

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K05123

研究課題名（和文）地中熱利用と抵抗低減効果を複合した地球にやさしい省エネルギー空調システムの開発

研究課題名（英文）Development of environmentally friendly, energy-saving air conditioning system that combines underground thermal energy utilization and drag-reducing effects

研究代表者

佐伯 隆 (Takashi, Saeki)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：30253165

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）：地中熱利用システムは、再生可能エネルギーである地中の温度（年間を通じて約15℃）を利用するもので、これに抵抗低減効果を複合する研究を行った。千葉県に設置された実証試験設備（全長約234 mの採熱管とコイル）を使用し、世界で初めての抵抗低減効果の適用実験を行った。この結果、循環ポンプの省エネ効果は16.0%であった。広島県に設置した試験設備（全長200 mの採熱管2系統）では、抵抗低減剤の添加により、採熱管の圧力損失が40.6%低減した。これらの実験データをもとに、採熱管を伴った循環系に対して抵抗低減効果を適用したときのメリットが算定できるシステムを完成させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

抵抗低減効果に関する最近の研究は流体シミュレーションが主体で、実験データが不足している。省エネ技術として有望な本技術の用途拡大のため、地中熱採熱管を用いた実験データが必要である。本課題では実際の地中熱利用システムにおいて、世界初の抵抗低減効果の複合化実験を行い、定量的なメリットを得た点で学術的意義がある。また抵抗低減剤の配合、濃度、防錆剤の選択と濃度等の最適化データを取得したことで、長期間に渡って安定した効果を示す添加条件が決定できる。さらに、抵抗低減効果を導入に際し、開発したメリット算定システムはF/Sに利用できるツールになりえ、複合化の実用化が可能になったという社会的意義は大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：Underground energy utilization systems utilize underground temperatures (approximately 15 °C throughout the year), which is a renewable energy source, and research was conducted to combine this with the drag reduction effect. Using a demonstration test facility (a heat collection pipe and coils with a total length of approximately 234 m) installed in Chiba Prefecture, the world's first application experiment of the drag reduction effect was conducted. As a result, the energy saving effect of the circulation pump was 16.0%. In a test facility installed in Hiroshima Prefecture (two systems of heat collection pipes with a total length of 200 m), the addition of a drag reduction agent reduced the pressure loss of the heat collection pipes by 40.6%. Based on these experimental data, a system was completed that can calculate the benefits of applying the drag reduction effect to a circulation system with a heat collection pipe.

研究分野：移動現象および単位操作関連

キーワード：抵抗低減効果 地中熱利用システム 採熱管 省エネルギー 配管摩擦抵抗 ポンプ所要動力 抵抗低減剤 界面活性剤

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

地球温暖化対策の一つとして、再生可能エネルギーをいかに有効活用できるかが問われており、報告者は『地中熱の利用』が有効な手段の一つであると考えている。地中温度は年間を通じてほぼ一定であり、外気温よりも高いときは暖房として、また低いときは冷熱として利用できる。熱源そのものの費用はゼロであり、CO₂の排出もなく、さらに熱を屋外に放出しないことから、ヒートアイランド現象の緩和にも有効である。環境省のHPでは、従来システム（空冷チャラーと灯油ボイラー）と比較して、地中熱とヒートポンプを利用した本システムは、エネルギー消費量を46%削減できると試算されているが、一方で、数百mのオーダーまで掘り下げた地中熱採取管に水を流すための動力に予想以上のエネルギーを消費してしまう欠点がある。ポンプ自体の省エネ化はほぼ限界まで高められており、あとは水が流れる際の抵抗を下げるしかない。

