

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2006～2009

課題番号：18206028

研究課題名（和文） 自律分散型電気エネルギー流通監視システム

研究課題名（英文） Distributed Autonomous Observation System for Transaction of Electric Energy

研究代表者

三谷 康範 (MITANI YASUNORI)

九州工業大学大学院工学研究院・教授

研究者番号：10192759

研究成果の概要（和文）：本研究では、電力系統の動特性監視を行うための一手法として GPS 時刻同期による多地点位相計測を用いた手法を用い、日本各地のみならずタイ、シンガポール、マレーシアに展開した需要家コンセント電圧計測による監視手法を実用的に構築した。解析手法、データ収集法、収集した大量データのデータベース化、データの可視化、イベントトリガ型データ収集・解析、系統安定化制御系開発、電力系統周波数制御特性解析といった一連の手法を共同で開発した。一方、手法を応用して屋内やビル内の電力の流れを解析する手法を開発し、省エネルギー化に供する手法を開発した。以上により分散して設置した計測器を自律的に用いることにより総合的に電気エネルギーを監視するためのシステム構築を行うことができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, a series of observation techniques for the electrical power systems by the measurement of the voltage of the customer outlet has been developed. The systems are installed in Japan by using the GPS time synchronization among various places with a method for power system analysis, a data collection method, database system design and a method to collect and store the bulk data, and visualization of analyzed results for the power system dynamics and the frequency control characteristics of interconnected power systems, etc. The system has been applied to the South-East Asian countries such as Thailand, Singapore and Malaysia. The event trigger type data collection, the dynamic system property analysis, and the stabilization control system were developed as feasible applications. The technique for analyzing the flow of the electric power in the house and the building by applying the technique was also developed for the purpose of energy savings. Consequently, the system to observe the electrical energy by using the distributed and autonomous measuring instruments was successfully developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
18年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
19年度	11,900,000	3,570,000	15,470,000
20年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
21年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
年度			
総計	37,500,000	11,250,000	48,750,000

研究分野：電力系統工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：位相同期計測, GPS, 自律分散, 電力系統, 状態監視, 安定度

## 1. 研究開始当初の背景

社会生活を支える重要な基盤システムである電力系統において、電力自由化は世界的な流れである。また、エネルギー・環境問題の顕在化により、自然エネルギーが積極的に電力系統に導入される傾向にある。競争的環境下において、電力系統の経済性、省エネルギー性、環境保全性を確保しつつ、信頼性、安定性を保証し、電気エネルギー利用における安全・安心を担保することが重要な課題となっている。こうした中、アジアを中心とする諸国では経済発展とエネルギー利用の電力シフトに伴い、電力系統の規模が急速に拡大している。石油やガスのパイプラインとともにエネルギー供給インフラとしての役割が強まり、国際間連系を睨んだ複雑で巨大なシステム構築が行われようとしている。系統規模の巨大化・複雑化ならびに競争的環境への移行に対応すべく、実時間で広域の電力系統基幹系情報をモニタリングし、制御・保護システムへ応用するための技術が世界的に盛んに研究されている。これらの中で、近年、GPS(Global Positioning System)衛星からの正確な時間信号を受けて多地点の電圧位相を同期計測する PMU(Phasor Measurement Unit)技術を利用した電力系統の広域監視に注目が集まっている。こうした背景の下で、研究代表者らのグループは、需要家のコンセント電圧に注目した小型分散型の PMU による広域電力系統特性の監視システムを提唱しその構築を進め、これまで全国 10 の大学の 100V コンセントに分散設置した小型 PMU により独自の大学間共同運用の電力情報計測ネットワークを構成してフェーザデータの収集と解析を実施してきた。これまでの研究によって、基幹系の広域安定度の推定、電力潮流特性の推定や周波数制御特性の把握を行い、広域あるいは PMU 近くの電力潮流情報の抽出にも成功してきた。さらに、H16 年度からはタイ国の 2 大学に、H17 年度にはシンガポールに PMU を設置して、これまでの日本における研究成果を応用したフィールド試験の準備を進めているところである。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記の実績を踏まえて、PMU 規格の世界標準に適合し、かつ電力品質の評価指標に適合しうる自律分散小型 PMU システムとしての電力系統広域動特性監視システムの構築、実システムを対象とした具体的な計測・演算機能の構築、電力品質(周波数、高調波)の監視や電力潮流監視など応用技術の開発を目指すと共に、取得データ解析に基

