

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03803

研究課題名（和文）丸棒ねじり変形を用いた電流密度均一条件下での電気塑性効果の検証と機構解明

研究課題名（英文）Verification of electroplastic effect and its mechanism under uniform current density using torsional deformation

研究代表者

前野 智美（MAENO, TOMOYOSHI）

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80505397

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）：金属に電流を流しながら塑性変形させると変形抵抗が低減する電気塑性効果が報告されている。電気塑性効果の発生有無について、変形中の電流密度変化が小さい丸棒のねじり試験によって検討した。水冷を用いた電流印加ねじり試験機を構築し、アルミニウム、銅およびチタン棒材のねじり試験を行った。アルミニウム、銅においては温度上昇のない試験が達成され、電流印加による変形抵抗の変化は生じなかった。チタン合金においては、ジュール発熱による温度上昇が生じたが、温度影響を踏まえて電流印加ありとなしを比較した結果、チタン合金で生じる変形抵抗の減少はジュール発熱による温度上昇が主な要因であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アルミニウム、銅、数十 A/mm²以下の電流印加ではジュール発熱による温度上昇や電流密度の集中を抑制すると、明瞭な変形抵抗の変化は生じないことが分かった。つまり、電気塑性効果は生じないことが分かった。また、温度上昇を抑制することが難しい電気抵抗の高いチタンにおいても、同様の電流印加においては変形抵抗の変化は生じるものの、そのほとんどはジュール発熱による温度上昇による軟化であることが、変形抵抗変化の比較およびその変化速度からわかった。

研究成果の概要（英文）：The electrical plasticity effect, where the flow stress of a metal decreases during plastic deformation with the application of an electric current, has been reported. To investigate the occurrence of this effect, bar torsion tests with minimal current density changes during deformation were performed. A water-cooled torsion testing machine with a current application was constructed, and torsion tests were performed on aluminium, copper, and titanium bar specimens. Tests without temperature rise were achieved for aluminium and copper, and no change in flow stress due to the current application was observed. For a titanium alloy, a temperature rise due to Joule heating occurred. Still, a comparison of the results with and without current, considering the temperature effect, showed that the decrease in yield stress observed in the titanium alloy was mainly due to the temperature rise caused by Joule heating.

研究分野：塑性加工

キーワード：電気塑性効果 ジュール発熱 変形抵抗 軟化

1. 研究開始当初の背景

金属材料の塑性加工において、加工中に外部から熱・電気などの物理的要素を印加することで材料特性を変化させる手法が用いられている。例えば、加熱は金属を軟化させ、また回復により延性を向上させている。静水圧付与は空洞の発生などを防止して延性を改善させた加工が可能であり、ファインブランキングなどに応用されている。超音波振動を付与すると Blaha 効果による応力緩和で加工荷重の低減や加工限界が向上する。電流印加は主にジュール発熱によって材料を加熱軟化させることに用いられる。

金属材料に電流を印加した状態で塑性変形を加えると、変形抵抗が減少し、延性が向上する効果として電気塑性効果が報告されている。この電気塑性効果はジュール発熱による軟化とは別に生じる効果として報告されている。しかしながら、多くの検討は引張変形によって検討されており、変形中に断面積減少による電流密度の集中が生じるためジュール発熱による影響を十分に分離して検討がされていなかった。変形抵抗低下のメカニズムについては電子風効果、粒界と転位での局所的なジュール発熱、原子結合弱化学論、エレクトロマイグレーションによる原子拡散の増強などの可能性が検討されている。

2. 研究の目的

本研究では、電気塑性効果の検証において、ジュール発熱の影響を極力小さくするために、断面積減少のほとんど生じない、ねじり変形および圧縮を用いて検討を行った。ジュール発熱による温度上昇が生じにくい実験系を構築し、電気塑性効果の発現有無を検証する。電気塑性効果が確認される場合は、電流印加条件が変形抵抗と延性に及ぼす影響について調査する。

