

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15007

研究課題名（和文）原子の共鳴現象を利用した電磁波リアルタイムイメージングの研究

研究課題名（英文）Research on Real-time Imaging of Electromagnetic Waves Using Atomic Resonance

研究代表者

東島 侑矢 (Tojima, Yuya)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：20805147

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：セシウム原子が封入された大面積ガラスセルを用い、セシウム原子と電磁波の相互作用により発生する蛍光を観測することで、2次元平面内のパッチアレーアンテナから放射する磁界強度分布をリアルタイム(0.01秒の露光時間)に撮像可能であること実証した。特に、可変位相器を用いてパッチアレーアンテナの素子間位相差を変化させたときに、アンテナからの放射磁界が走査される様子をリアルタイムに撮像することにはじめて成功した。その要素技術として、ガルバノミラーやシリンドリカルレンズを組み合わせた光学系を構築し、セシウム原子を励起するレーザーを同一強度でシート状に照射することが可能となり、撮像の安定性を改善した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多数の無線通信端末が普及する現代では、電磁波強度分布を正しく測定することは無線通信網の設計、ビームセンシング技術、不要放射評価において重要となる。従来、電磁界強度分布の測定にはアンテナやファイバー結合した小型センサを走査する必要があった。この手法では短時間の分布変動を広範囲でモニターすることは困難であった。本研究は、セシウム原子と電磁波の相互作用による蛍光に着目し、セシウム原子をセンサとしてアンテナから放射した磁界強度分布を10 cm四方の平面内でリアルタイムにイメージング可能であることを実証した。これにより、次世代無線通信の実現に期待されている電磁波の空間強度分布の評価技術の確立に貢献する。

研究成果の概要（英文）：In this study, two-dimensional real-time imaging of magnetic field strength using a large-area cesium gas cell was demonstrated. The magnetic field was emitted from a patch array antenna and the exposure time for the real-time imaging was 0.01 s. In particular, the real time imaging of the sweep of the radiated magnetic field by changing the phase difference between the elements of the patch array antenna using a variable phase shifter was successfully achieved for the first time. This success was achieved by improving the stability of imaging by creating a sheet-like pumping laser with uniform intensity using an optical system combining a galvano mirror and cylindrical lens.

研究分野：計測工学

キーワード：マイクロ波 パッチアレーアンテナ イメージング 二重共鳴 セシウム原子 磁界分布

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

第5世代移动通信システム(5G)は「高速・大容量通信」「低遅延伝送」「多数端末との接続」をキーワードとして、社会実装にむけた研究開発が盛んに行われている。これらのサービスの普及においては、空間を飛び交う電磁波の伝搬特性はもとより、その出入口となるアンテナの実環境での動作特性を評価することは重要な課題である。特に、IoT(Internet of Things)社会の実現に向け多数の無線センサが接続する電磁波環境では、より高度なアンテナの指向性制御技術が求められるだけでなく、故障により大規模な不具合が生じたときに速やかに正確な故障箇所を診断・補償する技術、設置環境に応じリアルタイムにアンテナの緒特性を評価する技術などが求められる。従来の電磁波イメージング技術では、検出用のアンテナや近傍界プローブなどを3次元走査して測定するか、アレー化することであるエリア内を一度に測定する手法が一般的である。走査型では測定点数に応じて時間がかかるためリアルタイム性に課題があり、アレー型では分解能の制約やアレー化した検出部自身が伝搬環境を侵襲してしまうといった課題がある。

2. 研究の目的

上記の課題を解決するため、本研究は走査型・アレー型とは異なる検出原理を用いて空間の電磁波分布をリアルタイムかつ高分解能にイメージングすることを目的としている。セシウム原子の共鳴現象を利用する本手法は、セシウムガスを封入したガラスセルを検出部として使用し、これに励起用のレーザーを照射する。このとき、観測対象の電磁波がセシウム原子と相互作用すると、電磁波の強度分布に応じた蛍光が発生する。この蛍光を高分解能かつリアルタイムにカメラで撮像することで、電磁波分布の評価を実現する。また、同時にラビ周波数を測定することで量子論に基づき電磁波の磁場や電場強度を正確に決定できるため、新たな絶対電磁波強度測定法としても期待できる。本手法は原子と電磁波との相互作用を用いることで高速な応答ができ、個々の原子がセンサとして働くため空間分解能も非常に高い。本研究の求めるリアルタイムかつ高分解能な電磁波測定を実現するため、電磁波イメージング系の構築を行い、アンテナから放射されるビーム走査のリアルタイムイメージングを実証する。