づく情報発信機能を開発することを目指す。広域電力系統の動特性監視においては、日本全体をカバーする監視システムの構築、タイ・マレーシア・シンガポールをカバーする国際連系を含む監視システムの構築を行い安定度のオンライン監視技術の開発、電力取引量の推定技術の開発など実用化応用技術の開発を行う。日本の電力系統においては、電力自由化後の電力取引の円滑化を図る役割を担う中立機関に対して、電力系統広域動特性を把握するための技術提供ができるシステムとしても期待される。電力取引監視、セキュリティ監視、事故波及解析、安定度マージン情報の提供、単独運転の検出を含む地域内の状態監視、地域内あるいは建物内の機器の電力情報管理、電気エネルギー流通の最適化による省エネルギー化など、さまざまな形態の電気エネルギー流通における社会的な要求に応えることのできるシステムの構築を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究開発は、A. わが国における電力系統動特性監視システムの構築と取得データの処理によりオンライン安定度評価・周波数制御貢献度評価・潮流監視を行うシステムを構築する、B. 国際共同研究体制の下、東南アジア国際連系電力系統における監視システム構築と実証試験を実施する、C. 自律分散的時刻同期データ解析処理技術および情報提供システムを開発する、D. 小型分散型 PMU システムのプラットフォーム化と基本機能の標準化をめざす、ことからなり、各項目間の密接な連携によりシステム化を図る。それぞれの研究計画は以下のとおりである。

### A. 広域電力系統動特性監視システムの構築と安定度評価

これまでの研究によって、西日本 60Hz 系統内の 8 大学と東日本 2 大学に設置した GPS 時刻同期型電圧位相計測装置を用いて、広域の電力系統動特性監視体制を整えてきた。また、九州工業大学と名古屋工業大学に取得したデータの管理・情報提供サーバを構築して、共同してデータを解析する体制ができた。本研究では、電力系統監視システムをより広域に展開して国内の系統すべての動特性を評価するために、北海道内、東日本 50Hz 系統内、西日本 60Hz 系統内あるいは安定度監視を実施したい地域系統内に必要に応じて機動的に(小型分散型の特徴を活かして)計測器を設置する。それにともない、現有の監視システムに改良を加え、解析のオンライン

化・高機能化をめざす。また、地域的な動揺成分の抽出、電力系統周波数制御特性の抽出、動揺解析結果に基づく電力系統制御系設計など収集データの解析処理技術および系統制御への適用技術などについて検討を行う。

#### B. 東南アジア国際連系電力系統におけるシステム構築と実証試験

タイ国タマサート大学の研究者および東芝アジア太平洋社の協力の下、東南アジア地域の電力系統動特性観測研究プロジェクトを推進し、共同でデータ取得と解析を行い、現地の事情に合わせたシステムの標準化を図る。タイ・マレーシア・シンガポールを中心とした東南アジア諸国は周辺諸国との連系により多国間で電力取引が可能な大規模電力システムを構築しようとしている。上記A.の研究テーマと連携しながら、地域的な電力事情に適合する東南アジア電力系統国際間連系におけるデータ収集、解析、安定度評価システム、情報発信機能の構築をめざす。

#### C. 自律分散的時刻同期データ解析処理技術および情報提供システムの開発

計測したデータはすべてデータサーバに記録して保存しているが、そのデータ量は計測地点の増加と計測の定常化に伴い膨大な量になっている。解析においてはそれらの一部を使っているのに過ぎない。とくに、地域電気エネルギー流通システムの最適運用などに計測システムを展開していくに当たり、計測システムの設置点は必要に応じて必要な場所すべてを対象とするようになるため数は膨大になる。そのため、電力ネットワークの階層的構造を考慮した自律分散的な処理体系を確立し、利用目的に応じてデータベースを階層的にクラスター化して管理することによってデータ利用の有効性を向上する。同時に、リアルタイム・オンデマンドでの電力情報提供システムの環境整備に向けた開発を実施していく。具体的には、広域電力系統動特性の監視・安定度評価においては、電力系統の事故が起こったことを検知して必要な広域データを収集解析する機構を有するイベントトリガ型のデータ収集機能や、電力系統安定度情報・系統事故伝播情報・周波数変動情報など系統各地点の電力情報のリアルタイム状態表示など情報提供機能について開発を進める。一方、地域電力流通システムへの応用においては、常時はデータベースの中で地域データ毎にサブセットを保存し、擾乱等のイベントが発生した場合に各計測に指令を与え、それまでに保存したデータを集めて解析を行うなど、イベントトリガ型の計測システムが重要になるものと考えている。こうした自律的分散処理型の計測システムの開発を順次進めていく予定である。