これに対し、報告者はまさに、水が流れる際の抵抗を下げるができる『抵抗低減効果』に関する研究を1995年から継続して行ってきた。これは水にある種のカチオン系界面活性剤と対イオン（抵抗低減剤という）をごく微量（0.02～0.05%）添加することで、渦の発生や運動が抑制され、流体輸送動力が顕著に低減するものである。地中熱利用と抵抗低減効果の複合を考えたとき、2つの問題がある。1つ目は地熱利用の熱媒流体として、関東以西では水が使われることが多いが、関東以北では凍結防止のため不凍液（ブライン）が使用される。冷凍機のブライン循環系を対象とした抵抗低減効果は、2000年頃に国内で数件程度研究報告があるものの、地中熱利用とは温度域が異なる。2つ目として、複合の実証データの不足から、メリットの事前試算が十分できないことである。

上記2つの問題を解決しながら、『地中熱利用』という再生可能エネルギーに『抵抗低減効果』という省エネルギー技術を複合することによって、地球にやさしい省エネルギー空調システムとして発展させる観点から、本研究を計画、着手した。

2. 研究の目的

(1) 研究課題の革新をなす学術的「問い」

第一の問いは、抵抗低減効果に及ぼす地中熱利用システムの配管系（長さ、口径、埋設深さ、流速）および熱媒流体（水、ブライン）の影響を明らかにすることである。

第二の問いは、総延長が数百mの地中熱採取管を伴う地中熱利用システムに抵抗低減剤を添加することによって、どの程度のポンプ動力の低減が可能か、また複合によるシステム全体のエネルギー消費量はいくらになるか、という実証である。

(2) 「問い」を受けて設定した本研究の目的

本課題は、上記二つの問いを明らかにすることを目的とし、二つの要素研究を行った。

1. 研究テーマ1：抵抗低減効果を関東以北での地中熱利用へ適用することも想定し、プロピレン水溶液において十分な抵抗低減効果を示す界面活性剤と対イオンの添加条件を明らかにする。

実証試験に必要な抵抗低減剤の添加条件を知る。

2. 研究テーマ2：地中熱利用システムの実設備に抵抗低減剤を添加し、ポンプ動力の低減効果を測定する実証試験を行う。

配管系と関連付けた抵抗低減効果の定量的な評価を行う。

上記データを蓄積し、メリットを試算できる『算定システム』を構築する。

複合化による優位性を定量的に示すことで、本技術の普及を図る。

3. 研究の方法

(1) 当初の計画と新型コロナウイルス感染症・落雷による計画変更・期間延長

当初は、千葉県八街市に設置された地中熱利用システムの試験設備（報告者が本件に関連して共同研究を行っていた新日本空調㈱の設備）を使用し、この循環水に抵抗低減剤を添加して、諸データを取得し、さらに長期の実証試験を行う予定であった。さらに、大学の実験室でブラインに有効な抵抗低減剤のスクリーニングを行うとともに、関東以北（当初は山形県）でのフィールド実験を計画していた。初年度（令和元年度）の千葉県における実験の準備やその実施は順調であったが、翌年にコロナによる緊急事態宣言が発令され、千葉県への出張ができなくなった。この状況は一年以上継続した。この間、千葉県の実験設備は設置場所と新日本空調㈱の契約より、撤去されることとなり、報告者はこの設備で計画していた実験データをわずかしき取得できていない状況であった。このため、大学の実験装置を改造し、研究棟の3階と地上を結ぶ配管系を増設し、抵抗低減効果の長期試験を行うとともに、千葉県で計画していた試験を新たに行うために協力会社を探した。三年目（令和3年度）の秋に新たな実証試験場所として、広島県三次市の会社の協力が得られることになった。しかし、コロナの影響で広島県への出張もしばらくはできず、実地の調査と新たな装置・計測システムの作製に4か月以上を要した。研究期間を1年間延長する旨の申請をし、受理された。令和4年度（延長1年目）は広島県三次市において、実際に地中に埋設された採熱管を用いた実証試験を行い、データの取得を進めた。ところが、同年9月に落雷による装置の破損（流量計、センサー、ロガー等の電気計装全て）事故が起き、実験はまたも中断した。すぐに破損した機器の修理や調達を依頼したが、世界的な半導体不足で復旧に数か月を要したため、再度、期間延長を申請し、受理された。装置は令和5年3月に普及し、実験を再開した。この間、大学では抵抗低減効果のメリット算定システムの開発や抵抗低減剤と併用して添加する防錆剤の影響実験を進めた。以上の状況から、本課題で当初予定していた関東