3. 研究の方法

(1) 電流印加丸棒ねじり試験：図1に引張り、せん断およびねじり変形における電流密度変化を示す。引張変形やせん断変形は変形途中において形状変化が大きく、また、電流が集中し、電流密度が高くなる部分が生じる。この場合、局部的にジュール発熱が大きくなってしまう。一方、丸棒のねじりの場合は形状変化がほとんどなく、電流が集中することを防止できる。また、形状変化がないため応力計算も簡単になる。電流印加ありとなしにおいてねじり変形を加え、その際の丸棒に生じる応力について比較し、電気塑性効果の発現について検証した。

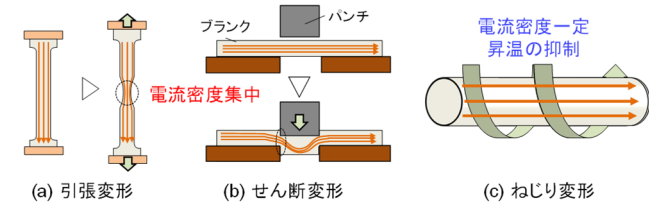


図1 引張り、せん断およびねじり変形における電流密度変化

図2に、直接水冷を用いた電流印加ねじり試験機の概略を示す。塑性発熱による温度上昇を低減するために、回転速度は 2-8 rpm の低速で実施した。試験片部はジュール発熱による温度上昇を抑制するために、9 L/min で水冷を実施した。ねじり中のせん断応力は、丸棒固定治具をロードセルとしてトルクを取得した。せん断応力およびせん断ひずみは、取得したトルクおよび回転数から求めた。

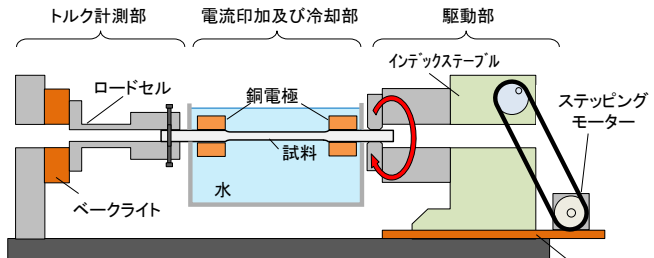
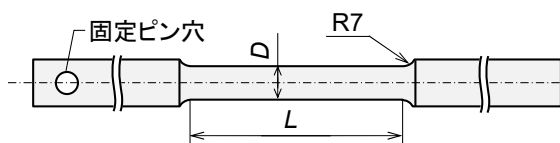


図2 直接水冷を用いた電流印加ねじり試験機概略

電流は、銅電極を丸棒に接触させ、電流密度 J で行い、変形開始 5 秒前から電流を印加した。また、ねじり途中で電流印加を停止および開始する実験も行った。

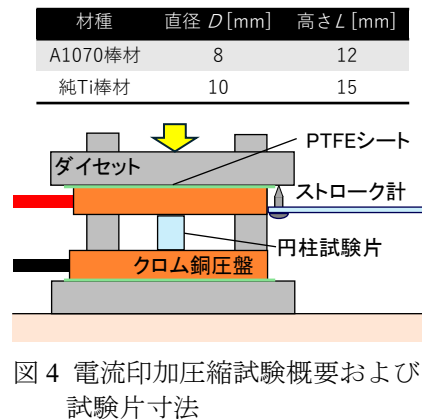
試験片には、アルミニウム丸棒、管材、純銅丸棒、および純チタン丸棒を用いた。アルミニウム丸棒試験片は、A1070 引抜棒材およびを用いた。丸棒においては、中心部温度が測定できないため、管材内部を流水で冷却し、非冷却側（外側）の温度が測定できる管材についても実験を行った。また、アルミニウム同様にジュール発熱の低い純銅、電気抵抗は高いが稠密六方晶構造を持つ純チタン丸棒についても同様の実験を行った。図3に、試験片寸法を示す。



材種	平行部直径 D [mm]	平行部長さ L [mm]
A1070棒材	10	50
A1070管材	外径 12.5, 内径 10	2
純銅	5	50
純Ti棒材	5	50

