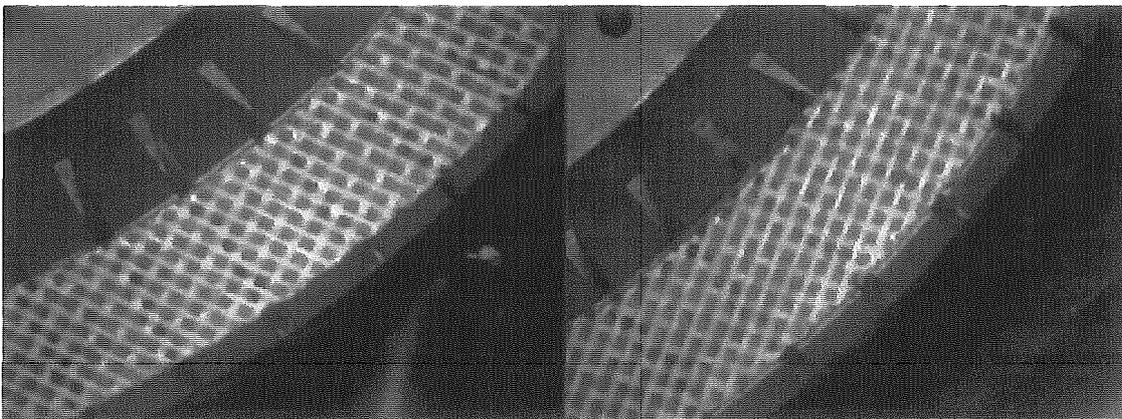


(a) Before use

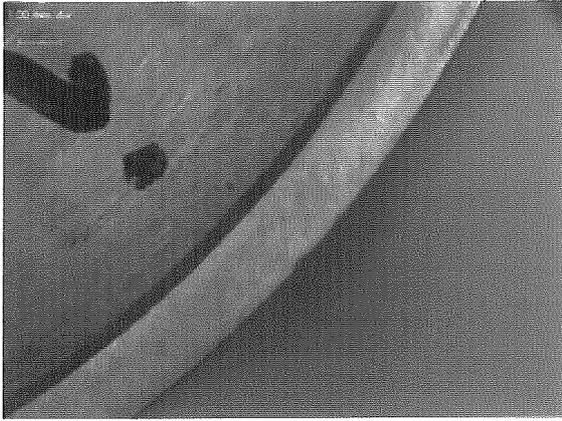
(b) Aluminum rotor (after 30 minutes)



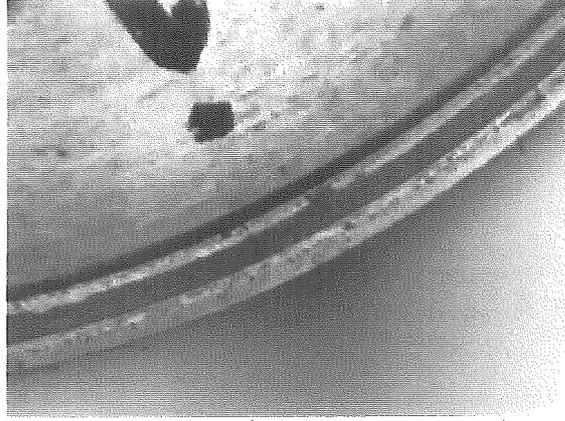
(c) PL-PEM rotor (after 30 minutes)

(d) PL-FLM rotor (after 30 minutes)

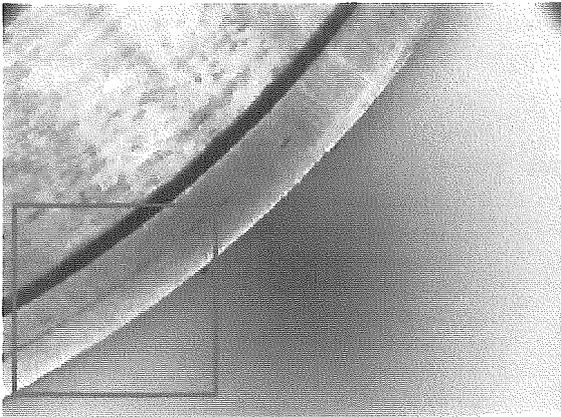
図 4.28 PTFE-GC ステータ接触面状態



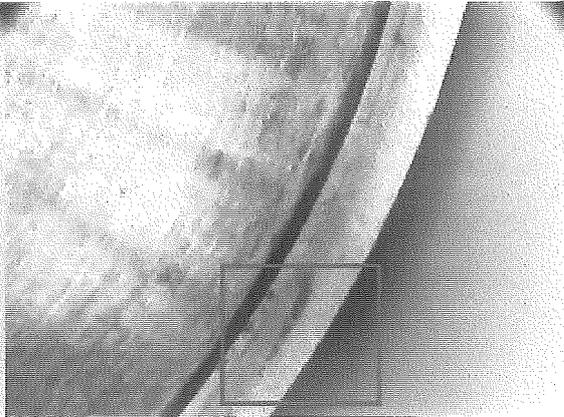
(a) Before use



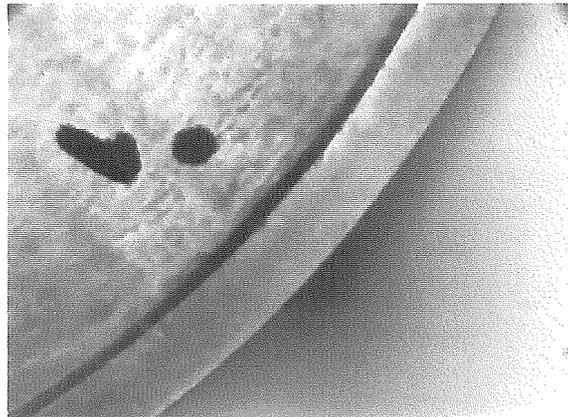
(b) C2700 stator (after 30 minutes)



(c) PTFE stator (after 30 minutes)

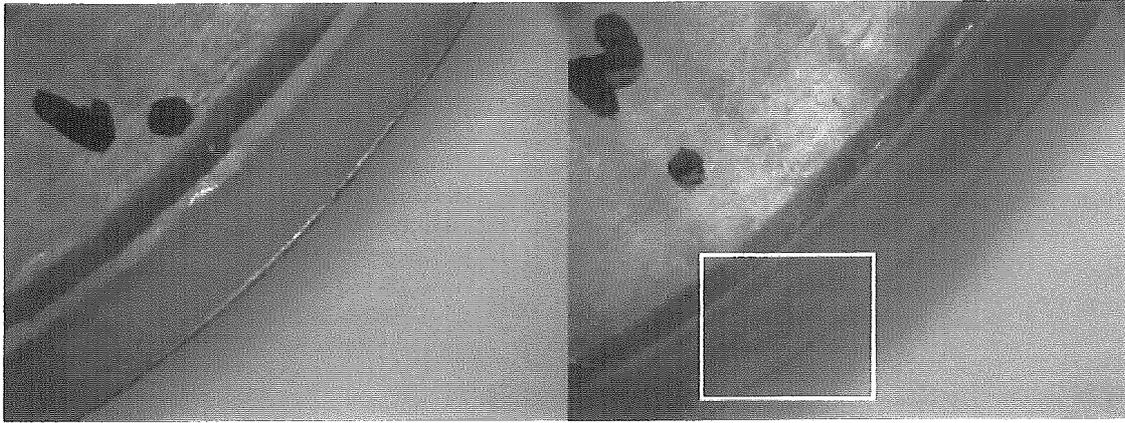


(d) PTFE-S stator (after 30 minutes)



