

マッチング・ファンド方式による産学連携研究開発事業

マイクロ加速度センサーを用いた広帯域・高感度 地下弾性波検出器の実用化

研究開発プロジェクト総括研究成果報告書

平成 13 年 5 月 30 日

総括代表者 新妻弘明
(東北大学・大学院工学研究科・教授)

企業分担代表者 鹿熊英昭
(株)アカシ・取締役技術部長

研究開発プロジェクトの背景・経緯と目的

(1) プロジェクトの背景

反射法 / 屈折法地震探査、微小地震観測、坑井間弾性波計測、AE / 微小地震法等に代表される地下弾性波計測技術は、最も主要な地下計測法として、地下資源開発、地熱開発、地殻工学、防災、地球科学など多くの分野で使用されている。

実際の地下探査・計測においては、測定対象が不確定な上に情報伝搬媒質が不均質であり、更に地表あるいは坑井からの遠隔計測を余儀なくされる。このため、そこで得られる信号は常に不確定であり、雑音や誤差を含む。このような計測系では、時間的・空間的に観測点数を増やすことが、精度の良い推定値を得るための最良の手段である。しかしながら、現用の地下弾性波検出器は大型かつ高価であり、また性能的にも限界がある。このため、多数のセンサーを設置することが出来ず、高精度測定を行う上での大きな障害となっている。

近年、自動車をはじめとする工業技術や医療技術の分野において、半導体の微細加工(マイクロマシニング)技術を用いたマイクロセンサーの開発が目覚ましい発展を遂げている。マイクロセンサーの利点としては、以下の点が挙げられる。

- i. シリコンやガラスなど、比較的入手しやすい安価な材料を使用することから、低コストでセンサーを開発できる
- ii. 多数のセンサー素子を、バッチプロセスによって一括生産するため、素子一個当たりの生産原価を大きく下げることが可能となる
- iii. ミクロン・オーダーの微細な構造を実現できるため、従来のセンサーに比べて飛躍的に小型化が可能となる
- iv. センサーが小型であることから、その駆動に要するエネルギーが小さいため、微小な力にも感度を持つ、高感度・広帯域センサーが実現可能となる

この様に小型・安価で高性能なマイクロセンサーを、地下弾性波計測に導入することができれば、観測点数を大幅に増やすことが可能となると同時に、多様な計測が可能となり、取得できる情報の信頼性が著しく向上することから、その実用化が広く期待されている。

(2) これまでの研究経過

本研究開発プロジェクトの総括代表者である新妻弘明は、1993年に、マイクロマシニング技術を地下計測に導入する“地下マイクロマシニング構想”を提唱し、各種マイクロセンサーの開発をはじめとする一連の研究を行ってきた。この構想は、マイクロマシニング

技術による小型・安価なマイクロセンサーと、従来よりも細い径の坑井を安価に掘削するマイクロドリリング技術の開発により、これまでほとんど不可能とされていた画期的な地下計測法を開発しようとするものである。この構想の概念を Fig.1 に示す。

