

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04330

研究課題名(和文) 期待効用理論に基づく電力系統の新たな供給信頼度指標の開発

研究課題名(英文) Investigation of New Reliability Index of Power System based on Expected Utility Theory

研究代表者

宮内 肇 (MIYAUCHI, Hajime)

熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授

研究者番号：20181977

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：従来の電力系統の供給信頼度指標は、停電時間などの確率分布の期待値として表現されている。近年、再生可能エネルギー電源の導入に伴い電源構成とともにその確率分布も変化している。期待値は確率分布のごく一部の情報に過ぎないことから、我々は、確率分布全体を評価することができるリスク鋭感的価値尺度(RSVM)を用いた供給信頼度評価を提案している。RSVMを用いた供給信頼度評価の有用性を、IEEE RTSと離島系統を例題系統として検証する。特に、従来の供給信頼度指標では同等と評価された場合でも、RSVMは大きな供給支障があれば信頼度を低く評価することを示す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年再生可能エネルギー電源が大量導入され、電力系統の電源構成が大きく変わっているにも拘らず、期待値を用いた従来の供給信頼度指標で系統の信頼度を評価している。これは本研究でも明らかにしたように停電時間などの確率分布の様相が変わっていることから、場合によっては系統の信頼度を正しく評価できていない場合もあり得る。その課題に対し、確率分布全体の評価を行う信頼度評価指標を提案している点で、学術的にも社会的にも意義がある。

さらに、元々リスク鋭感的価値尺度は経済学の分野で財を評価する指標であるが、それを全く分野の異なる電力システム工学に適用し、文理の学際分野での展開を図った点で、学術的意義が高い。

研究成果の概要(英文)：Conventional reliability indices of electric power system are represented by the expected values of probabilistic distributions such as blackout duration time. Recently, as the configuration of generators changes according to the penetration of renewable energy generations, the aspect of the probabilistic distribution also changes. Because the expected value loses the information which the probabilistic distribution has originally, we propose the reliability evaluation by RSVM, which can evaluate whole probabilistic distribution. We investigate the effectiveness of reliability evaluation by RSVM using IEEE RTS and an isolated island system as sample systems. Particularly, RSVM evaluates the reliability low when there is a severe supply problem even if the conventional reliability index evaluates the reliability equivalent.

研究分野：電力工学

キーワード：電力システム 供給信頼度 価値尺度 確率分布 電力不足確率 下方リスク

## 1. 研究開始当初の背景

電力系統の供給信頼度指標としては、電力量不足確率 LOLP、停電時間期待値 LOLE、供給不足電力量 EUE などさまざまな指標があるが、これらは全て、それぞれの確率分布に対する期待値として求められた指標である。しかし、単純に期待値だけで評価すると、確率分布が本来持つ情報が十分には反映されず、評価としては不適切になる可能性がある。例えば、大容量の発電機 1 機と小容量の発電機多数で構成される系統を比較すると、停電時間の期待値が同じであっても、供給不足となる電力量は大きく異なるものと考えられ、大容量の発電機 1 機からなる系統の方が社会に与える影響は大きいものと予想される。さらに、最近ではほとんどの検討に太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギー電源が導入され、従来の同期発電機からのみなる系統とは明らかに停電時間などの確率分布が変化している。

## 2. 研究の目的

期待値は確率分布が本来もっていた情報の多くを捨象することと、近年電力系統には再生可能エネルギー電源が大量に導入されていることの 2 点から、電力系統の供給信頼度指標として確率分布の期待値を用いることは適切でない場合が考えられる。そこで、確率分布全体の情報を元に評価する新たな供給信頼度指標の開発が望まれる。

一方、我々は元々市場で取引されないような財の価値を測るものとして、効用の概念に基づく期待効用理論を使う価値尺度に関する研究も行ってきた。その中でも指数関数型の効用関数を用いたリスク鋭感的価値尺度 (RSVM: Risk Sensitive Value Measure) を使って、発電事業などの価値評価を行ってきている。