3. 研究の方法

初年度は、提案手法を検証するための測定系構築と二重共鳴信号の検出に取り組んだ。図1に構築した電磁波イメージングの測定系模式図を示す。石英ガラスセル(容積 100 mm × 100 mm × 10 mm, ガラス厚 5 mm)内部にセシウム原子と圧力 1.333 kPa の窒素(バッファガス)が封入されており、地磁気調整用の準ヘルムホルツコイルの中央に配置される。ガラスセルから 300 mm 上部にはセシウムから生じる蛍光を撮像するために CMOS カメラが配置され、ガラスセルの側面からは波長 852 nm のレーザーがガルバノミラーによって走査入射しており、その出力はフォトディテクタによってモニターされている。ガラスセルの背面には電磁波の放射源となるアンテナが置かれている。このときガラスセル内部で発生する近赤外の蛍光強度は電磁波の磁界強度に比例して増大する。従って、このレーザーとの二重共鳴によって生じる蛍光強度分布を撮像することでマイクロ波の磁界強度分布をリアルタイムにイメージング出来る。特に、フォトディテクタから得られる二重共鳴信号は測定系の感度に直結するため、その高強度検出

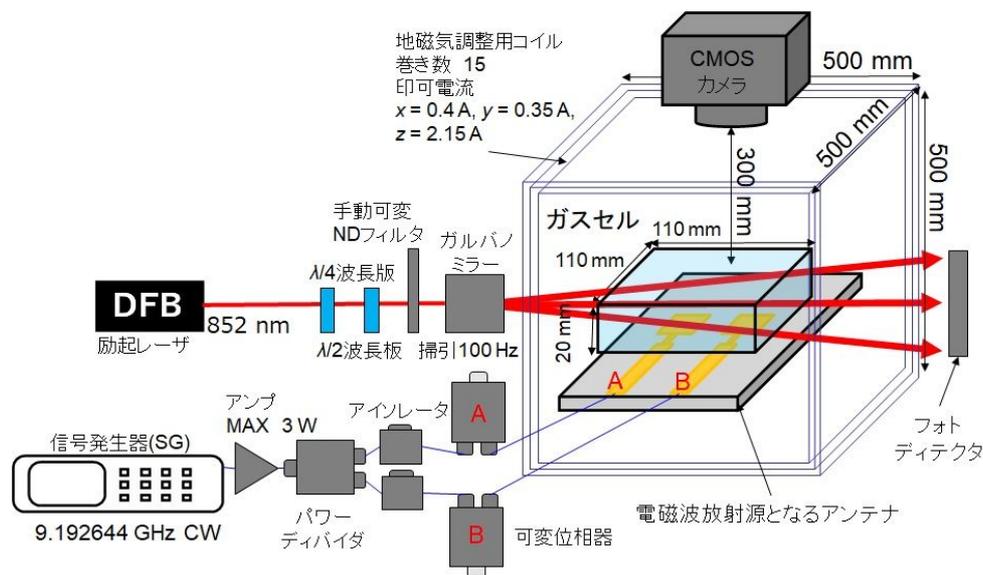


図1 構築した電磁波イメージングの測定系模式図

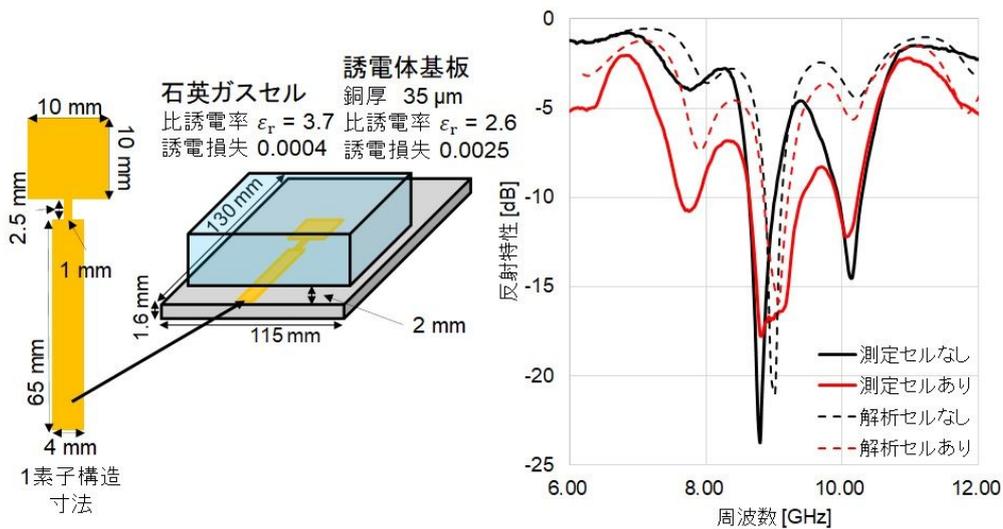


図2 試作したパッチアンテナ寸法と反射特性

にむけた測定系の検討を進めた。

最終年度では、高解像イメージングを得るためレーザー強度やカメラの露光時間などの測定系の最適な条件を検討し、試作したアンテナから生じる磁界分布リアルタイムイメージングに取り組んだ。特に、パッチアレーンテナへの給電位相差を変化させ、生じる磁界分布のリアルタイム測定を行った。撮像から得られた磁界分布の妥当性については、電磁界解析によって得られた磁界分布とも比較検証を行った。

