

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06148

研究課題名(和文)水棲生物のもつ筋力を考慮した変形による水面付近の自律推進・跳躍メカニズムの解明

研究課題名(英文) Research on self-propelling and jumping aquatic animals near water surface by deformation considering muscle force

研究代表者

白崎 実 (Shirazaki, Minoru)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授

研究者番号：50302584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：魚の遊泳は身近な現象でありながら詳細が不明なことも多い。一部の魚は水面付近を跳躍しながら遊泳するが、その理由は諸説あるものの必ずしも明らかにはなっていない。計算流体力学による解析により、消費するエネルギーを含めた推進効率を考えると、体長が大きい魚の場合には、水平遊泳よりも跳躍を伴う遊泳の方が総合的に優位になり得ることが示された。また、背骨や筋力を考慮した魚モデルでの解析結果から、大変形を行うタイミングや筋力の分布の違いが、魚の遊泳に大きな影響を与えることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、現実の魚の遊泳挙動の把握の他に、魚型ロボットの水面付近での効率的な遊泳、制御につながる可能性がある。特に、浅水領域において効率的で精密な遊泳や急旋回が可能な、スクリュウ推進に対する優位性を持つ魚型ロボット開発への寄与が考えられる。

研究成果の概要(英文)：Although fish swimming is a common phenomenon, many details remain unknown. Some fish swim with jumping near the water surface, but the reason for this is not always clear. Computational fluid dynamics (CFD) analysis showed that, considering propulsive efficiency including energy consumption, swimming with jumping may be more advantageous than horizontal swimming for fish with large body lengths. The results of other analyses using fish models that considered the fish backbone and muscle force showed that differences in the timing of large deformations and the distribution of muscle force have a significant effect on fish swimming.

研究分野：計算流体力学

キーワード：計算流体力学 固気液3相流れ 自由界面 生物流体 魚の遊泳

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

魚類やイルカやシャチといった哺乳類も含めた水棲生物のことを単に「魚」と呼ぶことにすると、魚の遊泳は身近な現象でありながら詳細が不明なことも多い。一部の魚は水面付近を跳躍しながら遊泳するが、その理由は諸説あるものの必ずしも明らかにはなっていない。そこで、水面付近では、通常の遊泳を行うよりも跳躍を伴う遊泳を行った方が、造波抵抗や発生した波による影響を避けることができることから、離着水時に生じる抵抗の増加を考慮しても、力学的には総合的に有利なのではないかという仮説についての検証を試みる。

2. 研究の目的

本研究では、特に水面近くにおける魚の遊泳、急加速、そして跳躍に至る一連の運動について、魚が持つエネルギーや筋力や考慮した自身の変形による自律推進についての解析を計算流体力学により実施する。本研究の成果は、現実の魚の遊泳挙動の把握の他に、魚型ロボットの水面付近での効率的な遊泳、制御につながる可能性がある。

3. 研究の方法

支配方程式として非圧縮性流れにおける連続の式と Navier-Stokes 方程式を用い、流速と圧力をカップリングには Fractional Step 法を用いた。等間隔直交格子上で有限差分法による離散化を行い、計算格子配置としては Staggered 格子を採用した。空間方向の離散化として、移流項には 5 次精度 WENO 法、粘性項には中心差分を用い、時間方向の離散化として、移流項には 3 次精度 TVD Runge-Kutta 法、それ以外の部分には Euler 陽解法を用いた。また、圧力 Poisson 方程式の解法には、幾何的 Multigrid 前処理付き Bi-CGStab 法を用いた。界面の捕獲には Level Set 法 [1]、移動する物体の表現には体積力型埋め込み境界法 [2] を用いた。表面張力の表現には CSF モデル [3] を用いた。

4. 研究成果

魚の形状として尾ひれのあるモデル (図 1) を用いた 3 次元計算 (図 2) を行った。この結果から、体長が大きい方が跳躍力も高く、跳躍時間が長くなり、水平遊泳よりも遊泳速度の x 方向成分が大きい時間が長くなる。この結果、遊泳位置の前後関係が逆転し、跳躍を伴う遊泳の方が総合的に遊泳速度は大きくなることがわかった。魚が遊泳時に消費したエネルギーを考え、跳躍を伴う遊泳の優位性について検討を行ったところ、水平遊泳を行う場合に比べ、跳躍を伴う遊泳の方が消費するエネルギーが小さく、かつ大きな遊泳速度で推進することができることがわかった。これらから、消費するエネルギーを含めた推進効率を考えると、体長が大きい魚の場合には、水平遊泳よりも跳躍を伴う遊泳の方が総合的に優位になり得るということが示された [4]。

背骨を考慮した魚モデルの水面近くでの 3 次元計算を行い、方向転換と急加速を行う C-start と呼ばれる動作を含む遊泳の解析を行った。図 1 のモデルの頭部先端から尾ヒレまでの中心線に関節数 30 の背骨を設定した (図 3)。魚モデルの形状の変形は、まず背骨の動作を決めた上で、コンピュータグラフィックスなどで用いられる Linear Blend Skinning 法を用いて背骨の動作と連動させた。魚モデルが遊泳途中で C-start の変形を行うことで遊泳速度は加速するが、その加速度は C-start を行う際の遊泳速度に関係し、遊泳速度が小さい時点で C-start を行う方が大きく加速する傾向が確認された。また、C-start によって加速した後、到達した遊泳速度を維持できず減速する場合とその後加速する場合があることがわかった。図 4 に水面からの距離が 5 cm の位置を遊泳し、C-start の変形開始時刻が 0.533 s である魚モデルの Level Set 関数と速度勾配第 2 不変量 Q (Q 値) をピンク色で表示されている魚モデルの時刻での Q 値 100 以上を可視化したものを示す [5]。

背骨および筋力を模した連結物体によって構成される魚モデルの遊泳に関する解析を行った。モデルの形状は図 5 のように平板状の剛体 (Unit) を連結させたものである。各関節において作用する筋力として、図 6 に示すような魚の頭側、中央、尾側のそれぞれに重みを置いた 3 種類のトルク分布を与えた場合について比較を行った。それぞれのトルク分布に対する魚モデルの動きと渦度の様子を図 7 に示す。遊泳速度は頭側に重みを置いたトルク分布を与えた場合が最も大きく、次に中央に重みを置いたトルク分布の場合が大きくなった。尾側に重みを置いたトルク分布の場合には、頭側に重みを置いたトルク分布と中央に重みを置いたトルク分布の場合と比べて著しく低い遊泳速度しか得られないことが明らかとなった [6]。また、同様の魚モデルにおいて、逆動力学の考え方を利用することにより、流体中でその変形を実現するために必要な筋力によるトルクを逆算することが可能であることを示した [7]。

<参考文献>

- [1] M. Sussman, P. Smerka, and S. Osher, "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow," J. Comput. Phys, Vol. 114, pp. 146-159, (1994)
- [2] T. Kajishima, S. Takiguchi, H. Hamasaki, and Y. Miyake, "Turbulence Structure of Particle-Laden Flow in a Vertical Plane Channel Due to Vertex Shedding," JSME Int. B, Vol. 44, pp. 526-535, (2011)
- [3] J. Brackbill, D. Kothe, and C. Zemach, "A Continuum Method for Modeling Surface Tension," J.

Comput. Phys., Vol. 100, pp. 335-354, (1992)

[4] 松下, 白崎, “ 推進効率を考慮した水面付近における魚の遊泳と跳躍に関する 3 次元数値解析 ”, 第 31 回数値流体力学シンポジウム 講演予稿集 (2017)

[5] 丸田, 白崎, “ 水面近くでの C-start 含む魚の遊泳に関する 3 次元 CFD 解析 ”, 第 34 回数値流体力学シンポジウム講演予稿集 (2020)

[6] 平松, 他, “ 背骨を考慮した変形を行う魚の水面近くにおける遊泳制御の数値シミュレーション ”, 第 32 回数値流体力学シンポジウム講演予稿集 (2018)

[7] 古川, 白崎, “ にもとづく筋力を考慮した遊泳する魚の数値シミュレーション ”, 日本機械学会 第 35 回計算力学講演会講演論文集 (2022)

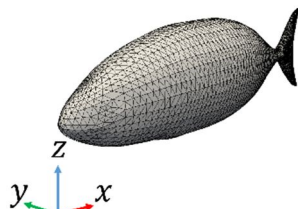


図 1 3次元魚モデル

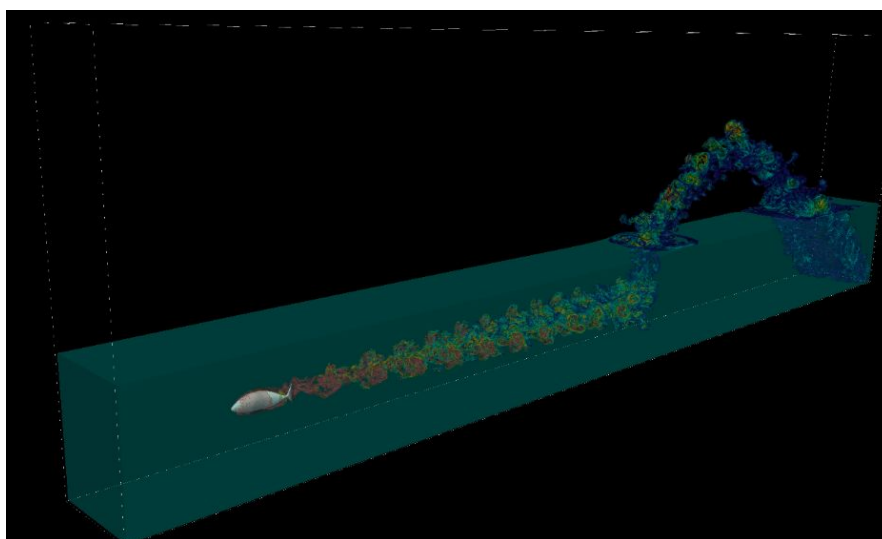


図 2 跳躍をともなう水面付近の遊泳



図 3 背骨のモデル

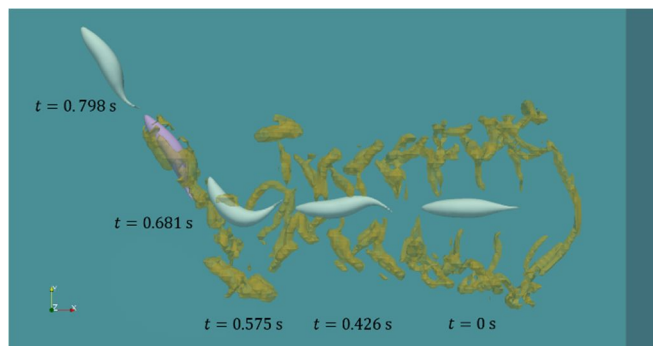


図 4 C-start 後の魚モデルまわりの渦の分布 ($t=0.681$ s)

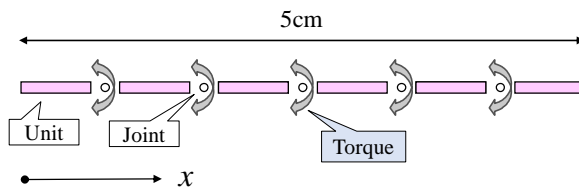


図5 連結物体のモデル

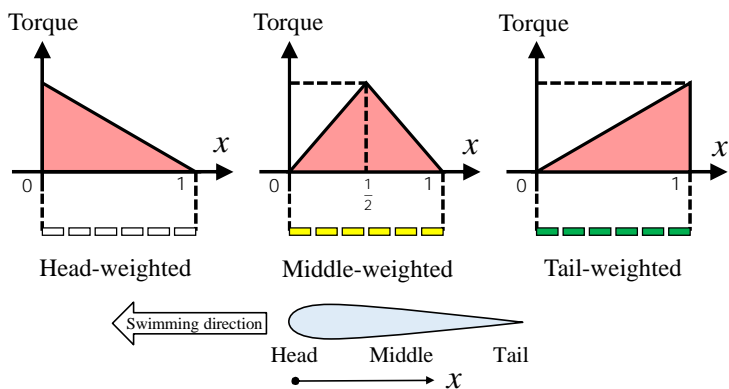


図6 筋力を模した3つのトルク分布

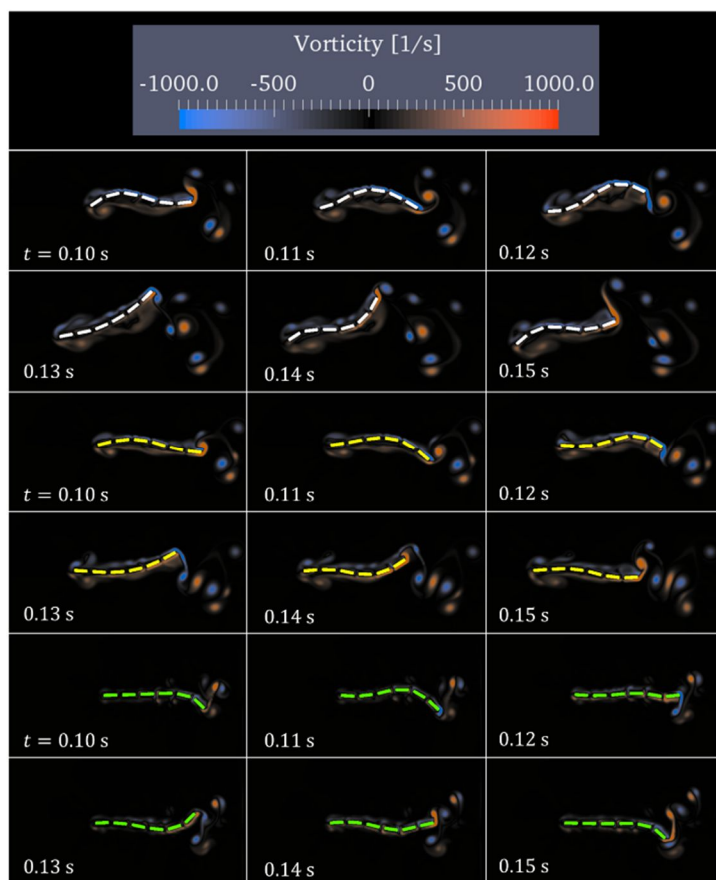


図7 魚モデルの動きと渦度の分布

(白色は頭側，黄色は中央，緑色は尾側に重みを置いたトルク分布)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 0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 松下悠貴, 白崎 実	4. 巻 -
2. 論文標題 推進効率を考慮した水面付近における魚の遊泳と跳躍に関する3次元数値解析	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本流体力学会 第31回数値流体力学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 -
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 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 松下悠貴, 白崎 実	4. 巻 -
2. 論文標題 水面付近を自律推進する魚の遊泳・跳躍・遡上の3次元数値解析	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本流体力学会年会2017講演予稿集	6. 最初と最後の頁 -
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 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 白石紘平, 白崎 実	4. 巻 -
2. 論文標題 コースロープの形状が消波効果に与える影響についての3次元数値解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本流体力学会 第32回数値流体力学シンポジウム	6. 最初と最後の頁 -
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 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 白石紘平, 白崎 実	4. 巻 -
2. 論文標題 複数のフロートが連結したコースロープの消波性能についての3次元数値解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本流体力学会年会 2018	6. 最初と最後の頁 -
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 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 平松 晴喜, 白崎 実, 松下 悠貴	4. 巻 -
2. 論文標題 背骨を考慮した変形を行う魚の水面近くにおける遊泳制御の数値シミュレーション	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本流体力学会 第32回数値流体力学シンポジウム	6. 最初と最後の頁 -
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 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 角 春伸, 白崎 実	4. 巻 ダウンロード
2. 論文標題 流水により駆動される濡れ性を考慮した振り子の数値シミュレーション	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本流体力学会年会2022講演予稿集	6. 最初と最後の頁 ダウンロード
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 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 古川亮佑, 白崎 実	4. 巻 ダウンロード
2. 論文標題 逆動力学にもとづく筋力を考慮した遊泳する魚の数値シミュレーション	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本機械学会 第35回計算力学講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 ダウンロード
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 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 角 春伸, 白崎 実	4. 巻 -
2. 論文標題 不均一な濡れ性を有する固体表面上での液滴挙動の数値シミュレーション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第35回数値流体力学シンポジウム講演予稿集	6. 最初と最後の頁 -
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 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 丸田 和慈, 白崎 実	4. 巻 -
2. 論文標題 水面近くでのC-start含む魚の遊泳に関する3次元CFD解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第34回数値流体力学シンポジウム講演予稿集(CD-ROM)	6. 最初と最後の頁 -
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 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 埜 直己, 白崎 実	4. 巻 -
2. 論文標題 気液混相流れと振り子の相互作用に関する数値解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第34回数値流体力学シンポジウム講演予稿集(CD-ROM)	6. 最初と最後の頁 -
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 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 平松 晴喜, 白崎 実	4. 巻 -
2. 論文標題 筋力により水面付近を遊泳する魚の数値シミュレーション	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本混相流学会混相流シンポジウム2019講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 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 平松 晴喜, 白崎 実	4. 巻 -
2. 論文標題 筋力を考慮した魚の跳躍および遊泳の数値シミュレーション	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本流体力学会年会2019講演予稿集	6. 最初と最後の頁 -
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 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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 角 春伸, 白崎 実
2. 発表標題 流水により駆動される濡れ性を考慮した振り子の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古川亮佑, 白崎 実
2. 発表標題 逆動力学にもとづく筋力を考慮した遊泳する魚の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会 第35回計算力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Minoru Shirazaki, Takuya Nagatsuka, and Keitaro Hanada
2. 発表標題 Numerical analysis of interaction between multiphase flow and rain chain
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM-APCOM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 角 春伸, 白崎 実
2. 発表標題 不均一な濡れ性を有する固体表面上での液滴挙動の数値シミュレーション
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Minoru Shirazaki and Kohei Shiraishi
2. 発表標題 Numerical analysis of effect of lane rope floats on wave dissipation
3. 学会等名 The joint 14th World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丸田 和慈, 白崎 実
2. 発表標題 水面近くでのC-start含む魚の遊泳に関する3次元CFD解析
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塙 直己, 白崎 実
2. 発表標題 気液混相流れと振り子の相互作用に関する数値解析
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平松 晴喜, 白崎 実
2. 発表標題 筋力により水面付近を遊泳する魚の数値シミュレーション
3. 学会等名 混相流学会混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平松 晴喜, 白崎 実
2. 発表標題 筋力を考慮した魚の跳躍および遊泳の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平松晴喜, 白崎 実, 松下悠貴
2. 発表標題 背骨を考慮した変形を行う魚の水面近くにおける遊泳制御の数値シミュレーション
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白石紘平, 白崎 実
2. 発表標題 複数のフロートが連結したコースロープの消波性能についての3次元数値解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白石紘平, 白崎 実
2. 発表標題 コースロープの形状が消波効果に与える影響についての3次元数値解析
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松下悠貴, 白崎 実
2. 発表標題 水面付近を自律推進する魚の遊泳・跳躍・遡上の3次元数値解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松下悠貴, 白崎 実
2. 発表標題 推進効率を考慮した水面付近における魚の遊泳と跳躍に関する3次元数値解析
3. 学会等名 日本流体力学会 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017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