

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：17102
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2012 年度 ～ 2012 年度
 課題番号：24651179
 研究課題名（和文） 社会システムにおける二次エネルギー導入モデルの構築と影響評価
 研究課題名（英文） Modeling of introduction of secondary energy carrier in social system

 研究代表者
 杉村 丈一 (Joichi Sugimura)
 九州大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：20187660

研究成果の概要（和文）：本研究は、従来の原油、天然ガス等の一次エネルギーを直接利用する社会システムに対し、電気や水素等の二次エネルギー中間媒体を用いる社会システムを構築した場合の効果を複合的に評価する一般化モデルの構築を目的として実施した。新たな中間媒体導入に伴う便益と社会費用が比較可能なシミュレーションモデルを構築し、自動車用燃料に適用した。また、消費者選好に基づく各中間媒体を用いる自動車の普及シミュレーションを実施し、中間媒体による便益と社会費用の視点から評価する手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：The model is made that enables comparison of benefits and investments in introducing new secondary energy carrier, and is applied to the transportation sector, especially automobile sector. The simulation of the market penetration of new vehicles and a method to optimize locations of refueling stations are established.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会システム工学・安全システム

キーワード：社会システム、水素、二次エネルギー、モデル化、運輸部門

1. 研究開始当初の背景

低炭素社会、高効率エネルギー利用社会の実現に向け、エネルギー需給のさまざまな形態が検討されている。従来、一次エネルギーから仕事への変換は、原油、天然ガス等の化石資源を熱機関に導入し、それらを燃焼させ仕事を取り出すシステムが広く採用されてきた。熱機関は仕事が必要な場所に設置されるため分散化し、そこから二酸化炭素を回収

することは容易ではなく、二酸化炭素発生抑制における課題となっている。また、熱機関は熱力学上の制限からエネルギー変換効率に限界が存在し、エネルギー利用の高効率化の障害ともなっている。

これに対し、電気、水素などの炭素が含まれない二次エネルギー中間媒体（以下、中間媒体）を一次エネルギーから生産し、電動機や燃料電池、または熱機関に導入する場合、

最終エネルギー消費地における二酸化炭素発生抑制とエネルギー利用の効率化を同時に実現することが可能となる。

従来の中間媒体に関する研究には、限られた一種もしくは二種程度の中間媒体導入を想定、現状との比較を行った例がある¹⁾²⁾。しかし、それらの先行研究は各中間媒体の特徴（例えば、貯蔵可・不可）まで考慮し、複数を同時利用する複合的モデルではなかった。

- 1) NEDO 他, 平成 19 年度 “水素経済社会移行シナリオ等研究” 成果報告書, 2008.
- 2) Z.Lin, et al., Int. J. Hydrogen Energy, 33, 12, 2008, 3009-3014.

2. 研究の目的

従来の原油、天然ガス等の一次エネルギーを直接利用する社会システムに対し、電気や水素等の中間媒体を用いる社会システムを構築した場合の便益を複合的に評価可能な一般化モデルを提案し、検証を実施する。

3. 研究の方法

本研究では中間媒体を導入する市場を運輸部門とし、とりわけ乗用車市場を対象にモデル化および検証を実施した。モデルは図 1 および表 1 に示す流れに従い、次の 3 要素から構成される。

- (1) 中間媒体の製造に必要な一次エネルギー量の把握モデル構築
- (2) 中間媒体の導入、組み合わせに伴う便益、社会費用算出
- (3) 中間媒体の普及、普及に伴う便益および社会費用負担評価モデルの構築

(1) 一次エネルギー量把握モデル構築方法

電気、水素など中間媒体は他の一次エネルギーから製造する必要がある。しかし、太陽光や風力などの再生可能エネルギーは地域に偏在するため、各地域において乗用車エネルギーとして利用できる量を把握する必要がある。そこで、まず初めに、日本に賦存す