RSVM は、形式的には確率分布の積率母関数に一致することから、確率分布全体を評価することができると言える。このことを考えると、停電時間など供給信頼度に関する確率分布を RSVM で評価すれば、確率分布全体の情報を元に評価する新たな供給信頼度指標として用いることができると考えられる。

そこで本研究は、RSVM を用いた供給信頼度指標を提案し、その有用性について検証することを目的としている。

## 3. 研究の方法

### (1) 研究方法の概要

信頼度評価のためのテスト系統である IEEE RTS 系統と、上位系統が存在せず孤立した系統である離島系統を例題系統とし、数値シミュレーションを行うことで、提案する RSVM を用いた供給信頼度指標の有用性を検証する。シミュレーションには MATLAB を用いている。

### (2) RSVM を用いた供給信頼度指標

発電機の故障や電力需要などを確率過程で記述し、モンテカルロシミュレーションにより停電時間などを確率変数  $X$  として表す。停電時間などは事業者にとって負の価値であることから、負、すなわち、 $-X$  に対して評価を行う。このとき、

$$U_x(\beta) = -\frac{1}{\beta} \log(E[e^{-\beta \cdot (-X)}]) \quad (1)$$

が RSVM を用いた供給信頼度の評価式である。ここで、 $E[\ ]$  は期待値を表し、確率変数  $X$  の分布に基づいて計算される。したがって、式(1)の値を得るには確率変数  $X$  が与えられている必要があることから左辺は  $U_x(\beta)$  と表記しているが、特に確率変数  $X$  を明示する必要のない場合、簡単に  $U(\beta)$  と表記する。式(1)より、RSVM は形式的には  $\beta$  をパラメータとする積率母関数に一致する。このことから、RSVM が確率分布全体の情報を反映した評価尺度であると言える。

式(1)は、意思決定者の効用関数として式(2)で表される指数型の効用関数を用い、式(3)で表される期待効用無差別価格形式に式(2)を代入し、 $v = U(\beta)$  について解くことで求められる。

$$u(\beta, x) = \frac{1}{\beta} (1 - e^{-\beta x}) \quad (2)$$

$$E[u(\beta, -U(\beta) + (-X))] = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\beta$  はリスク回避度であり、この値が大きいほど意思決定者はリスク回避的である。

### (3) IEEE RTS 系統における検証

例題系統として、IEEE Reliability Test System (RTS) に、出力が不確実に変動する太陽光発電と風力発電を追加した場合を考える。モンテカルロシミュレーションにより停電時間の分布を求め、得られた停電時間の確率分布を RSVM で評価する。

不確実性としては、電力需要を標準偏差 0.05 の正規分布で変動させる他に、火力発電機の故障、太陽光発電 (PV) の日射量による出力変動と故障、風力発電機 (WTG) の風速による出力変動と故障を考える。

図 1 に、PV の設置容量を変えたときの停電時間分布の変化を示す。PV 容量が多くなると、停電時間の分布の裾が短くなるのが分かる。このように PV など再生可能エネルギー電源が導入されると、停電時間の確率分布が変化する。

図 2 に、RSVM により信頼度を評価した結果を示す。WTG の供給信頼度を評価する手法の一つである供給信頼度対応能力 (Effective Load Carrying Capacity : ELCC) とは、ある系統に 550MW の火力発電機を連系した場合の電力不足確率 LOLP と等しい LOLP が得られる WTG の容量をとして示される。図 2 は、ELCC にならって、単機 550 MW の火力発電機を追加した場合の RSVM の値と等しい RSVM になる PV と WTG の追加容量の配分限界を示している。ここで、 $\beta = 0$  の場合の RSVM は従来からの供給信頼度指標 LOLP と等しい。 $\beta$  が正の値を取るとリスク回避的な意思決定となり、再生可能エネルギー電源の容量価値が相対的に上昇する。これは、RSVM の下方リスクを嫌う性質によるものと考えられる。

