

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21760214

研究課題名（和文） 優先度を考慮した将来型配電システムの自律分散型電圧分布制御方式

研究課題名（英文） A Study on Autonomous Decentralized Voltage Profile Control Method in Future Distribution Network considering Control Priority

研究代表者

辻 隆男 ( TSUJI TAKAO )

横浜国立大学・工学研究院・助教

研究者番号：00432873

研究成果の概要（和文）：

研究代表者は先行研究において、大量の分散電源を含む配電システムで問題となる電圧変動を、分散電源群のインバータ制御により適正化する自律分散的な手法を開発してきた。本研究課題では、制御システムを仮想的に多重化することで、インバータの空き容量を有効に活用する手法を実現した。また高圧および低圧の配電システムから構成される階層型配電システムモデルを用い、高低圧双方が協調的に動作することで、電圧維持と共に配電損失を低減できる手法を検討した。

研究成果の概要（英文）：

In the distribution network with a large amount of distributed generators, it becomes important issue to maintain the system voltage. We had been developed an autonomous decentralized voltage control method using reactive power control of inverter in his previous works. In this study, we proposed a new method which can utilize the free capacity of inverter effectively by duplicating the control system virtually. Additionally, the cooperative control method between high and low voltage distribution systems is also developed in order to reduce the distribution power loss.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

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

キーワード：配電システム、分散型電源、電圧-無効電力制御、自律分散型制御、配電損失、インセンティブ制度

## 1. 研究開始当初の背景

化石燃料に頼らない持続可能なエネルギー社会の実現を目指すため、自然エネルギーを活用した分散型電源の配電システムへの導入が進んでいる。特に我が国においては太陽光発電の大量導入が国策として推進されてお

り、その期待は大きい。大量の分散型電源が連系された配電システムでは、逆潮流（需要家から電力系統側への電力の流れ）の発生に伴い電圧分布が複雑化し、その適正化制御が重要な課題となる。この問題の解決を目指して、これまでに「系統連系インバータ」の無効電

力制御機能の活用を提案してきた。無効電力は配電系統の電圧と密接な関係にあるため、複数台の分散型電源において適切な無効電力制御を実施することにより、電圧分布を適正化できる可能性がある。しかし分散型電源が大量に導入されている場合、制御対象となる設備が非常に大量に存在することになり、効率的な運用制御の実施は容易ではない。したがって新たな運用制御手法の開発が必要である。特にインバータの容量に空きがない場合は、インバータの電流制約の観点から無効電力制御のために有効電力の出力抑制が必要となるため、この出力抑制量を極力低減することが重要な課題となる。

2007年度から2008年度にかけて実施した研究課題「むだ時間を考慮した将来型配電系統の自律分散型制御方式の研究」（課題番号：19860035）では、系統連系インバータの容量に空きがない状況を想定して、自律分散型の電圧維持制御手法を検討した。しかし現実には、系統連系インバータに容量の空きが存在する場合があるため、これを適切に活用することが重要である。

## 2. 研究の目的

上記背景の下、本研究課題では系統連系インバータに空き容量がある場合を想定し、これを有効に活用した電圧維持制御手法の検討を行う。具体的な検討項目は以下の通りである。

### (1) 空き容量を優先的に活用できる自律分散型制御方式の開発

系統連系インバータの空き容量を用いた無効電力制御を、有効電力の出力抑制を伴わないことから「優先度の高い制御」と位置づけ、これを優先的に活用できる自律分散型制御論理の構築を行った。

### (2) 自律分散型制御の動特性の検討

上記(1)の自律分散型制御方式の動特性を確認し、更なる安定化を行うことは重要な課題である。本検討項目では、まだ優先度の考慮は行っていないものの、2007年度～2008年度の実施で開発した自律分散型制御方式を対象に制御の動特性の検討を行い、具体的な制御系の設計手法を提案した。

### (3) 配電損失低減制御手法の開発

上記(1)の制御方式では、前述の通り配電線の無効電力潮流の増加を引き起こす場合があり、電流の増加に伴う配電損失の増加が懸念される。そこで本検討項目では、電圧維持制約の下で配電損失低減を達成できる無

