

腕の筋骨格特性を考慮した  
車のステアリング操舵感評価に関する研究

平成 18 年 度

三重大学大学院工学研究科  
博士前期課程 機械工学専攻

横 井 大 介

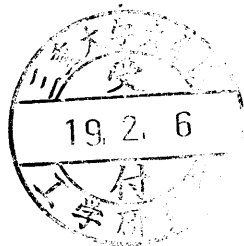
---

平成 18 年度 修士学位論文

腕の筋骨格特性を考慮した  
車のステアリング操舵感評価に関する研究

指導教員 池浦良淳 教授

三重大学大学院工学研究科  
博士前期課程 機械工学専攻  
横井 大介



# 目次

第1章	緒言	1
第2章	自動車操舵モデルとインピーダンス特性	3
	2. 1 自動車操舵モデル	3
	2. 2 インピーダンス特性	4
第3章	インピーダンス推定方法	6
	3. 1 人間のステアリング動作モデル	6
	3. 2 腕のインピーダンス推定方法	8
第4章	実験装置	10
	4. 1 システムの構成	10
	4. 2 ステアリングホイールの制御	13
	4. 3 実車データに基づく操舵感の実現	15
	4. 4 弾性ばねを用いた実験装置の検証	17
	4. 4. 1 実験方法	17
	4. 4. 2 実験結果	20
第5章	インピーダンスの測定	22
	5. 1 個人ごとのインピーダンスの正規化	22
	5. 1. 1 正規化手法	22
	5. 1. 2 最小、最大力の計測	22
	5. 2 操舵系の粘性・剛性特性を変化させた実験	24
	5. 2. 1 実験方法	24
	5. 2. 2 主観評価	24
	5. 2. 3 実験結果	25
	5. 3 操舵系の剛性・摩擦特性を変化させた実験	28
	5. 3. 1 実験方法	28
	5. 3. 2 実験結果	28
	5. 4 目標角度を変化させる実験	31

---

5. 4. 1	実験方法	31
5. 4. 2	実験結果	32
5. 5	手のひらのインピーダンスの測定	44
5. 5. 1	実験方法	44
5. 5. 2	実験結果	44
<b>第 6 章</b>	<b>筋電の測定</b>	<b>47</b>
6. 1	測定方法	47
6. 2	実験方法	47
6. 2. 1	実験結果	48
6. 3	手首を固定した状態での測定	59
6. 3. 1	実験結果	59
6. 4	手のひらを固定して測定	66
6. 4. 1	実験結果	66
<b>第 7 章</b>	<b>結言</b>	<b>72</b>
	<b>参考文献</b>	<b>74</b>
	<b>謝辞</b>	<b>75</b>

# 第1章

## 緒言

近年、自動車は環境問題や省エネルギー問題、排ガス規制等の観点から性能の進化が目覚しく進んでいる。また、自然環境への取り組みと同様に、ドライバへの負担の少ない、より快適な自動車の開発にも大きな関心が集まっている。そこで、本研究では人が自動車を操作する際に両者の接点となり、自動車の進行方向を決定する重要な役割を持つステアリングに着目し、ステアリングの操舵感の評価方法について研究を進めていく。

近年、自動車の電動パワーステアリングの開発により制御の高度化が進み、構造を大きく変更することなく、人間に様々な操舵感覚を提供できるようになってきている。また将来、タイヤの操舵系と人間が操舵するハンドルとを機械的に結合せず、それぞれ電動モータで駆動するシステムが導入されると、自由な操舵感覚の提供が期待できる。その場合、ステアリングの操舵感を人間にとって操作しやすいものに設定する必要がある、その操舵感評価が必要になる。

操舵感の評価方法の研究は古くから盛んに行なわれているが、その多くは車両特性の解析であり、操舵感の評価はドライバーの主観評価がメインである。さらに、現行の方法では評価する人は車両の特性と構造を熟知し、相対的な評価基準を持った、熟練ドライバーでなければならない。そのため操舵感を客観的に数値化した評価方法が望まれている。客観的な操舵特性を用いた手法としては、人間がハンドルに加えるトルクや角度から評価するものがあるが、ケーススタディにとどまっている。

人間のハンドル操作について考えてみると、無駄な力は使わずにリラックスして操作できる方が操舵感は良くなり、そのときの筋力は小さくなる。上腕二頭筋と上腕三頭筋の活動は腕のインピーダンスと深い関係があり、インピーダンスを計測することで、ステアリングの操舵感評価を客観的な特性から裏付け、官能評価を代行することも期待できる。

本論文では、まず本研究で取り扱う自動車操舵モデルとインピーダンス特性について説明する。次に、自動車の操舵系と操舵時の腕のモデル化を行い、腕のインピーダンス推定方法について論じる。次に、実車のステアリング部を模擬した実験装置及び装置の制御方法について説明する。そして、ハンドル操舵中の人間の腕のインピーダンスを計測することにより、操舵における主観評価の結果を反映できるかを示す。また、ハンドル操作中に使用される筋肉に着目し、筋電を使用して実験を行い、インピーダンスと筋肉の関係について調べる。

## 第2章

# 自動車操舵モデルとインピーダンス特性

自動車の操舵系に関してはすでに多くの研究が行なわれており、詳しい解析もなされている。本論文では簡単化のため、車両機構の考慮をせず、よりシンプルな操舵系のモデル化を行い、使用する。

また、人間の腕については、人間工学に基づき腕のインピーダンス特性を考慮したモデル化を行なう。

### 2.1 自動車操舵モデル

Fig. 2.1 に人間がステアリングを操作するときのブロック図を示す。人間は、道路などの環境や車体の運動状態を検知し、目標となる運動状態に基づいてステアリングを操作すると考えられる。脳から腕の筋肉に信号が伝わり、その後実際にハンドル操作が行なわれる。先に述べたように、従来の評価方法では腕から発生するステアリング

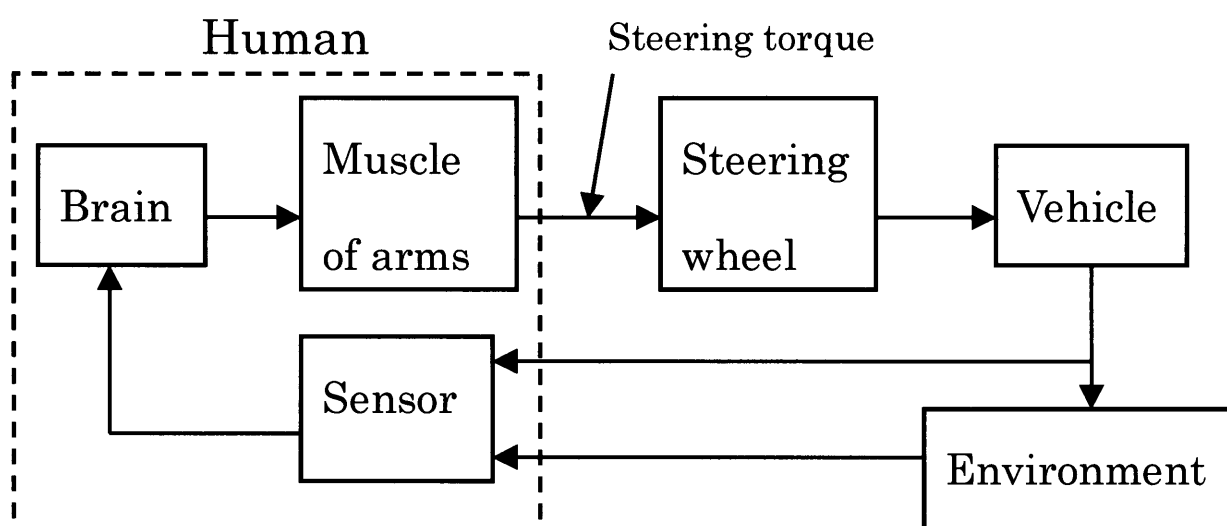


Fig. 2.1 Block diagram of steering control by human

トルクやステアリング角度を評価していたが、より脳に近い、筋肉に伝わる信号を観測するという方法が考えられる。

## 2.2 インピーダンス特性

先に述べたように、脳から筋肉への信号が観測できるのならば良いが、脳から筋肉への信号というのは神経に伝わる電気信号であり、それを直接計測することは困難である。

そのため、次のような手法を考える。Fig. 2.2 は肘周りの筋肉の配置図である。前腕は上腕二頭筋と上腕三頭筋によって駆動する。この系の運動方程式は式(2.1)のように表される。

$$I/d \cdot \ddot{\theta} = u_f - u_e - (u_f + u_e)(K\theta + C\dot{\theta}) \quad (2.1)$$

ここで、 $I$ は前腕の慣性モーメント、 $d$ はレバー・アーム長、 $u_f$ と $u_e$ はそれぞれ上腕二頭筋、上腕三頭筋の筋力、 $\theta$ は肘関節角度、 $K$ と $C$ は定数である。(2.1) に示すように二頭筋と三頭筋の筋力の差( $u_f - u_e$ )が前腕の駆動トルクとなり、筋力の和( $u_f + u_e$ )が肘周りの剛性・粘性を変化させる。このような剛性・粘性をインピーダンスと呼ぶ。従来

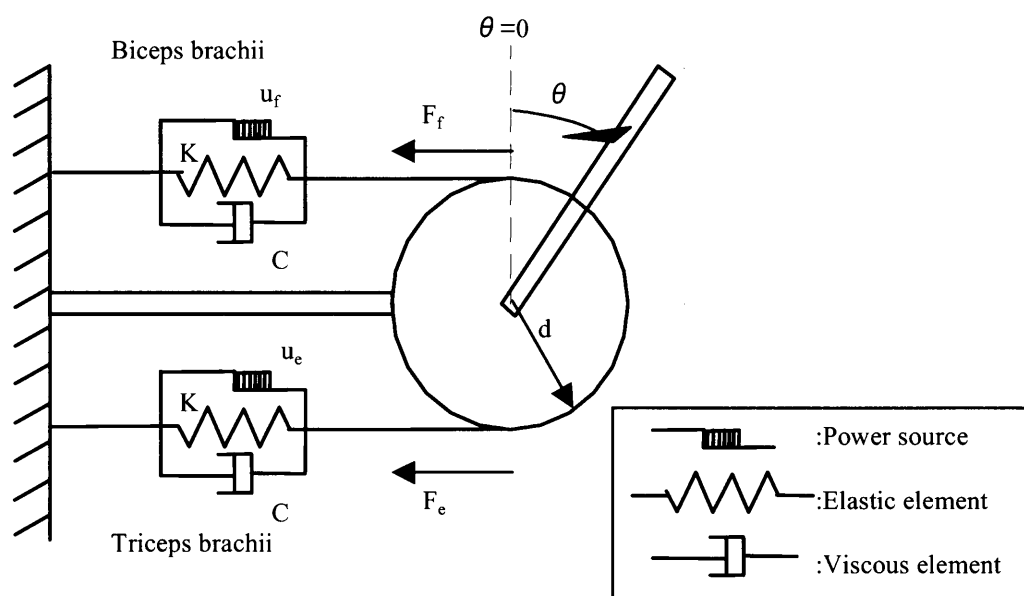


Fig. 2.2 Musculoskeletal system of human arm



の評価方法は駆動トルク ( $u_f - u_e$ ) を計測してきたが、関節のインピーダンスを変化させる ( $u_f + u_e$ ) を計測することにより、生体的な操舵特性から、ドライバーの操舵感を緻密に裏付けることが可能となる。つまり、関節のインピーダンスの大きさを腕の緊張度と定義すれば、トルクでは表現が困難であった腕のリラックス度なども定義・計測することができると思われる。

次章では、インピーダンスの計測手法について述べる。

## 第3章

# インピーダンス推定方法

### 3.1 人間のステアリング動作モデル

Fig. 3.1 は人間がステアリングホイールを操作したときのモデルを表している。操舵系を、摩擦を含む慣性・粘性・剛性特性を有する一軸の回転系とすると、式(3.1)のように表される。

$$I_p \ddot{\theta} + C_p \dot{\theta} + K_p \theta = T_h - F_p \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \quad (3.1)$$

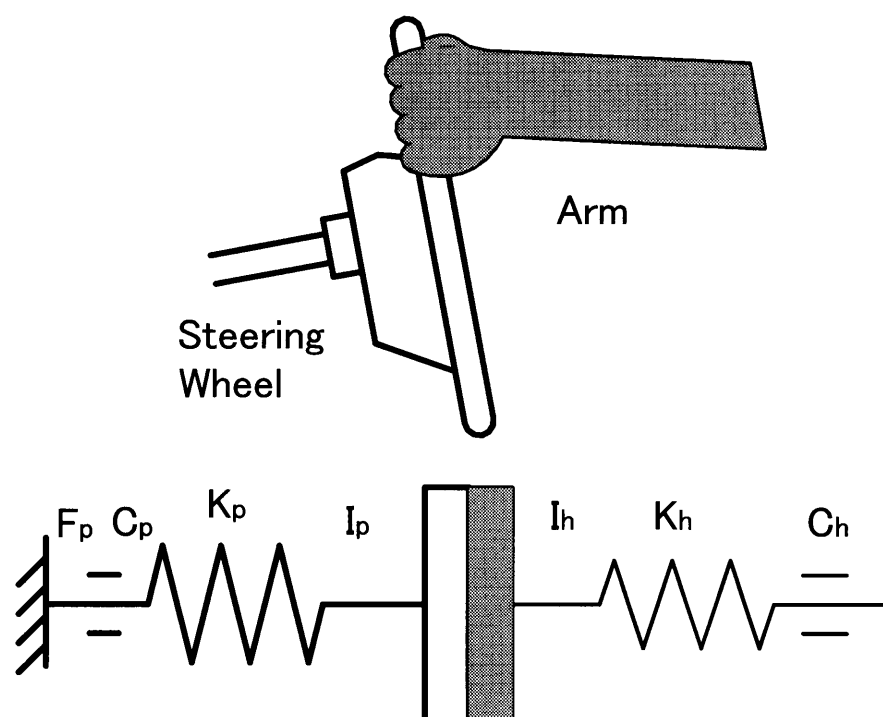


Fig. 3.1 Model of human arm and steering wheel

ここで、 $\theta$ はハンドル角、 $I_p$ は操舵系の慣性モーメント、 $C_p$ は粘性係数、 $K_p$ はばね定数、 $F_p$ は摩擦トルク、 $\text{sgn}(\dot{\theta})$ は角速度 $\dot{\theta}$ の符号を表し、 $T_h$ は人間からハンドルへ伝えられるトルクである。回転方向は反時計回りを正、横方向は向かって左を正とする。

なお、従来の研究や練習用の自動車シュミレータは、車両の方向と進行速度の方向とのずれ角、及び車両旋回速度を計算することにより、前輪にかかるモーメントを計算し、操舵系の状態を求める場合が多い。

人間の筋骨格系は複雑であるが、ここでは簡単に、慣性・粘性・剛性特性を有する一軸の回転系とすると、式(3.2)のように表される。

$$T_h = -I_h \ddot{\theta} - C_h(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) - K_h(\theta - \theta_d) \quad (3.2)$$

ここで、 $\theta_d$ は目標角度、 $I_h$ は腕の慣性モーメント、 $C_h$ は粘性係数、 $K_h$ はばね定数である。式(3.2)はステアリングを運動させたい目標値 $\theta_d$ に対して、現在値 $\theta$ に偏差があることにより、トルク $T_h$ が発生することを表している。操舵系及び腕のモデルをブロック線図に表すとFig. 3.2のようになる。図中の $1/s$ は積分、 $s$ は微分、 $\text{Sign}$ は速度の方向を表す演算子である。

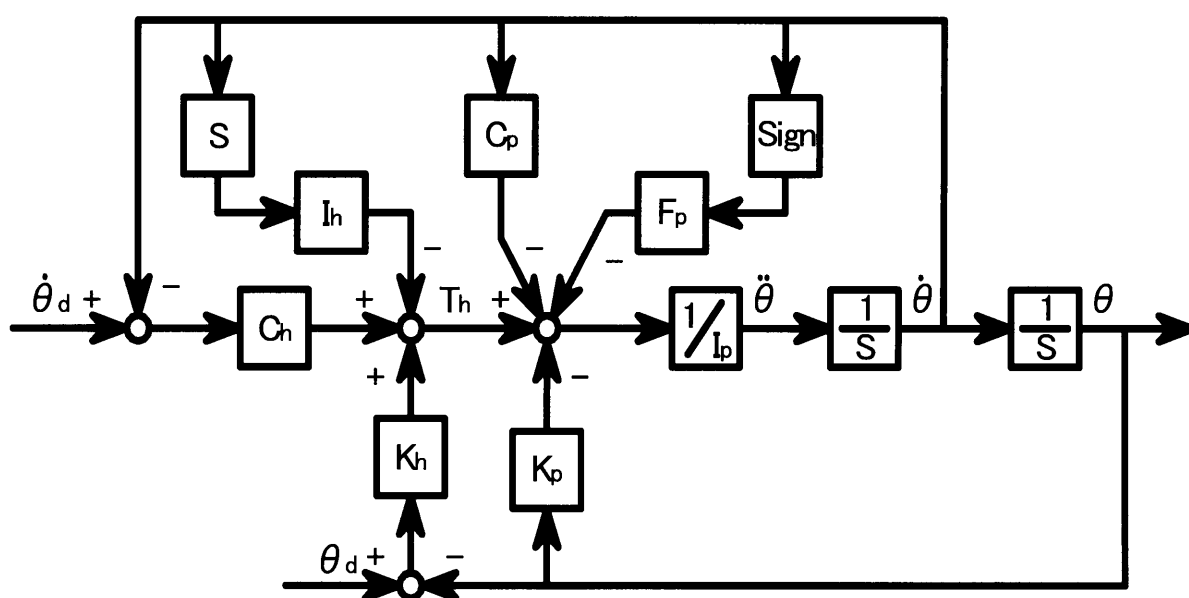


Fig. 3.2 Block diagram of arm-steering system

## 3.2 腕のインピーダンス推定方法

式(3.2)から腕のインピーダンスである $I_h$ 、 $C_h$ 、 $K_h$ を推定する方法を考える。指令角度 $\theta_d$ 、指令角速度 $\dot{\theta}_d$ は脳から腕へ伝えられる信号であり、観測することができないため、次の方法により観測不可能な変数を除去する。

式(3.2)のトルク $T_h$ に外乱トルク $dT_m$ を加えることを考える。 $T_h$ を $T_h + dT_h$ とすることで、 $\theta$ は $\theta + d\theta$ 、 $\theta_d$ は $\theta_d + d\theta_d$ となるが、 $\theta_d$ は脳から筋肉に伝える指令であるため、外乱トルク $dT_m$ を脳からの指令に対して十分速く加えることができれば、 $d\theta_d$ を無視することができる。このように、式(3.2)に十分速い外乱トルク $dT_m$ を加えることにより、

$$T_h + dT_h = -I_h(\ddot{\theta} + d\ddot{\theta}) - C_h(\dot{\theta} + d\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) - K_h(\theta + d\theta - \theta_d) \quad (3.3)$$

となる。式(3.3)から式(3.2)を差し引くと変化分だけの式

$$dT_h = -I_h d\ddot{\theta} - C_h d\dot{\theta} - K_h d\theta \quad (3.4)$$

が得られる。 $d\ddot{\theta}$ 、 $d\dot{\theta}$ 、 $d\theta$ は計測することができるので、腕のインピーダンス $I_h$ 、 $C_h$ 、 $K_h$ は、式(3.4)から最小二乗法により推定することができる。

しかし、実際問題として指令角度、指令角速度を定数と扱って推定した結果は精度に不安が残る。そこで、短時間では指令角度、指令角速度は時間に比例して変化すると仮定し、変数を追加する。一方、その他の変数にも低周波成分が存在し、それらを定数と扱い、差し引いてから係数を推定するよりも、それらも含めて同時に推定する方が効率的で、周期的な誤差を排除できることが予想される。時間の係数を $D_1$ 、定数項を $D_2$ とすると、

$$T_h = -I_h \ddot{\theta} - C_h \dot{\theta} - K_h \theta + D_1 t + D_2 \quad (3.5)$$

となり  $I_h$ 、 $C_h$ 、 $K_h$ 、 $D_1$ 、 $D_2$  を最小二乗法により推定する。

なお、本研究では  $dT_m$  として、Fig. 3.3 に示す 0.1[s] の短形波トルクを与える。実験では、図に示すような、時定数 0.01 の一次遅れフィルタを通過させた波形を用いる。

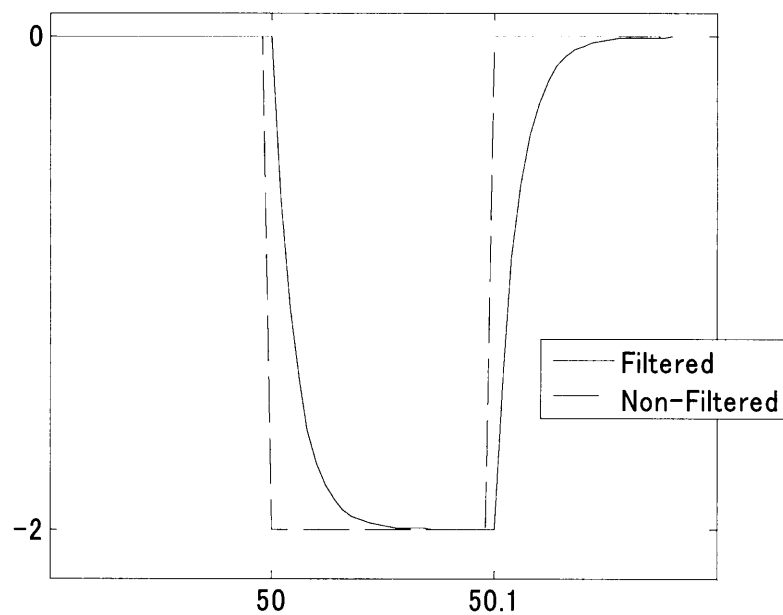


Fig. 3.3 Input torque

## 第4章

# 実験装置

### 4.1 システムの構成

Fig. 4.1 に実験装置の概要を示す。被験者は画面中央のシートに座りハンドルを操作する。シートの後方にあるプロジェクタを用い、前方にあるスクリーンに目標角度と車両角度を表示する。また、画面左側にあるコンピュータにより、ステアリングの操舵特性が制御される。

Fig. 4.2はステアリングを制御する装置である。ステアリングホイール軸はACサーボモータによりダイレクトに駆動されるようになっており、モータや人間から加えられるトルクはトルクセンサにより計測される。ステアリング角度はモータに取り付けられたエンコーダで計測する。摩擦トルクはアルミ円盤とベークライト及び板ばねで構成されるブレーキシステムにより発生させ、板ばねのたわみを変えることにより摩擦トルクを変化させることができる。

Fig. 4.3 に信号を処理するシステム図を示す。ACサーボモータのトルク指令値はコンピュータからD/A変換ボード、ドライバユニットを介して出力される。ハンドル角はカウンタボード、ドライバユニットを介しACサーボモータに取り付けられたエンコーダより、ステアリングトルクはA/D変換ボードを介しトルクセンサよりコンピュータに読み込まれる。検出するトルクの値はひずみアンプ内蔵のカットオフ周波数 300Hz のローパスフィルタにより、フィルタ処理を行なっている。

Fig. 4.4 に被験者前方のスクリーンに表示される画面を示す。スクリーンには目標角度(十字線)と現在車両角度(四角枠)を表示する。車両角度はハンドル角から二輪モデルを用い計算している。また、スクリーン上部に表示した7個の四角枠は、目標角度とステアリング操作により運動した車両角度との誤差の大きさを示すもので、次式により計算している。

$$f(t) = \frac{1}{T} \int \varepsilon^2 dt \quad (4.1)$$

ここで、 $\varepsilon$ は目標角度と車両角度の誤差、 $T$ は操作時間である。これは、被験者に操作の集中度を維持させるためのものであり、エラーが発生すると図のようにエラーの大きさに応じて左側からエラーを表示する。エラーが大きい場合は実験を中止し、再度行なうものとする。目標は車速 100km/h のスラローム走行を想定し、その周波数は 0.05Hz とする。

装置の制御、データの参照はMatlab/Real-Time Workshopを用いる。実験では装置の制御、データの保存等、全ての計算のサンプリングタイムは 0.004[s] で行なう。

