

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01935

研究課題名(和文) 実験・分析・分析から探る星周ダストの形成・変化・変質

研究課題名(英文) Formation and alteration of circumstellar dust from coordinated studies of experiments, analysis, and observation

研究代表者

瀧川 晶 (Takigawa, Aki)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：10750367

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：星間・星周ダストの形成を理解するために、任意の組成のガスの凝縮を模擬し、凝縮温度が室温と液体窒素温度に制御し、電子銃二つと抵抗加熱式ガス源からの同時凝縮が可能な真空凝縮装置を製作し、酸化物・珪酸塩凝縮実験をおこない、Mg-Si-Fe-O系、さらに珪酸塩とH<sub>2</sub>O氷の同時凝縮に成功した。また、誘導熱プラズマ装置で組成を系統的に変えた微粒子凝縮実験を行った。実験結果から、シリケートに富む・乏しい星周ダスト組成の制約をおこなった。隕石試料及びはやぶさ2が持ち帰ったリュウグウ試料へのイオン照射実験から宇宙風化過程を制約した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非晶質珪酸塩は星周・星間ダストとして豊富に、また至る所に存在し、これまでに多くの研究があるものの、観測されるダストの特徴を物質科学的に裏付けることが難しく、依然それらの組成や構造はわかっていない。本課題で低温での実験が可能でかつ系統的に組成を変化させられる実験装置を開発し、低温から高温まで幅広い宇宙環境でのダスト形成が実験室で再現できるようになった。これにより、観測から示唆されるダスト放射・吸収の特徴を再現するために必要な非晶質星周・星間ダストの形成条件と組成が推定できるようになると期待され、天文学と鉱物学の境界分野である宇宙鉱物学の発展にとって大きな意義がある。

研究成果の概要(英文)：For understanding the formation of interstellar and circumstellar dust, we constructed a vacuum apparatus that can simulate condensation of gases of arbitrary composition, control the condensation temperature to room temperature and liquid nitrogen temperature, and perform simultaneous condensation from two electron guns and a resistance heating gas source, and conducted oxide and silicate condensation experiments at room temperature and low temperature. In addition, particulate condensation experiments in the Al-Ca-Fe-Si-Mg-O system were conducted using an induction thermal plasma system. We measured the substrate temperature, calibrated a film thickness gauge to control the condensation rate, added an H<sub>2</sub>O gas introduction system, conducted condensation experiments using a single gas source and analyzed the condensate, and conducted condensation experiments using multiple gas sources and analyzed the condensate.

研究分野：宇宙鉱物学

キーワード：ダスト 実験 珪酸塩 赤外線天文学 宇宙塵

## 1. 研究開始当初の背景

銀河系に存在する金属元素の大半は、漸近巨星分枝星(AGB 星)と呼ばれる低-中質量の恒星が進化末期の巨星段階で放出したガスや塵によってもたらされたと考えられている。太陽系は約 46 億年前、原始太陽をまわるガスと塵の円盤(原始惑星系円盤)を経て形成した。原始惑星系円盤は分子雲と呼ばれる冷たいガスと塵の雲が崩壊・収縮してつくられるため、分子雲の塵と、原始惑星系円盤で一旦ガス化し再凝縮した塵が合わさって惑星や小惑星の原材料となったと考えられている。

始源的な小惑星や彗星塵中から、ごく稀(もっとも豊富なもので 100ppm 程度)に、非常に大きな酸素や炭素の同位体異常を示す珪酸塩、酸化物、有機物などの粒子が見つかる。同位体組成から、太陽系形成以前に進化末期の恒星大気外層で形成したと考えられるため、プレソーラー粒子と呼ばれる。プレソーラー粒子が形成した親星は、粒子の同位体組成の分析と、恒星での元素合成理論を組み合わせることで推定できる。大半が低-中質量の恒星で作られ、大質量恒星の進化末期段階である超新星起源のものも存在することがわかっている。

非晶質珪酸塩は、プレソーラー粒子として最も豊富である(Nguyen et al. 2007)。また、非晶質珪酸塩や非晶質酸化物は、主な星周・星間ダストでもある(e.g., Henning 2010)。これまでダストの種類と同定は、実験室で測定された鉱物や合成試料の赤外分光測定データと中間赤外線観測の比較で行われてきた。実験の容易さから、ダスト模擬物質として、ゾルゲル法という水を介した化学反応や溶融メルトの急冷などの手法が採用されてきた(e.g., Dorschner et al. 1995)。しかし、非晶質物質の構造は合成手法に依存するため、観測スペクトルの正しい解釈をおこなうためには、星周でのダスト凝縮環境に近い、高温ガスからの冷却によるダスト凝縮により合成した試料を比較対象として使う必要がある。さらに、ダストの供給と破壊のバランスから、星周環境だけでなく分子雲でのダスト形成が重要であることが指摘されている。しかし、実験的な困難さから物質科学的制約がほとんどされておらず、星周環境と分子雲で作られるダストの違いはわかっていない。

