

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26280099

研究課題名(和文) 屍体標本を用いたシミュレーションに基づく母指関節運動における主動筋相互作用の解明

研究課題名(英文) Interaction between agonists in articulated motion of the thumb revealed by cadaveric simulations

研究代表者

多田 充徳 (Tada, Mitsunori)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・人間情報研究部門・研究グループ長

研究者番号：70392628

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：母指の3次元的な関節運動に対する外在筋(EPL, FPL, APL, EPB)と内在筋(APB, OP, FPB, ADP)の関与を調べるために新鮮凍結屍体を用いて母指の3次元的な運動解析を行った。それぞれの内在筋に0, 100, 200, 300, 400, または500gの錘により静荷重を加えた状態で、外在筋を2.0mm/secで駆動した。外在筋だけでみるとAPLを除き関節固定が指尖部の軌跡に与える影響は小さいが、内在筋については関節固定が指尖部の軌跡に大きな影響を与えることが分かった。そのため、外在筋と内在筋による指尖部の可動領域は関節固定により元々の30%程度にまで制限されることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We investigated change in the thumb-tip motion before and after the trapeziometacarpal joint fusion in six cadavers. Tension was applied to the distal tendons of 4 extrinsic thumb muscles (extensor pollicis longus, flexor pollicis longus, abductor pollicis longus (APL), and extensor pollicis brevis) by the servomotors, while 4 intrinsic muscles (abductor pollicis brevis, opponens pollicis (OP), flexor pollicis brevis, and adductor pollicis) was applied tension by weights. Thumb-tip motion was measured by a motion capture system in six different intrinsic muscle tensions before and after the trapeziometacarpal joint fixation. The trapeziometacarpal joint fusion reduced the length when weighted the OP and pulled the APL most. After the joint fusion, the trajectory area of the thumb-tip was reduced to approximately 30% compared to the intact area. Area reduced due to the trapeziometacarpal arthrodesis was mostly found in a tolerable area in activity of daily life, however.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：母指 運動解析 関節固定

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトの繊細な手指の動きは、複雑な筋腱ネットワークの協調的活動から生み出される。例えば母指の場合には8種類の筋を巧みに活動させることで、屈曲・伸展、内転・外転、そして対立運動が実現されている。この中で対立運動は掌側外転と軸の回転が同時に発生する複雑な運動であり、これを可能にするのが鞍形状を持つCM関節である。霊長類の中でも最も進化した一部の種にしか備わっていないことから、ヒトの器用さの根源であると考えられている。

母指の関節運動に関する研究は、工学と医学にまたがる幅広い分野で行われている。前者では、母指の関節運動や指先で発揮可能な力を数学的に表現するために、運動計測装置を用いた関節運動の計測や、筋電位計を用いた筋活動の計測が行われている。また、後者で行われてきた解剖学的研究により、それぞれの筋が持つ幾何学的な構造や、典型的な関節運動の主動筋が明らかになっている。しかし、母指球筋(短母指外転筋、母指対立筋、短母指屈筋、そして母指内転筋の総称)の活動を選択的に計測することが難しいことや、目視や2次元画像を用いた大局的な関節運動の計測しか行われていないことなどから、複数の筋、特に前腕に筋腹を持つ外在筋と、手内に筋腹を持つ母指球筋(内在筋)が同時に活動する際の相互作用と、それが母指の関節運動、特にCM関節の運動に与える影響については未だに解明されていない。

## 2. 研究の目的

母指の3次元的な関節運動や、その運動に寄与する筋肉の働きについてはいまだ不明な点が多い。これらを解明することは、疾患の原因や治療や、新しい人工関節の開発などに重要である。

そこで本研究では、新鮮凍結屍体を用いて母指の3次元的な関節運動に対する外在筋と内在筋の関与を明らかにする。また、より臨床的なデータを取得するために、CM関節固定術が及ぼす影響についても同様の手法を用いて明らかにする。

