

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

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
	小野寺隆視	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
	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 緒言

(1) 本研究の目的

これまで財団法人電気磁気材料研究所では、抵抗温度係数および比電気抵抗が大きいことから接触燃焼式ガスセンサ用フィラメント材への応用が検討されている Fe-Pd 合金を薄膜化し、超小型ガスセンサまたは温度センサへの利用が可能であることを明らかにした。また、抵抗歪感度が大きい Cr を薄膜化した場合、窒素を少量添加することによってその抵抗温度係数を低減できることを見出し、超小型歪センサまたは圧力センサなどへの利用が可能であることを明らかにした。図 1 に、これら 2 つの薄膜と、従来の代表的な温度センサ材料および歪センサ材料の温度感度(抵抗温度係数)および歪感度(ゲージ率)を示す。図中、他材料との比較からわかるように、Fe-Pd 合金薄膜および Cr-N 合金薄膜は、それぞれ温度感度が高く圧力感度が低いこと、および圧力感度が高く温度感度が低いことを特徴とする。これらを同一基板上にモノリシックに形成することによって、温度および力学量を同時に検知可能とする超小型触覚センサが構築可能と考えられる。

このような触覚センサは、FES によって動かされる手や足などの動作・状態を測定しモニタリングすることを可能にすると考えられる。麻痺状態の手足において感覚も損なっている場合、目視以外には自身で手足の状態を把握することはできない。従って、触覚センサを用いることによって感覚を取り戻し、動作の修正が可能になるであろう。また、FES システム自体の開発にも動作や状態の情報を数値データとして収集することが可能になると共に、フィードバック制御への発展も期待できる。現段階では人体の皮膚に直接センサを取り付けることは難しいことから人体装着型の補助具としての靴や手袋にセンサを組み込むことが考えられ、そこから得られる信号を何らかの方法で保存しモニターするか、または FES システムに接続することによって有効な利用が可能になるであろう。さらに、そのような技術は義手・義足および近年注目を集めているロボットなどへの応用も可能と考えられる。

本研究は、FES を支える生体情報センサに必要な基本技術のひとつとして、Fe-Pd 合金薄膜および Cr-N 合金薄膜を複合化する新薄膜素子を用いてロボット、義手・義足および人体装着型補助具などに応用可能な感温感圧複合センサ(温度検知機能付触覚センサ)を構築することを目的として行われた。ここで、圧力センサについては、ロボット

用触覚センサとして 1982 年に報告された Harmon の調査結果を参考として、2mm の空間分解能および数 g/エレメントの感度を目標とし、温度センサについては、人間の生活環境を考慮して -20 ~ 100 の測定可能範囲および 0.5 の測定精度を目標とする。

(2) 研究の流れ

図 2 に、本研究の流れを示したフローチャートを示す。

まず、フェーズ において小型の薄膜複合センサの構築を検討するために、FePd および Cr-N 両合金薄膜の作製条件の最適化、小型化ならびに複合化を行い、それら各段階における両薄膜材料の温度感度および歪感度に関する特性評価を行う。次にフェーズ において、並列型素子、積層型素子ならびにそれらを用いた 2 次元分布型素子の設計、技術課題の検討および試作品の作製を行い、圧力・温度同時測定時の温度・圧力の相互補正の有効性の検証、積層膜における導通すべき箇所での導電性および絶縁すべき箇所での絶縁性を確実に得るための成膜方法の確立ならびに 2 次元分布における各エレメントに対する入出力信号の確実な伝達・検知手段の獲得などを行う。フェーズ においては、目標性能を満足する超小型・高精度の感温感圧複合センサを試作し、温度検知機能付き触覚センサとしてロボット、義手・義足、ならびに人体装着型補助具などへの応用を検討し、実用化を目指す。

(3) 実験方法

ここでは、本研究全般にわたって共通する実験方法・手段などについて概説する。

Fe-Pd 合金薄膜の作製には、高周波スパッタリング装置を用いた。ターゲットには公称純度 99.9% の Fe からなる直径約 750mm、厚さ約 3mm の円板上に正形状の Pd チップを配置した複合ターゲットを用い、このチップの数で Fe と Pd のスパッタ面積比を変えることにより組成を変化させた。成膜前真空度（背景真空度）、成膜時ガス圧、ターゲット-基板間距離(T-S 距離)、入力電力および成膜時間をそれぞれ約 2×10^{-5} Pa、1.33Pa、74mm、100W および 14400s として成膜を行った。

Cr-N 合金薄膜の作製には、高周波スパッタリング装置にスパッタリングガスの Ar(純度 99.9999%以上)とともに微量の窒素ガス(純度 99.9999%以上)を導入して成膜を行う反応性スパッタリング法を用いた。窒素の添加量は、導入する窒素ガス流量を調節することにより制御した。ターゲット(直径約 1000mm)には公称純度 99.9% の Cr を用い、成膜前真空度(背景真空度)、成膜時ガス圧、ターゲット 基板間距離(T-S 距離)および入力電力をそれぞれ約 5×10^{-5} Pa、 2.7×10^{-1} Pa、70mm および 100W として成膜を行った。

本研究では、基板に厚さ約 0.2mm の Corning#0211 ガラス板と合成石英板、ならびに 0.2mm 厚および 0.5mm 厚のステンレス (SUS304) 板を使用した。形状はいずれも 50mm x 50mm の正形状とした。抵抗測定用試料の薄膜形状は、ガラスまたはステンレスを加工して作製したマスクで基板表面を覆い成膜するマスク法またはフォトリソグラフィを用いたリフトオフ法により形成された。熱処理を施す場合、直径約 70mm の不透明石英管からなる真空チャンバー内に試料を挿入して真空に引いた後、その外側に電気炉をかぶせて所定の温度まで加熱して一定時間保持し、電気炉への電流印加を止めて加熱を停止した後は、そのまま電気炉内にて冷却(炉冷)するか、または電気炉を移

動させて大気中放冷とした。

作製した薄膜の所定の位置に、高周波スパッタリング装置によって Cu 薄膜を一部重ねて形成し、これを抵抗測定のための電極とした。この、試料から伸ばした 4 本の電極の端に、電源および電圧計につながるリード線をはんだ付けした。抵抗測定には直流四端子法を用い、0.1 ~ 2mA の定電流を流した際得られる電圧値から抵抗値を算出した。抵抗温度係数の測定は、温度制御可能な恒温槽内において - 80 ~ 100 の範囲内の異なる温度での抵抗値を測定することにより行われ、得られた結果から 0 および 50 間における平均の抵抗温度係数(TCR)を次式により計算した。

$$TCR = \frac{R_{50} - R_0}{R_0 \cdot \Delta T}$$

ここで、 R_{50} および R_0 はそれぞれ 50 および 0 における抵抗値を、ならびに ΔT は 50 と 0 の温度差、すなわち 50 を示す。

さらに、室温において - 500 ~ + 500 $\mu\epsilon$ の歪を $1 \times 10^{-6}\epsilon \cdot s^{-1}$ の速度にて連続的に変化させながら形成された薄膜の長手方向に沿って基板に印可し、それら各歪量に対応する電気抵抗値を測定した。得られた結果から、次式を用いて抵抗歪係数(ゲージ率、Gf)を

$$Gf = \frac{R_{500} - R_0}{R_0 \cdot \epsilon}$$

算出した。

ここで、 R_{500} および R_0 はそれぞれ歪量が 500 $\mu\epsilon$ および 0 $\mu\epsilon$ のときの抵抗値を、ならびに ϵ は印可した歪量(この場合 500 $\mu\epsilon$)を示す。 $\mu\epsilon$ は歪量であることを明示するために、伸びまたは縮みの割合 $\Delta L/L_0$ (無次元数)を $\times 10^{-6}$ オーダーで表した一種の単位記号として用いる。歪は 4 点支持による均一曲げモーメント方式により印可し、力の作用には引っ張りおよび圧縮の操作を可能とする万能試験機を用いた。歪量は、市販の歪ゲージを基板両面に貼り付けて行う曲げ歪測定法により測定した。

Fe-Pd 合金薄膜の組成は、エネルギー分散型 X 線分析(EDX)法ならびに ICP 発光分析法を用いて測定し、Cr-N 合金薄膜の組成は、ラザフォード後方散乱法を用いて測定した。膜厚は接触式の表面形状測定装置を用いて薄膜表面と基板表面との間の段差を調べることによって測定した。

2 フェーズ

(1) 研究の概要

温度・歪同時計測可能な小型の薄膜複合センサの構築を検討するために感温 Fe-Pd 合金薄膜および感歪 Cr-N 合金薄膜の作製条件最適化、小型化および複合化を行い、それらの特性評価を行った。作製条件の最適化の結果、Fe-Pd 合金薄膜に関しては、約 60at%Pd の組成および 700 ~ 800 の温度での熱処理によって最大の TCR が得られた。その条件における TCR および比電気抵抗の値はそれぞれ約 $6000 \times 10^{-6}/$ および 70 ~ 100 $\mu\Omega \cdot cm$ であり、Fe-Pd バルク材料にほぼ匹敵する優れた特性であった。さらに、Gf の値は 2.8 の小さな値であり、歪に対する感度は小さいことがわかった。Cr-N 合金薄膜

に関しては、約 20at%N の組成および約 350 の温度での熱処理によって、TCR はゼロ近傍の値を示し、Gf は市販の金属歪ゲージ材料の約 4.5 倍に相当する大きな値 9 を示す優れた特性をもつことがわかった。小型化・複合化により Fe-Pd 合金薄膜および Cr-N 合金薄膜の TCR および Gf に大きな変化は観測されず、電極間距離 100 μ m、試料幅 10 μ m の寸法までの小型化、ならびにその小型化した Fe-Pd 合金薄膜と Cr-N 合金薄膜を互いに平行に並べて成膜し、同時に計測を行わせる複合化が可能であることがわかった。

(2) 研究の目標

FePd および Cr-N 両合金薄膜の作製条件の最適化、小型化ならびに複合化を行い、良好な特性を保持したまま小型の薄膜複合センサの製作が可能であることを明らかにする。2mm の空間分解能を考慮して 1mm 以下の小型化を目指す。

(3) 実施内容

小型の薄膜複合センサの構築を検討するために、FePd および Cr-N 両合金薄膜の作製条件の最適化、小型化ならびに複合化を行い、それら各段階における両薄膜材料の温度感度および歪感度に関する特性評価を行った。

(4) 結果

Fe-Pd 合金薄膜

図 3 に、種々の組成 X ($0 \leq X \leq 1$) を持つ $Fe_{1-X}Pd_X$ 合金薄膜を 500 の温度で熱処理した試料において測定した抵抗温度曲線を示す。図からわかるように、 $X=0.59$ の組成において最大の抵抗温度係数 ($4650 \times 10^{-6}/$) が得られた。この $X=0.59$ の組成を持つ試料について、異なる温度で熱処理を施した試料の 0 における比電気抵抗 (ρ) および TCR の熱処理温度依存性を図 4 に示す。TCR は熱処理温度の増加に伴って増大し、700 ~ 800 において約 $6000 \times 10^{-6}/$ の大きな値で最大値をとり、その後 900 まで減少を示した。比電気抵抗は TCR とは逆に熱処理温度の上昇に伴って 70 ~ 100 $\mu\Omega$ -cm と減少し、600 で極小を示した。

これらの挙動は薄膜結晶構造の規則化に関連すると考えられ、規則化を増進させる熱処理時間の増大ならびに熱処理プロセスの最適化などによって、TCR はさらに増大することが見込まれる。実際、700 で 8 時間の熱処理を施すことによって約 $6300 \times 10^{-6}/$ まで増大した。このような大きな TCR は温度に対する感度が高いことを意味するが、さらに比電気抵抗が高いことによって分解能にも優れた温度センサを提供することが可能となる。例えば、広い温度範囲において安定に使用できることから測温抵抗体として JIS 規格にもなっている白金の場合約 $4000 \times 10^{-6}/$ の TCR および約 10 $\mu\Omega$ -cm の比電気抵抗をもち、その 1 あたりの抵抗変化量は 0.04 $\mu\Omega$ -cm である。これに対し Fe-Pd 合金薄膜のそれは上記 500 で熱処理を施した試料において 0.37 $\mu\Omega$ -cm と見積もられる。したがって、同じ形状とした場合 Fe-Pd 合金薄膜の方が Pt と比較して約 10 倍の大きな抵抗変化量が得られることがわかった。

さらに、図 3 において大きな TCR を示した $X=0.49$ および 0.59 の試料について、Gf の測定を行った。その結果を TCR の値とともに図 5 に示す。図から $X=0.59$ のほ

うが TCR が大きく Gf が小さいという特徴をもっていることがわかる。したがって触覚センサ用温度検知薄膜としては $X=0.59$ の組成が最も適していることがわかった。

Cr-N 合金薄膜

図 6 に、作製した Cr-N 合金薄膜の as-deposited 試料ならびに 250、300 および 400 の温度で 30 分の熱処理を施した試料における 0 での抵抗値で規格化して表した抵抗温度曲線を示す。as-deposited 試料は測定温度の増大に伴って抵抗が減少し、負の TCR をとることがわかる。この試料に熱処理を施すことによって TCR は変化し、熱処理温度の増大に伴って TCR の値は負から正へと変化した。このような負の TCR および負から正への TCR の変化は、X 線回折測定の結果から、窒素添加による A15 型構造 Cr の生成および熱処理による A15 型から bcc-Cr への相変態に起因すると考えられる。

