

### 3.3.5 大電流問題対策その2

超音波モータには電圧と電流の間に位相差があることから生じる無効電流が流れている。この無効電流をなくすことで超音波モータ自体に流れ込む電流量を減らし、ドライバ回路全体に流れる電流をも少なくすることができる。これは電流が流れることで生じる超音波モータの発熱問題にも通じており、重要な改善点であると考えられる。

超音波モータを電気回路素子として考える場合の電氣的等価回路は図 5.21 に示すように L, C, R の要素から構成される共振回路として表すことができる。この直列共振回路の L, C が圧電的機械振動を発生させている。一方, Cd は静電気容量であり, 片側相の表面積と圧電体の厚みより求まる。打削用のインダクタンスを入れることでここに流れる無効電流をなくすことができる。

ここで無効電流と打削電流の間には

$$2\pi fCdV = \frac{V}{2\pi fL_1} \quad (3.1)$$
$$\begin{cases} f & = \text{共振周波数} \\ V & = \text{印加電圧} \end{cases}$$

の関係がある。つまり打削インダクタンスは

$$L_1 = \frac{1}{(2\pi f)^2 Cd} \quad (3.2)$$

という計算式からもとまる。

φ80 用超音波モータをインピーダンスアナライザにより電氣的等価回路としてその値を求めた。その値は共振周波数  $f = 47.0\text{KHz}$ 、 $R=594.708\ \Omega$ 、 $C=96.8746\text{pF}$ 、 $L=116.613\text{mH}$ 、 $Cd=9.42547\ \text{nF}$  であった。式(3.2)より打削用インダクタンスを求めると

$$L_1 = \frac{1}{(2\pi f)^2 Cd} = 1.21\text{mH}$$

となる。つまりこの値のインダクタンスを入れることで無効電流をなくすることができる。この数値をもとに SPICE によりシミュレーションをかけた。その結果を図 2.14 に示す。共振周波数 47KHz (図上青い点線)では実際電流と電圧の位相差は 0 となり、無効電流はなくすることができるが、周波数領域を少しでもずれると途端に位相差が大きくなり、無効電流が発生してしまう。これらの結果から無効電流をなくするためにはこのインダクタンスの挿入とともに共振周波数追従が大きな課題となると判断された。

