

研究テーマ 多元情報感温感圧センサシステム / 2次元分布型感温感圧複合センサの構築に関する研究 (足底ベクトル荷重センサシステム)
 多元情報感温感圧センサシステム / 積層型感温感圧複合センサの構築に関する研究
 多元情報感温感圧センサシステム / 感温感圧複合センサの構成に関する各薄膜条件の最適化に関する研究

研究員	三寺 正雄	財団法人みやぎ産業振興機構	研究員
	佐々木 祥弘	財団法人みやぎ産業振興機構	派遣研究員
	丹羽 英二	財団法人みやぎ産業振興機構	派遣研究員
	小野寺 隆視	財団法人みやぎ産業振興機構	派遣研究員
	板垣 喜一	株式会社東栄科学産業	企業出向研究員
	菅原 孝則	有限会社豊洋電子精機	企業出向研究員
	矢野 健	財団法人電気磁気材料研究所	共同研究員

1 フェーズ

(1) 研究の概要

フェーズ 前期では、FES 用の立位安定情報を検出するセンサの開発を目標とし、並列型感温感圧複合センサ薄膜の作製および並列型複合センサ素子構造体の作製などの基盤技術の確立を目指した。

並列型複合センサとして、ステンレス製の基板を支える基部を含んだ構造のセンサ素子の設計と作製を行った。センサ素子の基本特性を把握するモデルとして 50mm 長の並列型複合センサ素子を試作し特性評価を行った。その結果、温度センサにおいては、目標値である 1 の分解能よりも優れていることが明らかとなった。歪センサにおいては、4g の分解能をもち 1g の目標値におよばなかったが、両センサとも、実際に検出可能な出力信号を得ることができた。また、ブリッジ回路を構成した歪センサを含むさらに小型の並列型複合素子の完成を目指し、薄膜形状および素子構造の設計を行い、幅 1.84mm、長さ 6.2mm および高さ 1mm の並列型複合センサの作製を行った。

フェーズ 後期は、立位安定情報を検出するベクトル荷重センサの試作および特性評価を行った。人の足裏にかかる荷重の大きさおよび方向を検出するために、靴底に配置するセンサ素子構造体の設計および試作を行い、荷重の方向検知に関する実験を行った。

ベクトル荷重センサ仮仕様としての 8mm 角、高さ 6mm の小型支持体構造の構造解析シミュレーションを行い、センサ出力を得るに十分な歪変化量が得られることを確

かめた。また、荷重の方向(ベクトル)検知に関する実験を行うために 10 倍の大きさのベクトル荷重検知モデルを試作し動作解析を行った。また、センサ出力情報を処理する周辺回路構築の前段階として、アナログ信号をデジタル化しパソコンにシリアル転送する回路の試作を行った。また、ベクトル荷重検知モデルを用いて構造体の非対称性の補正計算を行い、二次元の荷重方向の検出精度に関する補正の検討を行った。さきに設計した素子形状および配置を元に、薄膜素子および小型支持体を構築し、靴底へ配置可能な小型ベクトル荷重センサの試作および特性評価を行った。それらの結果、ベクトル荷重センサの出力結果より荷重印加方向を推測することができることが明らかとなった。

また、加工による特性劣化を生じないことを目的とするダイアフラム型ベクトル荷重センサ素子の開発に着手した。

(2) 研究の目標

感温感圧複合センサ素子の実現に向けた、絶縁膜作製条件の最適化を含む薄膜作製の基盤技術および作製プロセスの確立を目指す。また、2次元分布型感温感圧複合センサを実現するための薄膜パターンの検討および信号処理方法の確立を目指す。

立位安定情報の一つとなる、立ち上がり動作および歩行における人体の荷重移動をセンシングするセンサシステムを実現するために、ベクトル荷重検知モデルの動作解析を行い、加えられた荷重のベクトルに関する検討を行う。また、小型ベクトル荷重センサ素子の構造およびセンサ情報処理を行う周辺回路の検討を行う。

(3) 実施内容

感温感圧複合センサ素子の構造などについての検討を行い、基板とそれを支える基部構造をもつ並列型感温感圧複合センサ素子の設計と作製および特性評価を行った。

ベクトル荷重センサは、荷重の方向の検知を可能とするために、図 1 に示す、四辺にセンサを配置したスパイク状の立体構造とした。構造体の寸法を仮に $8 \times 8 \times 6 \text{mm}$ と設定し、センサ構造体が以下の条件を満足するかについて有限要素法による構造解析シミュレーションを行った。センサを靴底などに配置した場合に、人間の体重が一点に集中した最大荷重を 100kg と仮定し、その荷重によって支持体の最大変形量(歪量)が 2%以内の弾性領域であること。また、フルスケール 100kg の 0.1%である 100g の検知が可能な圧力センサの出力が得られる歪量が生じることとした。

図 4 に示すように、 $8 \times 8 \times 6 \text{mm}$ の大きさの小型ベクトル荷重センサ素子を作製した。センサ素子の作製工程は、 0.2mm の厚さのステンレス基板上にスパッタ装置により絶縁層を形成した後、Cr 薄膜および電極としての Cu 薄膜を形成した。その後、ワイヤー放電加工機による切り出し加工を行い、折り曲げ加工および上下のステンレス板の溶接を行った。

センサ素子ひとつにつき 4 方向上下 2 組ずつ、計 8 個のセンサ薄膜が形成され、1 回の作製工程では 50×50mm の基板上に 5 個のセンサ素子が作製される。それら 2 ロット分、80 箇所のセンサ薄膜の抵抗値を測定し、絶縁不良および断線箇所を調べた。4 方向のセンサ薄膜が正常であるセンサ素子に垂直および斜め方向の荷重を印加し、そのときの抵抗変化量の測定を行った。また、センサ素子の耐荷重を明らかとするために、垂直荷重印加前後の素子の高さの計測を行い、変形が生じる荷重限界を調べた。

ベクトル荷重検知モデルおよび評価装置の作製とセンサ情報の解析を行った。各辺に圧力(歪量)を検出するために市販品ストレインゲージを貼り付けた、80mm 角、高さ 60mm のステンレス板からなる構造体、各辺に荷重を印加するためのビームと分銅、および電源・デジタルマルチメータ・パソコンより構成されている。構造体に 500g おきに 0~2000g の荷重の印加を行い、計測したストレインゲージの抵抗変化量より歪量を算出した。四辺の歪量の関係より荷重の印加方向の推測を行った。また、垂直荷重印加の結果をもとに補正係数を求め、斜め荷重印加の測定結果に対する補正を試みた。

これまで試作したスパイク状の小型ベクトル荷重センサ素子の耐荷重計測を行った結果、数 kg の垂直荷重印加において変形が生じることが明らかとなった。靴底にセンサ素子を配置し、人の体重および方向を加えられた場合に数 10kg の荷重に耐えうる必要がある。耐荷重を増加させる方法として、薄膜センサを構築する基板材料の厚さを増加させることが考えられる。しかし、先の小型素子はその作製過程において折り曲げ加工が必要であり、折り曲げ加工を行う上で基板の厚さは 1mm 以下程度に制限されるため、数 10kg の耐荷重が期待できない。

そこで、折り曲げ加工を必要とせずベクトル荷重を検出するセンサ素子構造の検討を行った結果、スパイク状の小型センサ素子を展開し、その中央荷重印加部にスタッドを取り付けた構造のダイアフラム型ベクトル荷重センサ素子が、耐荷重を増加させることに有効であると考えた。ダイアフラム型ベクトル荷重センサ素子は、半径 10mm の円盤の 4 箇所を切り抜いた構造とした。耐荷重の計測およびベクトル荷重の検出を調べるために、ダイアフラム上に市販品ストレインゲージを貼り付け、その抵抗変化の計測を行った。

センサより出力される信号を A/D コンバータによりデジタル化し、ワンチップマイコンにより数値化処理を行った後、シリアルレベルコンバータ IC を介して汎用 RS232 ケーブルによりパソコンに転送する回路の試作を行った。10bit の分解能をもつ A/D コンバータ回路を内蔵するワンチップマイコンを用い、アナログ電圧変化を収集し数値変換を行う回路およびマイコンプログラムの作成を行った。収集する信号は、ベクトル荷重センサ信号の最小単位である 4ch とし、ほぼ同時に処理できるようにした。数値化した信号は RS232C のシリアル転送によりパソコン上にて表示およびファイル化を行うようにした。