この熱処理温度と Gf との関係ならびに、これらの試料における熱処理温度と TCR との関係を図 7 に示す。図からわかるように、熱処理温度の増大に伴って TCR の値は負から正へと変化した。途中 330 近傍の温度においてその値がゼロになる点が存在することがわかる。一方、Gf の値は as-deposited 試料で約 8.5 の値を示し、熱処理によって多少高くなるが、低減することはない。TCR がゼロをとる熱処理温度においては 10 近い値を示すことがわかった。これらの中の代表例として、350 の温度で熱処理を施した試料における -700 から $+700\mu\epsilon$ までの歪印加を 4 回繰り返して測定した抵抗値と歪量との関係を図 8 に示す。図から、歪量の変化に対して電気抵抗は直線的に変化することがわかる。したがって、Cr-N 合金薄膜は、TCR をほぼゼロにすることが可能であるとともに、従来市販の歪抵抗材料である Cu-Ni 系合金などの Gf (約 2) と比較して約 5 倍も大きいことが明らかになった。

小型化した薄膜の特性

小型化による特性の変化を調べるために、直線状の薄膜における電極間距離および試料幅をそれぞれ小さくして作製し、Fe-Pd 合金薄膜の場合 500、Cr-N 合金薄膜の場合 350 で熱処理を施した薄膜の特性評価を行った。図 9 に、電極間距離を $1000\mu\text{m}$ とした場合における試料幅と TCR および Gf との関係を示す。図からわかるように Fe-Pd 合金薄膜および Cr-N 合金薄膜の TCR は試料幅に対して顕著な変化を示さず、3-1 および 3-2 節で示した 6mm 長試料とほぼ同じ値を示した。また、Fe-Pd 合金薄膜の Gf は、試料幅 $10\mu\text{m}$ において約 2 の小さな値を示し、3-1 節で示した値 2.7 からの低減が観測された。その原因は不明だが、温度センサにおける歪感度は小さいほうがよいので、問題とはならない。これらに対し、Cr-N 合金薄膜の Gf は 3-2 節に示した値 9 よりも減少し、6 を示した。この Gf の減少は、図 9 中に示した $200\mu\text{m}$ の試料幅における Gf が 6 であるのに対し、同じ $200\mu\text{m}$ 幅をもつ 6mm 長試料の Gf が 9 であること、および Cr-N 合金薄膜の Gf 値が試料幅に依存して変化してないことから、試料幅による影響ではないと考えられる。

次に、試料幅を図 9 における最小値である $10\mu\text{m}$ とした場合における電極間距離と TCR および Gf との関係を図 10 に示す。Fe-Pd 合金薄膜および Cr-N 合金薄膜の TCR

ならびに Gf いずれもこの範囲内で電極間距離に対する変化を示さなかった。Cr-N 合金薄膜における大きさ以外に 6mm 長試料と小型化試料で異なる点は、パターン形成法の違いである。すなわち 6mm 長試料はマスク法であるためフォトレジストを用いず、小型素子はフォトリソグラフィによるリフトオフ法を採用しているためフォトレジストを使用することから、おそらく薄膜作製時に基板表面上に塗布されているレジストの有無が特性に影響をおよぼしている可能性があると思われる。

以上の結果、電極間距離 100 μ m、試料幅 10 μ m の小型化した試料においても、Fe-Pd 合金薄膜は $4200 \times 10^{-6}/$ の大きな温度感度と約 2 の小さな歪感度を持ち、Cr-N 合金薄膜については TCR 約ゼロとすることが可能であり、その試料において市販の歪センサ材料である Cu-Ni 系合金の約 3 倍に相当する Gf の値 6 を示した。したがって、小型化による特性値の低減は Cr-N 合金薄膜の Gf 以外には生じず、その Cr-N 合金薄膜の Gf に関しても、従来の材料よりも優れた特性であることが明らかとなった。

複合化した薄膜の特性

前節で特性劣化がないことを明らかにした最小形状の電極間距離 1000 μ m、試料幅 100 μ m をなす Fe-Pd 合金薄膜および Cr-N 合金薄膜を単一基板上に並べて作製し、その電気的特性評価を行った。複合薄膜の作製は、両薄膜を互いに平行に配置するようにして、まず Fe-Pd 合金薄膜を作製した後 500 の熱処理を施し、次に Cr-N 合金薄膜を作製した後 350 の熱処理を施し、最後に、両薄膜別々に一部重ねて直交するように配置した電流および電圧端子としての Cu 薄膜を形成するプロセスにて行われた。

図 11 に歪を印加しない場合における電気抵抗値の温度依存性を示す。縦軸は、0 における電気抵抗値で規格化した値で示した。Fe-Pd 合金薄膜および Cr-N 合金薄膜の TCR はそれぞれ $4300 \times 10^{-6}/$ および $-60 \times 10^{-6}/$ であり、単独で作製した場合とほぼ等しい値が得られた。図 12 は同様のいくつかの温度の元で歪印加測定を行った結果得られた、Gf の温度依存性を示す。Fe-Pd 合金薄膜における Gf の値は温度によって顕著な変化を示さず、0~100 全般に渡って単独小型薄膜の場合と同様の、ほぼ 2 の値であった。一方、Cr-N 合金薄膜における Gf は 0~100 の温度範囲において、5.9~6.6 の間でゆるやかな変化を示したが、単独小型薄膜の場合と同様、約 6 の大きな値を示した。

以上の結果、単一基板上に Fe-Pd 合金薄膜および Cr-N 合金薄膜を作製し複合化を行った場合においても大きな特性の変化は見られず、優れた感温および感歪特性をもつことが明らかとなった。特に、小型化および複合化した場合にも Fe-Pd 感温薄膜は、温度検知に必要な大きな温度感度をもつとともに、常に印加される歪に対する感度が小さいという特徴を持ち、逆に Cr-N 感歪薄膜は、歪検知に必要な大きな歪感度をもつとともに、常にもたらされる温度に対する感度が小さいという特徴をもつことが明らかになった点は重要である。このような 2 つの材料から構成されることによって、高感度な温度・歪の同時検知が可能となると考えられる。

3 フェーズ

(1) 研究の概要

フェーズにおいて、歪感度（ゲージ率）5~6，温度感度（TCR）5000ppm/°C の特性をもつ薄膜の小型化および複合化が可能であることを明らかにした。そこで次に、感温感圧複合センサの基本的構成要素である並列型および積層型の複合薄膜ならびに2次元分布素子の試作を行った。その結果、SUS 基材を用いて、受感部の大きさが数 100 μ m、荷重感度が数 100 g / エLEMENT ならびに温度分解能約 0.5 °C の特性をもつ小型・高精度の感温感圧センサの構築に成功し、歪センサにおける温度感度および温度センサにおける歪感度が共に小さいことによって、簡単な方法による相互補正が有効に作用することを明らかにした。さらに、人体装着型補助・測定具としての靴底ベクトル荷重センサへの応用を検討し、その可能性を見出した。

(2) 研究の目標

感温感圧複合センサを作製し、その技術確立を図ると共に実用化を検討する。圧力センサについては2mmの空間分解能および数 g / エLEMENT の感度を目標とし、温度センサについては - 20 °C ~ 100 °C の測定可能範囲および 0.5 °C の測定精度を目標とする。

(3) 実施内容

並列型素子、積層型素子ならびにそれらを用いた2次元分布型素子の設計、技術課題の検討および試作品の作製を行い、圧力・温度同時測定時の温度・圧力の相互補正の有効性の検証、積層膜における導通すべき箇所での導電性および絶縁すべき箇所での絶縁性を確実に得るための成膜方法の確立ならびに2次元分布における各ELEMENTに対する入出力信号の確実な伝達・検知手段の獲得などを行った。

並列型単独複合素子およびデータの相互補正

次に示す並列型単独複合センサ素子を作製し、圧力・温度同時印加測定を行うと共に測定時の温度・圧力の相互補償が有効に作用することを確かめるための実験を行った。

SUS304 からなる金属ダイアフラム上に、SiO₂ からなる絶縁層を介して Cr-N 合金歪センサ薄膜および Fe-Pd 基合金温度センサ薄膜を並べて作製し、配線後、測定用ホルダーに設置して荷重と温度の同時測定実験を行った。図 13 は模式的にあらわしたセンサ素子構造を示し、図 14 にはセンサ素子の作製プロセスを、また図 15 にはセンサディスク上に作製された薄膜パターンを示す。図 16 にはセンサ素子を設置した素子ホルダーの断面図および下面図を示す。薄膜が形成されている面が下を向くようにホルダーに設置され、荷重および熱はその反対側である上向きの面に加えられるようになっている。

実験は、荷重のみの印加、荷重と熱の同時印加ならびに熱のみの印加という3つの場合について行った。荷重のみの印加は約 200 g の荷重となるようにプラスチックの棒を手で押し付けることにより行い、熱のみの印加にはドライヤーの温風を用いた。

荷重と熱の同時印加には指を直接押し付けることによる約 200 g の荷重と指先の温度が用いられた。荷重と熱の印加は、測定開始の約 30 秒後から約 20 秒間行い、約 20 秒間の休止の後再び約 20 秒間印加するというように、計 5 回の印加を行った。抵抗測定には四端子法を採用し、定電流電源、デジタルマルチメータおよびパソコンを用いた。図 17 に、実験に用いた圧力・温度同時印加測定システムを示す。(a)は測定システム全体の写真を、(b)はダイヤフラムセンサ素子をホルダーに取り付けた受感部の写真を、ならびに(c)はダイヤフラム上に作製した並列型複合薄膜の光学顕微鏡写真を示す。

図 18 にデータ補正の概略を示した流れ図を示す。歪センサおよび温度センサから得られた信号に対して、それぞれ事前に測定しておいた荷重と電気抵抗の関係および温度と電気抵抗の関係をを用いて計算することによって荷重および温度に変換することができる。しかし荷重と温度が同時に印加されている場合、それらの値はそれぞれ温度および荷重によって生じた変化量を含む。よってこれらは見かけの荷重および見かけの温度であり、それらの値をそれぞれ A および B とする。見かけの温度 B を歪センサにおける温度と電気抵抗との関係に代入することによって、歪センサにおける温度による変化分 C を求めることができ、 $A - C$ が真の荷重となる。ここで B は誤差を含んだ値であるから C の値は正確なものではない。しかしその不正確さは、誤差中の誤差分であることから十分無視しうると考えられる。同様に、見かけの歪 A を温度センサにおける歪と電気抵抗との関係に代入することによって、温度センサにおける歪による変化分 D を求めることができ、 $B - D$ が真の温度となる。

上記のような単純な補正でほぼ正確な測定結果を得ることができるのは、歪センサにおける温度感度ならびに温度センサにおける歪感度が共に小さいことに起因する。半導体のように両方の感度が共に大きい場合、上記の誤差中の誤差分も大きくなり、不正確さは無視できなくなるため、このような簡単な補正だけでは正しい値を得ることができない。この点に、本複合センサの大きな特徴がある。

次に、そのような簡単な補正で実際に正確な値を得ることができることを実験的に確かめた結果について述べる。

図 19 は温度変化を与えずに荷重だけを印加した場合として、プラスチックの棒でセンサを押しした場合の測定結果を示す。左側のグラフが補正前のデータを、右側が補正後のデータを示す。また、上側のグラフが歪センサにおいて測定された荷重を示し、下側は温度センサにおいて測定された温度を示す。熱の印加が無かったために、歪センサの出力変化に大きな違いは見られない。一方温度センサにおいては、補正前のデータ中に、荷重の印加により生じた見かけの温度が現れていることがわかる。このような見かけの温度が実際の測定を行う上で問題となるが、右下のグラフからわかるように、補正を行うことによって見かけの温度による変動が消失し、荷重の影響をほとんど気にすることなく測定が可能となることがわかった。

図 20 は荷重と熱を同時に印加した場合として、指で直接センサを押しした場合の測定結果を示す。歪センサおよび温度センサ共に、補正前は補正後よりも印加による変化が大きいことがわかる。これは見かけの値として誤差分を含んでいるためであり、補正後はそれらが取り除かれたために変化が補正前よりも小さくなったことを示して

いる。

プラスチックの板の上に熱電対の頭を置き、その上に指を押し当てて指の温度を測定した。押し当てた直後は約 31 であったが、10 秒～20 秒後あたりでは約 32 であった。その結果は補正後の結果と良く一致した。補正前はそれよりも僅かではあるが高く、歪の影響によると考えられる。

図中特に顕著な挙動として挙げられるのが、左上のグラフにおける除荷後の裾引きである。これは下側のグラフからわかるとおり、熱の印加後、徐々に温度が下がっていく状況を示したものであり、明らかに温度による成分が加わっていることがわかる。実際、図 19 の左上のグラフでは、荷重だけの場合、除荷後は裾を引かず、すぐ零荷重に戻っている。そのような温度成分の混入も、右上のグラフに示されているとおり、補正によって取り除かれていることがわかる。

図 21 は荷重を印加せずに熱だけを加えた場合として、ドライヤーの温風をセンサに吹きかけた場合の測定結果を示す。荷重の影響が無いために下側の左と右のグラフでほとんど変化が無いのに対し、上側の左右では大きく異なる結果が得られた。荷重は掛かっていないことから、左上のグラフに見られる変化は温度によって生じた見かけの荷重であることがわかる。一方、右上のグラフではその見かけの荷重がほぼきれいに消失しており、補正が有効に作用していることがわかる。

以上の結果から、歪センサおよび温度センサはほぼ安定に測定を行うことができ、かつ相互補正により互いの物理量の影響を受けない正確な測定が可能となることが明らかとなった。その特性は、歪感度（ゲージ率）5～6、温度感度（TCR）5000ppm/°C の特性をもち、-80～100℃ で使用可能な薄膜の複合化を行い、SUS 基材を用いて、受感部の大きさが数 100 μm、荷重感度が数 100 g/エレメントならびに温度分解能約 0.5℃ と、単独センサとしては十分目標を満足するものであった。今後、センサ素子構造および補正方法の最適化を行うことによって、さらに高精度な測定が可能となると考えられる。