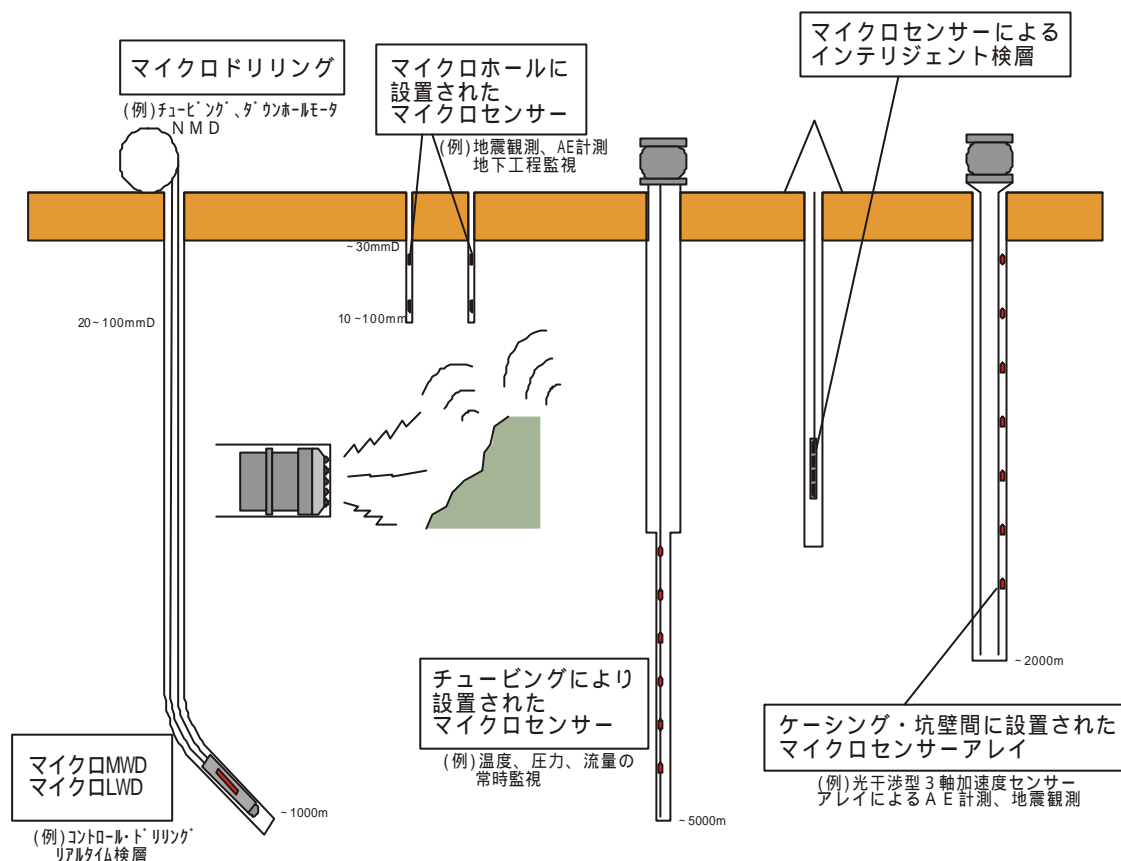


Fig. 1 地下マイクロセンシング構想

新妻らはこれまでに、本プロジェクトで取り扱う広帯域・高感度容量型マイクロ加速度センサーを試作し、実験室内での性能評価を行っており、それが従来使用されている圧電型高感度加速度センサーと同等以上の感度及び周波数特性を有することを明らかにしている。また、本研究の研究分担者である江刺正喜は、マイクロ加工技術に関して高い実績を上げており、平成 8 年にはマイクロ加工技術に関する東北大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリーの創設に関わっている。さらに、新妻らは坑井内 3 軸弾性波計測システムの開発、多成分弾性波信号処理技術の開発、フィールド実験等、広帯域・高感度坑井内多成分弾性波計測技術に関して多くの実績を有している。

分担企業である(株)アカシは、大正 5 年の創業以来、大森式地震計、HES 型地震計、SMAC 強震計、K-NET システム、Hi-NET システム、世界最深地下 3500m の地中地震計、日本初の常時観測用海底地震計の開発などを行うと共に、地震予知・防災に関連したナショナ

ルプロジェクトに数多く参加した実績を有する。現在同社は、全国規模の高感度地震観測網の構築に参画し、地中地震計を開発・販売しているが、地震計の設置コストを削減するためには超小型地震計の開発が急務であるとの認識の元に、従来型センサーの小型化や地下計測用小型パッケージなどについて基礎的研究を実施している。

(3) 本プロジェクトの目的と概要

本研究開発プロジェクトは、地下マイクロセンシング構想の一環として開発された超高感度容量型加速度センサーを、東北大学と(株)アカシとの共同研究によって実用化しようとするものである。新妻らは既に、本センサーに関してシリコンプロセスを含む基本設計技術を確立し、試作品が1kHz付近までの広帯域特性と80dB程度の広ダイナミックレンジを有することを明らかにしている。この研究成果を元に、本プロジェクトでは、地下弾性波検出器として実用化するために、センサー部の開発のみならず、システム全体としての総合的な開発を行う。

具体的には、以下のような課題を設定する。

1. センサー製作時の歩留まり向上のためのプロセスの検討
2. 電子回路の超小型化・高性能化及びセンサーとのハイブリッド化
3. 地下計測用パッケージ(マイクロゾンデ)の製作と、センサー・電子回路部の組み込み
4. 実フィールドに於けるセンサーの性能評価

以上の課題をクリアすることで、最終的に商用化に向けたシステムの設計を行う事も目的としている。

本プロジェクトにより地下弾性波マイクロ計測器が商用化されれば、(a)小型・軽量の検出器であるため、機動性を有した計測が実現可能である、(b)埋設孔の掘削コスト・掘削時間が大幅に低減する、(c)検出器が安価であるため地中から回収する必要がない、等の理由により、本センサーが地下計測に関連した様々な分野で従来品に代わり爆発的に普及する可能性が高い。また本研究プロジェクトの成果は、マイクロセンサーを石油等の生産井内部に設置し、生産と計測を両立する“インテリジェントボアホール”の実現、あるいは広い領域をカバーしうる防災システムの開発等一連の地下計測技術・産業の発展に結びつくことになる。

