

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26380533

研究課題名(和文) 組み込みシステムの複雑化と開発組織

研究課題名(英文) Increasing Complexity of Embedded Systems and Development Organizations

研究代表者

山口 裕之 (YAMAGUCHI, Hiroyuki)

東洋大学・経営学部・講師

研究者番号：50509255

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：機能の高度化が進展する領域では、開発対象のモジュラー化を進展させることと同時に、システム知識の共有を維持・促進させる必要があることが明らかとなった。機能の高度化が進展する領域では、急増する開発タスクに対する対応が求められる。この対応においては、開発対象のモジュラー化により、開発タスクを相互依存性の低い下位タスクに分割することが原則的な方策としてこれまで指摘されてきた。しかしながら、機能の高度化が進展する領域では、モジュラー化は、システム知識の共有度を低下させることで、2つの経路を通じて開発能力に対して中長期的に負の影響を及ぼしうることが本研究を通じて明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：This research propose that, when the rate of functional advancement is high, development organizations is needed to shear system knowledge with development members, in conjunction with modularize their development object. When the rate of functional advancement is high, coping well with increasing development task became critical matter. Existing research has shown that modularizing development object is a basic and effective mean to this matter. Modularizing object increase organization's development capacity by allowing task partition. This research provide new insight into these studies by indicating that there is negative influence path from modularizing object to organization's development capacity. We propose that, when the rate of functional advancement is high, modularizing development object may hinders sharing of system knowledge between project members, consequently undermine organization's development capacity.

研究分野：経営学

キーワード：開発組織 組み込みシステム アーキテクチャ システム知識

1. 研究開始当初の背景

近年、電気・電子機器産業をはじめとした多くの産業では、高度化・多様化する顧客ニーズに迅速に対応することが求められるようになってきている。このことを背景に、製品開発活動の現場では、開発タスクの増大、とりわけ組み込みソフトウェアの開発タスクが劇的に増大しており、このことへの対応が大きな課題となっている。

組み込みソフトウェアは、機器を構成する種々のハードウェア・デバイスの振る舞いを制御し、機器機能を実現する役割を担う。半導体技術の進展を背景に、組み込みソフトウェアの実装可能性が向上することで、より高度かつ複雑な機能の制御・実現が可能となり、機器機能の実現において組み込みソフトウェアの果たす役割は増大している。その一方で、組み込みソフトウェアの開発規模が巨大化することで、多くの開発組織は逼迫した状況に陥っている。すなわち、増大する開発タスクに対応できるか否かが、製品競争力、ひいては事業における競争優位性を大きく左右する状況が生まれているのである。

開発タスクの増大に対しては、開発対象のアーキテクチャをモジュラー化し、それに適合的な組織構造を採用する必要性がこれまで数多く指摘されている。この指摘は実務の世界にも広く浸透し、その対応策もまた広く講じられつつある。にもかかわらず、多くの企業が開発活動、とりわけ組み込みソフトウェアの開発において開発組織は逼迫した状況のままである。

開発タスクの増大は開発組織にどのような影響を与えているのだろうか。開発タスクの増大に対して開発組織はいかに対応しているのだろうか。この対応における成否はどのような要因によって左右されるのだろうか。増大する組み込みソフトウェアの開発タスクへの対応に関わるこれらの問題は、学術的にも実務的にも重要な意味を持つにもかかわらず、組み込みソフトウェア、そしてその開発組織に焦点を当てた検討は十分に行われていないように思われる。この間隙をうめることが、本研究の狙いである。

2. 研究の目的

これまで、開発組織のパフォーマンスをめぐっては、開発対象のアーキテクチャや、組織構造、それらの適合関係などによって説明を試みる研究が進められてきた。その一方で、開発タスクの増大という変化に対して開発組織が対応するプロセスに焦点を当てた議論は少ない。そのため、上述したような問題に対する十分な説明は提示されていないように思われる。

こうした問題意識の下、本研究は、開発タスクの増大が組織に及ぼす影響とその対応に際して開発組織が直面しうる課題を記述し、望まれる対応策を提示することを目的としている。

3. 研究の方法

上述した研究目的に対して、本研究では既存理論の整理と統合という演繹的アプローチと、組み込みソフトウェア開発組織の事例分析という帰納的アプローチの両面から検討を進めてきた。