図3 電流印加ねじり試験に用いた試験片寸法

(2) 電流印加圧縮試験：ねじり変形ではねじりの進行とともに変形方向が通電方向と離れていく。そこで、圧縮試験についても試みた。圧縮試験ではせん断方向が圧縮方向に対し、45度傾いた状況があまり変化せず継続する。図4に通電圧縮試験の概要を示す。通電圧縮試験では圧盤を電極とする。導電率と硬さを両立できるクロム銅を用いた。電極への熱伝達による試験片冷却のために、試験片は小型とし、圧盤の体積を大きくした。上下のクロム銅圧盤電極は150×80、厚さ21mmとした。圧盤とダイセットの間はPTFEシートで絶縁し、圧盤の固定も樹脂ボルトで固定した。圧縮中の試験片高さはカンチレバー式のスโตรーク計にて測定し、体積一定条件を元に計算した断面積から応力を求めた。



4. 研究成果

(1) アルミニウム丸棒材および管材の長手方向通電ねじり：図5にアルミニウム丸棒材に長手方向通電した水冷ねじり試験の結果を示す。試験中の平行部温度は接触式温度計で測定した。温度上昇は3℃以下に保たれている。電流印加ありとなしのせん断応力-せん断ひずみ曲線はほぼ重なり、破断位置も同じとなった。変形抵抗の低下や延性向上といった電気塑性効果は生じなかった。試験後の試験片硬さを測定したが、通電条件による差はなく、加工硬化挙動も同じとなった。電極の接触位置を長手方向通電の中で種々変化させたが、結果は同様となり電気塑性効果は確認されなかった。

アルミニウム管材の内部を流水で冷却し、ねじり試験を行った。断面積が小さくなり、高い電流密度での実験が実施できたため、 $J = 0, 21, 43 \text{ A/mm}^2$ の条件で実施した。温度は非冷却側となる外側においても4.5℃の上昇に抑えられた。棒材と同様せん断応力-せん断ひずみ曲線は重なり、電気塑性効果は確認されなかった。

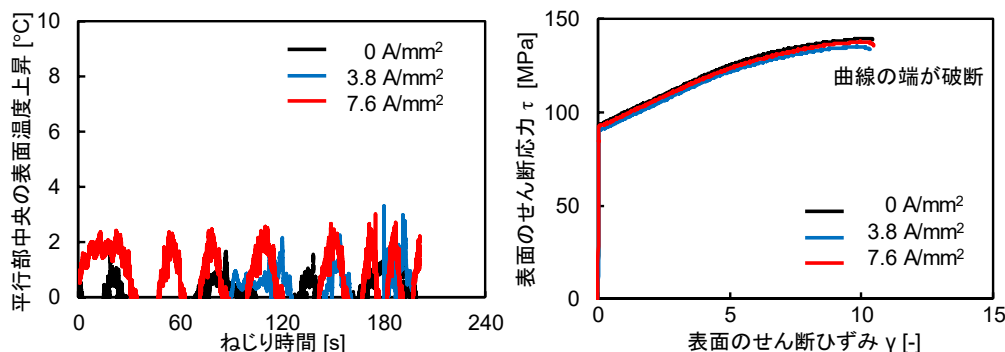


図5 アルミニウム丸棒の長手方向通電におけるねじり試験中の温度上昇およびねじり中の材料表面のせん断応力-せん断ひずみ曲線

(2) アルミニウム合金棒の半径方向通電ねじり：図6にアルミニウム合金棒に半径方向に通電した際のねじり試験の結果を示す。半径方向通電では、電極接触部が多く、十分に水冷されなかった。最大で60℃の温度上昇がみられたため、単純に通電なしの結果との比較ができなかった。そこでホットガンで加熱したねじり試験を行い、 $\gamma = 0.5$ および $\gamma = 2$ の時の応力について温度との関係を求めて比較した。通電なしの温間でにおける温度上昇に伴うせん断応力の低下よりもわずかに緩やかな低下を示しており、変形抵抗の増加がみられた。しかしながらその差はわずかであり、電気塑性効果によるものとみるのは難しい。

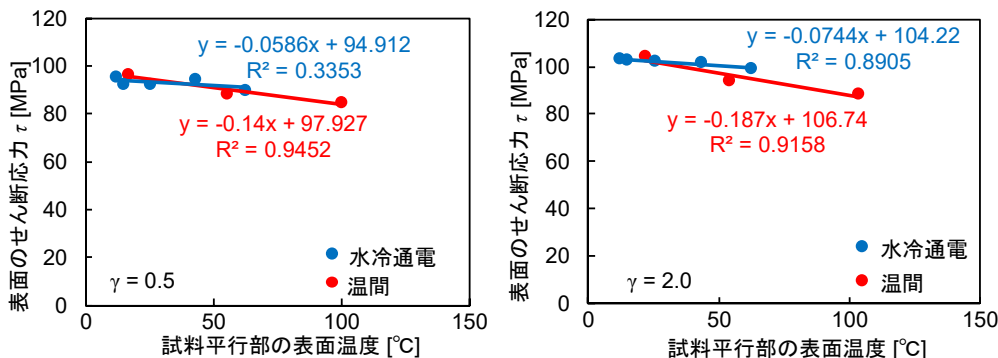


図6 アルミニウム合金棒の半径方向通電および温間における $\gamma = 0.5$ および 2 の時のせん断応力と試験片温度の関係

(3)銅棒材の長手方向通電ねじり：銅の場合、ジュール発熱は小さく温度上昇は4°C以下となっていた。図7に銅棒の長手方向通電におけるせん断応力-せん断ひずみ曲線を示す。通電ありとなしにおいて、せん断応力-せん断ひずみ曲線は完全に一致しており、電流印加によって変形抵抗の減少も増加も生じなかった。

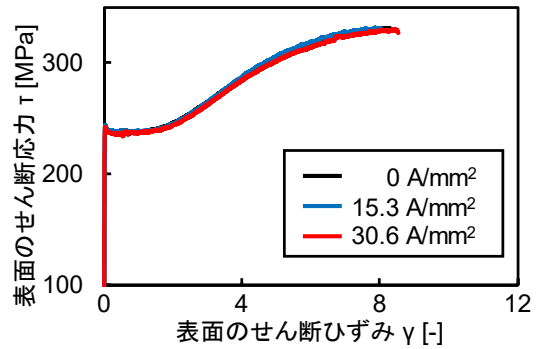


図7 銅棒の長手方向通電におけるねじり試験中のせん断応力-せん断ひずみ曲線

(4)チタン棒材の長手方向通電ねじり：図8にチタン棒材の長手方向通電におけるねじり試験中の温度丈量およびねじり中のせん断応力-せん断ひずみ曲線を示す。チタン棒材の場合電気抵抗が高いため、水冷を行っても比較的大きな温度上昇が生じた。しかしながら、水冷をしているため温度上昇はすぐに停止し、一定温度を保つ挙動をしめた。通電において温度上昇した結果と通電なしの結果を比較するために、ホットガンを用いたねじり試験を実施した。ヒートガンの場合、試験中に10°C程度の温度上昇が確認された。そこで、成形前半の $\gamma = 0.1$ 、中盤の $\gamma = 0.6$ の時点におけるせん断応力とその時の温度からせん断応力と温度の関係を通電ありとなしで比較した。電流密度を増加させるほど高温の結果となり30.6 A/mm²におけるデータは約160°Cのデータとなっている。図9にその結果を示す。 $\gamma = 0.1$ においては通電ありも無しも差は見られなく、最も電流密度の高い30.6 A/mm²の結果においても温間と一致した。 $\gamma = 0.6$ においても差はほとんど見られないが、温度に対する変形抵抗減少の勾配はわずかに緩やかになった。

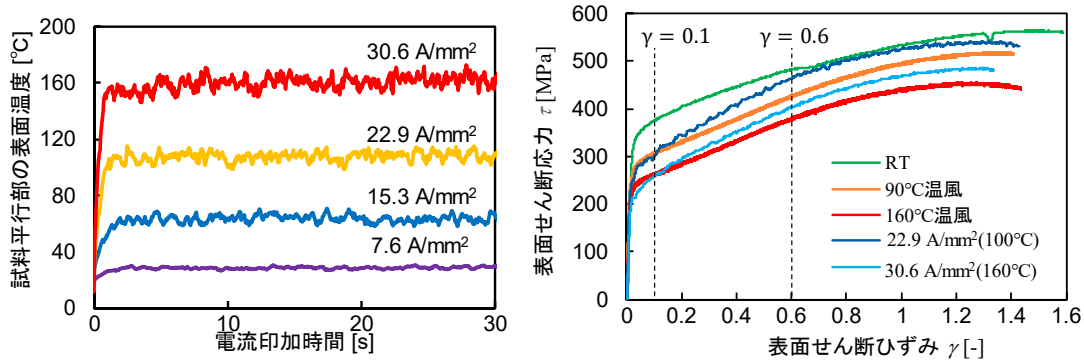


図8 チタン棒材の長手方向通電ねじり試験中の温度上昇およびねじり中の材料表面のせん断応力-せん断ひずみ曲線

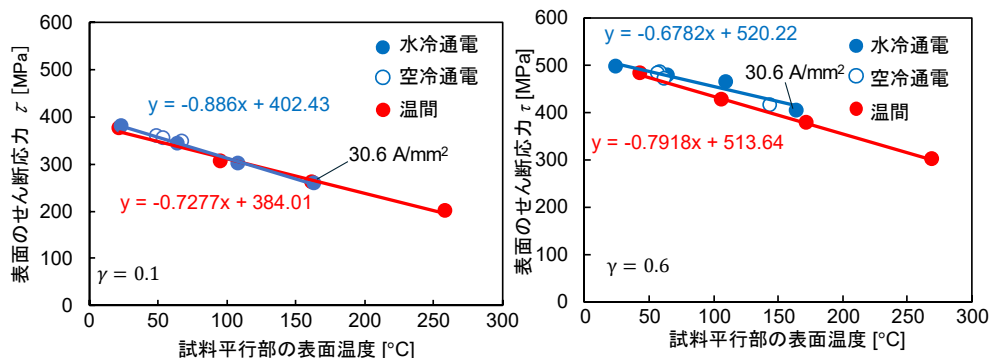


図9 チタン棒材の長手方向通電および温間における $\gamma = 0.1$ および $\gamma = 0.6$ の時のせん断応力と試験片温度の関係

(5)チタン棒材の長手方向通電ねじり（途中電流印加）：ねじり試験の途中から電流を印加する実験を行い、電流印加直後のせん断変形抵抗の変化を観察した。ねじり試験開始から45秒後および90秒後に30.6 A/mm²を印加した。図10に、チタン棒材の長手方向通電における電流印加タイミングが変形抵抗に及ぼす影響および45秒印加開始におけるせん断応力変化の詳細を示す。比較のため、電流なしおよび5秒前に通電開始した結果も示す。45秒後および90秒後どちらも、印加前は電流なしと同じ変形抵抗を示し、電流印加を開始するとすぐに5秒印加の結果に遷移するように変形抵抗が低下している。45秒後印加の変形抵抗の低下の詳細を見ると、変形抵

抗低下量のおよそ 63%で時定数を求めると 0.4 s となった。この変化は、電気的な作用の反応としては遅いと考えられる。図 8 の昇温の速さと似ており、変形抵抗の低下がジュール発熱による温度上昇が主要な要因と考えられる。