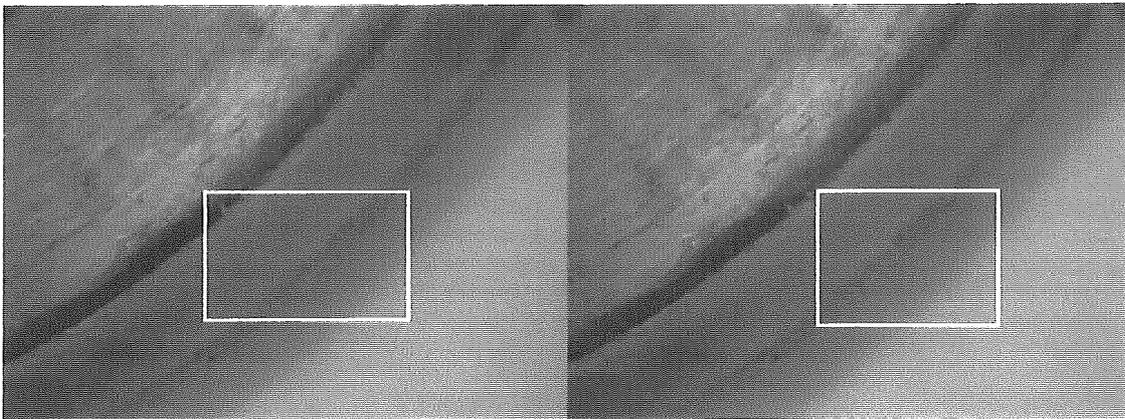
(e) PTFE-GC stator (after 30 minutes)

図 4.29 アルミロータ接触面状態



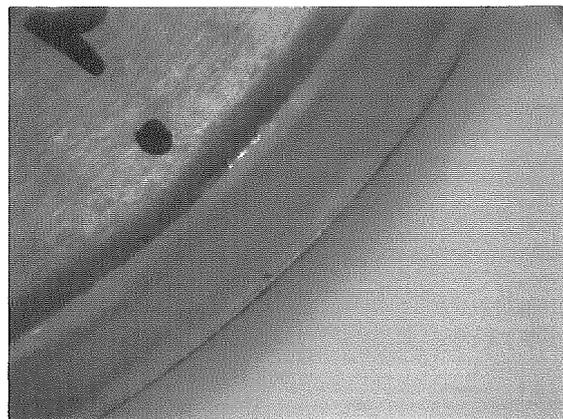
(a) Before use

(b) C2700 stator (after 30 minutes)



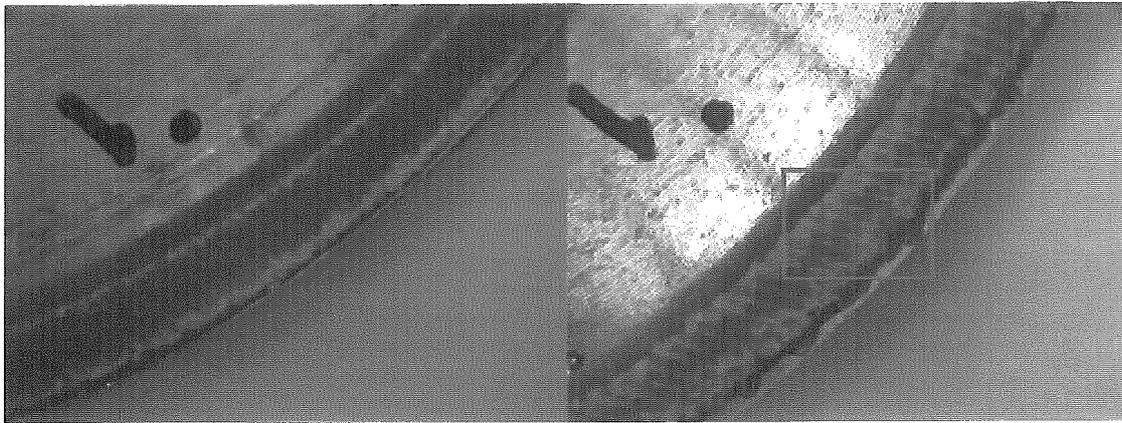
(c) PTFE stator (after 30 minutes)

(d) PTFE-S stator (after 30 minutes)



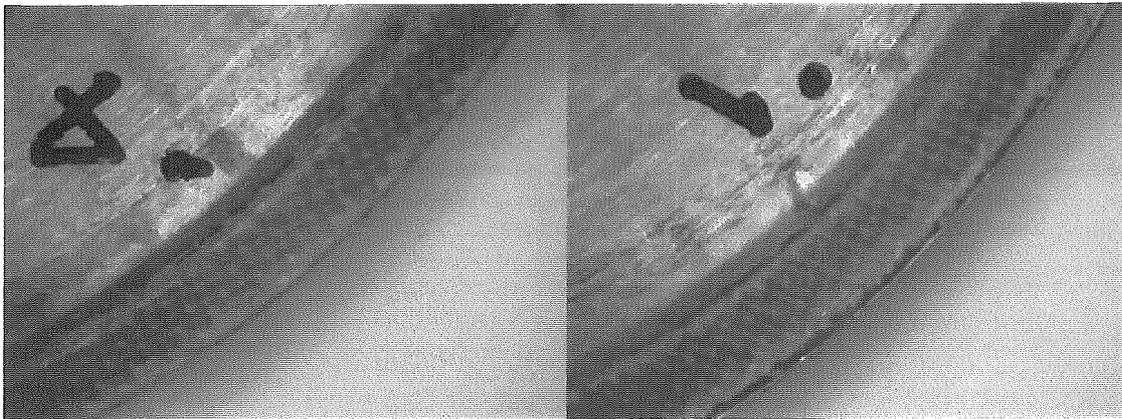
(d) PTFE-GC stator (after 30 minutes)

図 4.30 PL-PEM ロータ接触面状態



(a) Before use

(b) C2700 stator (after 30 minutes)



(c) PTFE stator (after 30 minutes)

(d) PTFE-S stator (after 30 minutes)



(d) PTFE-GC stator (after 30 minutes)

図 4.31 PL-FLM ロータ接触面状態

4.6 軽量サンドイッチ型超音波モータ駆動試験結果

サンドイッチ構造による超音波モータの出力特性の向上を確認するために、単体の超音波モータとサンドイッチ型超音波モータそれぞれの回転数 - 駆動トルク特性を図 4.32 に示す。超音波モータの構造をサンドイッチ構造にすることによって駆動トルクが約 1.5 倍となり、トルク向上にサンドイッチ構造は有用だと考えられる。また、ステータとロータの共振周波数及び振動モードを調整することによって駆動トルクは向上すると考えられる。

サンドイッチ型超音波モータの押し付け荷重及び印加電圧に対しての回転数 - 駆動トルク特性を図 4.33 - 4.35 に示す。各回転数 - 駆動トルク特性から、押し付け荷重と回転数は反比例し、駆動トルクは比例している。

本研究で開発したサンドイッチ型超音波モータの最大回転数 82rpm、最大トルク 3.0Nm を示した。但し、印加電圧 240V_{pp}、押し付け荷重 1200N である。