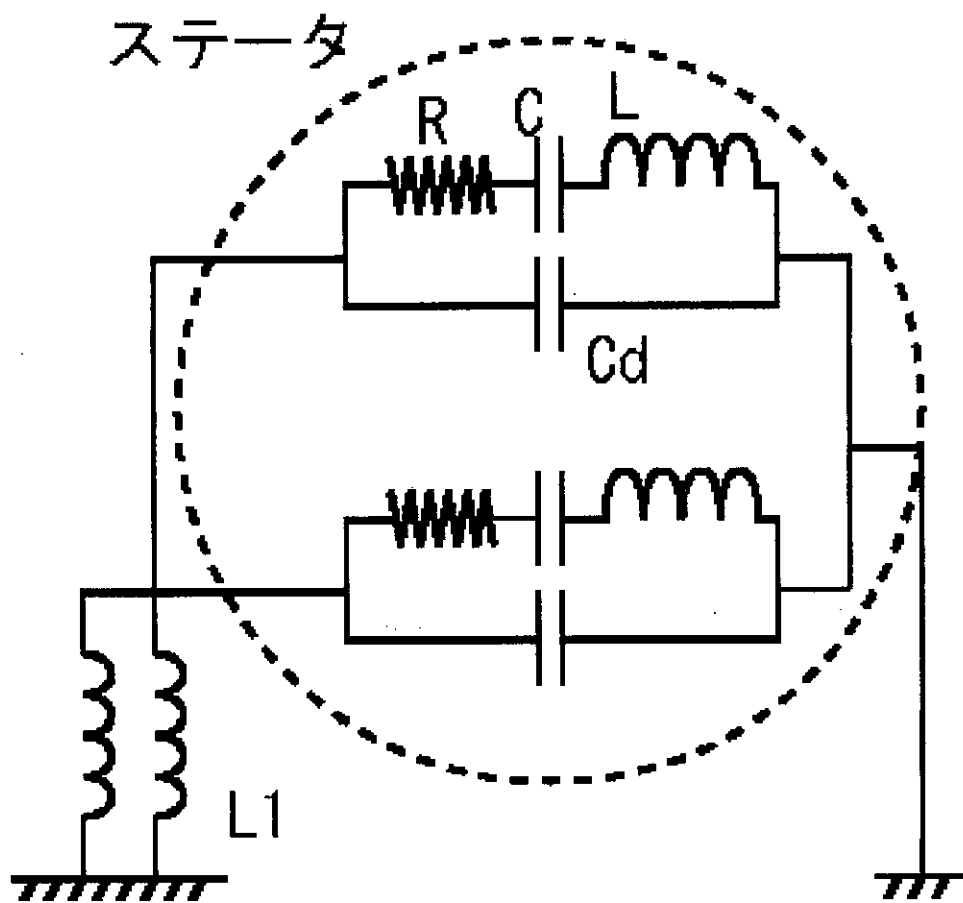


図 2.13 超音波モータ等価回路

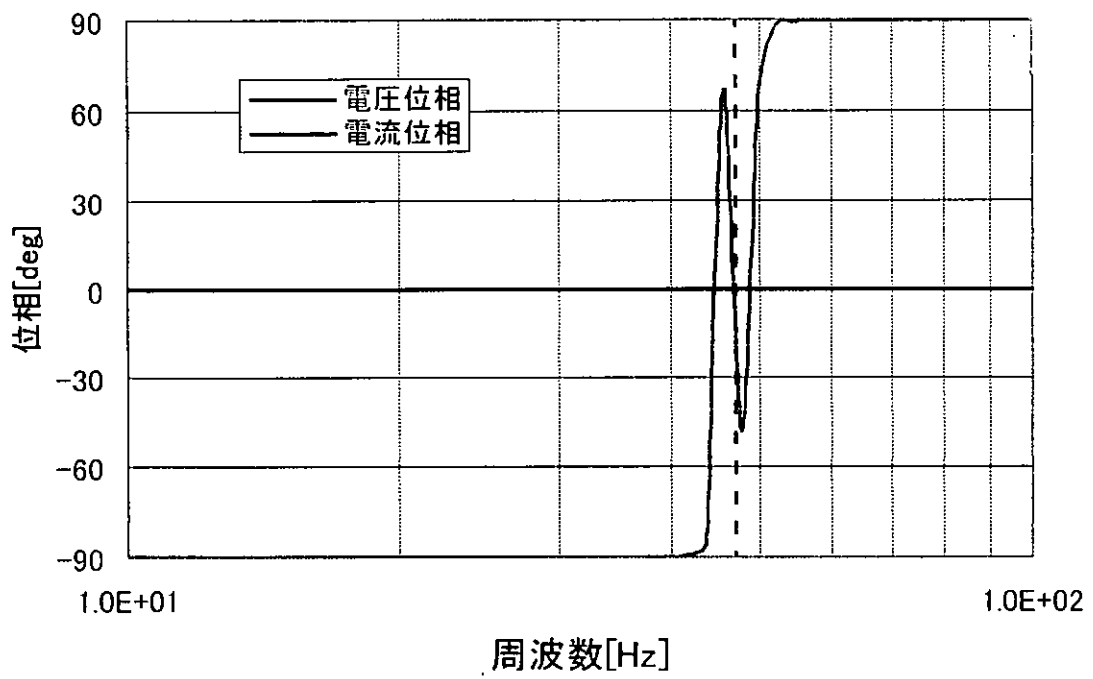


図 2.14 PSPICE によるシミュレーション

## 重心判定システム

B 節で示したような装置により移乗移載動作時の介護者の足裏反力を測定した。ロードセルの値を極力安定させるため、動作を極めてゆっくりと行った。その結果を図 4 に示す。得られたデータの特徴の説明を以下に示す。