共同研究組織

・総括代表者	新妻 弘明 (東北大学・大学院工学研究科・教授)
・研究分担者	江刺 正喜 (東北大学・未来科学技術共同センター・教授)
"	浅沼 宏 (東北大学・大学院工学研究科・助教授)
"	森谷 祐一 (東北大学・大学院工学研究科・助手)
"	鈴木 学 (東北大学・大学院工学研究科・リサーチアシスト)
・企業分担代表者	鹿熊 英昭 ((株)アカシ・取締役技術部長)
・研究分担者	高木 義彦 ((株)アカシ・技術部・システムテックグループリーダー)
"	吉田 勇作 ((株)アカシ・技術部・システムテックグループ研究員)
"	川添 勝 ((株)アカシ・技術部・システムテックグループ研究員)
合 計	9 名

研究期間

平成 12 年 3 月 17 日 ~ 平成 13 年 3 月 31 日

研究開発の実施状況等

(1) 研究開発の実施状況

本プロジェクトでは、東北大学と(株)アカシが Fig.2 に示す相互開発体制のもとに研究を実施した。センサーの開発及び製作は、東北大学大学院工学研究科機械電子工学専攻江刺研究室の施設及び装置、東北大学ベンチャービジネスラボラトリーの施設及び装置を利用して行った。

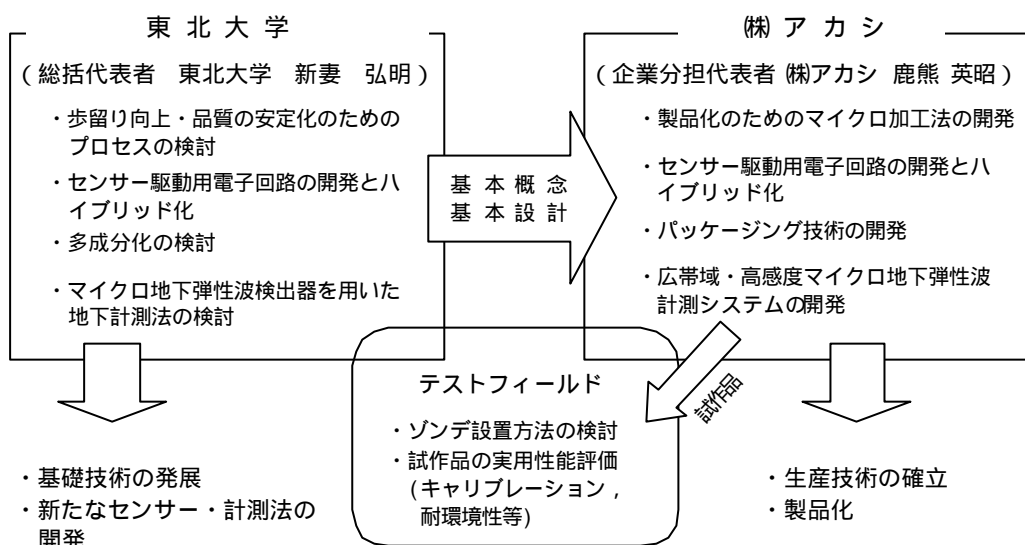


Fig.2 本プロジェクトの研究開発体制

(2) 各機関別の研究開発目標、実施方法、成果

(2-1) 東北大学

(a) センサー製作時の歩留まり向上のためのプロセスの検討

(i) 従来プロセスの改善

これまで開発してきた超高感度容量型加速度センサーについて、歩留まりの向上及び信頼性向上の観点から、マイクロ加工プロセスの再検討を行った。

このセンサーの基本構造を Fig.3 に、またマイクロ加工プロセスの概略を Fig.4 に示す。このプロセスにおいてこれまで問題となってきた以下の様な点について検討を行った。