#### D. 小型分散型 PMU の開発とハードウェアのプラットフォーム化および基本機能の標準化

小型分散型電力系統監視システムの応用分野を開拓し、それらの仕様の標準化を図ることにより、装置のプラットフォーム化を検討する。応用分野としては、高調波伝播特性などに注目した電力品質の監視、地域電力供給システム内の電力潮流監視・電圧管理などを考えている。C.の小型分散型計測システムに必要な時刻同期の精度、すなわち、GPS 衛星からの時刻信号利用や標準電波利用、情報ネットワーク時刻同期などの利用を想定し、プロトタイプを試作をとおして標準化を検討していく。

以上、様々なタイプの電力状態量の計測機能に関して、用途に応じた様々な仕様策定が可能な汎用的な装置を開発することをめざして装置のプラットフォーム化を実現する。そして、開発を通して得られた知見を国際標準の創成に結実していく。

### 4. 研究成果

#### (1) 電力系統広域安定度の監視

GPS 同期位相計測装置を用いて需要家コンセントから観測した広域電力系統安定度評価システムを構築した。評価指標として、動態安定度を評価するための固有値推定、電力の揺らぎと位相角の揺らぎを用いた同期化力推定法、慣性中心の決定に基づく動揺特性の抽出など多面的・実用的な評価手法を構築した。日本国内では全国主要なキャンパス内に計測器を設置した観測網(キャンパス WAMS, Wide Area Monitoring System)を構築し、常時モニタリングを完成した。図 1 は 2004 年から継続的に監視した西日本 60Hz 系統の安定度の推移を表している。縦軸は固有値実部に相当する量で、0[1/s]が安定限界で下にあるほど安定であることを示している。夏・冬に安定度は低下方向へ推移し春秋に回復方向へ推移する。年末年始やゴールデンウィークには安定度向上方向への大きな推移が見られる。シンガポール、マレーシア、タイにも応用システムを設置し、日本との比較において各国特徴的な電力系統動揺特性のモニタリングを行うことができた。

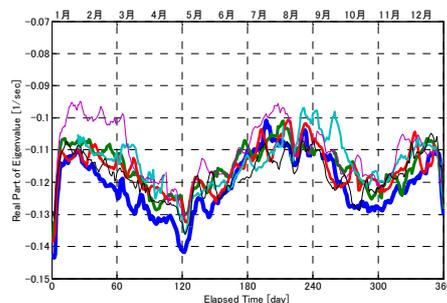


図 1 2004 以降の西日本 60Hz 系統安定度の推移

## (2) 動揺解析結果に基づく電力系統制御系設計

電力系統の広域安定度において支配的となる長周期動揺モードの特性および設計対象となる制御装置の構造を含む簡略動揺モデル構成による制御系設計方法を検討した。この方法では、観測情報に基づき電力系統の特性を簡略モデルとして表現するため制御系設計が容易かつ効率的になり、系統の状態変化や不確定性に対しても効果的に広域系統の安定化を図ることができる特徴を有している。

本方法のコンセプトは「電力系統の系統安定度制御方法及びシステム」として特許を取得した。さらなる高機能化のため、以下の項目について検討し、モデルシステムを用いたシステムシミュレーションによる解析を実施した結果、本手法適用による系統安定化を確認することができた。