## 2. 研究の目的

個々のプレソーラー粒子が形成して隕石母天体に取り込まれるまでの遍歴(プレソーラー粒子の歴史)は、太陽の一代前の恒星から太陽系形成初期に至る、太陽系原材料物質の歴史そのものである。本研究では、星周・星間ダストの形成を実験に調べ、地球外試料の分析や赤外観測を組み合わせることで、ダストがどのように形成し、変質し、太陽系に取り込まれ、太陽系形成材料の歴史の一端を明らかにすることを目指す。

### 3 . 研究の方法

従来の凝縮実験は、抵抗加熱式の真空炉を用いた結晶成長実験もしくは smoke 実験と呼ばれる金属元素を含む揮発性ガスを用いた微粒子凝縮実験が主流であった。これらの実験では、凝縮場におけるガス組成が非常に限られた実験しかない。そこで本研究では、星周環境及び分子雲でのダスト凝縮過程を模擬し、かつ、非晶質物質の凝縮過程を明らかにするために従来より幅広い化学組成での実験を可能にする、誘導熱プラズマ装置及び分子線エピタキシー装置を用いて凝縮実験をおこなった。

#### **誘導熱プラズマ装置を用いたダスト模擬粒子凝縮実験**

誘導熱プラズマ (ITP) 装置では、高温の熱プラズマ中で出発試料を蒸発させ、急冷させてナノ粒子を凝縮させる。出発試料は混合粉体で供給するため、ガス組成が任意にコントロールできる特徴をもつ。京都大学から東京大学へ ITP 装置 (JEOL TP-40020NPS) を移設し、Al-Ca-Na-Mg-Fe-Si-O 系で組成を変化させて凝縮実験を行った。EPMA、X線回折装置 (XRD) および透過型電子顕微鏡を用いて、凝縮物の結晶構造と組織、化学組成を分析した。

#### **分子線エピタキシー装置を用いた星周・星間ダスト凝縮実験**

あらたに電子銃 2 機および抵抗加熱式の高温セルを備えた真空装置を製作し、三つのガス源からのフラックスを独立に制御することで任意の組成のガスを凝縮する。基板温度は室温および液体窒素による冷却をおこなう。低温基板を用いた実験では、さらに系内に水蒸気ガスを導入し、氷と珪酸塩の同時凝縮実験をおこなう。

#### **低エネルギーイオン照射実験**

初期太陽系円盤でプレソーラー粒子が太陽風などの低エネルギー宇宙線との衝突により変質した可能性がある (Takigawa et al. 2015)。宇宙研において、低エネルギー (1-5 keV) で水素、ヘリウムイオンが照射できるイオン照射装置を開発し、性能試験および初期的な実験をおこなってきた。本研究では、この装置を用いて、単結晶オリビン、炭素質隕石試料 (Murchison, Orgueil 隕石)、はやぶさ 2 探査機により小惑星リュウグウから持ち帰った帰還粒子に対して、太陽風を模擬した 4 keV He イオン照射実験を行った。

### 4 . 研究成果

#### **誘導熱プラズマ装置を用いたダスト模擬粒子凝縮実験**

星間・星周非晶質シリケートの組成を制約するために、Al-Ca-Na-Mg-Fe-Ni-Si-O 系での Cl コンドライト組成の実験及び Al 量を変化させた実験、Na と Ca の有無、Fe と Ni の有無を変えた実験をおこない、非晶質珪酸塩ナノ粒子を凝縮物として得た。凝縮物の平均組成は出発物質と近く、狙い通りのガス組成での実験が行われたことが確認された (図 1)。星周ダストに見られる 11  $\mu$ m の肩や 20-24  $\mu$ m のフィーチャーの傾きが、Al-O 振動に由来するものであることを示した (図 2)。また、彗星塵の主要構成物である非晶質珪酸塩 (GEMS) の特徴をよく再現することを示した (Kim, Takigawa, et al. 2021, corresponding author)。