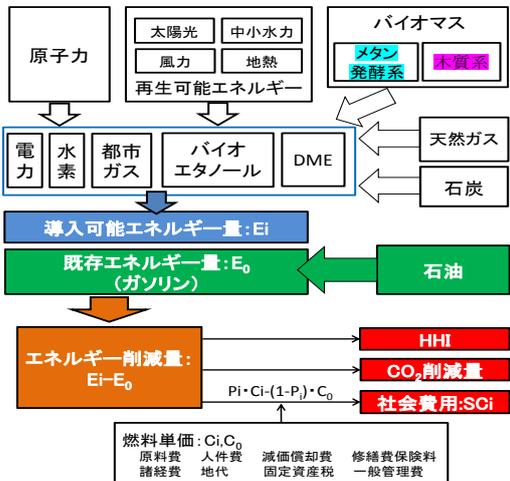


図 1. 分析フロー

表 1. 考慮したバイオマス一覧

木質系	林地残材 切捨間伐材 果樹剪定枝 タケ
農業 ざんさ	稲わら 籾殻 麦わら その他農業ざんさ
草木系	笹 ススキ
木質系	国産材製材廃材 外産材製材廃材 建築廃材 新・増築廃材 公園剪定枝
家畜 糞尿 汚泥	乳用牛糞尿 肉用牛糞尿 豚糞尿 採卵鶏糞尿 ブロイラー糞尿 下水汚泥 し尿・浄化槽余剰汚泥 集落排水汚泥
食品系	食品加工廃棄物 家庭系厨芥類 事業系厨芥類

る一次エネルギー量から乗用車に供給できる最大のエネルギー量推定を実施する。エネルギー需要については、各地域に登録されている乗用車台数に、日本の 1 台あたりの平均年間消費エネルギーを掛けて求める。

エネルギー供給については、再生可能エネルギーは日本国内起源のみを対象とし、環境省データ³⁾を元に市町村単位でのエネルギー量を求め、導入可能台数を算出する。これは、再生可能エネルギーの利用には、新たな送電線整備や資源の運搬が必要と考えたからである。太陽光に関しては、環境省データの整備状況から、住宅向けを含めない都道府県レベルでの分析で行う。なお、再生可能エネルギーの導入可能量は技術進展を考慮した場合に経済性を有する導入可能量とする。

一方、化石資源については、日本はその大半を輸入に依存していることから、国内での導入可能性は流通システムに依存すると考えられる。そこで、ガソリン、DME (ジメチルエーテル)、エタノールなどの液体燃料はローリ輸送により全国に配送可能であると、都市ガスについてはパイプラインが整備されている範囲を対象地域とする。

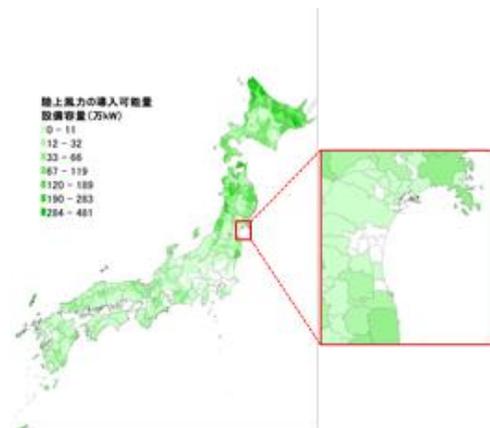


図 2. 一次エネルギー量評価方法

(2)中間媒体導入に伴う便益，社会費用算出方法

中間媒体の導入に伴う便益は，エネルギー消費量の削減量，二酸化炭素排出量の削減量，エネルギー分散化度（HHI：ハーフィンダール・ハーシュマン・インデックス）と定義する．また，社会費用は社会全体がそのエネルギーを利用するために支払う費用の総額とし，式(1)で与える．

$$SC_i = P_i \cdot C_i + (1 - P_i) \cdot C_0 \quad \text{式(1)}$$

SC_i ：中間媒体 i を P_i 導入した場合の社会費用（円/年）

P_i ：中間媒体 i の導入率（%）

C_i ：中間媒体 i を 100%導入した場合の社会費用（円/年）

C_0 ：現行の社会費用（円/年）

ガソリンの場合，2010年実績で乗用車には1.75EJが消費された．ガソリン単価を150円/Lとすると， C_0 は約8兆円/年と得られる．電力価格は政府コスト検証委員会評価結果²⁾を参考に，送電コストおよび充電コストについても考慮する．風力，太陽光等の天候に影響を受ける電源および，原子力や地熱など一定出力での運転が望ましい発電設備については，それら発電設備1MWあたり0.67MWh（4.8MWh）の蓄電設備を設置するとして社会費用を試算する．蓄電設備はNaS電池とし，1kWあたりコストを付帯設備まで含め20万円とする³⁾．