### 1. 0~20s

介護者は体を要介護者と密着させるため、右足を要介護者の脚の間に入れる。このため右足は宙に浮くため足裏反力はほぼ 0 となり、一方左足の足裏反力は急激に増える。

### 2. 20~40s

右足を踏み込み要介護者に近づく。最初右足をつき、ここで右足のかかたから足裏反力が生じる。その後踏み込み前傾となるため親指付け根の反力が増大する。

### 3. 40~80s

要介護者の体を介護者自身の体と密着させるために引き寄せる。このとき右足全体に荷重がかかり左足は前傾を支えるよう親指付け根に荷重がかかっている。

### 4. 80~110s

要介護者を引き起こす。このため左足は全体に荷重がかかるようになり、右足の荷重はかかと部分にシフトする。

### 5. 110~130s

要介護者をベッドへと移動させるため左に回転する。この時軸となる左足かかとの荷重は急激に増大する。

6. 130~150s

要介護者をベッドに座らせる。要介護者と離れ足裏反力は安定へと向かう。

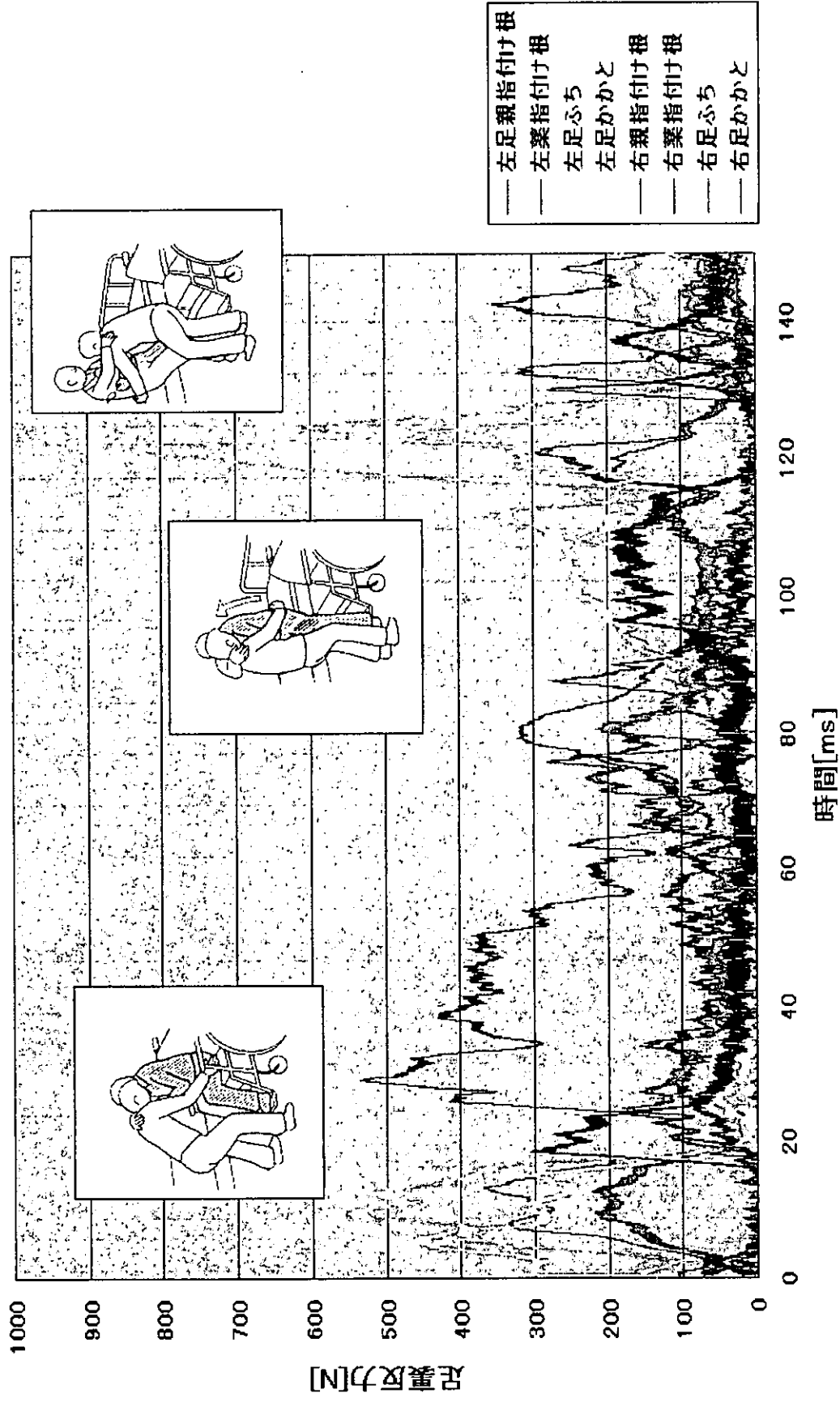


図4. 移乗移載動作時足裏反圧変化図





## D. 考察

### 新ドライバ開発結果

現在パワーアシストスーツに搭載する超音波モータは肘・肩・腰・膝の4箇所、左右にあり、全体で8個である。PASの将来像としてはどんな場所でも装着し、介護動作を行わなければならないため、バッテリー、ドライバ回路などは全て背負わなければならない。このため、ドライバの省スペース化はパワーアシストスーツの機構設計による軽量・小型化と同じく重要なものである。これら8個の超音波モータを駆動するために必要である重量は汎用機器で約408kgである。この結果からも汎用電源では事実上背負うのは不可能である。このため新ドライバの完成がパワーアシストスーツ完成への必要条件となる。

