

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22730293

研究課題名(和文) 太陽光発電のイノベーションと企業間競争における複数製品分野間の影響関係

研究課題名(英文) Research about the influence of different product areas upon innovation and inter-firm competition in solar energy industry

研究代表者

松本 陽一 (Matsumoto, Yoichi)

神戸大学・経済経営研究所・准教授

研究者番号：00510249

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円、(間接経費) 510,000円

研究成果の概要(和文)：DVD機器や液晶関連製品などのエレクトロニクス製品において、日本企業がイノベーションを主導しながら、そこから大きな利益を獲得できない例が数多く報告され、関連する貴重な研究が蓄積されてきた。そして太陽電池もその一例である疑いが強い。既存研究は、特定分野に焦点を絞って詳細な調査を行ってきた。ところが太陽電池は半導体など他産業との技術的関連が強く、複数の製品間で類似技術を用いること、他分野から応用した技術を使うこと等を考慮に入れる必要がある。ここでは複数製品分野間の横断的な視点をもって太陽電池産業に関する探索的な研究を実施し、イノベーションと企業間競争に関する新たな分析枠組みを構築した。

研究成果の概要(英文)：In electronics industries such as DVD players, LCD displays, and LCD TVs, lots of Japanese leading manufacturing companies failed to generate a big return from the innovation they had initiated. Valuable researches about this problem have been accumulated. Solar energy cells industry is regarded, with strong suspicion, as one such example. Although most of the existing researches have concentrate on a particular product or technology area and analyzed it at great length, solar cells industry has so strong technological relevance with other products such as semiconductors; we need to take into account that different products can share the same technology or one product area uses the technology applied from the other. From a cross-cutting point of view, we conducted exploratory research about solar cells industry, and established a framework for analyzing innovation and competition among firms.

研究分野：経営学

科研費の分科・細目：経営学

キーワード：イノベーション 太陽電池

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化など環境問題への関心が高まり、太陽電池を用いた太陽光発電に注目が集まっている。歴史的な経緯をいえば、この分野の技術開発に先行的に取り組んできたのは日本である。太陽電池は過去 40 年以上にわたる技術開発期間を経てきたが、先行的に取り組んできたおかげで、日本の産業技術はこの分野で一貫して世界トップ水準を維持してきた。しかし、ようやく産業が離陸し、本格的な成長が始まった段階で、主導的日本企業の当該市場での競争ポジションが低下している懸念がある。太陽電池の世界市場でずっとシェア上位を占めていた日本企業がこのところシェアを減少させ、代わってドイツや中国やアメリカの企業がシェアを増大させている。

1973 年のオイルショック以降、日本においては太陽電池および太陽光発電関連技術の開発が官民挙げて行われてきた。その間、多くの公的資金が投入され、それらは研究開発のめざましい成果に結びついてきた。しかしながら、そうして生み出された成果が日本企業の競争力、延いては日本国の産業競争力に十分貢献できないとすれば由々しき事態である。

日本企業が実用化で先行しながら、他国の企業、とりわけ東アジアの企業に急速にキャッチアップされるといった現象が DVD プレイヤーや液晶モニター、液晶テレビといったエレクトロニクス機器の分野を中心に多く観察され、その原因や日本企業がとるべき戦略について研究が蓄積されてきた。

これらの研究は学術面でも産業への示唆の面でも極めて有用な知見をもたらしてきた。ところが太陽光発電、とりわけ太陽電池の分野においては、一方で従来の研究が対象としてきたことと類似の現象を観察することができると同時に、他方で既存研究では必ずしも十分に考慮されていなかった点を顕著に見ることもできる。前者は、日本企業が技術開発と実用化で先行してきたことである。後者は、異なる産業で用いられてきた技術や、異なる産業で活動してきた企業が、太陽光発電をめぐる企業間競争において重要な役割を果たしていることである。太陽電池の主流となる技術は結晶シリコンを用いたものであるが、これは半導体技術が深く関与している。また、近年ではシリコンの使用量が少ない薄膜シリコン太陽電池も販売されているが、この分野では半導体製造装置大手のアプライド・マテリアルズ社が装置を販売しはじめた。

