抽出した(図1)。抽出した港の輸出品のシェア合計は、世界の海上輸送量の9割を占めている。

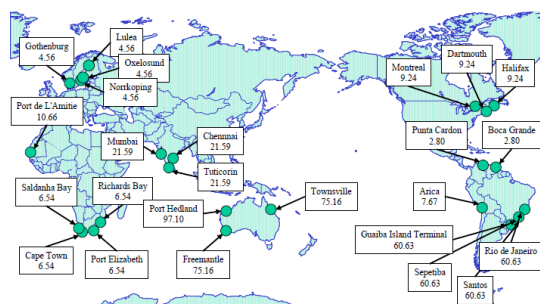


図1 鉄鉱石輸出27港(数字は鉄鉱石輸出品(百万トン))

一方、消費者側は、最大の製鉄会社でさえ世界粗鋼生産量の1割を占めるに過ぎず、多数の製鉄会社が存在している。本研究では、太平洋-大西洋輸送を含めて評価を行うため、粗鋼生産量上位3位までの製鉄会社として、大西洋地域のA社、日本国内のB社、C社の鉄鉱石調達を評価する。これら製鉄会社の輸入港および各輸入量は殆ど開示されていない

ため、輸入国としては、3社の製鉄所がある日本、フランス、オランダ、スペイン、トリニダードトバゴの5カ国の40港から、パナマックス船が入港可能で高炉の存在を示す情報がある18港を抽出した。日本側輸入港は製鉄各社の専用荷揚げ港であり、各港の輸入量は、公開資料およびヒアリングに基づき定めた。図2に、得られた輸入港の分布と輸入量を示す。シミュレータで扱うA社の輸入港は全て大西洋地域に、B、C社の輸入港は日本国内にある。各港の輸入量は、開示されていないものについては、高炉の粗鋼生産量等からの推定値とした。シミュレータ内の輸入量の合計は1.39億トンである。これは2006年の海上輸送量から、中国、韓国、台湾の3カ国の輸入分を除いた3.35億トンの42%に相当する。なお、鉄鉱石需要の急増する中国に関しては、輸入総量は判明したものの、詳細については不明な部分が多いために、直接取り扱わずに、その影響で日本への輸出量が減少するなどのシナリオを用いて対処することにした。

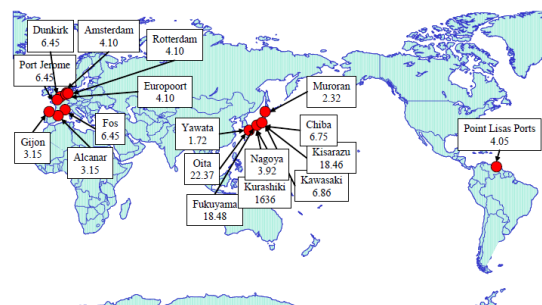


図2 鉄鉱石輸入18港(数字は鉄鉱石輸入量(百万トン))

(2) 鉄鉱石海上輸送シミュレータの開発：鉄鉱石の貿易を計算機上に再現するため、輸出港および輸入港、および鉄鉱石輸送船をモデル化した。シミュレーションは、複数の生産地からの供給による製鉄所貯蔵量の変化、滞船、事故などの時間に依存事象を取り扱える利点から、与えられたルールに従って個々の船舶が動く、マルチエージェント手法を採用した。各船舶は投入された航路において、輸出港での積み込み、輸入港での積み下ろしを行い、その輸送量に応じて各港の鉄鉱石ストックが増減する。各港には、現実のバース数と水深を定義し、同時に荷役ができる船舶数および入港できる船舶サイズを制限している。またバース数を超過して到着した輸送船は待ち行列に入り、滞船が生じる。なお、鉄鉱石輸送船は、航路が固定となる長期契約船と、一時的に輸送を行うスポット傭船の2種類を導入した。シミュレータの構成図を図3に示す。不定期船であるスポット傭船を組み入れた海上輸送シミュレータは、国内外を含めて殆ど開発されていない。汎用性に富む本