以北のフィールドによるブラインを用いた実証試験の実施は断念せざるを得なかった。

(2) 変更後の研究方法

- ・初年度（平成 31 / 令和元年度） 研究テーマ 1
大学の流れ系循環装置を使用した実験
千葉県八街市の地中熱利用システムの実証設備による実験
- ・二年目（令和 2 年度）研究テーマ 1
大学の流れ系循環装置の改造と実験
- ・三年目（令和 3 年度）
大学の流れ系循環装置による実験、
実証試験フィールドの探索と現地視察
- ・延長一年目（令和 4 年度）
広島県三次市における地中熱利用システムの実証試験設備による実験、落雷後の復旧
メリット算定システムの作成
- ・延長二年目（令和 5 年度）
広島県三次市における地中熱利用システムの実証試験設備による実験
メリット算定システムの作成

4. 研究成果

(1) 初年度

配管抵抗低減剤として界面活性剤である Ethoquad O/12（ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ株）と対イオンのサリチル酸ナトリウム、モリブデン酸系の防錆剤と銅管の防錆に有効な添加剤を混合した LSP-01M（周南水処理株）を使用した。実験室に設置した PVC 管（内径 25 mm）の循環系を使用し、直管部（1600 mm）の圧力損失を平均流速を変えて測定した。圧力損失より流体摩擦係数を求め、(1) 式より抵抗低減率 $DR\%$ [%] を算出した。

$$DR\% = (f_{water} - f_{surfactant}) / f_{water} \times 100 \tag{1}$$

地中熱利用システムの実証試験設備（千葉県八街市）の配管系は全長 92 m と 77 m の地中熱採熱コイル（埋設深さ 18.9 m）、および全長 65.6 m のダブル U チューブ（埋設深さ 16.49 m）からなり、保有水量は約 200 L である。

図 1(a) に 42℃（地中熱利用システムの冷房時よりやや高め）における直管部の抵抗低減効果を示す。一般的な配管系は経済流速域（1～1.5 m/s）になるように設計されており、図よりこの領域では $DR\%$ は約 80% である。地中熱回収では、平均流速を 0.5～1 m/s と小さくし、熱交換パイプの入口と出口の温度差が高くなるように採熱させた。この領域では $DR\%$ はやや低下したものの、70% を上回った。一方、暖房時に対応する結果(b)では、 $DR\%$ は約 35～65% であり、1000 mg/L をピークとし、濃度増加とともに $DR\%$ は減少した。

以上の実験室の結果を踏まえ、地中熱利用システムの試験設備で抵抗低減効果によるポンプの所要動力の低減の効果を実験的に評価した。LSP-01M の添加濃度を 2000 mg/L とし、2 本の地中熱採熱コイルを直列につなぎ、これと並列にダブル U チューブを接続した配管構成での冷房運転において、ポンプの消費電力は 552.5 W から 464.0 W に低下した。これより、循環ポンプの省エネ効果は 16.0% と求められ、地中熱利用システムへ抵抗低減効果を併用する効果が定量的に確認できた。この併用実験は、世界で初めて行われたものである。