並列型 2 次元分布複合素子の構築に関する検討

前節において、Fe-Pd 合金薄膜および Cr-N 合金薄膜を用いて作製した並列型単独複合センサ素子における圧力・温度同時印加測定を行い、温度・圧力の相互補償が有効に作用することを確認した。そこで次に、触覚センサとして必要となる 2 次元分布構造の検討を行った。1-2 節で述べたように、期待される空間分解能は 2mm 程度であるが、ここでは基本的な技術確立を目的とすることから 1 エレメントの大きさおよび分解能は約 5mm 程度と、少し大きいものとした。主な目的は、2 次元分布素子から正確かつ安定に信号を検知するために必要な薄膜パターンと作製プロセスならびに入出力の方式に関する基本データの入手およびプロトタイプの製作である。

そこでまず、以下に示す方式および方法で薄膜素子の作製を行うこととした。2 次元配列からの簡潔な入出力のために、電極配線はスキヤニング方式とし、零電位法を採用する。50mm×50mm 大で厚さ 0.5mm のステンレス（SUS304）基板上に、約 5mm の大きさのエレメントからなる 7×7 配列となるようにパターン化された SiO₂ 絶縁膜、両センサ薄膜（並列型）および Cu 電極配線膜を順に作製する。各エレ

メントはレーザー加工により薄膜の周囲3方に貫通の溝を掘ることによって形成した片持ち梁を起歪体とし、梁の先端部の薄膜が形成される反対側にフォトエッチング加工により周囲を掘り込むことによって荷重印加用の突起を形成する。すなわち、厚さ0.2mmの基板に0.3mm突出した突起をもち、その裏面に薄膜が形成されている構造となる。

図22は薄膜が形成される側から見た1エレメントの完成予想図を示し、図23は突起が形成される側から見た平面図を示す。これらの図から、温度センサが突起のほぼ中央に形成されること、および歪センサが突起部を支える起歪部上に櫛型に形成されることがわかる。この構造によって、温度検知および荷重検知が効率よく行われるものと考えられる。図24は2次元配列パターンの一部を拡大して示したものである。そしてさらに、そこに見られる配線の交差部分の立体構造を図25に示す。それは簡単な橋型構造であるが、断線が生じないこと、交差する配線とリークが生じないことが確実に行われる必要がある。

現在、薄膜作製の途中であり、まだ橋型構造の形成に着手していない。図26は実際に作製している薄膜素子の一部を撮影した実体顕微鏡写真である。暗くみえている部分に貫通の溝を掘ることになる。この中の1エレメントを拡大して写した光学顕微鏡写真を図27に示す。左端下側に配線が途絶えている個所がある。ここに橋型のジャンパー配線が形成される予定である。

今後、薄膜作製の完了後、レーザー加工およびフォトエッチング加工による荷重検出用構造体の作製を経て、入出力動作の試験を行う。その際、多チャンネルの入出力信号を順序良く出し入れするための回路装置も必要となるため、その装置の作製についても検討を行う。これらの要素技術を確立し、試作システムが完成することによって2次元情報を検知可能な触覚センサの基本動作を示すことが可能となる。

積層型単独複合素子の構築に関する検討

並列型複合センサの場合、圧力センサと温度センサの位置が異なることから、厳密には同じ圧力および温度が両者に加わっていないと考えられる。それは相互補正に誤差として影響を及ぼす可能性がある。従って、同じ位置に同じ対称性をもつように積層させることによってそれらの問題が解決できると考えた。また、積層化により並列の場合よりもさらに素子面積を小さくすることも可能となる。

3-(4)- および 3-(4)- に示した複合センサエレメントは、どちらも圧力を受けて変形する起歪体がセンサパターンよりも大きい。2-(4)- で明らかにしたように、薄膜そのものは100 μm と小さくできるので、2mmの分解能を実現するためには起歪体も同程度に小型化しなくてはならない。また、電極配線も歪の影響を受けないようにするため起歪体の外に配置する必要がある。そこで、図28に示すような、薄膜そのものを一種のダイアフラムとする薄膜マイクロダイアフラム構造を考えた。この構造は電極を橋脚とし、歪センサを橋架とする橋型構造をしており、歪センサ膜の下部は空洞となっていることから、基板の変形を伴わずに膜そのものが単独で変形することによって圧力・荷重を検知することができる。

しかし現実問題としてこの構造を完成させるのは容易ではない。そこでまず、図29

に示すような、薄膜ダイアフラムとほぼ同じ大きさのマイクロダイアフラム構造をもつ基板を作製し、その上に薄膜を形成することで、同様の機能を実現することを考えた。この基板は、作製する薄膜パターンの各エレメントの位置に、センサ膜の長さとはほぼ同じ $400\mu\text{m}$ の直径の貫通穴をあけた厚さ $300\mu\text{m}$ のステンレス板と、穴のあいていない厚さ $50\mu\text{m}$ のステンレス板を熱拡散法により貼り合わせて作製した物である。

現在、この基板上への成膜を開始した段階であり、その結果を得るに至っていない。図 30 および 31 に、積層製膜プロセス技術の確立のためにガラス基板上に作製した薄膜の光学顕微鏡写真およびその中心のセンサ膜部分を拡大して捕らえた SEM 写真を示す。これは、電極配線とともに歪センサだけが成膜されているものであるが、 $300\mu\text{m}$ のセンサの大きさ（電極間距離）を見て取ることができ、その大きさに対応する穴からなるマイクロダイアフラムがそのセンサ膜直下に配されることがイメージできる。図 32 に、やはりガラス基板上に成膜した FePd 温度センサまで重ねた積層薄膜の光学顕微鏡写真を示す。

今後、上記基板上への成膜を完了させ、ダイアフラムとして機能することを確かめ、マイクロダイアフラム構造をもつ積層型複合センサを完成させる。それを 3-(4)-2 で述べた 2 次元分布構造と組み合わせることにより空間分解能 2mm の目標仕様を満足するセンサが実現可能となる。

ダイアフラム型圧力センサへの応用

歪センサの応用の一つとして、圧力センサが挙げられる。本事業内の産業化推進委員会の下に組織された圧力/温度複合センサ分科会で調べた結果、カーエアコン冷媒用圧力温度センサおよび車載 AT 用油圧・油温センサなど、各種コンプレッサー媒体の圧力・温度を検知するセンサへの応用が有望と指摘された。

そこで、圧力センサ薄膜を形成したダイアフラムおよび測定系を作製し、ガスの導入によって増加する圧力に対する抵抗値の変化を調べた。ダイアフラムは 3-(4)-1 で用いたもの（図 15）と同じものであるが並列型複合センサではなく、直径 12mm 、厚さ 0.2mm の SUS304 からなる円盤に長さ $640\mu\text{m}$ 、幅 $10\mu\text{m}$ の歪センサのみを形成したものをを用いた。

図 33 に圧力センサホルダ部の概略を示す。下方から導入されるガスをダイアフラムが受ける構造となっており、上からのねじ込みによって押さえられ、O リングを用いてガスをシールした。ねじ込みのボルトには穴があいており、ダイアフラム上のセンサ膜の電極部にはんだ溶接したリード線を外部に引き出せるようにした。図 34 に、圧力印加実験装置の概略を示す。Ar ガスの導入によって圧力を印加し、圧力は減圧弁の 2 次側表示圧を見ながら印加し、同時に市販の圧力トランスデューサーによって測定されるようにした。センサ抵抗値は、 0.2mA の定電流印加の下、デジタルマルチメーターを用いて四端子法で測定した。

その結果、 $0\sim 35\text{kgf/cm}^2$ の圧力印加によって、薄膜の剥離および断裂などは生じず、はんだ溶接した電極が外れることも無かった。図 35 に圧力（トランスデューサー出力）と歪センサ薄膜の抵抗値との関係を示す。 $0\sim 35\text{kgf/cm}^2$ の圧力印加に対し抵抗値は直線的に増大し、約 5% の抵抗変化率を示した。また、除圧後の抵抗値は加圧前の

抵抗値とほぼ一致したことから、ヒステリシスはほとんど無いものと考えられる。これまで行ってきた歪感度測定では、0.5%の抵抗変化率は約 850 $\mu\epsilon$ の歪に相当したことから、約 5%のそれはダイアフラムに約 8500 $\mu\epsilon$ の歪が入っていたことを示唆している。故に、ダイアフラム上に形成した歪センサ薄膜は、その大きな歪領域でも使用可能であると考えられる。

以上の結果から、Cr-N 薄膜歪センサは、ダイアフラム型圧力センサ用材料として有望であると考えられる。今回の実験では車載 AT 用油圧センサの仕様圧力範囲を考慮して 35kg/cm² までしか測定を行わなかったが、さらに高い圧力まで使用できる可能はある。さらにダイアフラムの厚さを厚くすることによってより高い圧力領域でも使用可能と考えられる。感度の高い半導体を用いた圧力センサは高圧領域では強度が小さいために壊れやすく、使用できないことから、新たな開拓分野として期待できることを示唆していると考えられる。さらに 3-(4)-1 で示した並列型複合センサをそのまま組み込めば、温度測定および相互補正も可能となる。今後、実用化に向けた取り組みが必要である。

靴底ベクトルセンサへの応用

FES を支える生体情報センサへの応用として、歪センサを用いた荷重ベクトルセンサを靴底に配置した靴底ベクトルセンサの開発が進められている。この新たな人体装着型補助計測具の詳細については、本報告書の該当する章を参照されたい。

図 36 に、作製した靴底ベクトルセンサの受感部の写真を示す。四本のアーム上に楕型の歪センサ薄膜が 2 つずつ形成されており、各アームに印加される荷重を歪として検知し、それらの割合から空間的な荷重の大きさと方向、すなわちベクトルを算出することができる。アーム上の 2 つの薄膜のうち一方を温度センサとすることによって、より高精度な複合センサとすることも可能である。

市販の歪ゲージを用いる場合、貼り付け方のバラツキによる誤差が大きいという問題を持つが、薄膜の場合、基板に直接形成されるため、そのような問題をもたない。しかも Cr-N 薄膜は歪感度が高く、かつ抵抗値も大きくすることが可能なことから、より大きく高精度な信号を得ることができ、さらに、より小型にすることも可能であるというように多くの長所を持つ。

一方、問題としては成膜後の加工である。薄膜を作製したあと基板を加工して 4 本アームの形にし、靴底ベース金具に溶接するなど多くの機械加工が施される。その過程で薄膜が損傷するという問題が生じた。外注加工なので問題は単純ではないが、業者の現場担当者と密に打ち合わせをする等により解決できるものと思われる。

今後、本薄膜素子を用いることによって、より高精度・高感度な靴底ベクトルセンサが実現すると考えられる。

4 フェーズ の取り組み予定

基本的な構成要素としての並列型単独複合素子を用いて、受感部の大きさが数 100 μ m、荷重感度が数 100 g / エレメントならびに温度分解能約 0.5 の特性をもつ小型・高精度の感温感圧センサの構築に成功した。しかし、並列型 2 次元分布素子の試作におい

ては、エレメントの大きさおよびそれらの位置間隔は共に約 5mm と大きく、目標の 2mm 空間分解能が達成されていない。これについては、フェーズ ① の計画にある積層型 2次元分布素子の構築、すなわち積層型素子において確立した、起歪体を含めた 0.5mm 大エレメントの作製技術を用いることにより目標分解能を満足する 2次元分布型の感温感圧センサが実現できると考えられる。

そのような目標性能を満足する超小型・高精度の感温感圧複合センサを試作し、温度検知機能付き触覚センサとしてロボット、義手・義足、ならびに FES 関連を含む人体装着型補助具などへの応用を検討し、実用化を目指す。