## 重心判定システム

得られた床反力データから各足裏における重心を式(4)(5)を用いて算出した。瞬間荷重がかかった時などロードセルはひずみによる検出を用いているため値がばらつきその計算結果も多少ばらついてしまう。しかし大きな動作ごとにその重心の移動は見て取れる。その様子を図5に示す。

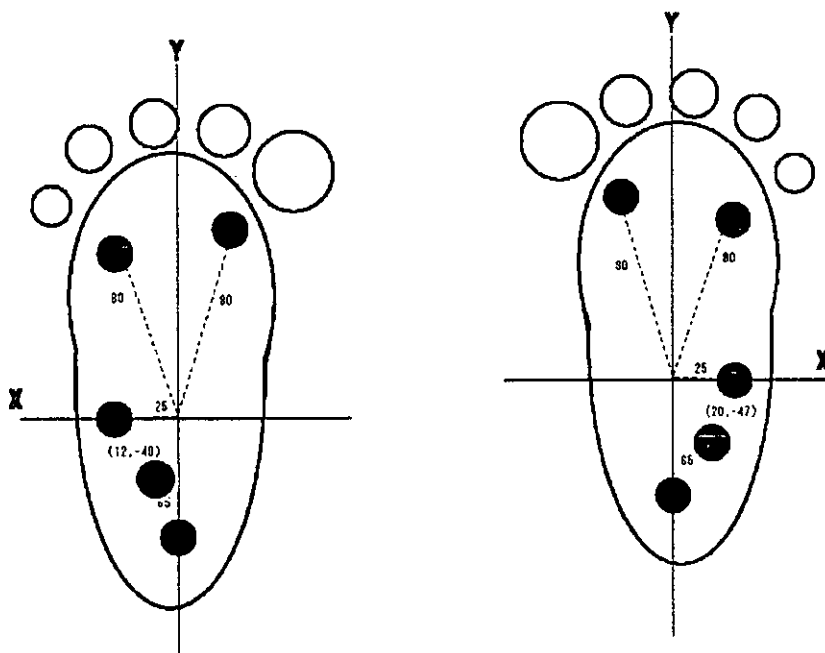


図 5.1 足裏重心・・・0s (初期時)

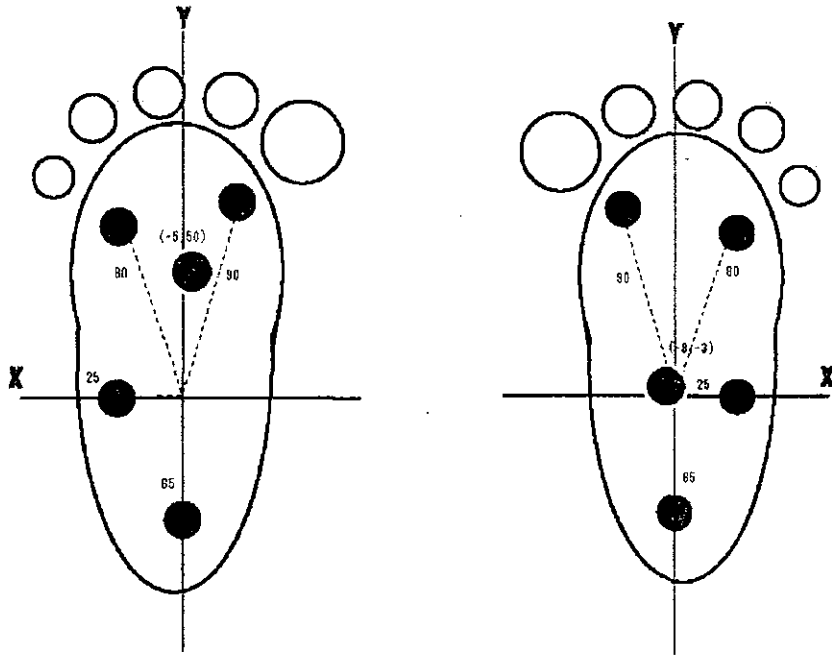


図 5.2 足裏重心・・・10s (右足踏み出し時)