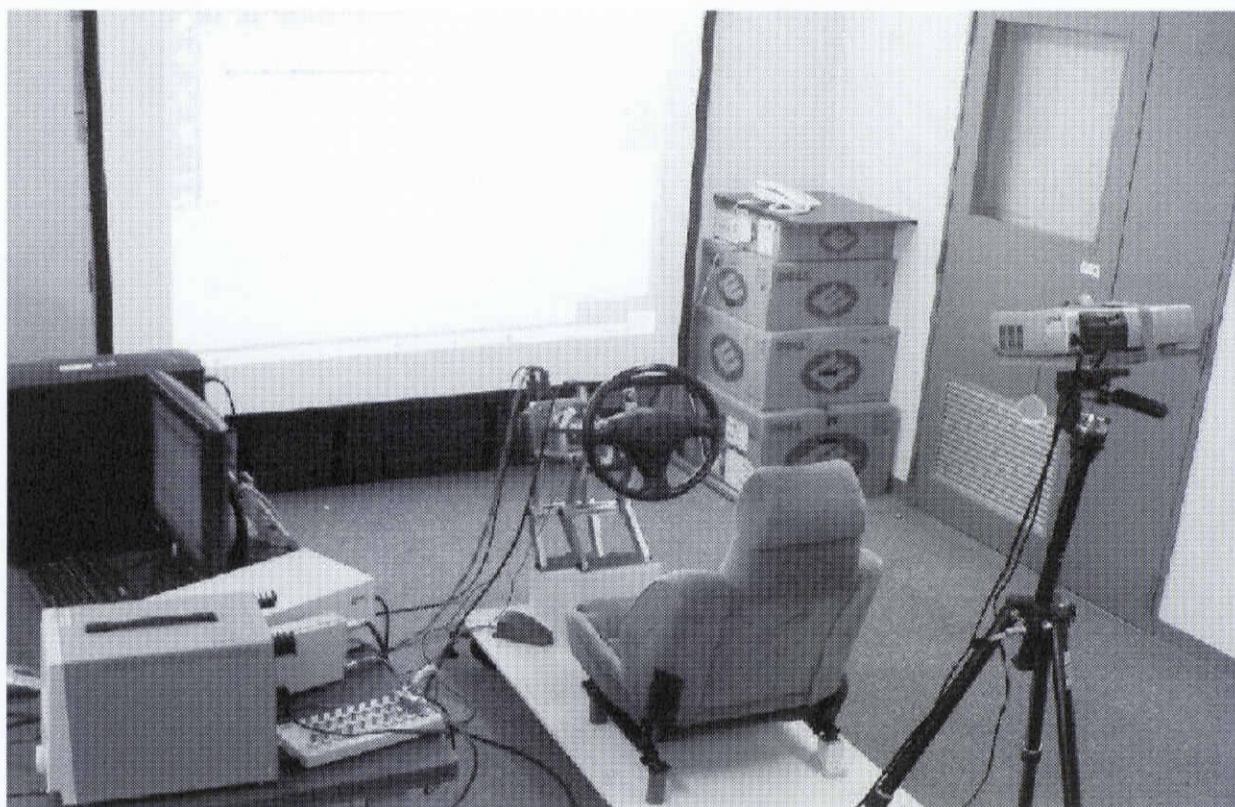


Fig. 4.1 Overview of experimental setup



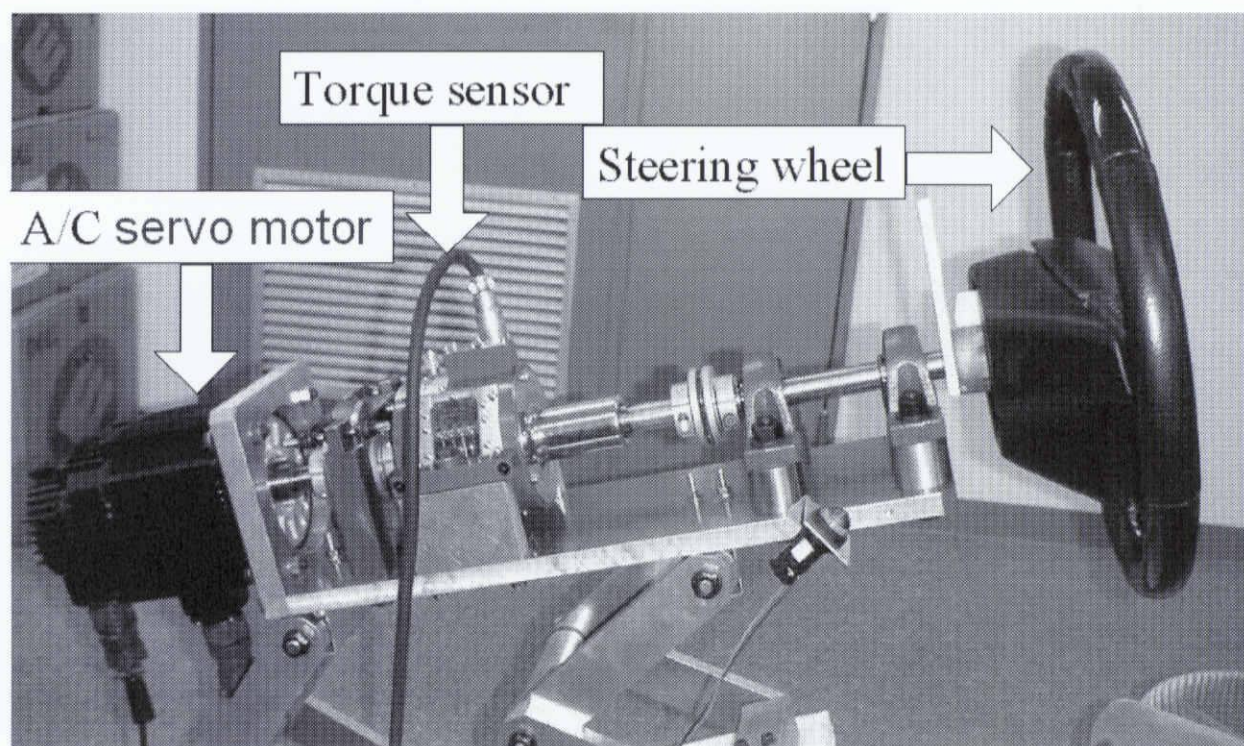


Fig. 4.2 Steering wheel control device

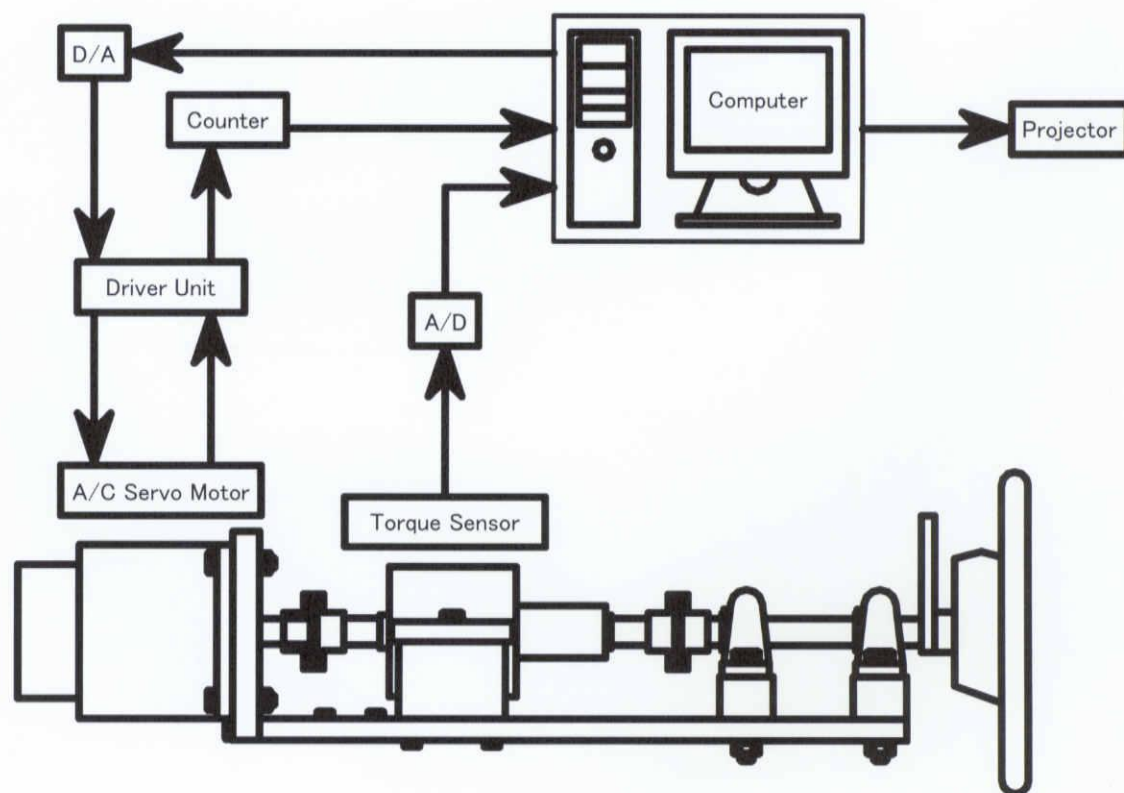


Fig. 4.3 Signal flow diagram of experimental system



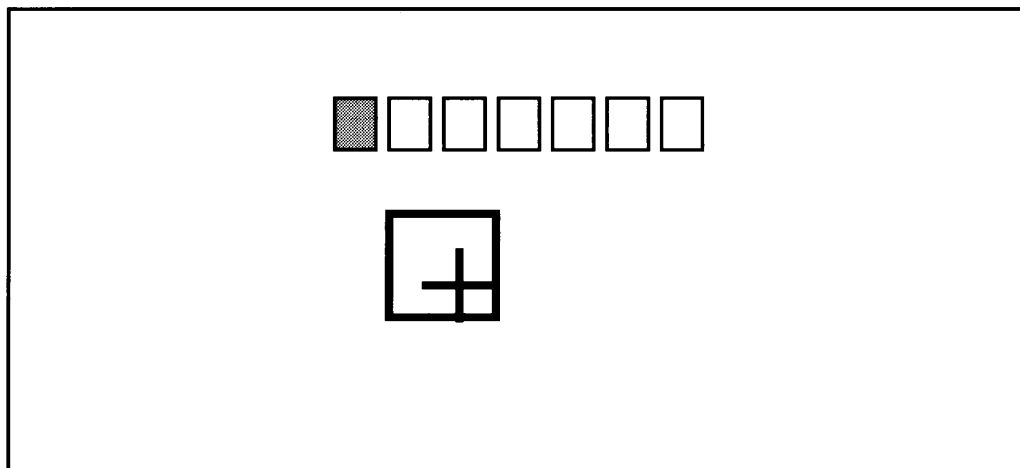


Fig. 4.4 Display for the error between the target angle and the real angle

## 4.2 ステアリングホイールの制御

Fig. 4.2 に示すシステムを、ロボットアームの制御などで多く使われているインピーダンス制御を用いて、式 (3.1) の特性となるように制御する。

Fig. 4.2 のシステムの運動方程式は、

$$I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} = T_m + T_h - F \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \quad (4.2)$$

$$T_s = T_h - I_s\ddot{\theta} - C_s\dot{\theta} \quad (4.3)$$

で表すことができる。ここで、 $I$ はステアリングホイール及びモータやセンサなどからなる慣性モーメント、 $C$ は軸受け部の粘性摩擦、 $F$ はブレーキシステムにより発生する固体摩擦トルク、 $I_s$ はトルクセンサからみたハンドル側の慣性モーメント、 $C_s$ はトルクセンサからみたハンドル側の粘性係数である。また、 $T_m$ はモータにより発生されるトルク、 $T_h$ は人間が加えるトルク、 $T_s$ はトルクセンサより検出できるトルクである。式 (4.2) で表されるモデルのトルク  $T_m$  を制御し、次式とすることを考える。

$$I_p\ddot{\theta} + C_p\dot{\theta} + K_p\theta = T_h - F_p \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \quad (4.4)$$

ここで、 $I_p$ 、 $C_p$ 、 $K_p$ 、 $F_p$  はそれぞれ実現させたい慣性、粘性、剛性、摩擦トルクである。式 (4.2) を  $\ddot{\theta}$  について解くと、

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{I}(T_m + T_h - C\dot{\theta} - F\text{sgn}(\dot{\theta})) \quad (4.5)$$

式 (4.4) に式 (4.5) を代入し、 $T_m$  について解くと、

$$T_m = \left(\frac{I}{I_p} - 1\right)T_h + \left(C - \frac{I}{I_p}C_p\right)\dot{\theta} - \frac{I}{I_p}K_p\theta + \left(F - \frac{I}{I_p}F_p\right)\text{sgn}(\dot{\theta}) \quad (4.6)$$

が得られる。式 (4.6) によりモータのトルクを制御することにより、式 (4.4) の特性を実現することができる。

式 (4.4) を計算するために必要なパラメータの物性値はモータに M 系列信号を入力し、得たデータの入出力関係から最小二乗法を用いて推定した。Table. 4.1 にそれぞれの値をまとめる。

Table. 4.1 Parameters in equation

$I[\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s}^2)]$	0.0256
$C[\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})]$	0.008
$F[\text{N}\cdot\text{m}]$	0.13
$I_s[\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s}^2)]$	0.0226
$C_s[\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})]$	0.001

式 (4.6) の  $T_h$  はモータの指令トルク計算時に、式 (4.3) により、ハンドルの慣性等の補償をすべきだが、システムが不安定になることとノイズが多くなることを防ぐために、 $T_h = T_s$  と近似的に扱っている。また、システムの構成上ノイズを含むことは避け

られないので、デジタルフィルタを通過させている。使用するデジタルフィルタの特性を Fig. 4.5 に示す。

なお、 $I_p = I$ かつ $F_p = F$ の場合は摩擦に関する補償を考慮しなくてもよくなっている。

### 4.3 実車データに基づく操舵感の実現

Fig. 4.6 は時速 100[km/h] で走行した実車のステアリング角度とトルクを示したグラフである。グラフはヒステリシスばねを持った回転系の形をしている。そこで式 (4.4) の  $K_p$  及び、 $C_p$  をのように設定した。

$K_p$  は Fig. 4.7 の左図のように、ステアリング角度が  $\pm 0.13[\text{rad}]$  で変化させた。 $K_{p1}$  はハンドルセンタ付近の弾性係数、 $K_{p2}$  は外側の弾性係数である。 $C_p$  も Fig. 4.7 の右図のようにステアリング角度が  $\pm 0.13[\text{rad}]$  で変化させるようにする。 $C_{p1}$  はハンドルセンタ付近の粘性係数、 $C_{p2}$  は外側の粘性係数である。しかし、値を急激に変化させると違和感を感じる上に、推定にも支障をきたす可能性があるので、 $0.13 \sim 0.15[\text{rad}]$  の範囲でスムーズに変化させた。これらの値は実車データを参考にした。

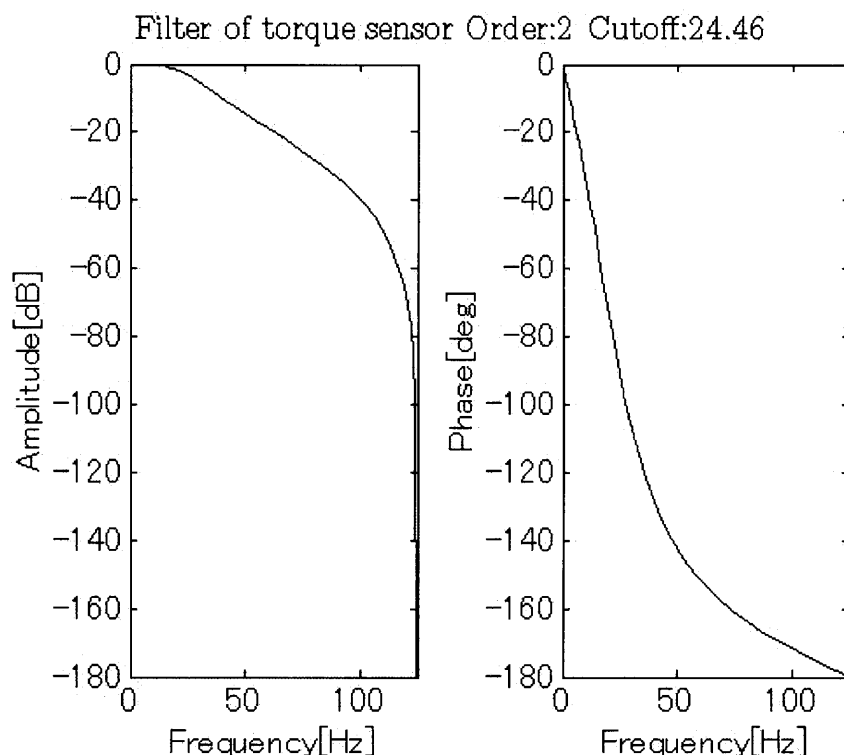


Fig. 4.5 Bode diagram of torque sensor's filter

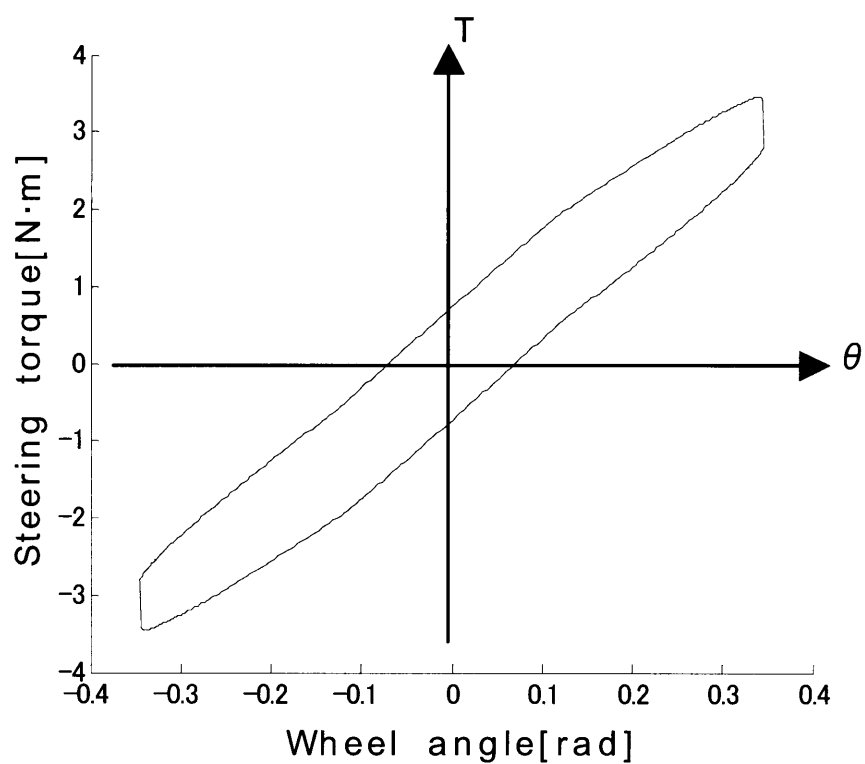
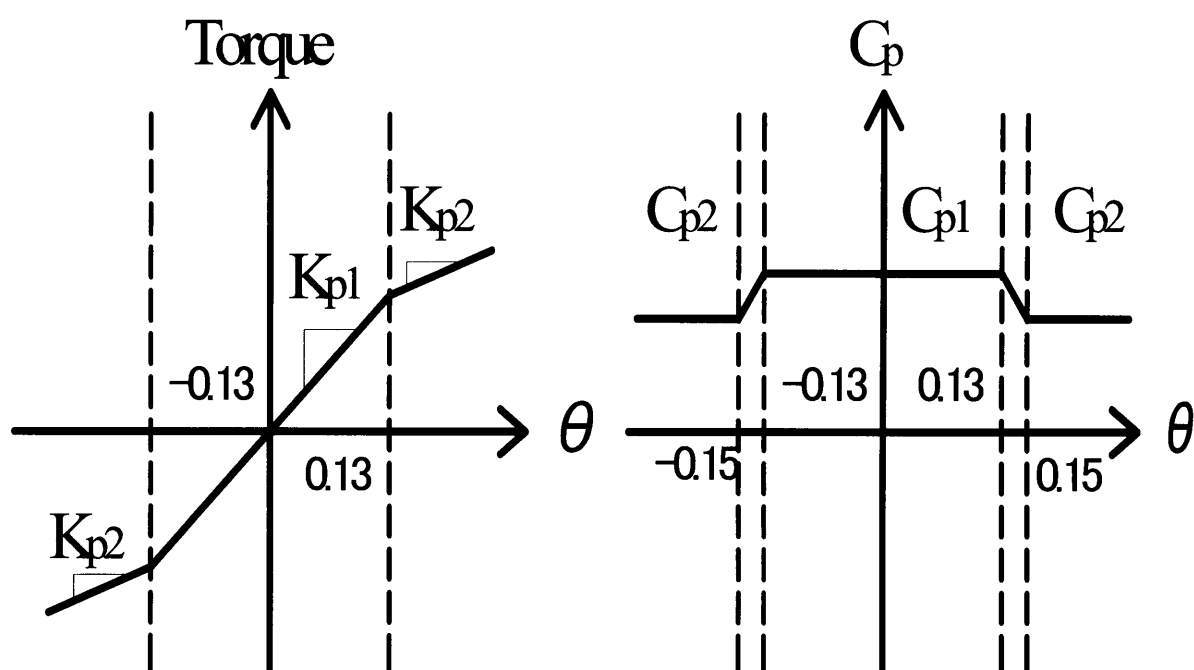


Fig. 4.6 Relationship between steering angle and torque

Fig. 4.7 Setting curve of  $C_d$  and  $K_d$

## 4.4 弾性ばねを用いた実験装置の検証

弾性ばねを実験装置に取り付け、弾性ばねのばね定数を人間の腕のインピーダンスを測定する時と同じように測定し、正しく推定されているか検証する。

### 4.4.1 実験方法

公証のばね定数と実際のばね定数は異なっている場合があるため、正確な値を測定するために、Fig. 4.8 のような装置を用いる。弾性ばねの下方に錘をつけ、変位を変位センサーを用いて測定する。錘の質量と変位から実際のばね定数を求める。使用する錘は 200[g] である。測定は 4 回行う。

その後以下のように、ばね定数をステアリング装置を用いて推定する。実験装置の外観を Fig. 4.9、Fig. 4.10 に示す。ハンドル軸と台座に取り付けられた板金に弾性ばねを取り付けてある。弾性ばねにはばね定数を正しく推定するために予め A/C サーボモータより弱いトルクを加え、遊びをなくした状態にしてある。この状態で外乱トルクを加え、ばね定数を推定する。実験で使用する外乱トルク  $dT_m$  は Fig. 3.3 で示す短波形トルクである。

本実験では操舵系が有するパラメータがばね定数の推定に影響がないか確認し、ばね定数が正確に求められるか検証する。実験で比較する装置のパラメータを Table. 4.2 に示す。慣性モーメント  $I_p$  は  $0.256[\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s}^2)]$  とする。弾性ばねのばね定数は一定であるため、操舵系が有するパラメータを変更しても、推定されるばね定数は変わらないと考えられる。実験に使用する弾性ばねは、ばね定数の異なる 2 本である。

Table. 4.2 Set parameters of the steering

	$C_p$ [N·m/(rad/s)]	$K_p$ [N·m/rad]	$F_p$ [N·m]
Parameter.1	0	0	0.6
Parameter.2	2	0	0.6
Parameter.3	0	16	0.6
Parameter.4	2	16	0.6
Parameter.5	0	0	0
Parameter.6	2	0	0
Parameter.7	0	16	0
Parameter.8	2	16	0

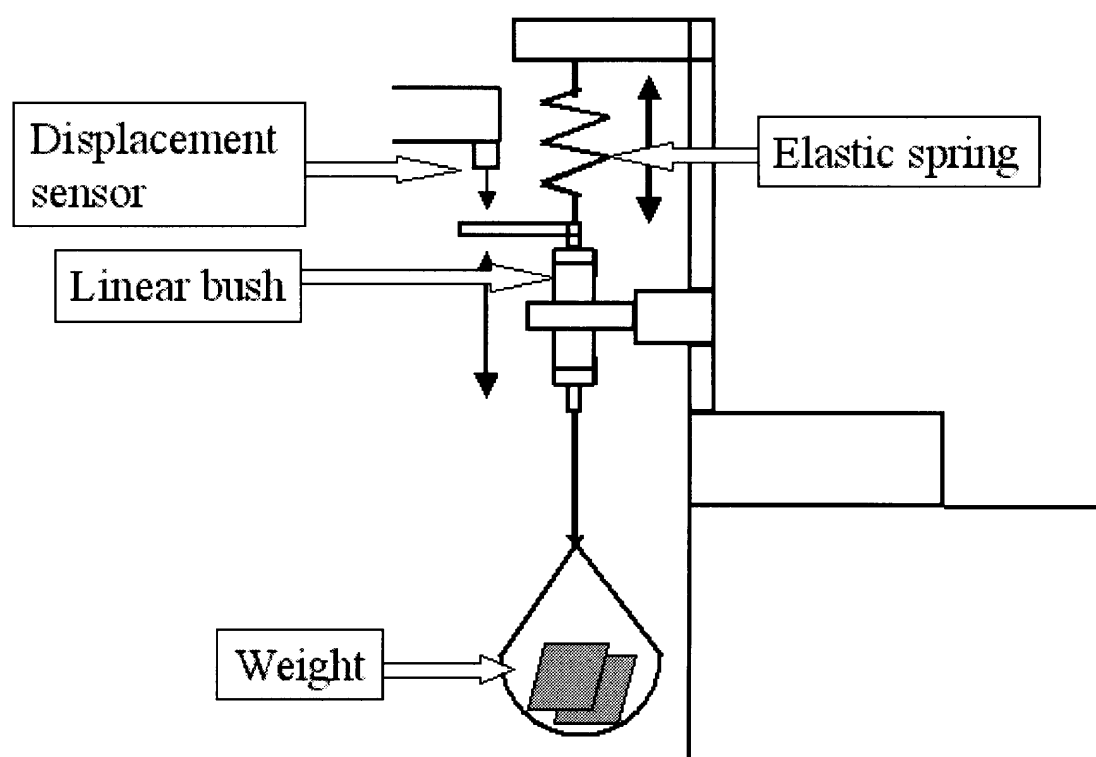


Fig. 4.8 Displacement measuring device

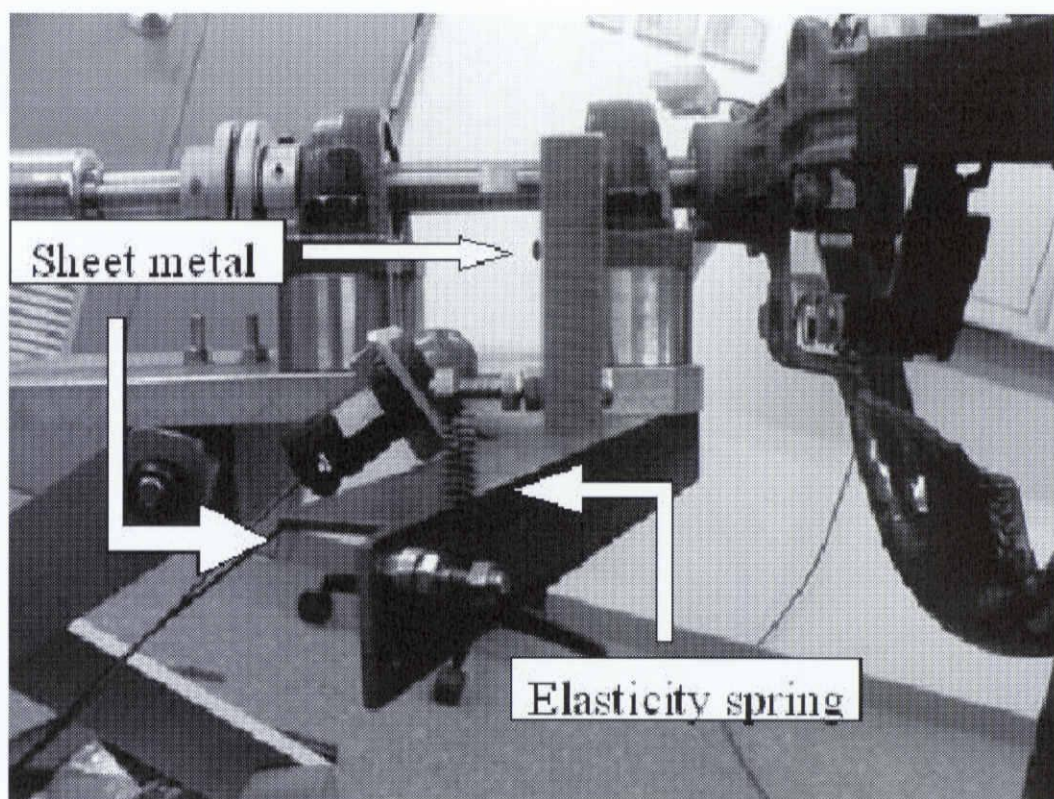


Fig. 4.9 Spring constant measurig device

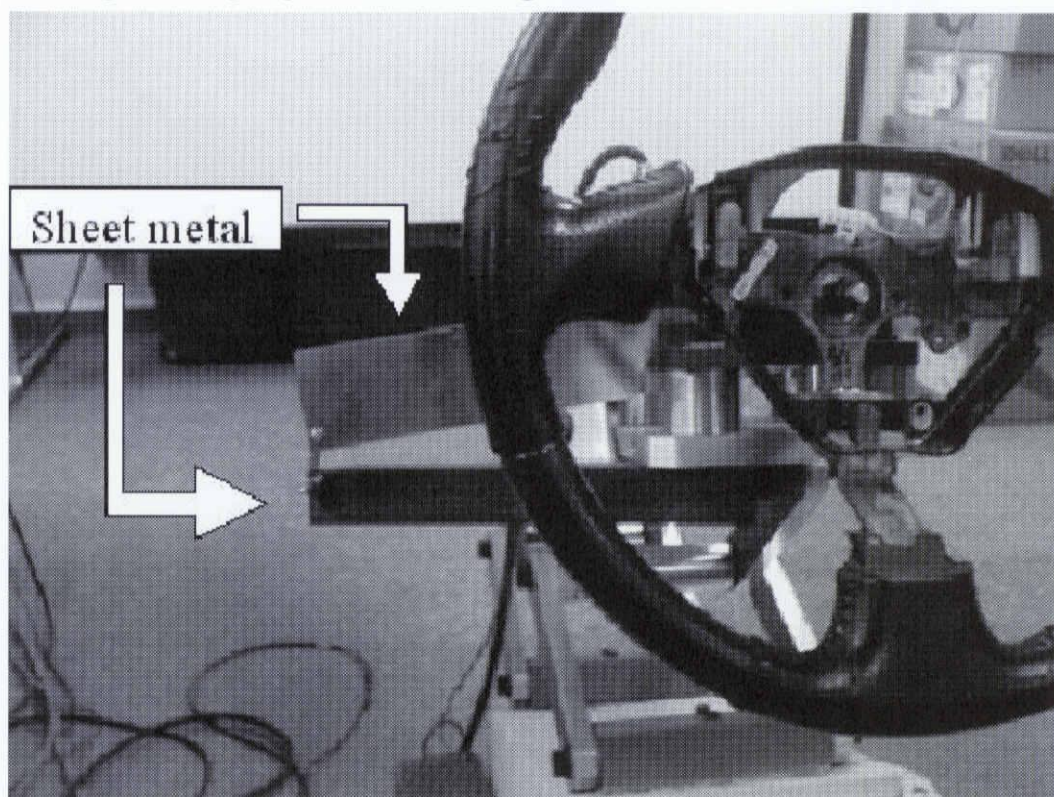


Fig. 4.10 Spring constant measurig device



### 4.4.2 実験結果

Table. 4.3、Table. 4.4 に実験に使用する弾性ばねのばね定数を計測した結果を示す。計測された4回の値の平均をとると、実測値は1本目の弾性ばねのばね定数が1660[N/m]、2本目のばね定数が410[N/m]となった。Fig. 4.11、Fig. 4.12 は実験で測定されたばね定数をグラフ化したものである。中心で値の平均値、幅で標準偏差を示してある。横方向の軸に左から順に Table. 4.2 で示した装置のパラメータ1からパラメータ8を表し、縦方向の軸に実験で計測されたばね定数の値を取ってある。