4. 研究成果

初年度では、まず構築した測定系においてセシウム原子がカメラで観測可能な強度で蛍光を放出することを確認するため、二重共鳴信号の高強度化に取り組んだ。本実験では、図2に示すように試作した1素子パッチアンテナをガラスセルの5 mm 下の高さに配置して行った。アンテナは比誘電率 2.6 の誘電体基板上に共振周波数が 9.2 GHz 近傍となるように電磁界解析ソフトを用いて設計した。アンテナの反射特性を測定し、所望の周波数においてガラスセルが置かれた状態でも十分に空間に電磁波を放射していることを確認した。ここで、二重共鳴信号はレーザーがセルを透過した後の強度をモニターすることで観測され、実環境に置けば図3の青破線に示すように15本の吸収線となって分裂している。本研究で検討している9.2 GHz 近傍である中央の吸収線によるレーザー透過光強度の減少量は少なく、これは電磁波との相互作用によって生じる蛍光も弱いことを示している。一方で、吸収線が分裂する要因は地磁気や不要磁場によって生じるゼーマン分裂によるものであると分かっており、この影響はヘルムホルツコイルなどによって環境磁場を調整することで低減することが出来る。今回、イメージングの高感度化のために1辺500 mmの準ヘルムホルツコイルを用いて磁場の調整を行った。このときの吸収線を黒線で示す。準ヘルムホルツコイルを用いることで吸収線が縮退されて1本となり、レーザー透過光強度がコイルなしの場合と比べ約6倍減少している。これにより、電磁波の照射によって生じる蛍光強度は増強され、CMOSカメラでもその蛍光の変化を十分に撮像可能となり、目的としていたリアルタイムな電磁波イメージングが可能な測定系を構築できた。

