

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04460

研究課題名(和文)大規模MIMOシステムにおけるルースビームフォーミングの実現

研究課題名(英文)Realizing of loose beamforming in massive MIMO system

研究代表者

西村 寿彦(Nishimura, Toshihiko)

北海道大学・情報科学研究院・教授

研究者番号：70301934

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：マルチユーザ大規模MIMO システムでは、基地局に100 素子以上の送信アンテナ素子を配置することに伴い、ウェイト形成の計算量が著しく増大する。このため、送信に使用するアンテナを選択するのみでウェイトを生成する簡易ビーム形成という手法が提案されている。本研究では、進化アルゴリズムの手法であるバイナリ差分進化や量子アニーリング、そして直接二値探索法といった、組み合わせ最適化手法を適用し、従来の学習時評価関数および、提案した評価関数によって実際に準最適解を生成したのち、その性能を下り回線における全ユーザのチャネル容量の総和を各種基準で評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

送信に使用するアンテナ素子数の増加に伴い、送信プリコーディングにおけるウェイト生成の際の計算量の増加が懸念されている。ユーザ毎に送信に使用するアンテナを選択することで簡易的にビーム形成を行う手法を提案し、検討を行ってきた。ユーザ数とアンテナ素子数の増加に伴いその組み合わせが爆発的に増加するので、効率的なアンテナ選択法の開発が必要だが、計算量を考慮しない最適なビームフォーミングに匹敵する簡易なアンテナ選択法は、まだ見つかっていない。本研究では、ルースビームフォーミングと名付けたこの簡易的なビーム形成法を実現し、送信機における信号処理を大幅に軽減することを目的とする。

研究成果の概要(英文)：In a multi-user large-scale MIMO system, the computational complexity of weight formation increases significantly due to the placement of more than 100 transmitting antenna elements at the base station. For this reason, a method called loose beam forming has been proposed to generate weights by simply selecting the antenna elements to be used for transmission. In this study, we apply combinatorial optimization methods such as binary differential evolution, quantum annealing, and direct binary search, which are evolutionary algorithms, to generate quasi-optimal solutions by using conventional and proposed evaluation functions, and then evaluate the performance of the quasi-optimal solutions using the total channel capacity of all users in a downlink. The performance is evaluated by various criteria based on the sum of channel capacities of all users in the downlink.

研究分野：無線通信工学

キーワード：ルースビームフォーミング マルチユーザ大規模MIMOシステム アンテナ選択 遺伝的アルゴリズム  
アニーリング 直接二値探索法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1 . 研究開始当初の背景

現在、移動体通信のトラフィック量は、スマートフォンやタブレットの普及により急速に増加している。これに対応するため、第 5 世代移動通信システム(5G)の開発が進められ、2019 年秋にプレサービスが始まり、2020 年春には本格的なサービスに移行した。その後も、更なるサービス向上に向けた研究開発は、様々な技術に関して進められている。5G そのものの品質向上を目指すのみでなく、将来の移動通信システムに向けた技術開発も視野に入れ(ピヨンド 5G や 6G として)更なる研究が行われている。

5G では、大容量通信・高速データ伝送・多数端末の同時接続などの要求条件を実現するため、基地局側に 100 素子程度のアンテナを配置する大規模 MIMO システムと呼ばれる技術の研究がなされている。MIMO とは、送信側受信側双方に多数のアンテナ素子を配置することで、通信容量や信頼性を向上させるものである。従来の、素子数が少ない MIMO システムに比較して、周波数利用効率を高めることができ、システム全体のスループットを大きくすることが可能となる。アンテナ素子を多くすることで、形成されるビームを鋭く、かつ、利得を大きくすることが可能となり、また、チャンネル行列の自由度が大きくなることから、より多くの端末を収容することが可能となるためである。