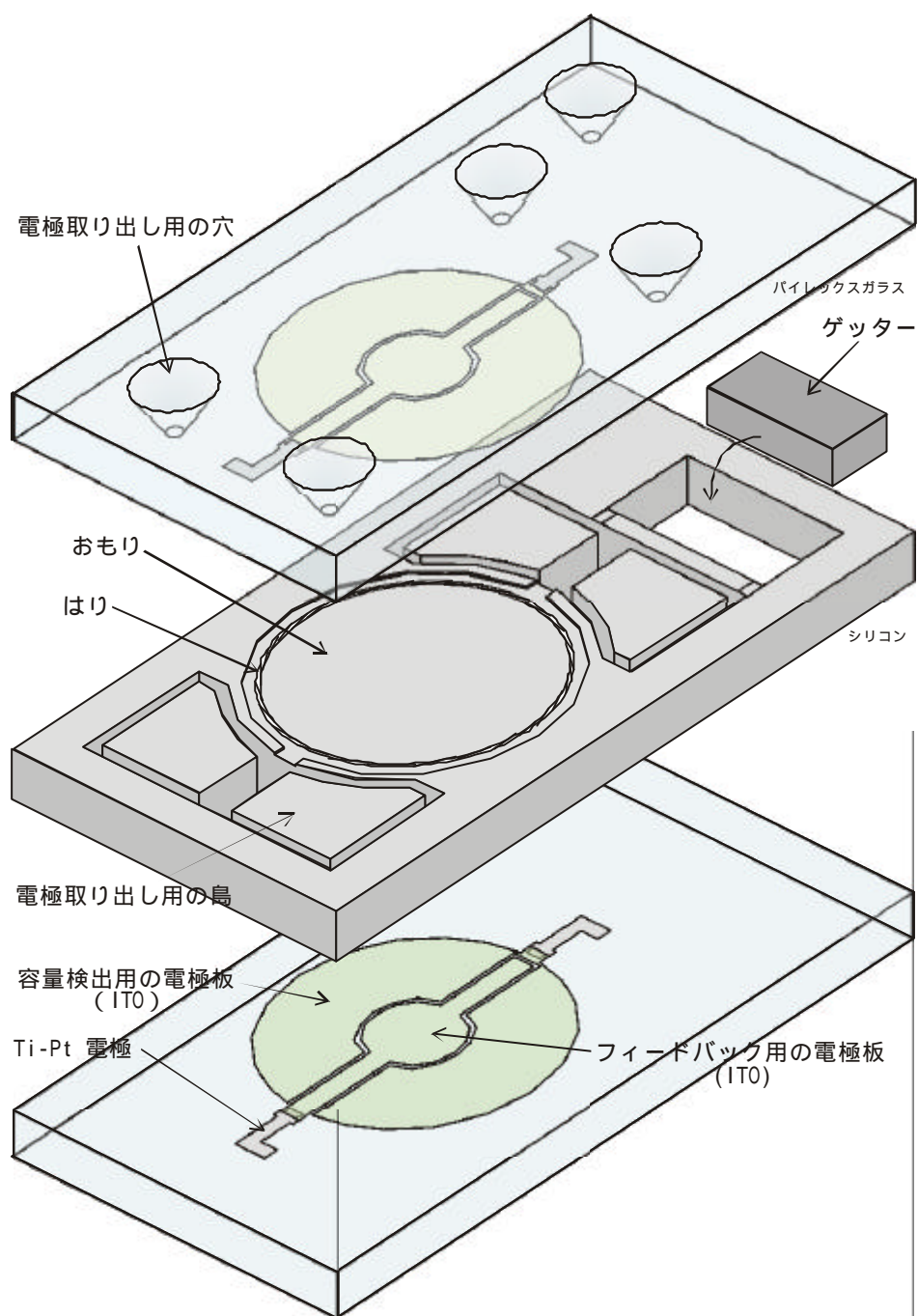


Fig.3 超高感度容量型加速度センサーの基本構造

プロセスチャート

シリコンプロセス



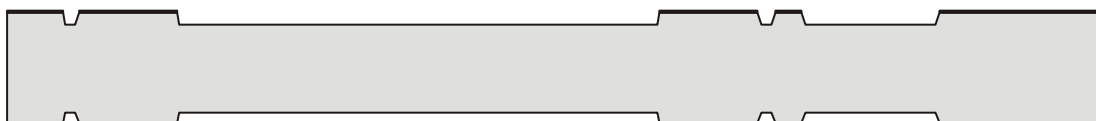
P+型、厚さ200 μm、両面研磨、面方位(100)のシリコンウェハを使用する。