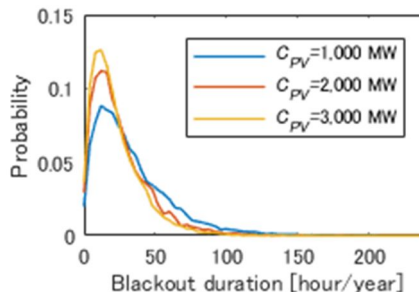


図 1 PV 容量変化時の停電時間分布

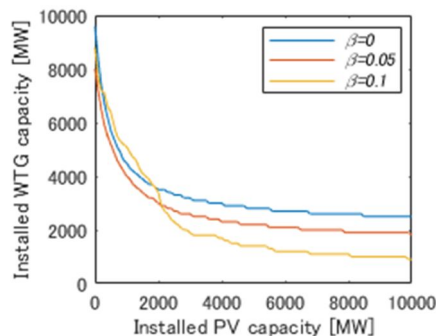


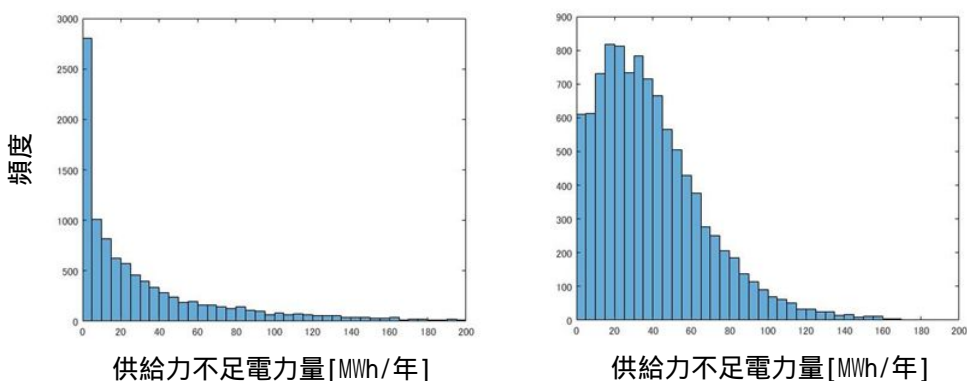
図 2 PV と WTG の追加容量限界

#### (4) 離島系統における検証

離島の電源として一般に用いられている内燃発電機の燃料コストが高いことから、比較的成本が高い再生可能エネルギー電源であっても導入されやすい。一方、系統規模が小さいことから、これら再生可能エネルギー電源の変動性や間歇性などが系統の信頼度を損ないやすい。一方で、系統を解析する立場からは、離島は上位系がなく、また、孤立した閉じた系統であることから、供給信頼度を評価しやすい。以上の理由から、離島をモデル系統として取り上げる。

夏季の最大需要の平均が 100MW の離島を考える。冬季は夏季の 90%、春秋は夏季の 70% を平均とし、毎日の需要の最大値は、この平均値を中心に標準偏差 5% の正規分布で変動するものとする。供給力としては、1 機 10MW の内燃発電機と 1 台 200kW の PV を考える。それぞれ故障確率を想定し、故障の規模に応じて使用できない期間を変化させている。PV の出力は日射量と天候に応じて変化させる。

内燃発電機と PV の割合は、内燃発電機を 8 機から 2 機まで 1 機ずつ減らした 7 つのケース全てで、供給力不足電力量 (EUE : Expected Unsupplied Energy) がほぼ 39.5MWh/年となるよう設定した。図 3 に、全 7 ケースのうち、最も内燃発電機の多いケース A (内燃発電機 8 機と PV33 台) と最も PV が多いケース G (内燃発電機 2 機と PV1700 台) の供給不足電力量の分布を示す。なお実行したモンテカルロシミュレーションは、1 年間で 1 試行とし 10000 試行実行した。