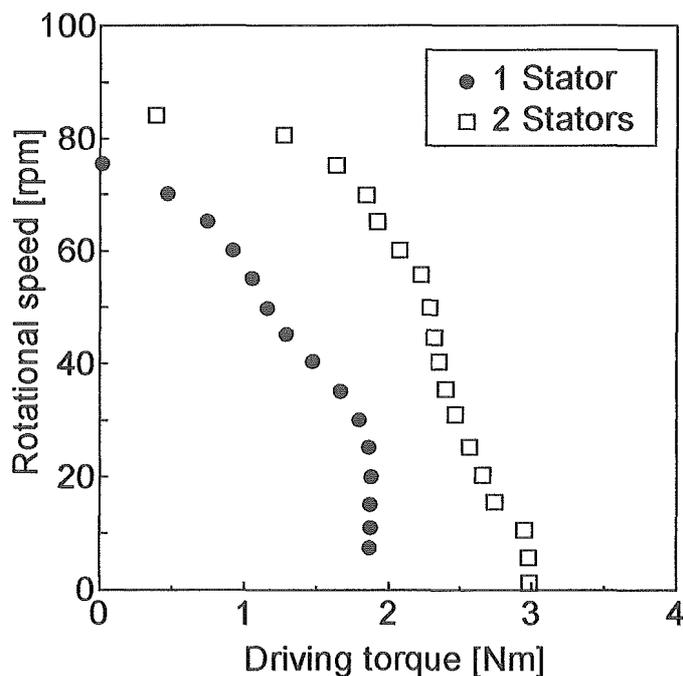


図 4.32 シングル・サンドイッチ型超音波モータの回転数—トルク特性

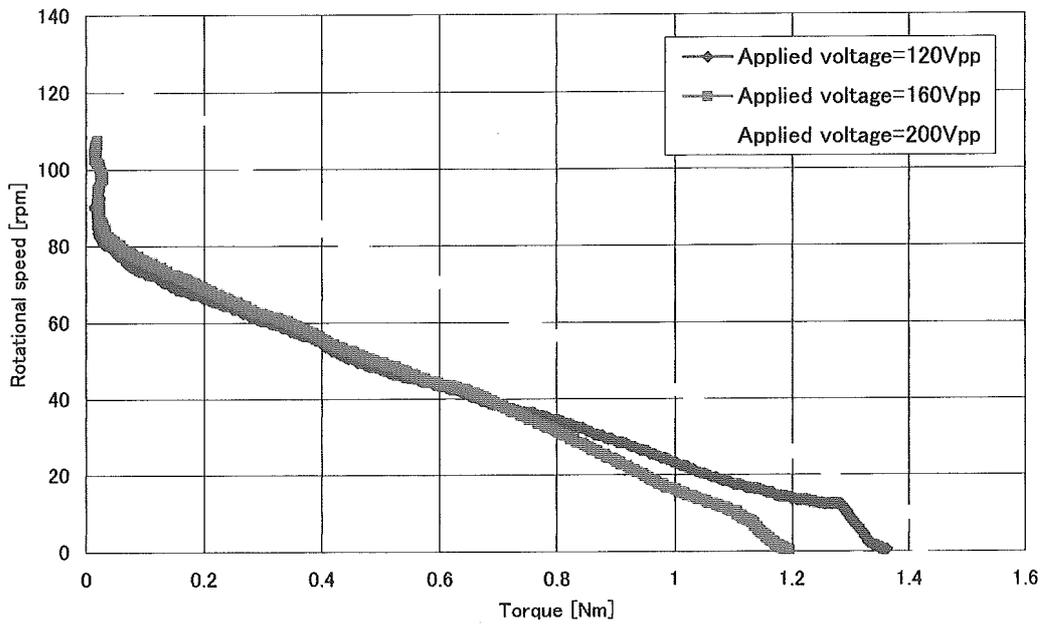


図 4.33 軽量サンドイッチ型超音波モータ回転数—トルク特性 (押し付け荷重 400N)

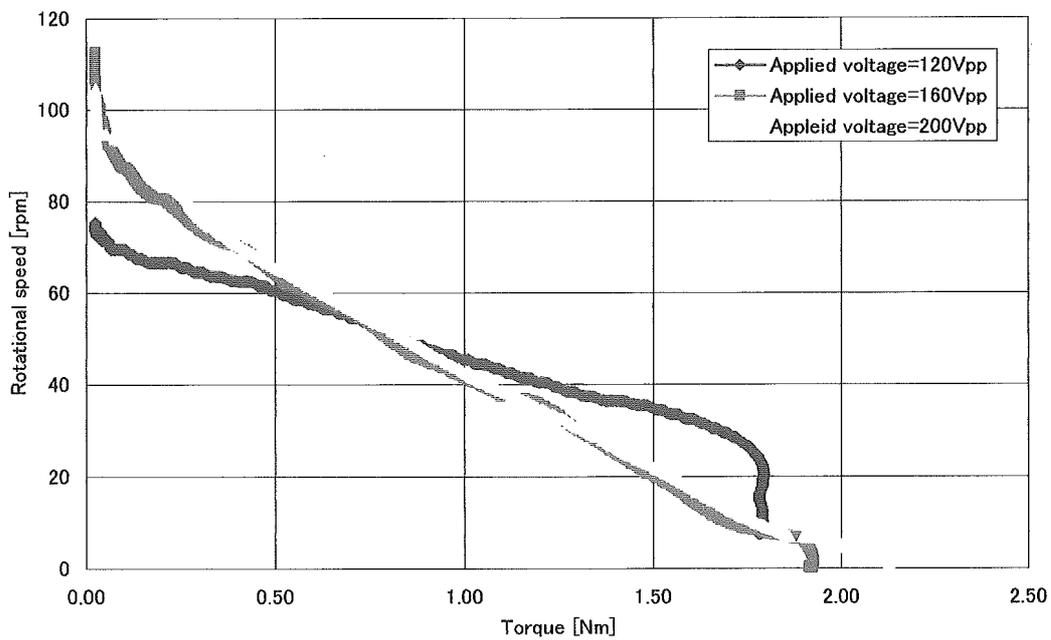


図 4.34 軽量サンドイッチ型超音波モータ回転数—トルク特性 (押し付け荷重 800N)

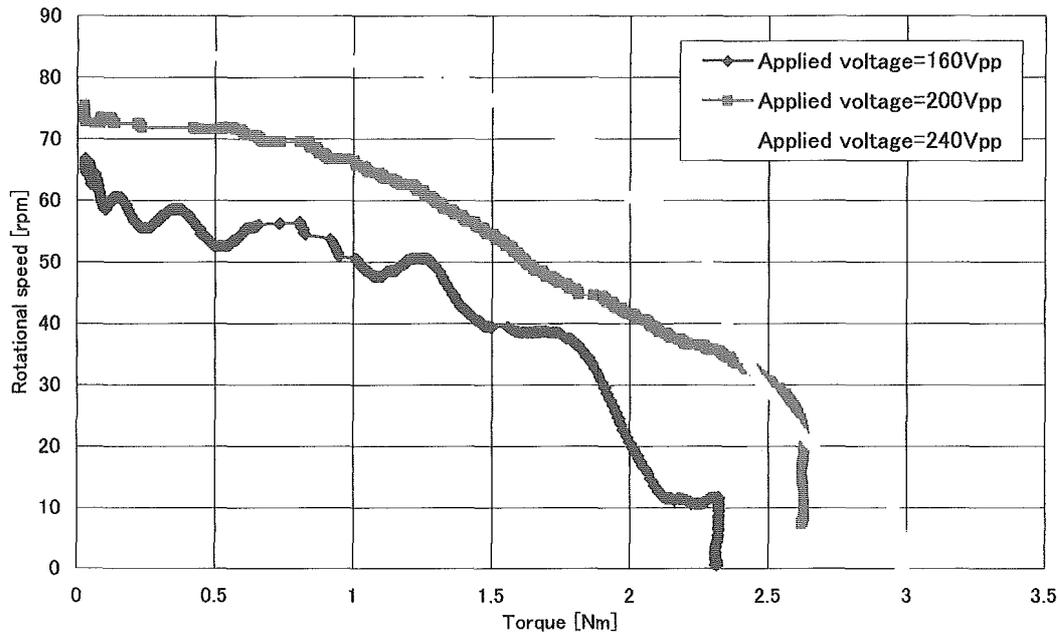


図 4.35 軽量サンドイッチ型超音波モータ回転数—トルク特性 (押し付け荷重 1200N)