(4) 結果

立位安定情報は、クローズドタイプ FES の高度化のために、人の立ち上がり動作あるいは歩行時における体重の中心位置および体重の移動方向に関する情報として必要となる。そのような情報のセンシングとして、床に設置したセンサ、あるいは靴の中敷きに配置したセンサなどが用いられているが、検知する動作範囲が制限されること、センサの耐久性に乏しいなどの問題がある。また、荷重の大きさおよび分布の検知は可能であるが、荷重の方向を直接検知することができない。そのような問題点を解決するために、耐久性を有するセンサ構造体に形成、靴底に複数配置するベクトル荷重センサを考えた。

小型ベクトル荷重センサ素子

ベクトル荷重センサは、荷重の方向の検知を可能とするために、図 1 に示すように四辺にセンサを配置した立体構造とした。構造体の寸法を仮に $8 \times 8 \times 6 \text{mm}$ と設定した。センサ構造体について有限要素法による構造解析シミュレーションを行った結果を図 2 および図 3 に示す。図は、センサ構造体を四分割した一部を示しており、矢印で示す構造体底面の中心部に、荷重を加えたときの圧力の分布を表している。図 2 の丸印で囲んだ、構造体の頂点部に最も大きな圧力が集中し、 100kg の荷重を加えた場合には 450MPa (約 45kg/mm^2) の圧力が加わることとなる。歪量は最下部付近が最大となり、約 0.48% の歪が生じているという計算結果が得られた。また、図 3 の矢印方向に 100kg の荷重を加えた場合の各部の歪量を調べた結果、頂点付近の面において 0.12% の歪が生じるという計算結果が得られた。その部分に圧力センサを配置した場合、 0.12% の歪量に対する圧力センサの抵抗変化量は、歪感度、歪量および初期抵抗値の積より算出される。歪感度を 6 および初期抵抗値を 1k とした場合の抵抗変化量は約 100 となることから、 0.1kg あたりの抵抗変化量は約 0.1 と計算される。この値は通常の抵抗測定装置において十分検知可能な値であると推測できる。

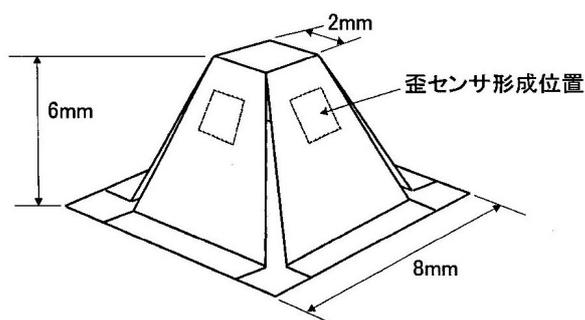


図 1 ベクトル荷重センサの構造

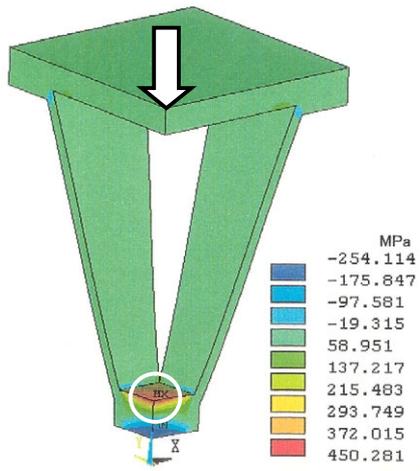


図2 シミュレーション結果

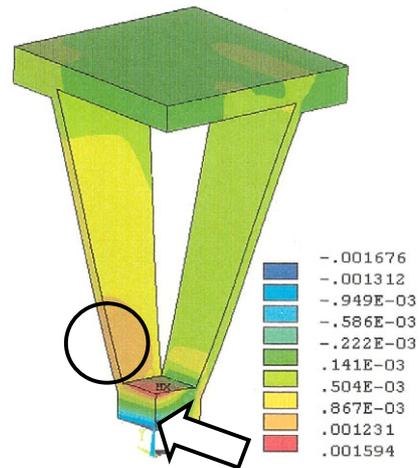


図3 シミュレーション結果

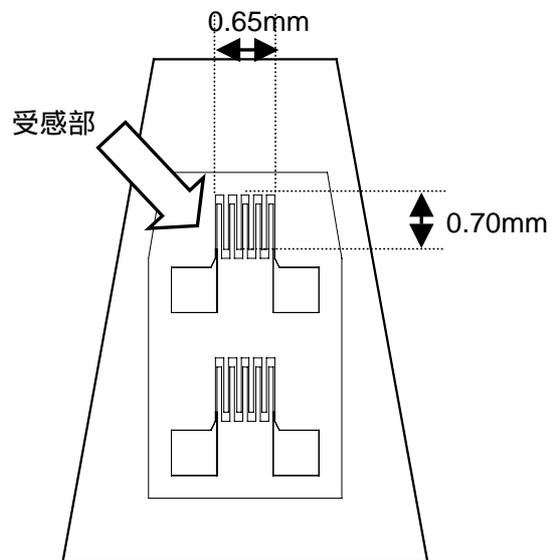
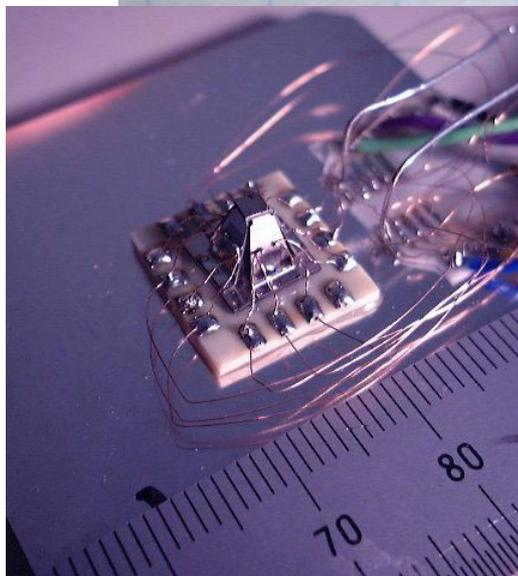
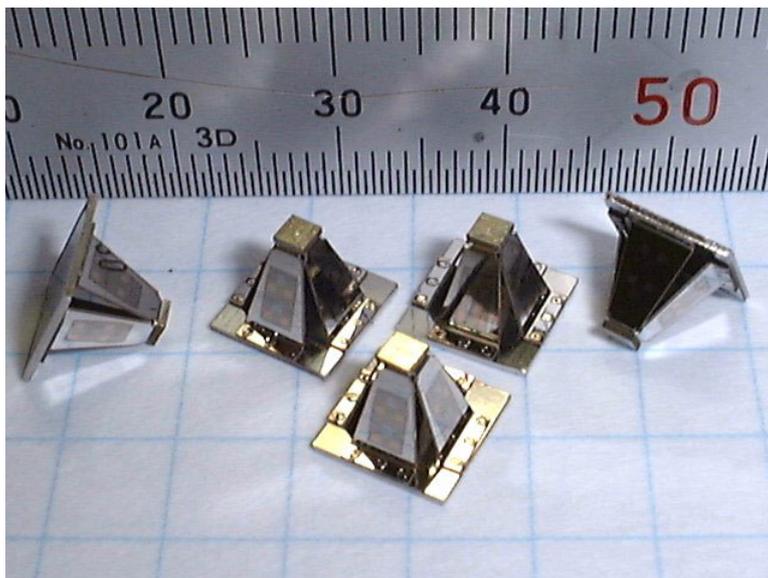


図4 小型ベクトル荷重センサ素子

さきに設計した結果を元に、小型ベクトル荷重センサ素子の作製を行なった。0.2mmの厚さのステンレス基板の上に絶縁層を形成した後、図4に示す形状のCr薄膜および電極としてのCu薄膜を形成した。その後、ワイヤー放電加工機による切り出し、折り曲げおよび上下のステンレス板の溶接を行い小型ベクトル荷重センサ素子とした。センサ素子に測定用配線を施し、素子の各辺におけるセンサ薄膜の抵抗値を測定した結果、2ロット(10素子)を通じて約60～数10kの範囲で抵抗値にバラツキが見られた。個々の素子において四辺の抵抗値がほぼ同じ値を示し測定可能な素子について荷重印加に対する抵抗変化の測定を行った。垂直荷重は、圧縮試験機を用いて5kgまで連続的に加え、そのときの抵抗変化量をデジタルマルチメータにより測定した。