(a) ケース A (内燃機 8 機 + PV33 台) (b) ケース G (内燃機 2 機 + PV1700 台)

図 3 供給力不足電力量の分布

内燃発電機の割合の高いケース A では、最頻値が 0MWh/年であり、また、PV に比べ容量の大きい内燃発電機が故障した場合の影響が大きく、供給力不足電力量の分布の裾が長く伸びている。一方、PV の割合の高いケース G では、0MWh/年でない値が最頻値となる一方で、例え PV が故障しても単機容量が小さいため、供給力不足電力量の裾が短い。ケース G は極端な例ではあるが、PV など再生可能エネルギー電源が大量に導入されると、図 3 に示すように、信頼度に関わる確率分布の様相が大きく変わり、ケース A のようにほとんど供給支障はないが稀に大きな事故が起こる状態から、徐々に供給支障の回数は増えるものの大きな事故はあまり起こらなくなる状態へと分布が変化する。

図3に示す2つのケースは、従来の供給信頼度指標であるEUEで評価すれば同じ値である。これは、EUEがあくまでも期待値でのみ評価し、確率分布全体を見ていないことによる。そこで、式(1)で表されるRSVMを用いて供給信頼度を評価する。その結果を表1に示す。

表1 EUE、RSVM、VaRによる供給信頼度評価

ケース(内燃機・PV)	EUE [MWh/年]	RSVM ( $\beta = 0.1$ )	VaR ( $\alpha = 1\%$ )
A(8機・33台)	39.5	-841.8	291.6
B(7機・205台)	39.7	-364.5	202.2
C(6機・435台)	39.4	-314.0	196.0
D(5機・700台)	39.4	-209.8	160.7
E(4機・1000台)	39.7	-163.3	139.5
F(3機・1340台)	39.6	-155.2	134.1
G(2機・1700台)	39.6	-114.5	130.7

7つのケース全てでEUEはほぼ同じ値であるが、図3に示す通り供給力不足電力量の分布が異なる。供給力不足電力量という確率分布全体を評価するRSVMの値は、これら7つのケースで値が異なる。RSVMを用いた供給信頼度指標では、大きい(この場合だと0に近い)方が、信頼度が高いと評価される。すなわち、ケースAのように供給力不足電力量分布の裾が長く伸び、極めて稀ではあるが非常に大きい供給支障が起きる場合を低く評価する。その意味では下方リスクを評価していることに相当するため、同じく下方リスクを評価するVaR(Value at Risk)で評価した結果も合わせて表1に示す。VaRでは小さい値の方が良いと評価されることから、RSVM同様ケースAが一番悪く、ケースGが一番良いと評価する。この点だけを見れば、RSVMはVaRと同じく単に下方リスクを評価するに過ぎないとも考えられる。しかし、式(1)に戻って考えれば、RSVMは供給力不足電力量の確率分布全体を評価し、単にある値以下となるリスクだけを評価するVaRよりも優れていると考えられる。さらに、表1でRSVMとVaRが同様の結果を示したのは、図3に示すように分布がなだらかであることも一因と考えられる。

(5) パラメータ $\beta$ の設定など残された課題について

本提案手法ではパラメータ $\beta$ の設定が問題となる。 $\beta$ と従来の供給信頼度指標との関連を考えるために、内部リスク回避度(IRRA: Inner Rate of Risk Aversion)を考える。図4に示すように、横軸にパラメータ $\beta$ を、縦軸に式(1)の $U(\beta)$ を取って図示し、式(4)を満たす $\beta$ をIRRAとして定義する。

$$U(\beta) = C \quad (\text{定数}) \quad (4)$$

すなわち、基準の満足度 $C$ を満たすリスク回避度 $\beta$ の基準値を表すものである。今考えているRSVMを用いた供給信頼度においては、IRRAの値の大きいほど供給信頼度は高いと評価できる。