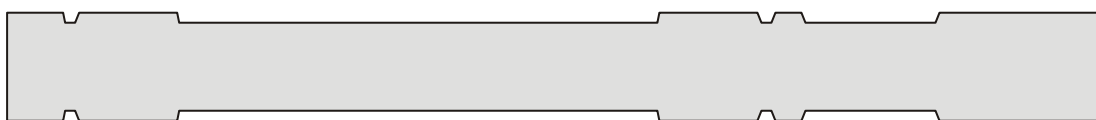
wet 酸化 (3000 ~ 4000)を行う。



フォトリソ後(マスク1、1′)、酸化膜をパターニングする。



TMAHによるエッチングを行い(0 μm)、ギャップを形成する。



酸化膜を全面エッチングする。

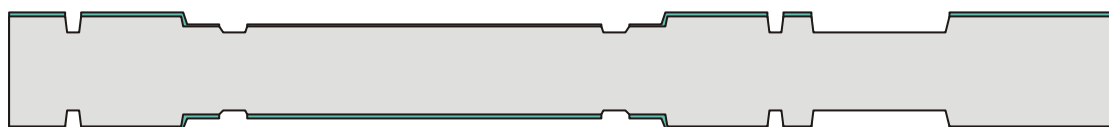


wet 酸化 (3000 ~ 4000)を行う。

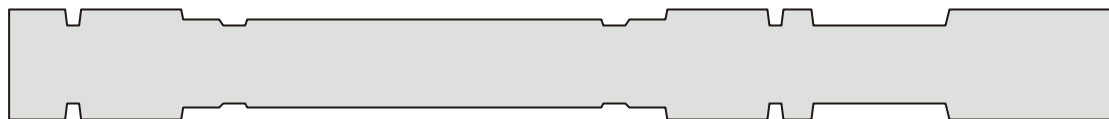


フォトリソ後(マスク2、2′)酸化膜をパターニングする。

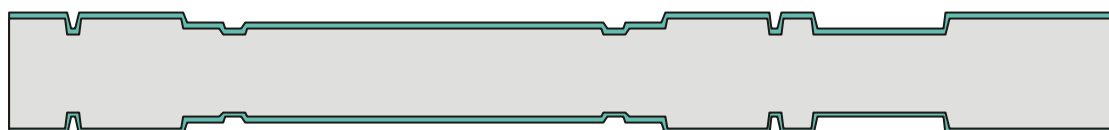
Fig.4 超高感度容量型加速度センサーのプロセス(その1)



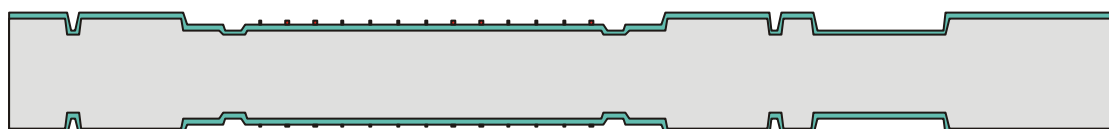
TMAHによるエッチング ($7\mu\text{m}$)を行う。(はりの貼り付き防止のため)



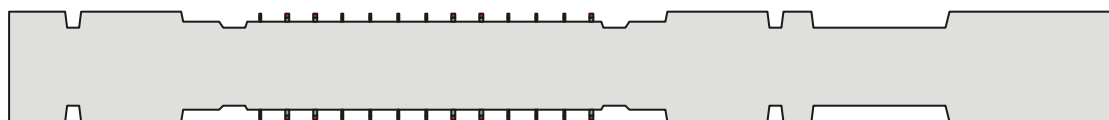
酸化膜を全面エッチングする。



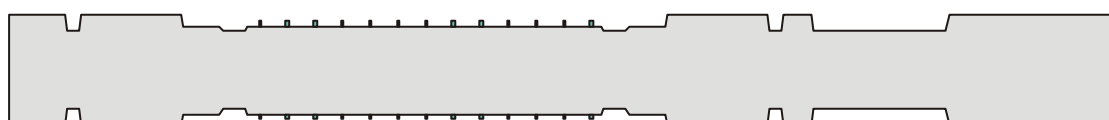
wet 酸化 ($1\mu\text{m} \sim 1.2\mu\text{m}$)を行う。



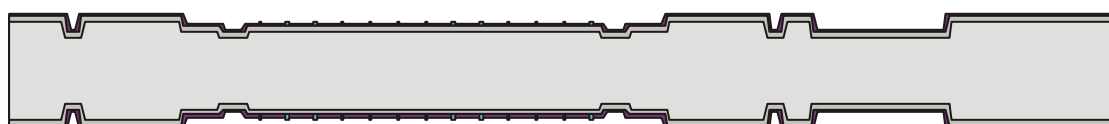
ポジレジスト塗布後、フォトリソグラフィーによりパターンニング (マスク $3, 3'$)を行う。



酸化膜をエッチングによりパターンニングする。(ストッパの形成)