効電力制御手法を、自律分散的なアプローチにより開発した。

### (4) 階層型電圧分布制御方式の開発

我が国における配電系統は、主に高圧系統と低圧系統から構成されている。2007年度～2008年度の研究課題では高圧系統のみを対象にした制御方式を検討していたが、本検討項目では高低圧の両方から成る配電系統モデルを対象として、電圧制御手法の検討を行った。

### (5) 空き容量を考慮したインセンティブ制度の検討

分散型電源を所有する需要家がインバータの制御を行う場合、前述の通り有効電力の出力抑制が生じる可能性があるため、当該の需要家には経済的な損失が生じる。したがって本制御方式に協力する積極的な誘因は存在しないと考えられる。そこで、制御協力する需要家に対してインセンティブを付与する制度を提案した。本制度の検討は2007年度～2008年度の検討にも含まれているが、空き容量を考慮できるよう拡張し、さらに配電損失低減に対する貢献度も評価する点が新規点である。

## 3. 研究の方法

### (1) 空き容量の活用

図1に示す通り、複数の分散電源から成る制御システムを、仮想的に二つの系統に分割する。この仮想系統1および2は、「インバータの空き容量を活用した無効電力」および

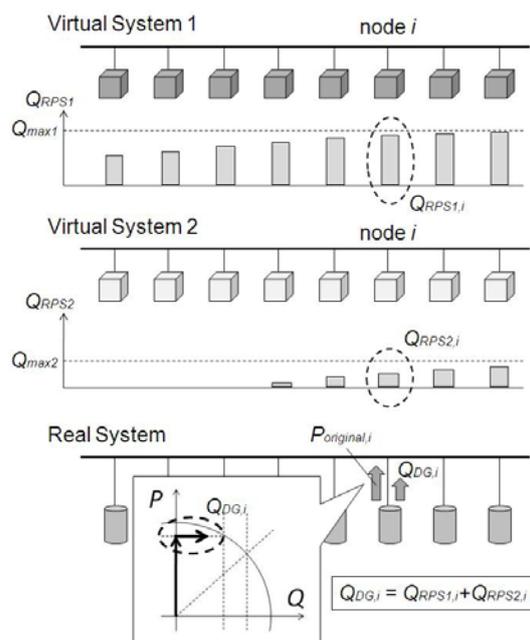


図1 仮想系統の概念

「有効電力出力抑制を伴う無効電力」が、それぞれ制御対象である。各仮想システムでは、電圧逸脱が生じたノードにおいて無効電力制御が開始し、制御効果が順次隣接する分散電源へと伝達されていく。本方式では優先度の高い仮想システム1で制御行動の伝達が高速に行われるように、仮想システム2に比較して1で制御ゲインを大きく設計する。これにより図1の通り、仮想システム1の制御のみで電圧維持が十分でない場合に限り、仮想システム2の制御が働くことになる。

## (2) 動特性の検討

自律分散型制御の動特性を検討するため、これまでに開発した制御方式を図2のブロック図の制御系で表す。制御入力に用いる情報は、自端電圧、自らの無効電力制御量、および隣接する分散電源の無効電力制御量であり、自端電圧に対しては3次関数による非線形制御を適用している。

同ブロック図を活用して、最終値の定理による定常解の評価、および極配置による動特性の評価、この双方を勘案して制御ゲインを決定する。

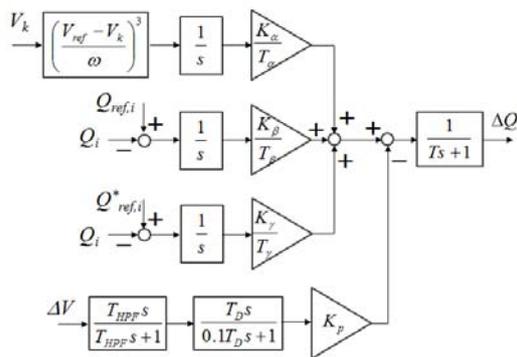


図2 自律分散型制御のブロック図

## (3) 配電損失低減制御

インバータが無効電力を吸収することで電圧上昇を抑制する方式では、配電線を通る無効電力潮流の増加により、配電損失が増加するおそれがある。あるノードにおける無効電力制御が、配電線の無効電力潮流を減少させる効果は、図3のように表現できる。そこで本方式では、フィーダ上流に連系するインバータ群が無効電力を配電線に供給するように働くことで、配電線を通る無効電力潮流を減少させることを目指す。