演繹的アプローチでは、開発対象のアーキテクチャや、組織構造、それらの相互関係と開発組織のパフォーマンスの関係について論じた議論を広くレビューし、それらの統合を試みた。

演繹的アプローチでは、複数ケーススタディを採用し、開発タスクの増大という変化に対して開発組織が対応するプロセスの記述・分析を進めてきた。具体的には、製品機能の高度化に伴い組み込みソフトウェアの開発規模が急速に増大している特定の製品領域に所属する2つの組織を対象に、インタビュー調査を実施することで、開発タスクの増大が組織に与える影響や、開発タスクの増大に対して開発組織が対応してきたプロセスの記述・分析を進めてきた。

なお、インタビュー調査は、2つの開発組織に対してそれぞれ3回、計6回実施した。インタビューは、1回あたり2~3時間をかけ、管理者層を対象に、調査対象期間における開発組織および開発活動の状況について半構造化形式で実施した。事実認識や解釈に大きな誤りやバイアスが介在しないよう、インタビューには研究代表者および研究分担者が2名以上で望み、インタビュー内容については全て録音のうえ文字データに変換し、読み合わせを行っている。また、同様の目的から、調査結果および研究成果の一部については、インタビューに送付のうえ、その確認を行っている。

4. 研究成果

本研究からは、開発対象の機能の高度化が進展する領域では、開発対象のモジュラー化を進展させる一方で、システム知識の共有を維持・促進させる組織施策の必要性が明らかとなった。機能の高度化が進展する領域では、時間の経過とともに、開発タスクが劇的に増大する。増大する開発タスクに対処するためには、開発対象のモジュラー化により、開発タスクを相互依存性の低い下位タスクに分化することが有効かつ原則的な方策としてこれまで論じられてきた。

しかしながら、機能の高度化が進展する領域では、モジュラー化とそれに基づくタスク分割は、組織内におけるシステム知識の共有度を低下させることで、2つの経路を通じて開発能力に対して中長期的に負の影響を及ぼしうるということが本研究を通じて明らかとなった。開発タスクの増大への対応にあたりモジュラー化は不可避である以上、その負の影響を回避・緩和するための組織施策が必要であることが本研究から示唆される。

(1)機能の高度化に伴う開発タスクの増大

機能の向上や多様化は、それらの実現を担う構成要素の数や規模(=開発規模)が拡大することを意味しており、それらに係る開発タスクを増大させる。ただし、開発規模の増大に対して、開発タスクは線形的に増加するわけではなく、非線形的に増加する。開発規模の増大に伴い、開発活動の遂行に必要な調整業務が逡増していくためである。個人のタスク処理能力が有限である以上、その限界を超えた開発タスクは分割処理されたうえで統合されなければならない(Simon, 1996; von Hippel, 1990)。このとき、分割された下位タスクの間の調整が必要となり、この調整に係るタスクも開発活動の遂行に必要な開発タスクとなる。この調整業務は、開発規模の増加に伴い開発活動に関わる主体数が増大するほど逡増する。調整対象となる成員数の増加に伴い、彼らの調整に必要なコミュニケーション経路は等比級数的に増大するためである。さらに、開発規模に対する開発タスクの増分は、下位タスク間の相互依存性が高まるほど大きくなる。相互依存性が高いタスク間の調整では、相対的に高コストである直接調整が高頻度で求められるためである。

機能の高度化が進展する領域では、開発対象の規模が増大傾向にあるだけでなく、開発対象の複雑性も増大傾向にある(藤本, 2013)。そのため、時間の経過に伴い開発規模が増大するごとに、その開発タスクは爆発的に増大していく。たとえば、組込みソフトウェアの世界では、開発規模(コード行数)が倍に増加するごとに、開発コストは2乗で増大するという通説が存在する。

(2)モジュラー化の機能

開発タスクの増大にいかに対応するか。この問題については古くから議論が展開されてきた。そこでは、開発タスクを相互依存性の低い下位タスクに分割する必要性が指摘されており、そのための手段として開発対象のアーキテクチャのモジュラー化が議論されてきた(e.g. Ulrich, 1995; Sanchez and Mahoney, 1996; Baldwin and Clark, 2000; 青島・武石, 2001)。