図5は、垂直に印加した荷重に対する各辺のセンサ薄膜の抵抗変化を測定した結果を示す。図において、中心をゼロ荷重として各辺の方向へ荷重が増加するようプロットしている。構造体の工作精度に伴う非対称性、あるいは荷重印加方向のずれなどから生じると考えられる各辺の出力の違いが見られるが、荷重の増加に対してほぼ直線的に抵抗値が増加していることがわかる。センサ素子に斜め方向の荷重を印加した結果を図6に示す。図の矢印方向より荷重を印加した場合、荷重を印加した面のセンサ薄膜の抵抗変化は最も小さく、上側では最も大きな抵抗変化が見られる。この結果より、センサ薄膜各辺の抵抗変化を計測することにより、荷重印加方向を推測することができると思われる。

小型ベクトル荷重センサ素子の耐荷重に関する測定を行った。垂直荷重印加後の素子の高さを計測し、その高さの減少により素子が耐えうる最大荷重を調べた。その結果、センサ素子の初期高さ6.5mmに対して5kg以上の荷重を印加した場合には0.003mmの減少が見られ、10kgにおいては0.01mm以上の減少が観測された。センサ素子の頂点部に応力が集中し、特に折り曲げ加工された部分に塑性変形が生じたと考えられる。先に行った有限要素法によるシミュレーションにおいては、耐荷重は十分であるとの結果を得たが、実際には折り曲げによる部分的な厚さの変化および溶接による強度変化が生じたため耐荷重が減少したと考えられる。耐荷重を増加させる方法として、センサ素子を構成する板材の厚さを増加させることが考えられるが、実験室における精度の高い加工は容易ではない。そこで、(4)-1-3項に示す折り曲げ加工を必要としないダイアフラム状のセンサ構造体について検討を行った。

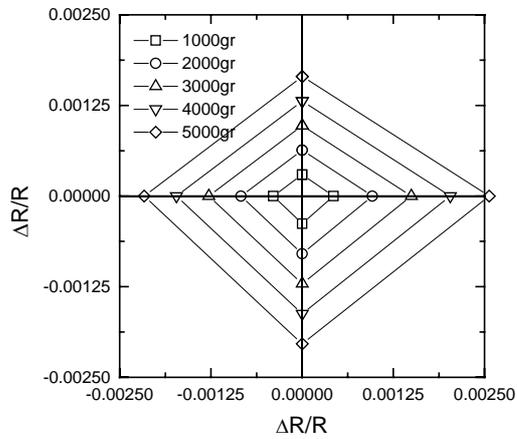


図5 垂直方向荷重印加結果

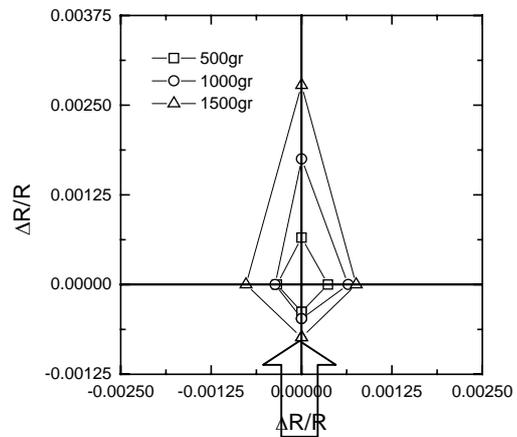


図6 斜め方向荷重印加結果

ベクトル荷重検知モデルの動作解析

小型ベクトル荷重センサ素子が荷重の方向(ベクトル)を検知可能であることを確かめるために、図7に示す検知モデルの作製と動作実験を行った。先に設計した小型素子の10倍の大きさをもつ構造体を作製し、構造体の各辺に市販品ストレインゲージを貼り付け圧力(歪量)を検知できるようにした。

構造体に対して垂直方向(Z方向)の荷重印加を行った結果、各辺に生じる歪量はほぼ一様であることがわかった。図8は構造体の上方より見下ろし、中心部より各辺に向かう方向を、各辺に生じる歪量の増加方向として示している。荷重の増加に伴い、ほぼ一定の増加を示し、各辺の歪量を結んだ図形は正方形となる。したがって、検知モデルの四辺のセンサ出力が等しい場合にはZ方向の荷重が加えられたと推測できる。プロット図は下側に伸びた形状となっており、この結果は、構造体の加工精度のばらつきに起因するものと考えられる。そこで、構造体の非対称性を理想形である正方形となるよう補正係数を算出し、実測値にZ荷重補正係数による補正を行った結果では正方形のプロット

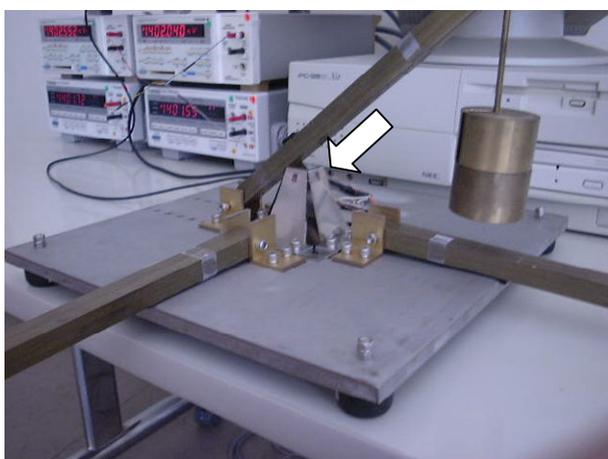


図7 ベクトル荷重検知モデル

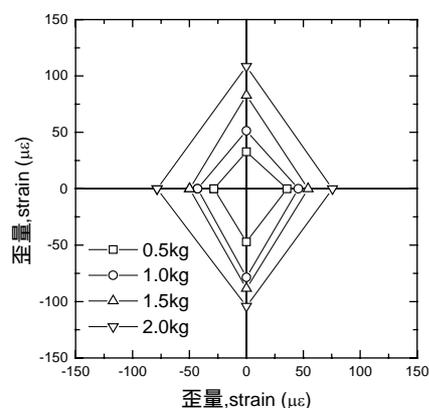


図8 垂直方向荷重印加結果

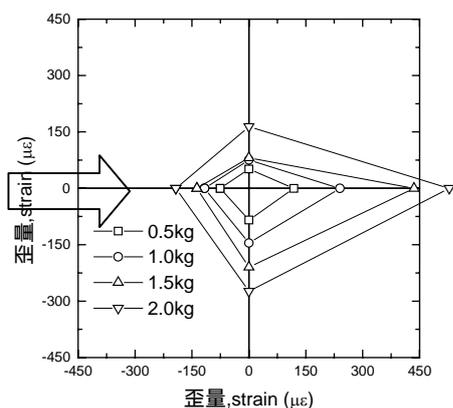


図9 斜め方向荷重印加結果

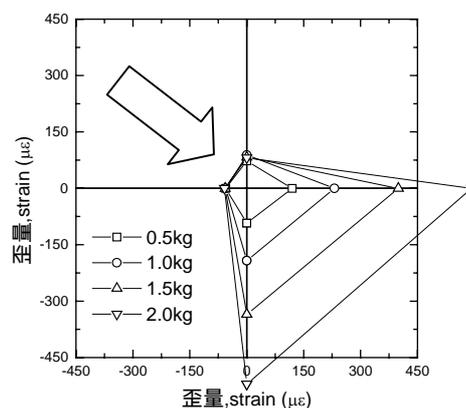


図10 角斜め方向荷重印加結果

図となることが明らかとなった。構造体のひとつの辺に図9の矢印方向(斜め方向)に荷重の印加を行った結果、荷重を加えた辺の歪量が小さく、荷重の印加方向の対辺に生じる歪量が大きく、かつ直交する二辺の歪量が等しく、図形は菱形状となる結果が得られた。したがって、対面する辺のそれぞれの歪量の比を比較することにより、XあるいはY方