電力系統では通常LOLP=0.1日/年を基準とし、我が国では実質的には同じであるが、最大電力発生月に対し0.3日/年を基準としている。この0.3日/年を一つの基準、すなわち基準の満足度 $C$ と考えて $U(\beta)$ を評価することで、パラメータ $\beta$ が定められないか検討してみた。前項(4)での計算で、RSVMを用いた供給信頼度指標の有効性を検証するためにシステムの信頼度をやや低く想定していたので、表2に示すように、内燃発電機を13機から10機までの範囲で検証する。内燃発電機を13機から1機ずつ減らし、LOLPがほぼ同じ0.1日/年となるようPVの台数を決定した4ケースについて検討する。図5に、これら4ケースについて、横軸にパラメータ $\beta$ を、縦軸に $U(\beta)$ を取って図示する。基準値を $C = -0.3$ と設定し、IRRAを求めた結果を表2に示す。このように、ある基準値を定めることができれば、パラメータ $\beta$ が設定できる可能性がある。しかし、現段階では、0.3日/年と基準値 $C = -0.3$ との関連を論理的に詰めることができていない。

またもう一つの課題として、試行回数の検証がある。例えば、同じ

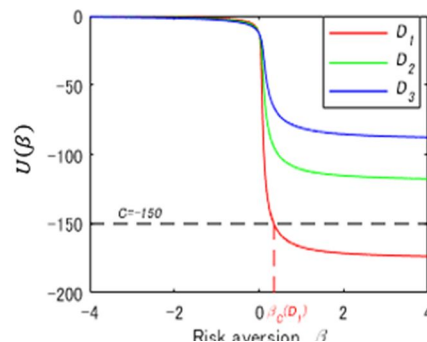


図4 IRRAの概念図

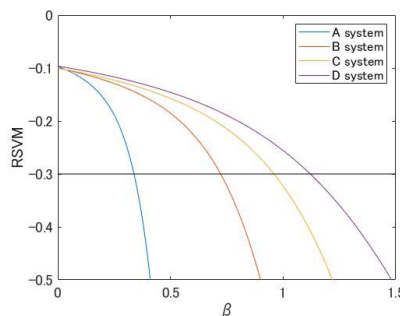


図5 IRRAによる の評価

表2 IRRAによるパラメータ $\beta$ の評価

ケース(内燃機・PV)	LOLP [日/年]	IRRA
A(13機・25台)	0.10	0.30
B(12機・110台)	0.10	0.71
C(11機・260台)	0.10	0.95
D(10機・420台)	0.10	1.10



離島系統モデルで、夏季の最大需要の平均値を 80MW と小さくし、かつ、内燃発電機を 12 機とした場合、LOLP は 0.0008 回/年、RSVM が -0.033 である。しかし試行回数を 10000 回から 100000 回に増やしたところ、LOLP が 0.00006 回/年、RSVM が -0.0015 となり、RSVM の値が大きく変わってしまった。このことから、試行回数が 10000 回のモンテカルロシミュレーションでは確率分布が十分には収束していません、その他のケースでの検証結果も合わせて考えると、このように LOLP が通常の基準値（すなわち LOLP=0.1 日/年）程度の信頼度のある系統では、故障などの不確実事象が起こることも稀頻度であるため、RSVM の値を正確に求めるためには 100000 回程度の試行回数が必要と考えられる。