実測値と実験で計測した値を比較すると、ばね定数が1660[N/m]の弾性ばねは、装置のパラメータによって値に上下しているが、どのばね定数も実測値に近いが測定されている。ばね定数が410[N/m]の弾性ばねは実測値に比べ、計測した値が全体的に1割程度低い、装置のパラメータによって値が上下しているが大きな差は出ていない。

測定値がパラメータの変化に対して差が小さいことから、実験で推定される腕のインピーダンスが実際の値より低く推定される可能性があるが、装置の特性の違いによる比較は十分に可能であるため、実験装置は腕のインピーダンスを推定できていると考える。

Table. 4.3 Measurement result(spring1)

	Displacement [mm]	Spring constant [N/mm]
1	1.21	1.65
2	1.18	1.69
3	1.21	1.65
4	1.21	1.65
Average	1.20	1.66

Table. 4.4 Measurement result(spring2)

	Displacement [mm]	Spring constant [N/mm]
1	4.90	0.40
2	4.73	0.42
3	4.91	0.40
4	4.79	0.41
Average	4.83	0.41



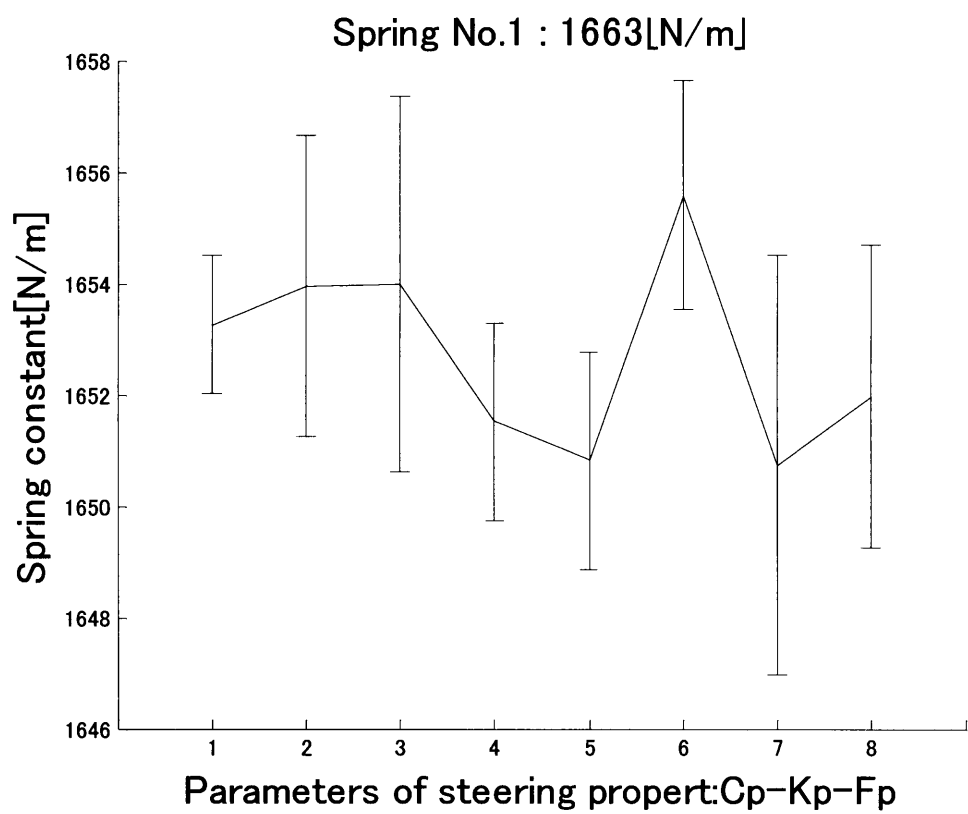


Fig. 4.11 Experiment result (Spring 1 )

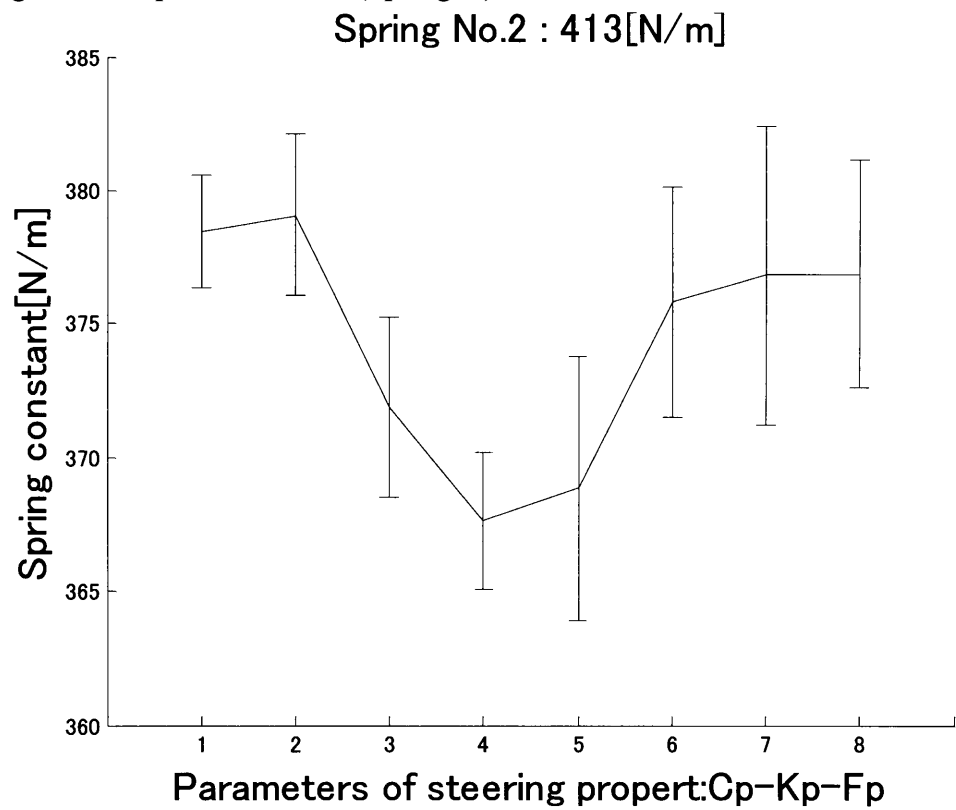


Fig. 4.12 Experiment result (Spring2)

# 第5章

## インピーダンスの測定

本章では、ステアリング装置を用い、腕のインピーダンスを実際に測定した実験の結果を示す。

### 5.1 個人ごとのインピーダンスの正規化

インピーダンスの大きさは筋力や体格によって個人差が大きいため、パラメータの正規化を行なう。

#### 5.1.1 正規化手法

被験者が腕の筋肉を弛緩した状態でハンドルを握ったときと、腕に最も力を入れてハンドルを握ったときのインピーダンスを測定する。そのときのインピーダンスパラメータをそれぞれ $P_{min}$ 、 $P_{max}$ とする。さらに、ステアリング操作時に計測したインピーダンスパラメータを $\bar{P}$ とし、次式(5.1)を用い正規化を行なう。

$$P = \frac{\bar{P} - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \quad (5.1)$$

これにより、被験者の筋力による個人差の影響を抑えることができ、被験者間の平均など統計処理をすることが可能となる。

#### 5.1.2 最小、最大力の計測

Fig. 5.1 は被験者が腕の筋肉を弛緩した状態でハンドルを握ったときと、腕に最も力を入れてハンドルを握ってもらったときのインピーダンスパラメータを示したものである。被験者は21～24才の三重大学学生の男性2人とテストドライバー1人である。

図は、左から順に $I_h$ 、 $C_h$ 、 $K_h$ の値を示しており、上から順に被験者1から3までを示している。

図から、弛緩時と最大時で被験者全員に共通して $K_h$ の値に最も大きな差が出ていることがわかる。式(5.1)を用いて正規化するので、大きな差が出るパラメータを使うことによってダイナミックレンジが増す。従ってここでは、 $K_h$ を人間のインピーダンスパラメータの代表パラメータとして用いることとする。

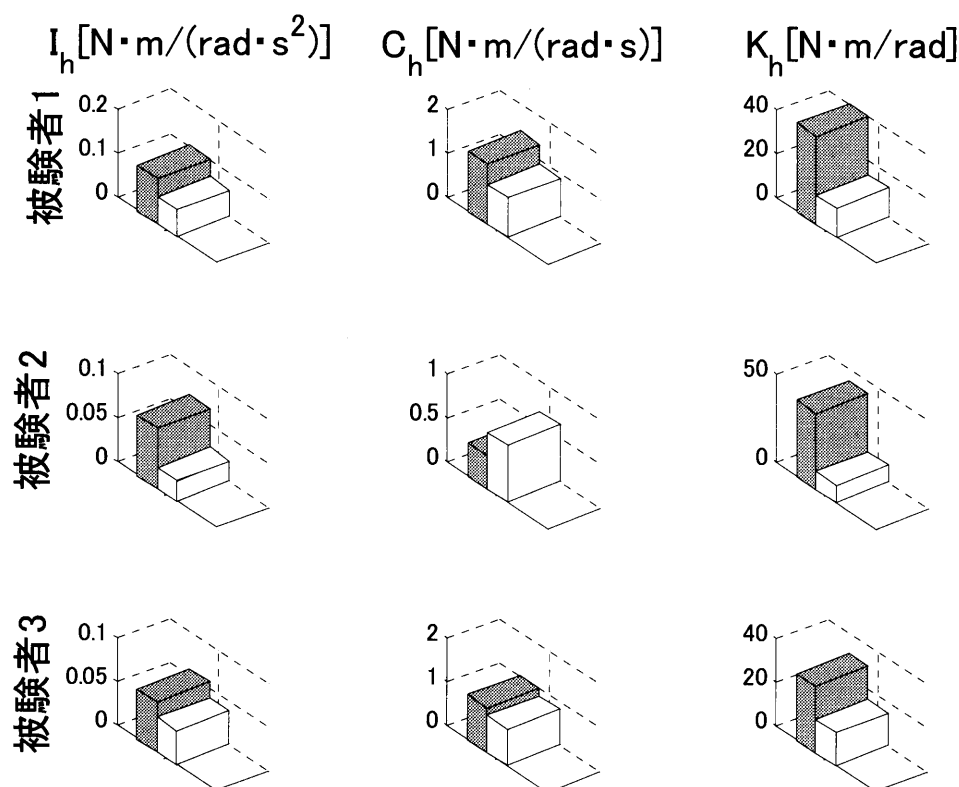


Fig. 5.1 Impedance parameters in minimum and maximum tension of the muscle

## 5.2 操舵系の粘性・剛性特性を変化させた実験

### 5.2.1 実験方法

固体摩擦トルクは、 $F_p = 0.3[N \cdot m]$ と固定し、粘性・剛性パラメータを変化させ、操舵感と粘性・剛性パラメータの関係について調べた。Fig. 4.7 における剛性・粘性については、Table. 5.1 に示すように、 $C_{p1}$  を3通り、 $C_{p2}/C_{p1}$  を1通り、 $K_{p1}$  を3通り、 $K_{p2}/K_{p1}$  を1通りとし、計9通りの組み合わせについて実験を行なった。1組のパラメータにつき、時間が150[s]の実験を3回行なう。1回の実験において、ハンドル角が0[rad]付近に4回の外乱トルクが入力される。ただし、入力される時間はランダムである。従って、1組のパラメータについては合計12回の外乱トルクが入力され、12回インピーダンスを測定することとなる。目標角度は時速100[km/h]で車線変更を行なう場合を想定し、周波数0.05[Hz]、ハンドル角度 $\pm 10[^\circ]$ のSin波を出力する。

外乱入力時のトルクセンサによるトルクデータ及びモータのエンコーダによるステアリング回転角度より、第3章で示した方法により人間の剛性を推定する。また、第5章で示した方法(式(5.1))により、先に求めた剛性 $\bar{K}_h$ を正規化し、 $K_h$ とする。

被験者は21～24才の三重大学学生の男性2人である。

Table. 5.1 Set damping of the steering

$C_{p1} [N \cdot m / (rad/s)]$	0.1 , 1 , 2
$C_{p2} / C_{p1}$	1
$K_{p1} [N \cdot m / rad]$	4 , 10 , 16
$K_{p2} / K_{p1}$	0.7

### 5.2.2 主観評価

各実験後に被験者にアンケート形式の主観評価をしてもらい、測定したインピーダンスとの対応を調べた。評価項目は、「位置決めのしやすさ」、「負荷・抵抗感」、「N(ハンドルセンタ、ニュートラル)の手ごたえ」、「全体的な操作感」の4項目であ

る。被験者には、各項目ごとに7段階(7が最も良い)の評定をつけてもらった。「位置決めやすさ」は思った通りの角度に位置決めできるか、「負荷・抵抗感」はハンドル操作に抵抗感があるか、「Nの手ごたえ」はハンドルセンタのわかりやすさはどうか、「全体的な操作感」は操作のしやすさを総合的に評価する。

### 5.2.3 実験結果

Fig. 5.2に実験結果を示す。横軸に $K_p$ 、縦軸に $C_p$ をとり、そのときの結果を6本の棒グラフで表示している。一番左の棒グラフが正規化した腕の剛性 $K_h$ 、その隣から順に主観評価の結果を表示している。「位」が「位置決めやすさ」、「負」が「負荷・抵抗感」、「N」が「N(ハンドルセンタ、ニュートラル)の手ごたえ」、「操」が「全体的な操作感」である。右端の棒グラフは目標角度とハンドル角度の誤差の大きさを表しており、外乱トルクが入力された4箇所を除き、ランダムに1周期取り出し、次式で計算している。

$$F(t) = \frac{\int \varepsilon dt}{T} \quad (5.2)$$

ここで、 $\varepsilon$ は目標角度と車両角度の誤差、 $T$ は1周期分の操作時間を表している。

また、 $K_h$ と誤差の棒グラフは棒グラフ下側の灰色に塗りつぶされた部分が平均を表しており、上側の塗りつぶしていない部分は標準偏差を表している。

図からステアリングの粘性が変わっても、腕の剛性の値や主観評価に変化がないことがわかる。これは今回行なったステアリング操作が比較的ゆっくりとした動きだったため、ステアリング角速度に比例する粘性トルクはあまり影響しなかったと考えられる。

ステアリングの剛性の変化に対しては、被験者によって異なった結果が得られた。被験者1については、 $C_p$ が小さい時、 $K_p$ が大きくなると、 $K_h$ は大きくなる傾向がみられ、それ以外の時にはほとんど変化がみられない。一方、被験者2については、 $K_p$ が大きくなると、 $K_h$ は小さくなることがみてとれる。

主観評価の結果は、被験者 1、被験者 2 共通して操舵系の弾性力が強くなることで「位置決めのしやすさ」、「N の手ごたえ」の項目の評価が良くなっている。これは弾性力が強くなることで、負荷が強くなり、ハンドル操作の微調整がしやすくなったためだと考えられる。実際に弾性力が強くなることで「負荷、抵抗感」の項目の値も低くなっている。粘性力の変化による傾向は見られなかった。「全体的な操作感」については、昨年度までは  $K_h$  の値が弛緩時の値に近い状態のときに操舵性が良いと感じる傾向が見られたが、本実験の結果では、その傾向はみられなかった。本実験では個人の結果を比較しているため、被験者 5 人の値を平均していた昨年度と違う結果が出たと考えられる。いずれにしても、主観評価の結果を腕の剛性が表現していると言える。

操舵感と誤差の関係については、操作性が良いからといって誤差が小さくなるという結果は出ていなかった。これは、誤差をランダムに 1 周期取り出したということと被験者の集中力にも影響された可能性があると思われる。

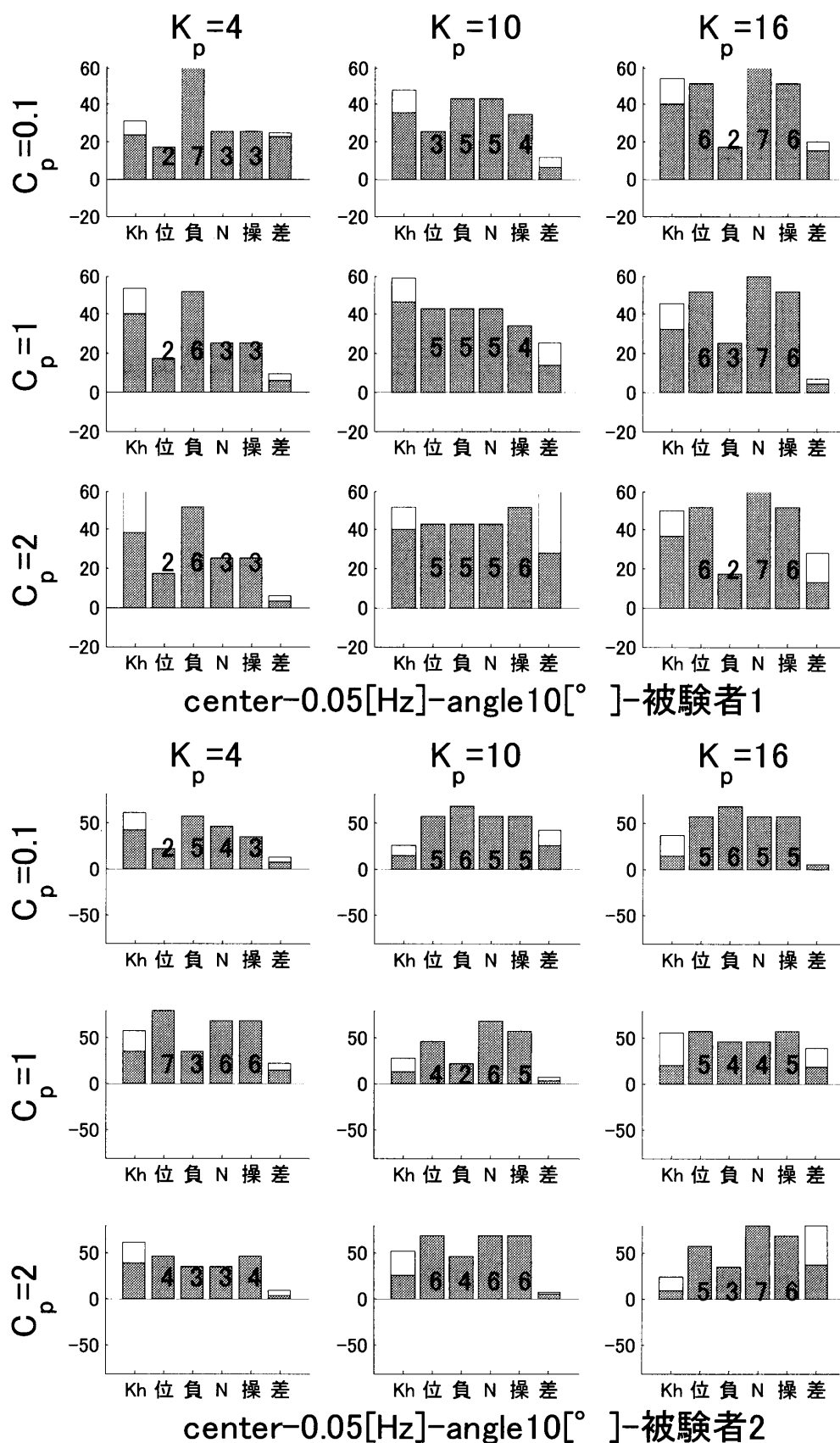


Fig. 5.2 Experimental result

## 5.3 操舵系の剛性・摩擦特性を変化させた実験

### 5.3.1 実験方法

Fig. 4.7 における剛性比 $K_{p2}/K_{p1}=0.7$ 、粘性 $C_{p1}=0.1[\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})]$ 、粘性比 $C_{p2}/C_{p1}=1$ とし、剛性と摩擦トルクについては、Table. 5.2 に示すように $K_p$ を3通り、 $F_p$ を3通りとし、計9通りの組み合わせについて実験を行なった。被験者は21～24才の三重大学学生の男性2人とテストドライバーの男性1人の計3人である。これとステアリングのインピーダンスパラメータ以外の実験条件は5.2と同じである。

Table. 5.2 Set stiffness and friction parameters of the steering

$K_{p1} [\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}]$	4 , 10 , 16
$F_p [\text{N}\cdot\text{m}]$	0.3 , 0.6 , 0.9

### 5.3.2 実験結果

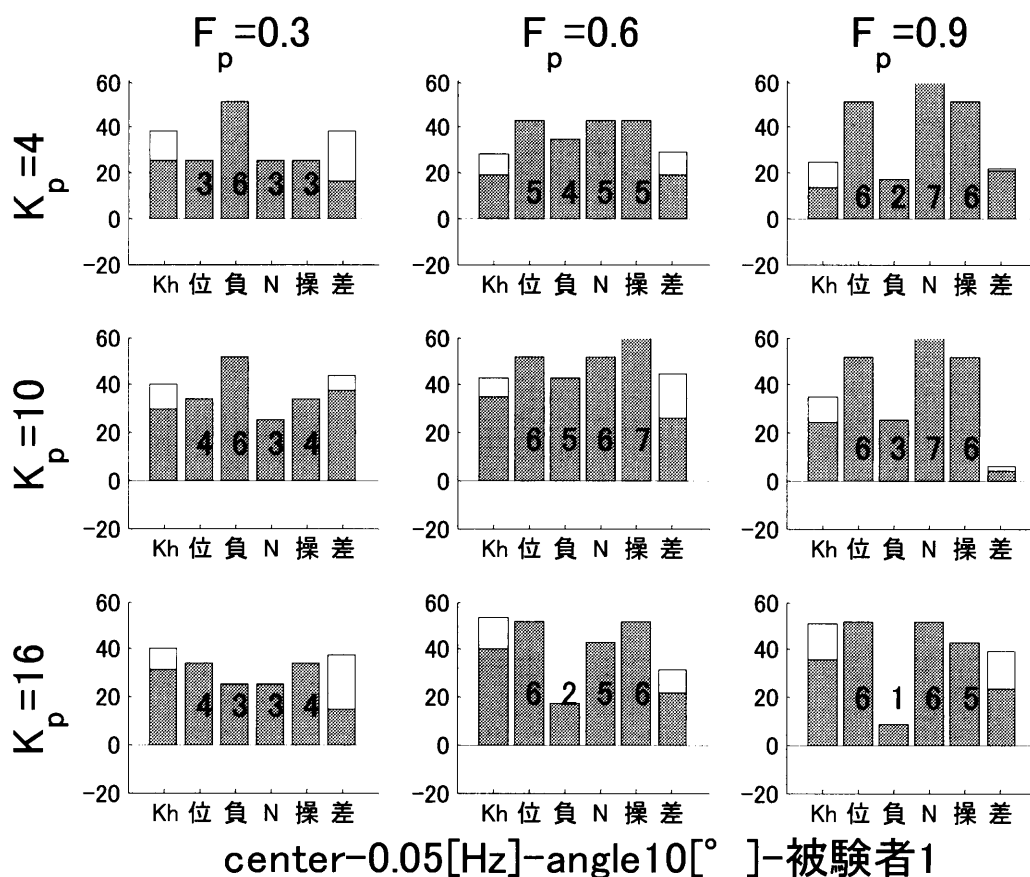
Fig. 5.3に実験結果を示す。横軸に $F_p$ 、縦軸に $K_p$ をとり、棒グラフは、左から正規化した腕の剛性 $K_h$ 、主観評価の「位置決めのしやすさ」、「負荷・抵抗感」、「N(ハンドルセンタ、ニュートラル)の手ごたえ」、「全体的な操作感」、目標角度とハンドル角度の誤差を表している。また、 $K_h$ と誤差の棒グラフの色の付いた部分が平均を表しており、色の付いていない部分が標準偏差を表している。棒グラフがマイナス側に伸びているのは、式(5.1)からわかるように、操作中の腕の剛性 $K_h$ が弛緩時の値よりも小さくなったことを示している。

図から剛性 $K_{p1}$ が大きくなると、被験者1と3は腕の剛性 $K_h$ も大きくなっている。被験者2は変化があまりみられない。また $K_{p1}$ が小さい時、 $F_p$ が大きくなると、 $K_h$ は小さくなるが、 $K_{p1}$ が大きくなるにつれて $K_h$ の変化が小さくなっている。

操舵系の弾性力の変更による主観評価の結果は、5.2の結果と同様に操舵系の弾性力が強くなることで「位置決めのしやすさ」、「Nの手ごたえ」の項目の評価が良くなっている。また、操舵系の摩擦力が強くなると「負荷、抵抗感」の項目の値が低くなり、「位置決めのしやすさ」、「Nの手ごたえ」の項目の評価が良くなっている。こ



れは弾性力と同様、摩擦力が強くなることで、負荷が強くなり、ハンドル操作の微調整がしやすくなったためだと考えられる。「全体的な操作感」は5. 2の結果と同様に、 $K_h$ の値が弛緩時に近くない場合でも操舵感が良いと評価されている。



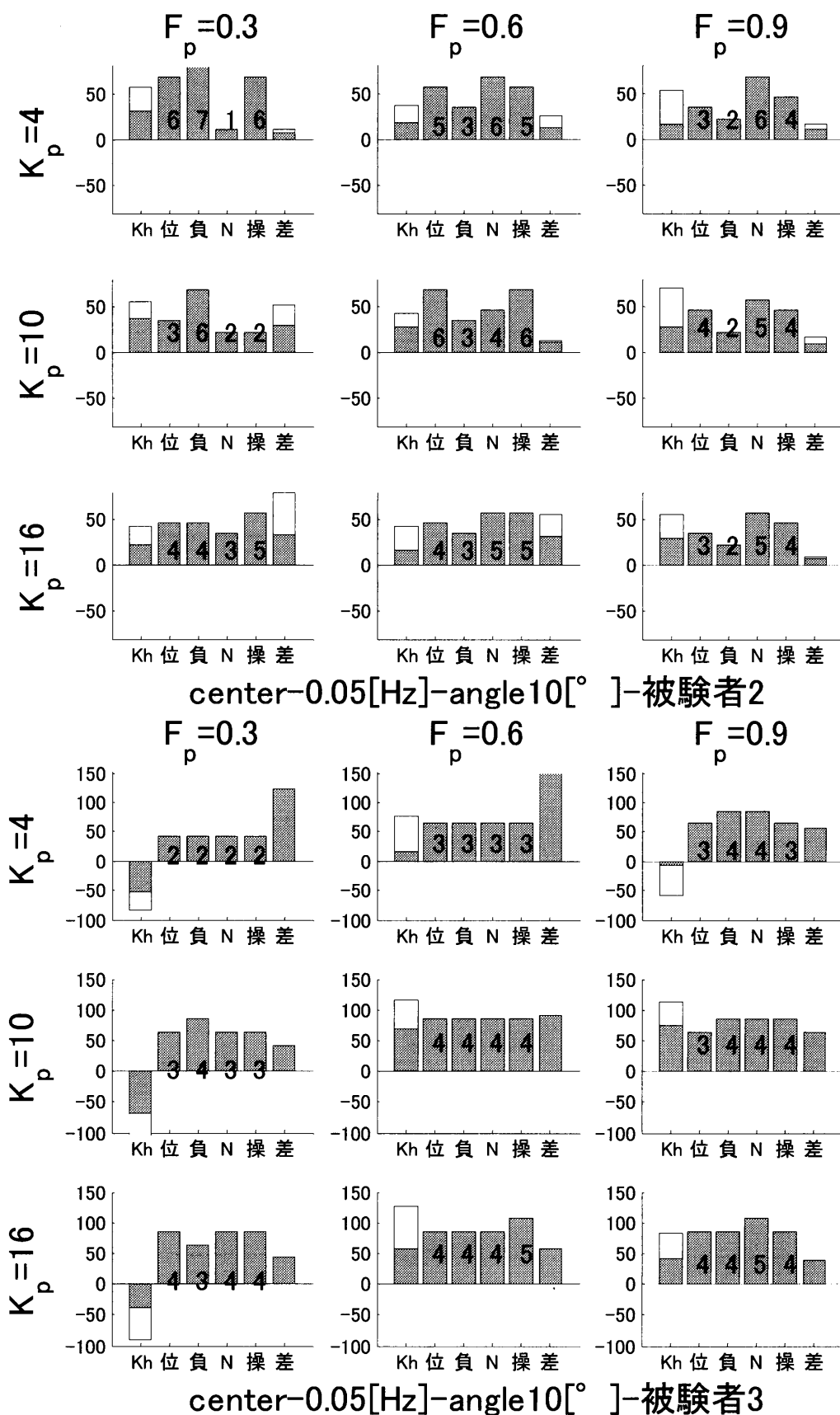


Fig. 5.3 Experimental result

## 5.4 目標角度を変化させる実験

5.2、5.3ともに操舵系のインピーダンスと腕のインピーダンス、操舵感の関係について調べてきた。いずれの実験も時速 100[km/h] のレーンチェンジを想定した場合の操作であったが、本章では外乱トルク入力位置や目標角度の周波数、最大ハンドル角度を変更し、腕のインピーダンスに変化があるかを調べていく。

