

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04258

研究課題名(和文) 鑄鉄粉の制振メカニズムの解明と異なる実振動現象への応用技術の確立に対する挑戦

研究課題名(英文) Challenging the elucidation of the vibration suppression mechanism of cast iron powder and its application to different vibration phenomena

研究代表者

中江 貴志 (NAKAE, TAKASHI)

大分大学・理工学部・准教授

研究者番号：80579730

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：粒状ダンパは、運動エネルギーを利用して、振動体と粒子間の衝突あるいは摩擦エネルギーとして消費するダンパである。現在、高級オーディオラックの制振材として鑄鉄粉が利用されているが、鑄鉄粉のような粒子が非常に小さい粒状体の制振効果とメカニズムを調べた研究は少なく、その技術的応用が期待されている。本研究では、粒子が非常に小さい鑄鉄粉の制振メカニズムを基礎的な実験から明らかにするのが第1の目的である。さらに、鑄鉄粉を用いた制振効果の実現象への応用を図るため、自励振動現象である、ディスクブレーキの鳴き、Hot Judder現象および強制振動系であるオーディオラックの制振に対する応用を試みる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鑄鉄粉はこれまでの粒状ダンパよりも粒径が非常に小さく、制振効果の優位性が確認されているが、粒径が小さい粒状ダンパの振動特性、制振メカニズムは未解決であり、さらに自励振動を制振する技術は未確立であった。このような異なる振動現象への制振効果を確認したことにより、汎用性が高い制振材として利用でき、独創的な製品開発が可能となる。また、鑄鉄粉はシンプルかつ安価で、一般的な粘性減衰やアクティブダンパと異なり、老朽化せず、メンテナンス不要で、温度に依存しない等の利点以外にも、廃材の有効利用の観点からも、インパクトのある社会還元性と環境の持続性を両立する制振材として利用可能である。

研究成果の概要(英文)：The particle damper is a damper that uses the kinetic energy of particles and consumes the energy by collision or friction energy between a vibrating body and particles. Currently, The cast iron powder treated in this study has a particle size much smaller than the particle dampers used so far, and is used as a damping material for high grade audio racks, but its damping mechanism is unsolved. In this study, the mechanism of vibration suppressive effect and vibration characteristics of cast iron powder are clarified by fundamental experiment. In order to apply the vibration damping effect of cast iron powder to actual vibration phenomena, the self-excited vibration phenomenon such as disc brake squeal, Hot Judder phenomenon, and the vibration damping of audio rack which is a forced vibration system are treated.

研究分野：機械力学

キーワード：粒状体 衝突ダンパー オーディオ 強制振動 自励振動 制振

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

粒子ダンパとは、粒子の運動エネルギーを利用して、振動体と粒子間の衝突あるいは摩擦エネルギーとして消費するダンパである。粒子ダンパは極めてシンプルで安価であり、一般的な粘性減衰やアクティブダンパと異なり、老朽化せず、メンテナンス不要で、かつ温度に依存しない等の利点がある。現在では、テニスラケット、ショックレスハンマー、スペースシャトルのメインエンジン等での利用があるが、産業界での使用例は非常に少ない。また、粒子ダンパに関する研究例はあるが、いずれも粒子径が 1mm を超えるものを対象にしたものがほとんどである。

本研究で扱うオーディオ機器用的高级ラックは、鑄鉄粉を封入することで音質を向上させる目的で開発されたが、振動理論に基づいた評価はなされていない。さらには、鑄鉄粉のような粒子が非常に小さい粒状体の振動特性を調べた研究はなく、その制振技術について提案されていない。

2. 研究の目的

本研究では、粒子が非常に小さい鑄鉄粉の振動特性や制振メカニズムを基礎的な実験から明らかにするのが第 1 の目的である。さらに、鑄鉄粉を用いた制振効果の実現象への応用を図るため、自励振動現象であるディスクブレーキの鳴き、Hot judder 現象、さらに、強制振動系であるオーディオラックの制振、以上の 3 テーマをアプリケーションとして、振動問題に対する鑄鉄粉の制振技術を開発することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 基礎的アプローチ