D. 考察

得られたそれぞれの実験結果から、各ステータ材料及び各ライニング材の評価を行い、各材質を決定した。また、軽量サンドイッチ型超音波モータの改良の評価も行う。

4.7 ステータ材料の評価

本研究において、ステータの出力特性の向上及び軽量化を行うために、昨年度までに行った有限要素法を用いた解析、共振の鋭さ Q 値、そして本年度行った回転数—トルク試験、振動振幅変位測定を行い、ステータ材料を選定した。振動解析では、全ての材料において外周部の任意の点における振動の軌跡が楕円になっており、安定した振動状態になっていた。このことから全ての材料ではステータに進行波が励起したとき安定した駆動が得られると考えられたが、インピーダンスアナライザを用いたインピーダンス特性で材料特性による差が見られた。C5210、A6061 の Q 値が TP340、SUS420-J2 に比べて低い結果となった。また、トルク試験と振動振幅測定を行った結果、超音波モータの駆動トルクに影響を及ぼす鉛直方向の振動振幅変位は、回転数、駆動トルクは、SUS420-J2 が最も大きい結果となった。材料特性による超音波モータに及ぼす影響が見られた。この結果の原因は、ヤング率やステータの Q 値、内部抵抗にあると考えられる。C5210 の出力特性が低くなったのは、インピーダンスアナライザの測定結果から明らかとなった内部抵抗が大きく機械的損失が大きかったためであると考えられる。A6061 の出力特性が低くなった要因も、C5210 と同様であると考えられる。この Q 値が低いということは、進行波が鈍くなっていると言える。超音波モータはステータで発生した進行波とロータの摩擦力で駆動力を得ているアクチュエータであることから、 Q 値が小さい場合、機械的損失が大きく、進行波が鈍くなりロータと進行波の接触点で生じた摩擦力が回転方向と違う方向に逃げたため回転数及び駆動トルクが低下したと考えられる。また、SUS420-J2 と TP340 の駆動トルクに差が生じた原因は、ヤング率にあると考えられる。ステータの進行波がロータに接触する際に、ステータとロータは微小変形を生じ、その部分で摩擦力が発生し、超音波モータは駆動力を得ている。そのため、ステータにもある程度の柔軟性が求められる。TP340 はヤング率が大きすぎるため、微小変形を起こせずにステータとロータ間で強い反発力が発生し、駆動トルクが SUS420-J2 に比べ低下したと考えられる。本研究結果から適度軽く実験結果からステータ材料としてステンレス SUS420-J2 が良いと考えられる。

弾性体を単一の材料で構成する場合は、ヤング率と実際に圧電素子を貼り付けインピーダンスアナライザを用いて測定した共振の鋭さを表す Q 値からステータ材料の選定が行えると考えられる。また、ステータは弾性体と圧電素子で構成されており、ステータとロータ間の摩擦熱等で弾性体及び圧電素子が膨張を起すため、それぞれの熱膨張係数が大きく違う場合、接着層でせん断方向に力

が生じ、圧電素子が剥がれやすいと考えられる。よって、圧電素子と弾性体の熱膨張係数がそれぞれ近いことも望まれる。

4.8 超音波モータの安定化

超音波モータは摩擦駆動であるため、ロータ及びステータに耐摩耗性が求められ、ステータ及びロータの接触面を磨耗させないものが要求されている。また、進行波をくい込ませることが出来る程度の硬さも要求されている。そして、これらの要求を満たしさらに超音波モータの安定駆動向上のためにステータに PTFE、PTFE-S、PTFE-GC を、ロータに PL-PEM、PL-FLM をそれぞれライニング材として貼り付け、検討してライニング材の選定を行った。

ステータ及びロータが金属同士の場合、摩擦係数が大きく起動トルクも高い。しかし、ステータ及びロータの接触面に激しい磨耗痕が観察されており、駆動中に磨耗粉が凝着し、駆動が停止したケースもあった。また、超音波モータ表面の表面温度が最も高い。超音波モータの表面温度は、主にステータが発熱しているため、その熱によって弾性体と圧電素子を貼り合わせている接着層の劣化を起し、ステータの破壊されてしまう可能性がある。同時に熱によってステータの剛性が変化し、ステータの共振周波数が大幅に低下し、超音波モータの出力特性低下が考えられる。よって、ステータ及びロータの材料が金属同士や片方が金属は、超音波モータの出力特性に不安定性を齎すため適していないと考えられる。

ライニング材は、縦弾性率もしくは引張強度と摩擦係数のバランスが重要であり、さらに硬さによって進行波がロータに適切なくい込みが可能であるかによって、超音波モータの出力特性に影響を及ぼしていると考えられる。また、耐摩耗性も要求されている。これらの問題を解決すべくステータに PTFE、PTFE-S、PTFE-GC、ロータに PL-PEM、PL-FLM をそれぞれ貼り付けた。PTFE、PTFE-S の場合、全てのロータに対して磨耗痕が観察されたが、PTFE-GC においては観察されなかった。また、PTFE-GC は PTFE、PTFE-S の起動トルクに比べて高い結果であった。よってステータに貼り付けるライニング材は、PTFE-GC が適していると考えられる。PL-PEM と PL-FLM を比較した場合、PL-PEM には、磨耗痕が観察されたものもあった。よって、同程度の起動トルクが得られた PL-FLM がロータのライニング材として適していると考えられる。

4.9 軽量サンドイッチ型超音波モータ

昨年度に解明した超音波モータの理論から超音波モータの駆動トルクは、押し付け力にある値までは比例関係があるためである。また、回転数は、押し付け荷重を上げることによって、摩擦力は増加して駆動トルクは向上するが、押し付け力がステータの振動の妨げとなり、低下すると考えられる。一般に、印加電圧を上げることによってステータの振動振幅が大きくなり、進行波の速度が増して衝突する力積が増加することによって回転数及び駆動トルクは大きくなる。しかし、押し付け荷重 400N、800N ではその傾向は見られなかった。これは、押し付け荷重が印加電圧に対して大きいため、進行波が押し付け荷重によって潰されてしまい出力特性が低下したと考えられる。また、押し付け荷重 1200N では、押し付け荷重が大きいため、400、800N 時の印加電圧では駆動することが出来なかった。

今回開発した軽量サンドイッチ型超音波モータは、過去に開発されたものに比べ、出力特性の大幅な向上に成功した。これは、ステータの櫛歯数を増やすことによって振動振幅が増加されたこと、ステータ上面に励起される波数を増やしたこと、ロータの共振周波数をステータの共振周波数の約 1.35 倍にすることによってトルク向上したと考えられる。また、ステータの枚数を増やしても超音波モータの重量を増やすことなく軽量化にも成功した。トルク向上及び軽量化したことによってよりサポートタイプのパワーアシストスーツに適した超音波モータであると言える。