先述したように、個人の情報処理能力が有限である以上、個人の処理能力を超えた開発タスクは分割され、分散処理されなければならない(Simon, 1996; von Hippel, 1990)。すなわち、開発タスクの増大に対しては、開発タスクを分割し、個別タスクにあたる組織成員を増加させることがその基本方針となる。

しかし、組織の開発能力は、成員数の増加によって無限に増大するわけではない。分散処理された個別タスクは統合される必要があり、この統合の必要性によって組織の開発能力は制約を受けるためである。成員数の増加は、一方で組織が探索・収集・処理できる

情報量を等差級数的に増加させるものの、他方でそれらを統合する(個別タスクを調整する)ためのコストを等比級数的に増加させる。つまり、成員の増強に伴い、開発組織の情報処理能力は増大するけれど、調整活動に振り向けられる割合が増大することで、開発活動に振り向けることのできるその能力(開発能力)の増分は逡減し、ある時点で減少に転じることとなる。成員の増加に伴う調整コストの逡増をいかに抑えることができるかが、開発タスクの増大への対応の鍵となるのである。

調整コストの逡増を抑制する有効な方策として注目されてきたのが、開発対象のアーキテクチャのモジュラー化である。前述したように、製品開発タスクは、個人の情報処理能力が有限であるがゆえに分割されなければならない。製品機能は複数の機能要素へと、製品構造は複数の構造要素へとそれぞれ分割され、複数の構造要素によって複数の機能要素の実現が試みられる(図1)。このとき、図1の上側のように機能(要素)と構造(要素)の対応が1対1といった簡潔な関係にあるものが、モジュラーリティが高いアーキテクチャ(モジュラー・アーキテクチャ)と、図1の下側のように機能(要素)と構造(要素)の対応が錯綜した関係にあるものが、モジュラーリティの低いアーキテクチャ(インテグラル・アーキテクチャ)と呼ばれる。

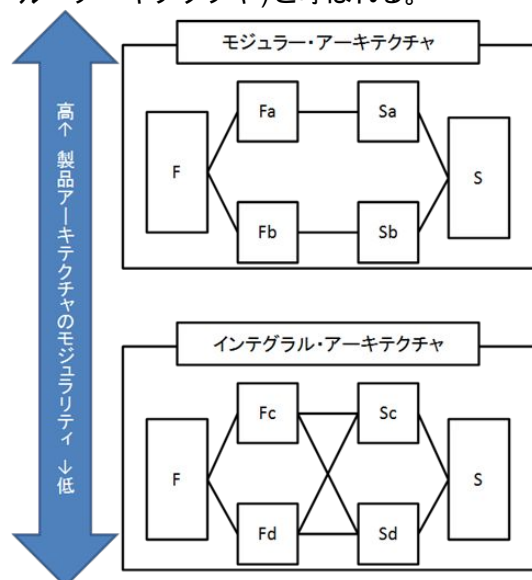


図1：アーキテクチャのタイプ

ここで重要となるのは、モジュラー・アーキテクチャでは、個別タスクに要求される成果が独立している点である。一方の、インテグラル・アーキテクチャでは、個別タスクに要求される成果(個別機能)は独立していない。個別タスクの間には、互恵的相互依存性(reciprocal interdependence)が存在するのである。他方、モジュラー・アーキテクチャでは、各要素機能の実現は構成要素 Sb の開発タスクに完結化(カプセル化)されている。この意味において、個別タスクに要求される成果(個別機能)は独立しており、両タスクの

間にはプール化された相互依存性(pooled interdependence)しか存在しない。すなわち、モジュラー・アーキテクチャの下では、個別タスクの相互依存性が、各個別タスクに課される成果目標(機能要素の実現)に縮約されることで、タスク間の相互依存性が削減されているのである(Ulrich, 1995; Baldwin and Clark, 2000)。

この相互依存性の違いにより、タスク間の調整コストは大きく異なってくる。互惠的相互依存性には、プール化された相互依存性よりも多くのコンティンジェンシーが含まれるためである(Thompson, 1967)。コンティンジェンシーへの対応においては、相対的にコストの高い直接調整という調整手段に頼る必要が生じる。そのため、インテグラル・アーキテクチャの下では、相互依存関係にあるタスク担当者間で頻繁なコミュニケーションが必要となる。他方で、モジュラー・アーキテクチャの下では、アウトプットの標準化というコストの低い調整手段を利用することができる。タスク間の相互依存性が、個別タスクの成果目標に縮約され、個別タスクに対して事前に課されているためである。