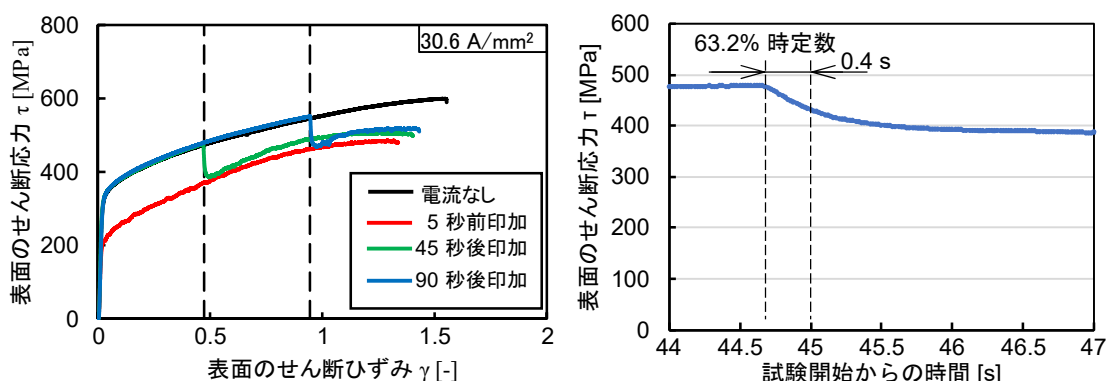


図 10 チタン棒材の長手方向通電(30.6 A/mm²)における電流印加タイミングが変形抵抗に及ぼす影響および 45 秒印加開始におけるせん断応力変化の詳細

(1)–(5)の結果、丸棒ねじり試験において、均一かつ一定の電流印加ねじり試験が達成された。また、水冷を用いることで、温度上昇が非常に小さい、もしくは安定した状態で電流印加ねじり試験が達成された。特に、アルミニウムおよび銅では、温度上昇はほとんど生じなかった。アルミニウムおよび銅においては、変形抵抗の低減や延性向上といった、これまでに報告されているような電気塑性効果は生じないことが分かった。半径方向の通電およびチタン合金において、わずかな変形抵抗の増加がみられたが、その変化はごくわずかであった。チタン合金のねじり試験では、温度上昇により、温度の影響と電気塑性効果の影響を十分に分離した検討ができなかった。しかしながら、その温度変化の様子と変形抵抗の低下の様子より、チタン合金で生じる変形抵抗の低下もジュール発熱による昇温で軟化したことが主な要因であると考えられる。

(6) 電流印加圧縮試験：アルミニウム円柱を用いて軸方向に電流を印加して圧縮試験を行った。図 11 に、アルミニウム円柱試験片の軸方向に電流を印加した圧縮試験における試験中の試験片表面温度および応力-ひずみ曲線を示す。0–12 A/mm²における試験片の温度は 40 °C 以下となっており、試験片で生じる熱は電極に拡散し、温度上昇は抑えられている。応力-ひずみ曲線については、電流密度の大小に関係なくほとんど重なっており、加工硬化の様子にも変化は見られない。通電方向におよそ 45°傾いた滑り変形が生じる圧縮試験においても、電気塑性効果による変形抵抗の変化は生じないことが示された。

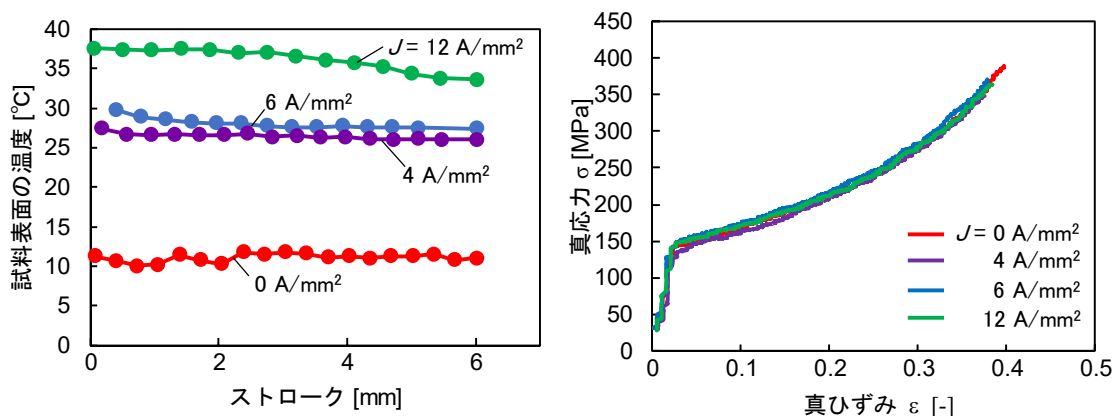


図 11 アルミニウム円柱試験片の軸方向に電流を印加した圧縮試験における試験中の試験片表面温度および応力-ひずみ曲線

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 前野智美, 金田晋弥, 大塚美海, 戸坂浩輔
2. 発表標題 純アルミニウムのねじりを用いた電気塑性効果発現の検証
3. 学会等名 2022年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2022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
---------	---------