ところが、全てのアンテナ素子に送受信機能を備えるフルデジタル MIMO システムを考えると、ベースバンド処理回路やアップコンバータなどがアンテナ素子と同数必要となり、それに伴い製造コストと消費電力が非常に大きくなるという問題がある。また、アンテナ素子数の増加は、チャンネル行列の次元の増加につながり、デジタル信号処理によるビーム形成のための計算コストも莫大になる。従来の素子数の少ない MIMO システムでは、すべての送信アンテナ素子についてウェイトを作り、各ユーザへの送信ビームを形成する。この場合、アンテナ素子数に対して 3 乗で計算量が増加する。そのため、膨大なアンテナ本数を抱える大規模 MIMO 環境下では計算量も膨大になってしまうという課題が生まれる。

## 2 . 研究の目的

アンテナ素子が多くなれば、チャンネル行列の要素に独立性の高いもの、すなわち相関の低い組み合わせが多く得られる可能性が高くなる。例えば、文献[1]では、大規模 MIMO の実伝搬環境でのチャンネル測定を通して、すべてのアンテナが同等にビーム形成に寄与するわけではないことを示している。したがって、ビーム形成に寄与の大きな素子のみを選択すれば、特性を大きく劣化させることなく実際に用いるアンテナ素子数を削減することができ、上記の様々なコストの低減が可能となると予想される。究極的には、希望するビーム形成をアンテナ選択のみで行うことができれば、大幅なコスト削減につながると期待できる。ただし、この選択は 1 ユーザに対しては有効でも、他ユーザに対しては干渉となる場合が多い。このことは、送受信アンテナ間のチャンネルに依存する。

研究代表者らは、このアンテナ選択のみで簡易的なビーム形成を行う方法を、ルースビームフォーミングと名付け、遺伝的アルゴリズムを利用してこの手法の潜在能力、すなわち有効性について評価を済ませている。しかしながら、最適なウェイト制御を行った場合と特性を比較した場合、ユーザ間干渉を低減することが難しいことがわかった。また、遺伝的アルゴリズムでは、局所的最適値に落ち込み、大域的最適値が得られないことがある。大域的最適値を得るには、アンテナ選択のすべての組み合わせを試す必要があるが、ルースビームフォーミングでは、アンテナ選択の組み合わせが非常に多いため、現実的な時間内では処理が終わらない、いわゆる MP 困難となっている。そこで、本研究では、進化アルゴリズムの一手法であるバイナリ差分進化や量子アニーリング、そして直接二値探索法といった、組み合わせ最適化手法を適用し、最適なアンテナ選択を実現する。最終的には、この最適なアンテナ選択の傾向を見極めて、簡易的にアンテナ選択を行う手法を開発し、その効果を評価する。

ルースビームフォーミングの有効性が大きければ、前述のように送信側の信号処理を大幅に軽減できるだけでなく、送信機の回路規模や消費電力も軽減できると見込まれる。さらに、受信側にも複数アンテナ素子を設けることを考えた場合、同様のアンテナ選択を行うことで、さらなる特性向上の実現が可能となると期待している。

[1] Xiang Gao, Ove Edfors, Fredrik Tufvesson, and Erik G. Larsson, "Massive MIMO in Real Propagation Environments: Do All Antennas Contribute Equally?" IEEE Trans. Commun., vol. 63, no. 11, pp. 3917-3928, Nov. 2015.

## 3 . 研究の方法

体育館程度の大きさの室内モデルで、この中に 100 素子アレーを持つ基地局を設置し、10 ユーザ程度が室内に存在しているとする。既に遺伝的アルゴリズムを使って、ルースビームフォー

ミングの有効性をある程度示しているが、必ずしも最適なアンテナ選択ができていないと断定できていない。そこで、各種組み合わせ最適化手法を導入して、最適なアンテナ選択を行い、MMSEのようなウェイト形成によるビームフォーミング法と比較して、どの程度の能力を持つかを評価する。