それぞれのアーキテクチャで必要とされる調整手段の違いは、成員数の増大に伴う調整コストの増加に大きく反映されることとなる。直接調整に頼らざるを得ないインテグラル・アーキテクチャの下では、開発人員の増加に伴い調整コストが逡増していく。他方で、モジュラー・アーキテクチャの下では、調整コストの逡増を抑制することが可能となる。

この違いが、開発組織のタスク処理能力およびその増強可能性を大きく左右する。開発組織のタスク処理能力を増強するうえでは、モジュラー・アーキテクチャ(モジュール化)が志向される必要がある。これが、このアーキテクチャの議論において注目されてきたタスク増大に対する対応策である。

(3)モジュラー化の逆機能

開発対象のモジュラー化は、個別タスク間の相互依存性、従って調整コストを低減させ、組織の開発能力を向上させる機能を持つ。しかしながら、その一方で、機能の高度化が進展する領域においては、開発組織内におけるシステム知識の共有度を低下させることで、開発能力に負の影響を与えうることが明らかとなった。

システム知識とは、構成要素間の相互依存関係に関する知識を指す。このシステム知識は、組織の開発能力に対して次の2つの機能を有することが既存研究において明らかにされている。

第1に、開発主体間の調整活動の潤滑油の機能を有する。開発活動の効率性を説明する様々な議論では、前提知識が共有されるほどコミュニケーション・コストが低下するというロジックがたびたび指摘・確認されてきた

(青島・延岡, 1997; 楠木, 1998; 青島, 1998; 武石, 2003)。そこでは、システム知識が、開発プロセスに有用な情報を選別するフィルター(Cohen and Levinthal, 1990)や、主体間の情報伝達の潤滑剤(中馬, 2004)の役割を果たすことで、調整コストを低下させる(Von Hippel, 1992)点が指摘されている。

第2に、モジュラー化の推進を促すことで、開発効率を向上させる機能を有する。モジュラー化を実現するためには、人工物を構成する要素間の相互依存関係に関する知識(=システム知識)を蓄積し、その知識を設計改善活動に活用する試みが、組織内で展開される必要がある(Sanchez and Mahoney, 1996; 向井, 2016)。

ただし、これらの機能が実現されるためには、システム知識が開発組織内で共有される必要がある。システム知識は、開発成員間で、構成要素間の調整活動を通じて試行錯誤的に獲得される(Baldwin and Clark, 2000)ため、当該活動に直接的に関与した主体に断片化した形で蓄積されるためである。

開発組織内におけるシステム知識の共有は、モジュラー化により阻害される可能性が高い。システム知識は、多くの場合、相互依存関係に係る問題を解決する独自ノウハウとして暗黙的な形で蓄積される(青島, 1998)ためである。暗黙的な知識が共有されるためには、密なコミュニケーションを通じた伝達か、当該知識を保有する主体による形式化が果たされなければならない。

こうしたシステム知識の共有化の試みは、モジュラー化に伴い組織の分化が進むことで阻害されると考えられる。モジュラー化により、個別タスク間の相互依存性が削減されることは、開発成員間の密なコミュニケーションの機会が減少することを意味している。また、個別タスクの相互依存性が減少するに伴い、志向性の分化や手段の目的化といったセクショナリズムが進展することで、システム知識を形式化しようとする各成員のインセンティブは低下する。タスク分割が進んだ組織では、成員の追求する目的が、組織の全体目標ではなく、自身に割り振られた個別目標に転化する傾向にあるためである。自身に付与された個別開発タスクの処理が優先され、全体設計の改善に必要なシステム知識の形式化と共有が軽視される恐れがある。

したがって、モジュラー化には、システム知識の共有度を低下させることで、次の2つの経路を通じて組織の開発能力に負の影響を及ぼしうると考えられる。下記の2つ影響経路は、機能の高度化が進展する領域において、モジュラー化の逆機能として顕在化する可能性が高い。

第1に、システム知識の共有度の低下は、調整コストを増大させる可能性がある。機能の高度化が進展する領域では、モジュラー化が強く志向されたとしても、構成要素間の相互依存性は少なからず残存する。開発過程で