2. 研究の目的

日本企業が実用化で先行しながら、そのイノベーションから十分な収益を獲得できないとすれば、それは重大な問題である。先行研究はこの問題に対して貴重な示唆を与えてきたが、それぞれの研究は特定の製品分野

を詳細に分析したものであり、産業間の関連性について分析したものではない。ところが太陽光発電の分野は他の産業との技術的関連が強く、また他業種の企業が次々に参入している。

本研究は、太陽光発電におけるイノベーションに他の製品と共通の技術や、それを用いた企業がいかなる影響を与え、また、この分野の企業間競争にどのように関わってきたのかを明らかにし、そのような重層的競争構造の分析枠組みを提起する。

3. 研究の方法

研究は、インタビュー調査、新聞や雑誌等の公刊されている資料、学会発表と特許情報の収集、という 3 つの情報源を活用して行った。については、独自のデータベースを作成し、これを分析した。

上記の方法で、産業レベル、企業レベル、特定の技術レベル、複数技術間の比較といった様々な分析レベルで、太陽光発電に関するイノベーションと企業間競争の分析を行った。以下では、大別 4 つの調査から得られた知見をまとめた上で、複数の製品分野間の影響関係を念頭に置いた競争構造の分析枠組みを提起し、今後の展望をのべる。

4. 研究成果

(1) 産業レベルの分析として、太陽光発電の市場が急拡大した 2000 年代以降を主な対象に、この産業で起きたことを調査した。その結果として 4 つの発見事実をえることができた。

第 1 に、一般に言われているように、太陽光発電の拡大には国の普及施策が極めて強く影響している。日本が 1990 年代後半から導入量で世界をリードしたのも、ドイツをはじめとするヨーロッパで 2000 年代以降に太陽光発電の導入が急速に進んだのも、導入を支援する政策によるところが非常に大きい。言い換えれば、太陽光発電は依然として普及を政策の支援に頼っているということができ、産業として自立しているとは必ずしもいえない。

第 2 に、企業間競争および技術間競争に対して、原料であるシリコン価格が及ぼす影響が非常に大きかった。2000 年代後半以降に、日本の大手企業のシェアが低下した。この背景には原料であるシリコンの調達に急激な需要増によって困難になったことがあると言われている。それに対して中国の新興企業はシリコンの長期調達契約を結び、原料を確保して躍進した。ところが、太陽電池向けのシリコンの供給が増加すると、シリコン価格が低下し、長期調達契約は中国企業にとって重荷になった。最大手であったサンテック・パワーの事実上の経営破綻には、シリコン調達契約の問題があったと言われている。また、シリコンの調達が難しくなる中で、シリコンの使用量が相対的に少なく済む薄膜シリ

コン太陽電池技術への期待が高まり、2008年にはシャープが堺に薄膜シリコン太陽電池の巨大工場を建設することを発表した。それだけでなく、半導体製造装置大手のアプライド・マテリアルズ（アメリカ）やアルバック（日本）などが、スイッチを入れれば製品が製造可能な状態の生産設備を販売する「ターンキー・ソリューション」事業に乗り出した。しかしながら、シリコン価格の低下にともなっていて、薄膜シリコン太陽電池はコスト面での優位性を失っている。

第3に、これまで日本企業が技術開発で先行してきた分野では、その最終製品において日本企業の存在感が低下した後も、部材や製造装置メーカーの存在感は依然として大きかった。ところが太陽電池においては、そのような構図は成り立たない。部材ではたとえばポリシリコンのWacker（ドイツ）、Hemlock（アメリカ）、GCL-Poly（中国）、OCI（韓国）が大きなシェアをもち、電極用の銀ペーストではDuPont（アメリカ）が強い競争力をもっている。また、製造装置ではたとえばプラズマCVD装置のcentrotherm（ドイツ）やRoth & Rau（ドイツ）、スクリーン印刷装置のBaccini（イタリア）などが強い競争力をもち（Roth & Rauは2011年にスイスのMeyer Burgerに買収された）、日本企業の中ではラミネート装置のNPCや日清紡メカトロニクス、プラズマCVD装置の島津製作所などの有力企業があるが、世界的に大きな市場シェアを獲得しているプレイヤーの数は限定的である。