E. 結論

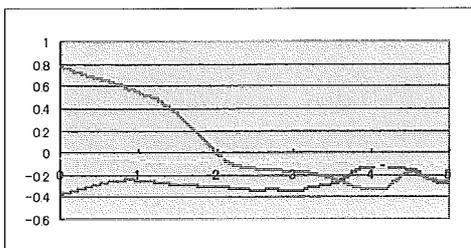
- ・ ステータ材料の選定には、ヤング率や硬さだけではなく、弾性体の電氣的内部抵抗及び共振の鋭さを表す Q 値が重要であった。
- ・ ステータ材料の検討を行った結果、軽量性には若干かけるが、出力特性は良好であることからステータ材料はステンレス鋼 SUS420-J2 が適している。
- ・ 超音波モータの出力特性向上のためにステータ及びロータにライニング材を貼り付けた。ステータ及びロータにライニング材それぞれ貼り付けることによって従来までのロータだけのものに比べてステータの発熱量が抑えられ、安定した駆動力が得られた。
- ・ ライニング材として駆動トルクも重要だが安定化を重視したものを選定した。ステータにフッ素樹脂にガラス繊維を混ぜた PTFE-GC、ロータに基材の熱硬化性フェノール樹脂 PL-FLM を貼り付けることによって、ステータとロータの磨耗を必要最小限に抑えることに成功した。また、出力特性にムラが少なく一定の出力を得ることが可能になった。
- ・ ステータ材料、ライニング材の検討結果を元に製作した軽量サンドイッチ型超音波モータの出力特性は、過去に制作された超音波モータと比較した場合、極めて良好な出力特性・小型軽量性である。

付録

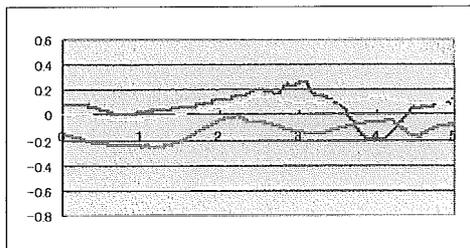
I. 抱え上げ動作

I.I. 初心介護者による試行

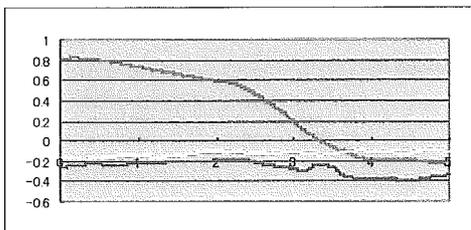
初心介護者による抱え上げ動作中の介護者の体幹姿勢、各関節角度変位、床反力を Fig.I.I.1~I.I.3 に示す。



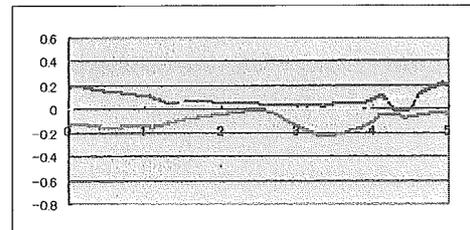
(a)体幹姿勢



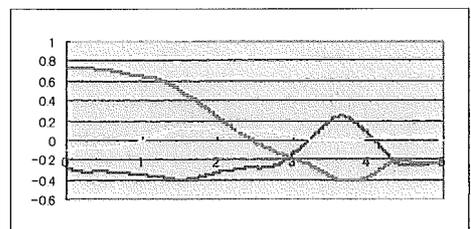
(a)腰関節



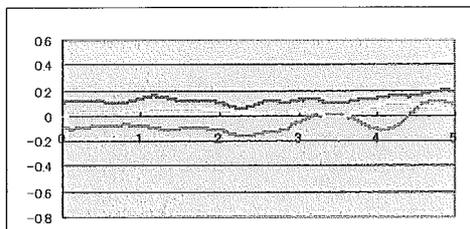
(b)体幹姿勢



(b)腰関節



(c)体幹姿勢



(c)腰関節

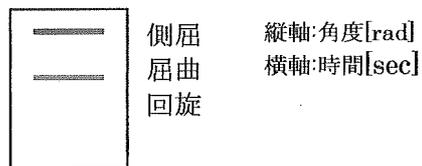
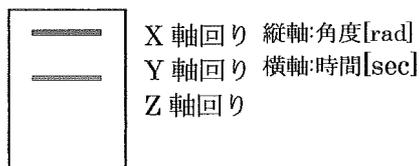
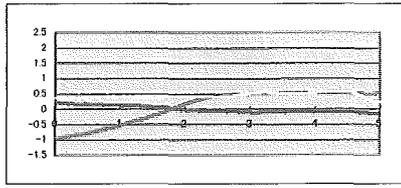
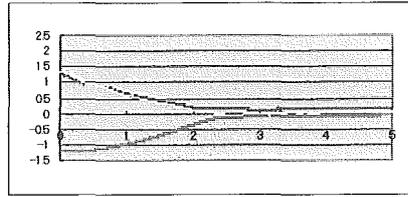


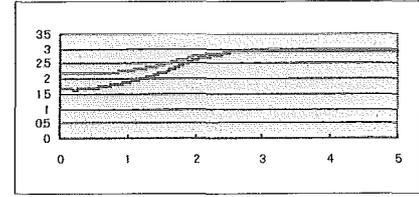
Fig. I.I.1 初心介護者による抱え上げ動作各試行での体幹姿勢と腰関節角度変位



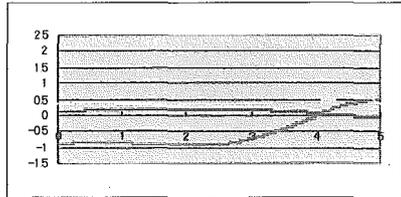
(a)左股関節



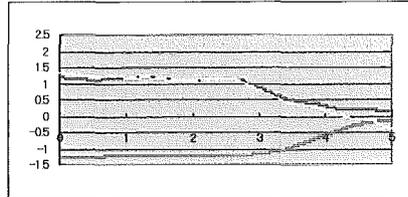
(a)右股関節



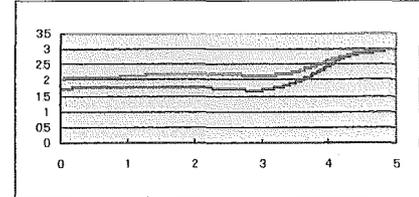
(a)膝関節



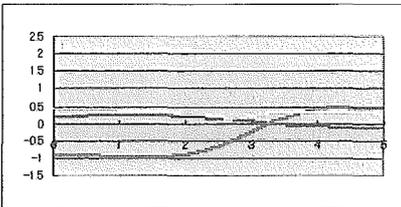
(b)左股関節



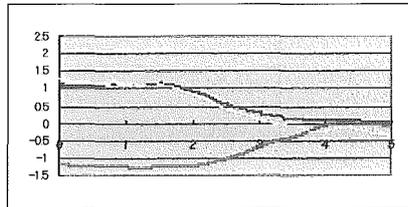
(b)右股関節



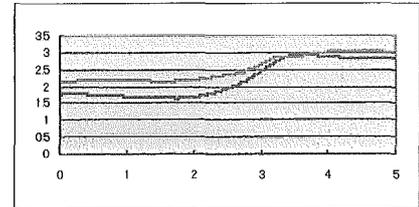
(b)膝関節



(c)左股関節



(c)右股関節



(c)膝関節

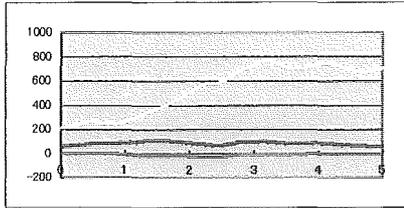


側屈
屈曲
回旋

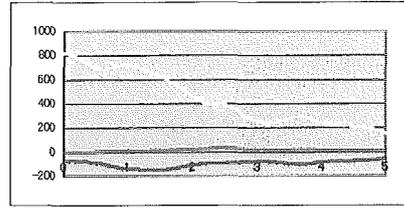
縦軸:角度[rad]
横軸:時間[sec]