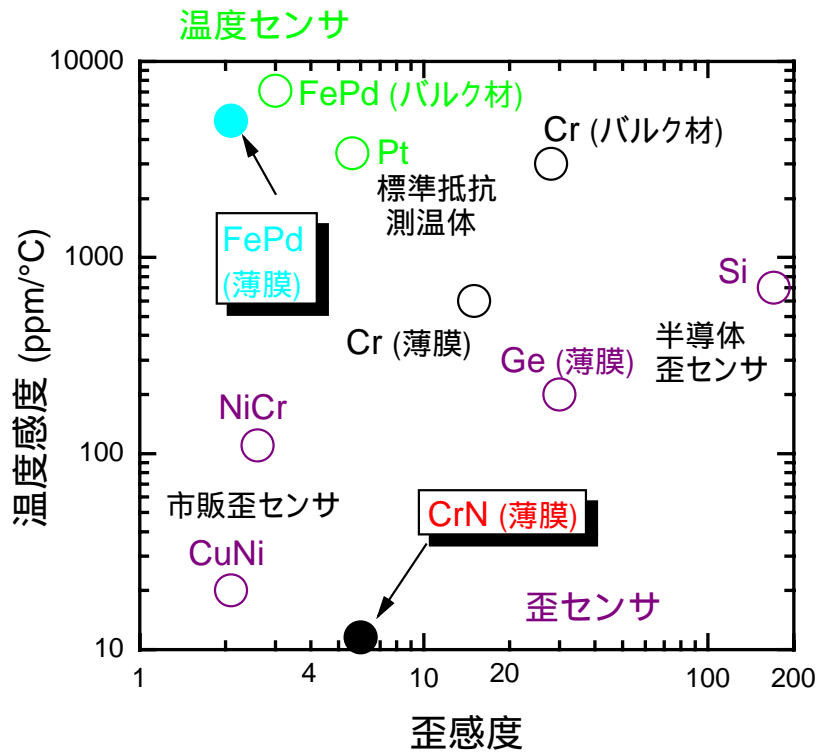


図1 代表的な温度センサおよび歪センサ材料の特性

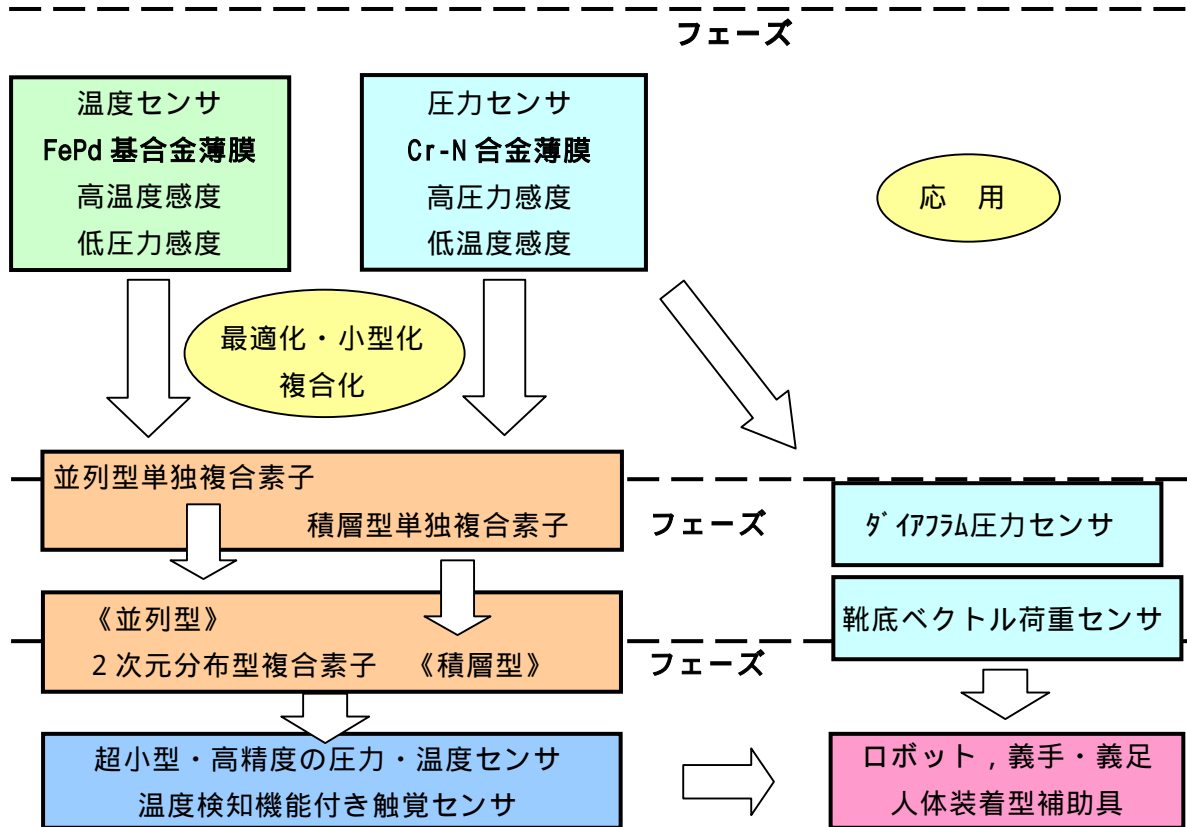


図2 本研究の流れ

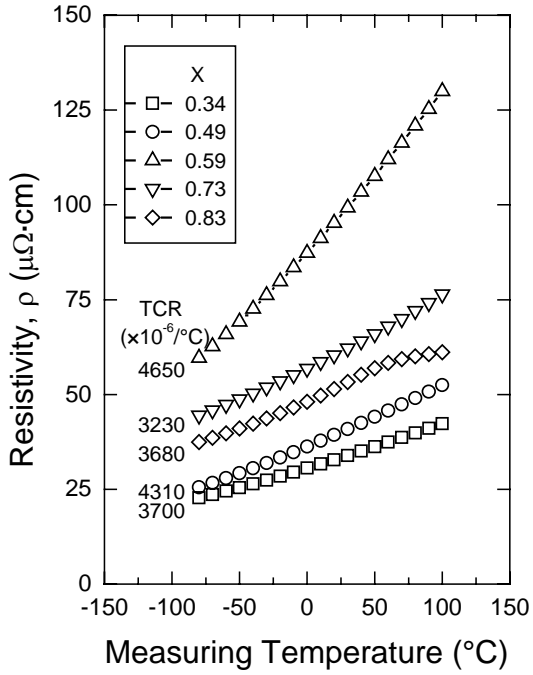


図 3 異なる組成 X からなる $Fe_{1-x}Pd_x$ 合金薄膜において測定した抵抗温度曲線

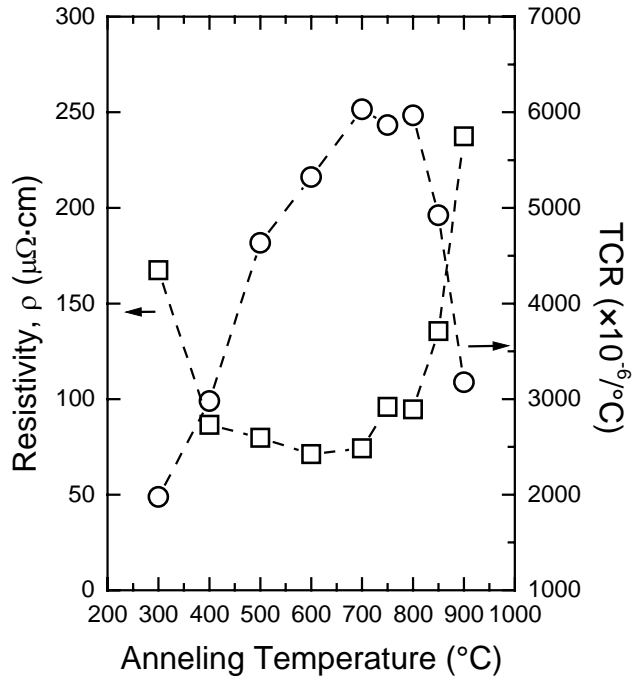


図 4 $Fe_{1-x}Pd_x$ 合金薄膜における比電気抵抗および TCR の熱処理温度依存性

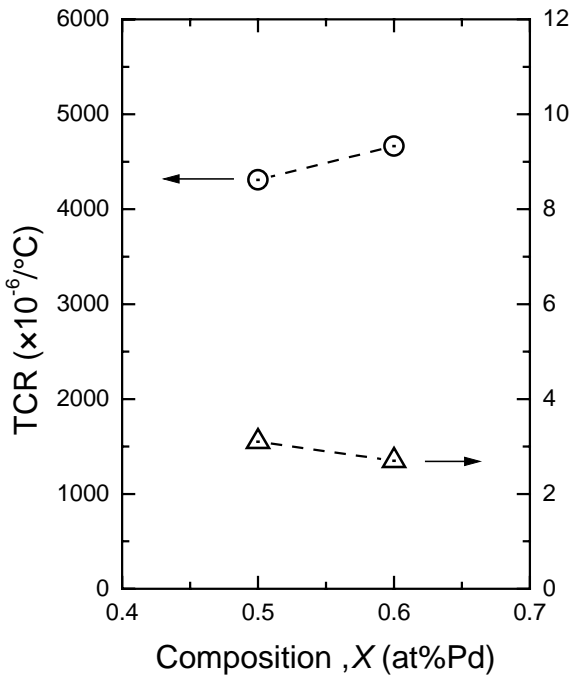


図 5 $Fe_{1-x}Pd_x$ 合金薄膜における Gf および TCR と組成との関係

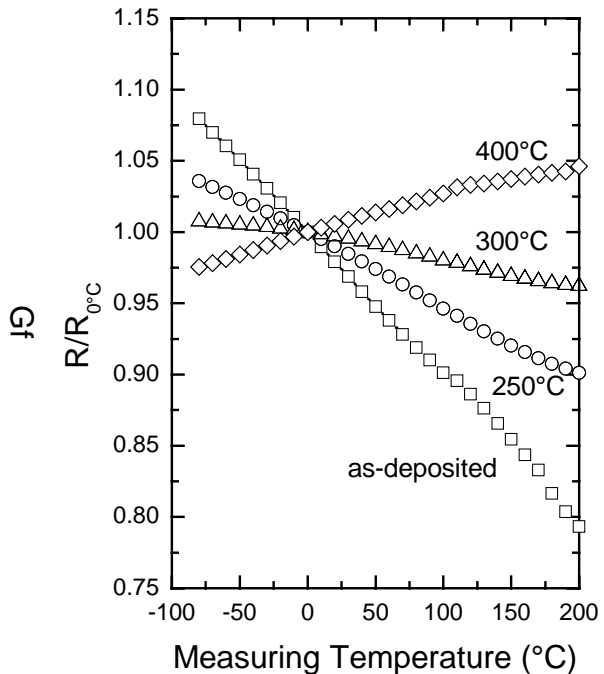


図 6 Cr-N 合金薄膜の as-deposited 試料ならびに 250、300 および 400 の温度で 30 分の熱処理を施した試料において測定した抵抗温度曲線