#### (1) バイナリ差分進化・遺伝的アルゴリズムを用いた評価

屋内を想定した見通し内環境において基地局に100素子規模のアンテナを配置し、下り回線マルチユーザ大規模MIMOシステムでバイナリ差分進化を用いて簡易ビーム形成を行う手法について検討した。また、新たな学習時評価関数を提案し、それを用いた学習によって得られた INR 特性, SNR 特性, チャネル容量特性について、従来の評価関数を用いた場合との比較を行った。

#### (2) 量子アニーリングを用いた評価

量子アニーリングは、組み合わせ最適化問題に特化したクラウドソルバーとして商用利用されるようになり、近年その用途について多くの検討が始まってきた。ルースビームフォーミングは送信アンテナを使うか使わないかの2値のベクトルを通信容量が最大となるように最適化することで実現できることから、この量子アニーリングが有用なソルバーとなりえると考えた。

#### (3) 直接二値探索法を用いた評価

直接二値探索法は、ランダムに1つずつ要素を選択し、その要素に対して状態変化を起こす。ある評価関数に従い、その変化によって評価値が改善されたのかを判断する。改善がみられた場合は、その変化を維持し、再度別の要素の選択を行う。一方、状態変化によって評価値が悪化した場合は、その状態変化を破棄し、再度別の要素を参照する。以上の処理を適用範囲全体に施すことで、最適化が行われる。

### 4. 研究成果

#### (1) バイナリ差分進化・遺伝的アルゴリズムを用いた評価

バイナリ差分進化法は、解空間を多点探索して評価関数を最小化または最大化する、0-1最適化問題のための進化アルゴリズムである。バイナリ差分進化は「変異」および「交叉」という2つのプロセスからなる。最初に乱数を用いて初期解候補をいくつか生成する。これらの初期解候補のそれぞれについて、解候補を一定の基準に従い変化させた変異解を生成し、元の解候補と変異解を交叉させてトライアル解と呼ばれる解をつくる。このトライアル解について評価関数を用いて評価し、もし現在の解候補よりも性能の良い解であれば、現在の解候補をトライアル解と置き換える。これを一定世代繰り返すことで、解候補は徐々に性能のよい解に置き換わってゆき、問題に対する最適解に近づく。

遺伝的アルゴリズムは近似解の探索アルゴリズムの一種であり、解きたい問題の初期解に対して、各世代で「交叉」「突然変異」「選択」という3つの処理を適用して新たな解を生成、これを一定条件のもとで初期解と置き換えることで、問題に対する最適解を探索する手法である。具体的な学習方法としては、まず、初期の個体群として、乱数などを用い複数の遺伝子で構成される染色体をいくつか生成する。これらの個体群から、各世代で親となる染色体を2つずつ取り出し、一定基準で互いに遺伝子を入れ替える交叉処理を行う。このようにして生成された子の染色体について、それらの遺伝子を一定確率で対立遺伝子に置き換える。最後に、生成した子を含めてより優れた染色体をいくつか選択して次の世代に残す。これらの過程を複数の世代にわたって繰り返すことで、初期解は徐々に性能の良い解に置き換わってゆき、目的の問題に対する最適解に近づく。遺伝的アルゴリズムはその発表以降、さまざまな応用や変種が検討されてきた。本研究では、簡易ビーム形成のウェイトが0および1の2値であることから、染色体を構成する遺伝子の値も同様の値をとるバイナリ遺伝的アルゴリズムを用いる。

上記手法により最適化した簡易ビーム形成ウェイトの下り回線の合計スループット, SNR, INR 特性をそれぞれ図1, 2, 3に示す。なお、これらのプロットは、最適化において生成した100個の簡易ビーム形成ウェイトにおける各特性の累積分布を表している。図中の「BDE」および「GA」はそれぞれバイナリ差分進化法、遺伝的アルゴリズムを表す。また、従来のプリコーディング手法としてMMSE法の特性も示す。