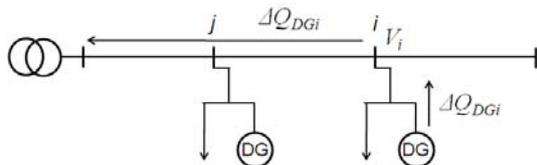


図3 無効電力制御による潮流変化

## (4) 階層型電圧分布制御

近年、高圧系統にはセンサ付区分開閉器などの導入が検討され、電圧降下や電流分布など、様々な情報を共有した集中管理の実現が今後期待される。一方で低圧系統は、その設備量の多さから集中管理には多くの困難を伴う。そこで本検討項目として、高圧系統では最適化技術に基づく集中運用方式を採用し、低圧系統では無線通信を用いた自律分散型運用方式の採用を想定する。この両者に関して、本検討では図4に示す通り、柱上変圧器におけるエージェントを介して互いに協調する方式を開発した。具体的には、高圧系統の最適化に資するように低圧系統が群として無効電力潮流を調整する。

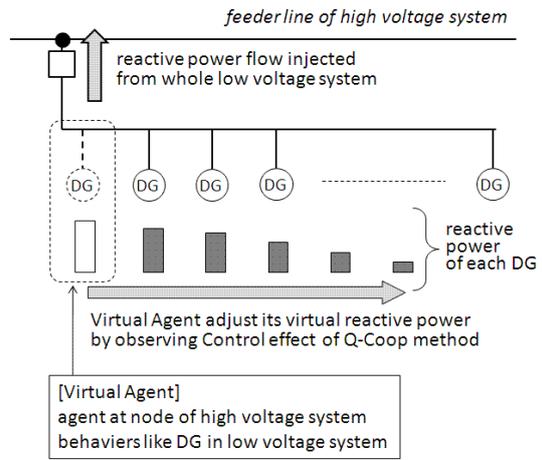


図4 高低圧系統間の協調運用方式

## (5) インセンティブ制度

無効電力制御による電圧調整効果は、各ノードにおける電圧-無効電力制御感度の差異に起因して、各分散電源ごとに大きく異なる。本方式では図5に示すように、分散型電源の単位量あたりの無効電力制御量による電圧分布の変動分を、全ノードにわたり積算し、これを電圧影響度と定義する。各分散電源所有者には、分散電源出力が電圧上昇を引

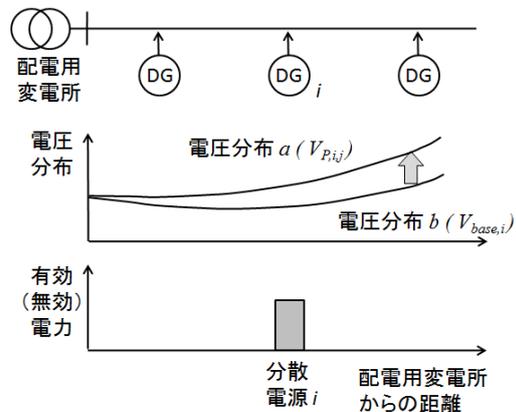


図5 電圧影響度

き起こした度合いに応じて連系料金を課金し、電圧維持制御への貢献度が大きい需要家には報奨金が配分される。また各分散電源の無効電力出力を仮想的に0にした場合の配電損失の変化から、配電損失低減への貢献度も評価し、その報奨金を決定する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 空き容量の活用

24ノードから成るモデルシステムに対して提案手法を適用し、電圧変動および空き容量を活用した制御量を、それぞれ図6、図7に示す。制御感度の高い系統末端側を中心に、複数の分散電源が協調的に無効電力を制御し、分散電源出力の変動に起因した電圧変動を規定の範囲に抑制できている。