### 5.4.1 実験方法

これまでの実験では、外乱トルクの入力はハンドル角度が  $0[^\circ]$  付近で、目標角度の周波数は  $0.05[\text{Hz}]$ 、最大移動振幅は  $10[^\circ]$  という条件のもとで行なってきた。本章では、Fig. 4.7 におけるパラメータを Table. 5.3 に示すように、実験1では操舵系の粘性・剛性を変え9通りで、Table. 5.4 に示すように、実験2では操舵系の剛性・摩擦トルクを変え9通りで、Table. 5.5 に示すように外乱トルク入力位置、目標角度の移動速度、目標の最大移動振幅を変えて5通りで実験を行なった。つまり、実験1で45通り、実験2で45通りである。

正規化に用いる  $K_{min}$ 、 $K_{max}$  は Fig. 5.1 を用いる。

被験者は 21 ～ 24 才の三重大学学生の男性 2 人である。

Table. 5.3 Set parameters of the steering ( Experiment 1 )

$C_{p1} [\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})]$	0.1	1	2
$C_{p2}/C_{p1}$	0.1		
$K_{p1} [\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}]$	4	10	16
$K_{p2}/K_{p1}$	0.7		
$F_p [\text{N}\cdot\text{m}]$	0.3		

Table. 5.4 Set parameters of the steering ( Experiment 2 )

$C_{p1}$ [N・m/(rad/s)]	0.1		
$C_{p2}/C_{p1}$	0.1		
$K_{p1}$ [N・m/rad]	4	10	16
$K_{p2}/K_{p1}$	0.7		
$F_p$ [N・m]	0.3	0.6	0.9

Table. 5.5 Experimental condition

	Frequency[Hz]	Move amplitude[°]	Torqu input position
Condition A	0.05	10	center
Condition B	0.05	10	outside
Condition C	0.05	5	center
Condition D	0.2	5	center
Condition E	0.2	5	outside

#### 5.4.2 実験結果

Fig. 5.4 ～ Fig. 5.8 に操舵特性の粘性・剛性を変え、conditionA ～ conditionE の条件で行なった実験結果を、Fig. 5.9 ～ Fig. 5.13 に操舵特性の剛性・摩擦トルクを変え、conditionA ～ conditionE の条件で行なった実験結果を示す。

まず、外乱トルク入力位置の違いによる変化をみるために、Fig. 5.4 と Fig. 5.5、Fig. 5.7 と Fig. 5.8、Fig. 5.9 と Fig. 5.10、Fig. 5.12 と Fig. 5.13 を比較すると、被験者1の場合、装置の剛性 $K_p$ が大きくなるとハンドルを切った状態の時の方が腕の剛性 $K_h$ が大きくなることもあるが、これはばねが戻ろうとする力に釣り合うような力が腕に働いているためだと思われる。しかし、被験者2においては、あまり変化がなかった。

次に、目標角度の移動速度の違いによる変化をみるために、Fig. 5.6 と Fig. 5.7、Fig. 5.11 と Fig. 5.12 を比較すると、両被験者に共通して、移動速度が速い場合に腕の剛性 $K_h$ が小さくなると言える。また、5.2の実験結果において、ステアリング操作が比較的ゆっくりとした動きだったため、ステアリング角速度に比例する粘性トルクはあまり影響しなかったと考察したが、今回速い操作をしても装置の粘性 $C_p$ の大きさの影響はみられなかった。

最後に、目標角度の移動振幅の違いによる変化をみるために、Fig. 5.4とFig. 5.6、Fig. 5.9とFig. 5.11を比較すると、実験2において移動振幅が小さい場合に、腕の剛性 $K_h$ が大きくなることがわかる。実験1ではあまり変化がみられないことから、装置の摩擦トルクの影響があるのではないかとと思われる。

この実験を通して改めて被験者によって、インピーダンスの値や傾向に違いがあることが確認できた。被験者1は装置の剛性 $K_p$ が大きくなると、腕の剛性 $K_h$ も大きくなる。しかし、被験者2は装置の剛性 $K_p$ が大きくなっても、腕の剛性 $K_h$ はほとんど変化しない。この原因は、ハンドル操作の仕方の違いがあり、ハンドル操作時に使う筋肉に違いがあるのではないかとと思われる。実際に、被験者1は主に腕の力のみで動かしている感覚で、被験者2は体全体を使って動かしている感覚を持っている。

この操作方法の違いのためにインピーダンスが上手く測定できていないことも考えられる。被験者1の方が被験者2よりも基本的に実験時のインピーダンスが大きくなっているが、これは腕のインピーダンスの測定が手の握りの強さに関係していることが考えられるため、次章で手のひらのインピーダンスの測定を試みることにする。