自動車用水素燃料については，JHFC報告書³⁾の水素費用検討を参考とし，300Nm³/hの水素が供給可能な水素ステーションについて，減価償却費，修繕費，人件費，燃料費等を考慮する．その他中間媒体として，エタノールは木質バイオマスからの製造を考慮し150円/L⁵⁾，DMEは石炭・天然ガス起源について0.6円/MJ⁶⁾とする．ただし，新たに導入する二次エネルギーに対する課税は現行では想定できないことから，考慮しない．複数の中間媒体を同時導入する場合は式(1)を式(2)に変形し，社会費用を算出するものとする．

$$SC = \sum P_i \cdot C_i + (1 - \sum P_i) \cdot C_0 \quad \text{式(2)}$$

(3)中間媒体の普及，普及に伴う便益および社会費用負担評価モデルの構築

(2)では各中間媒体を用いた自動車が普及した場合を設定し，その便益や社会費用を議論した．しかし，実際には自動車の普及に伴い，エネルギー消費量，二酸化炭素排出量は変化する．つまり経時変化の考慮が必要である．そこで，自動車用中間媒体導入を想定した普及シミュレーションモデルを構築する．

普及モデルは，式(3)で表されると考える．

$$\chi_{n_NEW} = \chi_{n_total} \cdot \kappa_{n_NEW} \cdot P_{n_purchase} \quad \text{式(3)}$$

χ_{n_NEW} ：n年度における新たな中間媒体を用い

る自動車の販売台数

χ_{n_total} ：n年度における乗用車販売台数

κ_{n_NEW} ：n年度末における新たな中間媒体供給施設整備率

$P_{n_purchase}$ ：消費者購入確率

消費者購入確率は表2のアンケート調査表に基づき，各中間媒体を用いる自動車の選好を評価して与える．これまでのハイブリッド車普及実績および天然ガス乗用車の普及実績から各種係数を導出，シミュレーション精度を確認する．なお，天然ガスステーションによる整備率は，ステーションから8分以上12分以内の人口割合と定義，日本ガス協会より提供頂いた天然ガスステーション設置実績データをArcGIS 10のネットワークアナリストに導入し整備率を求める．

中間媒体を用いる自動車の普及を促す場合，中間媒体供給設備の整備が必要であるが，普及が進むまではインフラ維持費用が不可欠であり，それは現行のガソリンスタンド維持費用に加えて必要となる．そこで，普及に相当するインフラ利用率を定義，インフラ利用率が低い場合は維持費用を中間媒体価格に転嫁して社会費用を算出する．

構築した普及シミュレーションモデルに対し，将来の年間自動車販売台数，中間媒体供給インフラ整備率，中間媒体を用いる自動車に対する消費者選好を設定することで将来の普及率が計算される．得られた普及率に対し，インフラ利用率と社会費用との関係式を適用することで，普及に伴う社会費用の変化が得られる．

表2. 消費者調査の条件設定表

Control factor (L18)	Level					
	1	2	3	4	5	6
Vehicle Type	ICEV	HV	FCV	PHEV	BEV	CNGV
Minimum distance from home to refueling station	5 min.	10 min.	15 min.	-	-	-
Fuel consumption (Gasoline equivalent)	15 km/L	30 km/L	60 km/L	-	-	-
Time to fill up	5 min.	30 min.	2 hours	-	-	-
New vehicle price	¥2.5 million	¥3.5 million	¥4.5 million	-	-	-
Maintenance cost per year	¥100 × 10 ³	¥150 × 10 ³	¥200 × 10 ³	-	-	-
Cruising distance	200 km	400 km	800 km	-	-	-

- 1) 環境省，平成22年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書，2011.
- 2) 内閣官房国家戦略室，発電コスト試算結果，2012.
- 3) 総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会（第31回）配付資料2-1，2009.
- 4) (財)石油産業活性化センター他，燃料電池システム等実証研究（第2期JHFCプロジェクト）報告書，2011.
- 5) 遠藤真弘，調査と情報，No. 53，2006.
- 6) 経済産業省，ジメチルエーテル戦略研究会報告書，2000.