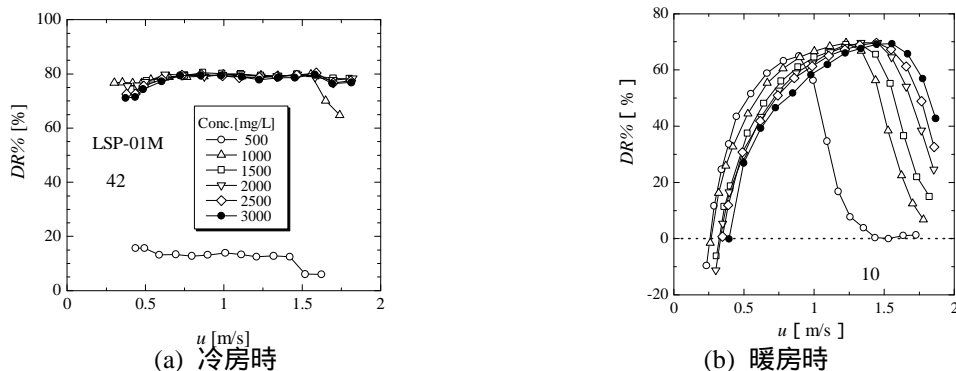


図 1 25 mm 直管における LSP-01M の抵抗低減効果

(2) 二年目

配管抵抗低減剤として、上述の LSP-01M（周南水処理株）を使用した。抵抗低減効果の評価装置は、大学の実験室（三階，地上高：約 9 m）に設置した内径 25 mm の PVC 管の循環系に、ヘッダー管を介して地上まで伸ばした三系統の配管系を接続したものである。これらは採熱管、採

熱コイル、PVC 管の系統であり、個々の保有水量は、それぞれ 52 L, 65 L, 39.3 L であった。循環水の性状変化を確認するために、PVC 管の直管部 (1600 mm) の圧力損失を平均流速に対して測定した。圧力損失より流体摩擦係数を求め、抵抗低減率 $DR\%$ [%] を算出した。

LSP-01M を 3000 mg/L 添加すると、収支上は界面活性剤とサリチル酸ナトリウムの濃度は、それぞれ 300, 180 mg/L となる。これに対し、循環水の成分分析では、277, 140 mg/L となった。この濃度低下は分析の精度の問題もあるが、配管壁への吸着もあり得ると考えられた。

図 2 に LSP-01M を 3000 mg/L 添加し、抵抗低減効果を 2 週間測定した結果を示す。添加して 1 週間は平均流速 1 m/s 以上の領域の $DR\%$ は徐々に低下したが、その後、安定した。そこで、LSP-01M を 1000 mg/L 追加添加したところ、当初の添加三日後の位置 (◇) まで抵抗低減効果が回復し、その後は安定した。これは、LSP-01M が均一混合するまでにタイムラグがあることを示しており、均一混合を確認し、必要に応じて追加添加を行う必要があることが指摘された。

地中熱利用システムでは、平均流速を 0.5 ~ 1 m/s と小さくし、熱交換パイプの入口と出口の温度差が高くなるように採熱する。図 3 は平均流速 0.5 m/s で 2 週間循環させたときの抵抗低減効果を示している。 $DR\%$ は外気温の変化で変動したが、30% 程度の抵抗低減効果を示しており、この期間に機械的劣化の影響は全く見られず、良好な効果の安定性を示すことが明らかになった。

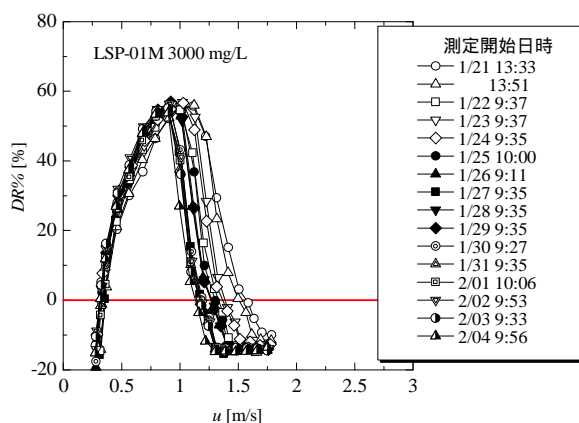


図 2 抵抗低減効果の経時変化

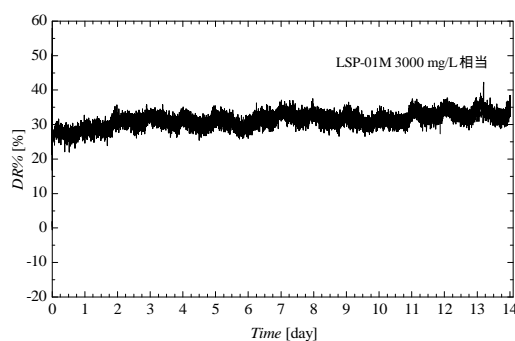


図 3 抵抗低減効果の経時変化 (流速 0.5 m/s)