## 3. 研究の方法

### 3.1 計測装置

図1に筋腱駆動装置の上に固定された新鮮凍結屍体と、光学式モーションキャプチャを示す。筋腱駆動装置は7個のセンサ・モータユニットから構成されている。本研究ではこのうちの4個を母指の関節運動に関与する4つの外在筋腱(長母指伸筋(EPL)、長母指屈筋(FPL)、長母指外転筋(APL)、短母指伸筋(EPB))の駆動、滑走距離の計測、そして張力の計測に使用する。内在筋(短母指外転筋(APB)、母指対立筋(OP)、短母指屈筋(FPB)、母指内転筋(ADP))については、錘を用いて静荷重を加えられるよう装置の末端にプーリーを設置した。

センサ・モータユニットは独自に開発したテンションゲージとサーボモータモジュール(RX-28: ROBOTIS Inc.)から構成されている。ブリッジ回路からの出力電圧については、動歪みアンプ(CV-10B: 共和電業)を用いて増幅した後に、AD変換器(AIO-163202FX-USB: コンテック)を用いてコントローラPCに取り込む。サーボモータモジュールはRS-485プロトコルを用いてコントローラPCと通信を行っており、任意の角速度で任意の角度に位置決めができる。サーボモータの回転軸にはプーリーが固定されており、腱に接続されたワイヤの巻き取りを行う。

サーボモータの制御プログラムは、制御の実行中にDA変換器(AIO-163202FX-USB: コンテック)から一定電圧を出力するよう設定されている。これを光学式モーションキャプチャ(Optitrack Flex13: Natural Point Inc.)の制御信号として使用することで、筋腱駆動装置で計測する滑走距離と張力、そしてモーションキャプチャで計測するマーカ軌道の同期がとれる。



図1: 実験装置

### 3.2 座標系・関節角度・指先の定義

運動計測に先立って撮像した屍体のCT画像から得られた骨の形状、そして筋骨格運動計測装置から得られた骨格の運動データを用いて、以下のように座標系、関節角度、そして指先を定義した。

#### 3.2.1 座標系の定義

**橈骨** 近位から遠位に向かう慣性主軸方向をx軸、掌側から背側に向かう慣性主軸方向をy軸、そして尺側から橈側に向かう慣性主軸方向をz軸とした。また、x軸と遠位関節面の交点を原点とした。指先の軌道を記述する際には、これをグローバル座標系とした。

**舟状骨** 伸展位においてx, y, z軸が橈骨のそれらと同じ方向となるように座標軸を設定した。これは、舟状骨に対する大菱形骨の運動が微小であり、骨の形状や運動から座標軸を決定することが困難だからである。また、骨の重心を原点とした。

**大菱形骨** 内転位と外転位における中手骨から算出した掌側から背側に向かう回転軸方向をy軸、伸展位と屈曲位における中手骨か

ら算出した尺側から橈側に向かう回転軸方向を z 軸、そして y 軸と z 軸の外積を x 軸とした。ただし、このままでは y 軸と z 軸が直交しないため、x 軸と y 軸の外積を z 軸とした。これは、中手骨が屈曲伸展運動をする際には、内転外転運動も同時に発生するからである。また、骨の重心を原点とした。

**中手骨** 近位から遠位に向かう慣性主軸方向を x 軸、伸展位と屈曲位における基節骨から算出した尺側から橈側に向かう回転軸方向を z 軸、そして z 軸と x 軸の外積を y 軸とした。これは、中手骨の形状が軸対称に近いいため、屍体によっては関節運動の方向と慣性主軸の方向が一致しないからである。また、骨の重心を原点とした。

**末節骨と基節骨** 近位から遠位に向かう慣性主軸方向を x 軸、掌側から背側に向かう慣性主軸方向を y 軸、そして尺側から橈側に向かう慣性主軸方向を z 軸とした。また、骨の重心を原点とした。

### 3.2.2 関節角度の定義

3.2.1 節で定義した座標系を用いて関節角度を定義した。橈骨手根関節 (Radiocarpal (RC) Joint)、手根中央関節 (Midcarpal (MC) Joint)、母指手根中手関節 (Carpometacarpal (CM) Joint)、中手指節関節 (Metacarpophalangeal (MP) Joint)、そして母指指節間関節 (Interphalangeal (IP) Joint) のいずれについても、その関節を構成する遠位骨の座標系を近位骨のそれへと変換するために必要な zyx オイラー角を、屈曲・伸展角度、内転・外転角度、そして回内・回外角度と定義した。