第4に、太陽電池自体は半導体素子の一種であるが、その多くは最先端の半導体回路素子に必要な技術の転用によって生産することができる。たとえば太陽電池メーカーの競争に大きな影響を与えてきたシリコンについては、半導体が11ナイン（純度99.999999999%以上）と呼ばれる純度を必要とするのに対して太陽電池は7ナイン（純度99.99999%以上）程度で良いと言われている。したがって半導体向けのシリコン原料やシリコンインゴットに比べて太陽電池への技術的な参入障壁は低い。上述の通りポリシリコンでは半導体向け製品を作っているWackerやHemlockが強い存在感を示している。さらに、GCL-PolyやOCIに代表される新興企業が参入したことで、供給不足から一転して急速に供給過剰に至った。

（2）企業レベルの分析として、株式会社カネカによる太陽電池事業創造の事例分析を行った。日本の主要な太陽電池メーカーはエレクトロニクス機器メーカーである。それに対してカネカは化学メーカーであり、その点は他社とは異なる特徴である。エレクトロニクス機器メーカーが太陽電池の技術開発と事業化を進めるのは、既存の事業ドメインから見て自然な流れであるように思われるのに対して、化学メーカーであるカネカが太陽電池の技術開発を行い、その事業化に必要な

資源動員を正当化するのには、他の主要メーカーより多くの困難がともなったはずである。技術開発と、その事業化に必要な資源を動員するためには、当該技術が有望であることを、経営陣を含む他者が納得する必要があった。その点で社外から高い評価（学会発表、新聞報道）をえることが重要な役割を果たした。また、事業化に必要な投資を得られるためには、将来の売上が確実に見込めることが重要であり、社外の顧客（この場合には超薄型電卓のための超薄型太陽電池を探していた電卓メーカー）との共同開発の成否が決定的な意味を持っていた。他にも超薄型電卓用の太陽電池の代替案を示した企業があった中でカネカが選ばれた理由のひとつに、小さな規模でも生産できるという点があった。この実現にあたって、それまでにカネカが蓄積してきたポリイミドの技術が重要な役割を果たした。

民生用エレクトロニクス機器向けに太陽電池を事業化したカネカであったが、最終的な目標は電力用の太陽電池事業であった。ところがそのためには解決すべき技術的課題がまだ残されており、すぐには事業化できなかった。したがって長期的な研究開発に必要な資源を獲得することが必要であったが、この点では、民生用で事業化したという実績が高く評価され、国の研究開発プロジェクトに参画することができ、基礎研究に必要な資源の獲得に成功した。

カネカが参入した当時、民生用太陽電池の市場には既存の大手エレクトロニクスメーカーが先行して参入しており、これから事業を成功させるのは難しいように見られた。したがって事業化に必要な資源をえるのは簡単ではなかった。プロジェクトの推進者たちは新聞報道を活用して自らの発明を自社の経営陣にアピールし、また学会発表を通じて潜在的な顧客に訴えることで用途開拓を進めた。技術的な優位性と、顧客が実際に開拓できたことが決め手となり、量産に必要な社内の資源をえることができた。そしていったん事業化できたという実績が長期的な資源動員を可能にした。イノベーションに必要な短期の資源獲得の正当化を成し遂げたことが、長期の資源動員の正当化に結びついた。

この研究によって2012年度組織学会高宮賞（論文の部）を受賞した。

（3）特定の技術レベルの分析として、結晶シリコン太陽電池の主な製造装置のひとつであるプラズマCVD装置について調査を行った。結晶シリコン太陽電池セルの表面には、太陽光を効率よくセル内に取り込むために窒化膜が形成される。プラズマCVD装置はそのために用いられる。この窒化膜形成プロセスは1980年代後半に島津製作所の協力をえて京セラが実現した。ただし、CVD装置自体は半導体の分野ですですに使われていた。1978年ごろにアメリカのRCAにおいて、アモルフ