は、しばしば、事前に特定されていなかった構成要素間の相互依存性や相互作用が明らかになり、その対処において開発成員の間ではコミュニケーションを通じた相互調整が必要となる。この直接的な調整活動において潤滑油の役割を担う共有されたシステム知識は、モジュラー化により毀損される恐れがある。

すなわち、偶発的な直接的調整が少なからず必要となる機能の高度化が進展する領域では、モジュラー化に伴いシステム知識の共有度が低下するほど、偶発的な相互調整に係るコストが増大することで、組織の開発能力が低下する恐れがある。

第2に、システム知識の共有度の低下は、開発組織におけるモジュラー化推進プロセスを停滞させることで、中長期的に組織の開発能力を低下させる可能性がある。機能の高度化が進展する領域では、時間の経過とともに、構成要素間の相互依存性が上昇する傾向にある。機能の変更や追加によって、構成要素間の相互依存性が不可避的に増大するためである。従って、開発組織は開発対象のモジュラー化を継続的に推進する必要がある。モジュラー化推進プロセスの停滞は、時間の経過とともに、個別タスク間の相互依存性の増大、従って調整コストの増大を招く可能性がある。モジュラー化の推進には、システム知識の共有が不可欠である。

すなわち、モジュラー化の継続的な推進が必要となる機能の高度化が進展する領域では、モジュラー化に伴いシステム知識の共有度が低下するほど、その後のモジュラー化推進プロセスが停滞することで、中長期的な調整コストが増大し、組織の開発能力が低下する恐れがある。

(4)本研究の示唆と課題

従来の研究では、増大する開発タスクへの対応においてモジュラー化が有効な方策であることが指摘されてきた。モジュラリティが高まるほど、調整調整コストが節減されることで、開発能力が高まるという因果指摘である。本研究は、この指摘を否定するものではなく、拡張するものであった。すなわち、モジュラリティと開発能力の間には、システム知識の共有度という変数を媒介した、負の関係が存在し、機能の高度化が著しい領域ほどこの逆機能のインパクトが高くなりうる、という因果メカニズムに関する仮説を提起したことに、本研究の理論的貢献が求められるだろう。

本研究の実務的貢献としては、機能の高度化が進展する領域ほど、システム知識の共有を促す組織施策の必要性が高まることを明らかにした点に求められるだろう。機能の高度化が進展する領域では、開発対象のモジュラー化は不完全なものにならざるを得ず、さらに時間の経過とともにそのモジュラリティは低下する。この2つの特徴ゆえに、当該

領域では、開発タスクの増大への対応は非常に困難なものとなる。開発対象をモジュール化させ、開発タスクを相互依存性の低い下位タスクに分割することは、従来の研究で指摘されてきたように、組織の開発能力を増強するうえで不可欠である一方で、組織内のシステム知識の共有を妨げることで、組織の開発能力に対して負の影響を与えうるためである。機能の高度化が進展する領域ほど、この開発能力に対するモジュラー化の逆機能は強まるため、その回避・低減を目的とした施策、すなわち、システム知識の共有を促す組織施策の必要性が高まる。

システム知識の共有を促す組織施策の必要性の指摘は、モジュラー化を推進する組織ではこれらの組織施策が看過ないし削減される傾向にあることを踏まえると、一定の意義を持つと考えられる。これらの組織施策は、一定のコストが伴う一方で直近の開発活動に対して測定しやすい効果をもたらすものではないためである。更に、モジュラー化を推進し、タスク分割と専門化、さらにはオープン化を進展させようとする組織にとって、これらの施策はそうした動きに反するものとして捉えられるためである。しかしながら、本研究成果に依拠すれば、機能の高度化とそれに伴うアーキテクチャの複雑化が進展することが予想される領域において、積極的に組織分化やオープン化を進めることは、短期的には開発能力を向上させるものの、中長期的には開発能力を低下させる恐れがある。

ただし、この指摘の妥当性については、さらなる検討が求められる。本研究は、開発能力に対してモジュラリティが逆機能を及ぼしうる因果メカニズムを指摘・提起するものであり、その検証や因果効果量の測定はされていない。したがって、機能の高度化のペースに応じて、モジュラリティの準機能と逆機能の効果量、従ってネットの効果量がどのように変化するかについては明らかとなっていない。これらの検証作業については、今後の課題としたい。