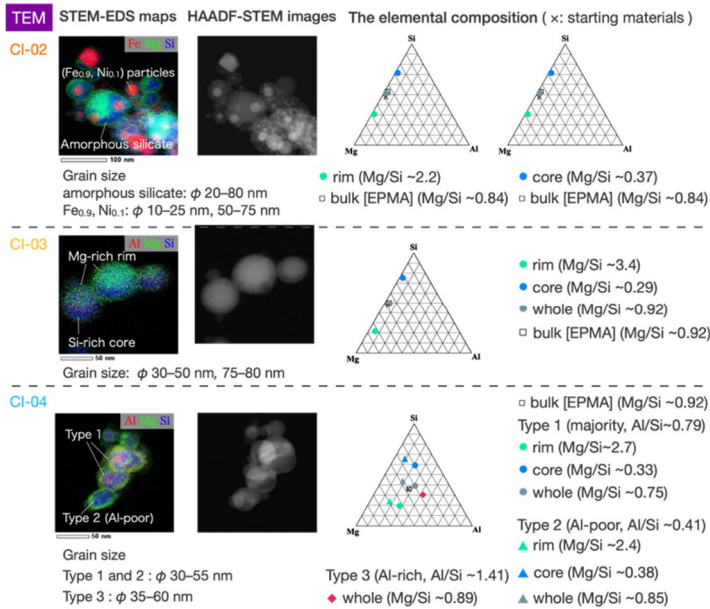


図 1 : (左) 凝縮ナノ粒子の透過型電子顕微鏡画像 (STEM-EDS 像と STEM-ADF 像) と (右) EPMA 及び STEM-EDS による凝縮物の化学組成と出発物質組成の比較 .

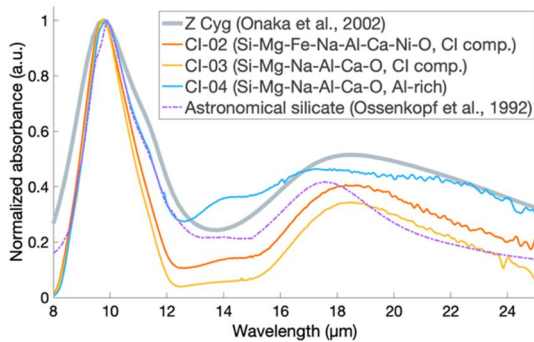


図 2 : ITP 凝縮物の赤外吸収スペクトルと Astronomical silicate, AGB 星のダスト放射観測との比較 .

さらに、シリケートダストに乏しい M 型 AGB 星のダスト組成を制約するために、Al-Ca-Fe-Si-O 系での凝縮実験をおこない、10-100 nm の結晶性に乏しい酸化物・珪酸塩を得た (図 3 左). その結果、12 μm 付近のブロードフィーチャーを説明するためには Al に富むダストでなくてはならないこと、Ca が微量に含まれることで、観測されるようなブロードフィーチャーが再現されることが示された (Takigawa et al. 2023, LPSC).

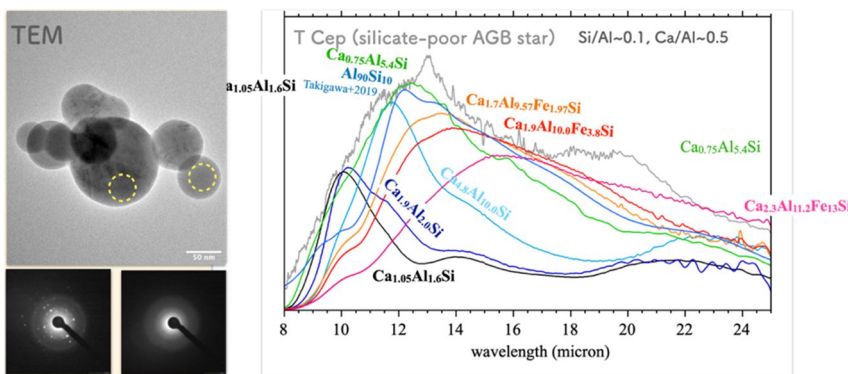


図 3 : (左) Al に富む珪酸塩凝縮物の透過型電子顕微鏡像と回折図形 (右) 系統的に組成を変えた凝縮物の赤外吸収スペクトルとシリケートダストに乏しい AGB 星 (T Cep) のダスト放射の比較 .