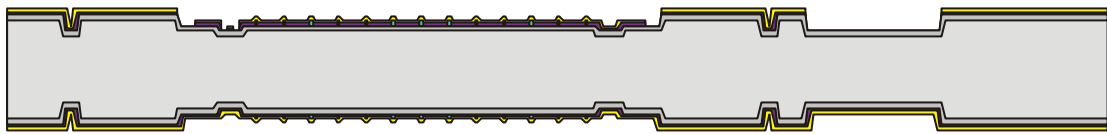


レジストを除去する。

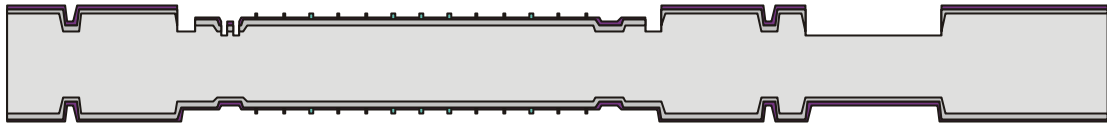


ウェハ全面にボロンを拡散する。(拡散深さ μm 、はりの厚み分)

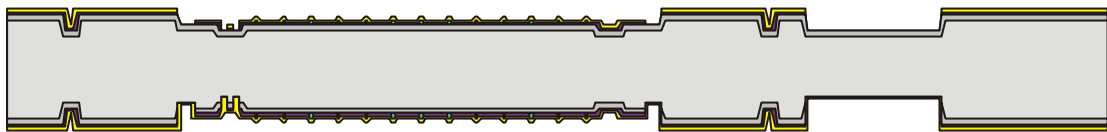
Fig.4 超高感度容量型加速度センサーのプロセス(その2)



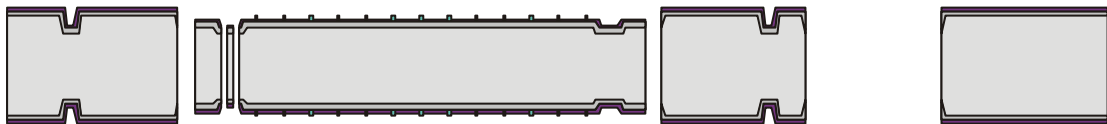
レジストを塗布し、フォトリソグラフィにより片面をパターニングする (マスク4)。



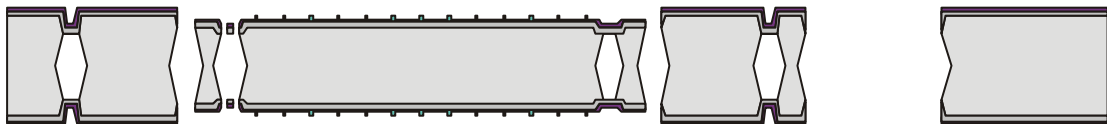
ICP-RIE によりシリコンを20~30 μm エッチングする。



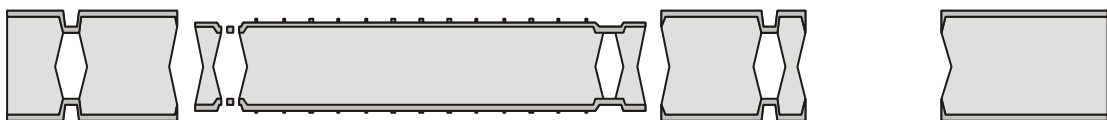
レジスト塗布後、裏面のパターニング (マスク4') を行う。



ICP-RIE によりシリコンを貫通エッチングする。その後レジスト除去。



EPCによるエッチングを行い、はりを形成する。



ボロン酸化膜の全面エッチングを行う。ストップパは残す。

Fig.4 超高感度容量型加速度センサーのプロセス(その3)

ガラスプロセス



厚さ1mm パイレックスガラスを使用する。



サンドブラスト加工により電極取り出しのための穴をあける。



フォトリソ後(マスク5)、Ti、Ptの成膜(1000)を蒸着により行い、リフトオフを行う。



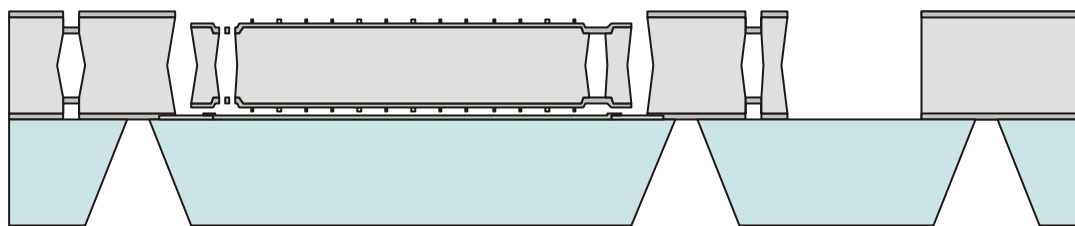
フォトリソ後(マスク6, 6'), ITOの成膜(3000)をスパッタにより行い、リフトオフを行う。