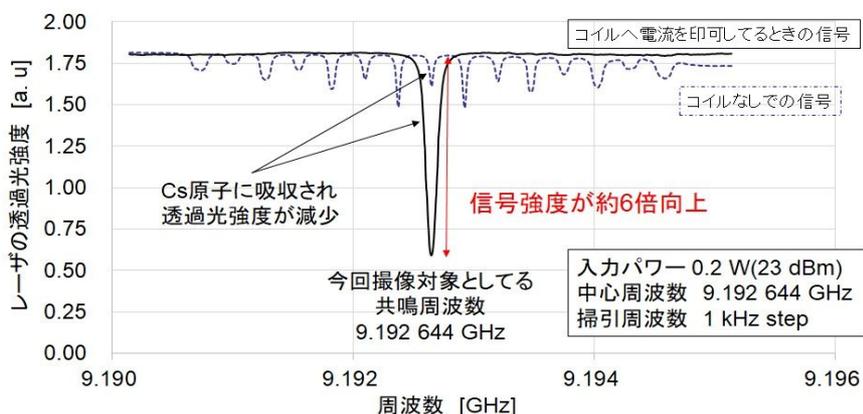


図3 レーザーの透過光強度と二重共鳴信号の観測

最終年度では、初年度に調整した測定系を用いて実際に自由空間中の電磁波イメージングを行った。図 4(a)~(c)に図 2 で示す 1 素子パッチアンテナで生じた蛍光強度分布を撮像した結果を示す。このときのカメラの露光時間は 1 s である。図 4(a)はアンテナへのマイクロ波給電なし、図 4 (b)はアンテナへ 9.192644 GHz で 33 dBm の連続波を給電している。図 4 (c)はその差分画像である。撮像画像から、磁界分布よるものと思われる蛍光分布が観測されている。図 4 (d)には得られた撮像画像の妥当性を評価するため、測定系と同条件の位置関係で電磁界解析をして得られたガラスセル中央の磁界強度分布を示す。それぞれの分布を比較すると、アンテナ素子の真上が最も強度が強く、その周囲に周期的に分布を持つ点など観測した蛍光分布は解析した分布と特徴が一致していることがわかる。一方で、給電部周辺などでの強度分布の相違点も見られる。これは、解析では考慮しきれていないコネクタなどの影響と、ガラスセル面内において調整された磁場が不均一なため、磁場強度に対する蛍光強度の感度が面内で異なっているためであると考察している。最終的に、本測定系ではカメラの露光時間は 10 ms においても撮像可能であり、給電のオンオフなど磁界分布が変化する様子をリアルタイムに撮像できることを実証した。ここで、アンテナを素子間隔 30 mm で配置して 2 素子アレー化し、図 1 に示す通りの給電部の構成で 27 dBm の連続波をそれぞれポート A, B に給電した。このときポート B の位相を可変位相器で 28 度ずつ変化させたときに撮像された蛍光分布の変化を図 5(a)~(i)に示す。図 5 の変化の様子から、ポート A とポート B の給電が同相(a)の場合、それぞれのパッチ部の直上が最も蛍光強度が強く、ほぼ逆相(g)のときに各パッチの中間部分が最も蛍光強度が強くなっている。同様に電磁界解析でも検証を行い、ポート B 側の位相を 60 度ずつ変化させたときの磁界分布結果を図 6 に示す。図 5 で撮像した蛍光分布と同様の変化が解析でも得られることを確認し、本測定系においてアレーアンテナのビーム走査状況などもリアルタイムに観測可能であることを示した。今後は、この点をより発展させ、より高速な掃引やより広範囲をリアルタイムに撮像できるように改良を進める。