従来の評価関数である「下り回線の合計スループット」(Total Downlink Throughput)を用いた場合と、提案した評価関数「仮想的な上り回線のスループット」(Virtual Uplink Throughput)を用いた場合の特性比較を行う。図1に示した通り、提案手法を用いた場合のスループット特性は、従来手法の特性よりも全体的に優れており、特に中央値では、バイナリ差分進化法を用いた場合に約30 bps/Hz、遺伝的アルゴリズムを用いた場合に約10bps/Hz程度特性の改善がみられた。提案手法を評価関数とした場合は、簡易ビーム形成ウェイト最適化の問題を受信ユーザ数分

の部分問題に分割でき、それぞれの部分問題の解空間が小さくなる。よって、機械学習による最適化により比較的短い世代数で優れた準最適解への収束が起こると考えられる。一方で、従来手法を評価関数とした場合は問題の解空間が非常に大きいため、本検討で用いた 10,000 ~ 20,000 世代程度の学習では解空間を十分に探索できず、準最適解への収束が起こりにくいものと思われる。同様に評価関数の違いに注目すると、INR 特性においても提案手法を用いた場合は従来手法に比べて効果的に干渉抑圧が達成できており、提案手法の有効性を示している。しかし、SNR 特性だけは、2 つの評価関数を用いた場合で特性の差がほとんど見られず、また従来手法を用いた場合に僅かながら優れた特性を示す傾向があることは興味深い。

## (2) 量子アニーリングを用いた評価

この手法は当初、シミュレーテッド・アニーリングなどと同じように、アルゴリズムの 1 つとして古典的なノイマン型計算機上でシミュレーションする用途が想定されていた。しかしその後、カナダを拠点とする D-Wave Systems 社(以下「D-Wave 社」)により、2011 年に量子ビットを実装した量子プロセッシングユニット(Quantum Processing Unit; QPU)を用いた商用マシンが実用化され、現在ではこのマシンをクラウド形式で実際に利用して組み合わせ問題の最適化を行うことができる。本研究でも、量子アニーリングにより簡易ビーム形成ウェイトを最適化するためのハミルトニアンを提案したのち、D-Wave 社のソルバーを用いて実際にウェイトの最適化を行う。

実行チャネル行列について行方向に所望信号電力と干渉信号電力を評価するハミルトニアン、および、列方向に所望信号電力と干渉信号電力を評価するハミルトニアンの 2 つを提案し、それらを用いた量子アニーリングによって得られる簡易ビーム形成ウェイトの特性を比較した。

計算機シミュレーションにより得られた下り回線のスループット特性、SNR 特性、INR 特性をそれぞれ図 4、5 および 6 に示す。図中では、プロットの視認性を高めるため凡例に省略記法を用いている。凡例の「HA」および「HB」はそれぞれハミルトニアン HA、HB を表す。また「TDT」は評価関数「下り回線の合計スループット」(Total Downlink Throughput) を、「VUT」は評価関数「仮想的な上り回線のスループット」(Virtual Uplink Throughput) を指している。なお、本章のこれ以降で「従来の評価関数」という呼称を用いる場合、それは 2 つの評価関数「下り回線の合計スループット」および「仮想的な上り回線のスループット」を指している。

図 4 に示した下り回線の合計スループットでは、全体的に、簡易ビーム形成ウェイトの特性は MMSE ウェイトには劣っていることがわかる。簡易ビーム形成手法の特性に注目すると、提案した 2 つのハミルトニアン HA、HB を用いて量子アニーリングを行った場合の特性は、「仮想的な上り回線のスループット」に準ずる良好な特性となっており、提案したハミルトニアンを用いる量子アニーリング手法の有効性を示してい