ステンレス板を用いた基礎実験

本実験では、長さが 425mm、幅が 30mm、厚さが 10mm のステンレス製の板を用いて加振実験を行った。図 1 に粒状体を付加した様子を示す。本実験では、鑄鉄粉または比較として粒径 1mm のステンレス球をステンレス板に付加し、Sin Sweep 加振試験を行う。ステンレス板と加振器の間にはフォースピックアップを取り付けている。

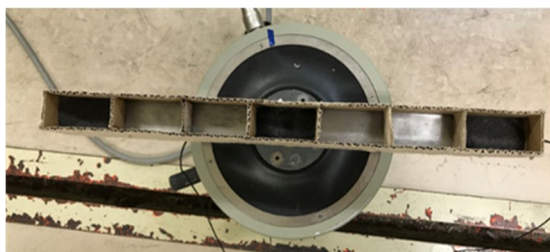


図 1 粒状体を付加したステンレス板

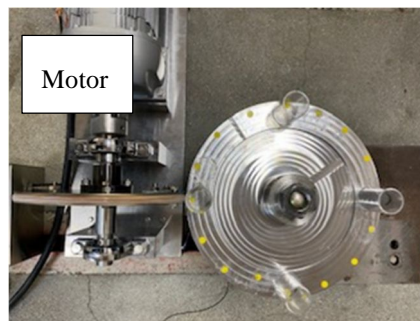


図 2 円板の実験装置

円板で発生する自励振動の制振

図 2 に示すように、テニスガットを巻き付けた円板をモーターで一定回転で回し、段付き円板を擦ることで自励振動を発生させる。テニスガットには松脂を塗布し、摩擦特性を調整する。段付き円板上の 4 か所にアクリルケースを取り付け、その中に鑄鉄粉またはステンレス球を 2~16g まで 2g 刻みで封入し、各質量に対し、それぞれ 10 回実験を行い、制振効果を確認する。円板に加速度計を取り付けその加速度信号を測定する。

(2) 応用アプローチ

過去の研究で、鑄鉄粉が封入されてる高級オーディオラック C と封入されていないラック M の打撃試験を行い、ラック C のモード減衰比がラック M に比べ約 1.5~2 倍大きく、特に 1000Hz 以上の高周波域に対して、鑄鉄粉に制振効果があることが確認されている。本実験では、鑄鉄粉の制振効果を確認するために、図 3 に示すように鑄鉄粉が封入されていないラック M の棚板の上に、鑄鉄粉あるいはステンレス球の粒状体を付加し、加振実験することで振動特性の違いを調査する。

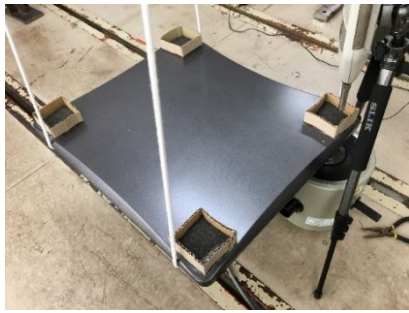


図3 粒状体を付加したラック M 棚板の加振実験

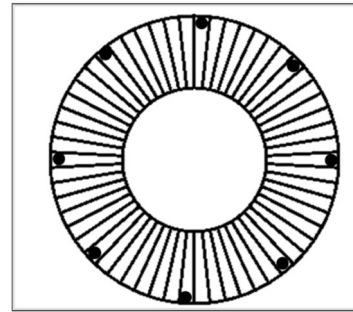


図4 質量付加配置場所

自動車用ディスクブレーキ面内鳴きに対する鋳鉄粉の抑制効果

ロータリブ部に集中質量または鋳鉄粉を付加した状態で打撃試験を行い、ロータの固有振動数の変化を調査比較する。集中質量または鋳鉄粉の付加配置や付加質量の合計は、様々な条件で実施したが、その代表として、図4に示すように等間隔に8要素配置した場合、また、付加質量の合計を、それぞれ、集中質量の場合は90g、鋳鉄粉は64gとした場合について報告する。