左膝 縦軸:角度[rad]
右膝 横軸:時間[sec]

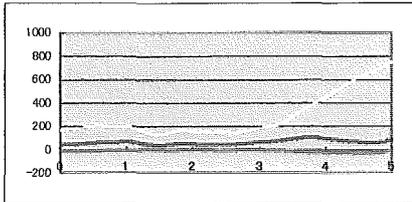
Fig. I.I.2 初心介護者による抱き起こし動作各試行の左股,右股,膝関節角度変



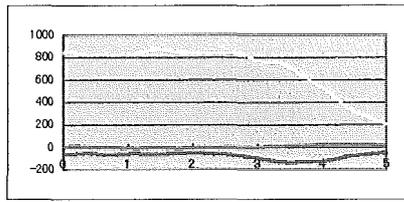
(a)左足床反力



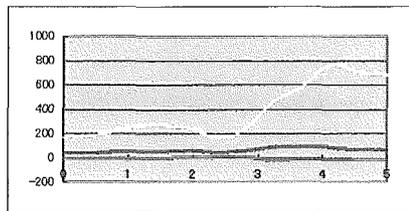
(a)右足床反力



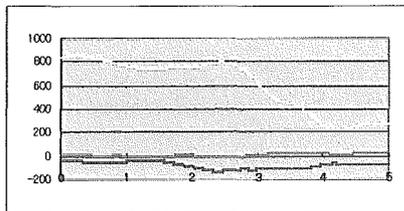
(b)左足床反力



(b)右足床反力



(c)左足床反力



(c)右足床反力



Fig. I.I.3 初心介護者による抱え上げ動作中の床反力

I.II. 熟練介護者による試行

熟練介護者による抱え上げ動作中の介護者の体幹姿勢、各関節角度変位,床反力を Fig. I.II.1~I.II.3 に示す.