<引用文献>

- 青島矢一、延岡健太郎、プロジェクト知識のマネジメント、組織科学、31巻1号、1997、20-36
- 青島矢一、製品アーキテクチャと製品開発知識の伝承、ビジネス/レビュー、第46巻第1号、1998、46-60
- 青島矢一、武石彰、アーキテクチャという考え方、ビジネス、アーキテクチャ(藤本隆宏、武石彰、青島矢一編)有斐閣、2001、27-70
- Baldwin, C. Y., K. B. Clark, Design Rules: The Power of Modularity, MIT Press, 2000
- 中馬宏之、日本のサイエンス型産業が直面する複雑性と組織限界、一橋ビジネスレビュー、2004年win号、2004、64-85
- Cohen, W. M., D. A. Levinthal, Absorptive

Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation, Administrative Science Quarterly, Vol.35, No.1, 1990, 128-152
藤本隆宏、「人工物」複雑化の時代、有斐閣、2013

楠木健、機能マネジャーと製品マネジャー：イノベーション管理者の比較分析、ビジネスレビュー、第45巻第3号、1998、17-37

向井悠一郎、設計組織による製品アーキテクチャの改変：非高付加価値・非先端技術分野における日本企業の製品開発組織、日本経営学会誌、第37巻、2016、29-39

Sanchez, R., J. T. Mahoney, Modularity, Flexibility, and Knowledge Management in Product and Organization Design, Strategic Management Journal, Vol. 17, 1996, 63-76

Simon, H. A., The Science of the Artificial 3rd eds, MIT Press, 1996

武石彰、分業と競争：競争優位のアウトソーシング・マネジメント、有斐閣、2003

Thompson, J. D., Organizations in Action, McGraw-Hill, 1967

Ulrich, K., The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm, Research Policy, Vol. 24, 1995, 419-440
Von Hippel, E., Task Partitioning: An Innovation Process Variables, Research Policy, Vol. 19, 1990, 407-418

Von Hippel, E., Sticky Information and The Locus of Problem Solving: Implications for Innovation, Management Science, Vol. 40, No. 4, 1994, 429-439

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 4 件)

山口 裕之、増大する製品開発タスクへの対応：カーナビゲーション開発における外部人材の活用とシステム知識の共有、現代経営研究の潮流(中央経済社)、査読無、第7章、2016、102 - 120

水上 祐治、野中 誠、小田部 彰、車載組込みソフトウェア開発におけるソフトウェア品質知識の文章化方針と活用度の測定：東海地方の自動車部品産業対象のアンケート調査を題材に、日本経営システム学会誌、査読有、第32巻、2015、91-100

柳田 礼子・野中 誠・菅田 直美、CMMI成熟度レベル別にみたソフトウェア品質の良否に関わる要因の複合的分析、ソフトウェアエンジニアリングシンポジウム 2015 講演論文集、査読有、2015、63-68

山口 裕之、増大する製品開発タスクへの対応：カーナビゲーション開発における外部人材の活用とシステム知識の共有、経営論集、査読無、第84巻、2014、139-153

〔学会発表〕(計 5 件)

山口 裕之、富田 純一、野中 誠、組込みソフトウェア開発におけるモジュラー化のダイナミクス、組織学会、2017年6月18日、滋賀大学(滋賀県・彦根市)

山口 裕之、組込みソフトウェアの大規模化と開発組織、日本経営学会関東部会、2016年10月22日、玉川大学(東京都・町田市)

富田 純一、山口 裕之、野中 誠、組込みシステムにみるソフトウェア・アーキテクチャの変化とマルチプロジェクト・マネジメント、JOMSA、2016年6月12日、神戸大学(兵庫県・神戸市)

山口 裕之、組込みシステムの肥大化と開発組織、日本マネジメント学会、2015年10月25日、香川大学(香川県・高松市)

富田 純一、野中 誠、山口 裕之、カーナビゲーションシステム企業における製品開発戦略、研究・技術計画学会、2014年10月19日、立命館大学びわこ・くさつキャンパス(滋賀県・草津市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 裕之(YAMAGUCHI, Hiroyuki)
東洋大学・経営学部・講師
研究者番号：50509255

(2) 研究分担者

野中 誠(NONAKA, Makoto)
東洋大学・経営学部・教授
研究者番号：30318787

富田 純一(TOMITA, Junichi)
東洋大学・経営学部・准教授
研究者番号：30396824