次に質量または鋳鉄粉をロータに付加した状態で制動実験を行い、面内鳴きへの影響を調査する。測定方法は、加速度計をキャリパに取り付ける。何も付加していない状態で制動実験を行い、基準鳴きを測定する。次に質量または鋳鉄粉を打撃試験と同様に8要素をロータに付加し、制動実験を10回連続で測定して、鳴きの発生の有無を測定する。

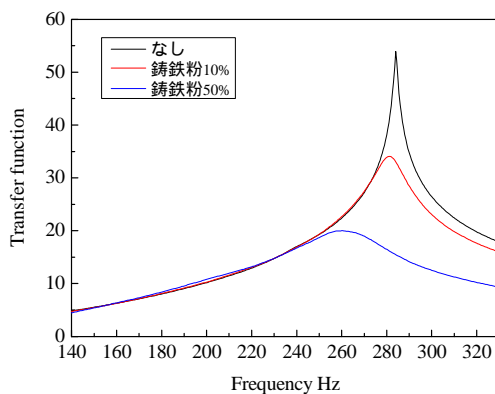
4. 研究成果

(1) 基礎的アプローチ

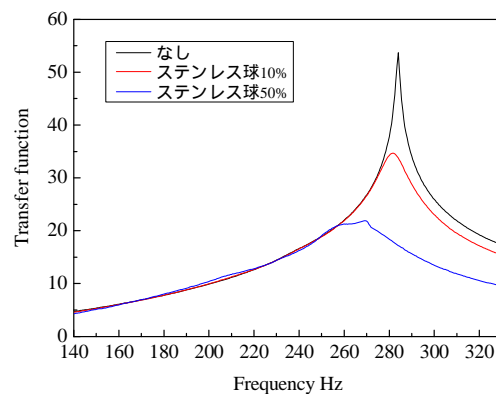
ステンレス板を用いた基礎実験

図5(a)および(b)にそれぞれ鋳鉄粉およびステンレス球を付加した時の1次曲げモードに対する周波数応答曲線を示す。図5から、粒状体を付加することによって伝達関数のピークが低下しており、質量比が大きいほどさらに応答が低下していることがわかる。

さらに表1に図5の応答曲線から求めた減衰比を示す。表から、質量比が増加するほど減衰比が大きくなり、ステンレス球よりも鋳鉄粉の方が減衰比が大きくなり、振動低減効果が大きいことがわかる。本実験以外に3次や5次の曲げモードに対しても同様の実験を行った結果、質量比によってはステンレス球の方が減衰比が大きい場合もあり、鋳鉄粉の抑制効果が加振周波数に依存していることがわかり、今後の課題となった。



(a) 鋳鉄粉



(b) ステンレス球

図5 周波数応答曲線

表1 減衰比(1次モード)

質量比	鋳鉄粉	ステンレス球
0%	0.213%	0.214%
10%	1.96%	1.77%
50%	8.47%	2.35%

円板で発生する自励振動の制振

まず、何も付加していない場合、635Hz の(2,0)モードに対する定常的な自励振動が約-13dBV(1mV=1m/s²)の加速度振幅で発生した。図6に鑄鉄粉またはステンレス球を付加した場合の抑制実験での振動ピークレベルを示す。横軸はそれぞれの粒状体の質量を縦軸は加速度振幅レベルを表す。図6(a)から4g載せた時、約-40dBVに急激に低下し、ほとんど自励振動の音が聞こえなくなった。それ以降は質量を増やすほど下がっていき、最終的には-60dBV付近まで抑えることができた。