4. 研究成果

(1) 一次エネルギー量評価における研究成果

全市町村もしくは全都道府県において、中間媒体を用いて走行可能な自動車走行台数を求めた。試算例として、太陽光発電による電気自動車走行可能台数、風力発電による燃料電池自動車走行可能台数を図3に、全国累計を表2、表3に示す。

試算の結果、今回設定した中間媒体のうち、再生可能エネルギー起源の中間媒体は、それら一つだけでは全乗用車のエネルギー需要を満たすことが難しいことが示された。一方、原子力や化石資源起源の燃料では、需要を十分に賄えると得た。

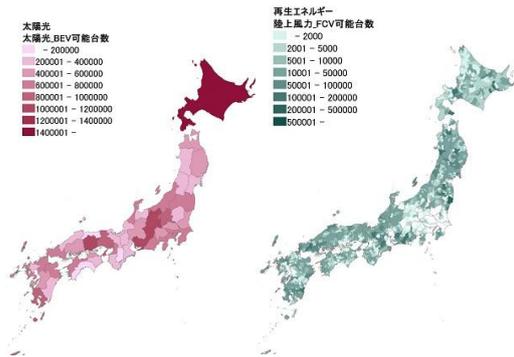


図3. 中間媒体自動車走行可能台数
(左：太陽光 BEV, 右：風力 FCV)

表2. 中間媒体による走行可能台数・試算例1

中間媒体 一次 エネルギー	電気自動車	水素燃料電池自動車		
	電力	木質+ 水電解	木質 ガス化	メタン 改質
現行電力MIX	100%	70MPa水素		
太陽光	38%	100%		
原子力	100%	100%		
中小水力	5%	4%		
風力	29%	25%		
地熱	3%	2%		
天然ガス	100%	100%		
バイオマス	2%	1%	3%	9%
石炭	100%	100%		
原油	100%	100%		

表3. 中間媒体による走行可能台数・試算例2

中間媒体 一次 エネルギー	内燃機関自動車		
	20MPa 都市ガ ス	バイオ エタノ ール	DME
天然ガス	61%	-	100%
石炭	-	-	100%
バイオマス	-	3%	6%

ところで、これまで行われた再生可能エネルギーポテンシャル分析結果¹⁾²⁾は、その供給可能量が議論され、需要に対応した供給量については議論されなかった。そのため、例えばすべての乗用車を電気自動車に置き替えた場合、風力発電による電力のみで全エネルギー供給が可能であるような結論が得られる。しかし、本モデルは再生可能エネルギーの地域性、地域のエネルギー需要を考慮した。すなわち、市町村もしくは都道府県単位でエネルギー需要を与え、それに対してエネルギー供給が十分か、もしくは不足するかを評価できる手法を新たに取り入れた。

これにより、従来実施できなかった再生可能エネルギーの地域偏在を考慮した中間媒体導入可能量の推定が可能となった。今後、地域規模を変化させることによって、地域間のエネルギー融通などを考慮した一次エネルギー量評価が可能となることが示された。

(2) 中間媒体導入に伴う便益、社会費用算出における研究成果

各中間媒体を導入した場合のエネルギー消費量削減率、二酸化炭素発生量削減率、エネルギー分散化度、社会費用を算出した。日本に電気自動車(EV)、燃料電池自動車(FCV)、天然ガス自動車、エタノール利用自動車を導入、それらのエネルギーを図1、表1で示した一次エネルギーから製造した場合の便益、社会費用を求めた。

次に、それら中間媒体を組み合わせ導入した場合の計算を実施した。風力発電と原子力発電を組み合わせ、乗用車市場にEV、FCVを100%導入した場合の試算例を図4に示す。また、乗用車のうち50%はガソリン車とし、残りを風力発電と原子力発電を組み合わせEV、FCVにエネルギーを供給する場合の試算結果を図5に示す。これら図4、図5の結果を比較すると、一次エネルギー(ガソリン、風力発電、原子力発電)の導入比率と、EVおよびFCVの導入比率の違いが社会費用に与える影響を定量的に比較することができる。

