

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：82632

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K21276

研究課題名（和文）上半身の反動動作に貢献する肩甲帯の力発揮特性 - 棒高跳競技者を対象にして -

研究課題名（英文）Characteristics of force exertion of shoulder girdle contributing to counter-movements of upper body - with reference to the pole vault

研究代表者

景行 崇文（Kageyuki, Takafumi）

独立行政法人日本スポーツ振興センター国立スポーツ科学センター・スポーツ科学・研究部・契約研究員

研究者番号：50913844

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、棒高跳競技者の身体をセグメントリンクモデル化することで跳躍動作を分析した上、数学的な処理を施して跳躍中の肩関節で発揮されたトルクの推定を試みた。加えて、筋機能評価運動装置を用いた肩関節の等速性伸展筋力および回旋筋力を測定し、それら筋力と跳躍中に発揮された肩関節トルクとの関係を検討した。

その結果、肩関節が180°近く屈曲した姿勢になる踏切足離地付近で最も大きな肩関節伸展トルクが発揮されていた。一方、跳躍中の肩関節伸展トルクの最大値と等速性伸展筋力および回旋筋力の最大値との関係は弱かった。この結果より、跳躍中に求められる肩関節周りの力発揮能力は競技特異的であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では両肩関節の和であるが、オーバーヘッド姿勢の踏切時に平均10Nm/kgの肩関節伸展トルクが発揮されていた。オーバーヘッド動作は、バレーボールのスパイクやテニスのサーブなど棒高跳以外の競技でも行われるため、本研究の知見は他競技でも競技に特化したトレーニングの重要性を示唆するものである。

また、棒高跳競技者の障がい好発部位は腰部であることが報告されており、オーバーヘッド姿勢かつ肩関節での大きな伸展トルク発揮が要求される棒高跳特有の動作が腰痛を招くリスクの一つである可能性がある。そのため、本研究の結果が棒高跳の技術理解を深め、棒高跳の合理的で安全なトレーニングの一助になることが期待される。

研究成果の概要（英文）：The present study employed a segment-link model to analyze the movement of pole vaulters, and attempted to estimate the flexion/extension torque of shoulder joint in vaulting by inverse dynamics calculation. Furthermore, the relationships between the estimated torque of shoulder joint in vaulting and the isokinetic extension and rotation strength of shoulder joints, as measured using the BIODEX system, were elucidated.

Consequently, the maximum extension torque of shoulder joint was exerted in close proximity to the instance of take-off, wherein the shoulder joint was in a nearly 180° flexed posture. On the other hand, the relationships between the estimated torque of the shoulder joint in vaulting and the isokinetic extension and rotation strength of the shoulder joints were not shown significant correlations. These findings suggest that the capacity to exert torque of shoulder joint during vaulting would be a competition-specific ability.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：バイオメカニクス 動作分析 筋力 肩関節 オーバーヘッド動作

1. 研究開始当初の背景

トレーニングは過負荷の原理,特異性の原理に則って実施されるため,目的を明確にした合理的なトレーニングが,パフォーマンスの向上には重要である.そして,トレーニングの合理化には,パフォーマンスと強く関係する技術および体力を解明することが欠かせない.

棒高跳は,ポールと呼ばれる棒を用いて跳び越えたバーの高さを争う競技であり,先行研究において,ポールの湾曲が大きいほどパフォーマンスが高いことが明らかにされている.ただし,ポールの大きな湾曲を導く技術やそのメカニズムは十分に明らかにされていなかった.そこで申請者は,光学式三次元動作分析装置および床反力計を用いて競技者の動作およびポールに作用する力を分析し,水平および鉛直方向に大きな力積をポールに加えること,踏切直後に肩関節が大きく屈曲すること,屈曲後に肩関節が大きく伸展すること,がポールの大きな湾曲に繋がることを明らかにした(景行,2021).特に,景行(2021)は,肩関節の屈曲伸展による上半身の反動動作がパフォーマンス向上に繋がる重要な技術である可能性を示した.

一方,「どのように動き,どのような力をポールに加えることができれば,ポールを大きく湾曲させることができるか」がこれまで十分に解明されておらず,科学的な知見が指導現場に普及していなかったため,棒高跳の指導現場では指導者の経験に頼ったトレーニングが行われてきた.したがって,パフォーマンスと強く関係する技術の特徴,および技術と密接に関連する体力を明らかにすることによって,合理的にトレーニングを実施するための着眼点を現場に提供できると考えられる.

他方,上半身の反動動作は棒高跳に限らず,オーバーヘッド姿勢での肩甲帯の爆発的な力発揮が必要なテニスやバレーボールなどにも重要な動作である.よって,本研究で明らかになった知見は,動作の類縁性を有した他競技にも競技横断的に応用できる可能性がある.

2. 研究の目的

上記背景より,本研究では棒高跳におけるポールの大きな湾曲を導く上半身の反動動作の特徴を明らかにし,上半身の反動動作と関係する肩甲帯の力発揮能力を明らかにすることを目的とした.

3. 研究の方法

(1) 研究対象者について

研究対象者は,棒高跳を専門とする男子学生競技者14名であった(身長= 1.77 ± 0.04 m, 体重 = 66.40 ± 3.32 kg, 自己最高記録 = 5.22 ± 0.19 m). なお,本測定は筆者が所属する機関の研究倫理委員会によって承認されたうえで実施した.

(2) 動作分析について

実験は,国立スポーツ科学センターの陸上競技実験場で行った.

実験跳躍におけるバー(ゴム製)の高さは対象者の自己申告によって決定した.対象者はバーを可能な限り高く跳ぶように指示を受け,試合と同程度の助走歩数およびポールを用いた試技を最大努力で複数本行った.バーに接触せずに跳び越えることができた成功試技のうち,最も高い最大重心高を記録した試技を分析対象とした.

対象者の跳躍動作を分析するため,身体分析点に貼付した反射マーカの3次元座標値を,光学式三次元自動動作分析装置(Vicon Motion System社製,250Hz)を用いて測定した.また,ポール下端を差し込むボックスの下に埋設したフォースプラットフォーム(Force platform,以下「FP」と表記;Kistler社製,1000Hz)を用いて,跳躍中のポール下端に作用する力(以下,「ボックス反力」と表記)を測定した.

絶対座標系は,助走の進行方向をY軸の正方向,鉛直上向きをZ軸の正方向,Y軸とZ軸の外積をX軸の正方向と定義した.

反射マーカの3次元座標値を用いて,対象者の身体を頭,上腕,下腕,左右の上腕,左右の前腕,左右の手,左右の大腿,左右の下腿,左右の足にリンクセグメントモデル化した.各セグメントの慣性パラメータは,阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて算出し,各関節中心は大島・藤井(2016)に基づいて算出した.

本研究ではポール湾曲局面のみに焦点を当て,以下の各イベントを定義した;ポール下端がボックス奥壁に衝突した時点をポール突っ込み時(Pole Plant,以下「PP」と表記),踏切足が離地した時点を踏切足離地時(Take-off,以下「TO」と表記),ポールが最大に湾曲した時点をポール最大湾曲時(Maximal pole bending,以下「MPB」と表記).加えて,景行ほか(2023)を参考に,TOからMPBまでにおける特異的なイベントとして,X軸周りの身体重心周りにおける全身の角運動量が最大値を迎えた時点を角運動量最大時(Maximum Angular Momentum,以下「MAM」



図1 局面の定義

と表記)と定義した(図1)。

PP から MPB までをポール湾曲局面と定義した(図1)。加えて, PP から T0 までを踏切局面, T0 から MAM までをドライブ局面, MAM から MPB までをスウィング局面と定義し, ポール湾曲局面を3つの小局面に分割した(図1)。

身体重心周りの全身の角運動量およびポールの弾性エネルギーは, Kageyuki et al. (2020)と同じ方法で算出した。

肩関節の屈曲伸展角度は, 体幹セグメントの左右軸(左肩関節から右肩関節に向かうベクトル)周りで上腕セグメントの長軸と体幹セグメントの長軸がなす角度とし, 屈曲を正, 伸展を負と定義した。

(3) 跳躍中の肩関節伸展トルク推定について

本研究は両握り手で形成する閉ループを研究の限界とした上で, Hubbard (1980) のモデル化を参考に, 両上肢を合成した1つの上肢セグメントにモデル化することによって, 仮想肩関節に作用する関節トルクの推定を試みた。仮想肩関節は両肩関節の midpoint とし, 合成上肢セグメントの遠位端を上握り手, 近位端を仮想肩関節と定義した。合成上肢の質量は両上肢の和, 合成上肢の質量中心は上握り手側上肢の合成重心と同じ内分比になる位置と定義した。上握り手側上肢の手・前腕・上腕セグメントが直列に揃っていると仮定し, 上握り手側上肢の手・前腕・上腕の各セグメント重心と合成重心との位置関係に基づく中心軸の定理によって, 合成上肢の慣性モーメントを定義した。上握り手とポールの接続部および仮想肩関節は球関節でモデル化した。

仮想肩関節の関節座標系について, 仮想肩関節中心から上握り手セグメント重心に向かう単位ベクトルを $z_{shoulder}$, 左肩関節中心から右肩関節中心に向かう単位ベクトルを $s_{shoulder}$, $z_{shoulder}$ と $s_{shoulder}$ の外積より得られる単位ベクトルを $y_{shoulder}$, $y_{shoulder}$ と $z_{shoulder}$ の外積より得られる単位ベクトルを $x_{shoulder}$ と定義した。そして, $x_{shoulder}$, $y_{shoulder}$, $z_{shoulder}$ から成る座標系を仮想肩関節座標系と定義した。

測定したボックス反力が上握り手に作用すると仮定し, 仮想肩関節に作用する関節トルクを以下の式を用いた逆動力学計算によって算出した。

$$m\ddot{x} = mg + CF + JF$$

$$I\dot{\omega} = \omega \times (I\omega) + r_{grip} \times CF + r_{shoulder} \times JF + BM$$

m は合成上肢の質量, \ddot{x} は合成上肢の重心加速度ベクトル, g は重力加速度ベクトル, I は合成上肢の重心周りにおける慣性テンソル, $\dot{\omega}$ は合成上肢の重心周りにおける角加速度ベクトル, ω は合成上肢の重心周りにおける角速度ベクトル, r_{grip} は合成上肢の重心に対する上握り手の位置ベクトル, $r_{shoulder}$ は合成上肢の重心に対する仮想肩関節中心の位置ベクトル, CF は圧縮力, BM は曲げモーメント, JF は仮想肩関節に作用する関節力, JT は仮想肩関節周りに作用する関節トルクである。なお, CF および BM の算出は, Kageyuki et al. (2020) と同じ方法で算出した。

仮想肩関節座標系周りの運動について, $x_{shoulder}$ 軸を屈曲 - 伸展軸とし, 運動の方向は屈曲を正, 伸展を負と定義した。

関節トルクの時系列データは, PP を 0%, MPB を 100% とする時間で規格化した。

(4) 等速性筋力測定について

等速性筋力の測定は, 動作分析用の実験試技が終了してから1時間以上の十分な休憩を取った後, 同日に行った。

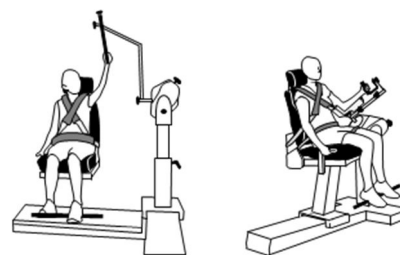
各自ランニングやストレッチ等のウォーミングアップを十分に行った後, 筋機能評価運動装置(Biodex Medical Systems 社製)を用いて, 等速性の求心性肩関節伸展筋力(以下, 「求心性伸展筋力」と表記), 遠心性肩関節伸展筋力(以下, 「遠心性伸展筋力」と表記), 求心性肩関節内旋および外旋筋力(以下, 「求心性外旋筋力」, 「求心性内旋筋力」と表記)を測定した(図2)。

求心性および遠心性伸展筋力の測定の可動域は, シートの背もたれとアタッチメントが平行になる角度を基準(0°)に 180° 屈曲位までとした。求心性内旋および外旋筋力の測定の可動範囲は, 最大内旋位から最大外旋位までとした。

各測定の角速度は, 求心性伸展筋力と求心性内旋および外旋筋力が $300^\circ/s$ (以下, 「高速条件」と表記), $180^\circ/s$ (以下, 「中速条件」と表記), $60^\circ/s$ (以下, 「低速条件」と表記), 遠心性伸展筋力が中速および低速条件であった。

各測定は, 角速度が高い試技から順に実施した。各試技前には, 主観的努力度を50%から90%まで段階的に上げる練習を3~5回実施した。練習後, 対象者は当日に発揮できる最大努力で, 高速および中速条件では3回反復し, 低速条件では2回反復した。なお, 求心性伸展筋力では, 屈曲角速度を高速条件で統一し, 測定者が屈曲を補助した。遠心性伸展筋力では, 求心性の伸展角速度を高速条件に統一し, 対象者が任意のタイミングと主観的努力度で肩関節を伸展した。

各筋力のデータは9点移動平均法によって平滑化した後, 最大筋力を抽出した。抽出した最大筋力は, 対象者の身体質量で規格化した。求心性および遠心性伸展筋力は, 左右の最大筋力の和を算出した。



(a) 屈曲/伸展 (b) 内旋/外旋

図2 等速性筋力測定の様子

(5) 統計処理について

各変数の平均値および標準偏差（以下、「Mean ± SD」と表記）を算出した。変数間の関係は、Pearson の積率相関係数（以下、「r」と表記）を用いて検討した。本研究では、有意確率 p が 5% 未満の関係性を主に検討した。

4. 研究成果

(1) 実験跳躍について

対象者の記録した最大重心高は 5.00 ± 0.14 m, MPB におけるポールの弾性エネルギーは 18.26 ± 1.29 J/kg であった。

図3には、ポール湾曲局面におけるボックス反力の力積と MPB における弾性エネルギーの関係を示した。MPB におけるポールの弾性エネルギーとボックス反力 Y 成分 F_Y の力積との間に有意な負の相関関係が認められた ($r = -0.56$, $p < 0.05$)。この結果は、先行研究を支持するものであり、ポールに大きな水平方向の力積を加えることが、ポールを大きく湾曲させるための技術的課題であると考えられる。

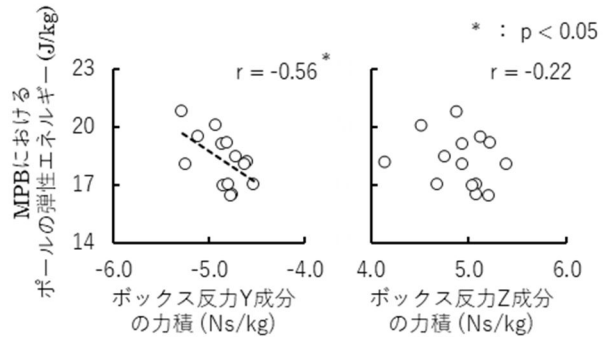


図3 ポール湾曲局面におけるボックス反力の力積とMPBにおける弾性エネルギーの関係

(2) 各局面におけるボックス反力の力積と肩関節角変位との関係について

図4には、最も高く身体が上昇した対象者が行った跳躍中の両肩関節の継時変化を示した。T0 付近で両肩関節ともに最大屈曲を迎え、MPB にかけて肩関節が伸展する様子が共通して確認された。なお、各局面における F_Y の力積と肩関節角変位との関係を検討したところ、スウィング局面における F_Y の力積と両肩関節角変位との間に有意な負の相関関係が認められた（上握り手側： $r = -0.54$, $p < 0.05$ ；下握り手側： $r = -0.62$, $p < 0.05$ ）。筋の速度 - 張力関係 (Hashima et al., 1972; Hill, 1938) を踏まえると、本研究の結果はポールに大きな力積を加えるために有利な姿勢や動作があることを示している。また、競技者ポール間でのエネルギー変換の様相を明らかにした景行ほか (2023) は、身体が高く上昇した棒高跳競技者ほどスウィング局面において身体の並進運動エネルギーが減少し、ポールに弾性エネルギーが蓄積されたことを報告している。これらを踏まえると、本研究の結果は、ポールの湾曲を導く上でスウィング局面の重要性を示すものであり、棒高跳のトレーニングを考えるための具体的な着眼点になると考えられる。

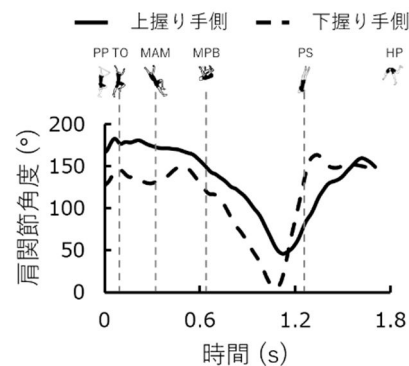


図4 跳躍中の肩関節角度の継時変化

PS: ポール伸展時, HP: 最大重心高出現時

(3) ボックス反力と上肢キネティクスとの関係について

図5には、跳躍中の仮想肩関節に作用したトルクの継時変化を示した。屈曲伸展トルクは、T0 付近の 11% で最大伸展トルク -10.05 ± 4.96 Nm/kg が出現した。最大伸展トルク出現後、MAM 付近まで伸展トルクは漸減し、MAM 以降は -1 Nm/kg 程度で MPB まで推移した。なお、ドライブ局面における F_Y の力積と仮想肩関節トルクの角力積との間にのみ有意な正の相関関係が認められた ($r = 0.67$, $p < 0.01$)。体操競技の吊り輪種目での後方伸身懸垂回転中の肩関節トルクを算出した Sprigings et al. (2000) は、両肩伸展トルクの和が最大で約 1100Nm (対象者の身体質量は 69kg) に及ぶことを報告していることを踏まえると、棒高跳競技者は体操競技者に匹敵する上半身の力発揮能力がめられる可能性が考えられる。加えて、肩関節が 180° 近く屈曲した姿勢になる T0 付近で最も大きな肩関節伸展トルクが発揮されていたことは特筆すべき点である。棒高跳競技者の傷がい発生部位は腰部が最も多いとされる (Rebilla, 2015)。オーバーヘッド姿勢かつ肩関節の大きな伸展トルク発揮が要求される棒高跳特有の動作が腰痛を招くリスクの一つである可能性が考えられるため、身体にどれくらい大きな力やトルクが作用するかを明らかにした本研究結果は、棒高跳の技術理解を深め、棒高跳の合理的で安全なトレーニングの一助になることが期待される。

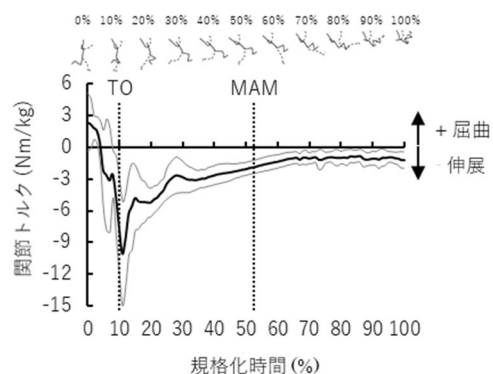


図5 仮想肩関節トルクの継時変化

(4) 肩関節の伸展筋力および回旋筋力と仮想肩関節伸展トルクとの関係について

表1には、求心性および遠心性最大伸展筋力を示した。求心性の最大伸展筋力は、高速条件<中速条件<低速条件の順に大きな値を示した。それに対し、遠心性最大伸展筋力は、中速条件と低速条件で同程度の値を示した。なお、跳躍中の仮想肩関節の最大伸展トルクと求心性および遠心性最大伸展筋力との間に有意な相関関係は認められなかった(表1)。

表2には、求心性最大内旋筋力および最大外旋筋力を示した。内旋および外旋筋力ともに、高速条件<中速条件<低速条件の順に大きな値を示した。なお、跳躍中の仮想肩関節の最大伸展トルクと最大内旋筋力および最大外旋筋力との間に有意な相関関係は認められなかった(表2)。

これらの結果は、棒高跳跳躍中に要求されるトルク発揮能力は体力と直結するものではないことを示している。言い換えると、棒高跳の跳躍中の上半身のトルク発揮能力は、競技や動作に特異的な能力であると考えられる。

表1 求心性および遠心性伸展筋力と肩関節伸展トルクとの関係

	角速度(°/s)	握り手	Mean ± SD (Nm/kg)	r
求心性	300	上	1.50 ± 0.18	-0.28
		下	1.48 ± 0.14	-0.03
		合計	2.96 ± 0.29	-0.24
	180	上	1.69 ± 0.20	-0.35
		下	1.66 ± 0.16	-0.37
		合計	3.33 ± 0.31	-0.46
	60	上	1.83 ± 0.20	-0.36
		下	1.77 ± 0.19	-0.11
		合計	3.60 ± 0.37	-0.27
遠心性	180	上	1.63 ± 0.18	0.23
		下	1.55 ± 0.17	0.18
		合計	3.18 ± 0.33	0.21
	60	上	1.62 ± 0.20	0.08
		下	1.54 ± 0.13	-0.07
		合計	3.15 ± 0.32	0.00

表2 求心性内旋筋力および外旋筋力と肩関節伸展トルクとの関係

	角速度(°/s)	握り手	Mean ± SD (Nm/kg)	r
内旋	300	上	0.73 ± 0.11	0.00
		下	0.71 ± 0.09	0.14
		合計	0.83 ± 0.15	0.01
	180	上	0.83 ± 0.15	0.01
		下	0.79 ± 0.10	0.00
		合計	0.86 ± 0.16	-0.17
外旋	300	上	0.82 ± 0.12	0.02
		下	0.26 ± 0.08	0.12
		合計	0.24 ± 0.08	0.12
	180	上	0.35 ± 0.12	0.13
		下	0.35 ± 0.13	-0.04
		合計	0.43 ± 0.16	0.00
60	上	0.43 ± 0.16	0.10	
	下	0.43 ± 0.16	0.10	
	合計	0.43 ± 0.16	0.10	

<引用文献>

阿江通良(1996)日本人の幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. Japanese Journal of Sports Science, 15(3): 155-162.

Hashima, H., Akazawa, K., Kushima, H., and Fujii, K. (1972) The force-load-velocity relation and the viscous-like force in the frog skeletal muscle. The Japanese Journal of Physiology, 22(1): 103-120.

Hill, A. V. (1938) The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. Proceedings of the Royal Society, 123(843): 136-195.

Hubbard, M. (1980) Dynamics of the pole vault. Journal of Biomechanics, 13(11): 965-976.

景行崇文(2021)棒高跳における最大重心高に影響を及ぼす要因 競技者 - ポール間のエネルギー変換に着目して. 筑波大学博士(コーチング)学位論文.

景行崇文・松林武生・大山卞圭悟・木越清信(2023)棒高跳における最大重心高と関係する競技者 ポール間でのエネルギー変換. 体育学研究, 68: 249-261.

Kageyuki, T., Matsubayashi, T., Yamamoto, T., Kobayashi, F., Asai, T., Ohyama-Byun, K., and Kigoshi, K. (2020) Mechanical factors influencing bending of pole in pole vault. International Journal of Sport and Health Science, 18: 134-143.

大島雄治・藤井範久(2016)水平面における下胴の動きに着目した疾走動作の三次元動力学. 体育学研究, 61: 115-131.

Rebelle G. S. (2015) A prospective study of injury patterns in collegiate pole vaulters. American Journal of Sports Medicine. 43(4): 808-815.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 景行崇文、木越清信、横澤俊治
2. 発表標題 棒高跳のパフォーマンスと肩関節伸展筋力および内旋外旋筋力との関係
3. 学会等名 日本陸上競技学会第21回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kagaeyuki, T., Kigoshi, K., Yokozawa, T.
2. 発表標題 Relationship between angular displacement of shoulder joint and force acting on the pole in the pole vault
3. 学会等名 European College of Sport Science Paris 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------