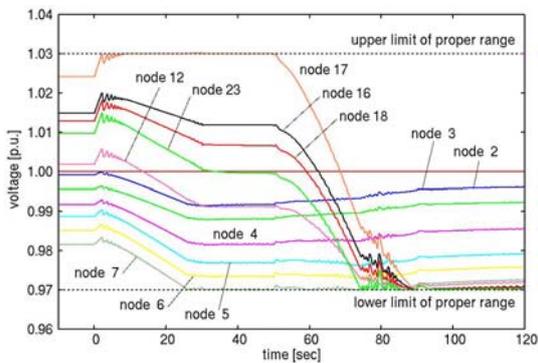


図6 電圧変動

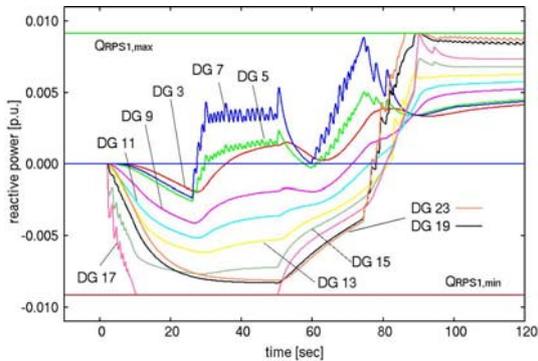


図7 無効電力制御量

##### (2) 動特性の検討

4ノードから成るモデルシステムに対し、非線形制御による自律分散型制御論理を構築し、3章に示した手法で制御系パラメータを決定した。本制御手法の適用がない場合には、太陽光発電出力の変動により、日間を通じた電圧変動が図8の通り与えられる。これに対し提案手法の適用により、電圧変動が図9の通り抑制される結果を得た。

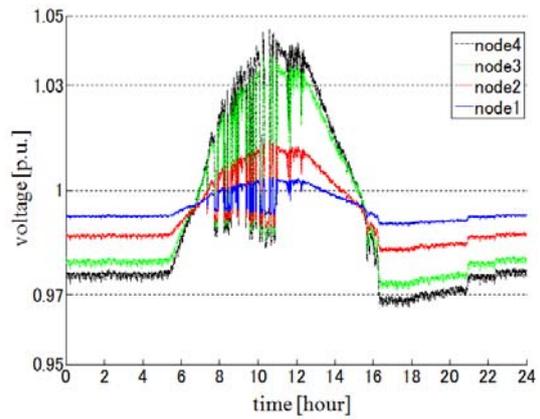


図8 日間の電圧変動

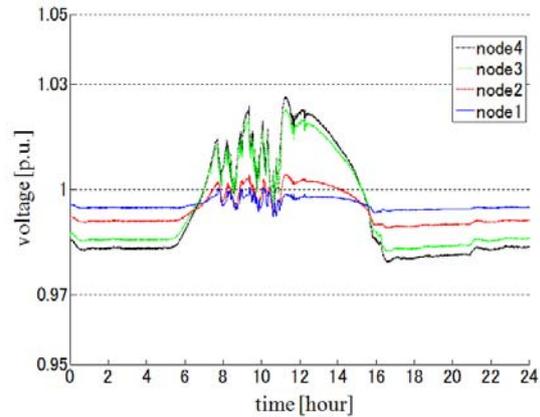


図9 提案手法の適用結果

##### (3) 配電損失低減制御

図10に、電圧維持のみを目的とした電圧制御方式と、配電損失の低減も目指した方式による、日間の配電損失の変化を示す。夜間の時間帯を中心に、配電損失が大きく低減できる結果を得た。

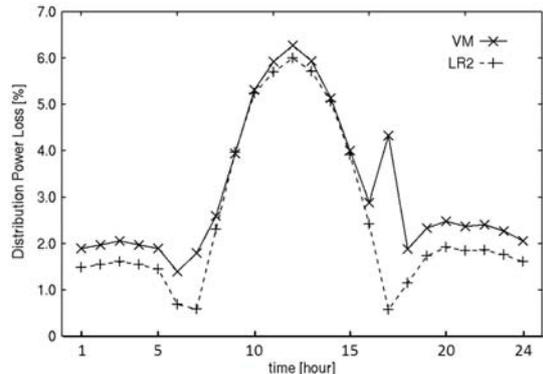


図10 日間の配電損失の比較

##### (4) 階層型電圧分布制御

高圧系統と低圧系統から構成される図11のモデルシステムを構築し、太陽光発電出力の変動に対して提案手法を適用した。電圧変動を図12に示す通り基準値から3%以内に抑制しながら、図13の通り配電損失の低減も実現できる結果を得た。