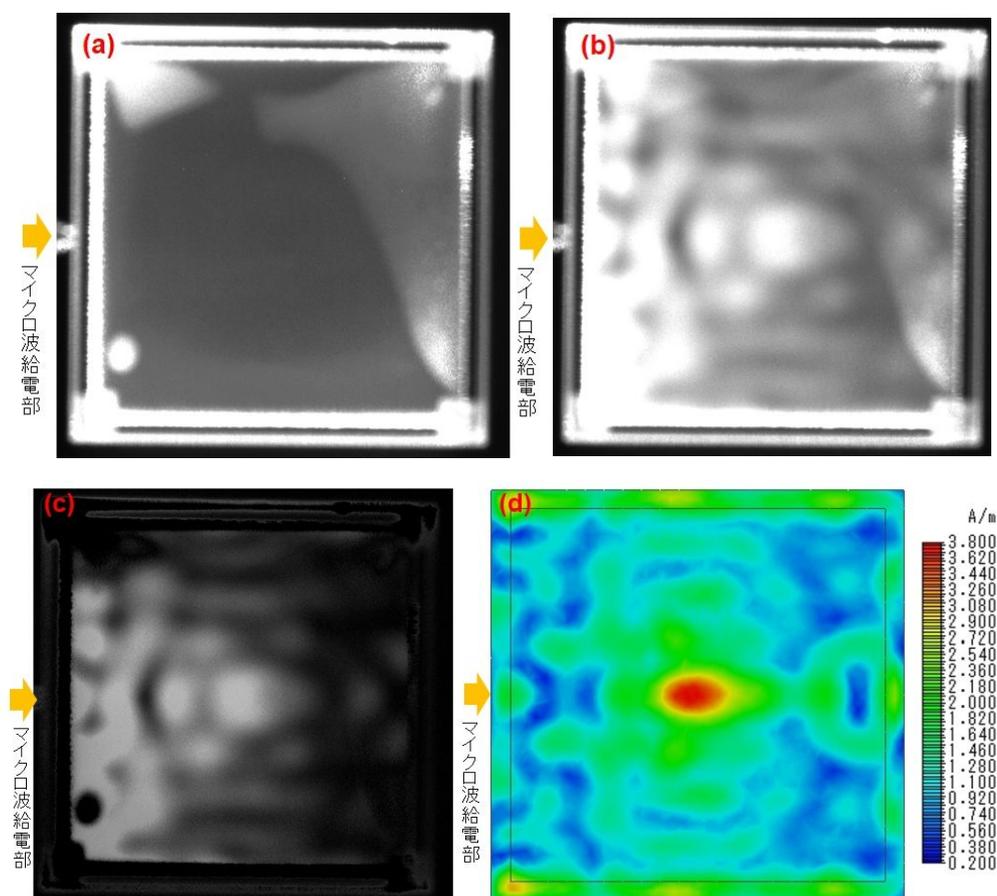


図 4 (a) ~ (d) 1 素子パッチアンテナでの蛍光撮像画像((a)給電なし,(b)給電あり,(c)差分画像)と電磁界解析で得られた磁界強度分布(d)