ァス・シリコンの作成に用いられたのが太陽電池とCVD装置とが関わりあうようになったきっかけである。その後、実験用に日本でも用いられるようになったが、いずれもアモルファス・シリコン太陽電池（薄膜シリコン太陽電池の一種）のための装置である。1979年には三洋電機が、1983年にはカネカがインライン式の装置を導入しアモルファス・シリコン太陽電池の量産に利用された。この技術は1980年代半ばになると液晶ディスプレイの製造への応用が目指された。それと同じ頃に、結晶シリコン太陽電池の成膜に使われるようになった。それが前述の島津製作所による装置である。島津製作所では1981年から大阪大学と共同でアモルファス・シリコン太陽電池用のプラズマCVD装置の開発をスタートした。結果的にはアモルファス・シリコン太陽電池向けのプラズマCVD装置は大きな事業にはならなかったものの、その技術的な蓄積をいかして結晶シリコン太陽電池用のプラズマCVD装置開発で大きな成果をあげた。1987年に京セラに対してプラズマCVDを納めた後、1992年には大型化した装置を再び京セラに納入した。筆者のインタビューによれば、製造装置は一般に2台同じものが売れると元が取れる。1992年に開発したSLPC-71Hは、その後多くのメーカーに販売され、2005年までに50台を超える販売台数となった。

島津製作所による結晶シリコン太陽電池の窒化膜形成用のプラズマCVD装置は、この技術が電力用に実用化される上で重要な発明である。この装置は結晶シリコン太陽電池のためにゼロから生み出されたというよりもむしろ、様々な用途に向けた模索を通じた技術の蓄積が島津製作所においては結晶シリコン太陽電池向け装置として結実したといえることができる。

(4) 複数技術間の比較として、太陽電池の世界的な学会における発表動向のデータベースを作成し、現在の市場で流通している3つの技術分野において、主な国のプレゼンスがどのようなものかを明らかにした。分析対象としたのは電気・電子関連の世界最大の学会であるIEEEの分科会のひとつであるPhotovoltaic Specialists Conference（太陽光発電専門家会議）である。近年の傾向を見るために2010年にハワイで開催された学会の発表予稿集から独自のデータベースを作成した。

まず発表件数全体を見ると、最も多いのはアメリカで378件、次が日本で94件、第3位がドイツで65件、その後は台湾が44件、韓国38件、オーストラリア24件と続く（件数はいずれも筆頭著者の所属組織の住所に基づく）。IEEEはアメリカを拠点とする学会であり、開催地もハワイであるということを考えれば、アメリカの研究者による発表が多いのは当然である。それに続く第2位が日本で、第3位のドイツの1.5倍近い発表数であ

る。日本の太陽電池の研究開発におけるプレゼンスは非常に大きいといえる。

この結果をさらにいくつかの技術ごとに分けてみよう。実用化されている太陽電池としては結晶シリコン太陽電池、薄膜シリコン太陽電池、化合物半導体太陽電池の3つがある。そこで、それに関連するセッションでの発表に限定してアメリカ、日本、ドイツの口頭発表の内訳をみた。結晶シリコン、薄膜シリコン（微結晶を含む）、化合物半導体の順に、その件数（括弧内は同セッションの発表件数に占める割合）を見ると、次のようになる。まず、アメリカは11件（27.5%）、8件（34.8%）、29件（69%）、日本は2件（5%）、6件（26.1%）、4件（9.5%）、ドイツは19件（47.5%）、1件（4.3%）、2件（4.8%）である。興味深いことに、アメリカは化合物半導体、日本は薄膜シリコン、ドイツは結晶シリコンで、それぞれプレゼンスが高い。ただし、ドイツは結晶シリコンにおいてアメリカよりも大きな存在感をもつのに対して、日本は薄膜シリコンの発表件数シェアでアメリカの後塵を拝している。

つぎに、この予稿集の論文が引用している文献についても、同じようにアメリカ、日本、ドイツのプレゼンスを技術分野ごとに集計した。発表件数が、その時の技術毎の注力度を示すとすれば、引用文献に占めるシェアはその時の研究に与える過去の研究の影響度の強さを示しているといえる。これについて口頭発表の論文に限定し、また筆頭著者が自ら関与した論文の引用（自己引用）を除いて集計すると、結晶シリコン、薄膜シリコン（微結晶を含む）、化合物半導体の順に件数（括弧内はシェア）は次のようになる。まずアメリカは106件（24.1%）、56件（23.0%）、136件（44.3%）、日本は32件（7.3%）、66件（27.2%）、29件（9.4%）、ドイツは141件（32.1%）、32件（13.2%）、51件（16.6%）となる。件数と同様に影響度の点でもアメリカは化合物半導体、日本は薄膜シリコン、ドイツは結晶シリコンで大きい。