研究のシミュレータの様々な活用が期待される。なお、この開発されたシミュレータの成果の一部は、コンテナ船輸送のシミュレータにも流用しており、主な発表論文等のリストにはコンテナ輸送の発表・論文も掲載した。

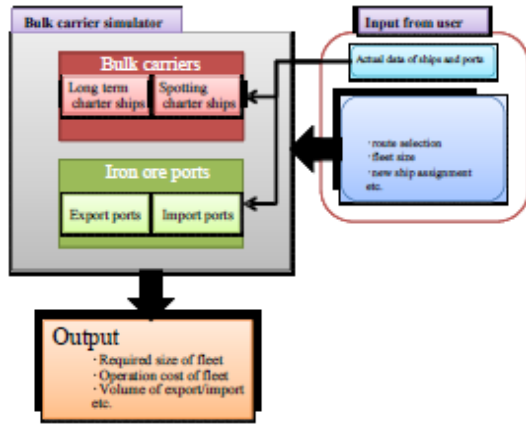


図3 鉄鉱石海上輸送シミュレータの構成

(3) 最適化のための評価関数：評価関数 F は、船団運航に要する総コスト C と、製鉄所における鉄鉱石在庫の払底による損失リスク R の和である(式1)。

$$F = C + R \quad (1)$$

C と R はシミュレーションの最後の1年間における1日当たり平均値を採用する。

輸送コスト C の内訳を式2に示す。

$$C = \sum_{i=1}^{N_{ship}} (S_{ci} + D_{ci} + D_{li}) \quad (2)$$

これは船団を構成する N_{ship} 隻の輸送船ごとのコストの総和であり、 S_{ci} は人件費や燃費などを含む1日当たり航海費用、 D_{ci} は滞船等によって期日より遅れてしまった時に支払うペナルティー、 D_{li} は、2港揚げを行う場合の追加経費である。 S_{ci} は船舶サイズに応じた燃料費用をもとに、航海費用に占める燃料費の割合が45%と仮定して概算する。滞船は輸送の機会損失であり、同輸送量を確保するには滞船日数分の契約期間延長を必要とするとの考え方から、 D_{ci} は、滞船日数分の運航コスト相当とした。2港揚げは、鉄鉱石を積んだ大型輸送船が2つの輸入港に分けて荷揚げを行い、小口の需要を満たす場合に用い、第1港で積荷の一部を陸揚する事によって、第2港での喫水制限が緩和される。この代償として、1日分の運航費用相当額を D_{li} に加算する。

在庫の払底リスク R は、輸送能力が供給に対して不足することによって生じる製鉄所の鉄鉱石在庫の払底を、製鉄所の機会損失としてモデル化した(式3)。

$$R = \left\{ \sum_{j=1}^{N_{port}} (S_{dj} \times C_{pj} \times S_{rj}) \right\} / day \quad (3)$$

ここで、 S_{dj} はシミュレーション期間中に鉄鉱石在庫が尽きていた日数、 S_{rj} は、輸入港湾が所属する製鉄会社の鉄鉱石1トンに対する売上高、 C_{pj} は該当港における1日あたりの鉄鉱石消費量、 day は、シミュレーション期間の日数である。製鉄所の鉄鉱石在庫の払底は、現実の高炉の運用を考えると現実的ではないが、暗黙に存在している在庫切れリスクの見積りとして、上記の粗鋼販売の機会損失を用いた。本研究における鉄鉱石在庫の払底は、在庫の不足により、高炉が停止しないぎりぎりまで生産速度を落とした状態の近似と考えられる。