一方、図6(b)からステンレス球は8gのとき10回中4回自励振動を抑えることができ、8g以降16gまでは、質量を付加してもあまり変化が見られなかった。以上から、鑄鉄粉の方が少ない量で自励振動を抑えることができ、鑄鉄粉の有用性が確認できた。

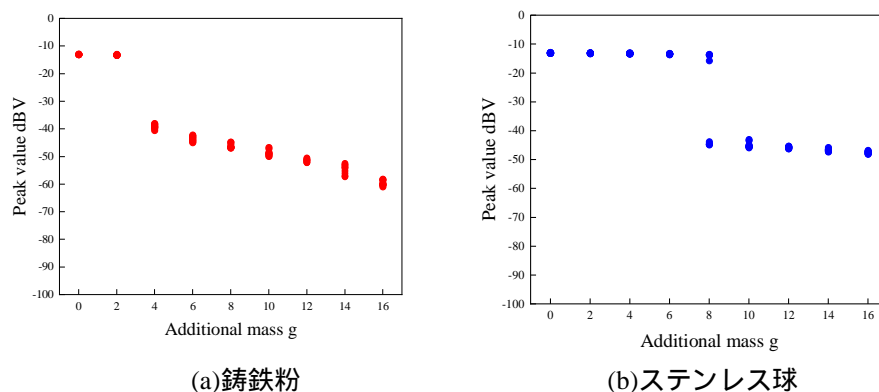


図6 ピーク値の散布図

(2) 応用アプローチ

図7に周波数応答曲線を示す。図7の横軸は周波数、縦軸は加速度振幅と加振力の比を表す。図7より粒状体を付加することで、すべての振動モードで振動を抑制することができており、曲げモードだけでなく、ねじりモードにも粒状体ダンパの効果があることが分かった。さらに、加振実験において、ステンレス球では互いに衝突を激しく繰り返しているのに対し、鑄鉄粉ではそのような大きな衝突は見られず、粒状体の動きが全く異なることから、鑄鉄粉では、摩擦の影響が大きいと予想している。

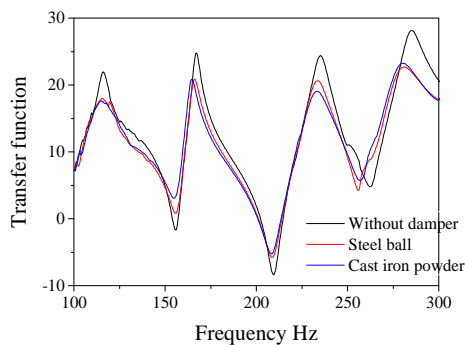


図7 周波数応答曲線

自動車用ディスクブレーキ面内鳴きに対する鑄鉄粉の抑制効果

図8(a)に何も付加していないときの基準となるロータの打撃試験時の周波数分析結果を、図8(b)に質量90gを付加した時、図8(c)および(d)にそれぞれ鑄鉄粉を64gおよび224g付加した時の結果を示す。図8(a)の10425Hzの固有振動数が面内鳴きの発生に起因するロータの面内2次モードに対する固有振動数である。図8(b)から質量を付加した場合、質量効果からロータの固有振動数が低下していることが確認できる。また、一方、図8(c)および(d)では固有振動数の低下は確認できず、鑄鉄粉の量が多いほど周波数ピークが丸みを帯び、減衰比が増加していることが確認できる。表2に図8(a)、(c)および(d)の面内2次モードの周波数ピークに対する減衰比を示す。鑄鉄粉が多いほど減衰比が増加していることが確認できた。以上から、集中質量は質量効果があり、ロータの固有振動数を低下させ、パッドとの連成を軽減させ面内鳴きの抑制に期待できる。また、鑄鉄粉は質量効果ではなく減衰として効果的であることがわかった。