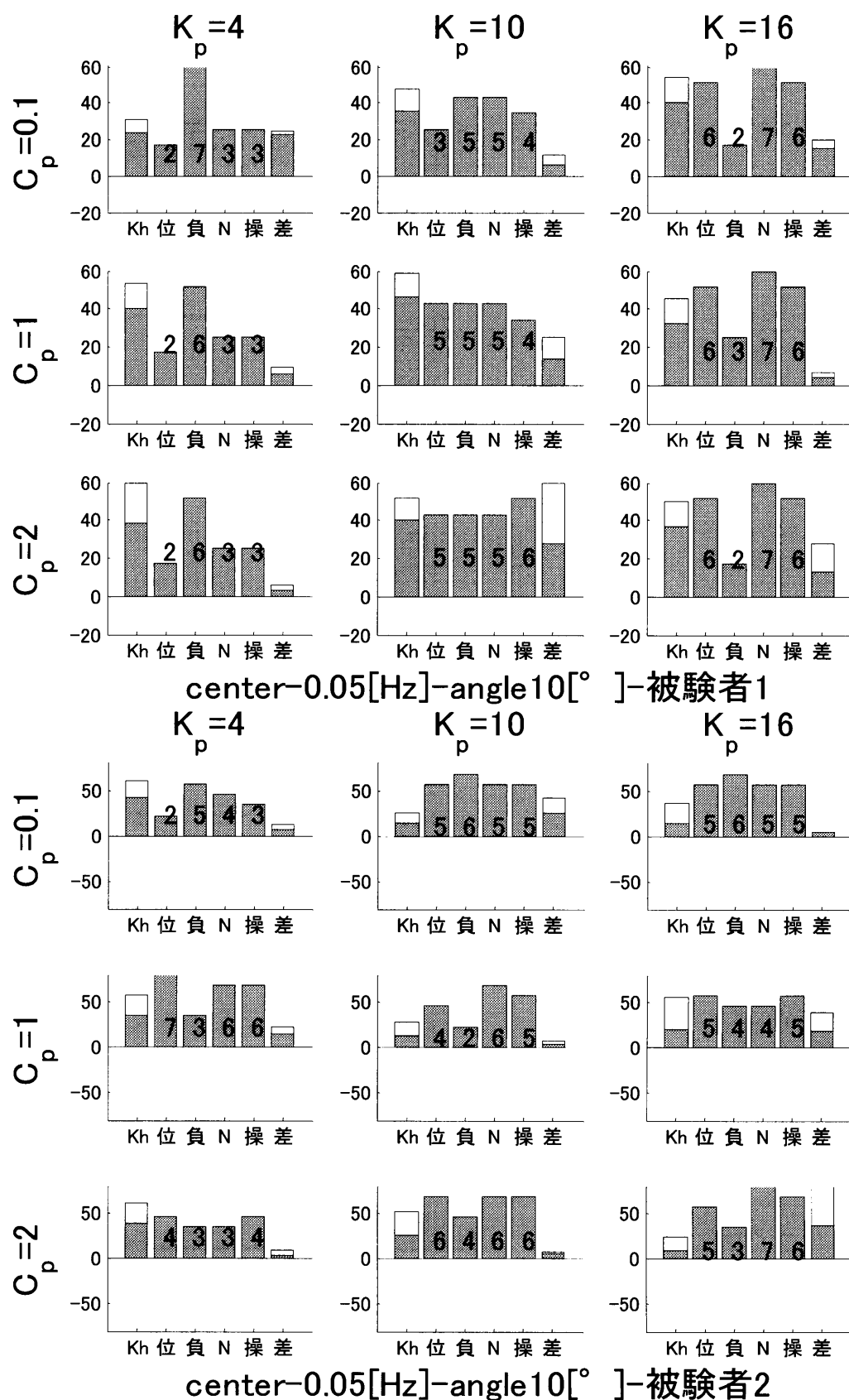


Fig. 5.4 Experimental result 1-A

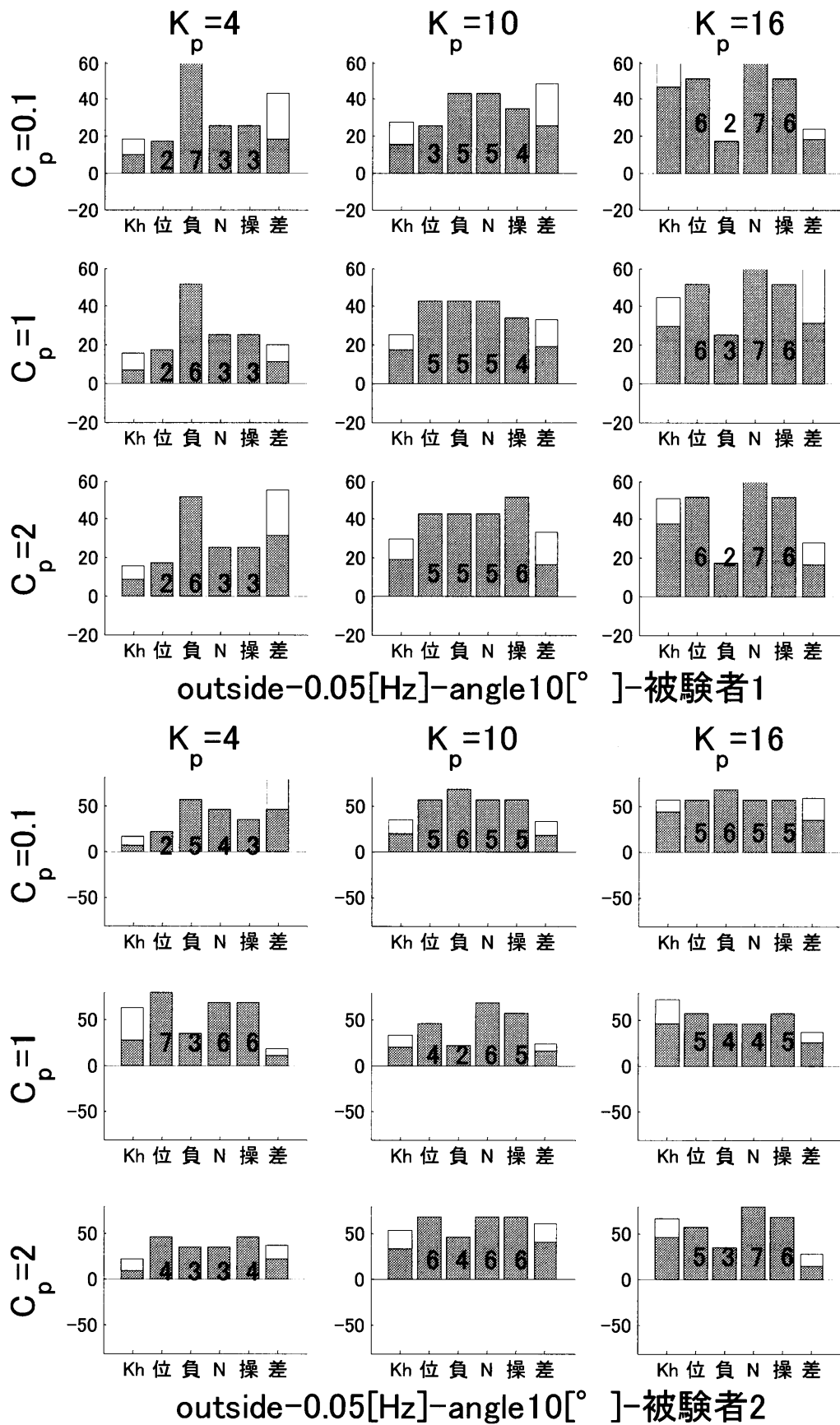


Fig. 5.5 Experimental result 1-B

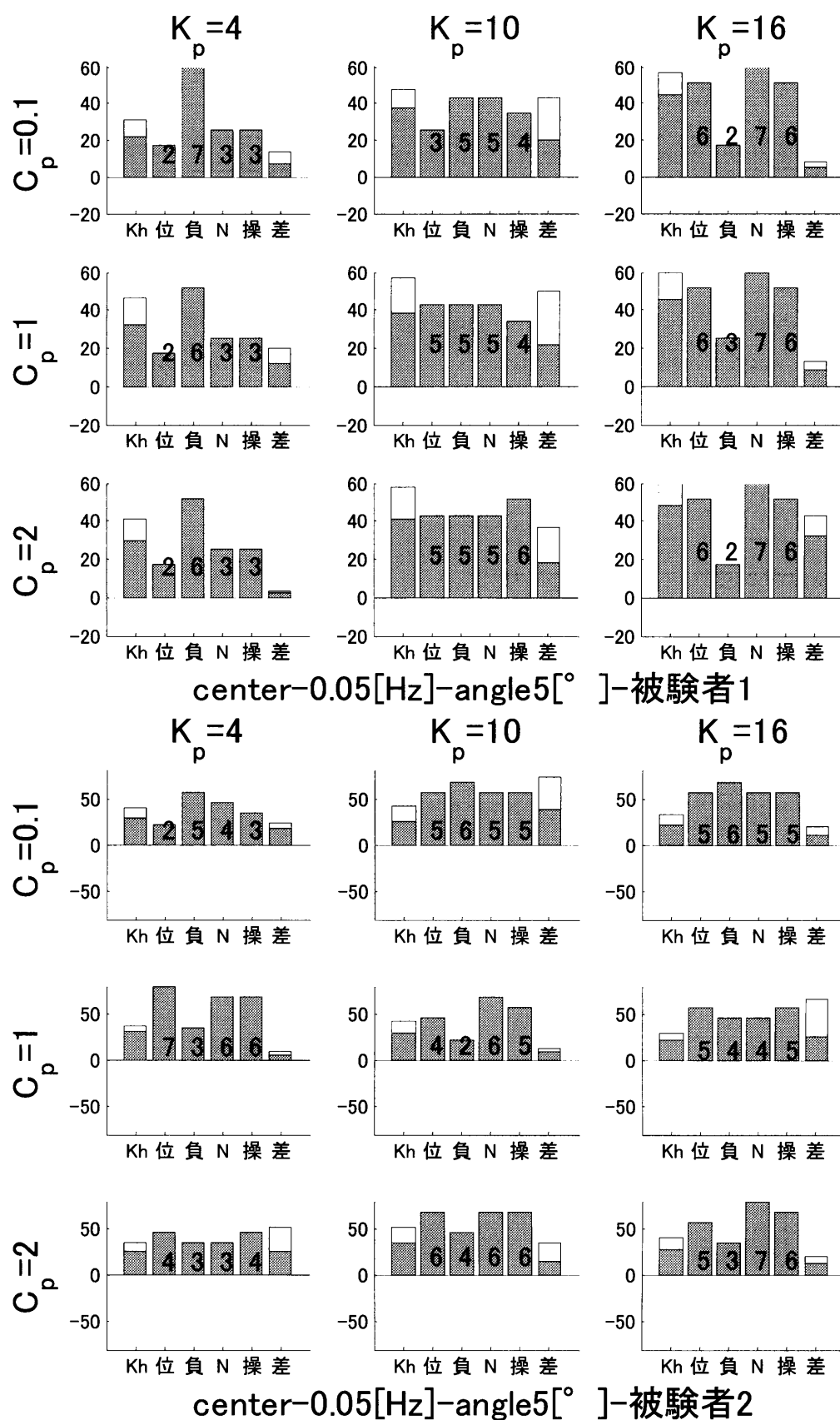


Fig. 5.6 Experimental result 1-C



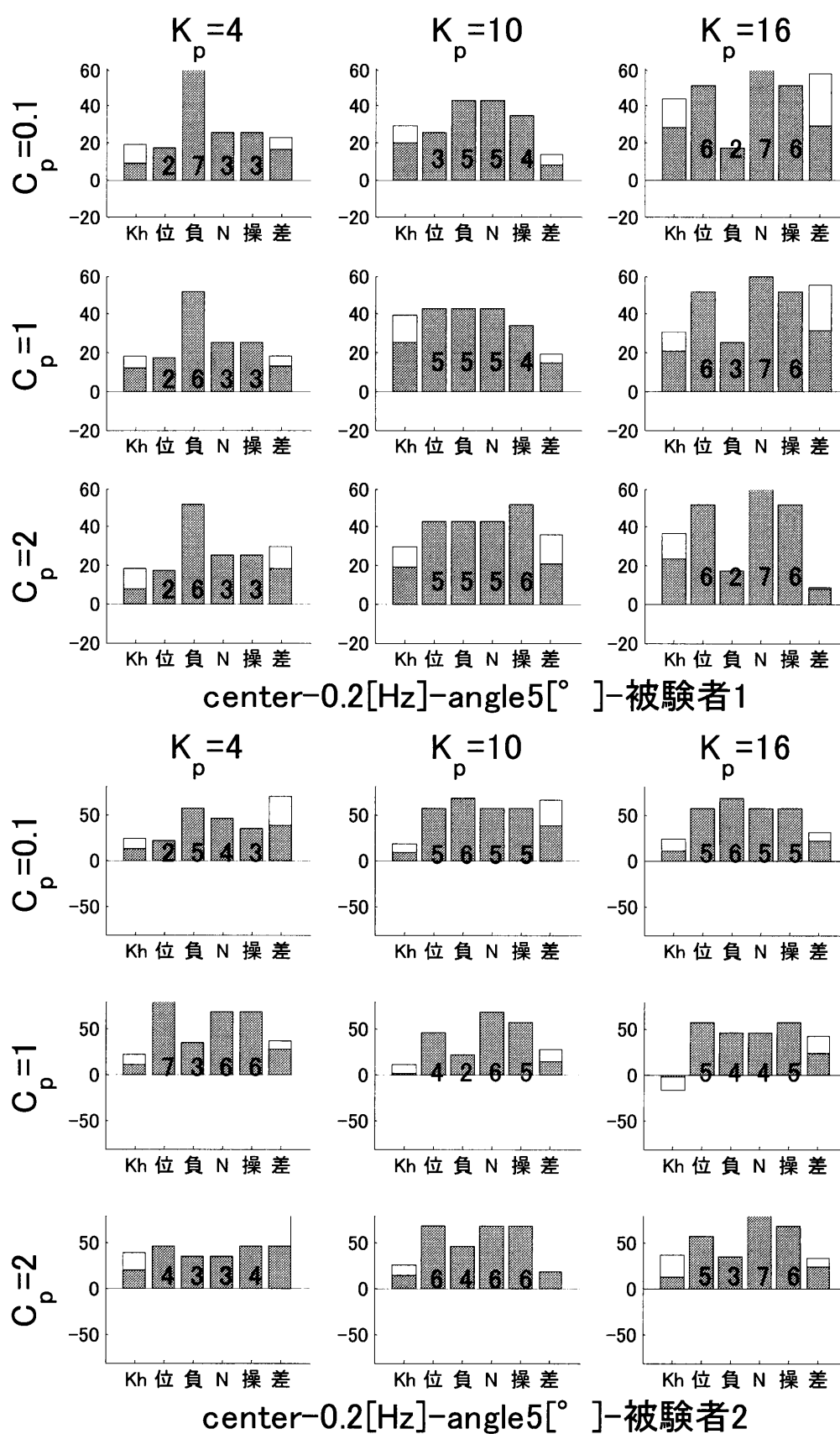


Fig. 5.7 Experimental result 1-D

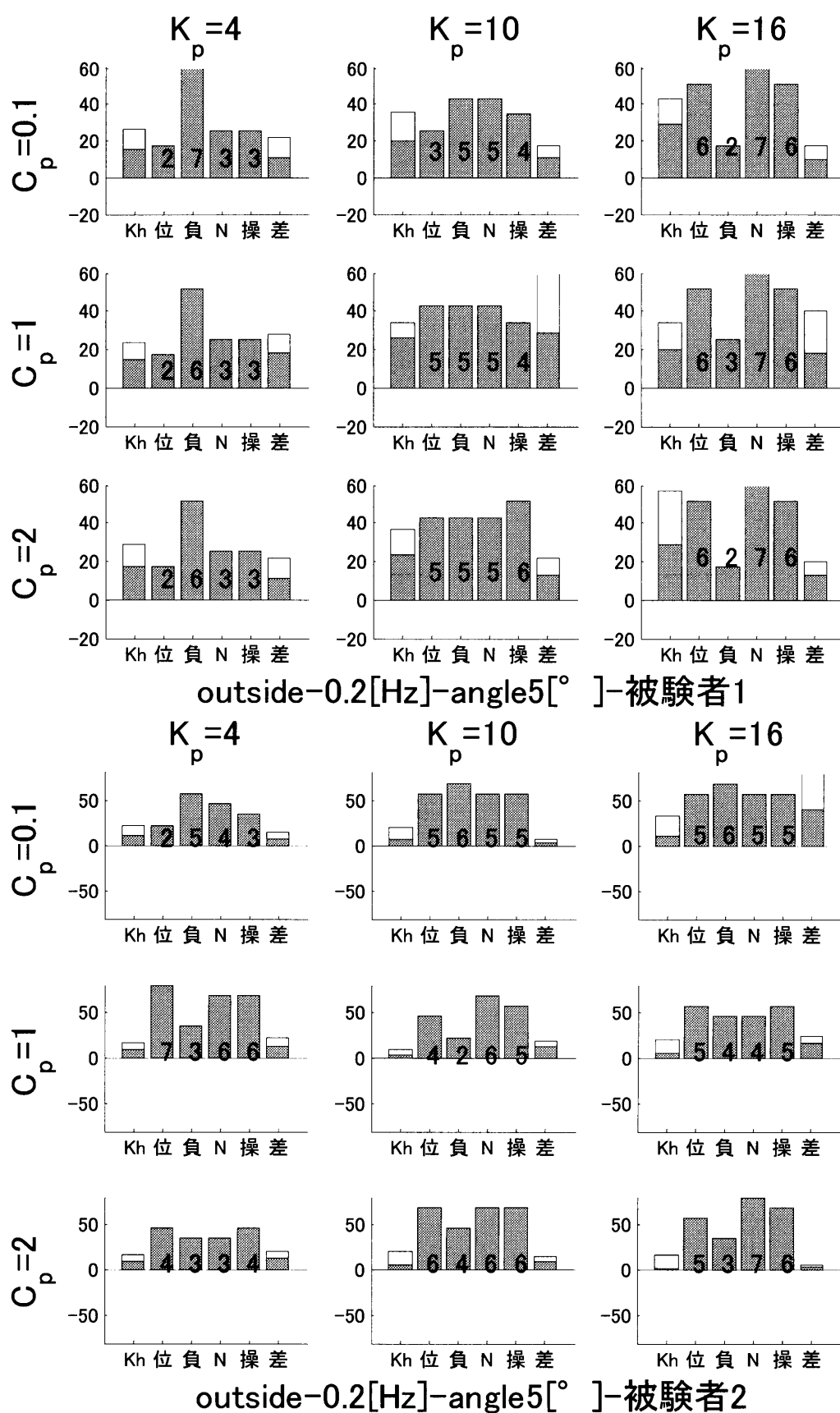


Fig. 5.8 Experimental result 1-E

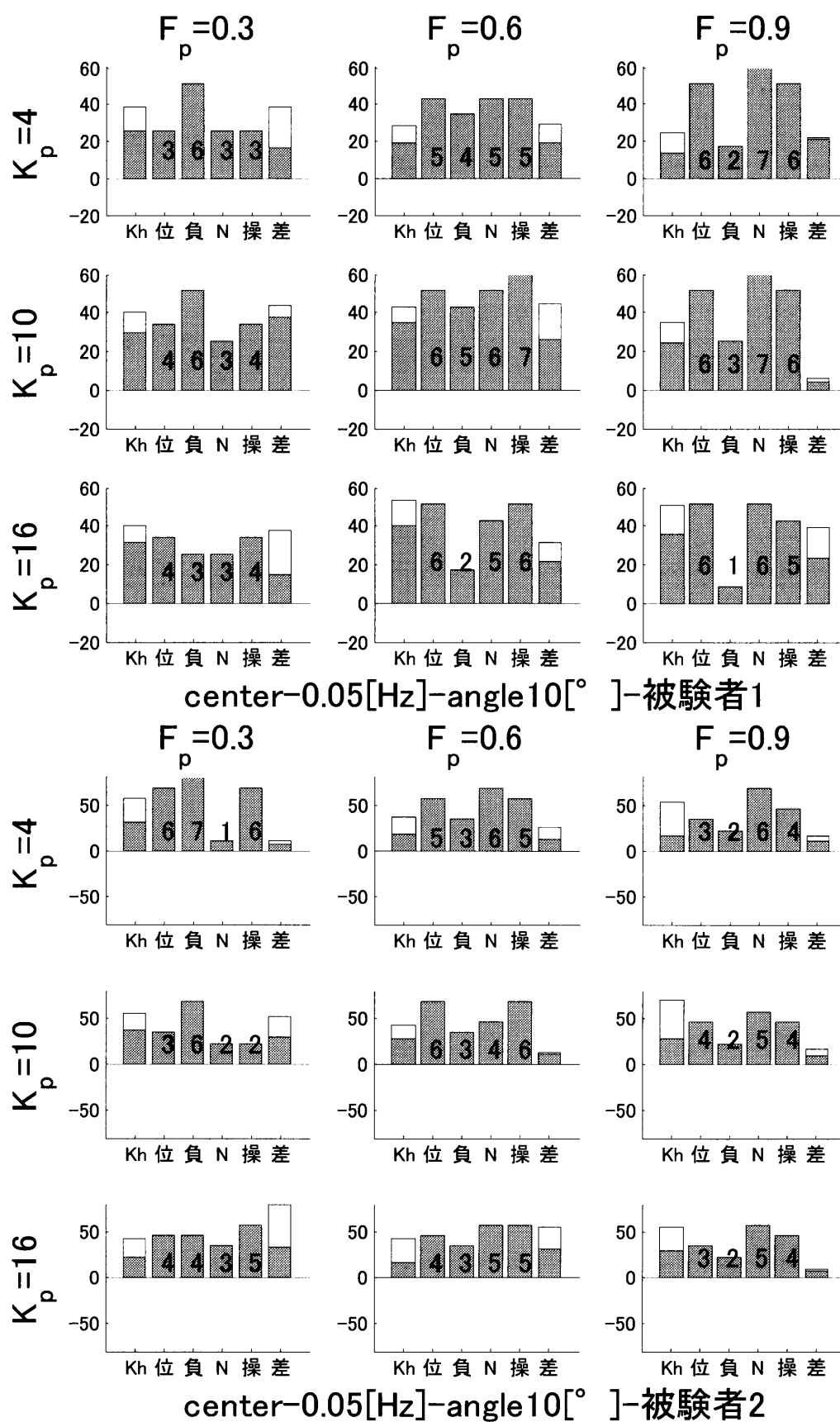


Fig. 5.9 Experimental result 2-A

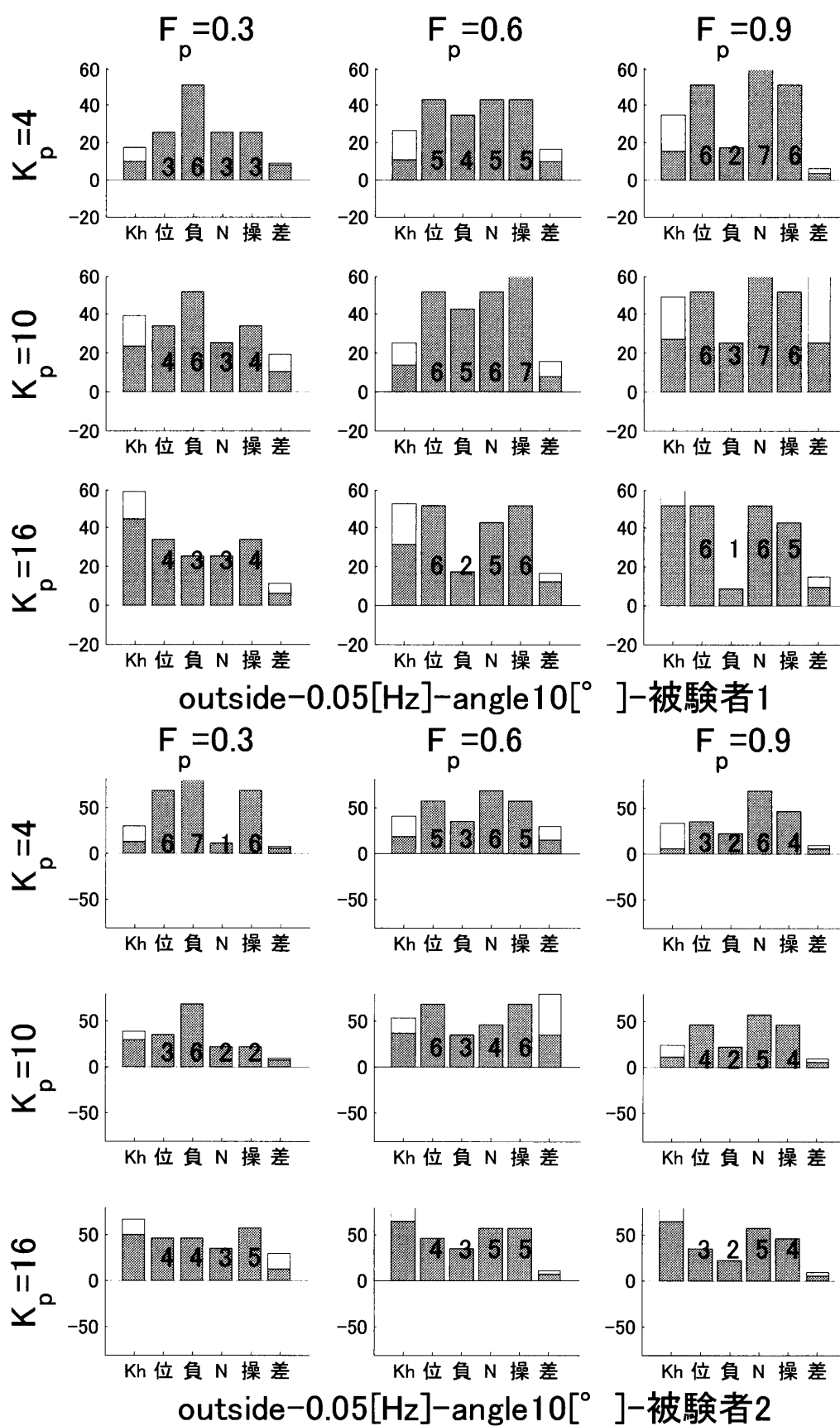


Fig. 5.10 Experimental result 2-B

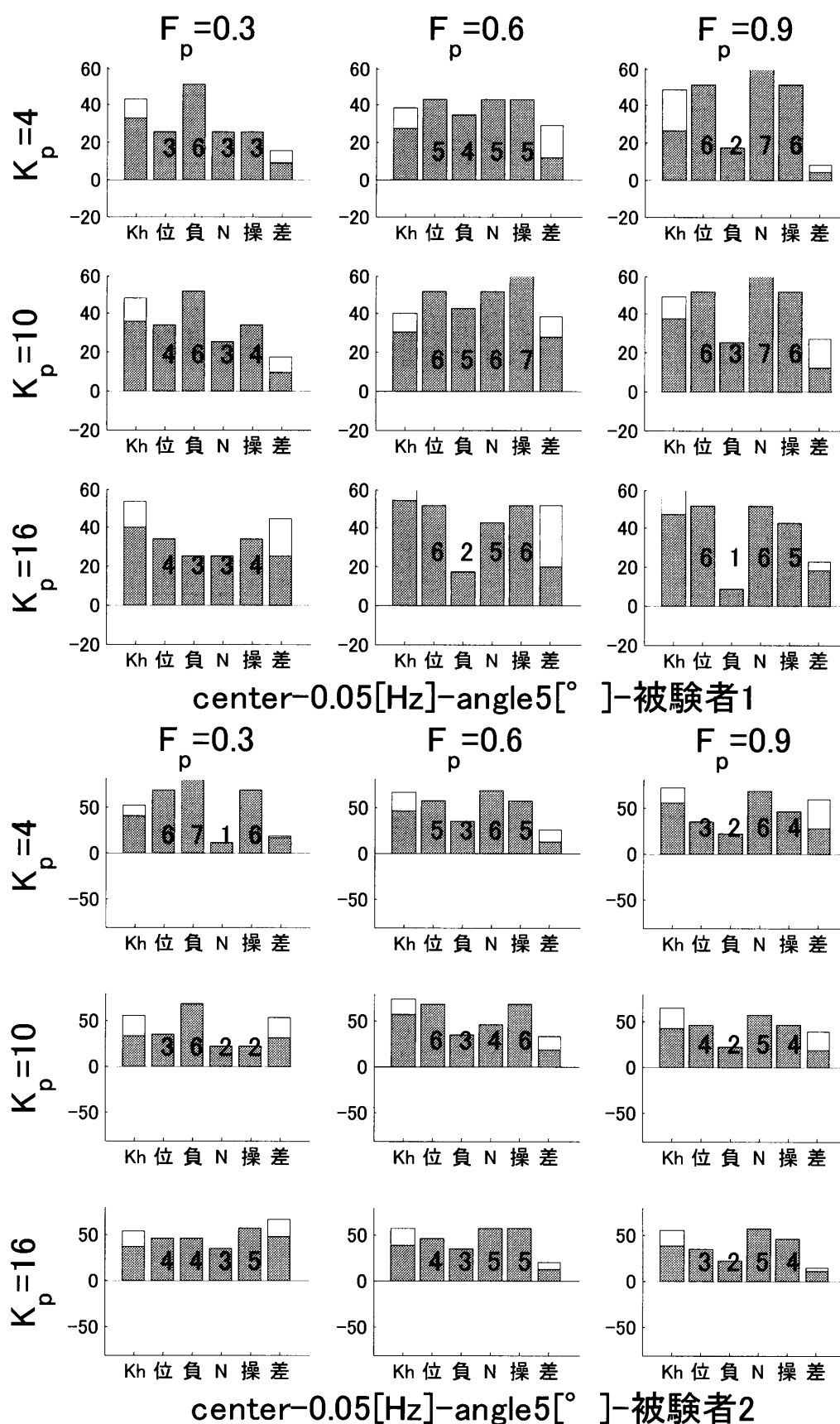


Fig. 5.11 Experimental result 2-C

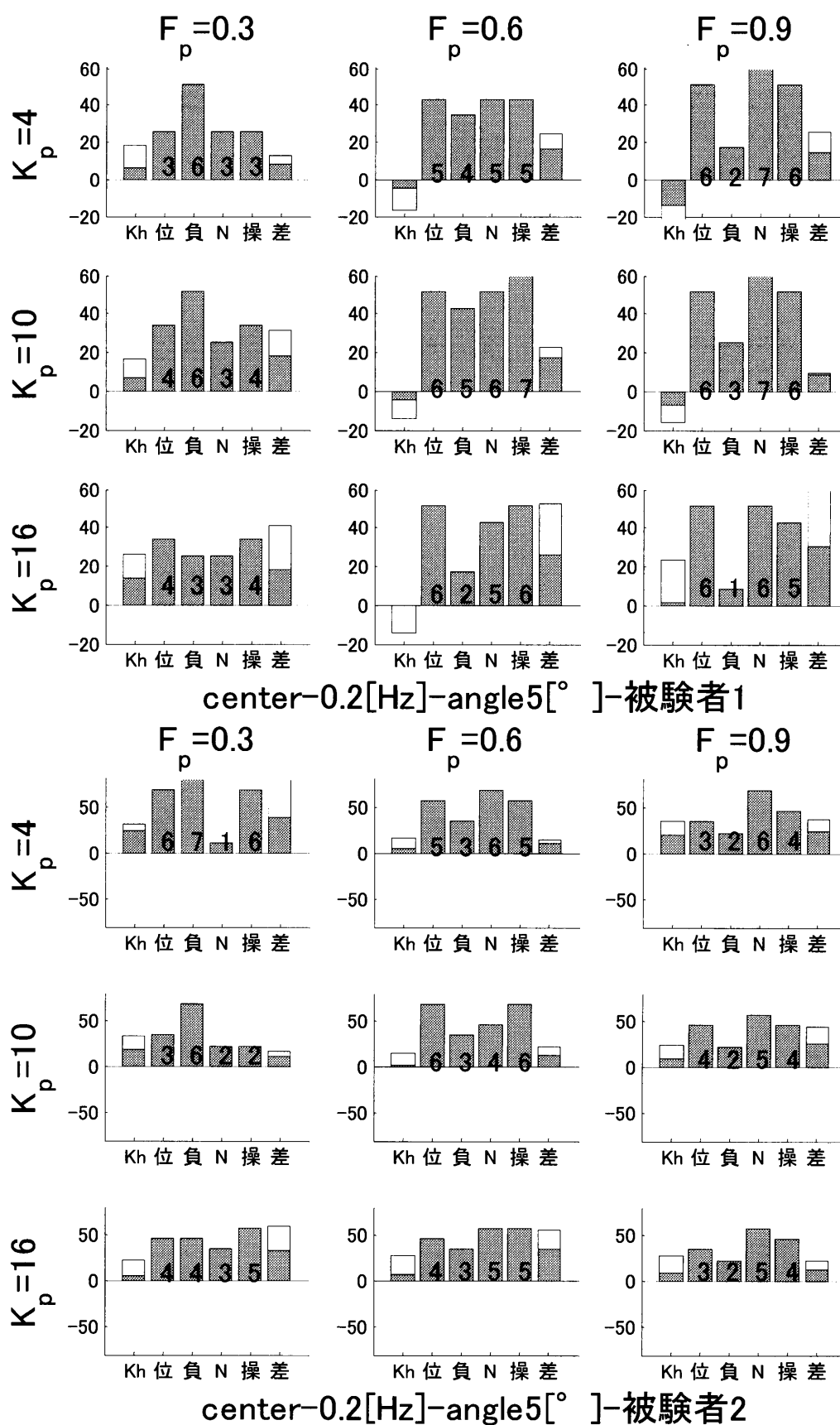


Fig. 5.12 Experimental result 2-D

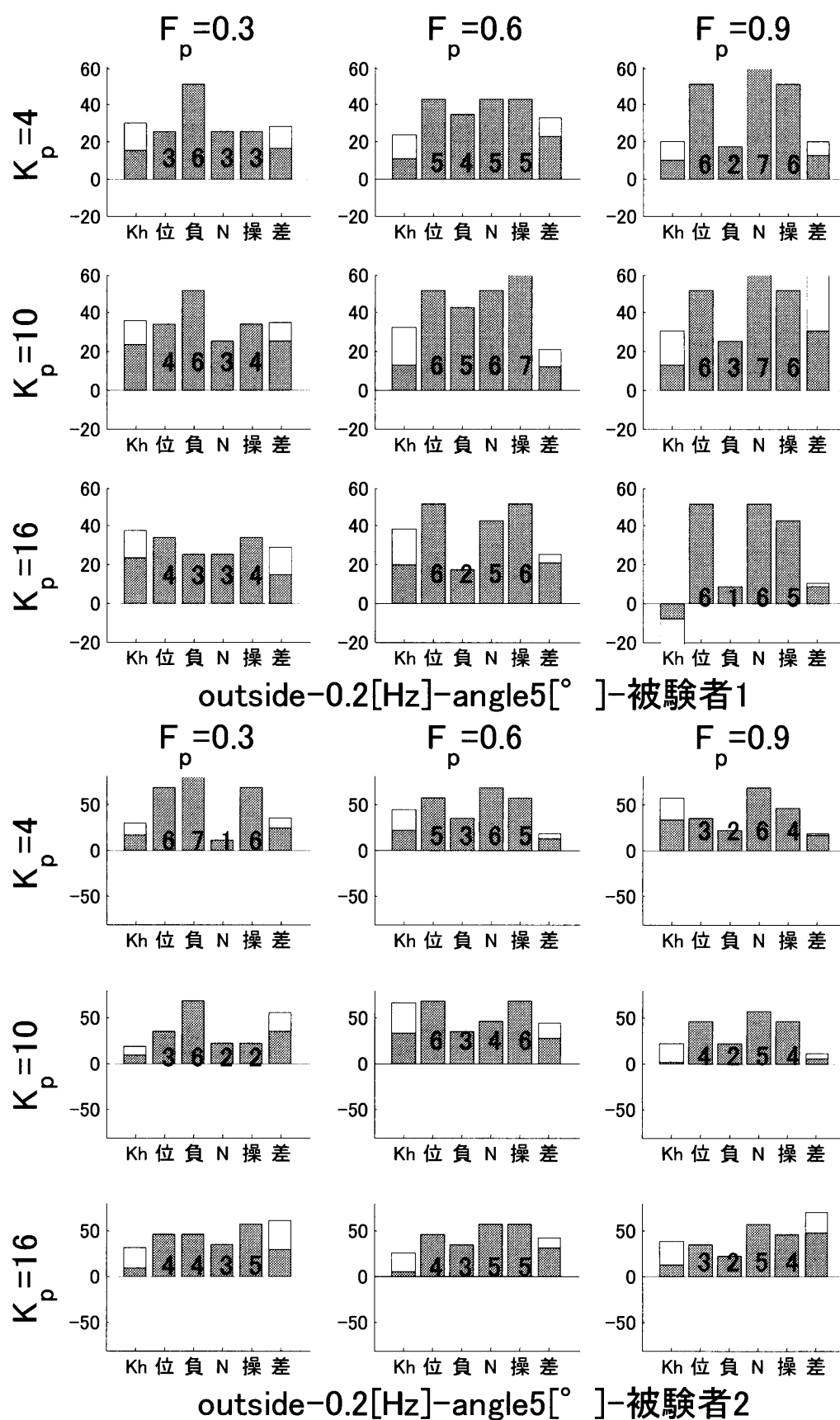


Fig. 5.13 Experimental result 2-E

## 5.5 手のひらのインピーダンスの測定

### 5.5.1 実験方法

ハンドルに被験者の手を固定した状態と固定しない状態で、インピーダンスの測定を行なう。手の固定にはベルトを使用し、ハンドルと手の間に隙間ができないように注意し、がっちりと固定することで意図的に強くハンドルを握る状態を作る。このように固定し、ハンドルは握っているが腕はリラックスしている弛緩状態と腕にできる限り力を入れた緊張状態でそれぞれ 10 回ずつ測定する。同様に、手を固定していない状態でも、それぞれ 10 回ずつ測定する。測定方法は被験者にハンドルを動かすことなく固定してもらい、その状態で外乱トルクを入力し、そのときの腕の反応から測定する。

実験で使用する車両特性を Table. 5.6 に示す。

なお、被験者は 21 ～ 24 才の三重大学学生の男性 2 人である。

Table. 5.6 Set parameters of the steering

$C_{p1}$ [N•m/(rad/s)]	0
$C_{p2}/C_{p1}$	0
$K_{p1}$ [N•m/rad]	0
$K_{p2}/K_{p1}$	0
$F_p$ [N•m]	0

### 5.5.2 実験結果

Fig. 5.14 に実験結果を示す。上のグラフが被験者 1、下のグラフが被験者 2 である。

グラフの左から順に  $I_h$ 、 $C_h$ 、 $K_h$  を表し、色の付いた棒グラフが緊張状態、色の付いていない棒グラフが弛緩状態である。上の段が固定した場合で、下の段が固定していない場合である。



これまでの結果から、緊張状態と弛緩状態で最も変化が表れる $K_h$ に特に注目してみ  
てみる。手のひらを固定することによって、固定しない場合に比べて、緊張状態と弛  
緩状態の腕のインピーダンスの変化が少なくなっていることがわかる。特に被験者1に  
ついては、弛緩状態においても、緊張状態と変わらない大きさのインピーダンスが測  
定されている。この結果から、現在の装置では、腕のインピーダンスの大きさは腕全  
体の緊張度はそれほど関係なく、ハンドルと手のひらの握りの部分によるものが大き  
いといえることができる。よって、腕の力でハンドル操作する人であれば、この装置で  
も問題はないが、体全体で操作する人のインピーダンスの大きさを正確に測定するこ  
とは困難である。

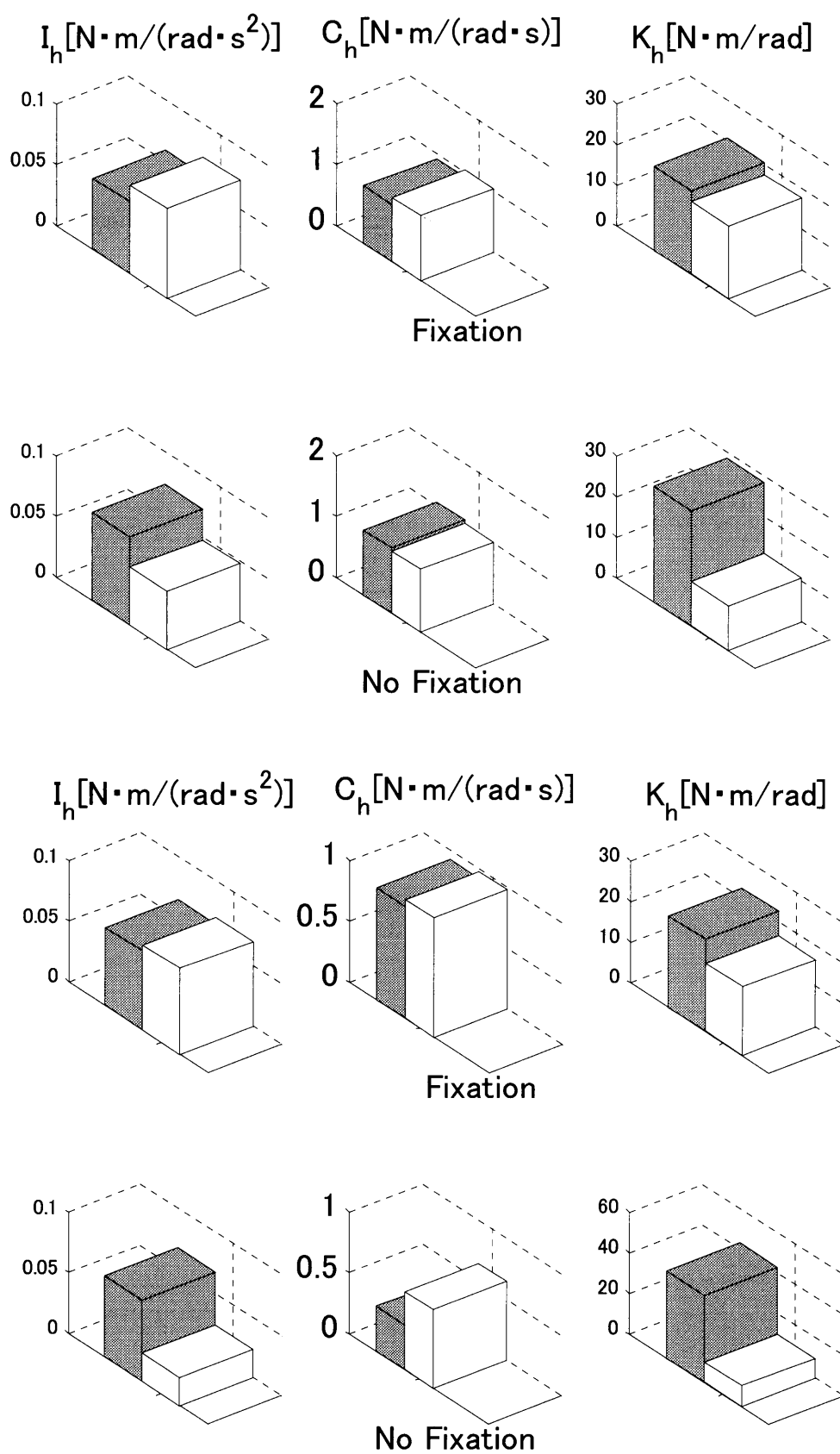


Fig. 5.14 Experimental result

# 第6章

## 筋電の測定

第5章より、被験者によってハンドル操作時に力を入れる筋肉に違いがあることが考えられるため、筋電を用いてハンドル操作時の筋肉の力の使い方を調べる。

### 6.1 測定方法

筋電の測定は、デジタル生体アンプシステムとデータ収録ソフトウェアを使用し、測定する。デジタル生体アンプシステムは生体電気信号（筋電）をパーソナルコンピュータとデータ収録ソフトウェアを使用して、計測及び収録するソフトである。詳しい方法としては、筋電測定用の電極を筋肉に貼り付け、その信号をデジタル生体アンプシステムのヘッドボックス内で増幅し、250[Hz] のアンチエリアシングフィルタを通した後A/D変換処理を行い、電氣的に絶縁された状態でプロセッサボックスへ転送する。

また、このシステムは柔軟なフィルタ設定が可能であり、高域通過、低域通過、ハム除去フィルタを組み合わせ設定できる。今回の実験では、体動などによるノイズの除去の為に 10[Hz] の高域通過フィルタ、商用電源の周波数成分の除去の為に 60[Hz] のハム除去フィルタを使用した。

### 6.2 実験方法

ステアリング装置を使い、目標角度にハンドル角を合わせる操作を行なう。ステアリング操作中の筋肉に筋電測定用の電極を貼り付け、ハンドル操作時の筋電について調べる。目標角度は時速 100[km/h] のレーンチェンジを想定し、周波数を 0.05[Hz]、移動振幅を 10[°] と設定する。装置の特性は被験者の最も操作しやすい設定と最も操作しにくい設定を用いた。それぞれの設定値を Table. 6.1 に示す。

筋電の測定箇所は前腕、上腕二頭筋、上腕三頭筋、三角筋、大胸筋、僧帽筋、広背筋の7箇所にし、いずれにおいても体の右側のみで計測した。また、電極を接続するコネクタのアース(グラウンド)は、心電や筋電の影響の少ない耳たぶを使用した。

被験者は21～24才の三重大学学生の男性2人とテストドライバーの男性1人の計3人である。

Table. 6.1 Set parameters of the steering

	subject 1		subject 2 and 3	
	good	bad	good	bad
$I_p$ [N・m/(rad/s <sup>2</sup> )]	0.256	0.256	0.256	0.256
$C_{p1}$ [N・m/(rad/s)]	1	1	1	1
$C_{p2}/C_{p1}$	1	1	1	1
$K_{p1}$ [N・m/rad]	10	4	4	4
$K_{p2}/K_{p1}$	0.7	0.7	0.7	0.7
$F_p$ [N・m]	0.6	0.3	0.9	0.3

### 6.2.1 実験結果

Fig. 6.1～Fig. 6.6に実験結果を示す。一番上の図がハンドル角度でその下にそのときのそれぞれの部分の筋電の絶対値を表示してある。グラフから、全ての被験者において大胸筋・僧帽筋・広背筋は筋電とともに心電を拾ってしまっており、上手く測定できていないと思われる。Fig. 6.7～Fig. 6.16に筋電の絶対値に一次遅れ系を通し、平滑化処理をしたグラフを示す。ノイズがひどいため、大胸筋・僧帽筋・広背筋はグラフから除いてある。このグラフの方がわかりやすく思われるので、今後表示にはこのグラフを用いる。グラフから、実験時に最も変化が大きく出るのは三角筋であることがみてとれる。一定の周期で筋電の値が変化しているのは、ハンドルを左にきって右肩が上がる際に筋電が大きくなり、ハンドルを右にきって右肩が下がる際に筋電が小さくなるためである。また、三角筋は操作しやすい特性の時の方が操作しにくい特性の時よりも力の強弱の差がはっきりしているように思われる。

被験者によって使う筋肉にもっとはっきりとした違いが出ることを期待していたが、特に大きな違いはみられなかった。

ただし、被験者2の上腕二頭筋と三頭筋は一定の変化がみられるが、被験者1はどのような変化はみられなかったので、今後さらに詳しく調べてみる必要があるように思われる。テストドライバー(subject 3)は、操作のしやすさにほとんど関係なく、筋電の変化がとても小さかった。

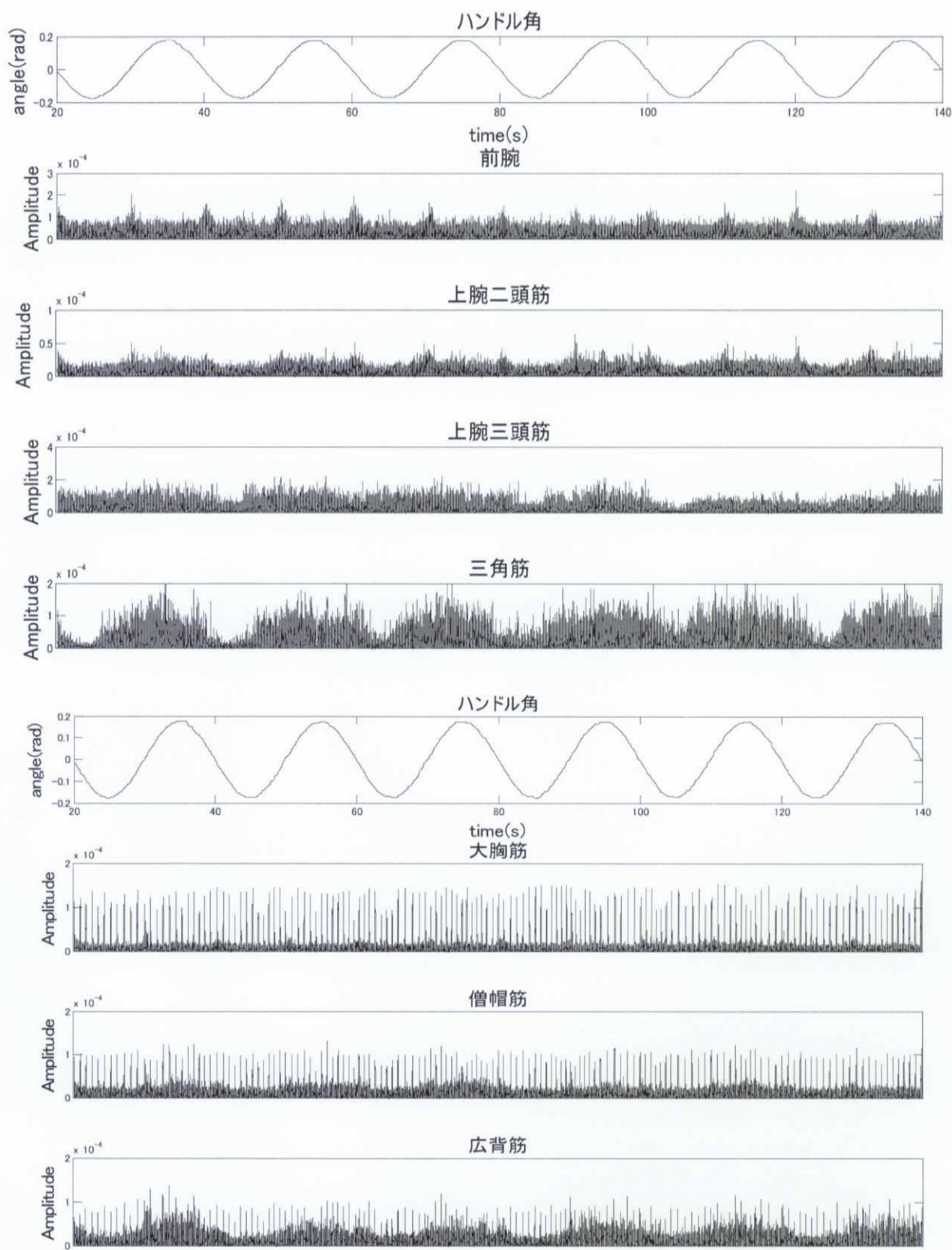


Fig. 6.1 Experimental result ( subject 1 - good )