向に荷重が加えられたと推測できる。

図 10 に示す構造体の角に荷重の印加を行った(角斜め方向)結果、荷重を印加した角方向を上底とし、対称形状の台形の図形となる。隣接する辺の歪量の等しい組の歪量の小より大なる方向へと荷重が印加されていると推測できる。

それらの実測値に、先に算出したZ荷重の補正係数を与えた場合の結果、実際に印加した荷重の方向と検出した荷重の方向の角度誤差が改善され、その角度誤差は半分以下に改善され、荷重を加えた方向を推測する基礎技術を確立した。

ダイアフラム型ベクトル荷重センサ素子

耐荷重を容易に増加させることが可能なセンサ素子構造として、図 11 に示すようなダイアフラム型ベクトル荷重センサの試作を行った。このタイプの素子は、図に示すように、円盤状の中心に荷重を受けるためのスタッドを固定し、X および Y 方向の変形を妨げないように 4 本のビームで構成されている。このような構造では、必要となる加工は切り出し加工および溶接であるため、比較的強度が加工に依存しないと考えられる。また、耐荷重を増加させるための板厚を容易に変更できる。ダイアフラムの板厚を 0.5, 1.0, 1.5mm として、つま先およびかかととの組を三種類試作した。次にダイアフラムのビーム部分四箇所に市販品ストレインゲージを貼り付け、荷重変化に対するストレインゲージの抵抗変化の測定を行った。板厚が 1.0mm のダイアフラムのスタッド上に 10kg 単位の分銅を載せ、最大 60kg までの抵抗変化の計測を行った結果の一部を図 12 に示す。各辺に対してほぼ均等な抵抗変化が生じていることがわかる。両センサ素子とも 60kg の最大荷重印加後に 0.2%程度の変形が生じたが、この変形は塑性変形というより、むしろ、溶接部等の微小なゆがみが縮小する初期変形と考えられる。

以上の結果より、ダイアフラム型センサ素子構造体は、十分な強度をもち、荷重のベク



図 11 ダイアフラム型ベクトル荷重センサ素子

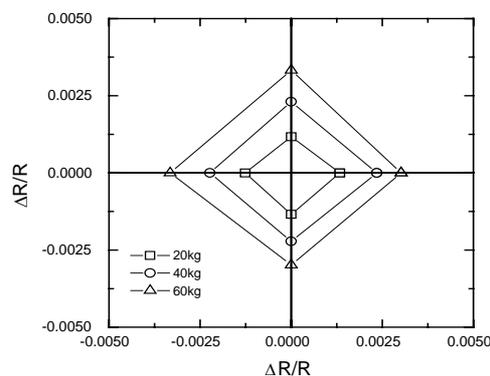


図 12 垂直方向荷重印加結果

トルが検知できることから、立位安定情報のひとつとなる靴底圧を検出するセンサとして有効であることがわかった。

2 フェーズ

(1) 研究の概要

「フィードバック FES 制御により足漕ぎ車椅子を走行させ、目的の場所で起立および数歩の歩行を可能とするインテリジェント FES」への応用に向けて、立位安定情報を検出することを目的とする靴底ベクトル荷重センサの試作および特性評価を行った。前期においては、ダイアフラム型ベクトル荷重センサ素子を用いた靴底ベクトル荷重センサの設計と作製を行った。まず、センサ素子となるストレインゲージの最適配置を行うにあたり、センサ構造体の構造解析シミュレーションを行い、その結果をもとに素子を配置した構造体を靴底に装着し、起立や歩行に伴う靴底のベクトル荷重の変化を測定した。その結果、床反力計では検出できない、各センサ素子が配置された位置での床反力（足底圧）ベクトルを検出することができた。後期では、靴底ベクトル荷重センサシステムを展示会などに出展し、来場者を被験者とした歩行状態のデータ収集を行った。その結果をもとに、歩行パターンの分類について考察を行い、歩行の癖などを分類することができた。また、センサ信号をリアルタイムで検出する信号処理回路の作製と調整を行った。

従来、靴底圧の計測に用いてきた固定装置と異なり、被験者が信号処理装置を背負い（携帯型）無線伝送により計測結果をリアルタイムで、離れた場所で観測できる靴底ベクトル荷重センサシステムを構築した。

(2) 研究の目標

立ち上がり動作および歩行における人体の足底圧をセンシングするセンサシステムの開発を行う。ベクトル荷重センサ素子を配置した靴の作製と歩行時におけるベクトル荷重の検出により、歩行状態におけるベクトル荷重の変化、および重心位置などの推測を行い、電気刺激フィードバック制御のための情報を提供可能となるシステムを構築する。また、ベクトル荷重センサ素子の情報処理を行う周辺回路を作製する。

(3) 実施内容

ベクトル荷重センサの基本構造となるダイアフラム型センサ構造体の荷重に対する応力分布およびひずみ量を有限要素法による構造解析シミュレーションにより明らかとした。その計算結果をもとにベクトル荷重の検出を行うためのセンサ配置を決定した。市販されている靴にダイアフラム型ベクトル荷重センサ構造体を貼り付け、実際に歩行を行った場合のセンサ出力の計測を行い床反力計の検出結果と比較を行った。さらに、左

右のベクトル検出より得られるベクトルの中心位置の計算を行い、重心位置の推測を行った。

複数の被験者の異なる足寸法に対応できるよう、ベクトル荷重センサを配置した履物の改良を行った。展示に用いる靴底ベクトル荷重センサの検出結果を表示するプログラムの作成を行い、試験計測を行った。靴底ベクトル荷重センサが検出した進行方向、左右方向および垂直方向の出力を表示するプログラムを作成した。また、左右方向の出力結果をもとにベクトルの中心位置の計算を行い、歩行時のバランス変化を表示するプログラムを作成した。さらに、左右のつまさき、かかとなどの詳細な接地状態を個々に表示するためのプログラムを作成した。表示プログラムは、歩行データの解析と被験者への試験歩行結果の解説に用いた。

フェーズ 後半では、携帯型センサ信号処理回路に着手し、靴底ベクトル荷重センサにより検出されたセンサ出力情報を、離れた場所でリアルタイムに表示および解析を行うための信号処理回路の設計と作製を行った。

(4) 結果

フェーズ の期間内において、立位安定情報を検出することを目的とするベクトル荷重センサの基本実験を行った。その結果、靴底圧を検出するためのセンサ構造として、ダイヤフラム型が有効であることが明らかとなった。フェーズ においては、靴底にセンサを配置し、実際に歩行を行なった場合のベクトル検出実験を行った。また、よりスムーズな計測を行うための携帯型信号処理回路の作製に着手した。

ダイヤフラム型ベクトル荷重センサ素子の構造解析

ベクトル荷重センサの基本構造となるダイヤフラム型センサ構造体の荷重に対する応力分布およびひずみ量を有限要素法による構造解析シミュレーションにより明らかとした。その計算結果をもとにベクトル荷重の検知を行うためのセンサ配置を決定した。

図 13 に示すように、ダイヤフラム型センサ素子は、4 箇所を切り抜いた厚さ 1mm、半径 10mm の円盤および中央に取り付けたスタッドからなる。また、全ての材質は変形に対する耐久性に優れたバネ材料(SUS329J4L)とした。ダイヤフラムの外周部および

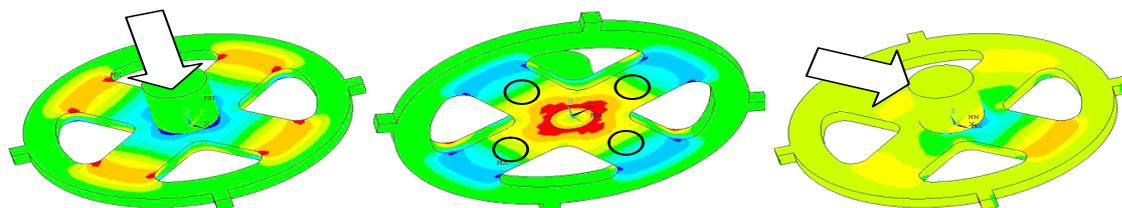


図 13 変形シミュレーション結果(色が濃いほど荷重が大きい)