次に、制動実験時の加速度波形を図9に示す。図9(a)から何も付加していない時、面内鳴きが発生していることがわかる。図9(b)から質量を付加した場合、鳴きのレベルが低下しており、間欠的な鳴きがわずかに発生していることがわかる。さらに、図9(c)から質量よりも少ない64gの鑄鉄粉で完全に鳴きが抑制されていることが確認できる。以上から、鑄鉄粉の減衰作用は、集中質量よりも鳴きに効果的であり、今回の実験ではさらに鑄鉄粉の量をさらに増やすほど、面内鳴

きに対する抑制効果がより得られることが分かった。

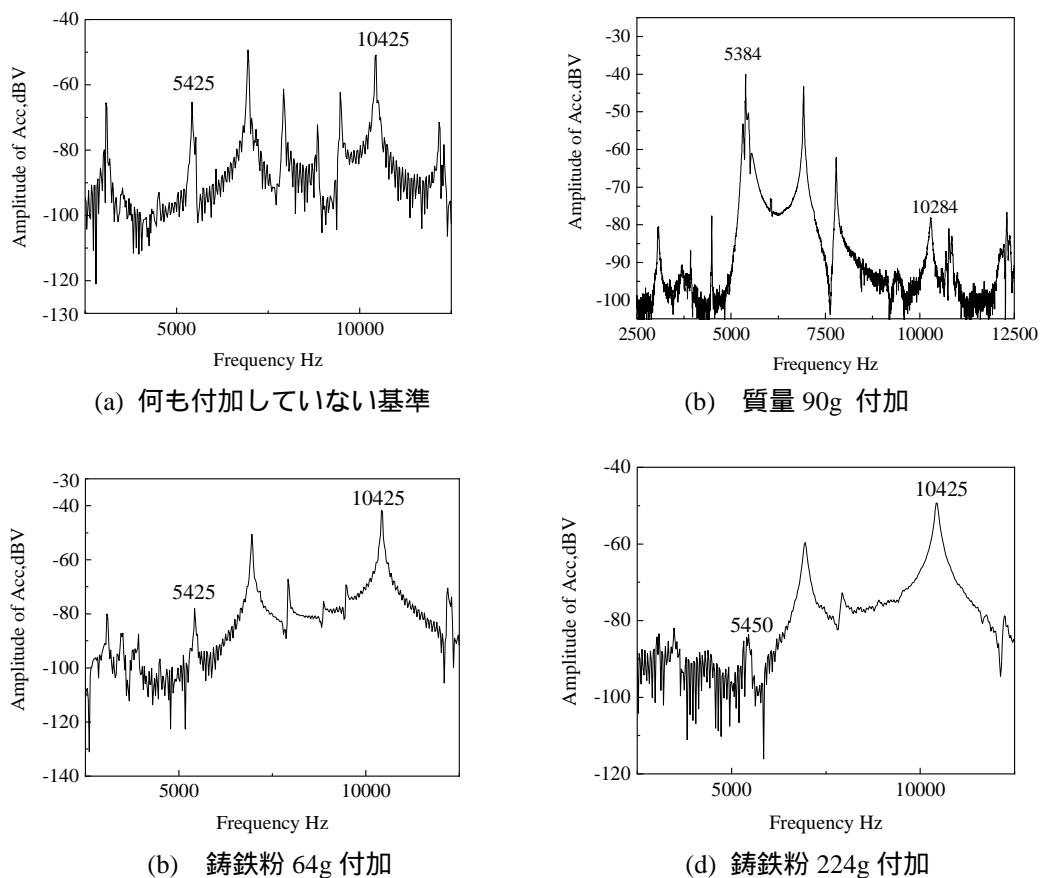


図 8 ロータの打撃試験結果

表 2 減衰比

鋳鉄粉の量	0g	64g	224g
減衰比	0.001	0.0012	0.0054

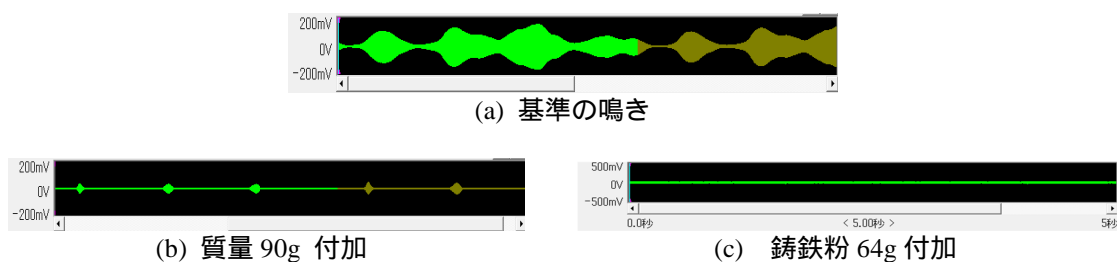


図 9 制動実験時のキャリパ加速度波形

Hot Judder に対する検討

ホットジャダーに対しては、熱に起因するディスク表面の膨張を接触力の変動へフィードバックし、時間遅れ系として低自由度の解析モデルを用いて、簡易的な減速過程を考慮したシミュレーションを行い、ホットジャダーを再現することができた。しかし、この時間遅れ系に対し、粒状体の衝突シミュレーションを組み込むことに難航し、予定していた研究を完了できなかった。

本研究では、鋳鉄粉の制振効果の有用性は明らかになったが、振動数や量によって鋳鉄粉の振動特性が異なっており、その違いについて定量的に評価するまでに至らなかった。現在、新たに基礎的な加振実験および個別要素法を用いたシミュレーション、さらには力と加速度の信号を利用した損失係数を算出し、鋳鉄粉の制振メカニズムを明らかにする研究を継続している。

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 0件）

1. 著者名 Takashi Nakae, Takahiro Ryu, Taisei Miyazaki	4. 巻 1
2. 論文標題 FUNDAMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF PAD LENGTH ON AUTOMOTIVE DISC BRAKE HOT JUDDER	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 27th International Congress on Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 Tatsuya Nakasono, Takashi Nakae, Takahiro Ryu	4. 巻 1