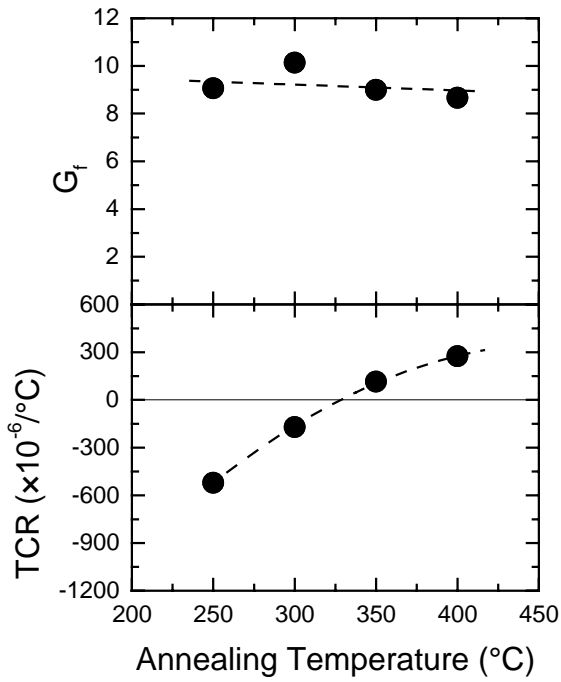


図7 Cr-N合金薄膜における G_f およびTCRの熱処理温度依存性

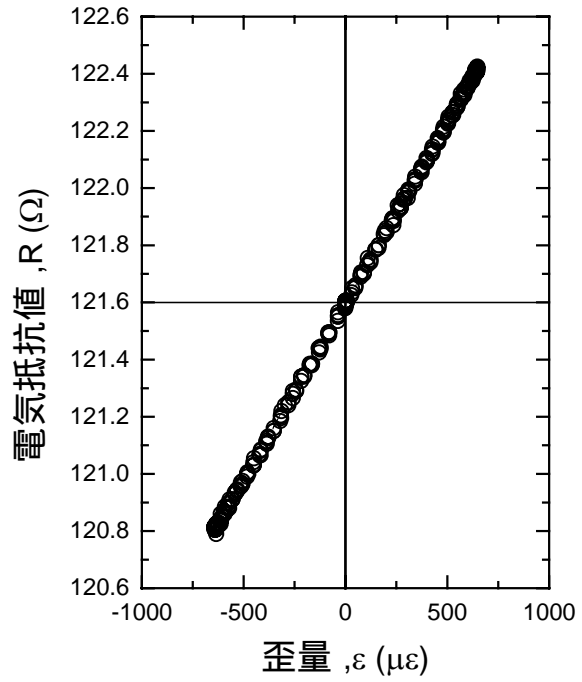


図8 350 で30分の熱処理を施したCr-N合金薄膜における電気抵抗値と歪量との関係

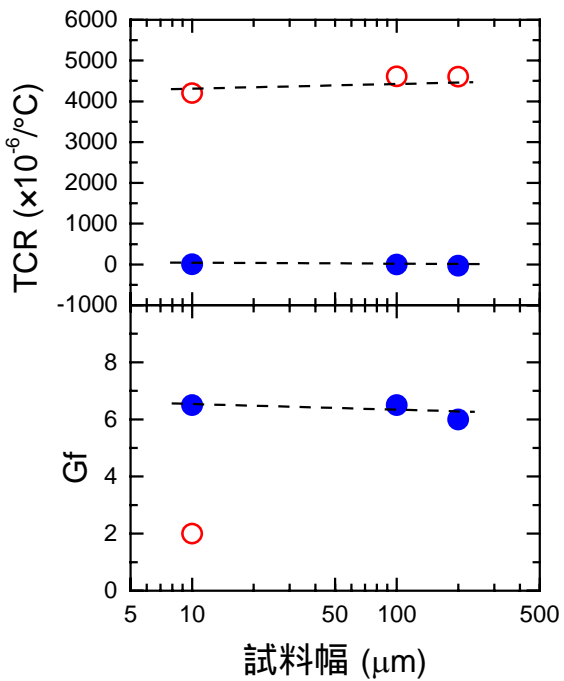


図9 電極間距離を1000 μm 一定とした場合のFe-Pd()およびCr-N()合金薄膜におけるTCRおよび G_f と試料幅との関係

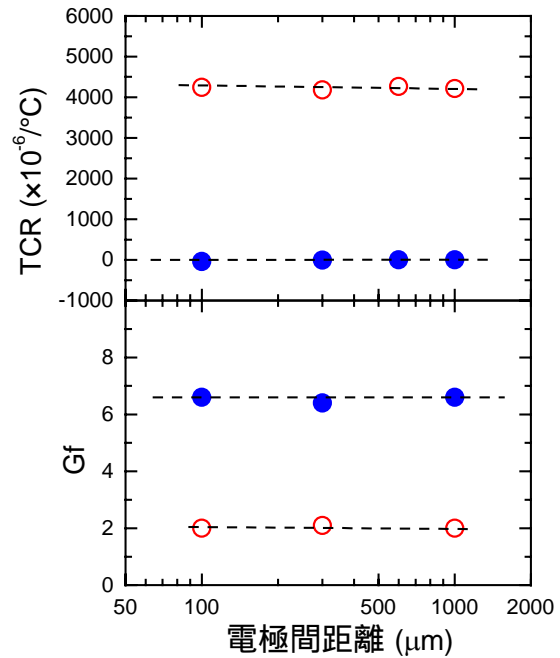


図10 試料幅を10 μm 一定とした場合のFe-Pd()およびCr-N()合金薄膜におけるTCRおよび G_f と電極間距離との関係

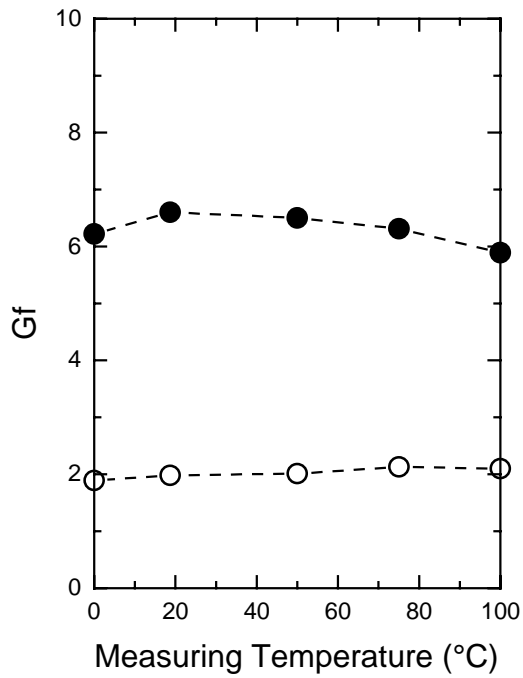


図 11 複合化した Fe-Pd(●)および Cr-N(○)合金薄膜における電気抵抗値の温度依存性

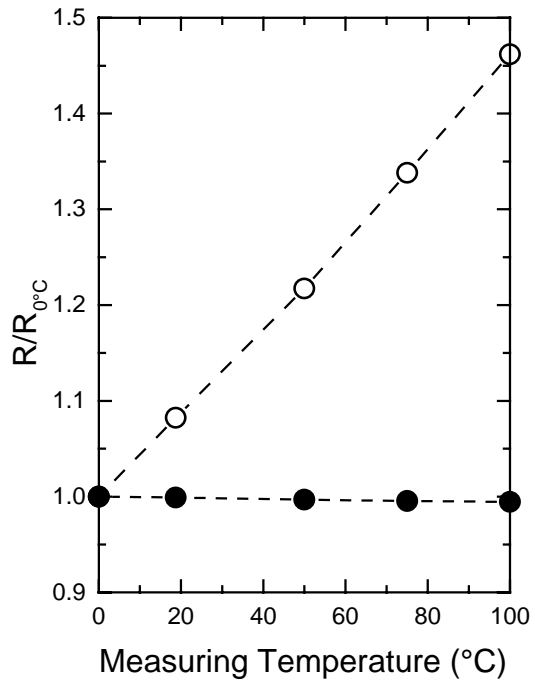


図 12 複合化した Fe-Pd(○)および Cr-N(●)合金薄膜における Gf の温度依存性

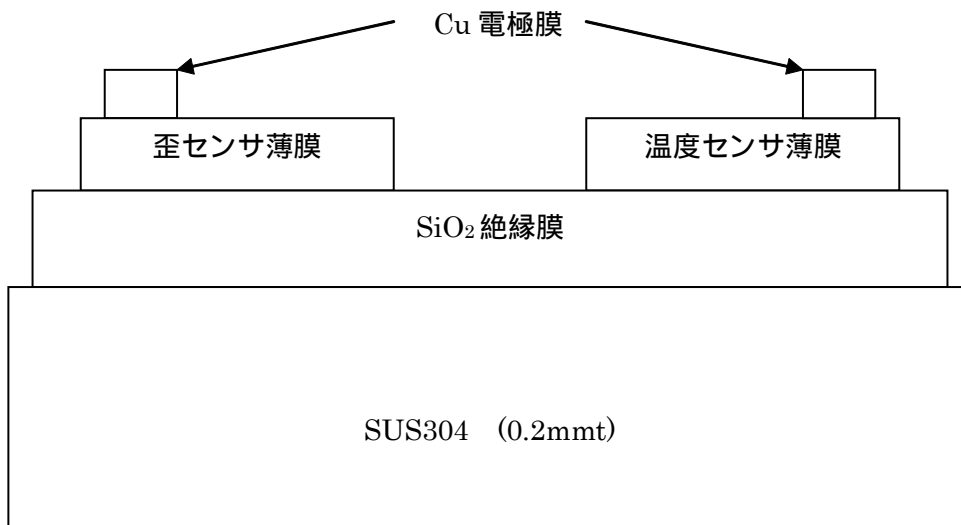


図 13 並列型複合センサ素子の構造

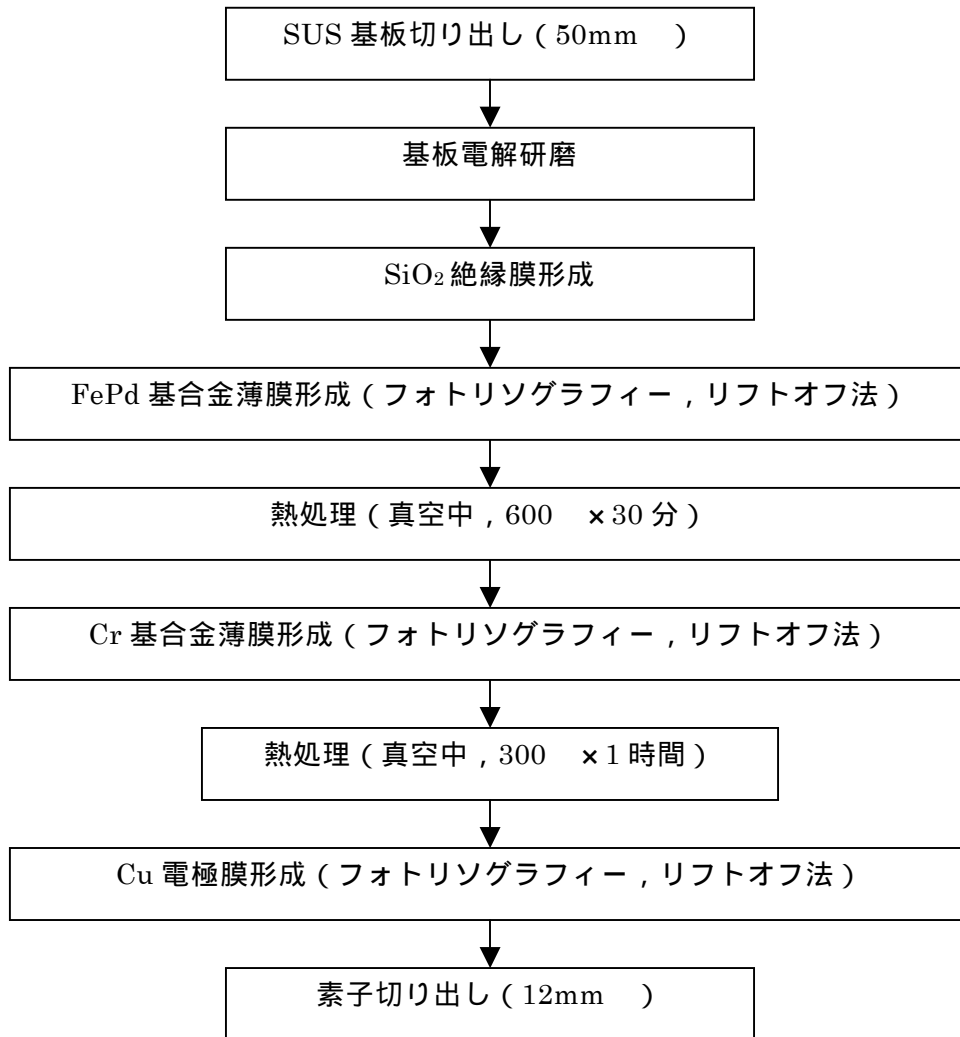


図 14 並列型複合センサ素子の作製プロセス

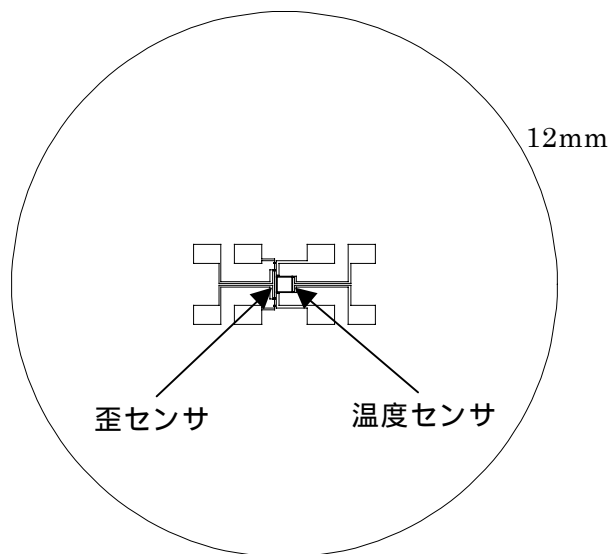


図 15 センサディスクおよび薄膜パターン

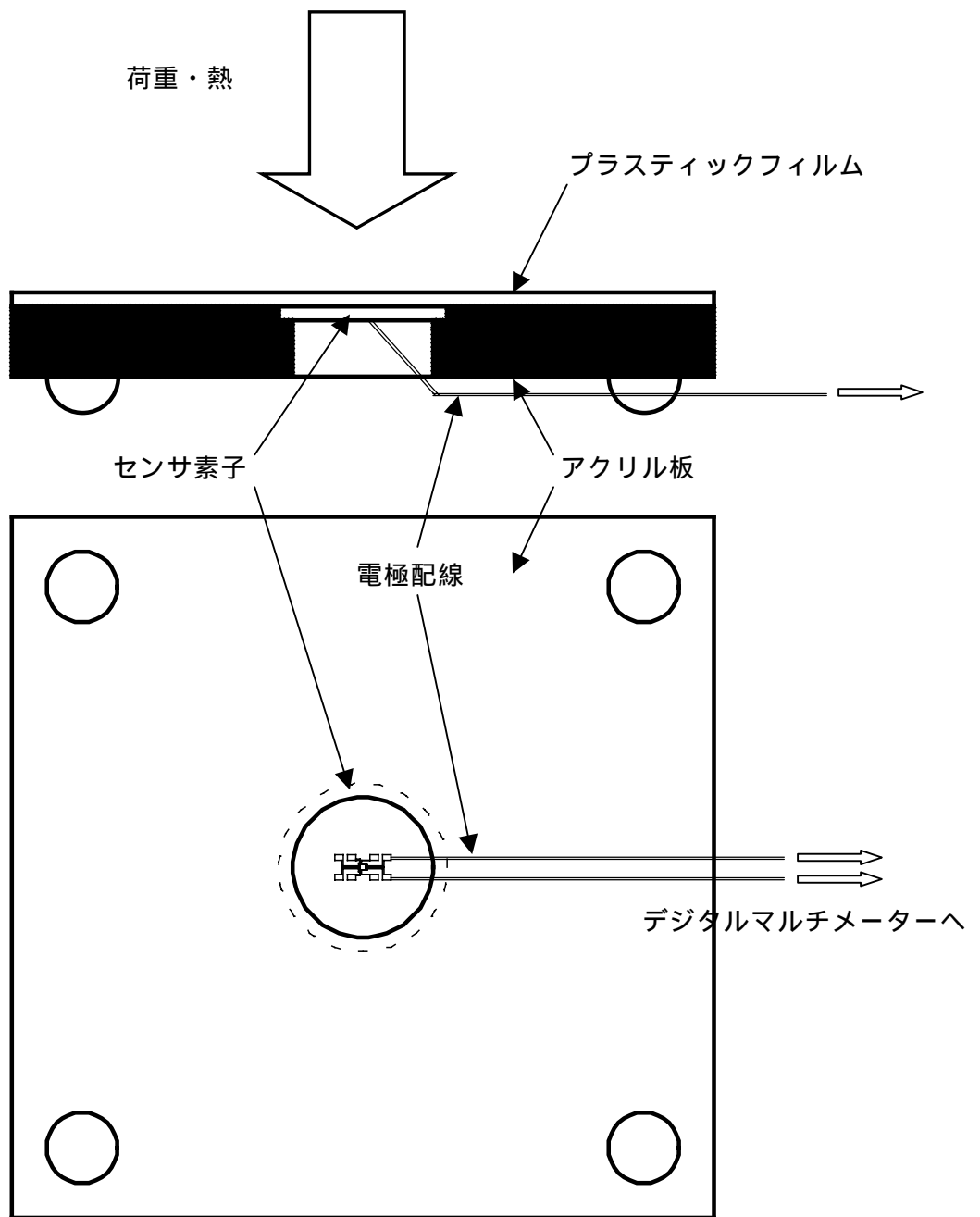


図 16 荷重・熱印加のための素子ホルダー

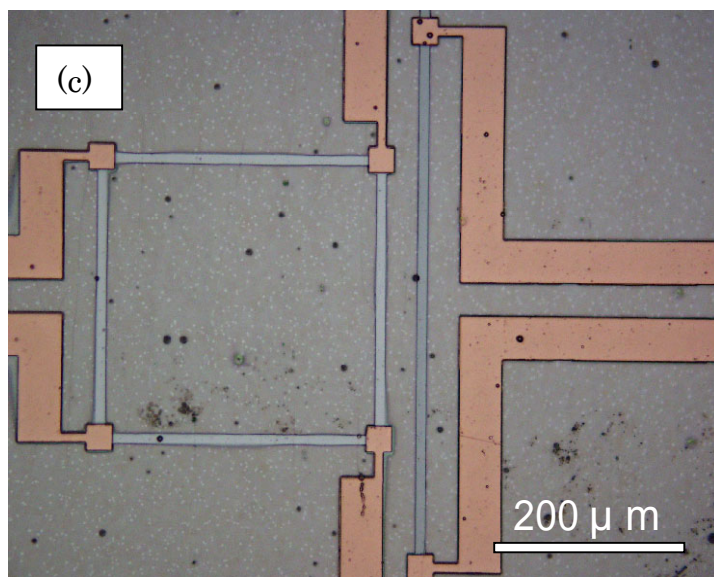
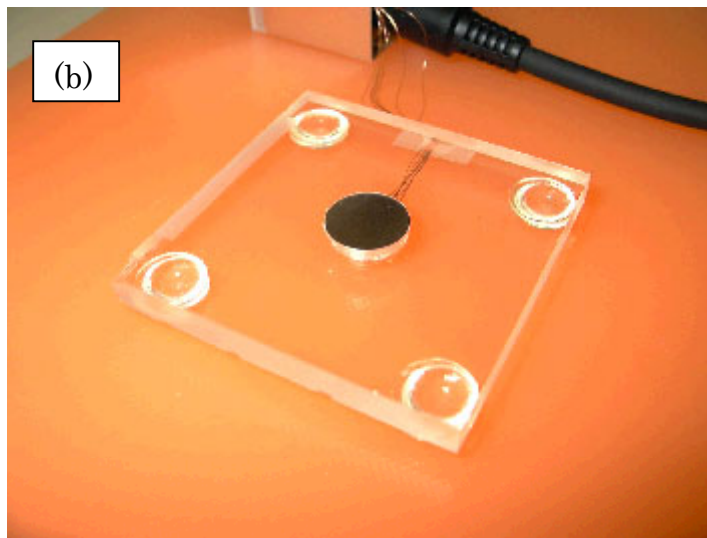