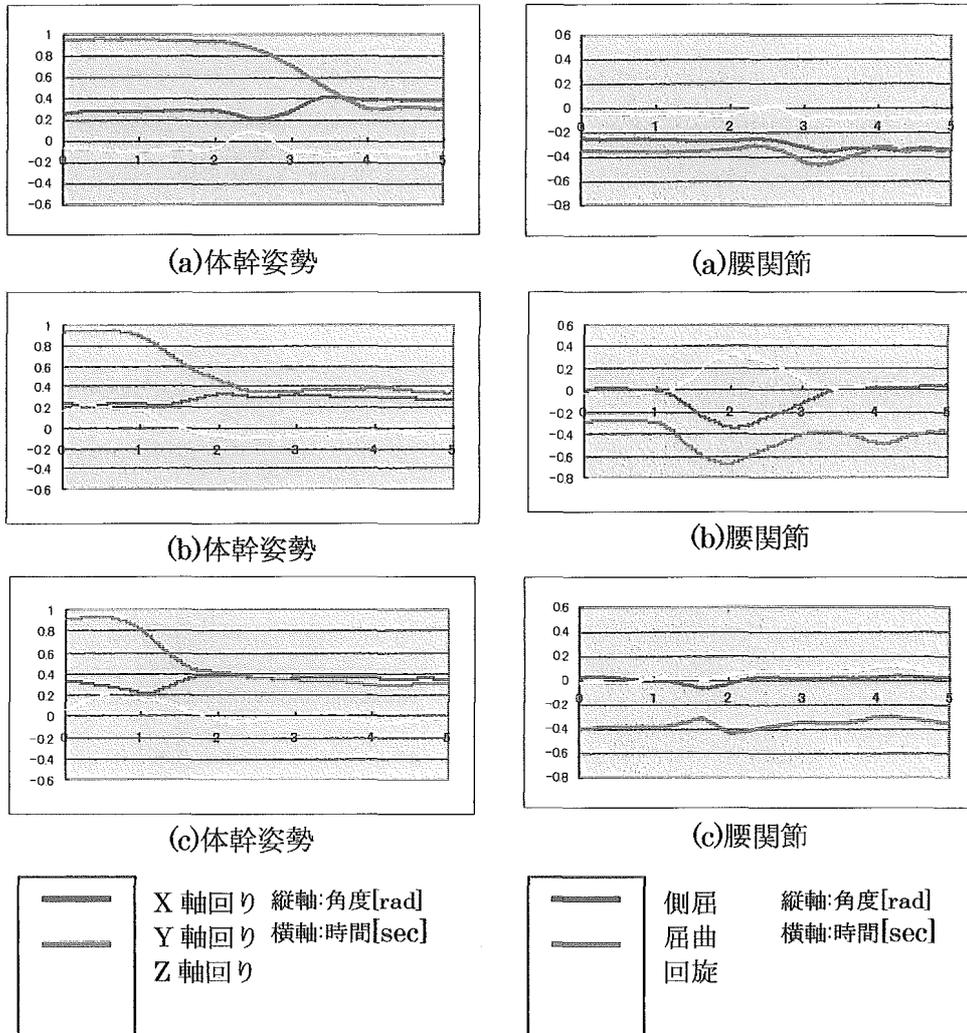


Fig. I.II.1 熟練介護者による抱え上げ動作各試行での体幹姿勢と腰関節変位

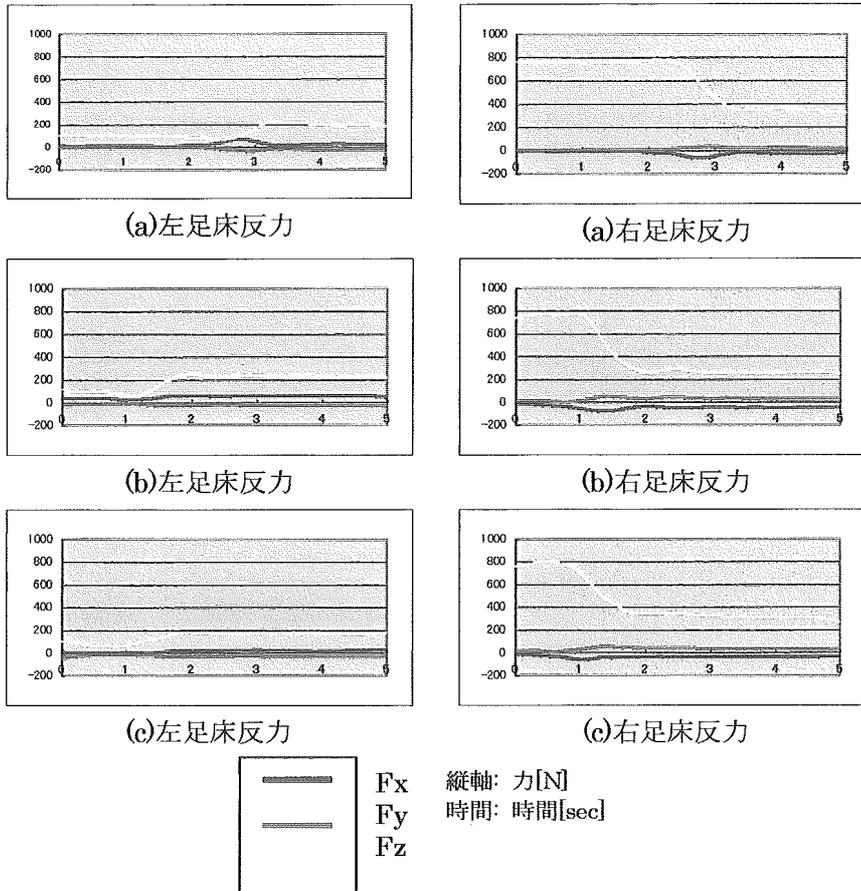


Fig. I.II.3 熟練介護者による抱え上げ動作各試行での床反力

II. 移乗動作

II.1. 初心介護者による試行

初心介護者による移乗動作中の介護者の体幹姿勢、各関節角度、床反力を Fig. II.1.1~II.1.3 に示す。

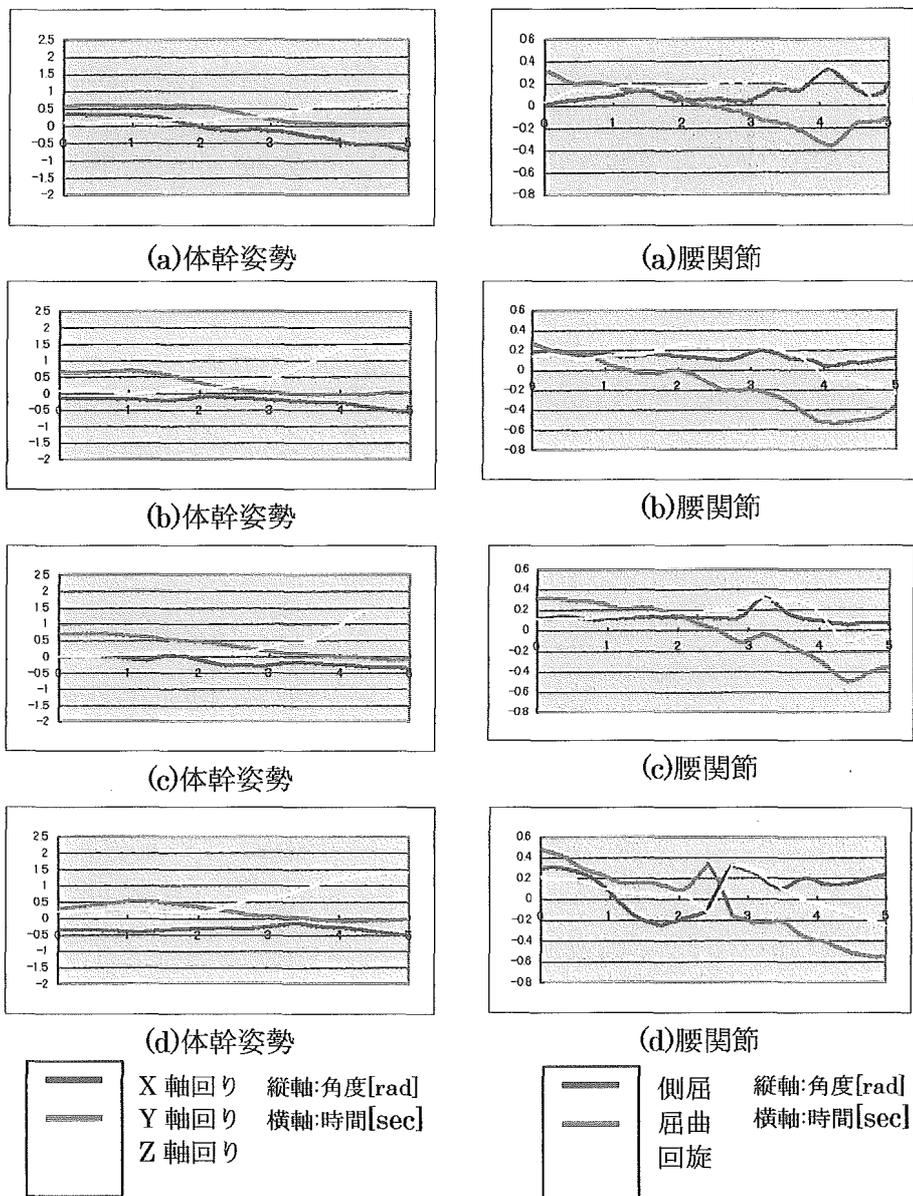


Fig. II.1.1 初心介護者による移乗動作各試行での体幹姿勢と腰関節角度変位