2. 論文標題 FUNDAMENTAL STUDY ON GENERATION MECHANISM OF AUTOMOTIVE DISC BRAKE HOT JUDDER BASED ON A SELF-EXCITED VIBRATION	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 26th International Congress on Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 兒島蒼太, 中江 貴志, 劉 孝宏, 中村 将志
2. 発表標題 自動車用ディスクブレーキ面内鳴き抑制のためのパッドスリット最適位置の考察
3. 学会等名 第30回 交通・物流部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井 優太郎, 中江 貴志, 劉 孝宏
2. 発表標題 自動車用ディスクブレーキで発生するHot Judderに対するパッド長さの影響
3. 学会等名 Dynamic and Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村 将志, 中江 貴志, 劉 孝宏, 兒島蒼太
2. 発表標題 ディスクブレーキ面内鳴きに対するロータ鑄鉄粉付加の影響
3. 学会等名 Dynamic and Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中江 貴志, 劉 孝宏, 川崎 紗梨菜, 廣瀬 新吾
2. 発表標題 鑄鉄粉が封入されたハイグレードオーディオ機器の振動特性に関する基礎的研究
3. 学会等名 Dynamic and Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林 大起, 劉 孝宏, 中江 貴志, 中村 将志
2. 発表標題 ディスクブレーキ面内鳴きを抑制するロータ質量付加の最適設計
3. 学会等名 第29回 交通・物流部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 大介, 劉 孝宏, 中江 貴志
2. 発表標題 ディスクブレーキ面内鳴き抑制のためのロータ質量付加の最適配置
3. 学会等名 Dynamic and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本 伸太郎, 劉 孝宏, 中江 貴志, 廣瀬 新吾
2. 発表標題 鋳鉄粉が封入されたオーディオラック支柱の振動特性に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 沖縄講演会
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
研究分担者	劉 孝宏 (RYU TAKAHIRO) (60230877)	大分大学・理工学部・教授 (17501)	

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