び外周部の突起を固定点とし、スタッド頂点に 100kg の荷重を加えた場合の構造解析計算結果を図 13 に示す。垂直方向に荷重を加えた場合、左および中央の図に示されるように、センサ素子のスタッドと円盤が接する部分の裏面および、表面のビームが外周部に接する部分に荷重が集中している。図中、丸印で示した場所において、中心から外側へ向かうひずみが生じており、その場所へセンサを配置することにより不要な方向のひずみの影響を含まず、精度のよいひずみ検出を行うことが可能となることがわかる。右図は、真横より荷重を加えた場合の計算結果である。この図から、スタッドは倒れるように変形し、荷重を加えた方向と逆側のスタッドと円盤が接する裏面に最も大きなひずみが生じ、荷重印加方向と直行するビームでは左右対称なひずみが生じており、荷重の印加方向によりひずみの生じ方が異なることがわかる。これらの結果、ビームに生じるひずみ量の分布は荷重の印加方向に対し、それぞれ異なる変化がみられ、図に示した丸印部分 4 箇所のビーム中央部にセンサ素子を配置することにより、荷重の印加方向を効率的に推測できると考えられる。

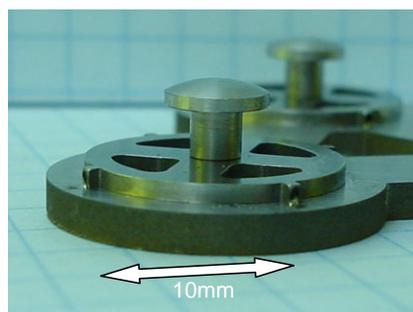


図 14 ダイアフラム型ベクトル荷重センサ素子

図 14 は、作製したセンサ構造体の一部である。センサを配置するビームの変形を妨げないような場所において、ベース板と溶接加工を施している。溶接は、ビーム溶接とし、構造体に余分な加熱を与えない工夫をした。

センサ構造体

ダイアフラム型ベクトル荷重センサ構造体をつまさき用およびかかと用の大きさの異なる三角板に溶接し、図 15 に示すセンサ構造体を作製した。構造体の基本動作を

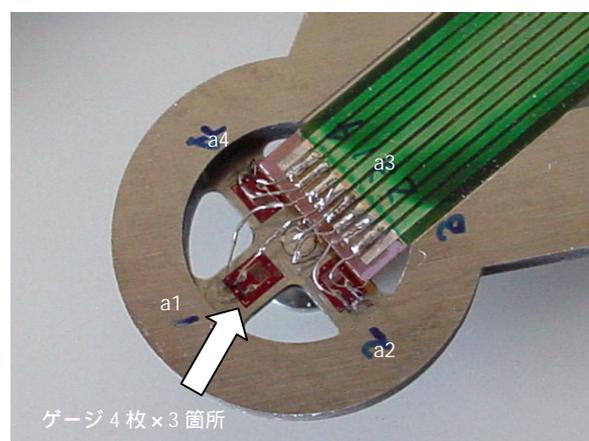
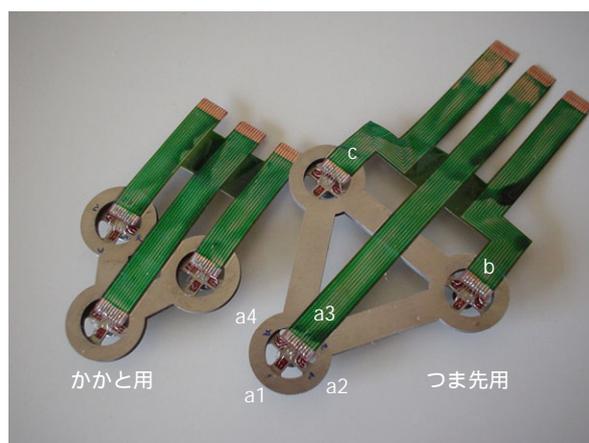


図 15 センサ素子構造体

確認するために、市販品ストレインゲージをセンサ素子として用いた。先のシミュレーション結果をもとに、市販ゲージを中央よりのビームに貼付け、変形を妨げないよう薄いフレキシブルケーブルにて配線を行った。市販ゲージの出力信号は、ブリッジボックスを中継してデータレコーダに接続し、それぞれのひずみ量の同時計測を行えるようにした。

センサ素子構造体の三角の各頂点を a, b, c とし、それぞれのビームに貼り付けたストレインゲージの出力を a1, a2, a3, a4, ... c1, c2, c3, c4 と表したとき、X 方向(かかとからつまさきへ向かう方向)の出力は荷重印加方向の 2 辺の差より検出され、式(1)より求められる。Y 方向の出力は荷重印加方向と直交する 2 辺の差からなり、式(2)となる。さらに Z 方向の出力は 4 辺の総和からなり、式(3)より求められる。

$$X = \{(a3 - a1) + (b3 - b1) + (c3 - c1)\} \quad \dots (1)$$

$$Y = \{(a2 - a4) + (b2 - b4) + (c2 - c4)\} \quad \dots (2)$$

$$Z = \{(a1+a2+a3+a4) + (b1+b2+b3+b4) + (c1+c2+c3+c4)\} \quad \dots (3)$$

靴底ベクトル荷重センサ(運動靴タイプ)

センサ素子構造体を市販の靴に固定し、
 図 16 に示す靴底ベクトル荷重センサを製作した。靴底ベクトルセンサのつまさき 24 箇所、かかと 8 箇所のストレインゲージを図 17 に示す、32ch 分のブリッジボックスおよびレコーダに接続した。靴底ベクトル荷重センサを装着し床反力計の上を歩行した時のセンサ出力および床反力計出力を同時に計測した。図 18 は、左足側のセンサ出力を示しており、測定時間を横軸に、センサ出力および床反力計出力を縦軸として示した。図の(i)~(iii)はそれぞれ、進行方向に対する反力、横方向に対する反力、および床に垂直な方向に対する反力を示す。歩行試験は、両足で起立した後、左足から踏み出し 4 歩の歩行を行った。図中、大きな出力が見られる部分が、左足接地の状態である。靴底センサの出力は床反力計の出力とほぼ同じ傾向の変化を示している。測定開始から 3 秒間は X,Y,Z 方向とも出力が見られることから、両足で起立した状態ということがわかる。左足を踏み出す



図 16 靴底ベクトル荷重センサ



図 17 測定装置と床反力計

と左足が床より離れるため、全ての出力が減少し、左足が接地する 3~4 秒においては出力が増加する。この出力の増減は、歩行状態とよく一致している。さらに、左足 2 歩めが接地するときに、X 方向の出力に負の値を見ることが出来る。これは、かかとから接地したときに進行を妨げる方向に反力が生じていることを示している。また、右足についても同様の計測結果が得られている。これらの結果より、歩行時の立脚相の状態の「かかと接地」「足底接地」「かかと離地」などの要素分類を行うことができると考える。

図 19 は、図 18 の左足の 2 歩め部分を拡大したものである。図に示す矢印は、進行および垂直方向(X,Z 方向)の出力より計算した反力のベクトルを示している。

図の上部に示した歩行の模式図は、一般に知られている歩行時の床反力の模式図である。計測結果より導いたベクトルはこの模式図に示されるベクトルとよく一致している。かかと接地状態において、進行方向に対して逆方向の反力ベクトルがみられ、制動力が生じている。歩行が進むにしたがい反力は真上に向かい、その後進行方向の反力となり推進力として作用していることがわかる。したがって、靴底ベクトルセンサは十分に歩行時のベクトル検出を行うことが可能であることがわかる。また、図 18 および 19 の結果は、靴底全体をひとつのベクトルとして示しているが、図 20 に示すように、靴底に配置したセンサ出力を個別に示すことも可能であり、歩