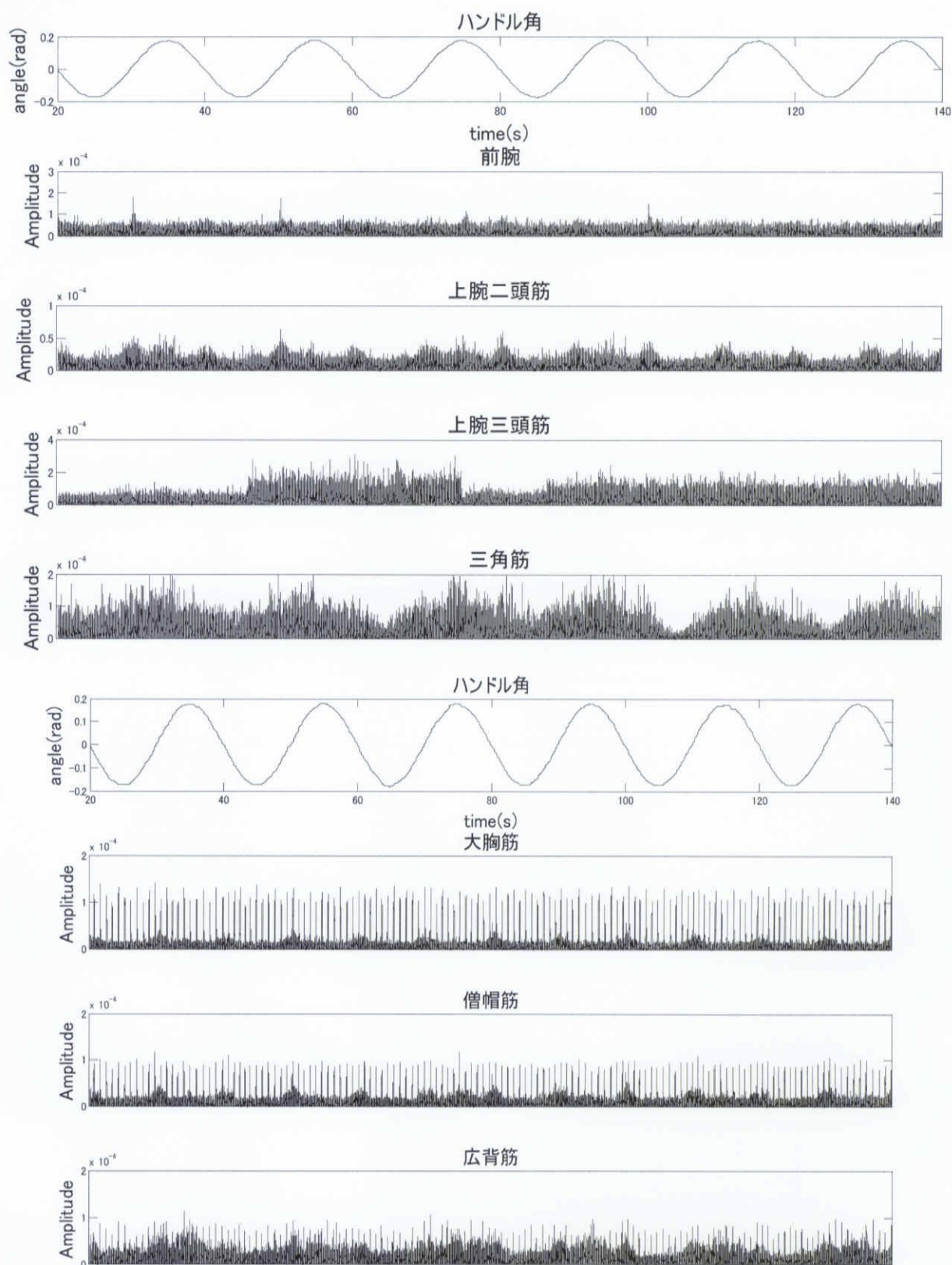


Fig. 6.2 Experimental result ( subject 1 - bad )



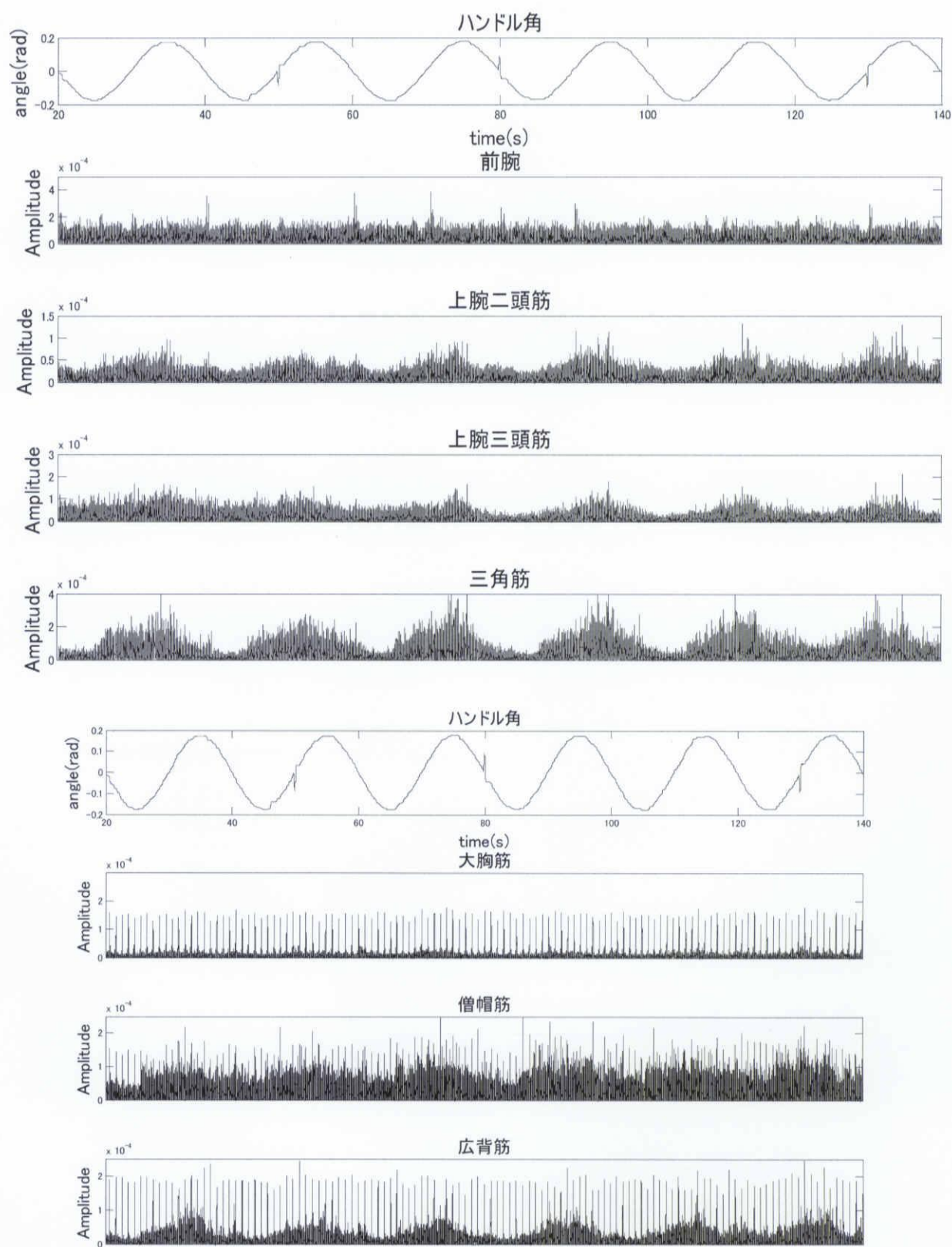


Fig. 6.3 Experimental result ( subject 2 - good )



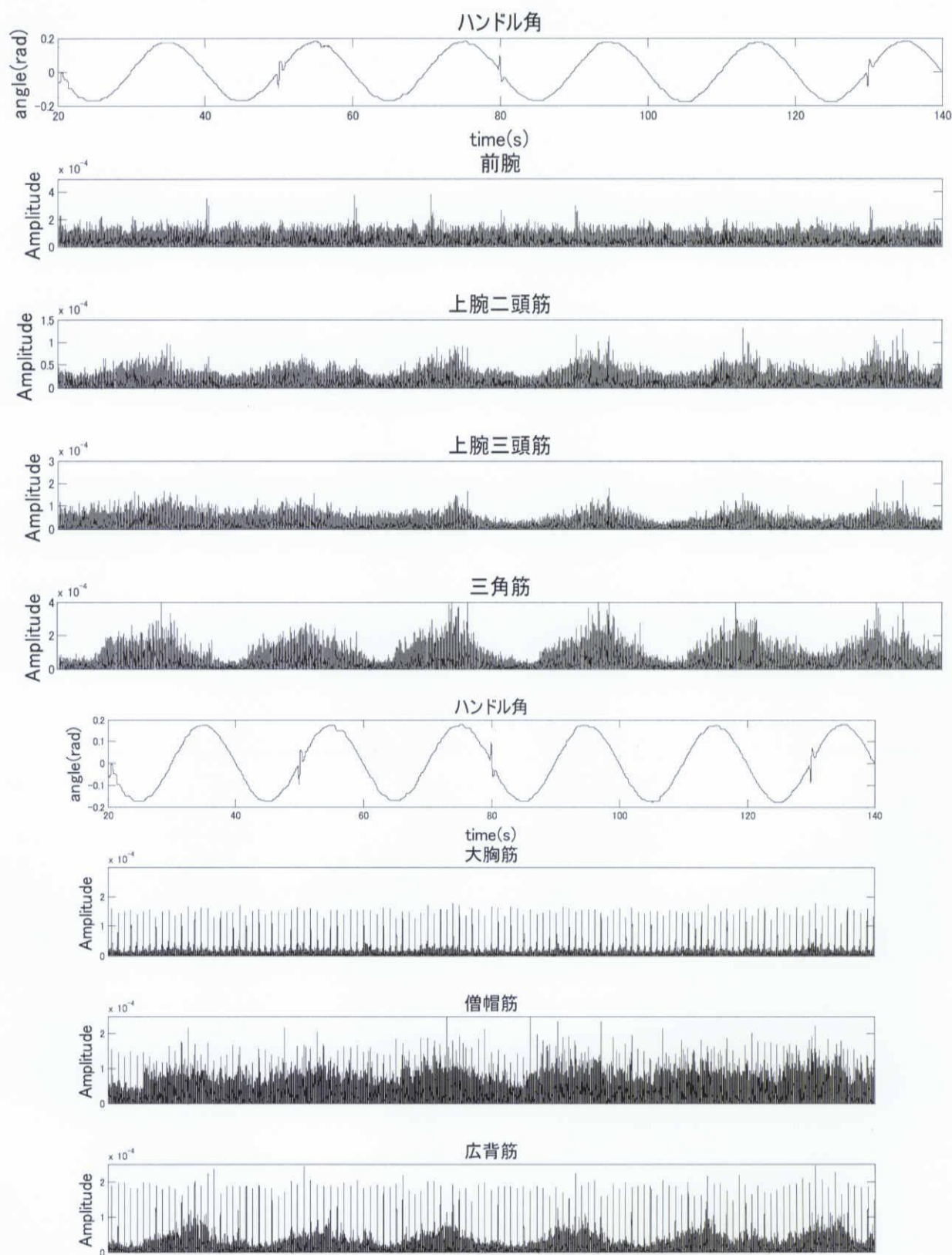


Fig. 6.4 Experimental result ( subject 2 - bad )

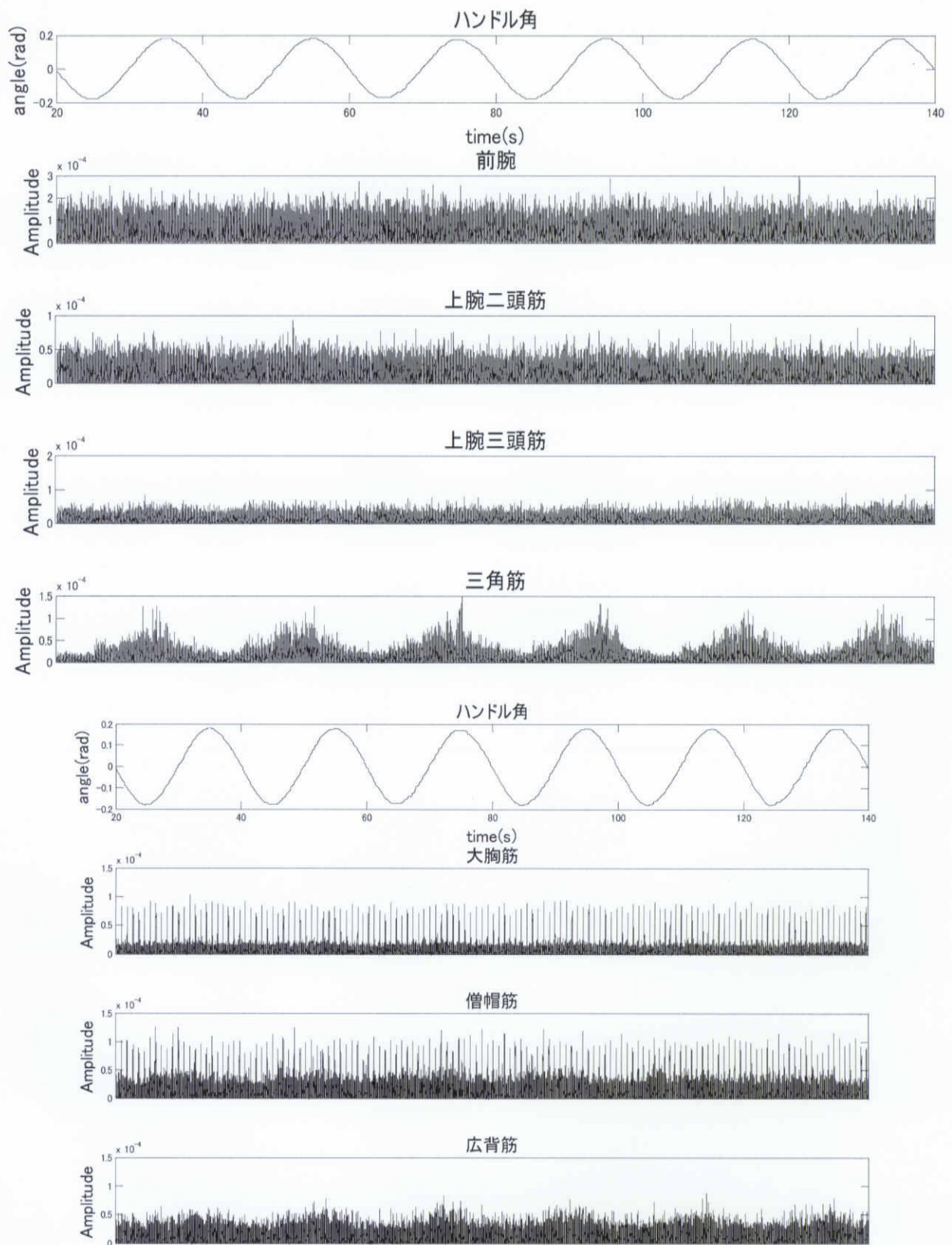


Fig. 6.5 Experimental result ( subject 3 - good )

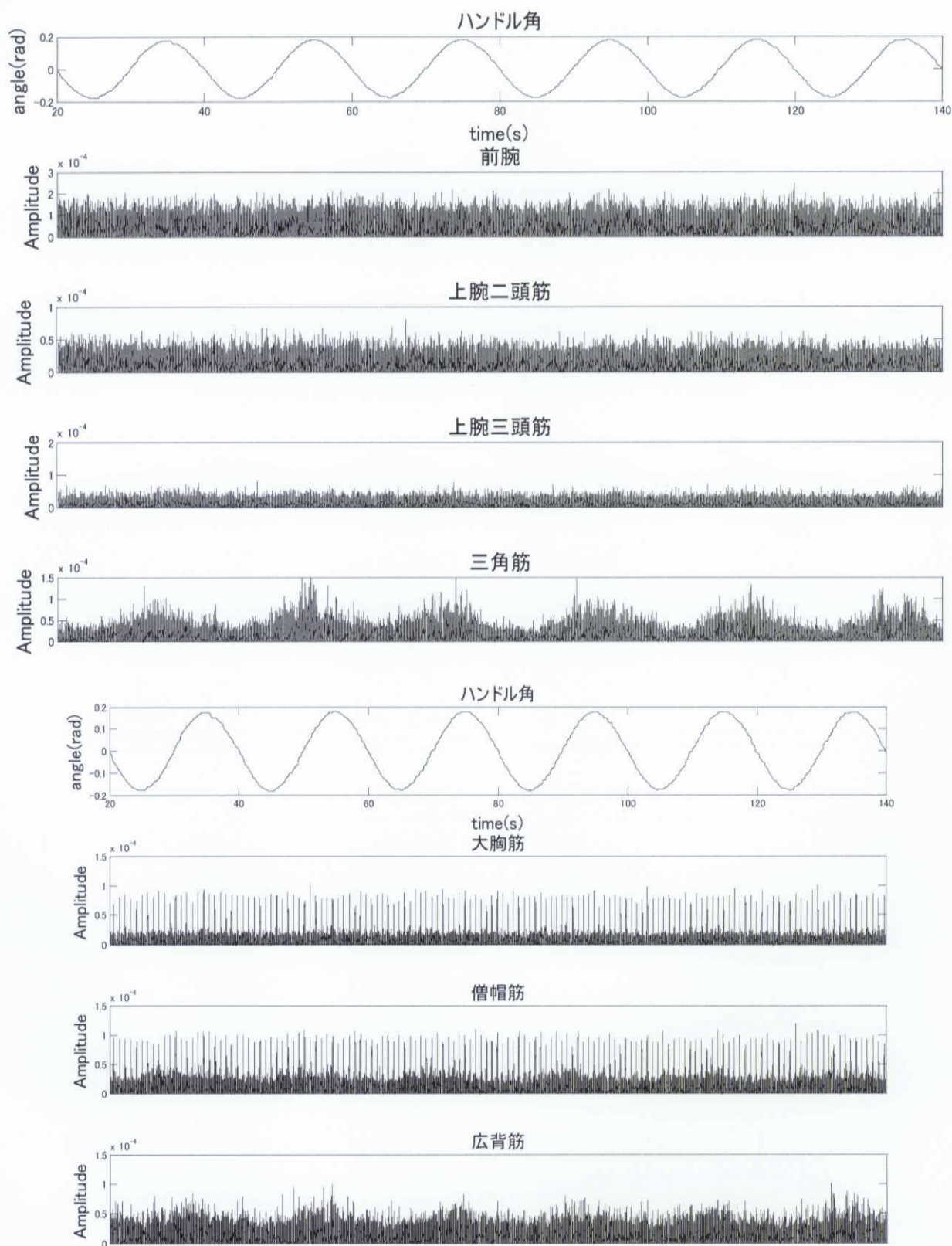


Fig. 6.6 Experimental result ( subject 3 - bad )

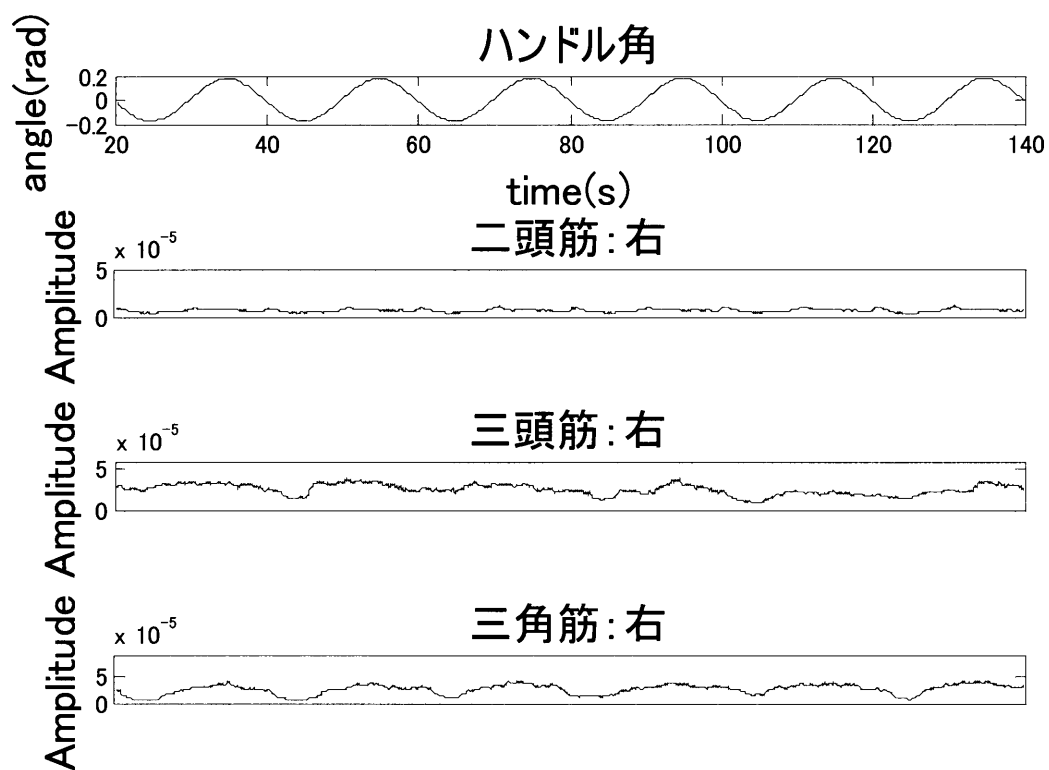


Fig. 6.7 Experimental result ( subject 1 - good )

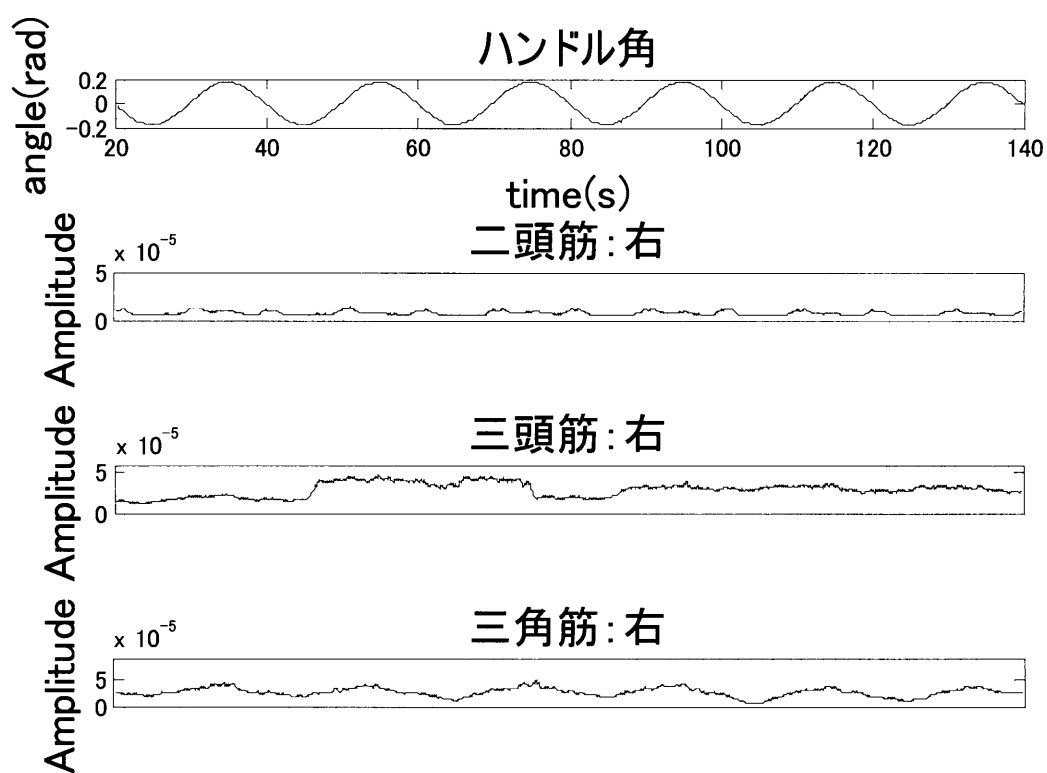


Fig. 6.8 Experimental result ( subject 1 - bad )

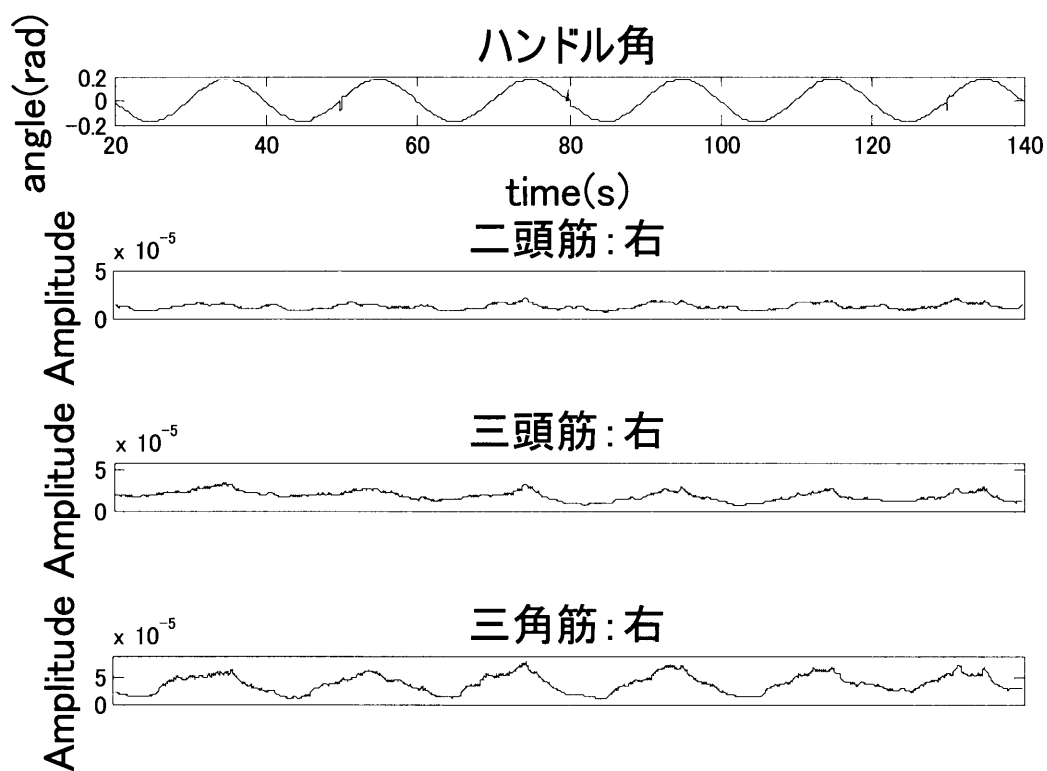


Fig. 6.10 Experimental result ( subject 2 - good )