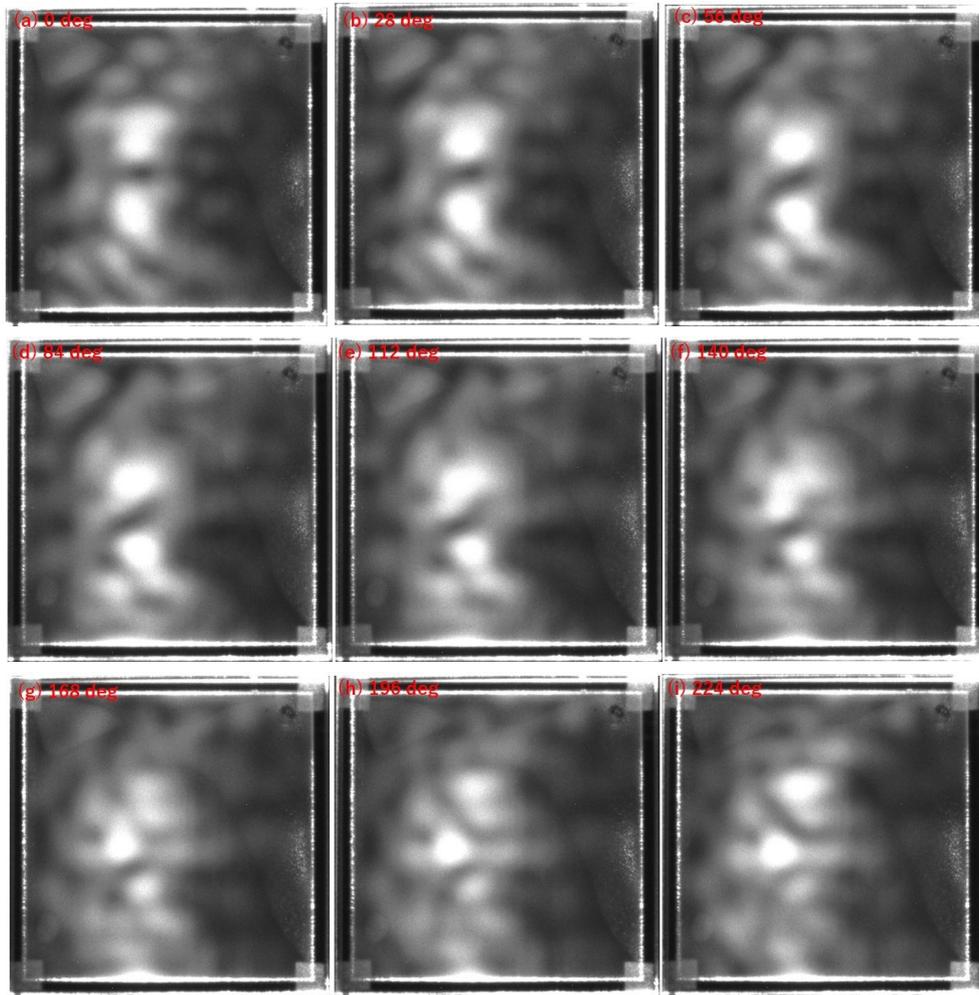


図 5 (a) ~ (i) パッチアレーアンテナでの CMOS カメラ蛍光撮像画像

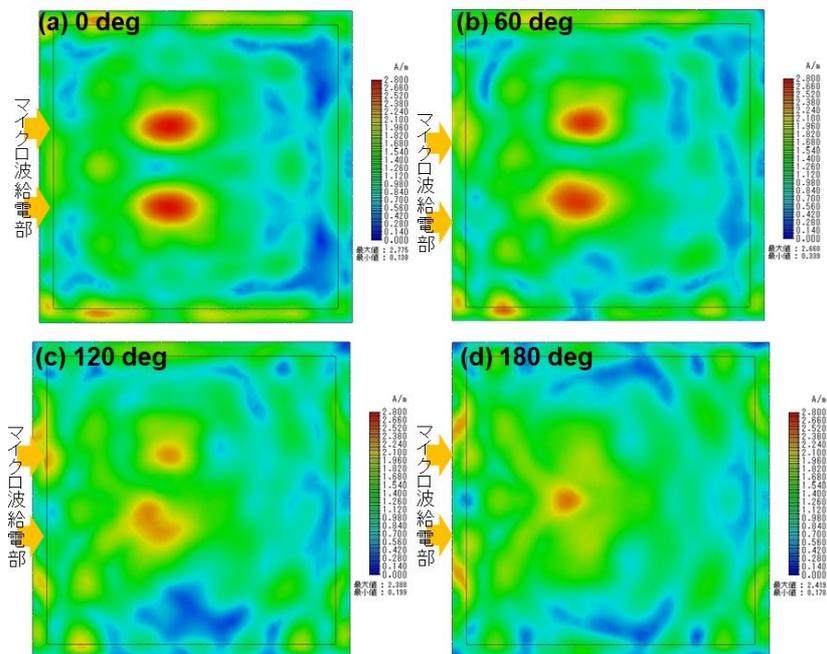


図 6 (a) ~ (d) 電磁界解析から得られた給電位相を変化させたときのパッチアレーアンテナからの放射磁界分布の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 東島侑矢、木下基、飯田仁志
2. 発表標題 セシウム蒸気セルを用いたパッチアンテナからの放射磁界分布のリアルタイムイメージング
3. 学会等名 電子情報通信学会 2021年総合大会 B-1-131
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 東島侑矢
2. 発表標題 原子の共鳴現象を用いたパッチアンテナの放射磁界分布リアルタイムイメージング
3. 学会等名 2020年度 計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 東島侑矢
2. 発表標題 原子の共鳴現象を利用した電磁波リアルタイムイメージングための基礎的検討
3. 学会等名 2019年度 計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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