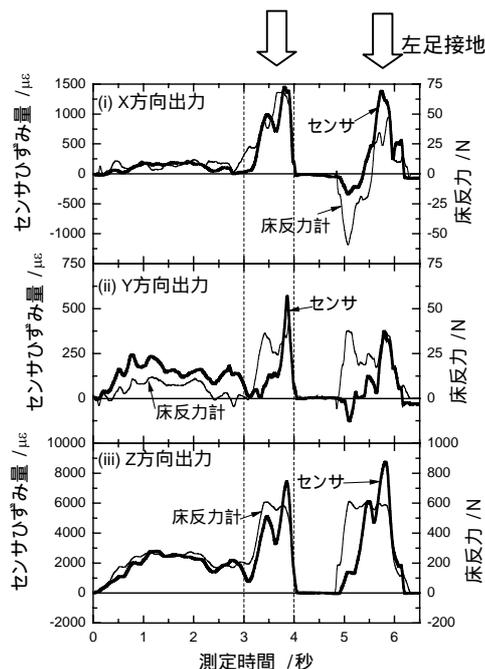


図 18 計測結果

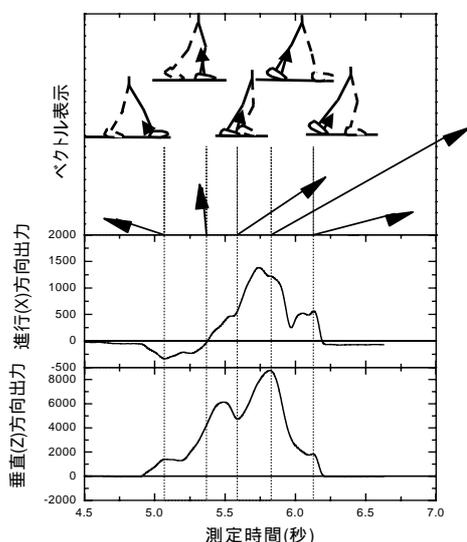


図 19 計測結果(ベクトル表示)

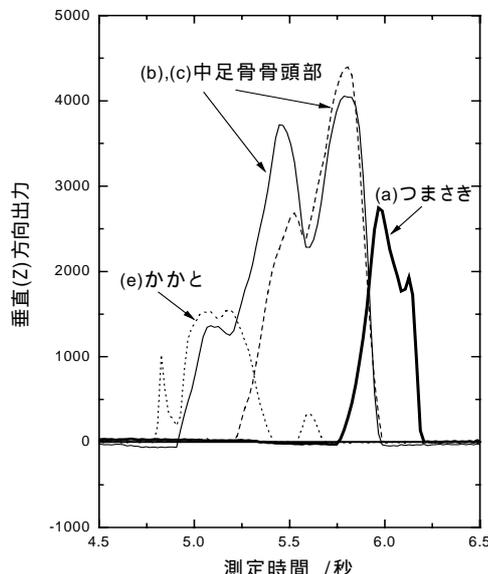


図 20 計測結果(部分表示)

行時におけるベクトルの作用点および、作用点の移動を示すことも可能である。

靴底ベクトル荷重センサ(サンダルタイプ)

図 20 の計測結果は、被験者によりそれぞれの部分の出力の大きさ、あるいは出力の順番などが異なることから、歩行状態における個人の癖などを検出することができると考えられる。複数の被験者の歩行状態の観察を行うために、靴底ベクトル荷重センサの改良を行った。これまで、靴底ベクトル荷重センサは、歩行計測の対象となる被験者の足寸法に合わせて、寸法 26cm の運動靴を用いてきた。また、つまさき、およびかかとの計測を正確に行うために、それぞれの部分を固定できるような靴形状を選択した。しかし、多数の被験者の足寸法は不特定であることへの対策、および装着時間を短縮するために、靴底ベクトル荷重センサの改良を行う必要がある。そのために、つまさき、およびかかとを固定できるようなサンダルを採用することにした。改良を行った靴底ベクトル荷重センサを図 21 に示す。甲および足首を固定する部分は、被験者の足寸法に対して調節可能である。左図に示すように、つまさき、およびかかとのベクトル荷重センサを配置し、つまさき部の 12 チャンネル、かかと部の 4 チャンネルのセンサ信号を導線束により外部測定機器に伝送した。歩行計測を行う場合には、右図に示すようにセンサの保護を目的としたゴム板を貼り付けた。

歩行計測の被験者は 31 人で、その内訳は表 1 に示す通りである。歩行計測の解析を行った結果、特につまさき側に配置したセンサ出力の大きさにより分類可能となる歩行パターンが認められた。



図 21 計測に用いた靴底ベクトル荷重センサ

表 1 測定人数の内訳 (年代は推測を含む)

	20代	30代	40代	50代	60代
男性	0	6	10	9	1
女性	3	1	1	0	0

一般に、歩行パターンは足裏の荷重移動の違いにより、次の三種類に分類されることが知られている。図 22 における模式図(1)は、荷重位置が足の外側を通り、急激に親指内側に抜けていくパターンである。この歩行パターンが見られる場合には、歩行時に体が大きく左右に揺れる傾向を示す。(2)は、かかとの外側より設置し、荷重位置が足の外側を通り、第 5 中足骨骨頭部から第 1 中足骨骨頭部まで移動し、親指を通り抜けるパターンである。この歩行パターンは、理想的で効率のよい歩行形態であるとされている。(3)は、荷重位置が足の内側を通り、親指から抜けるパターンである。この歩行パターンが見られる場合には、歩行時に体が大きく上下に揺れるとされている。図 22 の(2)に分類される歩行パターンは、足の回外運動と回内運動の 2 つが組み合わされた運動であり、足の縦アーチと横アーチを利用することにより、少ないエネルギーで効率的に歩くことが可能となる理想的な歩行パターンとされている。

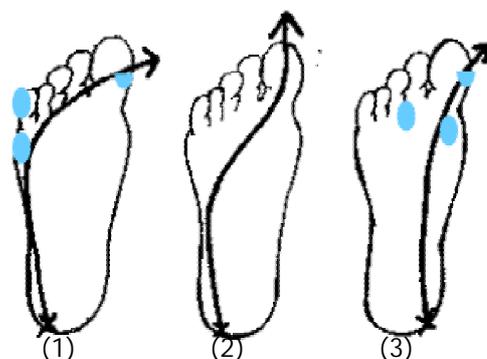


図 22 歩行パターンの模式図

図 23 に、(2)の歩行パターンを参考に、靴底ベクトル荷重センサより得られる進行方向、左右方向および垂直方向出力の予測を行った結果を示す。ここで、縦軸は片足の一步分のセンサ出力を、横軸は時間を示す。靴底ベクトル荷重センサ配置は、それぞれ、(i)かかと、(ii) 第 5 中足骨骨頭部、(iii) 第 1 中足骨骨頭部、および(iv)つまさき部とした。歩行の過程は、かかとから接地し、つまさきで蹴りだすまでを示しており、(i)点においては、かかとの接地により制動力が働き、進行方向と逆向きの力を示す負の出力および垂直方向には正の出力が見られると予測される。(ii)(iii)点においては、第 5 中足骨骨頭部から第 1 中足骨骨頭部に荷重が移動することにより、(ii)点に配置したセンサ出力が右方向および垂直方向に見られた後、(iii)点のセンサ出力に移行すると予測される。(iv)点の蹴りだしの状態では進行方向および垂直方向のつまさきの出力のみが見られると予測される。したがって、図 22 における(1)および(2)の歩行パターンは、(ii)の第 5 中足骨骨頭部、および(iii)の第 1 中足骨骨頭部のセンサの出力を調べることで分類できる。

図 24 は、実際に歩行計測を行った場合における左足一步分の各センサ出力を示している。左図の(a)30 代男性の垂直方向出力の結果から、(ii)の第 5 中足骨骨頭部の出力が

(iii)の第 1 中足骨骨頭部の出力よりも大きく、外側に荷重が印加されていることから、(1)あるいは(2)の歩行パターンに分類されることが考えられる。右図の(b)40 代男性の場合は、逆に(iii)の出力が大きいことから内側に荷重が印加されることから、(3)の歩行パターンに分類されることが考えられる。

実際の歩行測定結果は、図 23 における予測ほど完全に各センサの出力を分離して見ることができないため、(1)と(2)の判別は困難であった。表 2 に分類した結果を示す。なお、(4)は左右におけるセンサ出力の分類が異なる場合を示している。

歩行パターン(1)および(2)の判別に関しては、センサ配置の最適化を行うことにより解決できると考えられる。今後、生体情報として必要となる場合には、(2)の分類が可能となるようにセンサ配置および計測方法を検討する。