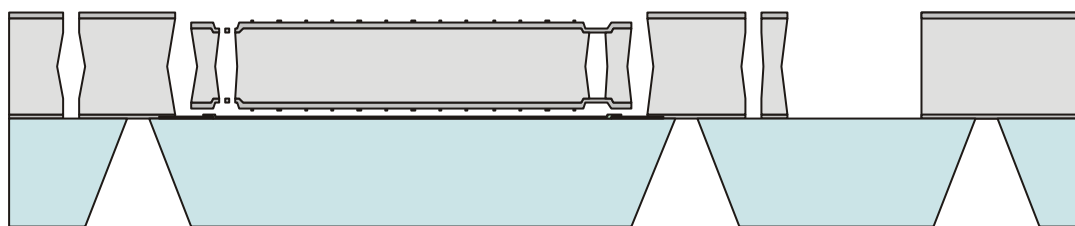
穴のないガラスも同様に処理する。

Fig.4 超高感度容量型加速度センサーのプロセス(その4)

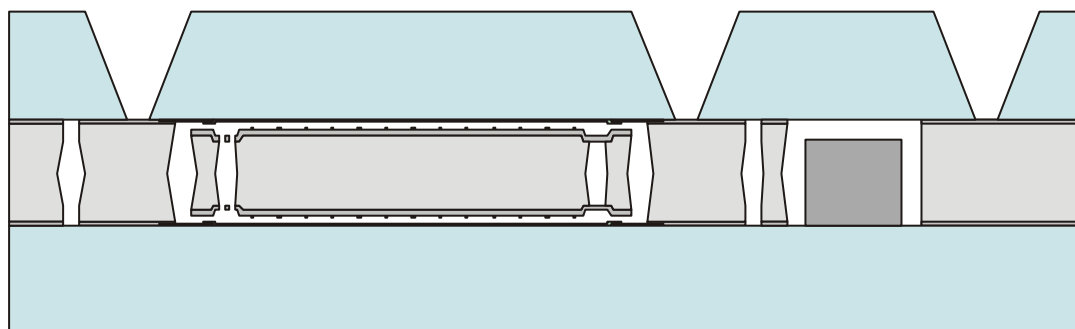
組み立てプロセス



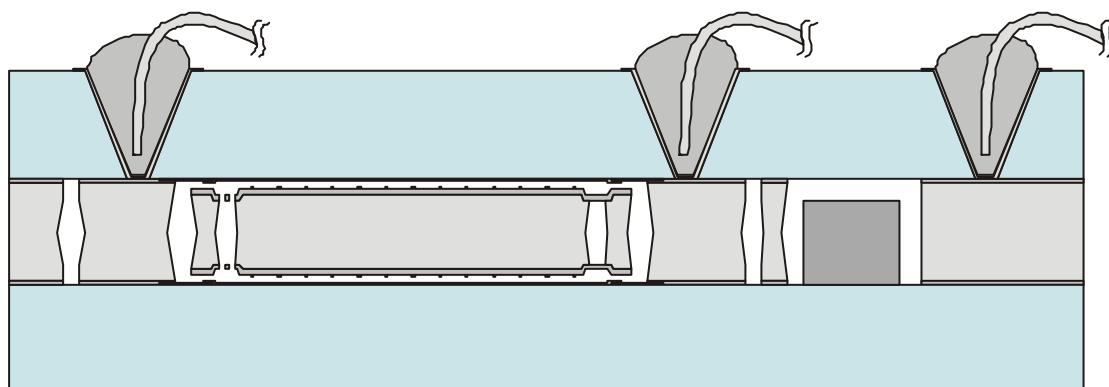
穴のあいたガラスとシリコンの陽極接合を行う。



YAG レーザアシストエッチングにより犠牲はりを切断する。



内部にゲッターを入れ、真空中で陽極接合を行う。



ガラスの穴にアルミをスパッタし、シンタリングを行う。貼り付き防止のための配線をレーザーで切断し、ダイシングを行った後、導電性のエポキシで配線を行う

Fig.4 超高感度容量型加速度センサーのプロセス(その5)