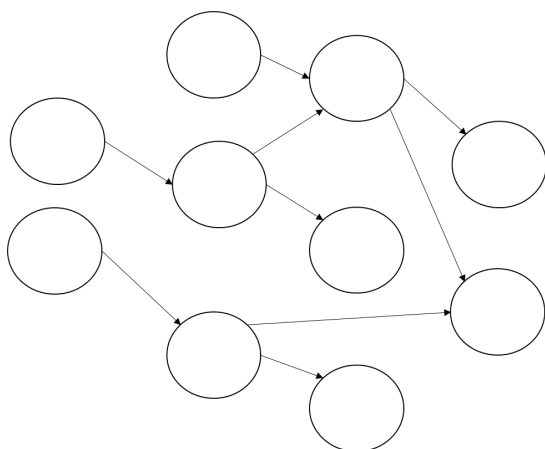
現在、市場で流通している太陽電池の圧倒的多数を占めるのが結晶シリコン太陽電池である。それに化合物半導体太陽電池、薄膜シリコン太陽電池が続く。ところが日本では薄膜シリコンが発表件数、被引用件数ともに大きく、化合物半導体、結晶シリコンと続く。つまり、市場の動向と日本における太陽電池の研究開発の注力度合い、および影響度の強さとは必ずしも適合的な関係にあるとはいえない。日本は太陽電池の研究開発において確かに主要な地位を得ているものの、少なくとも近年において、それは市場で主流となっている結晶シリコン太陽電池関連技術ではない疑いが強い。

(5) 極めて多くの研究が、エレクトロニクス機器を対象とするイノベーションあるいは企業間競争を対象として蓄積されてきた。

とりわけ近年ではエレクトロニクス機器において日本企業が技術開発で先行しながら、そのイノベーションから大きな収益を獲得するのに失敗する事例が相次ぎ、その要因や処方箋について、多くの研究が行われている。そうした研究は確かに貴重な知見をもたらしてきたものの、それらの多くは特定の製品や産業を対象としている。それに対して、本研究では、複数製品分野間あるいは複数技術分野間に何らかの影響関係が存在し、それがイノベーションの推移や企業間競争に小さくない影響を及ぼしているのではないかという見立てにもとづいて、複数分野間の影響関係に着目し、さまざまな分析レベルから太陽光発電の分野に関する探索的な研究を行った。これまでに得られた知見から、イノベーションや企業間競争が特定の「産業」の枠内で閉じたものとして存在するのではなく複数の製品あるいは技術分野間で関連しながら推移していくものと見なす分析枠組みを提起する。

分析枠組みを構築する上で必要な要素として2点が重要である。第1に、何かの用途を実現する技術要素と、それによって実現される用途との組み合わせはひとつではない。これはカネカの事例において、超薄型電卓を実現しようとした際に、カネカのフィルム型太陽電池の他にも利用可能な技術があったことや、また近年でも複数の技術方式の太陽電池が電力用に流通していることが示唆するところである。複数の用途への応用は、同時期に起こることもあれば、異なる時期に起こることもある。そして第2に、何かの技術は何かの用途に用いられ、それによって実現された何らかの用途はまた、何かさらに上位の用途を実現する技術になるというように、技術は入れ子状に関連しあっている。太陽電池のセルはいくつか集まって太陽電池のモジュールとなり、太陽電池のモジュールが集まって太陽光発電設備となる。その発電設備は、さらに他の発電設備とつなぎ合わされて大規模な電力網を形作っている。

図1 技術と用途の多対多の関係



技術と用途に関する2つの特徴を表したのが図1である。円はひとつの技術要素を意味している。そして矢印には2通りの見方がある。ひとつは、これが時間の経過を伴う技術と用途との関係を示しているという見方である。この場合、ある円を出発点として、その円が意味する技術がいろいろな用途に使われていくことを意味する。もうひとつは、システムを構成する要素としての技術と、その技術が用いられるシステムと、という関係を示している。この場合、左に行くほど原理的な要素であり、右に行くほど大規模なシステムであることを意味する。