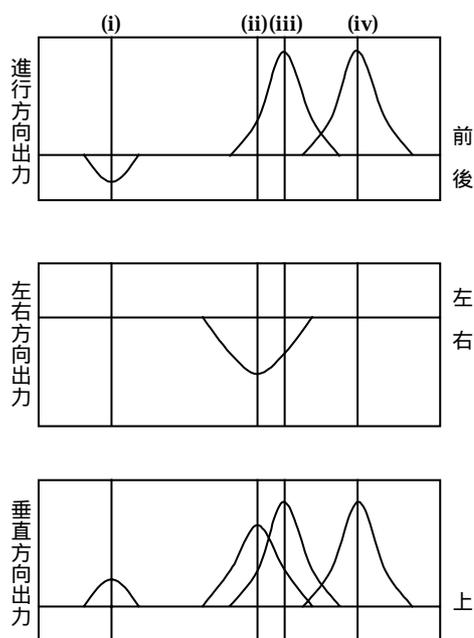


図 23 出力結果予測

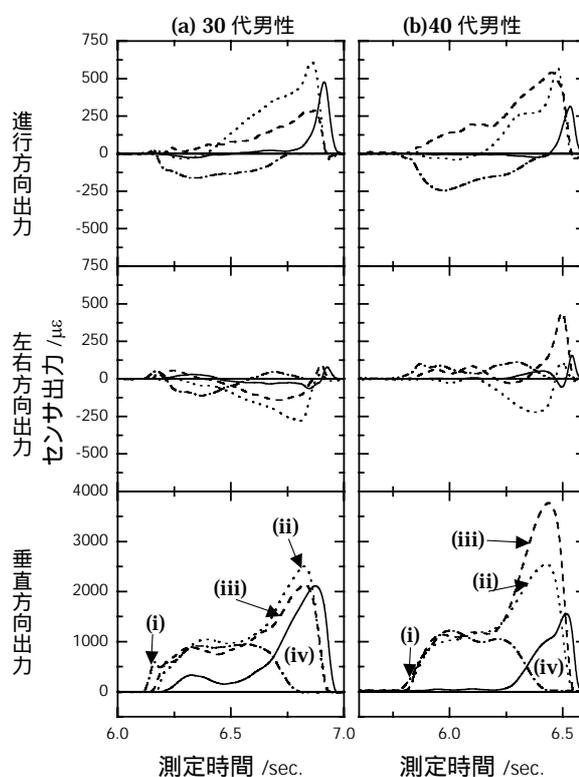


図 24 歩行計測結果

表 2 歩行パターンによる分類(男女別)

	(1)外側	(2)	(3)内側	(4)その他
全体	15	(1)に含む	5	11
男性	14		4	7
女性	1		1	4

靴底ベクトル荷重センサシステム信号処理回路

ベクトル荷重センサによる歩行状態の計測は、比較的大きな設備であるブリッジボックス、およびデータレコーダを用いてきた。今後の歩行計測を行う上で、装置の小型化および簡便化が望まれる。そこで、データレコーダなどに代わる信号処理回路を作製した。信号処理回路の試作機として、平成 14 年前期にアナログ方式の信号処理回路を試作し、センサ信号の検出に関する実験を行い、片足分のベクトル荷重センサの歩行計測に関する有効性の確認を行った。しかし、両足分では多数のセンサ信号の処理を行う必要が生じ、アナログ的にブリッジバランスを調整することは非常に困難であることや、有線によるサンプリング方式であったため、配線が歩行の妨げになることが問題視されてきた。そこで、それらを解決するデジタル方式の信号処理

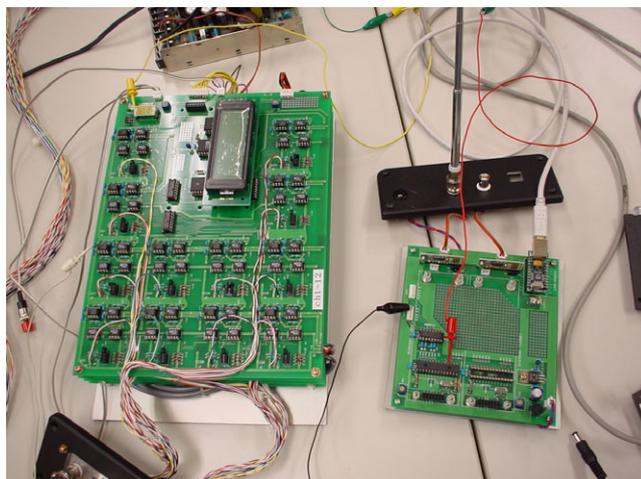


図 25 微小信号処理回路基板



図 26 靴底ベクトル荷重センサシステム

回路に関する検討と作製を行った。信号処理回路は、48ch 分の、センサ素子に電流を印加するための定電流回路、初期電圧をキャンセルするためのオフセット回路、微小な電圧変化を増幅する増幅回路、A/D 変換し無線にて信号を伝達するマイコンを用いた送信回路、および信号を受信し外部パソコンに転送する受信回路からなる。図 25 は、試作した微小信号処理回路の内部基板を示している。左側の信号検出送信回路は、ほぼ A4 サイズであり、内蔵したバッテリーにより数時間駆動するように設計されている。重量はバッテリーおよびケースを含むと約 2.5kg である。図 26 のように、被験者が背中に背負うように鞆に納め、歩行の妨げにならないように配慮した。背中よりベクトル荷重センサへの配線は有線となるが、レコーダを用いた場合と異なり配線は、被験者の体にフィットするため、歩行時に違和感が生じないを考える。また、無

線伝送であるため、自由度の高い歩行計測を行うことが可能となる。受信機側においては、各チャンネルの信号を受信し、RS232C あるいは USB によりパソコンへ伝送するように設計した。

靴底ベクトル荷重センサシステム計測表示プログラム

パソコン側の表示プログラムは、図 27 に示す「リアルタイム測定」表示画面、および図 28 に示す「既存データ解析」画面からなる。リアルタイム計測画面では、48ch 全てのセンサ出力の計測を行い、(4)-(2)項で示した式より、左右合わせて 12 箇所の X,Y および Z 方向の出力を計算する。それぞれの Z(垂直)方向のセンサ出力を図中の棒グラフの大きさを視覚的に表示している。また、左右(Y)および前後(X)方向の出力の合計より、ベクトルの中心位置を計算し、丸印が移動するように表示を行っている。リアルタイム計測画面は、立位状態の体のふらつきをその場で観測することがで