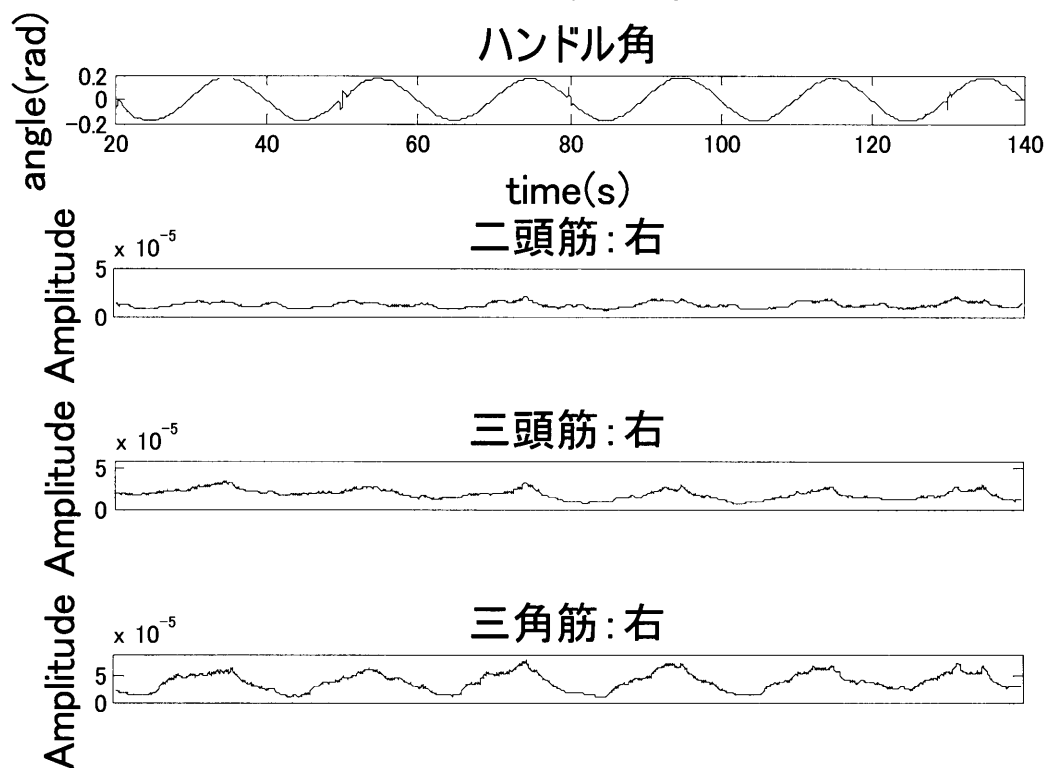


Fig. 6.12 Experimental result ( subject 2 - bad )

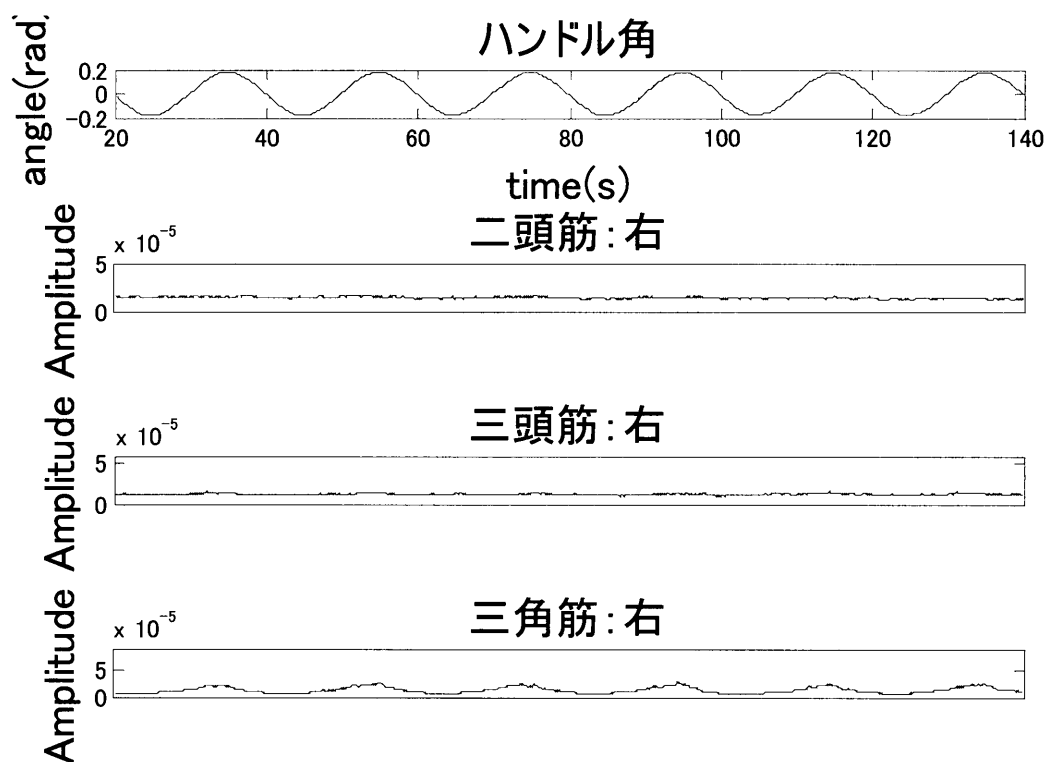


Fig. 6.14 Experimental result ( subject 3 - good )

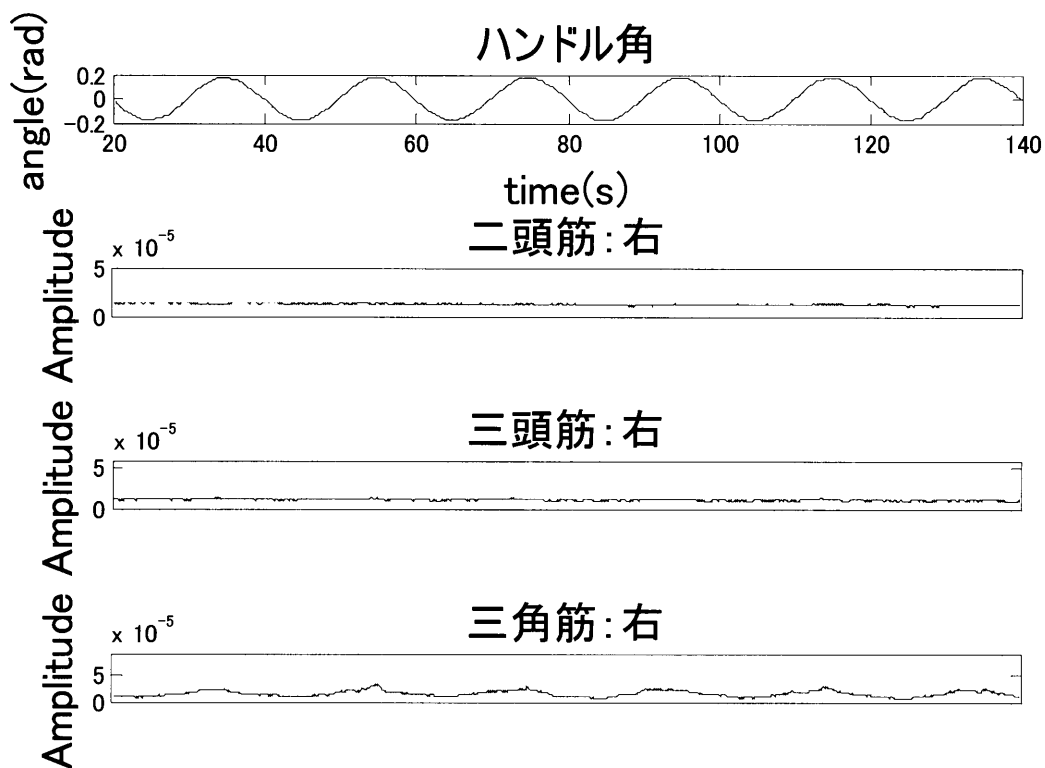


Fig. 6.16 Experimental result ( subject 3 - bad )



### 6.3 手首を固定した状態での測定

ベルトを用いて手首をハンドルに固定した状態で、同様の実験を行なった。ただし、前腕・大胸筋・僧帽筋・広背筋はうまく求められないため計測を行わず、被験者1と被験者2の違いが考えられる上腕二頭筋と上腕三頭筋、そして変化の大きい三角筋を左右両側計6箇所を測定した。アースには前回同様耳たぶを使用した。被験者は21～24才の三重大学学生の男性2人である。測定の際に設定した装置の特性をTable. 6.2に示す。

Table. 6.2 Set parameters of the steering

	subject 1		subject 2	
	good	bad	good	bad
$I_p$ [N・m/(rad/s <sup>2</sup> )]	0.256	0.256	0.256	0.256
$C_{p1}$ [N・m/(rad/s)]	1	1	1	1
$C_{p2}/C_{p1}$	1	1	1	1
$K_{p1}$ [N・m/rad]	10	4	4	4
$K_{p2}/K_{p1}$	0.7	0.7	0.7	0.7

#### 6.3.1 実験結果

Fig. 6.18～Fig. 6.21に実験結果を示す。前回は測定した筋電の絶対値を結果として表示したが、結果を見やすくするために絶対値に一次遅れ系を通し、平滑化処理を施したものを表示する。前回の実験結果と比較したいが、筋電は大きさに判断することはできない上に、電極の貼る位置のわずかな違いによっても変わってしまうので、比較できない。実験結果から上腕二頭筋・上腕三頭筋・三角筋全てが同じタイミングで値が変化している。現在のステアリング装置では上手く測定できないが、本来インピーダンスは二頭筋と三頭筋の和であるから、装置の特性が変化すれば値も変わってくることが考えられるが、今回装置の特性が操作しやすい設定と操作しにくい設定で実験したが上腕二頭筋・上腕三頭筋ともにそれほど変化はなかった。

被験者 1 と被験者 2 で比較すると、被験者 2 の方が上腕三頭筋の変化がはっきりしていたように思うが、これはやはりハンドル操作の仕方の違いによるものと思われる。6. 2 の実験で操作しやすいときの方が三角筋の強弱がはっきりしていると書いたが、それを確認するために図を示すこととする。Fig. 6.22 はハンドル 1 周期ごとに筋電の最大値・最小値を求め、それぞれの平均・標準偏差を示したものである。平均は I 型をしたグラフの縦線を中心点で、縦棒の長さで標準偏差を表している。図から、最大値は操作性が良い方が小さくなるとわかる。



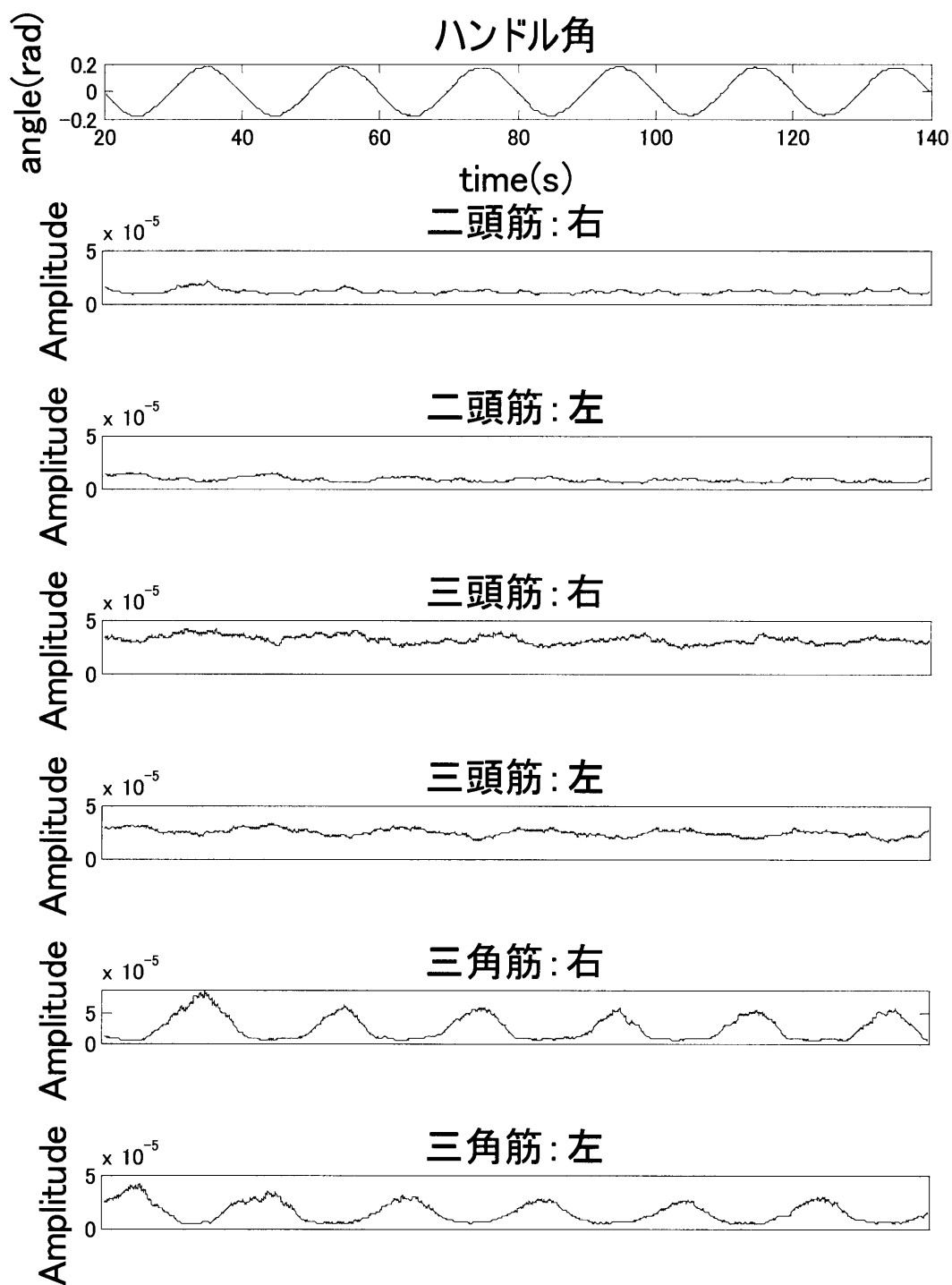


Fig. 6.18 Experimental result ( subject 1 - good )

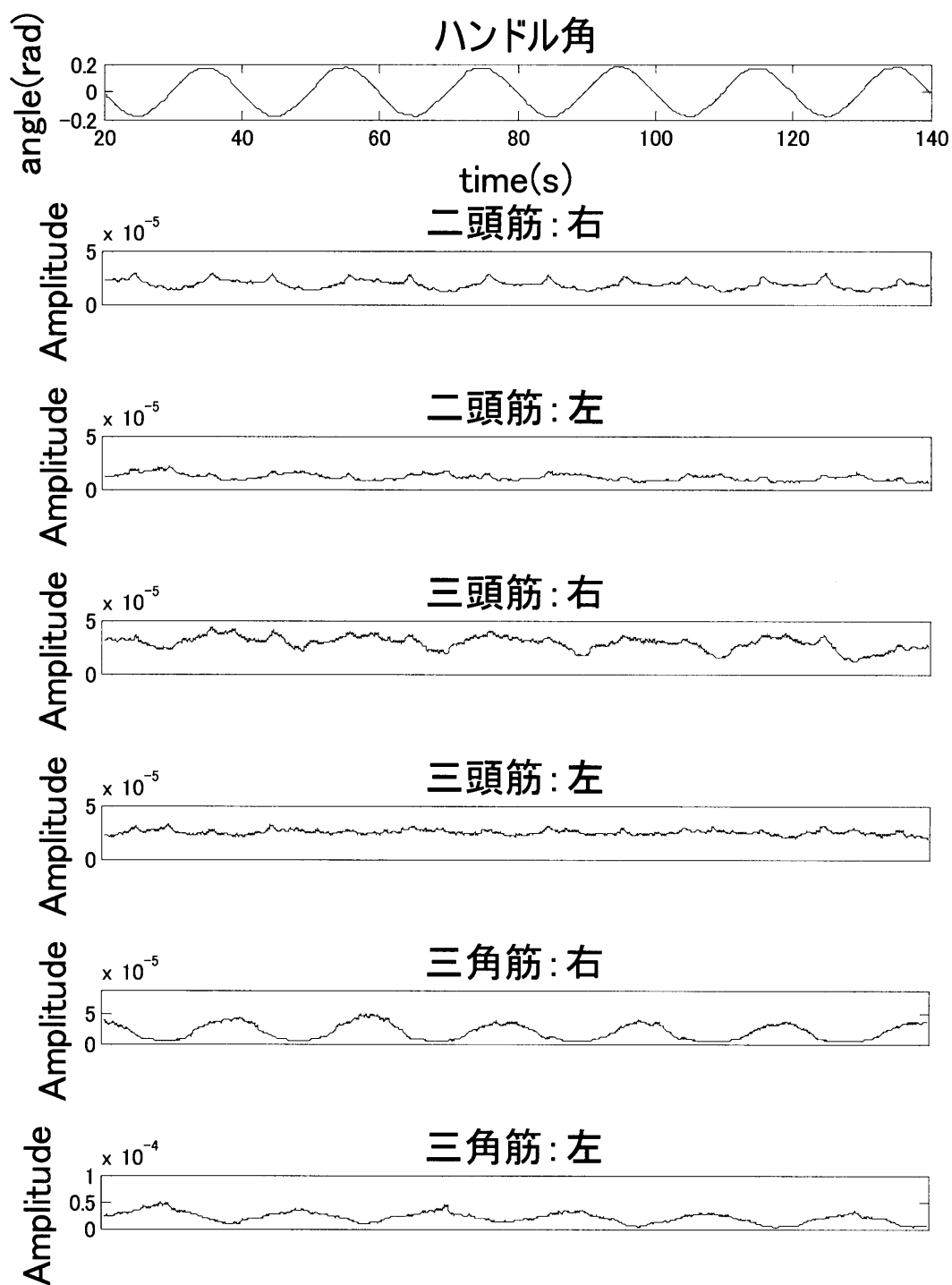


Fig. 6.19 Experimental result ( subject 1 - bad )

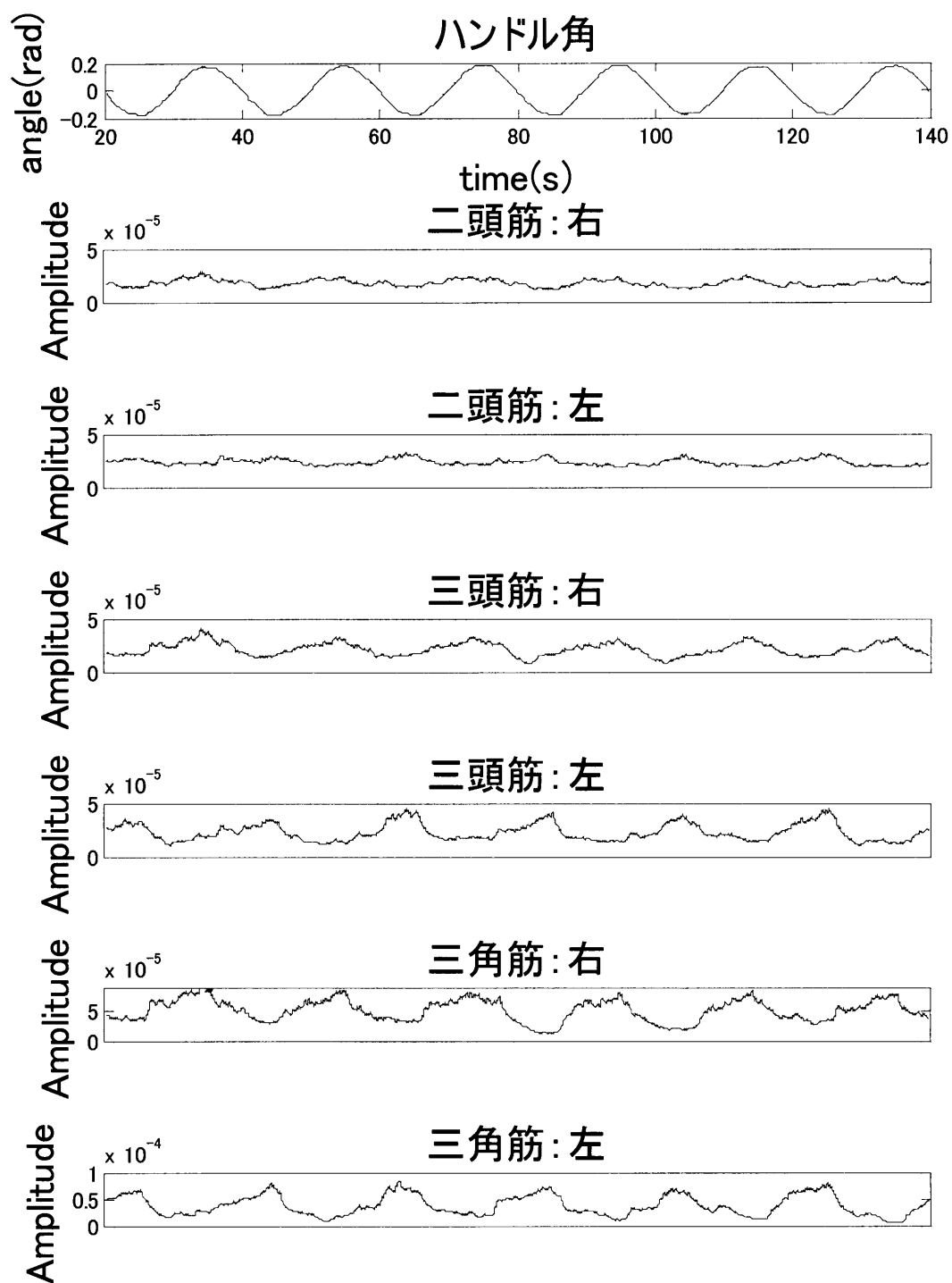


Fig. 6.20 Experimental result ( subject 2 - good )

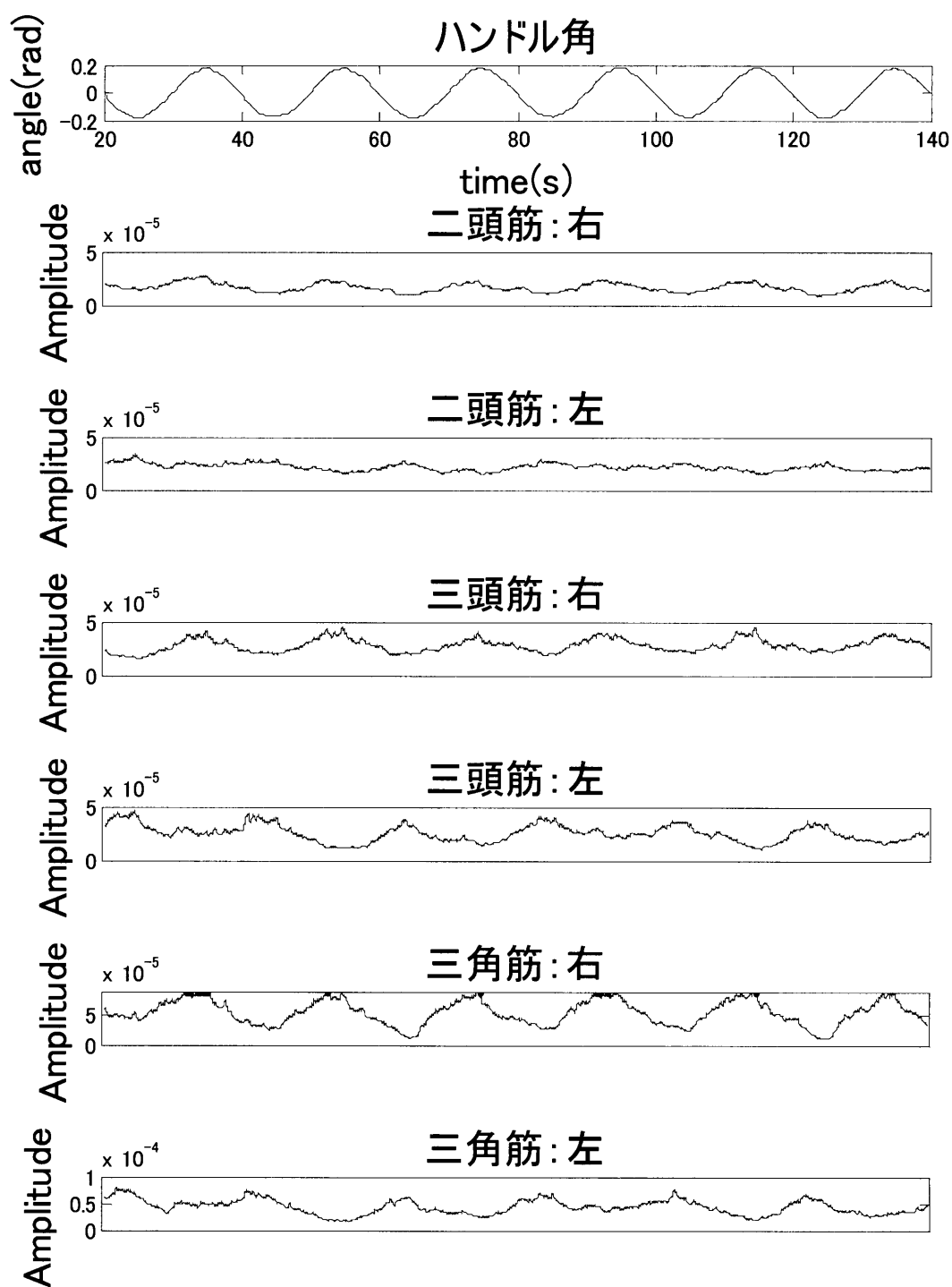


Fig. 6.21 Experimental result ( subject 2 - bad )