プラズマCVD装置の事例で見られたように、何かの用途に使われているある技術は、別の用途で使われることがある。この場合、インプットする側の技術にとっては、それまでに蓄積してきた知識を転用できるので、技術開発の効率が良い。ただし、その前に狙っていたか、あるいは実際に使っていた用途の影響を受けているはずなので、初めから新たな用途に最適とは限らない。それに対してインプットされる側の用途にとっては、複数ある選択肢の中から何を選ぶかという問題を解決する必要があり、技術開発の効率、求める内容に対する適合度などを勘案することになるだろう。とはいえ、その判断が毎回、独立の事象として生じるとは限らない。たとえば電力網のような大規模システムに用いる発電設備の場合には、非常に多くの技術的選択肢が存在する。その中でどれが有望と見なすかについて、経路依存性が生じる可能性はある。カネカにおいて、薄膜シリコン太陽電池の長期的な基礎研究の資源動員が可能となった理由のひとつに事業化に成功したという事実があった。このことは、短期的に事業化できる技術ほど、長期的に生き残るための資源動員を正当化しやすい可能性があることを示唆している。つまり、ある技術の種は最も大きな市場規模を見込める用途を目指して長い道のりを一直線に進むべきだとは必ずしも言えず、むしろ短期的に実現可能な何らかの用途で実績を積み重ねていくことが、結果的に長期間を要するイノベーションを成功させるのかもしれない。つまり「寄り道」に重要な意味がある。これは図1のひとつ目の見方にそった考えだけれども、二つ目の見方にそって言えば、より多くの用途に使うことができそうな技術要素ほど、長期的な資源動員を正当化しやすい可能性がある。

イノベーションをこのように技術と用途との多対多の関係で考えると、市場で必ずしも主流とはいえない(微結晶シリコンを含む)薄膜シリコン太陽電池の研究が日本において盛んであることに対する有力な仮説を導出することができる。日本では民生用のエレクトロニクス機器メーカーを中心に太陽電池の研究開発が進められてきた。民生用で実用化されたのは主に薄膜シリコン太陽電池である。その事実が日本においては薄膜シ

リコン太陽電池の研究を盛んにし、それがさらに薄膜シリコン太陽電池の電力用の事業化で世界をリードするという経路を生み出した可能性がある。結果として薄膜シリコン太陽電池は電力用の太陽電池市場で世界の主流とはならなかったものの、そのような動向とは直接的に結びつかない理由で、薄膜シリコン太陽電池の技術蓄積が進んできた可能性がある。もちろん、薄膜シリコン太陽電池の研究は、結晶シリコン太陽電池の次の世代の技術開発を目指した未来志向の研究であると思われるけれども、ある種の技術蓄積に関する経路依存について、今後さらに検討する必要がある。

太陽電池において、さまざまな分析レベルで複数の製品分野間の影響関係に着目した調査を実施し、図1の模式図を提起した。これを用いて分析することで、複数の製品や技術分野間の重層的な影響関係を簡潔に理解することができるようになると思われる。今後、これを利用してさらに実証研究を進めることによって、この枠組みの妥当性を確認する必要がある。その際に、インプットする側（供給サイド）とインプットされる側（需要サイド）とが、それぞれ別の分野から受ける、あるいは別の分野に及ぼす影響が何であるのかを、さらに明確にしていく必要がある。

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 3 件)

松本陽一、IEEE PVSC (太陽光発電専門家会議)の発表動向の分析、国民経済雑誌、査読無、Vol. 209、No. 6、2014、印刷中。

松本陽一、イノベーションの資源動員と技術進化：カネカの太陽電池事業の事例、組織科学、査読有、2011、Vol. 44、No. 3、pp. 70-86。

〔学会発表〕(計 4 件)

松本陽一、太陽電池は「技術力で勝って事業で負けた」のか？ - IEEE PVSC 発表論文の分析 -、組織学会、2014年6月22日、北海道大学。

松本陽一、太陽電池をめぐる競争の分析：技術特性から見た日本企業被逆転の要因、IIR サマースクール、2013年8月27日、一橋大学。

松本陽一、イノベーションの資源動員と技術進化：カネカの太陽電池事業の事例、組織学会、2012年6月17日、立命館大学びわこ・くさつキャンパス。

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rieb.kobe-u.ac.jp/academic/ra/dp/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 陽一 (MATSUMOTO, Yoichi)

神戸大学・経済経営研究所・准教授

研究者番号：00510249