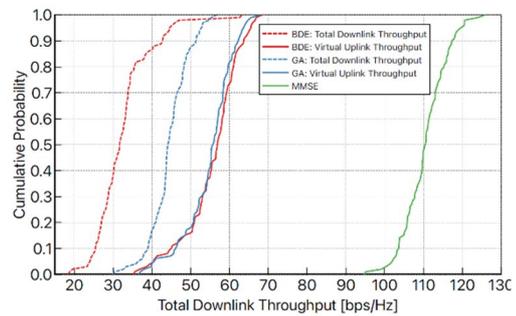


図 1 下り回線の合計スループット特性

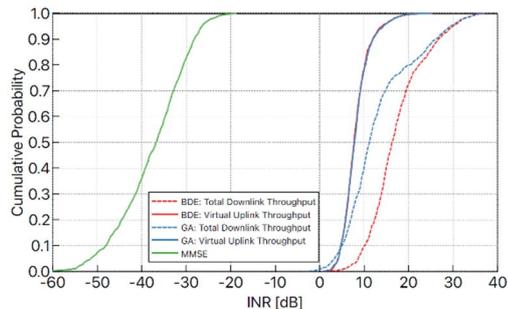


図 2 SNR 特性

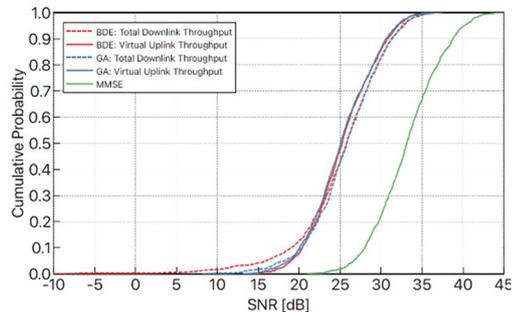


図 3 INR 特性

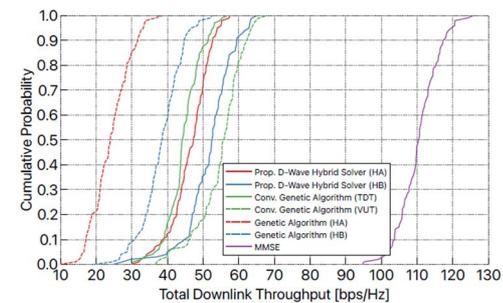


図 4 下り回線の合計スループット特性

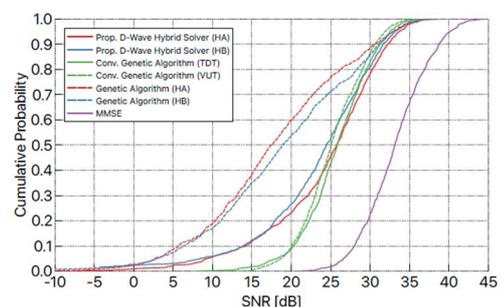


図 5 SNR 特性

る．図 5 からは，ハミルトニアン HA および HB を用いて量子アニーリングを行った場合，一部，従来の評価関数に劣る領域も見られるものの，全体としてはほとんど同等か，または優れる SNR 特性を得られることが確認できた．図 6 の INR 特性からは，ハミルトニアンおよびを用いた量子アニーリング手法の特性が，それぞれ下り回線の合計スループット，仮想的な上り回線のスループットを評価関数とした遺伝的アルゴリズムの特性よりもやや優れていることがわかる．

### (3) 直接二値探索法を用いた評価

ランダムに 1 つずつ要素を選択し，その要素に対して状態変化を起こす．ある評価関数に従い，その変化によって評価値が改善されたのかを判断する．改善がみられた場合は，その変化を維持し，再度別の要素の選択を行う．一方，状態変化によって評価値が悪化した場合は，その状態変化を破棄し，再度別の要素を参照する．以上の処理を適用範囲全体に施すことで，最適化を行う．

ここでは 2 種類の評価関数を検討する．1 つ目は下り回線の合計スループットに対応した評価関数，2 つ目は仮想的な上り回線のスループットに対応した評価関数であり，それぞれ次式(1)，(2)で定義する．

$$C_{\text{SUM}} = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \text{SINR}_k) \quad (1)$$

$$C_k = \log_2(1 + \text{SIR}_k) \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