### 3.2.3 指先の定義

末節骨に設定した座標系の x 軸方向に沿って最も遠位にある節点を指先と設定した。

### 3.3 実験手順

皮膚、神経、そして血管を除去した新鮮凍結屍体 (前腕から指尖まで) を準備し、母指の関節運動に関与する外在筋 (EPL, FPL, APL, EPB) の筋腱移行部にナイロン糸を結紮した。内在筋 (APB, OP, FPB, ADP) についても附着位置近傍にナイロン糸を結紮し、それらをもととの筋力の作用方向が保持できるように手関節へと導出した。また、外在筋からのナイロン糸の末端には、筋腱駆動装置のプーリに巻き取られた直径 0.18mm のステンレスワイヤを結合した。一方、内在筋からのナイロン糸の末端には、錘を吊り下げられるようフックを結合した。その後、橈骨と第 3 中手骨の背側にそれぞれ 2 本のスレッド付きピンを刺入し、これらをクランプすることで屍体を筋腱駆動装置上に固定した。

モーションキャプチャ用のマーカを固定するために、橈骨、舟状骨、大菱形骨、第 1

中手骨、母指基節骨、そして母指末節骨に直径 1.6mm のスレッド付きピンを刺入した。ピンの末端には一辺の長さが約 15mm の 3 角形板を固定し、この板の頂点上に直径 4mm のマーカを接着した。このようなマーカ配置を採用したことで、皮膚変形の影響を受けない骨格運動の計測が実現できる。また、筋腱駆動装置の橈骨固定部近傍にも 6 個のマーカを接着した。実験を行う前に屍体と装置の CT 画像を撮像した。この CT 画像からマーカの重心と骨の形状を抽出することで、マーカの起動から 3 次元的な骨格運動が復元できる。

はじめに、この筋骨格運動計測装置の妥当性を評価するために、伸展位から屈曲位に至るまで FPL を 2.0mm/sec で駆動し、その際の滑走距離、張力、そして骨格運動の計測を行った。

次に、母指の 3 次元的な関節運動に対する外在筋 (EPL, FPL, APL, EPB) と内在筋 (APB, OP, FPB, ADP) の関与を調べるために、それぞれの内在筋に 0, 100, 200, 300, 400, または 500g の錘により静荷重を加えた状態で、外在筋を 2.0mm/sec で駆動した。ただし、EPL は屈曲位から伸展位まで、FPL は伸展位から屈曲位まで、APL は内転位から外転位まで、そして EPB は屈曲位から伸展位までを駆動の範囲とした。先の実験と同様に、その際の滑走距離、張力、そして骨格運動の計測を行い、そこから母指指尖部の軌跡を計算し、母指の可動範囲の評価に用いた。また、同様の計測を CM 関節固定術後にも行い、同固定術が母指の可動範囲に与える影響を評価した。

## 4. 研究成果

### 4.1 母指の関節運動

屈曲運動中の滑走距離と張力の変化を図 2 に示す。このグラフから明らかのように、伸展位から屈曲位へと関節運動を行うためには、FPL を 45mm 程度駆動する必要があった。また、FPL の滑走距離の増加に応じて、その張力も非線型的に増加した。一方、この際の骨格運動を図 3 に示す。この図から明らかのように、FPL を駆動しただけでは掌面内での 2 次元的な屈曲運動しか発生しなかった。

また、図 4 に CM, MP, そして IP 関節に対して屈曲 (-)・伸展 (+) 角度を計算した結果を示す。MP 関節と IP 関節が FPL 駆動の初期に屈曲するのに対して、CM 関節は MP 関節と IP 関節の屈曲後に屈曲を開始することが分かる。