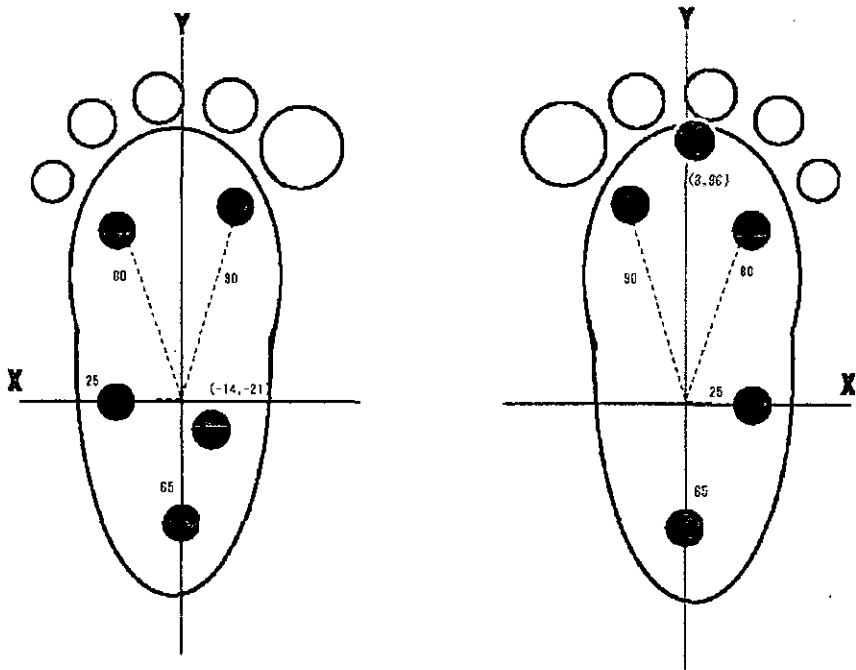


図 5.3 足裏重心・・・30s (右足踏み込み時)

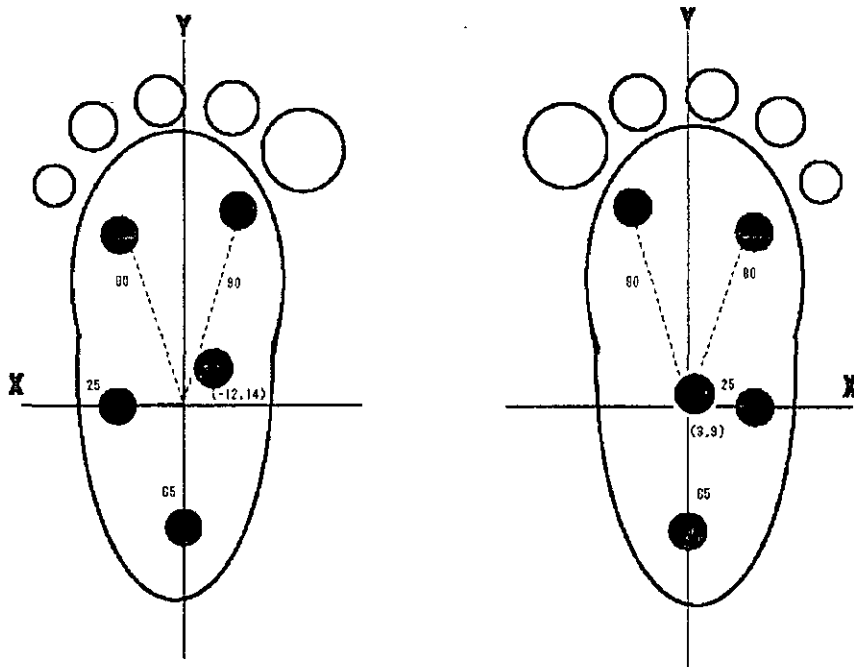


図 5.4 足裏重心・・・60s (要介護者引き寄せ時)