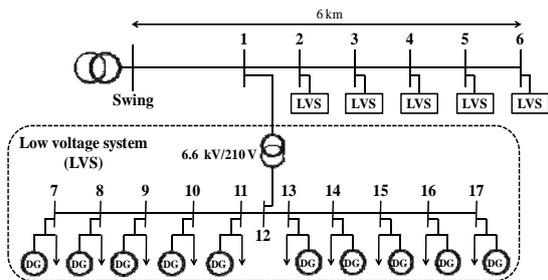


図 11 階層型配電システムモデル

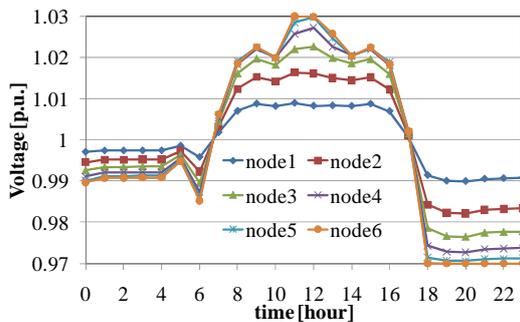


図 12 日間の電圧変動

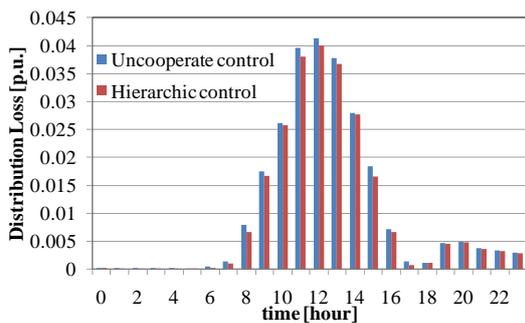


図 13 日間の配電損失

(5) インセンティブ制度

24 ノードから構成される配電システムモデルに対して提案手法を適用した。図 14 には、分散電源の系統連系に対して多くの需要家に幅広く課金し (OLF), これを原資として、電圧制御への貢献度が大きい系統末端側の需要家を中心に、電圧制御報奨金が配分されている様子を示す。また図 15 には、配電損失低減への貢献度を評価した結果を示す。系統上流側の分散電源は、配電線に無効電力を注入することで配電用変電所から供給される無効電力制御量を減少させることが可能であり、配電損失低減に寄与できていることが分かる。

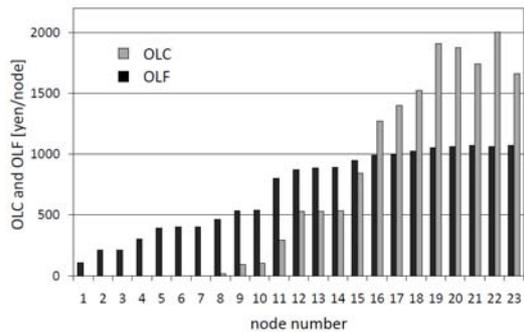


図 14 系統連系料金と電圧制御報奨金の例

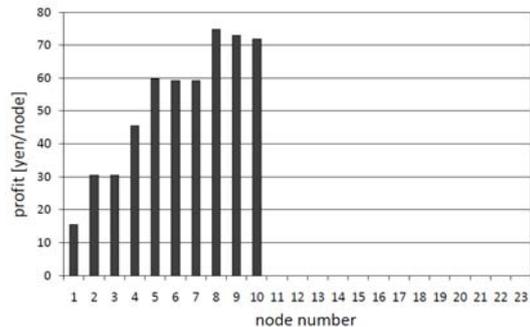


図 15 配電損失低減報奨金

以上の通り本研究課題の遂行により、太陽光発電をはじめとする分散電源大量導入時の配電システムにおける電圧管理の在り方について、静特性・動特性・経済性、などの幅広い観点から、運用制御技術の発展に貢献できた。