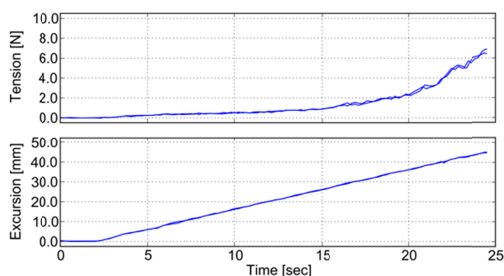


図 2: 屈曲運動中の滑走距離と張力の変化

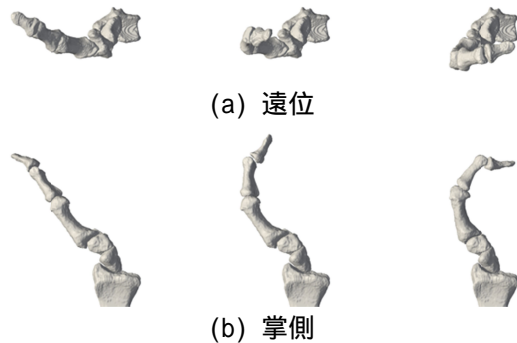


図 3: FPL による関節運動

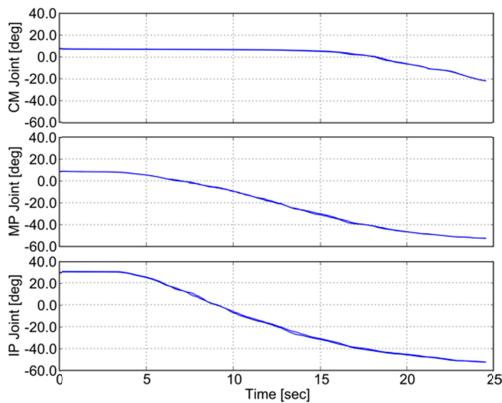


図 4: CM, MP, IP 関節の屈曲角度変化

#### 4.2 母指の可動範囲

内在筋に荷重を加えない状態で FPL を 2.0mm/sec で駆動した際の母指指尖部の軌跡を図 5 に示す。ただし、青線が関節固定前、赤線が関節固定後の軌跡を示す。この図から明らかな通り、この条件では関節固定の前後で軌跡の長さがあまり変わらないことが分かる。

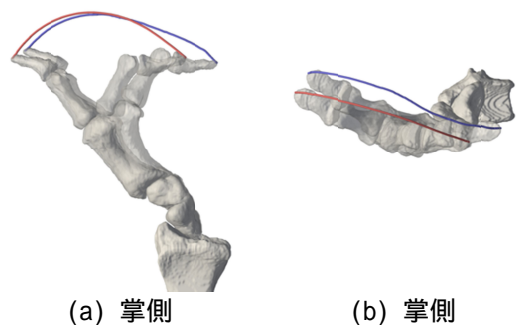


図 5: FPL による指尖部軌跡(内在筋荷重 0g, 関節固定前・関節固定後)

一方、表 1 に内在筋に荷重を加えない状態で、それぞれの外在筋を 2.0mm/sec で駆動した際の母指指尖部の軌跡の長さの減少率をまとめる。ただし、#1 から #6 は今回の実験で使用した屍体番号を表す。この表から明らかな通り、EPL, FPL, そして EPB においては、軌道の長さに有意な減少がみられなかった。一方、APL においては、軌道の長さが有意に減

少した。

表 1: 関節固定前後での指尖部軌跡の減少(表中の数値の単位は%)

	EPL	FPL	APL	EPB
#1	118.9	101.9	47.9	131.5
#2	97.8	92.3	64.7	89.0
#3	99.6	87.3	60.3	97.9
#4	126.3	87.5	18.8	179.9
#5	117.0	102.5	40.4	112.5
#6	89.0	76.2	40.2	100.1
Total	108.1	91.3	*45.4	118.5

同様に、外在筋を駆動しない状態で APB を 0 から 500g の錘で荷重した際の母指指尖部の軌跡を図 6 に示す。ただし、青線が関節固定前、赤線が関節固定後の軌跡を示す。この図から明らかな通り、この条件では関節固定の前後で軌跡の長さが顕著に減少していることが分かる。