- ①考慮されていない状態量の不安定化を防止するための改善策として、発電機端子電圧に着目した発電機内部状態の考慮による簡略モデル表現の検討
- ②制御系効果を明確に表現してより効果的な制御系設計を実現するため、観測情報を利用したシステム同定手法に基づく系統低次元化モデルの考案
- ③ロバスト性の考慮によるモデル化誤差や不確定性の補償に関する検討
- ④系統連系点近傍多地点における電圧・電流、周波数などの微小な変動情報を用いたくし形系統の等価2機発電機モデルへの縮約化の提案
- ⑤広域系統における同期位相角差情報を用いた階層型系統安定化装置（PSS:Power System Stabilizer）制御系設計手法の提案

## (3) 広域電力系統動特性監視の高機能化

電力系統の広域安定性において特に支配的となる弱制動の長周期動揺モードの特性を抽出するための信号処理方法を検討した。高速フーリエ変換を利用したバンドパスフィルタ処理を適用することで、任意の周波数帯を特定して動揺抽出を行うことができ、他の動揺成分を除去して着目する電力動揺成分のみを抽出できるようになった。

この処理方法を用いることで、電力会社間の系統連系線を越えた広域観測によらずとも、たとえば一電力会社管内など自系統内の任意の地点における位相情報からでも支配的電力動揺モードの特性把握が可能となった。さらに、系統端部一地点の周波数情報からでも支配的動揺モードの特性が抽出できるようになり、広域にわたる複数地点での計測で得られる結果と同程度の精度で電力動揺の安定度監視が可能であることを明らか

にして、位相計測の適応性を高めることができた。より柔軟な系統監視・運用・制御を実現するため、以下の各項目について検討し、構築した観測網で得られた位相データや系統シミュレーションによる解析を実施し、その有効性を確認した。

- ①安価な周波数計を利用した広域観測における時刻同期方法の考案と広域動特性監視の有効性検証
- ②大規模需要家における自家用発電設備を含む構内電力系統安定度監視への適用可能性の検討
- ③観測情報を用いた動揺モード寄与率の導出方法の検討
- ④動揺抽出におけるバンドパスフィルタ処理自動化のための基礎検討
- ⑤周波数変動のスペクトル標準偏差を用いたイベントトリガ型外乱検出法による検出精度の向上
- ⑥多地点位相角差情報を利用した事故種類および発生点の特定手法の提案と事故データに基づく有効性検証

## (4) 自律分散的なオンライン状態監視システムの構築

情報提供システムの一つとして、各地の位相計測結果を周波数偏差一位相差平面に逐次プロットする方法を考案した。図2のように表示されるデータについて、そのデータ群の挙動をオンラインで監視することにより、任意のユーザが家庭用コンセント電圧の観測によって簡便に広域電力系統の挙動の概要を把握できるようになることを示した。データ群を捉えることで、特別な信号処理の手続きを省略してシステムの簡略化を追求しつつ、データ通信のエラーの問題を克服し、ノイズを多分に含む電力系統の末端における計測を可能にした。また、図2のように標準的なデータ窓（図中緑色の四角窓）を設けて監視することで、イベントトリガとしても機能する。任意のユーザが独自に構築できる計測システムであることから、例えばスマートグリッドの構想の中で、分散形電源やマイクログリッドなどの所有者が、自らの意志によって電力系統の状態を監視し、その周波数制御に貢献しようとする場合などに有効なオンライン監視システムと考えられる。

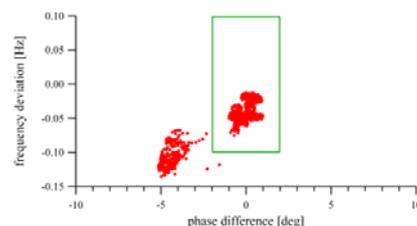


図2 電源解列時のモニタ例

国内外へのインパクトとしては、研究期間全体に亘って電力系統解析・制御技術分野の国内外への成果発表を行ってきたが、とりわけ最終年度においては、系統保護や産業応用分野といった異なる分野の国内外技術者への成果発表と意見交換に努めた。系統保護分野においては、国内をはじめとし、アジア、ロシアを含む欧州、米国、南米において、広域系統保護技術に対する一定の期待が高まりつつあるなか、特に末端の計測結果であっても、ある一定の情報が得られることを確かめた点が高く評価された。

また、小型分散形 PMU プロトタイプの開発を目的として、計測・信号処理・通信の機能分化とモジュール化による低コスト化、多様な用途に応じたソフトウェアの開発が可能な処理体系の合理化などを実現する装置の基本設計を行い、仕様策定における標準化について検討した。

この後の展開として、この監視方法によるイベントトリガ機能の充実とマイクログリッドへの適用を想定した小型分散形 PMU の開発と、これらの装置の多数台分散形電源やマイクログリッドにおける潮流制御・電圧制御への適用などの効果検証といった、本監視方法に適した制御技術開発の新しい研究課題への取り組みに着手したところである。

#### (5) データサーバの構築

増加する膨大な計測データを効率的に管理可能なデータ構造に関する検討を行い、一次データを変換・集約し、効率的にアクセス可能なデータ構造をもつデータサーバを構築した。その際、一次データからアクセスの容易なデータ構造へ逐次変換する機構としているため、イベントトリガ型の処理も可能となっている。また、膨大なデータを管理するため分散処理技術を導入し、より拡張が容易なシステムとした。前述のように、利用するデータは蓄積された膨大なデータの一部のみである。そのため、効率的な検索・抽出機能を有するデータベースアクセス機能を付与した。さらに、データサーバでの視覚可処理を実現することにより、データ利用者による当該データの有用性の判定ができるようになったことなど、操作性の容易なデータサーバを構築でき、利便性が大きく向上した。このように情報提供システムの高度化によってより多くの研究者が容易にデータにアクセス可能なインフラを構築できたものと考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- ① 橋口卓平, 渡邊政幸, 合田忠弘, 三谷康範, 佐伯修, 北條昌秀, 鶴飼裕之, 多地点同期計測データに基づく慣性中心周波数の推定法, 電気学会論文誌B, 査読有, 130 巻, 1 号, 2010, pp. 106-113

- ② Issarachai Ngamroo, Cuk Supriyadi Ali Nanda, Sanchai Dechanupaprittha, Masayuki Watanabe, Yasunori Mitani, A robust SMES controller design for stabilization of inter-area oscillations based on wide area synchronized phasor measurements, Electric Power Systems Research, 査読有, Vol.79, No.12, 2009, pp.1738-1749
- ③ 李 長松, 渡邊政幸, 三谷康範, Bessie Monchusi, Participation Weight Estimation in Power Oscillation Mode Based on Synchronized Phasor Measurements and Auto-spectrum Analysis, 電気学会論文誌B, 査読有, 129 巻, 12 号, 2009, pp. 1449-1456
- ④ Issarachai Ngamroo, Cuk Supriyadi Ali Nanda, Sanchai Dechanupaprittha, Yasunori Mitani, Power Oscillation Suppression by Robust SMES in Power System with Large Wind Power Penetration, Elsevier Physica C, Vo.469, Issue 1, pp. 44-51
- ⑤ Sanchai Dechanupaprittha, Komsan Hongesombut, Masayuki Watanabe, Yasunori Mitani, Issarachai Ngamroo, A Practical Design of Fuzzy SMES Controller based on Synchronized Phasor Measurement for Interconnected Power System, International Journal of Emerging Electric Power Systems, 査読有, Vol.9, No.5, 2009, 6 pages
- ⑥ 渡邊政幸, 橋口卓平, 三谷康範, 佐伯修, 北條昌秀, 鶴飼裕之, 多地点同期位相計測に基づく電力系統広域安定度推定における観測地点変更時の精度向上, 電気学会論文誌B, 査読有, 128 巻, 1 号, 2009, pp. 84-90
- ⑦ 渡邊政幸, 橋口卓平, 泉貴紀, 三谷康範, 広域位相計測に基づく電力系統広域安定化制御, 電気学会論文誌B分冊, 査読有, 126 巻, 12 号, 2006, pp.1199-1206

〔学会発表〕(計 98 件)

- ① Changsong Li, Analysis of Kita-Hon HVDC Link for Load Frequency Control of Eastern Japan 50-Hz Power, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2010), 2010 年 3 月 30 日, Chengdu, China
- ② 藤本真大, 多地点同時電圧計測による電力使用状況可視化システム, 平成 22 年電気学会全国大会, 2010 年 3 月 19 日, 明治大学, 東京
- ③ 林田徹, 実測データを用いた広域動揺の P- $\delta$  曲線の推定, 平成 22 年電気学会全国大会, 平成 22 年 3 月 19 日, 明治大学,

- 東京
- ④ 山尾秀行, 広域同期位相計測による電力系統安定度推定における動揺モード抽出に関する検討, 平成 22 年電気学会全国大会, 平成 22 年 3 月 19 日, 明治大学, 東京
- ⑤ 添田裕介, 位相計測を利用した電力システム同定による系統安定化装置設計, 平成 22 年電気学会全国大会, 平成 22 年 3 月 19 日, 明治大学, 東京
- ⑥ 北條昌秀, 需要家端における同期位相計測による電力系統オンライン状態観測法とその結果, 電気学会全国大会, 平成 22 年 3 月 19 日, 明治大学, 東京
- ⑦ 北條昌秀, 需要家端の同期電圧位相計測による電力系統オンライン状態観測, 電気学会電力系統技術研究会資料, 平成 22 年 1 月 21 日, 福井工業大学, 福井県
- ⑧ Yasunori Mitani, Power System Monitoring by Campus WAMS (Wide Area Measurement System), International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications, 平成 21 年 12 月 19 日, Langkawi, Malaysia
- ⑨ Sanchai Dechanupaprittha, An Improved Controller Design of Distributed Energy Resources based on Synchronized Phasor Measurement and Metaheuristic Optimization, IEEJ-EIT Joint Symposium on Advanced Technology in Power Systems, 平成 21 年 11 月 26 日, Bangkok, Thailand
- ⑩ Takuhei Hashiguchi, Analysis of Power System Dynamics Using Center of Inertia Estimated by Actual Measurement Data, IEEJ-EIT Joint Symposium on Advanced Technology in Power Systems, 平成 21 年 11 月 26 日, Bangkok, Thailand
- ⑪ Sanchai Dechanupaprittha, A Practical Controller Design of Distributed Energy Resources for Stabilization of Interconnected Power System based on Synchronized Phasor Measurements, TENCON 2009 (IEEE Region 10 Conference), 平成 21 年 11 月 25 日, Singapore
- ⑫ Masahide Hojo, Real-Time Power System Monitoring at Demand Sides by Campus Wide Area Measurement System, The 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2009), 平成 21 年 11 月 4 日, Porto, Portugal
- ⑬ Masahide Hojo, Online Power System Monitoring by Campus Wide Area Measurement System, Advanced Power System Automation and Protection 2009 (APAP2009), 平成 21 年 10 月 20 日, 済州島, 大韓民国
- ⑭ 添田裕介, 位相計測を利用した電力系統

低次元化による系統安定化装置設計, 平成 21 年度電気関係学会九州支部連合大会, 平成 21 年 9 月 29 日, 九州工業大学, 福岡

- ⑮ 藤本真大, 多地点同時電圧計測を用いた建物内電力使用状況の可視化, 平成 21 年度電気関係学会九州支部連合大会, 平成 21 年 9 月 29 日, 九州工業大学, 福岡
- ⑯ 林田 徹, 同期位相計測による電力相角曲線に着目した電力系統の過渡安定度評価, 平成 21 年度電気関係学会九州支部連合大会, 平成 21 年 9 月 29 日, 九州工業大学, 福岡
- ⑰ 阿部 恵一, CampusWAMS による外乱発生時の電力系統の状態観測, 電気関係学会四国支部連合大会, 平成 21 年 9 月 26 日, 愛媛大学, 愛媛

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: 電力系統の系統安定度制御方法及びシステム

発明者: 三谷康範

権利者: 九州工業大学

種類: 特許

番号: 4069209

取得年月日: 2008 年 01 月 25 日

国内外の別: 国内及び米国

[その他]

ホームページ等

<http://wwwpmu.pwr.eng.osaka-u.ac.jp/project/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

三谷 康範 (MITANI YASUNORI)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 10192759

### (2)研究分担者

渡邊 政幸 (WATANABE MASAYUKI)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 90398115

佐伯 修 (SAEKI OSAMU)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 20252596

北條 昌秀 (HOJO MASAHIDE)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス

研究部・准教授

研究者番号: 10314840

鵜飼 裕之 (UKAI HIROYUKI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 40135405