図 17 並列型複合素子を用いた圧力・温度同時印加測定システム

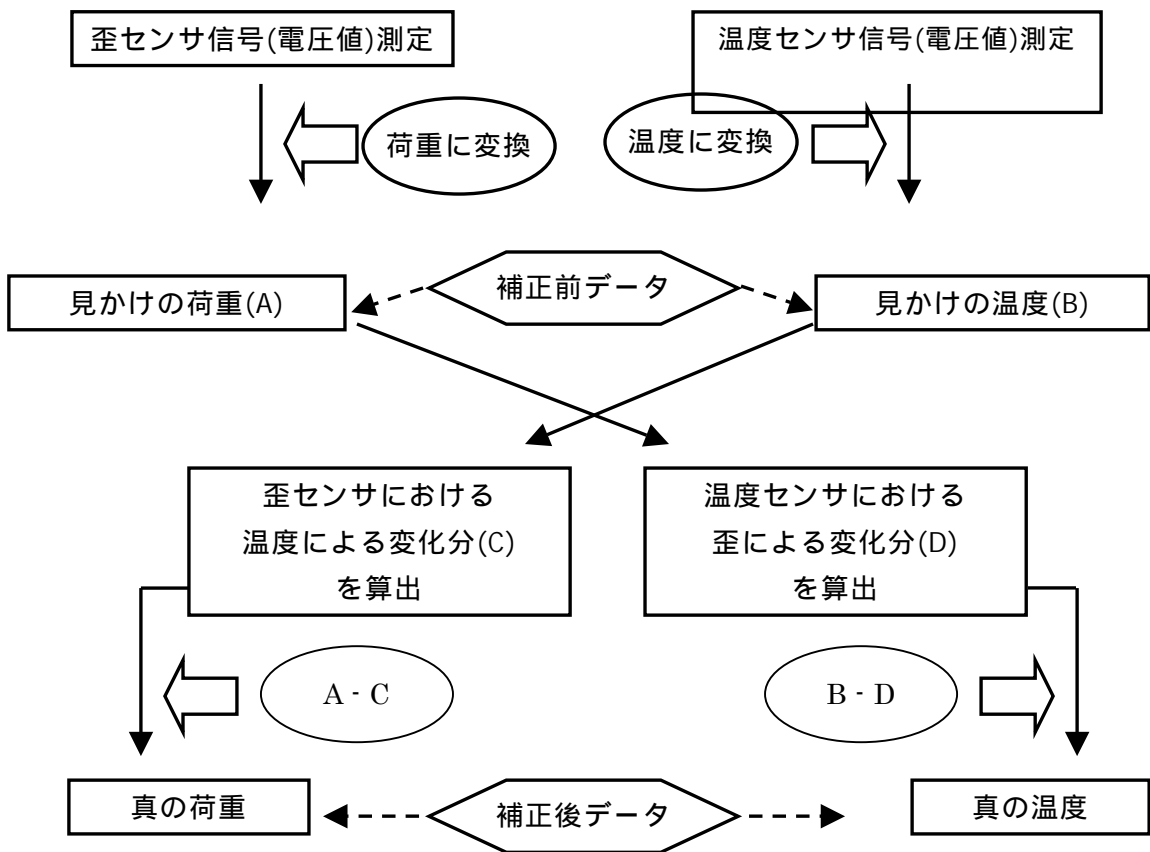


図 18 データ補正の概略を示したフローチャート

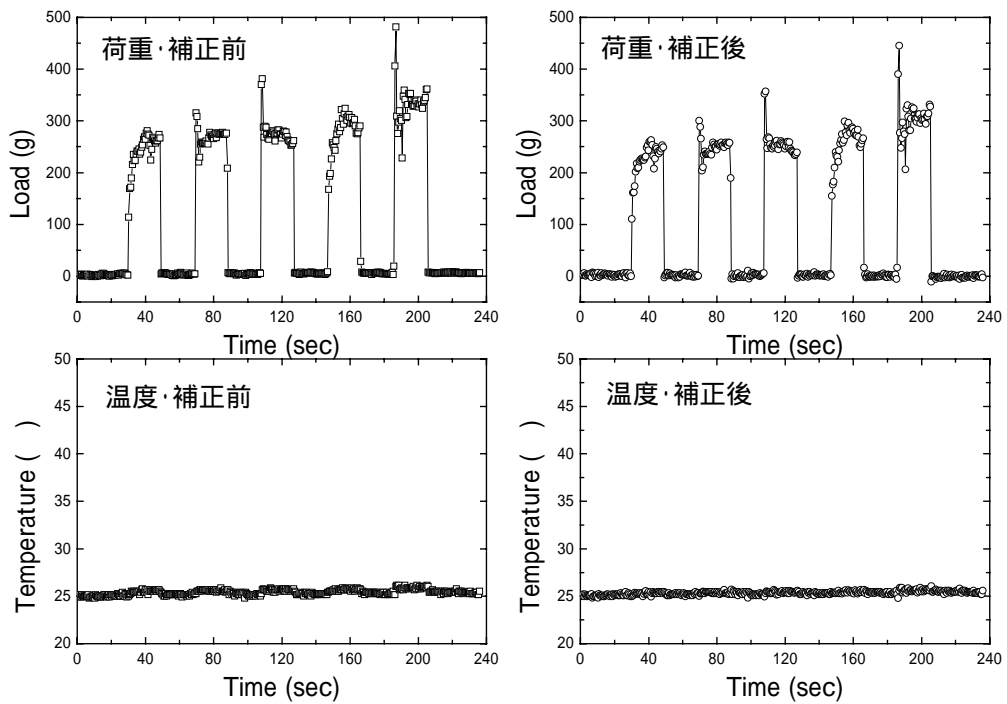


図 19 プラスティックの棒で押した場合の変化

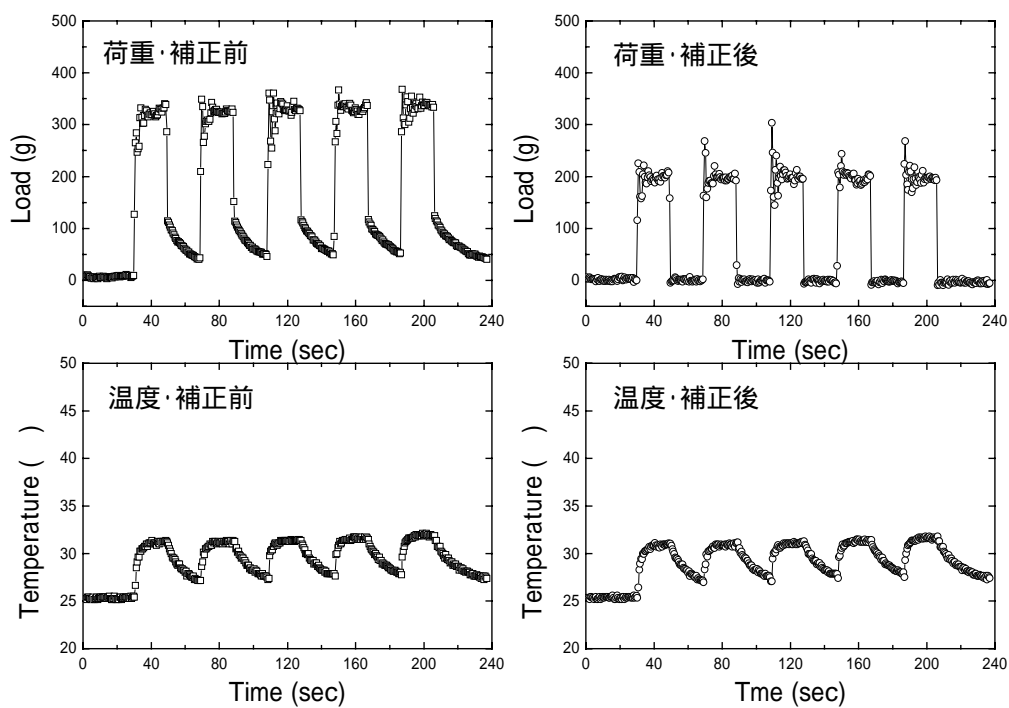


図 20 指で押した場合の変化

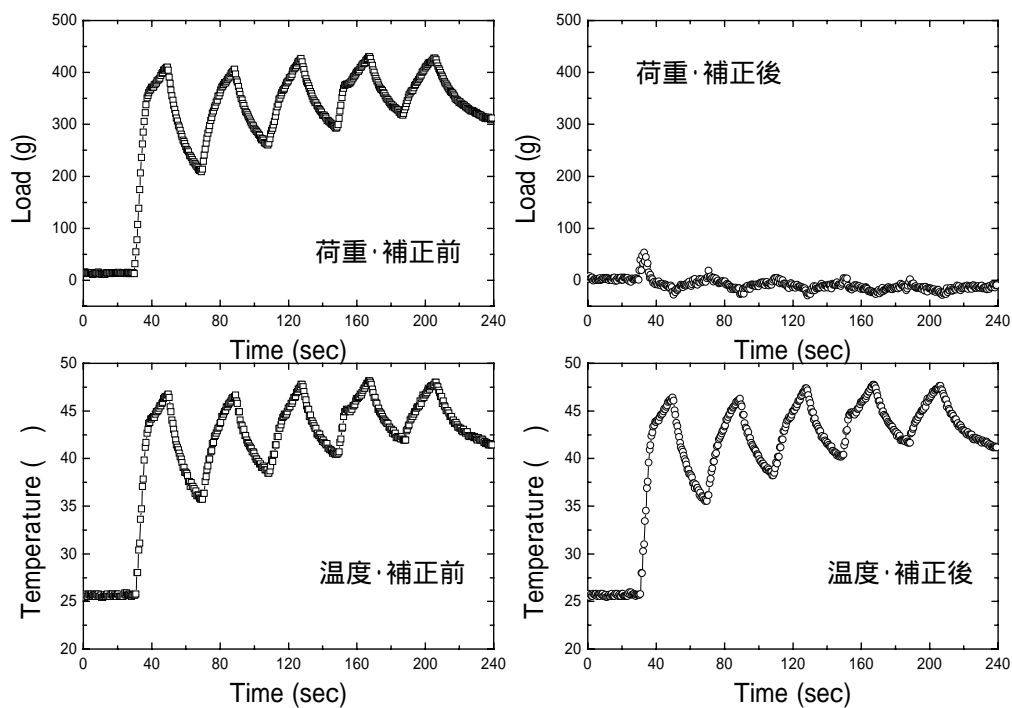


図 21 ドライヤーで温度をかけた場合

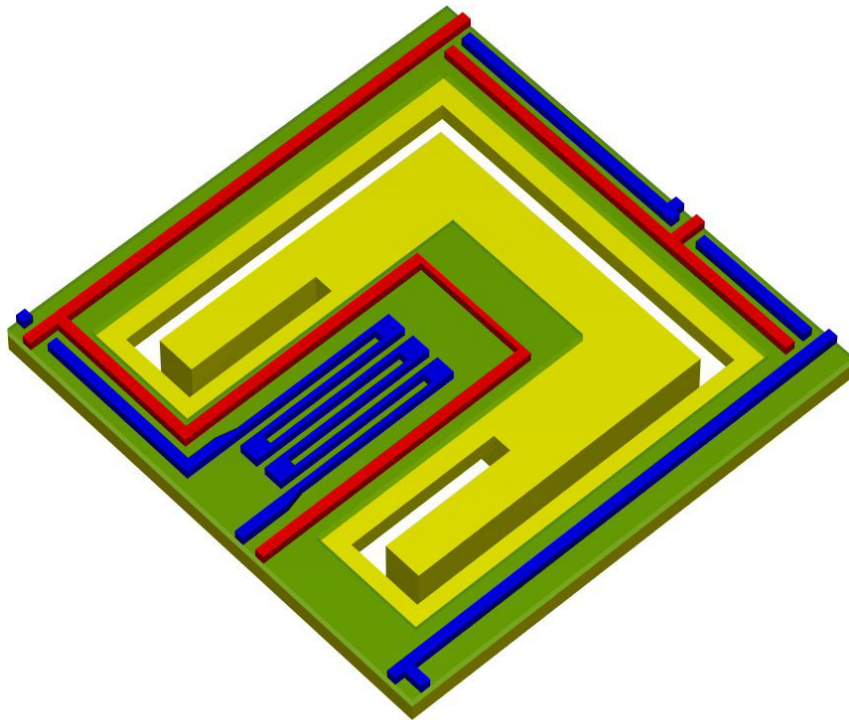


図 22 並列型 2 次元分布複合素子 1 エLEMENTの完成予想図

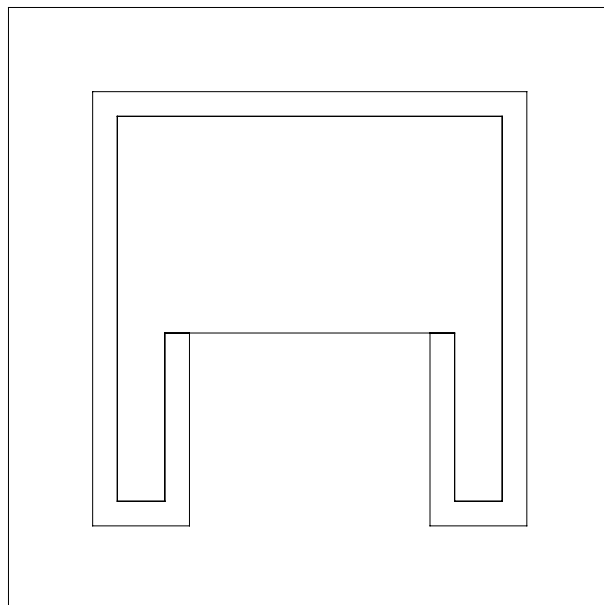


図 23 並列型 2 次元分布複合素子 1 エLEMENTの突起側から見た平面図

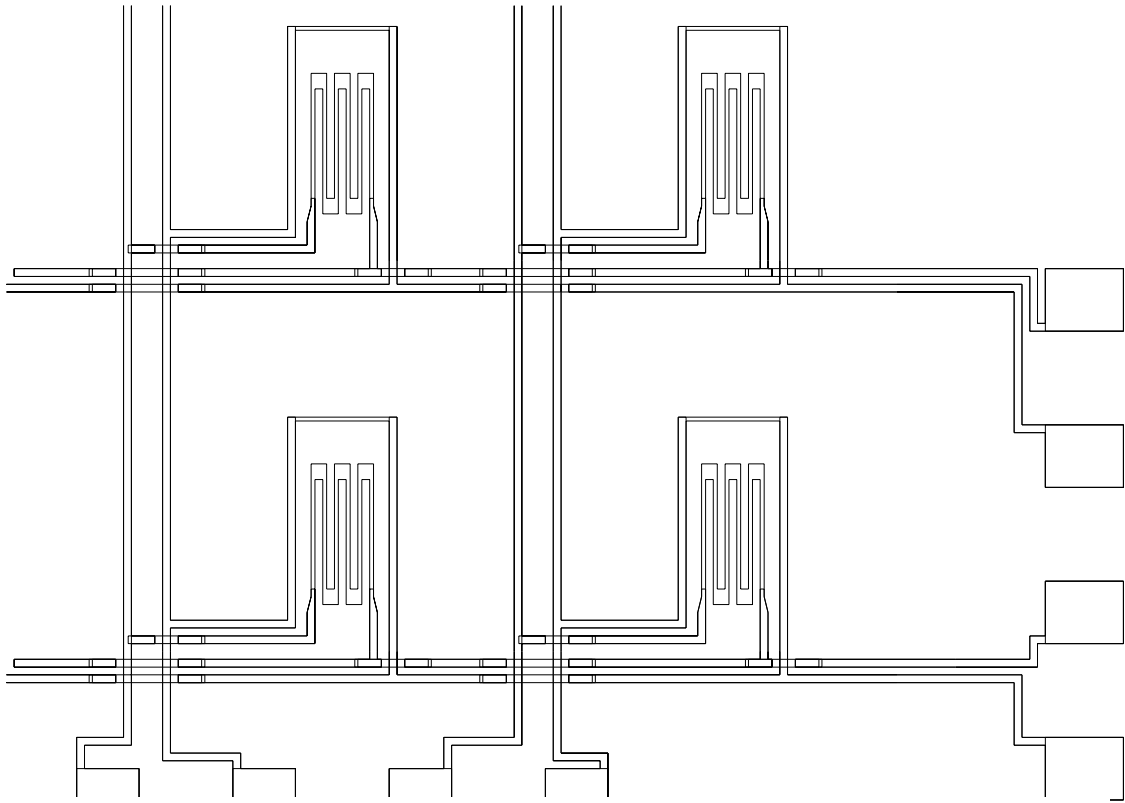


図 24 2次元配列パターン設計図面の一部を示した図

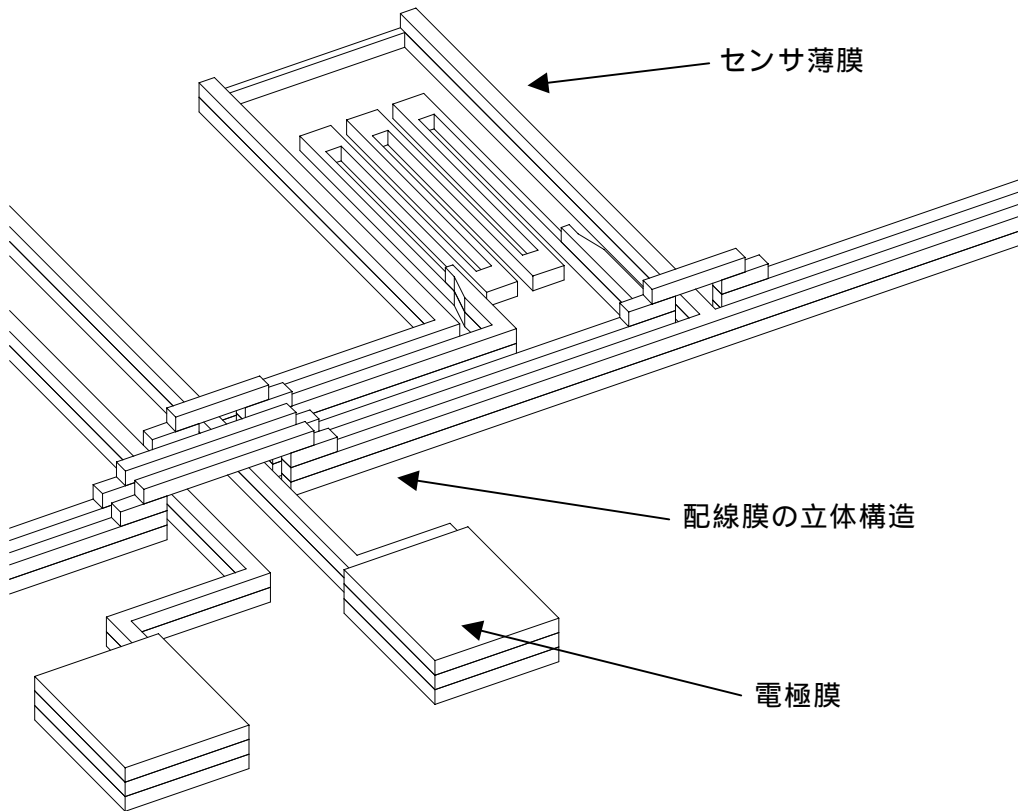


図 25 配線膜における交差部分の立体構造を示した図

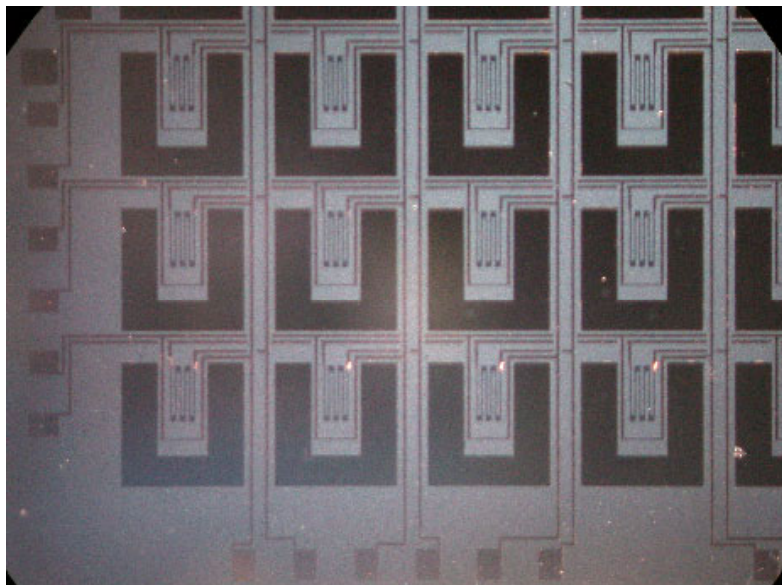


図 26 並列型 2 次元分布素子の一部を撮影した実体顕微鏡写真

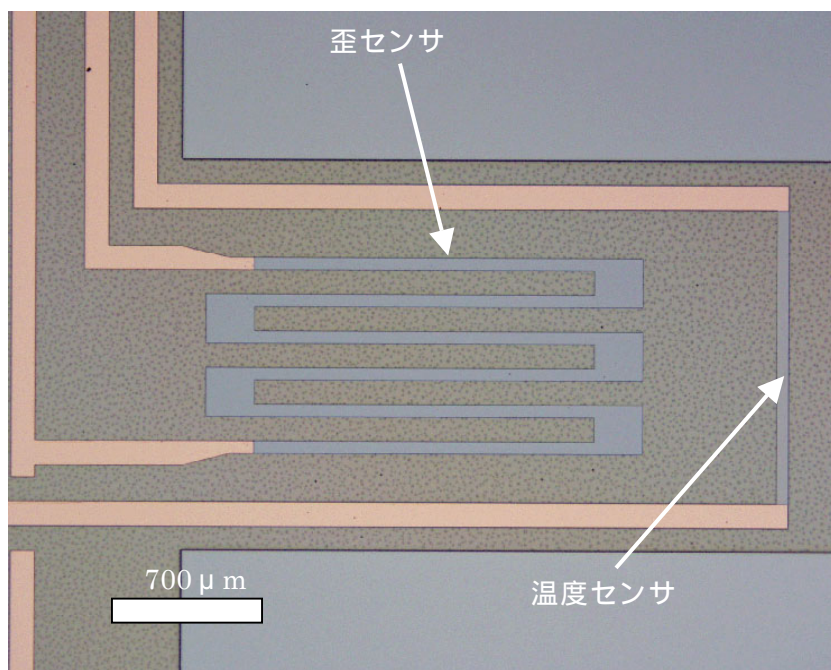


図 27 素子並列型 2 次元分布素子の エレメントの光学顕微鏡写真

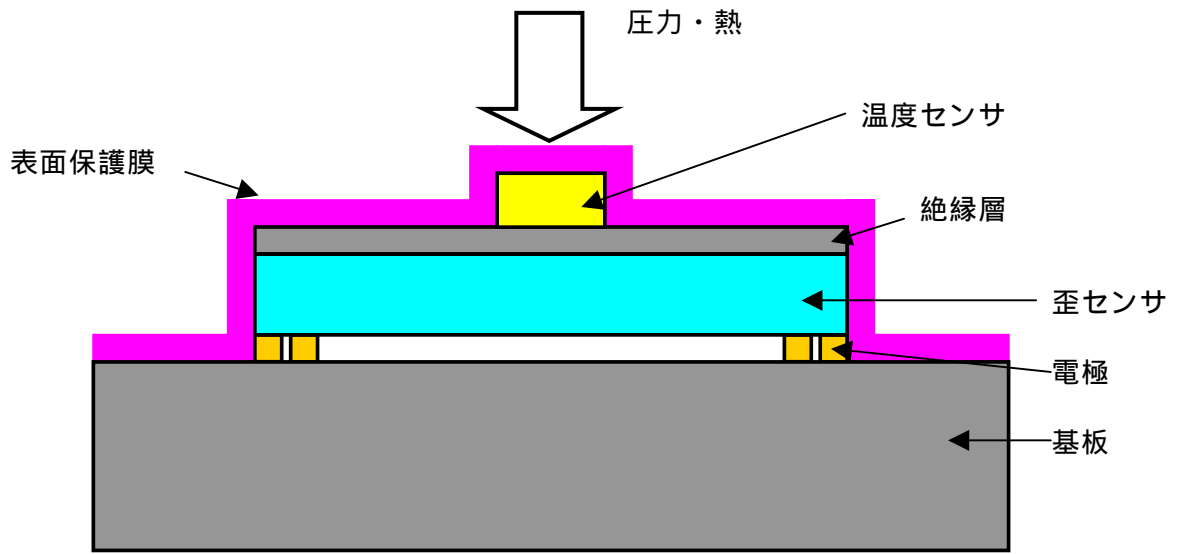


図 28 積層型素子の構造

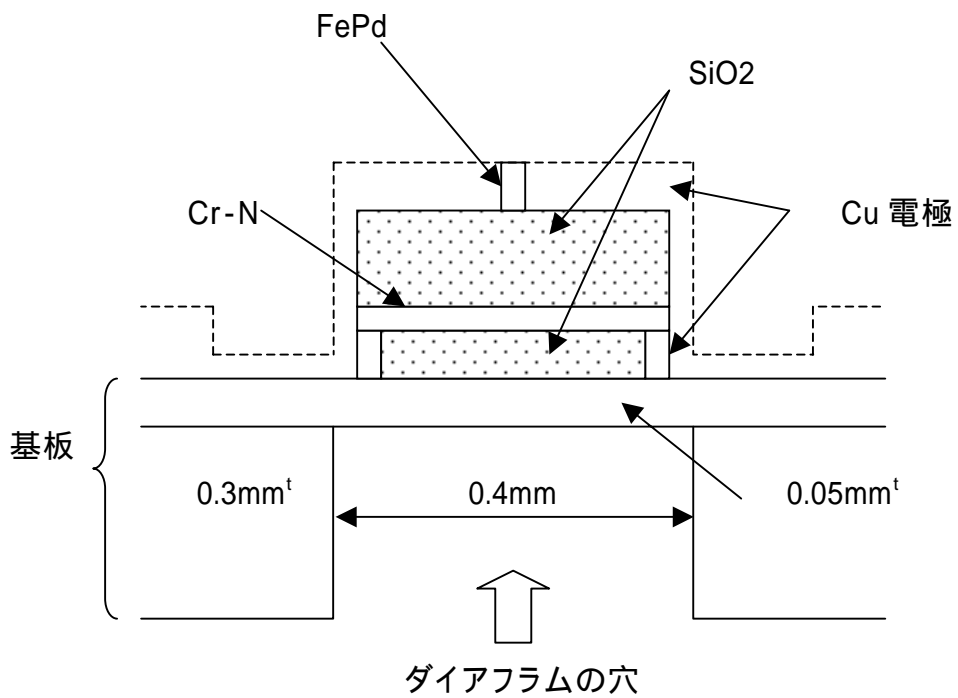


図 29 貼り合わせ SUS 基板および薄膜との位置関係を示した模式図