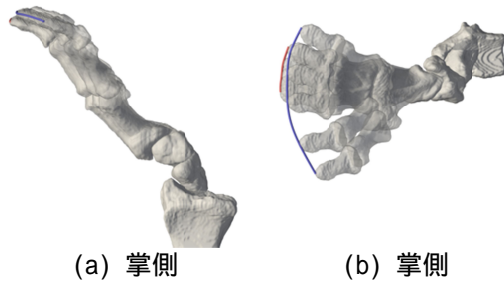


図 6: APB による指尖部軌跡(外在筋無駆動, 関節固定前・関節固定後)

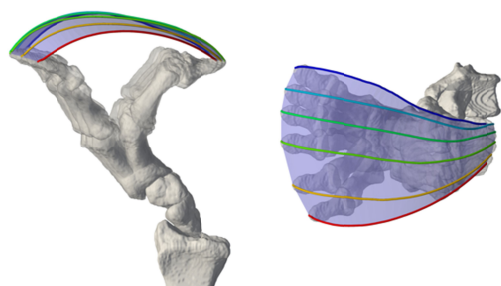
一方、表 2 に外在筋を駆動しない状態で、それぞれの内在筋を 0 から 500g の錘で荷重した際の母指指尖部の軌跡の長さの減少率をまとめる。ただし、#1 から #6 は今回の実験で使用した屍体番号を表す。この表から明らかな通り、全ての内在筋において、軌道の長さに有意な減少がみられた。

表 2: 関節固定前後での指尖部軌跡の減少(表中の数値の単位は%)

	APB	OP	FPB	ADP
#1	34.3	22.2	38.4	63.0
#2	34.9	16.3	24.5	79.3
#3	50.4	21.8	34.6	67.8
#4	34.4	4.5	31.6	58.3
#5	17.2	7.6	25.5	69.4
#6	31.1	18.9	27.2	72.2
Total	*33.7	*15.2	*30.3	*68.3

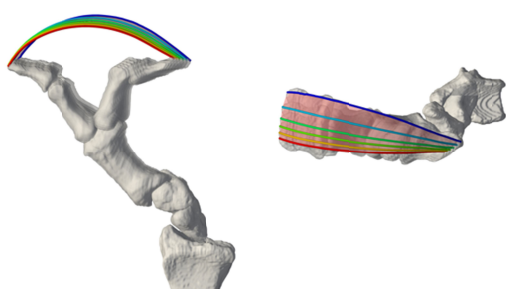
APB の荷重を 0g から 500g まで増加させながら、FPL を 2.0mm/sec で駆動した際の母指指尖部の可動領域を図 7 と図 8 に示す。ただし、前者が関節固定前、そして後者が関節固定後の可動領域を表す。また、双方の図において、青から赤への軌跡の色の変化が荷重の

増加を表す。この図から明らかな通り、この条件では関節固定の前後で可動領域の面積が顕著に減少していることが分かる。



(a) 掌側 (b) 掌側

図7: 関節固定前のFPLによる指尖部可動領域(青から赤になるに従いAPBの荷重増)



(a) 掌側 (b) 掌側

図8: 関節固定後のFPLによる指尖部可動領域(青から赤になるに従いAPBの荷重増)

一方、内在筋の荷重を0gから500gまで増加させながら、外在筋を2.0mm/secで駆動した際の母指指尖部の可動領域の面積の減少率を表3にまとめる。この表から明らかな通り、2つの条件を除き、可動領域の面積に有意な減少がみられた。平均するとCM関節固定で母指の動きが30%程度に制限されることになる。

表3: 関節固定前後での可動領域の減少 (表中の数値の単位は%)

	EPL	FPL	APL	EPB
APB	*30.4	*32.3	*14.2	*28.6
OP	*11.4	*14.9	*6.3	*11.1
FPB	*24.1	*27.6	*11.7	*24.6
ADP	106.9	*72.9	*18.4	89.4

以上より、外在筋だけで見るとAPLを除き関節固定が指尖部の軌跡に与える影響は小さいが、内在筋については関節固定が指尖部の軌跡に大きな影響を与えることが分かった。そのため、外在筋と内在筋による指尖部の可動領域は関節固定により元々の30%程度にまで制限されることが分かった。