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)

- ① 辻隆男, 坂本憲一, 大山力, 橋口卓平, 合田忠弘, 進士誉夫, 辻田伸介: “配電システムにおける電圧維持制御のための分散電源連系料金と報奨金制度の検討”, 社会経済研究, No. 59, pp. 25-36 (2011) (掲載確定) 査読有
- ② 辻隆男, 大山力, 橋口卓平, 合田忠弘, 進士誉夫, 辻田伸介: “配電損失低減を目的とした将来型配電システムの自律分散型電圧分布制御方式”, 電学論 B, Vol. 130, No. 11, pp. 941-954 (2010) 査読有
- ③ 辻隆男, 橋口卓平, 合田忠弘, 進士誉夫, 辻田伸介: “優先度を考慮した将来型配電システムの自律分散型電圧分布制御方式”, 電学論 B, Vol. 129, No. 12, pp. 1533-1544 (2009) 査読有

〔学会発表〕(計8件)

- ① 辻隆男, 古舘優, 大山力, 橋口卓平, 合

- 田忠弘, 進士誉夫, 辻田伸介: “分散型電源を含む配電系統の階層的電圧分布制御方式の検討”, 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, PSE-10-191, pp.133-138 (2010) 広島大学 (2010年9月30日発表)
- ② Tran Nguyen, 辻隆男, 大山力, 橋口卓平, 合田忠弘, 進士誉夫, 辻田伸介: “配電系統の電圧分布制御における経済性を考慮した協調的タップ制御方式の検討”, 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, PSE-10-188, pp.121-126 (2010) 広島大学 (2010年9月30日発表)
- ③ 辻隆男, 伊藤良太, 大山力, 橋口卓平, 合田忠弘, 進士誉夫, 辻田伸介: “将来型配電系統の自律分散型電圧分布制御方式における制御系設計手法の検討”, 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, PSE-10-190, pp.127-132 (2010) 広島大学 (2010年9月30日発表)
- ④ Tran Nguyen, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama, Takuhei Hashiguchi, Tadahiro Goda, Takao Shinji, and Shinsuke Tsujita: “A Study on Cooperative Tap Control Method of Distribution Network with Distributed Generators for Reduction of Distribution Power Loss”, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering, T&DS-07 (2010) Paradise Hotel, Busan, Korea (2010年7月14日発表)
- ⑤ Takao Tsuji, Yu Furudate, Tsutomu Oyama, Takuhei Hashiguchi, Tadahiro Goda, Takao Shinji, and Shinsuke Tsujita: “A Study of Cooperative Control Method in High and Low Voltage Distribution Network for Voltage Maintenance Using Wireless Communication”, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering, T&DS-01 (2010) Paradise Hotel, Busan, Korea (2010年7月14日発表)
- ⑥ 坂本憲一, 辻隆男, 大山力, 橋口卓平, 合田忠弘, 進士誉夫, 辻田伸介: “DGの種類を考慮した電圧分布最適化制御と補償金制度の検討”, 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, PSE-09-184, pp.89-94 (2009) 早稲田大学 (2009年9月17日発表)
- ⑦ 辻隆男, 大山力, 橋口卓平, 合田忠弘, 進士誉夫, 辻田伸介: “配電損失を考慮した将来型配電系統の自律分散型電圧分布制御方式”, 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, PSE-09-186, pp.101-108 (2009) 早稲田大学 (2009年9月17日発表)
- ⑧ 辻隆男, 橋口卓平, 合田忠弘, 進士誉夫, 辻田伸介: “優先度を考慮した将来型配電系統の自律分散型電圧分布制御方式”, 電気学会平成21年度電力・エネルギー部門大会, 10, CD-ROM (2009) 芝浦工業大学 (2009年8月18日発表)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

辻隆男 (TSUJI TAKAO)  
 横浜国立大学・工学研究院・助教  
 研究者番号: 00432873

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし