

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：12602

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K10242

研究課題名（和文）AIアシスト型全部床義歯設計システムの開発

研究課題名（英文）Designing system for complete dentures assisted by Artificial Intelligence

研究代表者

金澤 学（Kanazawa, Manabu）

東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・教授

研究者番号：80431922

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）：本研究では、全部床義歯装着患者100名分のデータを利用して、切歯点の位置の予測し、予測値の精度評価を行った。まず、上下全部床義歯のSTLデータを取得し、解剖学的ランドマークの各座標を求めた。そして、各ランドマーク間の距離を用いて重回帰分析および数理解析を行い切歯点の予測を行った。なお、座標は、x軸を義歯の前後方向、y軸を上下方向、z軸を左右方向とした。結論として、切歯点のz座標の予測では、精度の高い予測が可能であることが示唆された。一方、切歯点のx座標とy座標の予測においてはそれぞれ、予測精度が低かったことから、追加の情報として、上唇下縁の位置と顔貌の正中の位置が必要であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、顎堤データから自動的に切歯点を決定するために、義歯データから切歯点の位置座標を予測し、その精度評価を行なった。本研究結果より顎堤データに加えて上唇下縁の位置と顔貌の正中の位置の情報から切歯点の自動的決定が可能であることが示唆されたが、将来的に、切歯点の高い予測精度を確実にすることで咬合平面決定の自動化を実現させる必要がある。さらに人工歯配列や歯肉形成の自動化を実現させることで、デジタル全部床義歯の製作の完全な自動化の達成が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, data from 100 patients with full dentures were used to predict the position of the incisor points and to evaluate the accuracy of the predicted values. First, the STL data of the upper and lower full dentures were obtained and the coordinates of each anatomical landmark were determined. Multiple regression analysis and mathematical analysis were then used to predict the incisor point using the distance between each landmark. The x-axis was defined as the anterior-posterior direction of the denture, the y-axis as the vertical direction and the z-axis as the lateral direction. In conclusion, it was suggested that the prediction of the z-coordinate of the incisor point could be predicted with high accuracy. On the other hand, the prediction of the x-coordinate and y-coordinate of the incisor point was less accurate, suggesting that the position of the upper lip and lower border and the midline of the face are needed as additional information.

研究分野：高齢者歯科学分野

キーワード：自動化 切歯点 解剖学的ランドマーク 全部床義歯

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

従来法の全部床義歯の製作工程の大部分が、デジタル全部床義歯の製作工程では自動化されている¹⁻³が、人工歯配列と歯肉形成においては、技工士の熟練した経験や技術力が必要とされている。そのため、デジタル全部床義歯製作時においても人工歯配列や歯肉形成はコンピュータ上で熟練者による人工歯配列や歯肉形成が行われている。また、デジタル全部床義歯の製作工程においては、患者に対する「試適」の段階を省力して、完成することが可能であるが、完成義歯の審美面に対する complication は多く、多くの研究において試適の時間を設けることが推奨されている⁴。熟練した歯科医師であったとしても、従来法の義歯やデジタル全部床義歯における咬合採得時において、審美に関連すると思われるリップサポートや前歯部切縁の位置の確認にエラーが生じる可能性があることが考えられる。

歯肉形成の自動化についての研究はまだ報告されていない一方、人工歯配列の自動化については、これまでにいくつかの報告がされている。Busch ら⁵は、上顎と下顎の無歯顎顎堤のみの情報から人工歯配列を行う方法について報告を行ったが、彼らはチェアサイドにて簡潔な咬合採得を行い、さらに、上唇下縁と顔貌の正中の情報に基づき上顎と下顎の無歯顎顎堤間の咬合高径・咬合平面を決定していた。そして、前歯部から臼歯部までの歯槽頂間線と顎堤頂を基に人工歯配列位置を自動計算するアルゴリズムを構築した。Dai ら⁶は、理想的な人工歯配列位置曲線を数式化することで、咬合採得後の人工歯配列位置を数式への変数の代入により算出するアルゴリズムを考案した。また、Yu ら⁷は、上顎と下顎の義歯の模型をスキャンし、さらに顔貌の正中線や顎堤弓の解剖学的特徴を入力した後、それらの情報をもとにして、人工歯配列の自動化について独自の方法を開発した。以上より、現時点での人工歯配列の自動化は、人工歯配列時の歯列弓の探索や人工歯配列の方法に焦点が当てられてきた。しかし、審美に大きく影響する前歯部排列の位置を自動的に決定することが可能となれば、臼歯部人工歯の配列ミスを防ぎ、全ての人工歯配列のやり直しの頻度を減少させることが可能になると考えられる。

2. 研究の目的

そこで我々は、上顎と下顎の無歯顎顎堤情報から咬合平面を自動的に求める方法を検討することとした。咬合平面を上顎のランドマークから決定することが可能である HIP 平面と平行であると仮定し（HIP 平面と咬合平面が平行であることを述べている参考文献）、さらに咬合平面は最低 3 点で決定されることから、咬合平面の後方 2 点をレトロモラーパットの 1/2 とし⁸、残り 1 点を下顎左右中切歯の近心隅角間の中点とする切歯点とした（図 1）。よって、切歯点が決定されれば、咬合平面が自動的に決定され、さらに前歯部の位置も自動的に決定され、人工歯配列全体を自動的に行うことが可能になると考えられた。以上より、本研究では、切歯点の位置座標を上顎と下顎の無歯顎顎堤のランドマークの座標から求めるために、全部床義歯のスキャンデータから各ランドマークの位置座標を求めて、切歯点の位置座標の予測とその精度検証を行った。

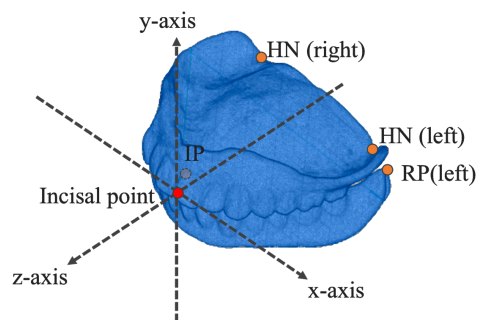


図 1

3. 研究の方法

本研究は、まず無歯顎患者が使用している上下全部床義歯のスキャンを行い、スキャンした義歯の STL データを CAD ソフトに取り込み、さらに義歯の STL データ上の点から、顎堤の各ランドマークに対応する点の位置座標をそれぞれ求めて、咬合平面を構成する点を求めることとした。

1) 全部床義歯スキャンデータの収集

本研究のプロトコルは、当施設の倫理審査委員会の承認（D2019-062）を受け、大学病院医療情報ネットワークセンター（UMIN-CTR Unique Trial No.UMIN 000042470）に登録された。

研究参加者の選択基準は下記を満たす者とした。

(i) 本学にて全部床義歯製作を行い、調整が終了した者

(ii) 研究参加にあたり十分な説明を受け、十分な理解の上、本人の自由意思による文書同意が得られた者

また除外基準は、

(i) 選択基準に該当していない者

(ii) 同意撤回を求めた者、とした。

なお、すべての参加者に対して、書面によるインフォームドコンセントを求め、インフォームドコンセントが得られた参加者飲みが本研究に参加した。

患者も術者も義歯に対して維持・安定に問題がないと判断している上下全部床義歯を装着している 100 名の患者の上顎・下顎の全部床義歯を上下咬合させた状態で技工用スキャナ（E-3, 3shape）にてスキャンを行い、その STL データを取得した。さらに、取得した STL データをデータ上での計測が可能な CAD ソフト（Autodesk Fusion 360）に取り込んだ。

2) 切歯点位置座標の算出と予測

咬合平面決定の自動化のための切歯点予測は、本研究では下記の通りに行った。まず、(前述のように)咬合平面を、上顎のランドマークから決定することが可能である HIP 平面と平行であると仮定し、さらに咬合平面は最低 3 点で決定されることから、咬合平面の後方 2 点をレトロモラーパットの 1/2 として、残り 1 点を下顎左右中切歯の近心隅角間の midpoint とする切歯点とした。よって切歯点の x 座標、y 座標、z 座標をそれぞれ、上顎や下顎のランドマークの座標から回帰式または計算式によって求め、さらに求めた座標値と実際の座標値 (実測値) のずれを求めるために精度検証を行なった。なお、座標軸の設定については、x 軸を前頭面からみた切歯点の左右的方向、y 軸を前頭面からみた切歯点の上下的方向、z 軸を前頭面からみた切歯点の前後的方向とした (図 2)。さらに、切歯点の位置座標の予測に参考にしたランドマークは、上顎は、ハミュラーノッチ (HN)、切歯乳頭 (IP)、下顎はレトロモラーパッド (RP) とした (図 3)。切歯点の各座標の求め方については、x 座標と y 座標は計算式から、また z 座標は回帰式から求めた。各座標の精度検証については、x 座標と y 座標は、RMSE 値を求め、z 座標は交差検証を行い、RMSE 値を求めた。下記にそれぞれの座標値の求め方と精度検証の方法の詳細について説明する。

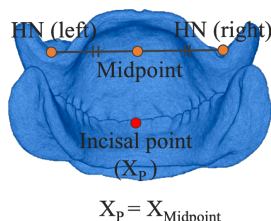


図 2

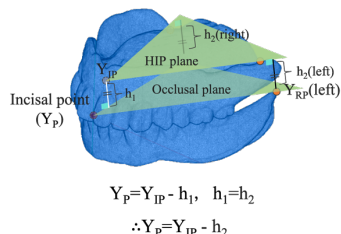
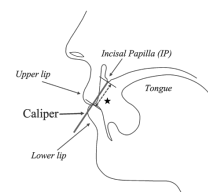


図 3

2-1) 切歯点の x 座標の算出 (図 4)

切歯点の x 座標は、上顎の口蓋正中は顔貌の正中と等しいと仮定して算出した。つまり左右の HN を結んだ線分の midpoint の座標を切歯点の x 座標の予測値として採用した。



★ = Distance between the lower border of the upper lip and IP

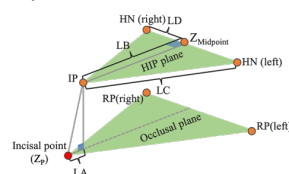
図 4

2-2) 切歯点の y 座標の算出

切歯点の上下的位置座標は (y 座標)、下記の 2 種類の方法を実施した。

2-2-1) HIP 平面を利用した方法 (図 5)

HIP 平面の後方基準点である HN の y 座標と咬合平面の後方基準点である RP1/2 の点の y 座標の距離と、HIP 平面の前方基準点である切歯乳頭の y 座標と切歯点の y 座標の距離が等しいと仮定して、切歯点の y 座標を求めた。なお HIP 平面の後方基準点である HN と咬合平面の後方基準点である RP の 1/2 は、それぞれ左右に存在するため、本研究ではそれぞれ左右 2 点の y 座標の平均値を使用して 2 点間の距離を求めた。



$$Z_p = Z_{\text{midpoint}} + \text{Length of (LA + LB)}$$

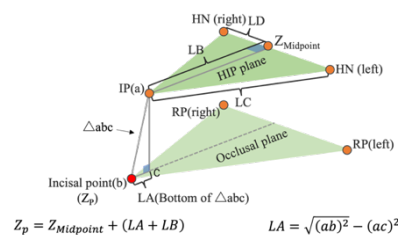
図 5

2-2-2) 顔面計測を利用した方法

参加者の切歯乳頭から上唇下縁までの距離に対してノギスを用いて計測し、切歯乳頭の y 座標の値に計測した距離を引いて求めた。

2-3) 切歯点の z 座標の予測 (図 6)

切歯点の z 座標の予測には、ランドマーク間距離 A`D を使用した。各線分はそれぞれ次のように定義した。線分 A は直角三角形 abc の底辺、線分 B は HIP 平面の垂直二等分線、線分 C は、IP と HN とを結ぶ直線の距離、線分 D は、左右の HN を結んだ直線の距離の半分と定義した。なお、線分 C は HIP 平面に対して、左右に存在するため、本研究ではその平均値をとって用いた。また、これら線分 A`D の算出時は、HIP 平面を二等辺三角形であると仮定した上で、三平方の定理を応用して算出した。



$$Z_p = Z_{\text{midpoint}} + (LA + LB) \quad LA = \sqrt{(ab)^2 - (ac)^2}$$

図 6

3) 統計解析

切歯点の z 座標の予測は、STL データ 70 症例用いて、目的変数は図 4 に示す線分 A と線分 B との距離の和、説明変数は同じく図 4 に示す線分 C と線分 D とする重回帰分析を行った。変数選択にあたってはステップワイズ法を用いた。重回帰分析は、SPSS ソフトウェア (バージョン 20, IBM) を用いた。切歯点 z 座標は、左右の HN を結んだ線分の midpoint の x 座標値に目的変数 (線分 A + 線分 B) の値を加えることで予測された。

精度検証については、x 座標と y 座標の精度検証には RMSE 値を使用した。(RMSE 値は、予測値と観測値の差の平方根を表し、RMSE の値が小さいほど、予測値が観測値に近いことを示し、より良い予測であることを示している)。z 座標の精度検証については、重回帰分析に使用しなかった残りの義歯 STL データ 30 症例を用いて交差検証を行った後に、RMSE 値を求めた。

4. 研究成果

それぞれの解析結果については、切歯点の x 座標～z 座標の精度検証の結果を表 1 に示し、切歯点の z 座標の重回帰分析の結果を表 2 に示した。

切歯点の x 座標の予測については、RMSE 値は 2.22 となった。また、切歯点の y 座標の予測については、HIP 平面を利用した方法の RMSE は 3.18 となった。一方、顔面計測を利用した方法の RMSE は 0.73 となった。切歯点の x 座標の予測については、まず重回帰分析の結果、目的変数（線分 A+線分 B）の有意な説明変数として、線分 C (P<0.01) が検出された。また、算出された回帰式の R² 値は 0.84 となった。また、交差検証においては、RMSE 値は 1.53 であった。

本研究は、上下の無歯顎顎堤のみの情報から、咬合平面を自動的に求めることが可能となるように切歯点の座標を顎堤の各ランドマークの位置座標から算出することを検討した最初の研究である。

切歯点の x 座標位置の予測については、RMSE 値が 2.22 であった。切歯点の左右的位置は義歯の正中に関わるもので、切歯点の左右的位置座標の実測値と予測値との誤差は、顔貌の正中と切歯点の左右的位置座標の予測値の誤差と考えられる。したがって、本研究結果より、口蓋の正中を参考にして切歯点の左右的位置を設定すると、顔貌の正中と 2mm 以上のずれが出る可能性があると考えられる。Seki ら⁹により顔貌と義歯との正中線の誤差は 1.0mm 以内が臨床的許容範囲であることが報告されていることから、切歯点の左右的位置を参考とした配列位置は許容範囲外のずれとなるために修正が必要となる可能性が高いことが示唆された。Jayalakshmi ら¹⁰は、有歯顎者と対象として、顔貌の正中線と前歯の正中線がどの程度ずれているかを調査したところ、男女それぞれ約半数が、ずれが 0~1mm であり、残りの約半数はずれが 1~3mm であったことを報告している。よって歯が残存している時からすでに顔貌の正中線と口蓋の正中線がずれている可能性が約 50%であることから、顔貌の正中と切歯点の左右的位置はずれが生じる傾向があることが考えられる。以上より、切歯点の左右的位置座標については、無歯顎顎堤のデータのみでは、精度が低くなるため、追加の情報として顔貌の正中線の左右的位置座標が必要であることが示唆された。

切歯点の y 座標の予測については、本研究では HIP 平面を利用した方法と顔面計測を利用した方法の 2 種類を実施したが、前者と後者の RMSE の結果から、顔面計測を利用した方法の方が精度が高いことが示唆された。HIP 平面は咬合平面と平行であることが多くの論文で報告されていたが、切歯点の上下的位置の予測については、RMSE 値の結果から予測値と実測値では 3mm のずれがみとめられることが明らかとなった。その理由としては、本研究で集積した症例データにおいて、上顎前歯部顎堤吸収の進行により咬合平面と HIP 平面との平行性が失われた症例数が多かった可能性が示唆された。咬合平面と HIP 平面との平行性を報告した研究の多くは、有歯顎者¹¹、顎堤吸収の少ない無歯顎者¹²を対象に実施されているものであった。また、Sivakumar ら¹³は、歯を喪失しても切歯乳頭は一定の位置にあるが、顎堤吸収の増大によってハミュラーノッチが消失することがあると報告している。現代は、無歯顎患者の高齢化が進んだことにより、顎堤吸収の著しい症例が増加しており、総義歯補綴学の治療原則確立時に対象としていた平均的な無歯顎症例像とは大きく変化していることも報告されている¹⁴。一方、顔面計測を利用した方法として、本研究では義歯の審美性に関するレビュー論文¹⁰を参考に上唇下縁の位置を利用したが、同様に Busch らの先行研究⁵においても咬合平面の決定時に上唇下縁の位置を利用されていた。よって、切歯点の y 座標については、無歯顎顎堤のデータのみでは、精度が低くなるため、追加の情報として上唇下縁の上下的位置座標を用いることで精度を上げることが可能となることが示唆された。

切歯点の z 座標の予測については、本研究において予測のために回帰式を求めた。切歯点は切歯乳頭の位置から 12mm 程度前方の位置と言われている。ただし、人工歯は後方に配列される傾向にあると言われている。切歯点の z 座標はリップサポートに大いに影響するため、患者の好みや咬合高径など多くの因子が関連しているため、切歯乳頭の位置のみでは決定することが難しい。本研究の重回帰分析結果においては、目的変数である線分 A と B の和（切歯点と切歯乳頭の距離と切歯乳頭とハミュラーノッチの中点の距離の和）との有意な説明変数は切歯乳頭とハミュラーノッチの距離であることが明らかにされた。重回帰分析から求められた回帰式の R² 値が 0.8 であったことから、実測値と予測値には強い相関があると考えられるため、精度の高い予測がされたことが示唆された。また、交差検証による精度評価については、RMSE 値は 1.53 であり、切歯点の前後的な位置座標においては、1mm~2mm 以内のずれがあるため、臨床の場合において微調整が必要であるが、大幅な修正が必要とならないことが示唆された。

本研究のリミテーションとしては、以下のことが考えられる。まず 1 点目として、切歯点を含めたランドマークの座標を義歯のデータから求めたため、顎堤上の座標とのずれが指摘される。しかし、本研究で使用した義歯は、適合や維持・安定に問題がないことを十分に確認された義歯を使用しているため顎堤上の座標とのずれは問題ないと考えられる。2 点目として、本研究の対象者の選択基準は「本学にて全部床義歯製作を行い、調整が終了した者」のみであり、顎堤吸収の度合いによる選択基準は特に設けていなかった。例えば無歯顎者の顎堤吸収の分類には McGarry らの分類¹⁵があるが、それぞれの顎堤吸収度の人数の割合を調べていなかった。顎堤吸収度の人数の偏りは RMSE 値に影響する可能性が高い。しかし、今回の研究より切歯点位置座標の予測が可能であることが示唆されたことは意義深いことであると考えられる。また、3 点目として、本研究で集積した症例データ数は 100 症例であったが、将来的には、本研究よりも多くの症例数によって、さらにそれぞれの顎堤吸収度の人数の割合を均等にして、切歯点の位置座標の予測精度を高くすることが必要であると考えられる。

本研究は、顎堤データから自動的に切歯点を決定するために、義歯データから切歯点の位置座標を予測し、その精度評価を行った。本研究結果より顎堤データに加えて上唇下縁の位置と顔貌の正中の位置の情報から切歯点の自動的決定が可能であることが示唆されたが、将来的に、切歯点の高い予測精度を確実にすることで咬合平面決定の自動化を実現させる必要がある。さらに人工歯配列や歯肉形成の自動化を実現させることで、デジタル全部床義歯の製作の完全な自動化の達成が期待される。

結論として、本研究の限られた研究条件下において、切歯点の z 座標の予測では、精度の高い予測が可能であることが示唆された。一方、切歯点の x 座標と y 座標の予測においてはそれぞれ、予測精度が低かったことから、追加の情報として、上唇下縁の位置と顔貌の正中の位置が必要であることが示唆された。

● 参考文献

1. Kanazawa M, Inokoshi M, Minakuchi S, Ohbayashi N. Trial of a CAD/CAM system for fabricating complete dentures. *Dent Mater J*. 2011;30(1):93-96.
2. Iwaki M, Kanazawa M, Arakida T, Minakuchi S. Mechanical properties of a

- polymethyl methacrylate block for CAD/CAM dentures. *J Oral Sci.* 2020;62(4):420-422.
3. Soeda Y, Kanazawa M, Arakida T, Iwaki M, Minakuchi S. CAD-CAM milled complete dentures with custom disks and prefabricated artificial teeth: A dental technique. *J Prosthet Dent.* 2022;127(1):55-58.
 4. Kanazawa M, Iwaki M, Arakida T, Minakuchi S. Digital impression and jaw relation record for the fabrication of CAD/CAM custom tray. *J Prosthodont Res.* 2018;62(4):509-513.
 5. Busch M, Kordass B. Concept and development of a computerized positioning of prosthetic teeth for complete dentures. *Int J Comput Dent.* 2006;9(2):113-120.
 6. Dai N, Yu X, Fan Q, Yuan F, Liu L, Sun Y. Complete denture tooth arrangement technology driven by a reconfigurable rule. *PLoS One.* 2018;13(6):e0198252.
 7. Yu X, Cheng X, Dai N, Chen H, Yu C, Sun Y. Study on digital teeth selection and virtual teeth arrangement for complete denture. *Comput Methods Programs Biomed.* 2018;155:53-60.
 8. Sahoo S, Singh D, Raghav D, Singh G, Sarin A, Kumar P. Systematic assessment of the various controversies, difficulties, and current trends in the reestablishment of lost occlusal planes in edentulous patients. *Ann Med Health Sci Res.* 2014;4(3):313-319.
 9. Seki T, Suzuki T, Hayakawa I. 総義歯装着者の審美的評価に対する正中線位置と切歯傾斜の影響 (Influence of Midline Position and Incisal Inclination on Esthetic Evaluation of Complete Denture Wearers). *Prosthodontic Research & Practice.* 2006;5(3):150-156.
 10. Jayalakshmi NS, Ravindra S, Nagaraj KR, Rupesh PL, Harshavardhan MP. Acceptable Deviation between Facial and Dental Midlines in Dentate Population. *J Indian Prosthodont Soc.* 2013;13(4):473-477.
 11. Fu PS, Hung CC, Hong JM, Wang JC. Three-dimensional analysis of the occlusal plane related to the hamular-incisive-papilla occlusal plane in young adults. *J Oral Rehabil.* 2007;34(2):136-140.
 12. Tambake D, Shetty S, Satish Babu CL, Fulari SG. Analysis of Relative Parallelism Between Hamular-Incisive-Papilla Plane and Campers Plane in Edentulous Subjects: A Comparative Study. *J Indian Prosthodont Soc.* 2014;14(Suppl 1):132-136.
 13. Jayachandran S, Ramachandran CR, Varghese R. Occlusal plane orientation: a statistical and clinical analysis in different clinical situations. *J Prosthodont.* 2008;17(7):572-575.
 14. Ivanhoe JR, Cibirka RM, Parr GR. Treating the modern complete denture patient: a review of the literature. *J Prosthet Dent.* 2002;88(6):631-635.
 15. McGarry TJ, Nimmo A, Skiba JF, Ahlstrom RH, Smith CR, Koumjian JH. Classification system for complete edentulism. The American College of Prosthodontics. *J Prosthodont.* 1999;8(1):27-39.

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 柏崎健汰, 駒ヶ嶺友梨子, Namano Sahaprom, 岩城麻衣子, 金澤 学, 水口俊介
2. 発表標題 全部床義歯の咬合平面予測における切歯点の予測精度評価
3. 学会等名 公益社団法人日本補綴歯科学会 第132回学術大会
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
---------	---------