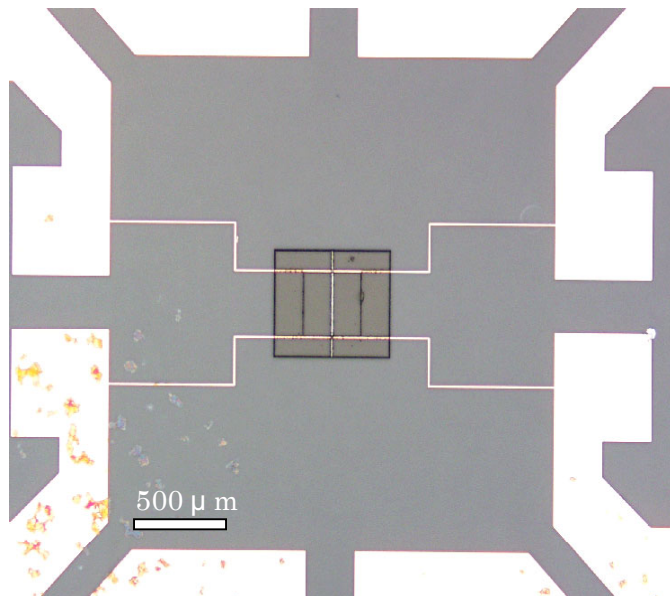


図 30 積層薄膜の光学顕微鏡写真（歪センサのみ）

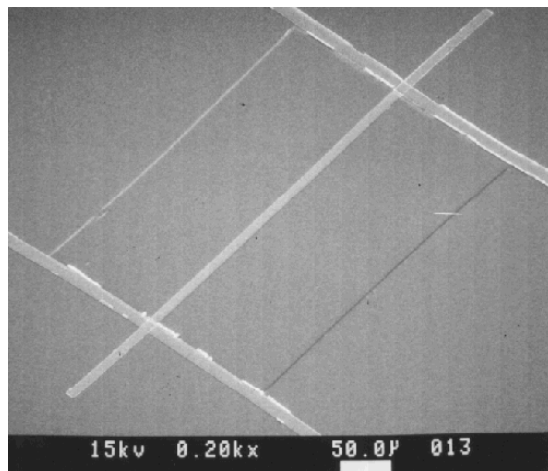


図 31 受感部の SEM 写真（歪センサのみ）

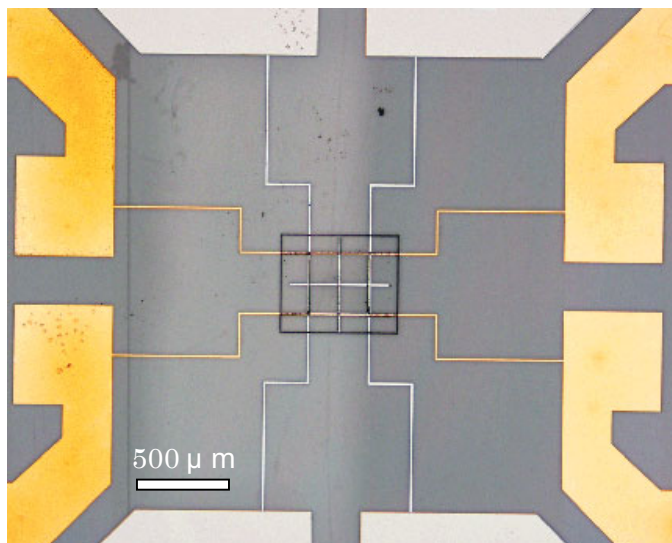


図 32 積層薄膜の光学顕微鏡写真（複合センサ）

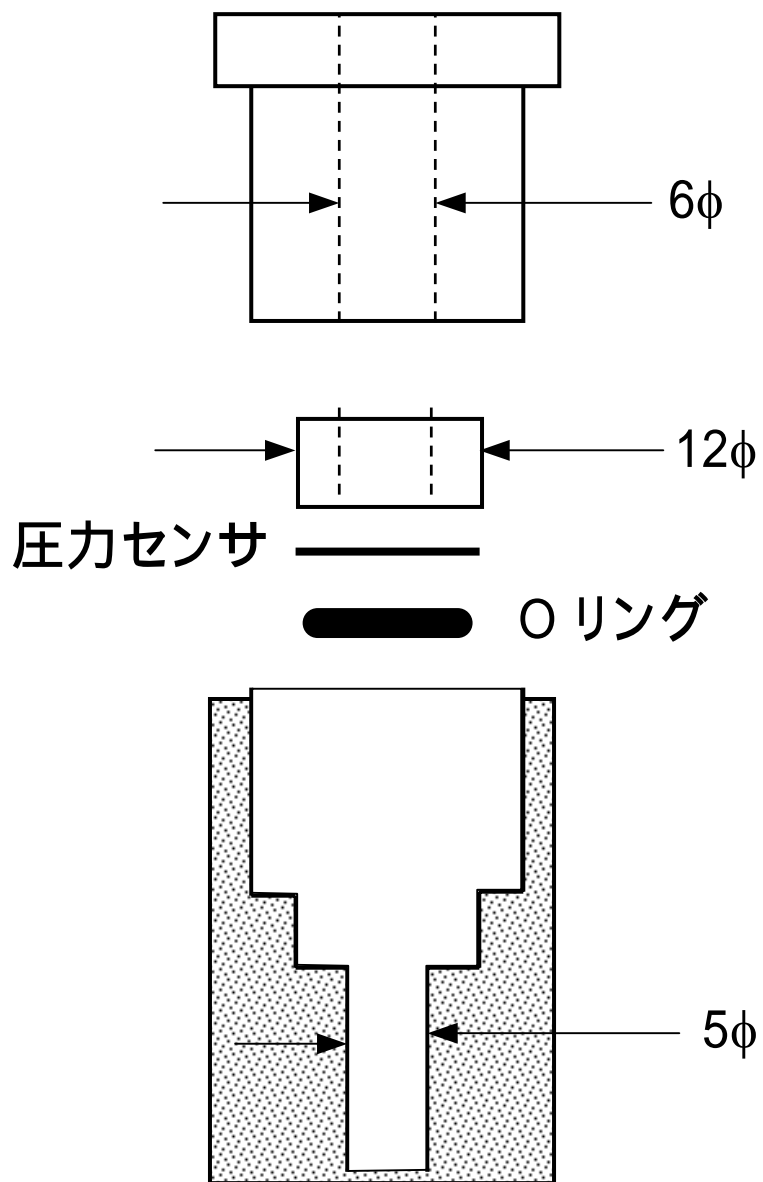


図 33 ダイアフラム圧力センサホルダ部の概略

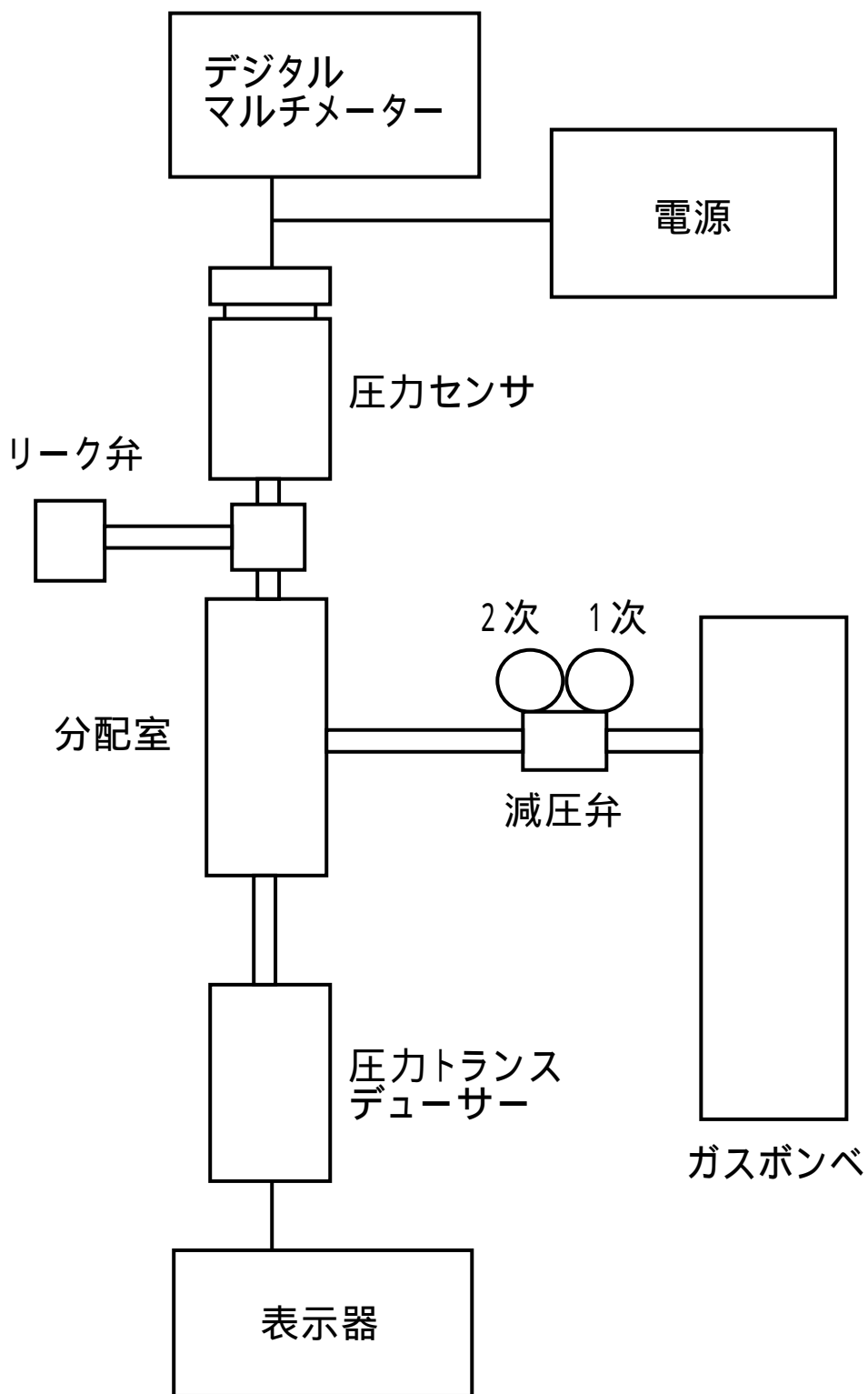


図 34 圧力印加実験装置の概略

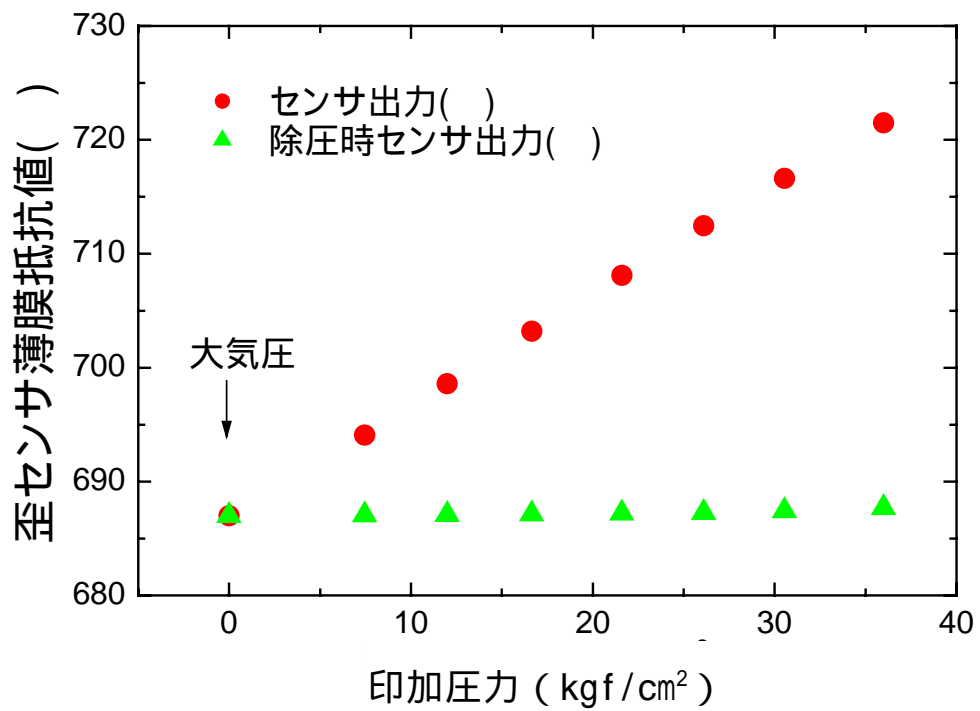


図 35 ダイアフラム型圧力センサにおける圧力抵抗特性



図 36 靴底ベクトルセンサの受感部