(3) シミュレーションを用いた最適化検討 コンビネーション輸送比率

全輸送能力におけるコンビネーション輸送と単純シャトル輸送の比率を変化させ、輸送コストに与える影響を調べた。この評価では、長期契約船のみで輸送需要を満たし滞船が発生しない状態とし、コンビネーション輸送比率(コンビネーション輸送の船舶数が全体に占める割合)を0から100%まで10段階で変化させ、それぞれ在庫払底が起こらない最小規模の船団を求めるシリーズ計算を行った。払底が生じない規模であるため、リスク R は0となり、輸送コスト C と目的関数 F は一致する。この制限の下でコストを最小化する船隊を探索した。なお、コンビネーション輸送を太平洋-大西洋貿易に使用すると、空船航海の減少によりコスト面でシャトル輸送より有利となるが、寄港する4港全てで船舶サイズの制限を満たす必要があり、輸送効率の高い大型船は投入できない。このため、配船される船舶サイズの上限を、バース水深による入港制限が少ない17万トンとした。図4に、コンビネーション輸送比率が総輸送コストに与える影響を示す。30%程度がコスト最小の最適比率となった。コンビネーション輸送がない場合には、ブラジル産鉄鉱石の日本向け輸送は、航海の半分为空荷となるため高コストであり、コンビネーション輸送比率が高い場合には、航海距離の短いオーストラリア産鉄鉱石の日本向け輸送を遠方のブラジル産鉄鉱石に切り替えるためコスト増となる。この際の配船状況を図5に示す。

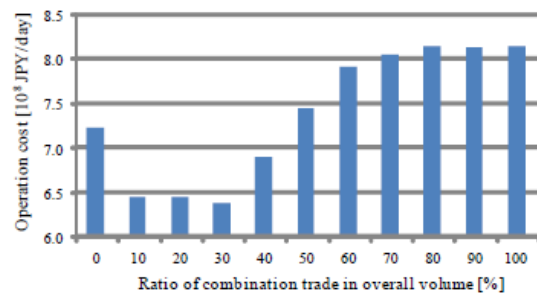


図4 コンビネーション輸送比率と総コスト

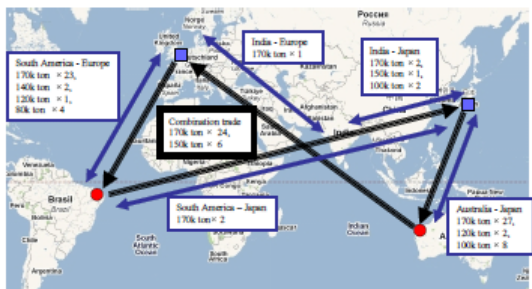


図5 コンビネーション輸送比率30%のときのコスト最小化配船

船隊構成

配船される輸送船サイズの上限 32 万トンに引き上げた場合と、先の①の比較を図 6 に示す。輸送船サイズの上限以外の設定は、先の①の検討例と同一である。コストが最小となるのは、上限 17 万トンの①のケースと同様にコンビネーション輸送の比率が 30%であった。図 7 は、サイズ上限を 32 万トンにした場合に、各製鉄会社 A, B, C が負担するコストをコンビネーション輸送の比率に対してプロットしたものである。いずれの 3 社でもコンビネーション輸送比率が 20%から 40%の近辺でコスト最小となるが、コスト最少となる比率は各製鉄会社で異なる結果となった。このような各製鉄所の個別最適化と、日本および世界全体からの視点の資源物流の最適化との関連の明確化は今後の課題である。