この成果をまとめてJournal of Hand Surgery(European Volume)に投稿中である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- [1] Yusuke Kawano, Toshiyasu Nakamura, Mitsunori Tada, Takeo Nagura and Yoshiaki Toyama, "Analysis of the thumb-tip trajectory and the function of the thumb muscles after trapeziometacarpal joint fusion: a cadaveric study", Journal of Hand Surgery (European Volume). (Under Review)

〔学会発表〕(計10件)

- [1] 浅見 優紀, 多田 充徳, 遠藤 維, 荻原直道, "ヒトの手部筋骨格モデルを用いた力学的負担の最小化に基づく物体把握姿勢の生成", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 講演論文集, 2P2-J01, 2017.
- [2] 浅見優紀, 遠藤 維, 村井 昭彦, 多田 充徳, 荻原 直道, "手部筋骨格モデルの構築と物体把握時の力学的負担の推定", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 講演論文集, 2P2-12a4, 2016.
- [3] Mitsunori Tada, Yusuke Kawano, Toshiyasu Nakamura, Shinjiro Sueda and Dinesh K. Pai, "Musculoskeletal motion analysis of the thumb: a cadaveric study", Proceedings of the 37th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2015.
- [4] Yusuke Kawano, Toshiyasu Nakamura, Mitsunori Tada, Shinjiro Sueda, Dinesh K. Pai and Yoshiaki Toyama, "Trapeziometacarpal (TMC) joint fusion reduced the thumb-tip trajectory area approximately 30% of the original trajectory area: a cadaveric study", Proceedings of the 9th Triennial Symposium of Hand and Wrist Biomechanics International, 2015.
- [5] Yusuke Kawano, Toshiyasu Nakamura, Mitsunori Tada, Shinjiro Sueda, Dinesh K. Pai and Yoshiaki Toyama, "The influence of trapeziometacarpal arthrodesis on thumb metacarpophalangeal and scaphotrapezium motion: a biomechanical cadaveric study", Proceedings of the Combined Meeting of the American Society for Surgery of the Hand and Japanese Society of the Hand, 2015.
- [6] Yusuke Kawano, Toshiyasu Nakamura, Mitsunori Tada, Yusaku Kamata, Shinjiro Sueda, Dinesh K. Pai, Takeo Nagura, and Yoshiaki Toyama, "A

biomechanical comparison of the thumb-tip trajectory with/without trapeziometacarpal joint fusion: a cadaveric study ”, Proceedings of the 61st Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society, 2015.

- [7] 河野 友祐, 中村 俊康, 多田 充徳, 名倉 武雄, 佐藤 和毅 ”, 筋腱駆動装置を用いた未固定屍体母指 CM 関節固定前後の三次元的動作解析 ”, 第 58 回日本手外科学会学術集会講演論文集, 2015.
- [8] 河野 友祐, 中村 俊康, 多田 充徳, 鎌田 雄策, 大木 聡, 名倉 武雄, 戸山 芳昭, “ 筋腱駆動装置を用いた母指三次元的運動の生体工学的解析(未固定凍結屍体を用いた研究) ”, 第 29 回日本整形外科学会基礎学術集会, 2014.
- [9] 多田 充徳, 河野 友祐, 中村 俊康, 名倉 武雄, 大木 聡, 戸山 芳昭, “ 新鮮凍結屍体を用いた母指の筋骨格運動解析:座標系の定義 ”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 3P1-107, 2014.
- [10] 多田 充徳, 河野 友祐, 中村 俊康, 名倉 武雄, 大木 聡, 戸山 芳昭, “ 新鮮凍結屍体を用いた母指の筋骨格運動解析:計測装置の構成 ”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 3P1-106, 2014.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

多田 充徳 (TADA, Mitsunori)

産業技術総合研究所・人間情報研究部門・  
研究グループ長

研究者番号: 70392628

### (2)研究分担者

中村 俊康 (NAKAMURA, Toshiyasu)

国際医療福祉大学・臨床医学研究センター  
(医学系)・教授

研究者番号: 70265859

### (3)研究協力者

河野 友祐 (KAWANO, Yusuke)

### (4)研究協力者

鎌田 雄策 (KAMATA, Yusaku)