背景においても述べたが、これまでの研究では一種類ないしは二種類程度の中間媒体の導入のみ想定されていた。しかし、本モデルの構築により、中間媒体を製造する一次エネルギー、供給する中間媒体、利用する車種を自由に組み合わせ、その比率を変化させた場合の、エネルギー消費量、二酸化炭素排出量、エネルギー分散化度、社会費用の算出が可能となった。そして、それら便益や社会費用を比較することによって、各中間媒体について議論することができる。

ただし、今回のモデル化および検証では、運輸部門のうち乗用車に必要なエネルギーのみを考慮した。しかし、本モデルは利用可能な中間媒体数が自動車以上に多いと想定

される冷暖房システムなどに対しても応用可能である。つまり、より幅広いエネルギーシステムへの適用が可能である。従って、本研究により、複数の中間媒体の同時利用を考慮することができる複合的モデルが構築された。

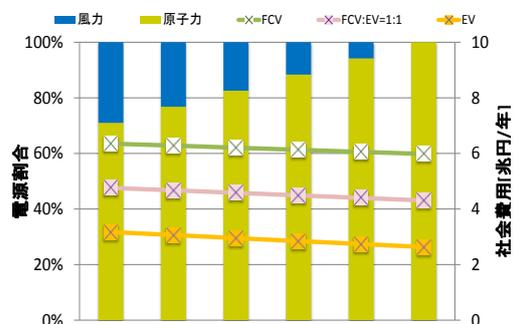


図 4. 風力+原子力導入時の社会費用・試算例

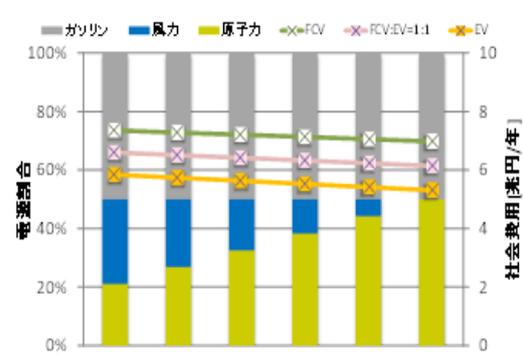


図 5. 風力+原子力+ガソリン導入時の社会費用・試算例

(3) 中間媒体の普及、普及に伴う便益および社会費用負担評価モデル構築の成果

中間媒体を用いる自動車の普及に関し、本研究で構築した普及シミュレーションモデルと過去のハイブリッドカー、天然ガス乗用車の普及実績との比較を実施した。結果を図 6 および図 7 に示す。ハイブリッドカーについては 1996 年以降、天然ガス乗用車については 1997 年以降の普及実績と比較したところ、シミュレーション結果とおおよそ良い一致を得ることが出来た。

次に、中間媒体導入モデルに関し、設備利用率と社会費用との関係を導出した。一例として、原子力発電より水素を製造する場合の FCV 向け燃料供給設備の利用率に対する社会費用の算出結果を図 8 に示す。これは、水素供給インフラは整備されているにも関わらず FCV が普及しない場合、水素供給インフラを維持するために必要な社会費用とみなして考慮したものである。

JHFC プロジェクトにおいて設定された水素ステーション規模の場合、インフラ利用率、すなわち普及率がおよそ 60%に達した時点で、

現行ガソリン車による社会費用と同等になるとわかった。

また、FCV の普及に伴い乗用車エネルギーのガソリン独占が崩れ HHI は減少する。しかし、普及の進展と共に、再びエネルギーの寡占化が進む。つまり、エネルギー源の分散化には、導入する中間媒体の普及が一定程度進んだ時点で、中間媒体を製造するエネルギー源の分散化が必要であるとの示唆が得られた。