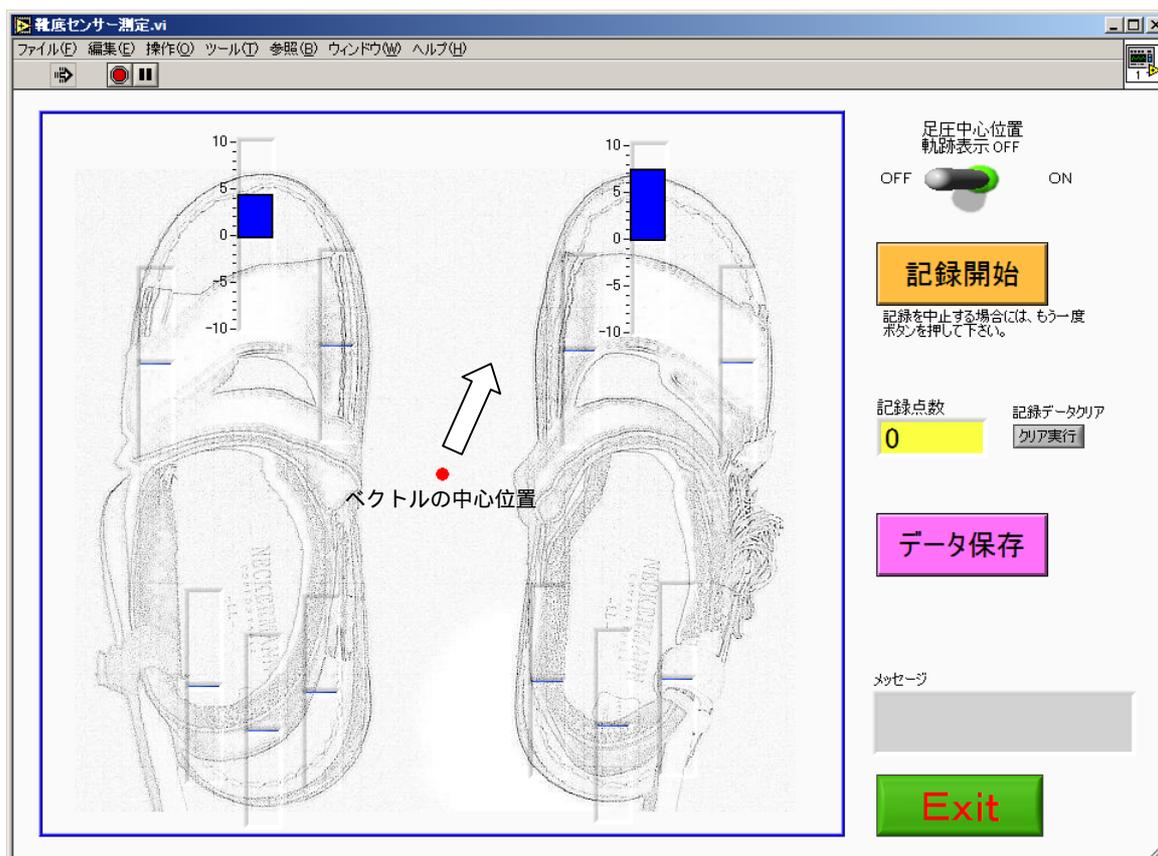


図 27 靴底ベクトル荷重センサシステム(計測画面)

きる。また、計測を行うオペレーターは、「記録開始」ボタンおよび「データ保存」ボタンを押すことにより、適当な媒体に計測結果を保存することが可能となっている。表示画面は簡易的なものであるが、歩行状態あるいは各種運動の状態に対する靴底圧

の表示と結果記録を行うことができる。

さきのリアルタイム計測において保存したファイルは、図 28 の「既存データ解析」画面より、リプレイ表示を行うようにプログラムを作成した。画面中心にはリアルタイム計測画面と同様に、各センサの垂直方向出力およびベクトルの中心位置の移動が表示される。画面左側には、左右のベクトルの合成により得られるベクトルの中心の挙動が表示される。このゆれは体の左右のゆれに対応しており、歩行時の癖を表現している。画面下部には、左右のかかとからつまさきまで配置された個々のセンサの垂直方向出力を時間経過に対して示している。垂直方向出力画面を拡大することにより、(4)- 4 項で示した歩行時の癖を見ることができる。

以上述べたように、X,Y,Z 方向のベクトル表示を可能とする「靴底ベクトル荷重センサシステム」を実現することができた。今後は、研究室においては、基本プログラムをもとに、靴底ベクトル荷重センサシステムを用いた各種足底圧測定を行い、解析目的にあわせたプログラムの改良を行う。また、企業への積極的なアピールを行い、将来の商品化を目指した関係の構築に邁進する。

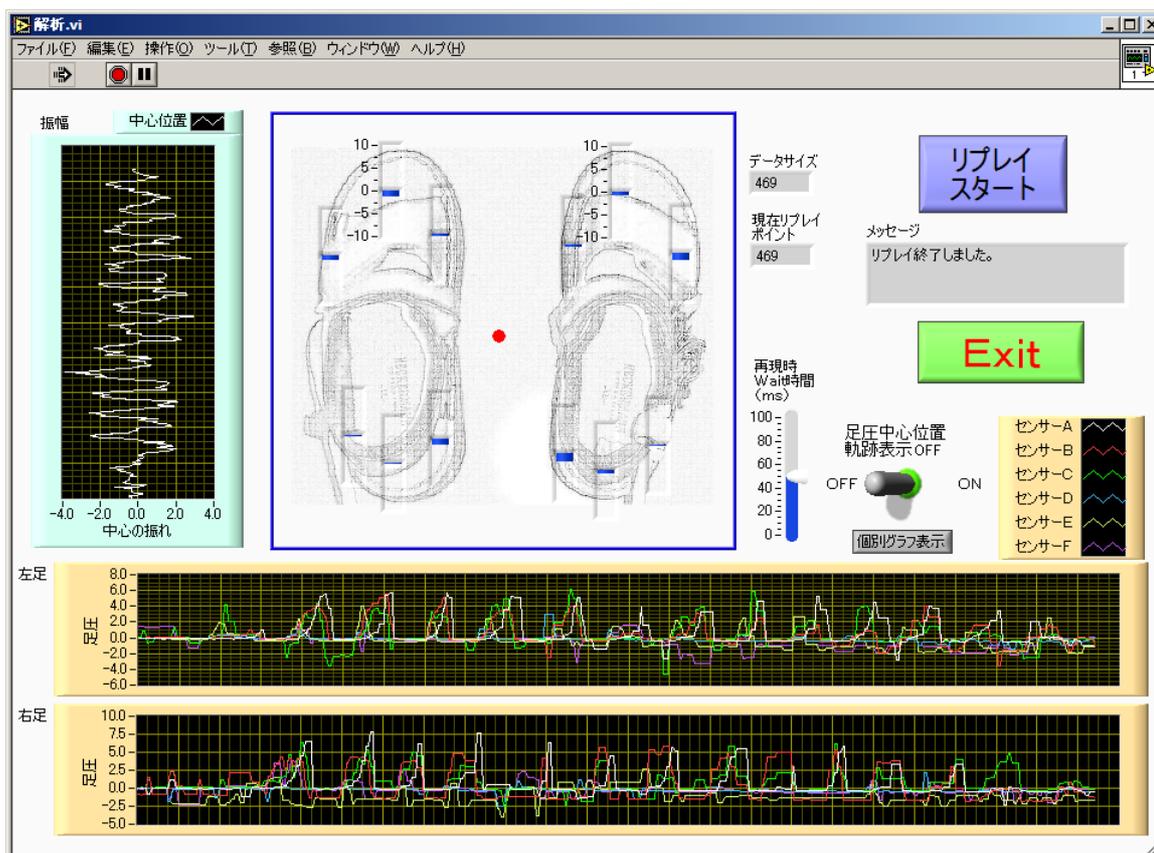


図 28 靴底ベクトル荷重センサシステム(解析画面)

3 フェーズ の取組み予定

フェーズ の終了時期においては、靴底ベクトル荷重センサシステムプロトタイプの完成をみる事ができた。一般に知られている足底圧を検出する装置は、大きく二つに分類される。ひとつは、床反力計に代表される計測装置である。もう一方は、導電ゴムを用いた圧力検知シートを用いた計測システムである。しかし、多様な歩行運動を測定するためには、測定面積が広く、測定箇所が多いものが望まれる。床反力計を用い広範囲の歩行分析システムを構築する場合には、非常に高価なること、また、床反力計は大型であるため、足底の細かな部分の反力計測を行うことは困難である。また、導電ゴムを用いたシステムの場合には、圧力の分布の計測には有効であるが、部分的なベクトル検出を行うことができない。さらに、耐久性に難点があり、多くの計測を行うためにはコストの問題が生じる。

本研究事業において開発した、靴底ベクトル荷重センサシステムは、プロトタイプではあるが、上記の問題点の克服を期待できる。

フェーズ においては、各種多彩な分野への応用を目指した、センサシステムの改良を検討する。また、企業と提携し、研究室では行えなかった、小型で携帯性に優れたシステムの構築を検討し、商品化を目指す。

医療・福祉分野

歩行状態、重心動揺を計測し、リハビリテーションの評価、身体機能の評価

リハビリテーション機器、義足などの設計

スポーツ分野

スイング、ショット、バッティング時の重心および部分荷重を測定

姿勢、構えの安定性のもととなる重心動揺の測定

歩行、走行時の地面からの反力を測定

ロボット分野

歩行を支援する足底圧を測定

その他

各個人に最適な履物の設計

文献

- [1] 山本澄子 他, 下肢装具のバイオメカニクス-片麻痺歩行と装具の基礎力学-, 医歯薬出版株式会社
- [2] 滝口 清昭, 平成 13 年度未踏ソフトウェア創造事業成果報告集, 情報処理振興事業協会