(3) 三年目

二年目に改造した大学の装置を使用し、抵抗低減効果の経時変化を引き続き計測した。図 4 は増設配管系の圧力損失の経時変化である。採熱コイルの場合、抵抗低減剤を添加する直前の差圧は 28.0 kPa であり、添加直後は 22.5 kPa となった (19.6% の減少)。同様に、採熱チューブは 24.7 kPa が 13.3 kPa となった (46.2% の減少)。その後の差圧は、いずれも循環水の温度変動に伴って変化したものの、経時的には安定した抵抗低減効果を示した。

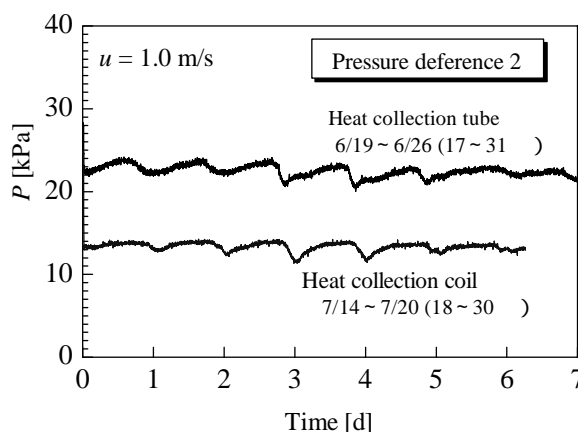


図 4 抵抗低減効果の経時変化

(4) 延長一年目

抵抗低減剤と併用して添加する防錆剤の影響を実験的に検討した。防錆剤として、亜硝酸ナトリウムとモリブデン酸ナトリウムを使用した。図 5 に抵抗低減効果に及ぼす防錆剤の影響を示す。亜硝酸ナトリウムを 1000 mg/L 添加しても (□) 流速 0.5 ~ 1.0 m/s において、 $DR\%$ は無添加の場合 (△) と変わらなかった。一方で、モリブデン酸ナトリウムを 600 mg/L 添加したとき (▽) は、 $DR\%$ が顕著に増加し、0.5 m/s で 64% を示した。このとき、水溶液の粘度は、モリブデン酸

ナトリウムが無いときよりも低下した。以上のことより抵抗低減剤にモリブデン酸ナトリウムを併用することによって、防錆効果のみならず、対イオンの錯体形成を防ぎ、安定した抵抗低減効果を示す添加剤が調製できることが明らかになった。