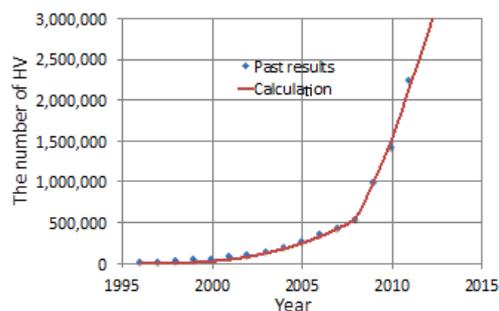


図 6. 過去のハイブリッドカー普及実績とシミュレーション結果の比較

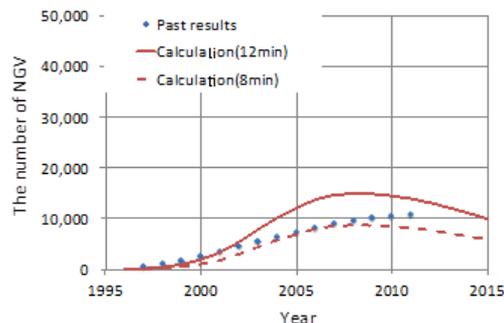


図 7. 過去の天然ガス乗用車普及実績とシミュレーション結果の比較

図 9 は、水素供給インフラを日本の全乗用車に供給できるよう整備し、水素を原子力発電から製造する場合の普及に伴う社会費用の変化である。普及シミュレーション条件は、消費者による FCV の選択確率をアンケート結果³⁾から 14%と設定、マスメディアによる情報拡散はハイブリッドカーと同等速度とした。この場合、2040 年までの FCV 普及率は 10%以下であり、それまでの FCV 導入に伴う社会費用は現行ガソリン車以上となることが示された。従って、水素など中間媒体導入においてインフラ利用率を向上させながら普及を促すことが重要であることが社会費用分析からもわかる。

これまで、普及に伴う中間媒体導入の便益、社会費用の変化については議論されておらず、本モデルは初めてそれを可能にした先駆的な位置づけにあると言える。

以上より、本研究では、①エネルギー需要側と供給側に適切な地理範囲（市町村規模など）の下での一次エネルギー評価手法、②複数の二次エネルギー中間媒体の導入を同時に扱い、その便益および社会費用を比較可能とするモデル、③中間媒体の普及まで考慮して中間媒体の便益および社会費用の算出が可能な分析モデルを構築した。また、本モデルの一部ないし全部は乗用車以外の運輸部門、運輸部門以外のエネルギー利用分野にも適用が可能であり、一次エネルギー源とその需給組み合わせを議論する際に幅広い応用が期待できるエネルギー分析モデルを提案することができた。

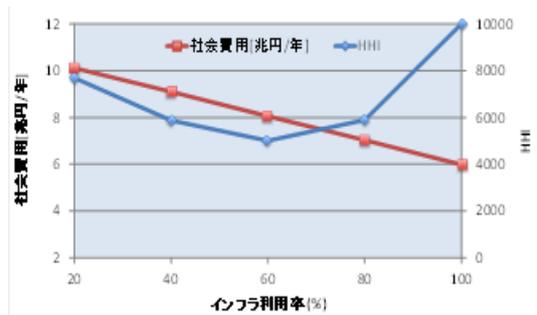


図 8. 原子力起源水素を利用する水素ステーション設備の利用率と社会費用との関係（計算結果例）

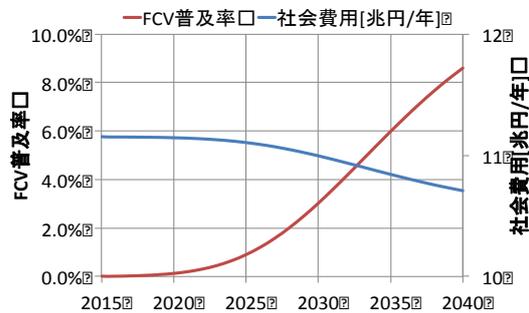


図 9. FCV 普及に伴う社会費用の変化（原子力発電起源水素の場合）

- 1) 環境省，平成 22 年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書，2011.
- 2) 分山達也，GIS を用いた再生可能エネルギーポテンシャル評価に関する研究，九州大学博士論文，2012.
- 3) 木村誠一郎，次世代自動車の導入に伴う社会的影響の評価手法に関する研究，九州大学博士論文，2013.

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 0 件）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉村 丈一 (Joichi Sugimura)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：20187660