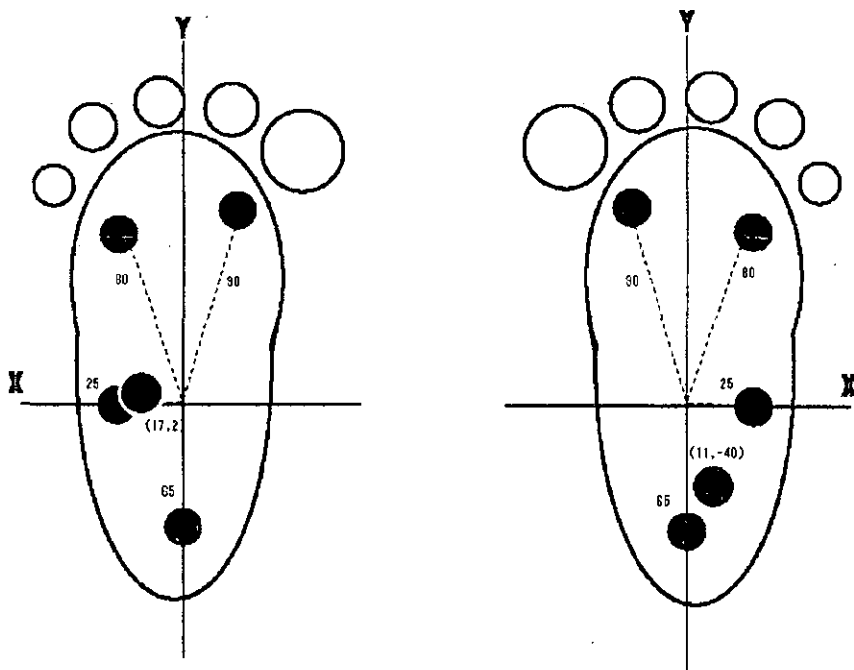


図 5.5 足裏重心・・・100s (要介護者引き起こし時)

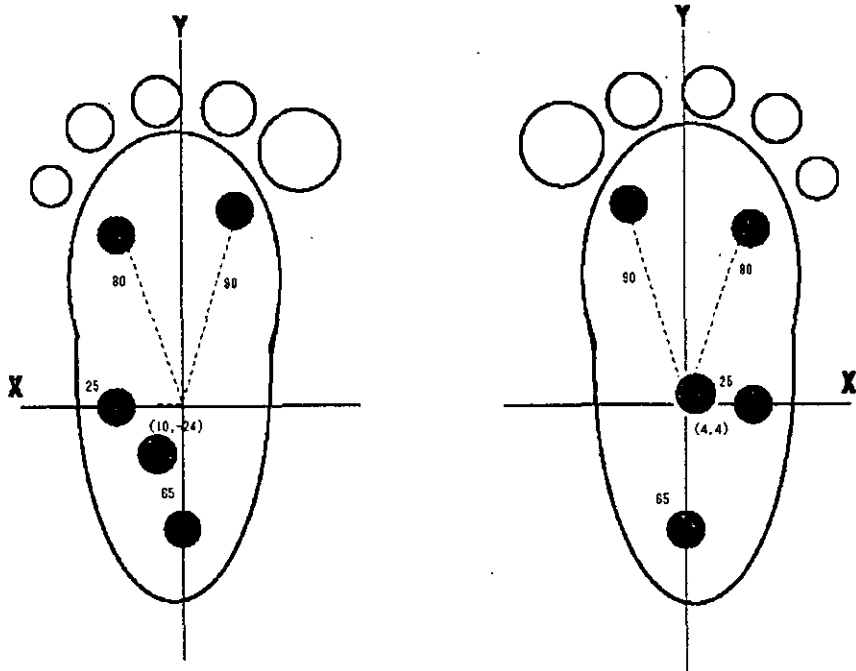


图 5.4 足裏重心 · · 120s (左回轉時)

## E. 結論

ドライバの小型化、及び制御性能の向上を受け、今年度行った制御動作に関しても大幅な精度向上が望め、小型化したことによりパワーアシストスーツへの装備を考慮に入れた設計も容易に可能である。

今回足裏センサから床反力を検出し、それによって体の重心位置を算出することで重心位置の判定を行った。この重心判定と各関節に取り付けられたエンコーダからの回転角度から得られた体の姿勢とその安全性が判定できると考えられる。これによって危険な体勢にあるときにその姿勢を安定にさせるという動作をパワーアシストスーツ側にさせることも可能になると考えている。

厚生科学研究補助金(長寿科学総合研究所)

分担研究報告書

### 機構の設計と強度計算

研究者 桑原 利彦 東京農工大学工学部教授

#### 研究要旨

超音波モータは摩擦力を利用して駆動力を得るアクチュエータである。この駆動原理により、ステータ・ロータ間の接触面での摩擦状態は、モータの性能に大きな影響を及ぼす。そのため、ロータ材の選定、耐摩耗用の摩擦材の選択は非常に重要である。前年度までのロータ材の検討、耐摩耗用の摩擦材の検討により耐久力、トルクの向上を示唆することが出来た。今年度は更なる高トルク化のための有限要素法を用いたステータ形状の解析、超音波モータの押し付け機構に関する検討を行った。これまでの研究でステータを二枚使用したサンドイッチ型にすることでほぼ同体積でトルクを約2倍まで上げることが出来ることがわかっている。そこで今回はステータ一枚での性能の向上をのため、これまで製作してきたモータ( $\Phi 80$ 、 $\Phi 100$ )の機構を見直し、さらに大型のモータ( $\Phi 120$ 、 $\Phi 145$ )、 $\Phi 110$ の大型サンドイッチ型モータを製作しトルクの向上を目指した。これらの検討により大幅にトルクの向上を確認することが出来た。