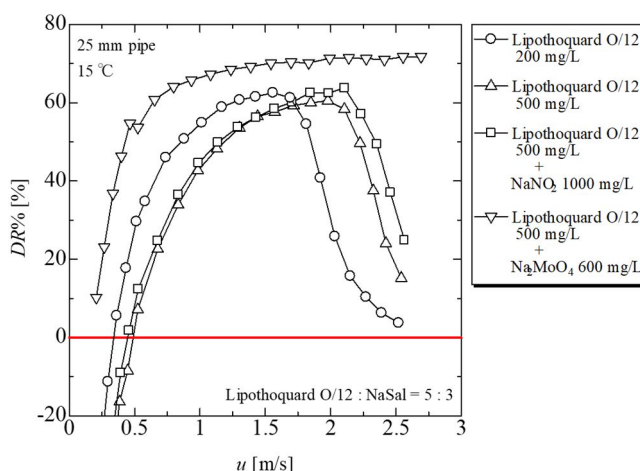


図5 抵抗低減効果に及ぼす防錆剤の影響

(5) 延長二年目

地中熱利用システムの実証試験装置を広島県三次市に設置し、抵抗低減効果の長期安定性についての実証試験を行った。抵抗低減効果としては、平均流速が 0.5 m/s の条件に対し、抵抗低減剤を添加することにより採熱管全体の圧力損失は 19.0% 低下し、同様に平均流速が 0.62 m/s, 0.7 m/s では、それぞれ 40.6%、43.4% の低下となった。このように、抵抗低減効果は平均流速が増加すると増加する傾向にあり、本実験で流速（ポンプのインバータの周波数）を変え、平均流速と圧力損失を計測した結果を図 6 に示した。インバータの周波数を 32Hz に設定したとき、水の場合の平均流速は 0.62 m/s であったが、抵抗低減剤の添加により 0.714 m/s と流量が増加した（15.2%）。これは、流れの抵抗が低減したことを示すものである。同様に、圧力損失は水の場合、35.2 kPa であったが、抵抗低減剤の添加により 20.9 kPa となった。この減少率は 40.6% となり、報告者が目標としていた 30% 以上を大きく上回った成果が得られた。

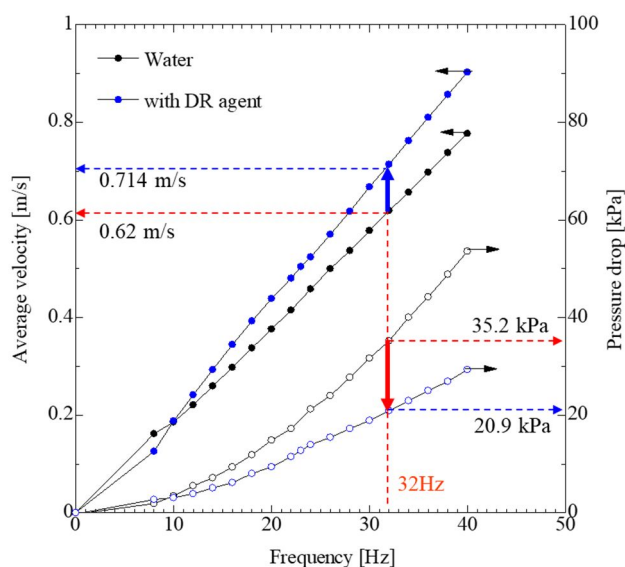


図6 インバータに設定周波数に対する流量と圧力損失の推移

システムの根拠となる抵抗低減効果の諸データを上記実験によって収集し、抵抗低減剤によるメリットを定量的に得るアルゴリズムを検討した。最終的に、採熱管を伴った循環系に対して抵抗低減効果を適用したときのメリットが定量的に算定できるシステム（エクセルのマクロ）を完成できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Saeki Takashi, Kaide Aya, Nagasaka Shigeyuki	4. 巻 18
2. 論文標題 Improving energy efficiency of ground thermal energy systems by reducing drag inside pipes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/apj.2951	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takashi Saeki, Aya Kaide, Shigeyuki Nagasaka
2. 発表標題 Energy saving of fluid transportation of ground thermal energy system by drag reducing effect
3. 学会等名 19th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (APCCHE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐伯 隆, 貝出 絢
2. 発表標題 抵抗低減効果に及ぼすせん断の影響とその加速試験
3. 学会等名 化学工学会第88年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐伯 隆, 貝出 絢, 永坂茂之
2. 発表標題 地中熱利用システムの採熱管における抵抗低減効果
3. 学会等名 化学工学会第51回秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鎌矢良平、貝出 絢、佐伯 隆
2. 発表標題 界面活性剤水溶液のDR効果に及ぼす管付属物の影響
3. 学会等名 化学工学姫路大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐伯 隆、貝出 絢、永坂茂之
2. 発表標題 界面活性剤による抵抗低減効果の地中熱利用システムへの適用
3. 学会等名 化学工学85年会
4. 発表年 2020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	貝出 絢 (KAIDE AYA) (50773074)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授 (15501)	

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