### 分子線エピタキシー装置を用いた星周・星間ダスト凝縮実験

あらたに電子銃 2 機および抵抗加熱式の高温度セルを備えた真空装置を製作し、三つのガス源からのフラックスを独立に制御することで任意の組成のガスを凝縮できる装置を開発した (図 4). 基板温度は室温および液体窒素による冷却で、低温凝縮性生物の構造を調べた. 低温基板を用いた実験では、さらに系内に水蒸気ガスを導入し、氷と珪酸

塩の同時凝縮実験に初めて成功した。金属基板に凝縮させた生成物は、集束イオンビーム加工装置で断面を切り出し、透過型電子顕微鏡で構造及び組成分析をおこなった(図5左)。KBr基板に凝縮させた試料は、フーリエ赤外分光分析をおこない、条件ごとの赤外スペクトル変化を調べた(図5右)。

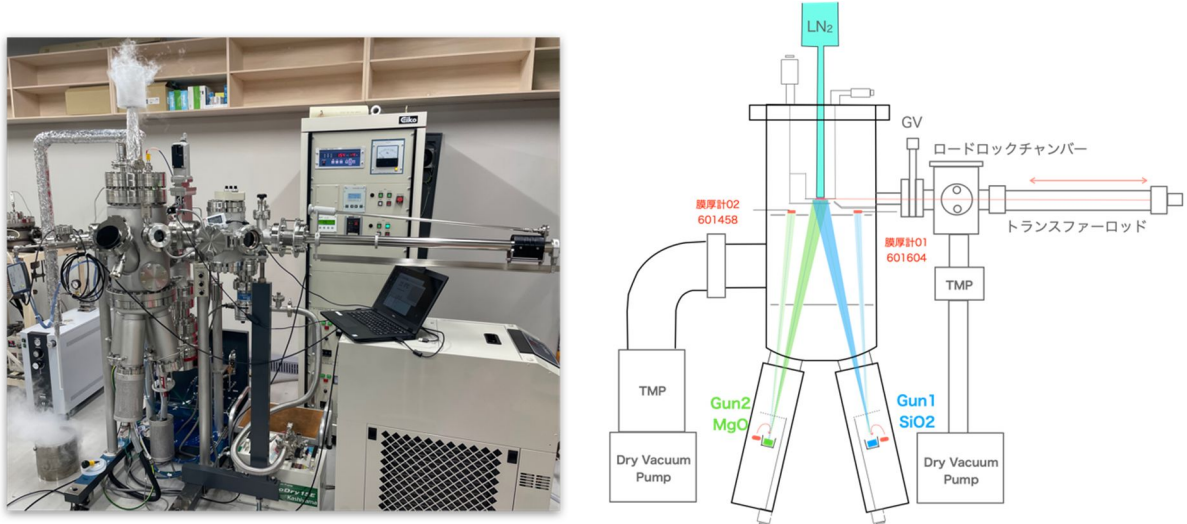


図4：新規製作した分子線エピタキシー(MBE)装置。右の概略図では、電子銃加熱によるガス供給システム。抵抗加熱式の高温度セルは省略している。

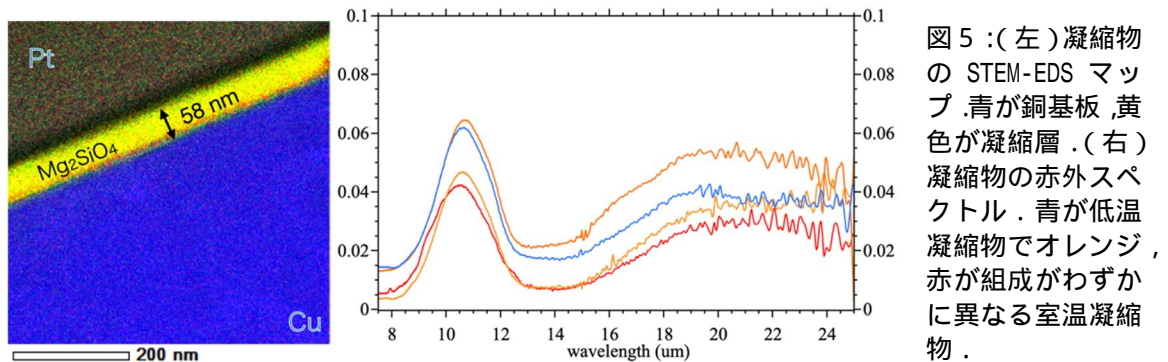


図5:(左)凝縮物のSTEM-EDSマップ。青が銅基板,黄色が凝縮層。(右)凝縮物の赤外スペクトル。青が低温凝縮物でオレンジ,赤が組成がわずかに異なる室温凝縮物。

### 低エネルギーイオン照射実験

照射実験はJAXAに設置したイオン注入装置を用いた。CIコンドライト隕石であるOrgueil隕石とリュウグウ粒子へ4 keV Heイオンを $10^{17}$  ion/cm<sup>2</sup>照射した。照射前後の試料のSEM観察及び照射断面のTEM分析を行い、はやぶさ2による帰還試料に見られる宇宙風化組織が主に太陽風照射による変質組織であることを示した(図7)。これらの宇宙風化組織はプレソーラー粒子に見られる表面層組織と類似しており、予測していたプレソーラー粒子の原始太陽系円盤での表面組織の変質を裏付ける結果となった。

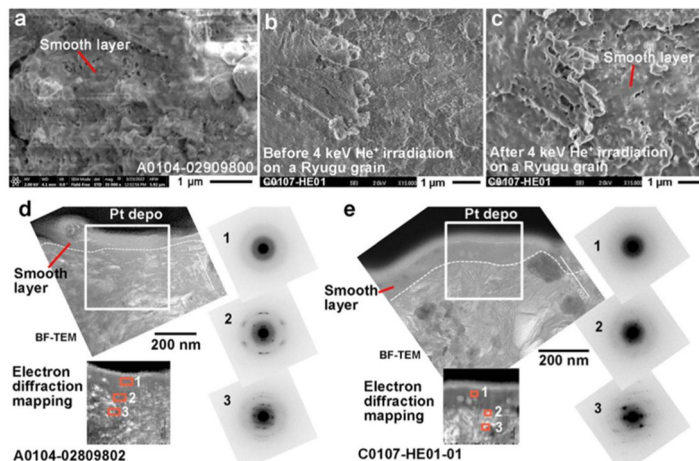


図7:(a)リュウグウ帰還資料に見られる宇宙風化組織及び(d)断面の透過型電子顕微鏡像。(b),(c)イオン照射前後のリュウグウ粒子及び(e)照射後のリュウグウ粒子断面の透過型電子顕微鏡像。Noguchi et al. (2022), Nature Astronomy を改変。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Davidsson Bjorn J.R., Birch Samuel, Blake Geoffrey A., Bodewits Dennis, Dworkin Jason P., Glavin Daniel P., Furukawa Yoshihiro, Lunine Jonathan I., Mitchell Julie L., Nguyen Ann N., Squyres Steve, Takigawa Aki, Vincent Jean-Baptiste, Zacny Kris	4. 巻 354
2. 論文標題 Airfall on Comet 67P/Churyumov?Gerasimenko	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114004 ~ 114004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2020.114004	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 該当する
1. 著者名 Takigawa Aki, Kim Tae-Hee, Igami Yohei, Umemoto Tatsuki, Tsuchiyama Akira, Koike Chiyo, Matsuno Junya, Watanabe Takayuki	4. 巻 878
2. 論文標題 Formation of Transition Alumina Dust around Asymptotic Giant Branch Stars: Condensation Experiments using Induction Thermal Plasma Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L7 ~ L7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab1f80	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 該当する
1. 著者名 TAKIGAWA Aki	4. 巻 51
2. 論文標題 Astrominralogical studies on material circulation in the galaxy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Magazine of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/gkk.220225	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 Enju S., Kawano H., Tsuchiyama A., Kim T. H., Takigawa A., Matsuno J., Komaki H.	4. 巻 661
2. 論文標題 Condensation of cometary silicate dust using an induction thermal plasma system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A121 ~ A121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202142620	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Kim T. H., Takigawa A., Tsuchiyama A., Matsuno J., Enju S., Kawano H., Komaki H.	4. 巻 656
2. 論文標題 Condensation of cometary silicate dust using an induction thermal plasma system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A42 ~ A42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202141216	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Matsuno Junya, Tsuchiyama Akira, Watanabe Takayuki, Tanaka Manabu, Takigawa Aki, Enju Satomi, Koike Chiyo, Chihara Hiroki, Miyake Akira	4. 巻 911
2. 論文標題 Condensation of Glass with Multimetal Nanoparticles: Implications for the Formation Process of GEMS Grains	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 47 ~ 47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe5a0	査読の有無 無
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2件(うち招待講演 1件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 瀧川 晶
2. 発表標題 紀元前太陽系を探る：質量放出星から太陽系への物質進化
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Takigawa, T.-H. Kim, Y. Igami, T. Umemoto, A. Tsuchiyama, C. Koike, J. Matsuno, T. Watanabe
2. 発表標題 Formation of metastable alumina dust around agb stars: Condensation experiments using induction thermal plasma systems.
3. 学会等名 The 82nd Annual Meeting of the Meteoritical Society(国際学会)
4. 発表年 2019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
---------	---------