## A. 研究目的

このパワーアシストスーツに装備するアクチュエータには、高トルクであり、要介護者に恐怖感を与えないために騒音がしないものが求められている。超音波モータは低速・高トルクを出力することができ、ダイレクトドライブに向いており、摩擦駆動を動作原理としているため、ある一定の押し付け力が必要であり、電力停止時に高い保持トルクが作用する。さらに駆動する際には超音波領域の振動を利用しているため、駆動音が極めて静かであり、静粛性に優れているといった特徴を有しています。これらの特徴はパワーアシストスーツを製作する際、軽量及び小型化に有効であり、スーツ自体の姿勢の保持、騒音の防止にもつながる。また、ダイレクトドライブ駆動によって減速機等により遅れが生じないため細かい制御がしやすくやわらかさがある。以上のような利点から、パワーアシストスーツに用いるアクチュエータとして超音波モータは最適であると考えられる。本研究では、この超音波モータの高出力化を行う。



## B. 研究方法

パワーアシストスーツに使用するモータには、高トルクなものが求められている。超音波モータのトルクは、図 4.2 に示すように理論的にステータ直径の 3 乗に比例している。また超音波モータの回転数及びトルク、そして最適押し付け力は、式(4-1)によって表すことができる。そこでこれまでに得られた設計ノウハウ、また今回導出した理論式をもとにして、ステータ直径  $\phi 80\text{mm}$ 、 $\phi 100\text{mm}$ 、 $\phi 110\text{mm}$ 、 $\phi 120\text{mm}$ 、 $\phi 145\text{mm}$  の超音波モータを製作した。これまでは、製作した超音波モータの圧電素子に直接配線をし、電圧を印加していた。しかし、圧電素子に配線した半田付けの部分がステータの振動によって剥離する事が多くあった。そこで今回は、全ての圧電素子にそれぞれの圧電素子に合った電圧印加用のフレキシブル基板を製作し、圧電素子に貼ることでステータの振動による電極の剥離を防ぐようにした。超音波モータを構成する部品の材質を表 4.1 に示す。

ステータ表面の縦振幅  $a_0$

ただし、 $m$ 、 $e_{31}$ 、 $S$ 、 $t$ 、 $f$ 、 $V$  はそれぞれステータ接触部有効質量、圧電定数、圧電素子断面積、圧電素子厚さ、共振周波数、印加電圧である。