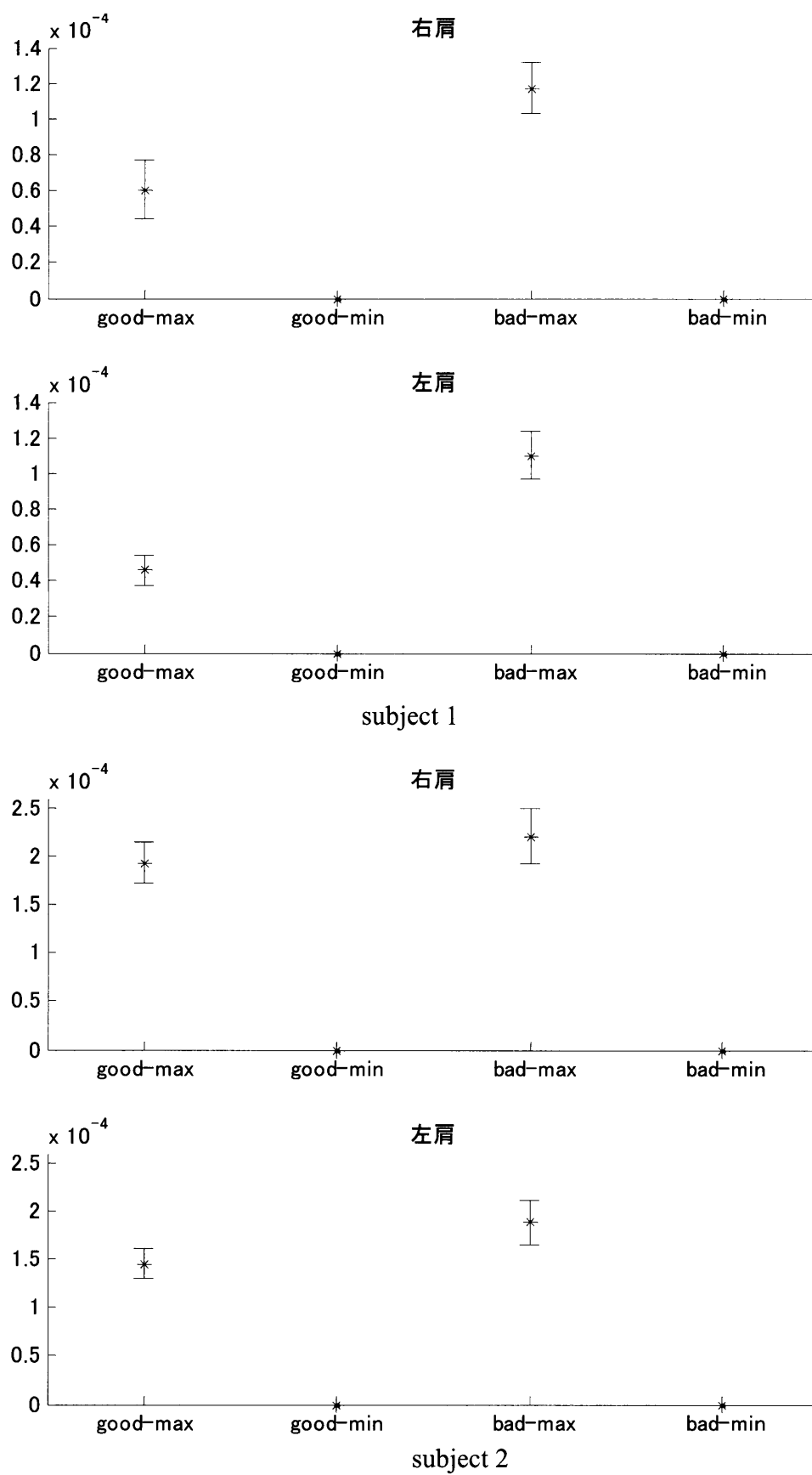


Fig. 6.22 Experimental result

## 6.4 手のひらを固定して測定

6.3と同様にベルトを用いて手のひらをハンドルに固定した状態で、同様の実験を行なった。ただし、前腕・大胸筋・僧帽筋・広背筋はうまく求められないため計測を行わず、被験者1と被験者2の違いが考えられる上腕二頭筋と上腕三頭筋、そして変化の大きい三角筋を左右両側計6箇所を測定した。アースには前回同様耳たぶを使用した。被験者は21～24才の三重大学学生の男性2人である。測定の際に使用した装置の特性をTable. 6.3に示す。

Table. 6.3 Set parameters of the steering

	subject 1		subject 2	
	good	bad	good	bad
$I_p$ [N•m/(rad/s <sup>2</sup> )]	0.256	0.256	0.256	0.256
$C_{p1}$ [N•m/(rad/s)]	1	1	1	1
$C_{p2}/C_{p1}$	1	1	1	1
$K_{p1}$ [N•m/rad]	10	4	4	4
$K_{p2}/K_{p1}$	0.7	0.7	0.7	0.7

### 6.4.1 実験結果

下に実験結果を示す。Fig. 6.23～Fig. 6.26は測定した筋電の絶対値を一次遅れ系を用いて平滑化処理をしたもので、Fig. 6.27は三角筋の最大値と最小値の平均・標準偏差グラフである。手のひらをベルトで固定して操作したが、筋電の値は手首を固定した時とほとんど変わらなかった。操作しやすい時と操作しにくい時の違いもほとんどみることができない。三角筋はこれまで同様変化が出るが、電極の貼る位置の違いで筋電の値が変わってきてしまうので、正確に筋肉に貼り付けなければ上手く測定できないことを実感した。三角筋の最大値と最小値のグラフをみると、操作しやすい時のほうが、最大値が小さくなるという結果が出た。これは手首を固定した実験と同じ傾向だが、大きさにそれほど変化がないため、確かな違いがあるとは言い切れないと思われる。

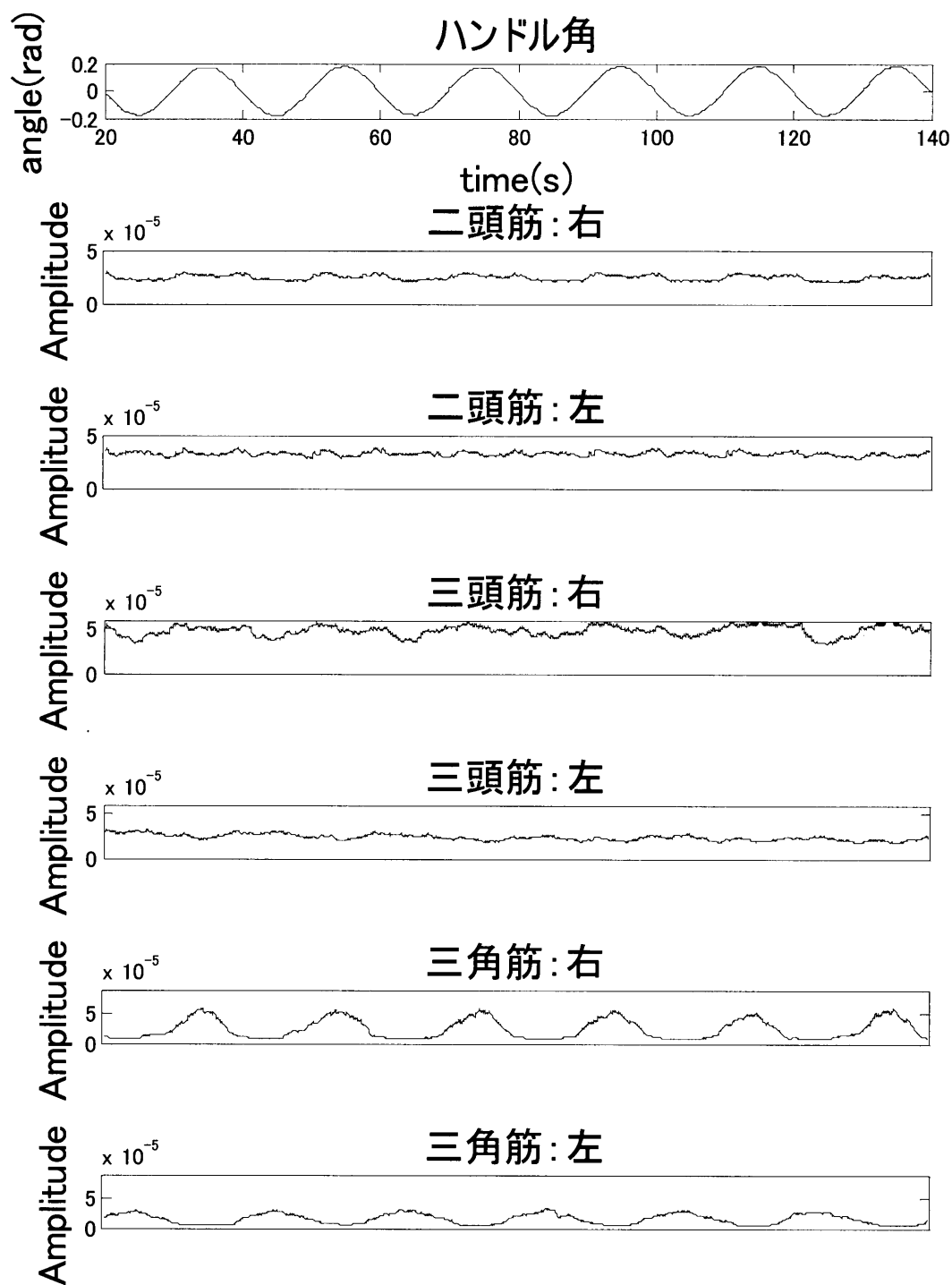


Fig. 6.23 Experimental result ( subject 1 - good )

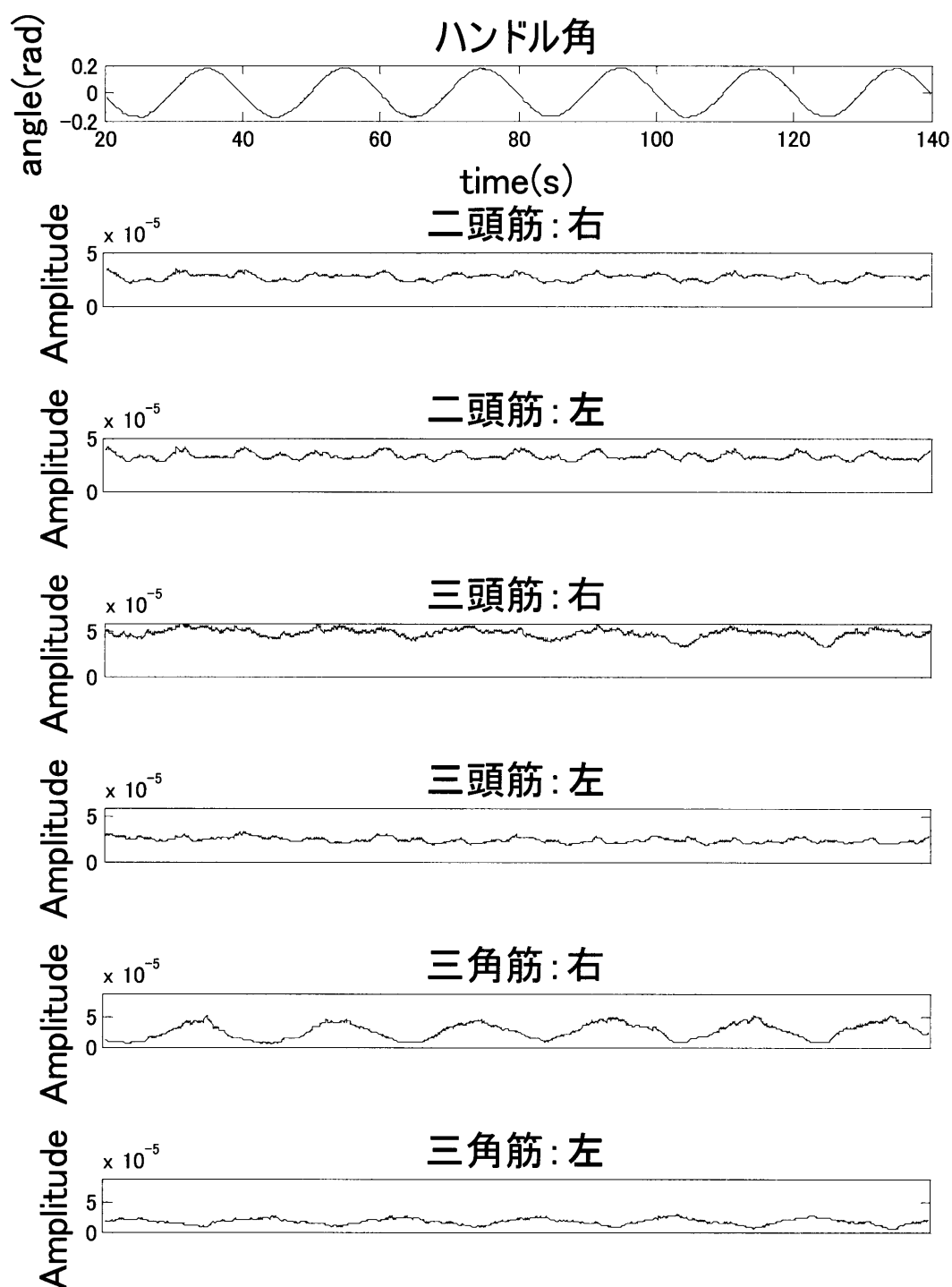


Fig. 6.24 Experimental result ( subject 1 - bad )



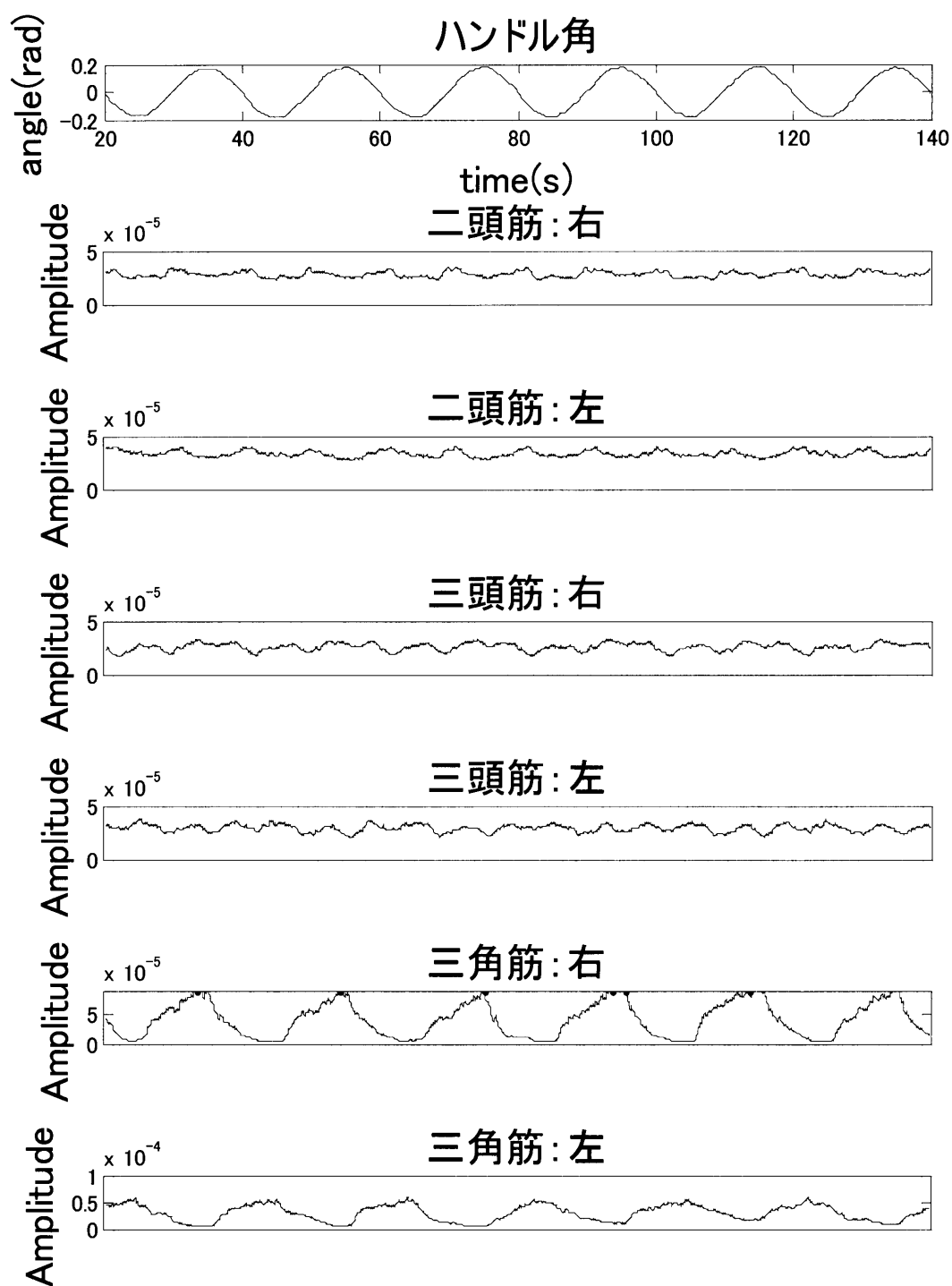


Fig. 6.25 Experimental result ( subject 2 - good )

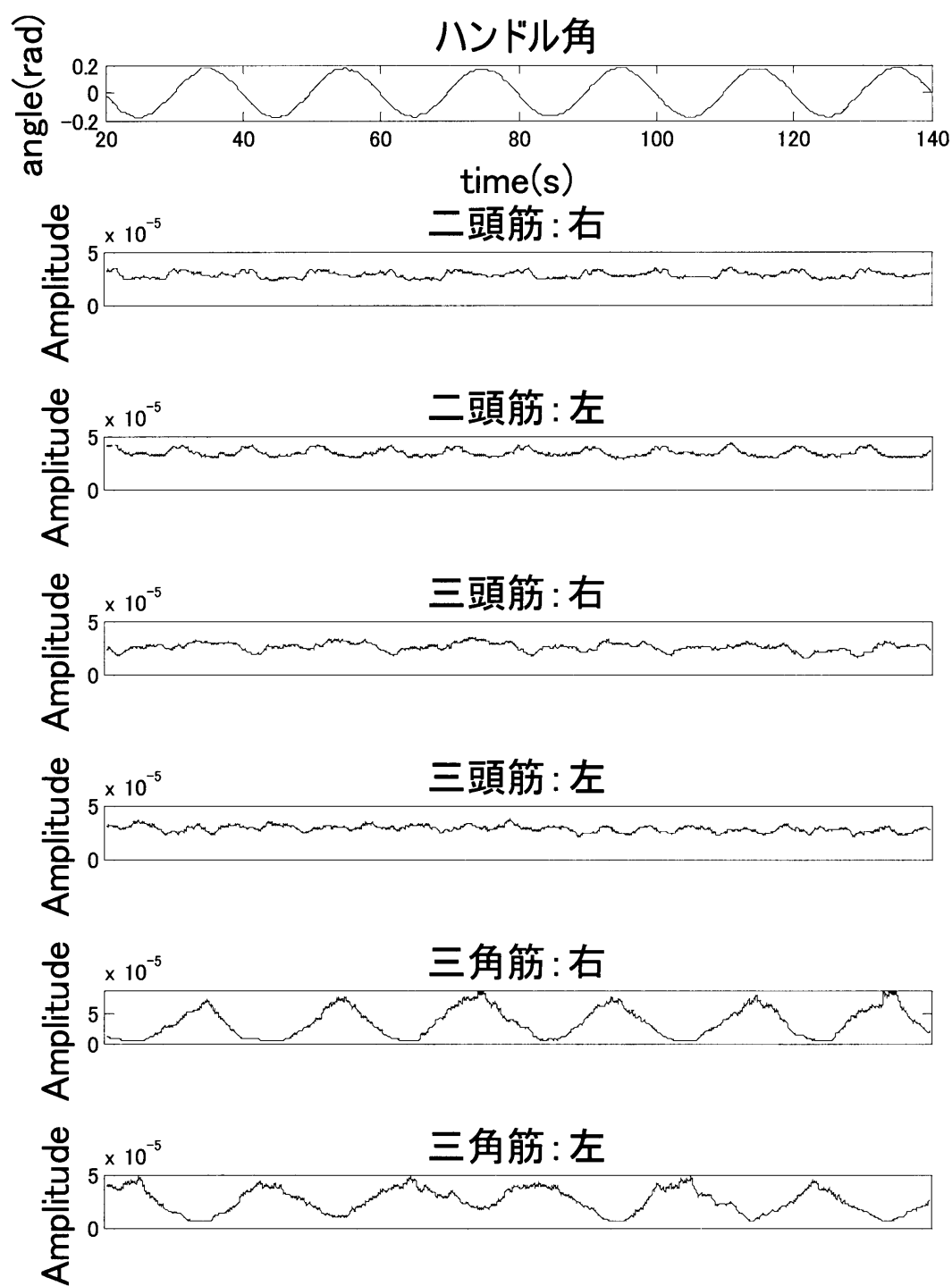


Fig. 6.26 Experimental result ( subject 2 - bad )

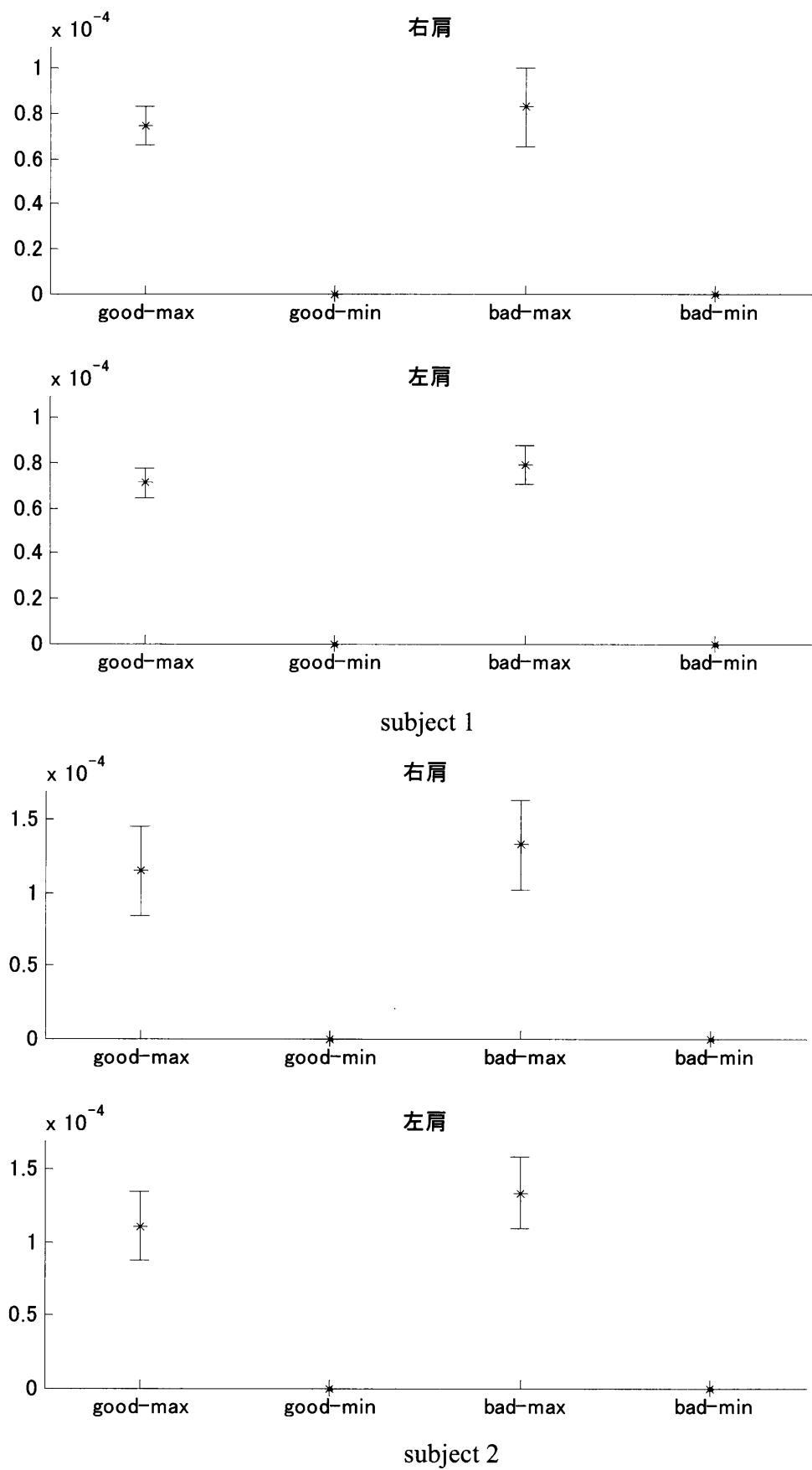


Fig. 6.27 Experimental result

## 第7章

### 結言

ステアリング装置を用いて、装置の粘性・剛性・摩擦トルク特性を変え、操舵中の腕のインピーダンスを測定した結果、これまでとは異なる結果が得られた。これまでの研究ではステアリング装置の操舵特性 $K_p$ が大きくなると、人間の腕のインピーダンス $K_h$ が大きくなり、装置の摩擦トルク $F_p$ が大きくなると、人間の腕のインピーダンス $K_h$ が小さくなるという結果が出ていた。しかし、今回の研究より、主に腕の力によってハンドルを操作する人は同じような傾向が出るが、体全体を使ってハンドル操作をする人については、そのような傾向はみられず、腕の力で操作する人より、インピーダンス $K_h$ の変化が小さいと言える。その理由として、装置の構成上、腕のインピーダンスの大きさが手の握りの強さに大きく影響されるということが、手をハンドルに固定しインピーダンスを測定した実験より明らかにすることができた。手の握りの強さが弱い分、体全体や特に上腕二頭筋や上腕三頭筋の力を使うことで補っているのだと考えている。よって、現在の手の握りの大きさがインピーダンスが決まってしまう問題を解決し、手の握りや上腕二頭筋や上腕三頭筋といった筋肉を考慮した装置に改良することで、また違った結果を得ることができると思われる。目標角度の移動振幅や移動速度を変更した実験も行なったが、粘性の影響は全く確認できなかった。官能評価については、被験者の操舵感の良悪を大きく決定しているのが、摩擦トルクの大きさであるとわかった。テストドライバーと学生の被験者による感覚の違いはそれほどなく、摩擦が小さいときに操作しにくいといえた。

先ほど述べた、手の握りの問題の改良の方向性を模索するためやインピーダンス以外の手法として何か指標になるようなものがないか考えた上で、前腕・上腕二頭筋・上腕三頭筋・三角筋を中心に筋電の測定を行なったが、筋電に大きな変化はみられなかった。その原因は、ノイズやノイズ除去のためのフィルタの設定の難しさや皮膚の

表面に電極を貼り付ける計測方法によるものの影響があったと考えられる。また、心電などの影響も大きいため腕以外の筋肉を測定することができなかった。

これからの課題としては、手の握りのみに影響されるのではなく、腕全体として捉えられる装置の改良が必要になると思われる。また、ステアリングの操舵感に大きな影響を与える摩擦トルク発生装置も手動調整ではなく、モーターのトルクによる制御を用いて効率的かつ正確にする必要があると感じる。それを実現すれば、インピーダンスを用いて操舵感を評価することは可能であると考えている。

---

## 参考文献

---

- (1) 安部正人：“車両の運動と制御”，共立出版株式会社.
- (2) 相良節夫，和田清，中野和司：“デジタル制御の基礎”，コロナ社.
- (3) 佐藤博文，原口哲之理，大沢洋：“操舵感に関わる操舵応答特性の考察”，自動車技術会，Vol.44，No.3，1990.
- (4) 山下秀也，村田重雄，乗松尚樹，小野恒男：“ステアリング操舵感の評価方法について”，自動車技術会，Vol.45，No.12，1991.
- (5) 星野光弘，Joop pauwelussen：“タイヤ過渡特性とステアリング動的パフォーマンス”，自動車技術会学術講演会前刷集，No.4-01，2001.
- (6) Mingcong Deng，五味裕章：“運動中の多関節人腕粘弾性のロバスト推定法”，計測自動制御学会論文集，Vol.39，No.6，537/543，2003.
- (7) 鈴木秀明：“人間に協調するロボットの最適可変インピーダンス制御に関する研究”，平成12年度 三重大学大学院工学研究科 修士学位論文.  
小澤治明：“人間とロボットによる協調運搬動作に関する研究”，平成9年度 三重大学大学院工学研究科 修士学位論文.
- (8) 池浦良淳，星野広行，横井大介，兼原洋治，星野光弘，水谷一樹，澤井秀樹：“腕のインピーダンスに基づく操舵感の評価方法について”，自動車技術会論文集，Vol.37，No.4，33/38，2006.

## 謝辞

研究を進めるにあたり、制御方法や人間工学理論及び実験方法について熱心にご指導いただいた指導教官の池浦良淳助教授に心より深く感謝いたします。

研究発表の際の的確な質問や助言、また振動についてご指導いただいた水谷一樹教授に深く感謝いたします。

実験装置の設計から製作及び研究内容にわたり面倒を見ていただいた沢井秀樹技官に感謝の意を表します。

本研究に関連のある振動についてご指導いただいた加藤光廣助手に感謝の意を表します。

研究を進めるにあたり、いやな顔一つせずに実験に協力してくれた小野真平君に感謝し、これからのよりいっそうのご活躍と成功をお祈りいたします。

また、実験に快く付き合ってくださった被験者の方々に深く感謝いたします。

最後に研究室の皆様には、楽しく過ごさせてもらおうと共に、研究にご協力頂き、深く感謝いたします。皆様のこれからのご活躍をお祈りいたします。