図 7 に直接二値探索法(DBS)と，比較のために MMSE 法，遺伝的アルゴリズム (GA : Genetic Algorithm) によるスループット特性を示す．ここで，DBS および GA に関しては簡易ビーム形成，MMSE 法は通常のビーム形成を行った結果である．図 7 より，評価関数として式(1)より式(2)を使用する方が良い特性を示すことがわかる．これは，式(2)を使用する場合，DBS の適用範囲が狭くなり，評価すべき組み合わせの数が減少するためと考える．また，式(1)と式(2)を併用した場合を試したところ，DBS の中で最も良好な特性となった．このことから DBS の適用回数を増加させると特性が改善されることが予想される．

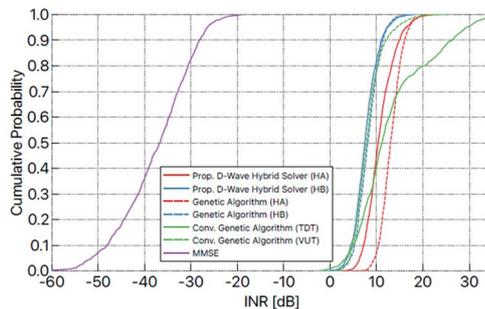


図 6 INR 特性

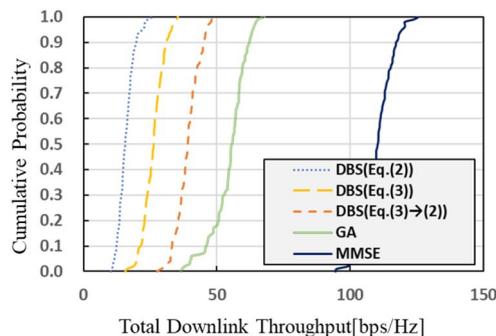


図 7 : 下り回線の合計スループット特性

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 2件）

1. 著者名 KASE Yuya, NISHIMURA Toshihiko, OHGANE Takeo, OGAWA Yasutaka, SATO Takanori, KISHIYAMA Yoshihisa	4. 巻 -
2. 論文標題 Accuracy Improvement in DOA Estimation with Deep Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2021EBT0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 NISHIMURA Toshihiko, OGAWA Yasutaka, OHGANE Takeo, HAGIWARA Junichiro	4. 巻 E104.A
2. 論文標題 Radio Techniques Incorporating Sparse Modeling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 591 ~ 603
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2020EAI0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大塚達樹, 西村寿彦, 大鐘武雄, 佐藤孝憲, 萩原淳一郎, 小川恭孝
2. 発表標題 大規模MU-MIMOシステムにおける量子アニーリングを用いた簡易ビーム形成法
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大塚達樹, 西村寿彦, 大鐘武雄, 小川恭孝, 萩原淳一郎, 佐藤孝憲
2. 発表標題 差分進化を用いた簡易ビーム形成に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究専門委員会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大塚達樹, 西村寿彦, 大鐘武雄, 佐藤孝憲, 萩原淳一郎, 小川恭孝
2. 発表標題 簡易ビーム形成において受信ユーザ数を変化させた場合の特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究専門委員会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林 優太 西村寿彦, 佐藤孝憲, 小川恭孝, 萩原淳一郎, 大鐘武雄
2. 発表標題 簡易ビーム形成のための送信ウェイト生成に関する検討
3. 学会等名 電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林 優太 西村寿彦, 佐藤孝憲, 小川恭孝, 萩原淳一郎, 大鐘武雄
2. 発表標題 大規模MIMO システムにおける直接二値探索法を用いた簡易ビーム形成法
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023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	大鐘 武雄  (Ohgane Takeo)  (10271636)	北海道大学・情報科学研究院・教授   (10101)	

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
---------	---------