$$a_0 = \frac{Ve_{31}S}{\frac{4}{\pi}mtf^2} \quad (4-1)$$

超音波モータ出力トルク  $T$

ただし、 $\mu$ 、 $R$  はそれぞれステーターロータ間摩擦力、ステータ半径

である。

$$T = \mu RN \quad (4-2)$$

最適押し付け力  $N$

ただし、 $w$  はステータ表面に励起される波数である。

$$N = \frac{4}{\pi} m f^2 w a_0 \quad (4-3)$$

超音波モータ回転数  $n$

ただし、 $b_0$  はステータ表面の横振幅である。

$$n = \frac{2b_0 f}{2\pi R} \times 60 \quad [\text{rpm}] \quad (4-4)$$

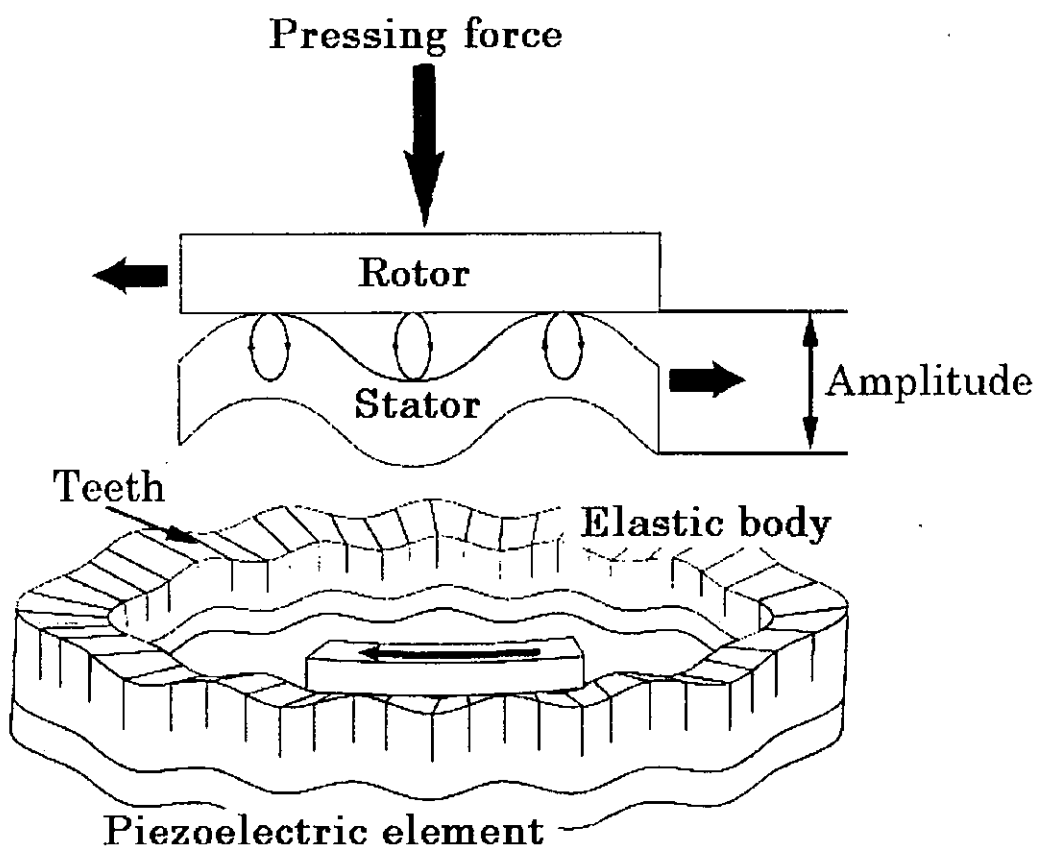


図 4.1 超音波モータ模式図

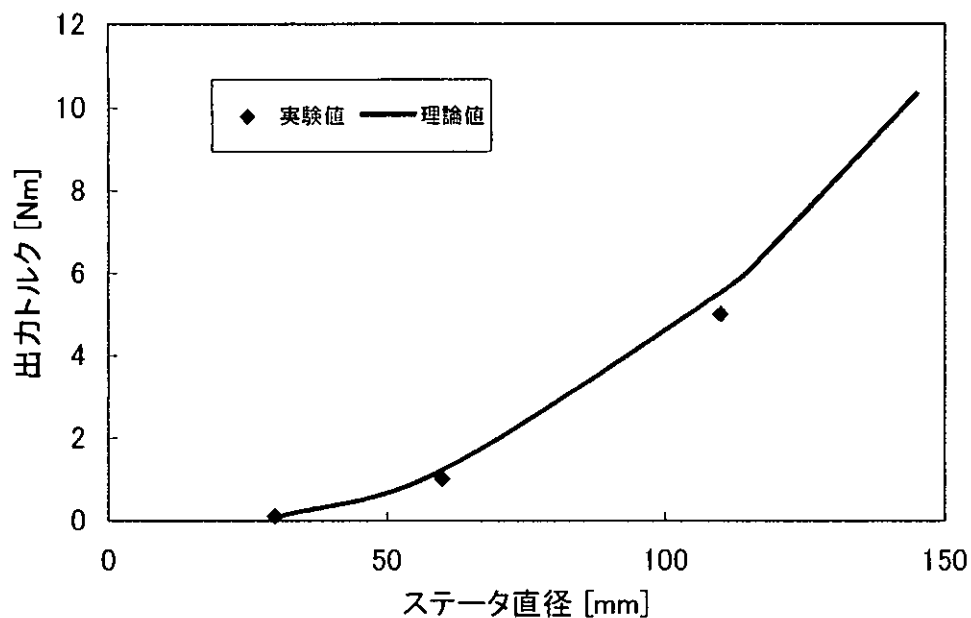


図 4.2 ステータ直径－出力トルク関係

表 4.1 構成部品材料

	Φ80	Φ100	Φ120S	Φ120W	Φ145S	Φ145W	Φ110 サンドイッチ
ステータ	真鍮	SUS303	SUS303	SUS303	SUS303	SUS30	真鍮
圧電素子	N61	N61	N61	N61	N61	N61	N61
ケース	ASSY	ASSY	ASSY	ASSY	ASSY	ASSY	ASSY
ロータ	A2011	A2011	A2011	A2011	A2011	A2011	A2011
分極数	13	12	12	12	15	15	14
圧電素子幅	20	15	10	15	10	20	20