#### 4. 研究成果

本研究の研究成果として以下のことが得られたものと考えている。

- (1) 太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギー電源の導入など、電力系統は従来型発電機である同期発電機主体の電源構成から大きく変化しつつある。それに伴い、供給信頼度に関わる停電時間などの確率分布の様相が変わりつつある。これらの再生可能エネルギー電源は比較的小容量であるが故障頻度は同期発電機に比べ高いことから、確率分布の最頻値は 0 でなくある値をもつものの、大規模な供給支障を起こす可能性は低いことから、確率分布の裾は短くなる。
- (2) これまでの供給信頼度指標はどれも期待値で表すものであり、確率分布が本来もつ多くの情報を捨象している。前項(1)で述べたように、系統によって停電時間などの確率分布が今後ますます異なってくることが予想されるため、確率分布全体を評価する供給信頼度指標が必要である。
- (3) 効用無差別価格を用いて財の価値を評価するリスク鋭感的価値尺度 (RSVM) は、形式的には積率母関数に一致することから、確率分布の情報を反映した評価尺度であるとも言える。この RSVM で停電時間などの確率分布を評価すれば、確率分布全体を評価する供給信頼度指標として用いることができる。
- (4) RSVM で供給信頼度を評価すると、従来の供給信頼度指標である電力不足確率 (LOLP) や供給支障電力量 (EUE) などで同等の供給信頼度と評価された場合でも、信頼度評価が異なる結果となる。特に RSVM では大きな供給支障をより悪く評価する。その点では、下方リスクを評価するバリュアットリスク (VaR) と似た結果が得られるが、VaR は下方リスクのみを評価し、RSVM は確率分布全体を評価する点が大きく異なる。

RSVM を用いた供給信頼度指標における今後の課題として、リスク回避度であるパラメータ  $\beta$  の設定が挙げられる。特に、一般に用いられている信頼度基準、例えば、LOLP=0.1 日/年をどのように  $\beta$  と関連付けられるかが課題である。本研究では内部リスク回避度 (IRRA) を用いて関連付けを試みたが、まだその途上にある。また、RSVM を求めるためにモンテカルロシミュレーションを行っているが、その試行回数についても今後さらなる検証が必要である。

#### < 引用文献 >

宮原孝夫、リスク鋭感的価値尺度法、リアルオプションと戦略、9 巻、2 号、2017、33-40

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 古川義英、宮内 肇、三澤哲也	4. 巻 139
2. 論文標題 リスク鋭感的価値尺度を用いた供給信頼度指標	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 356 ~ 362
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejpes.139.356	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 三澤哲也、宮内 肇	4. 巻 141
2. 論文標題 ファイナンスにおけるリスク評価手法の電力・エネルギー分野への適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会誌	6. 最初と最後の頁 496 ~ 499
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjournal.141.496	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hajime Miyauchi, Tetsuya Misawa
2. 発表標題 Application of Risk Sensitive Value Measure on Electric Power Systems
3. 学会等名 1st International Conference on Electrical and Information Technology（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮内 肇、三澤哲也
2. 発表標題 リスク鋭感的価値尺度を応用した電力系統の供給信頼度指標
3. 学会等名 令和3年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣山康貴、宮内 肇、三澤哲也
2. 発表標題 再生可能エネルギー電源をもつ電力系統のIRRAによる供給信頼度評価
3. 学会等名 令和3年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 嶺川 宙貴，宮内肇，廣山康貴，三澤 哲也
2. 発表標題 リスク鋭感的価値尺度に基づく電力系統の供給信頼度評価
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 嶺川宙貴，宮内 肇，三澤哲也，廣山康貴
2. 発表標題 リスク鋭感的価値尺度に基づく電力系統における供給信頼度評価
3. 学会等名 令和2年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣山康貴，宮内 肇，三澤哲也，嶺川宙貴
2. 発表標題 RSVMとIRRAによる再生可能エネルギー電源をもつ電力系統の供給信頼度評価
3. 学会等名 令和2年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋庭 駿、宮内 肇
2. 発表標題 小規模水力発電と分散型電源を有する孤立電力系統の供給信頼度
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶺川宙貴、宮内 肇、古賀貴裕
2. 発表標題 様々な電源構成におけるリスク鋭感的価値尺度に基づく供給信頼度評価
3. 学会等名 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古賀貴裕、宮内 肇、三澤哲也
2. 発表標題 再生可能エネルギー電源をもつ電力系統のRSVMを用いた供給信頼度評価
3. 学会等名 令和元年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	三澤 哲也  (MISAWA Tetsuya)  (10190620)	名古屋市立大学・大学院経済学研究科・教授    (23903)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------