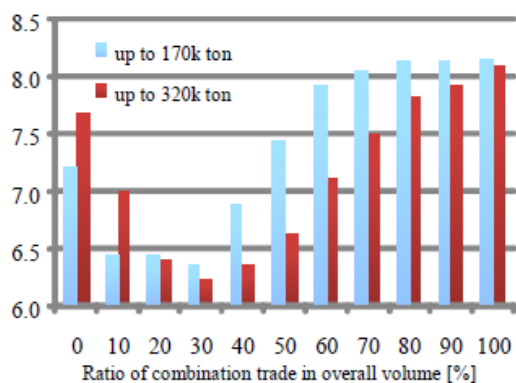


図6 船隊を変更した場合の輸送コスト

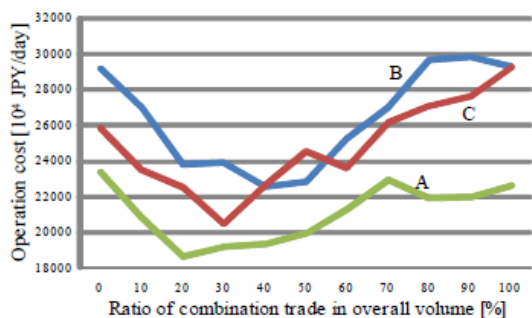


図7 3社の輸送コスト比較

滞船を生じるシナリオに基づくリスク評価：オーストラリアの最大港湾である Port-Headland の 5 岸壁のうち 4 岸壁が事故で使用できなくなったために、滞船が発生するシナリオを用いてリスク評価を行う。初期の船団として長期傭船のみから構成される船団を考慮し、コンビネーション輸送率 30%、船舶サイズの上限は 32 万トンとした。図 8 に事故後のスポット（臨時）傭船などの対応によるコスト増加の比較を示す。稼働岸壁数が減ったにもかかわらず、スポット傭船を行わずに長期契約船のみで運用した場合には、製鉄所の在庫が払底し、1 日当たり 1.7 億円の機会損失が発生した。これを避けるため、払底が予想される 15 日前に緊急的なスポット傭船を行うと、機会損失によるリスク費用はなくなるが、この緊急調達のコストにより運用費用が大幅に増加し、このケースでは、スポット傭船を行わない場合に比べてわずかながらコストが増加してしまう結果となった。一方、配船が契約から 30 日後となる通常のスポット傭船を併用する 3 番目のケースでは、早期の手当て可能と成るため、僅かに被害額を減らす事ができた。

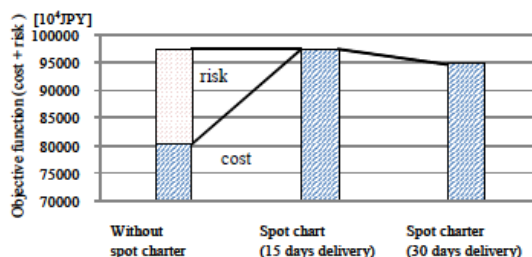


図8 輸送コストに資源払底リスクを加味した総合評価

本研究課題で開発したシミュレーション手法は、個々のばら積み船エージェントと港の稼働の挙動を時間進行で把握できるため、突発的な事象への反応を評価する事ができた。さらに、鉄鉱石以外のばら積み貨物も同様に扱う事ができ、対象とする貨物に必要な船隊構成、船腹量や船舶サイズごとの需要などの推定に活用できる。日本の資源エネルギー・セキュリティのためには、経済発展の著しい中国などの消費量を推定し、この先必要となる船腹量を、輸送コストと安定的な輸送共有の観点から算定して、余剰船腹や不足船腹を回避する検討が今後の課題である。この課題の一部について雑誌論文の①で検討を行った。

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 5 件)

秋元博路, 横田季和, 武市祥司, 田中謙司: 海運・中古船市況データを利用した海運会社の船団構成戦略モデル, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, 印刷中
秋元博路, 武市祥司, 野澤久穂: マルチエージェントシミュレーションを用いた鉄鉱石海上輸送船団の設計, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, 12 巻, 2011, 185-191

滝沢尚士, 武市祥司, 秋元博路: 日本発着の国際コンテナ輸送におけるネットワークとハブ港の選定と評価法, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, 11 巻, 2010, 173-179

野澤久穂, 秋元博路, 武市祥司, 宮田秀明: マルチエージェントシミュレーションを用いた鉄鉱石海上輸送船団の設計, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 査読有, 8 巻, 2009, 209-212

滝沢尚士, 秋元博路, 武市祥司, 宮田秀明: 日本発着の国際コンテナ輸送ネットワーク設計とハブ港の選定と評価, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 査読有, 8 巻, 2009, 223-224

6. 研究組織

(1)研究代表者

武市 祥司 (TAKECHI SHOJI)
金沢工業大学・情報学部・准教授
研究者番号: 90291319

(2)研究分担者

宮田 秀明 (MIYATA HIDEAKI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 70111474
秋元 博路 (AKIMOTO HIROMICHI)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 20283971
田中 謙司 (TANAKA KENJI)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 40431788

(3)連携研究者

なし