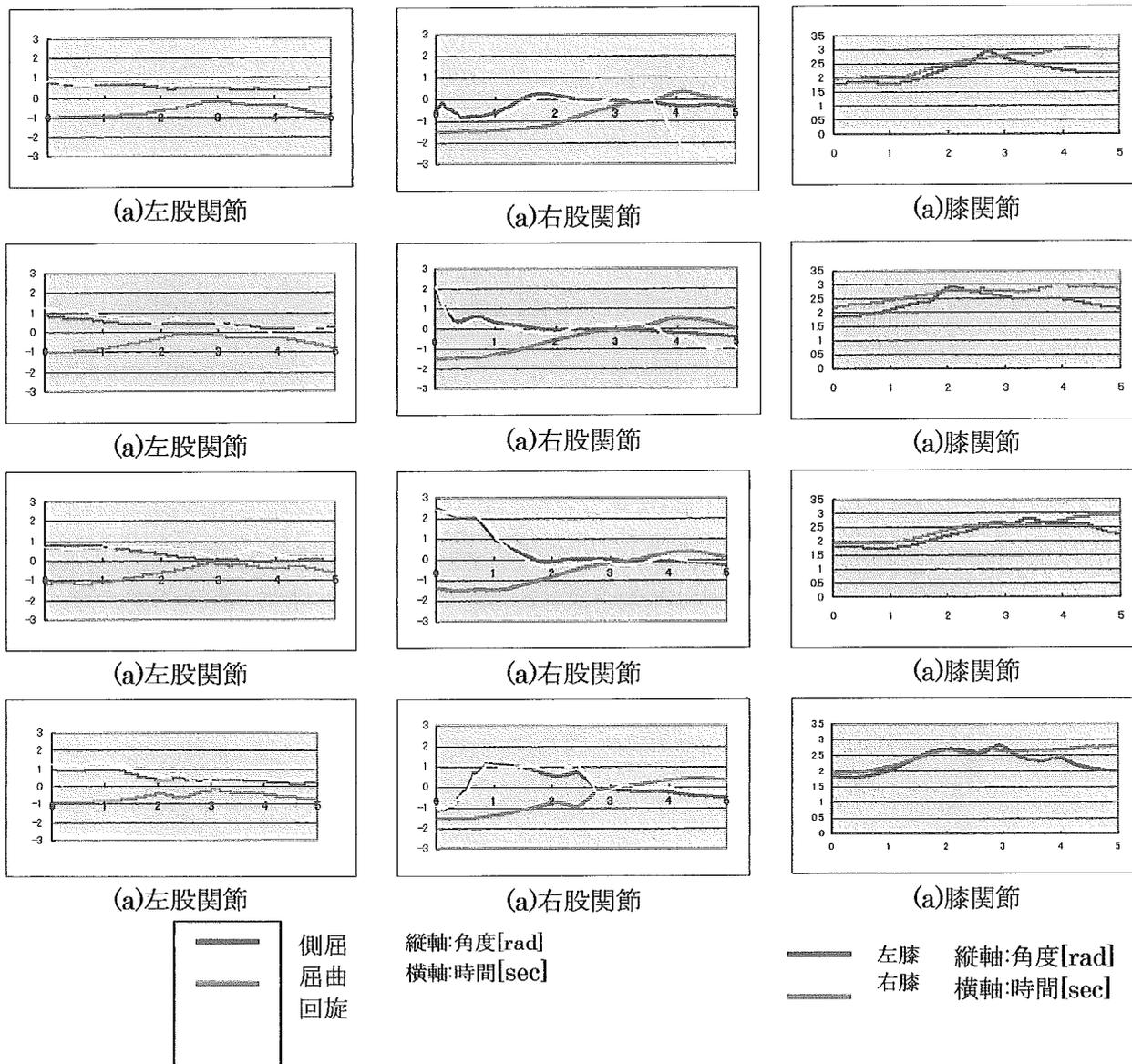


Fig. II.I.2 初心介護者による移乗動作各試行での左股,右股,膝関節角度

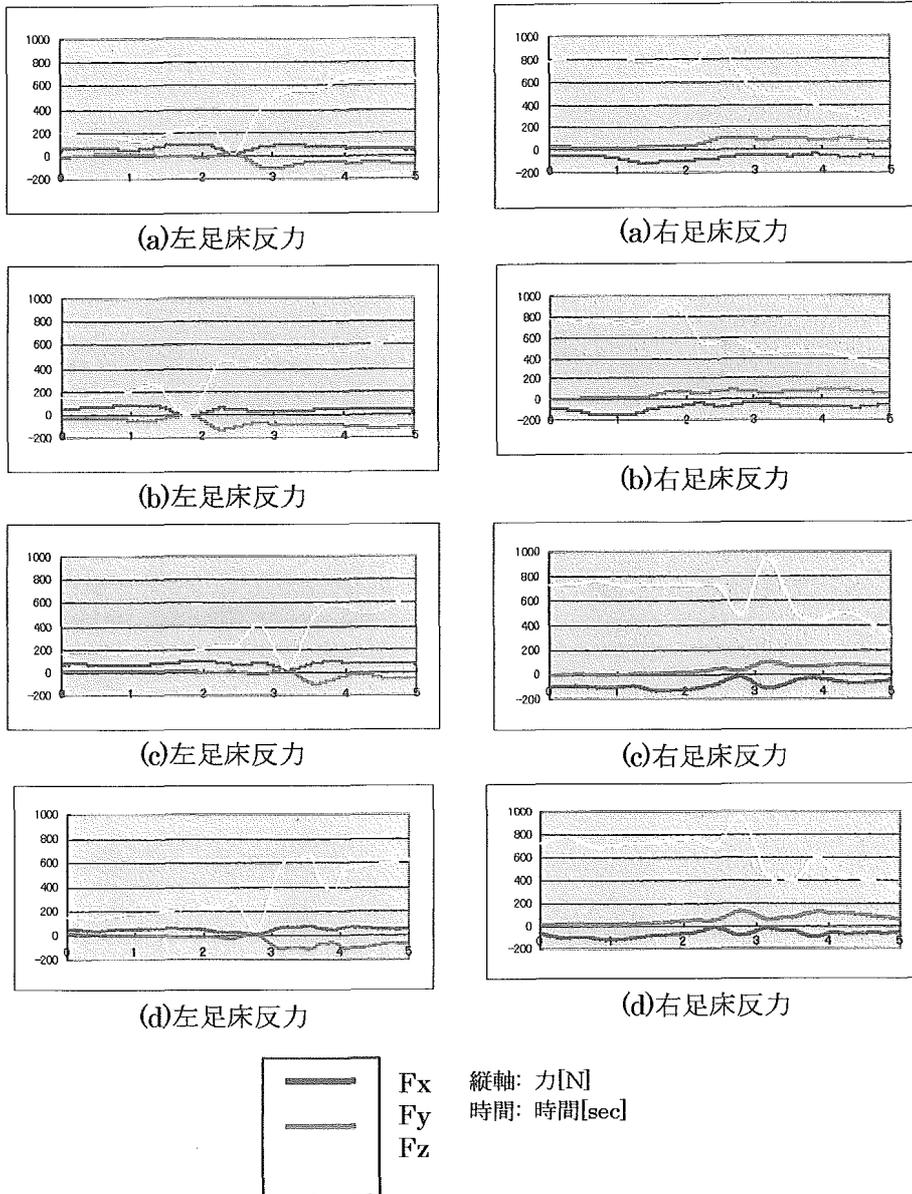


Fig. II.L.3 初心介護者による移乗動作各試行での床反力

II.II. 熟練介護者による試行

熟練介護者による移乗動作中の介護者の体幹姿勢、各関節角度変位,床反力を Fig.II.II.1~II.II.3 に示す。

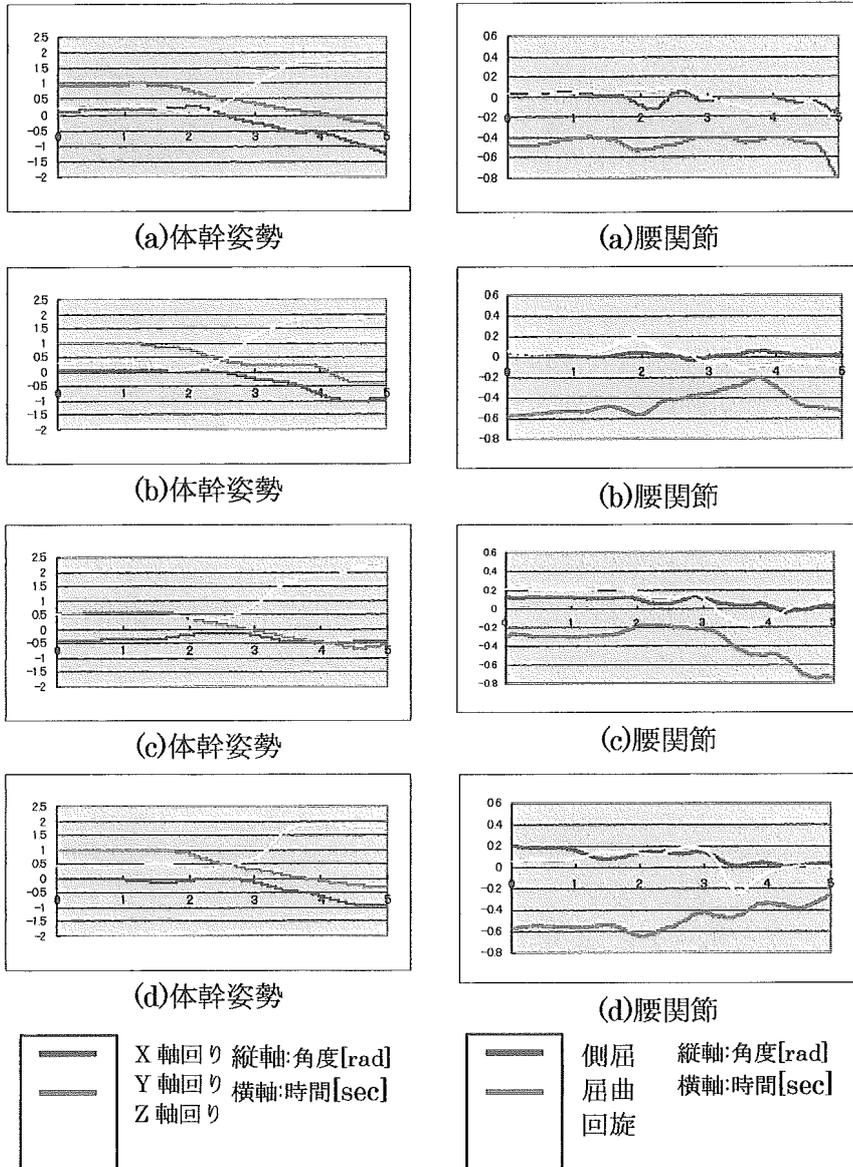


Fig. II.II.2 熟練介護者による移乗動作各試行での体幹姿勢、腰関節角度変位