- ボロン拡散プロセスにおける拡散深さのばらつき

このセンサーでは、おもりを支えるためのカンチレバーを、ボロン拡散層の選択エッチングによって形成する。このカンチレバーの寸法、特に厚みは測定感度や周波数特性に大きく影響するため、ボロン拡散層の深さのばらつきは極力抑える必要がある。ボロン拡散深さのばらつきは、最終的にはセンサー各素子での特性のばらつきとなって現れるため、特性の等しいセンサーが多数必要となる多成分計測を目的とする本プロジェクトでは特に大きな問題となる。

しかし、本プロセスで用いているボロン拡散装置は、実験室レベルでの試作用の装置であるため、面内での不均一や表裏面での厚さの差、あるいはサンプル間やロット間での厚みのばらつきが生じることが避けられない。この問題を解決するために最も効果的なのは、より大規模で制御性が高い拡散炉を導入することだが、予算や設置場所、他の利用者との整合性などの点から、現状では困難であると言わざるを得ない。

最終的にこのセンサーを実用化する際には、マイクロ加工プロセスは 4 inch の Si ウェハを用いて行う予定である(現状、東北大では 20mm 角)。いずれにせよこの際には、(株)アカシにおいて量産レベルでの大規模な拡散炉を導入するか、あるいは外注に出すこととなる。この場合、これまでと比べて高い精度で拡散深さを制御できると思われる。そこで、東北大学で行うプロセスにおいては、Si ウェハの前処理や拡散条件を可能な範囲で制御し、拡散深さの均一化を図る事に留めた。

また、サーボ型のセンサーの場合、カンチレバーのバネ定数によるセンサー特性への影響が小さくなるため、この問題はそれほど重大でないとも考えられる。

- レーザー支援エッチング時のゴミの付着

このセンサーでは、電極を引き出すために Si のアイランドを使用している。このアイランドは最終的に周囲とは分離する必要があるが、接合前に分離してしまうと組み立てが不可能となる。このため、接合前の状態では細い犠牲ばりによってこのアイランドを支えておき、片側のガラスを陽極接合して固定した後、レーザー支援エッチングで切断する工程を取っている。

この工程の問題として、EPW エッチング後に残るボロン拡散層の端部が、アイランド付近で Fig.5 に示すように、レーザー照射時の衝撃により折れて散乱することが挙げられる。このような散乱物は、陽極接合の不良やおもり振動の阻害を引き起こす。また、アイランドと周囲との間に付着した場合、配線の短絡を引き起こし、計測が不可能となる場合もあり、歩留まりを大きく低下させることが判明した。

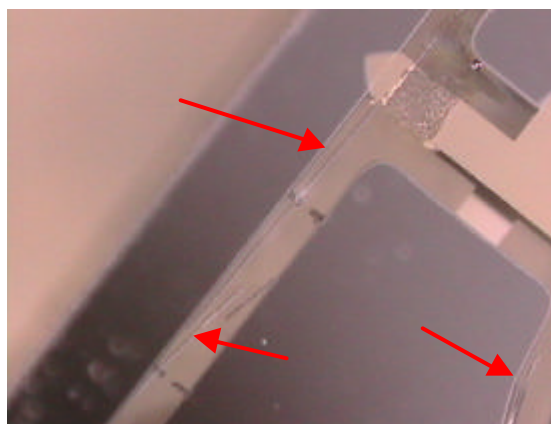
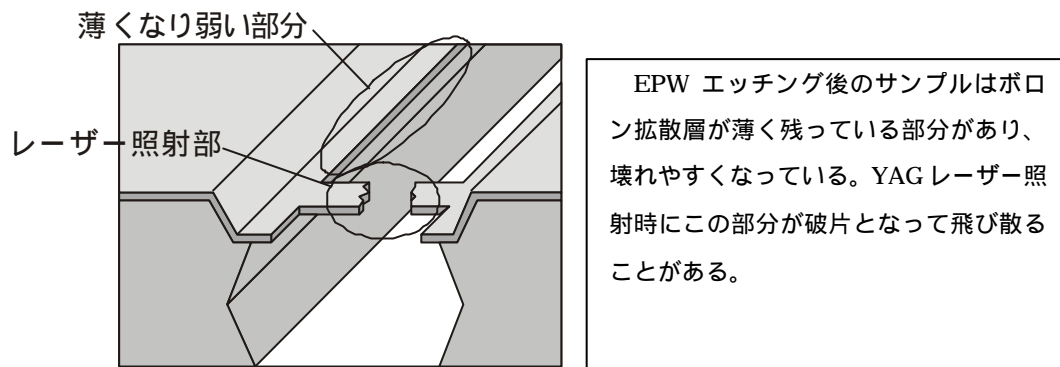


Fig.5 レーザー支援エッチング時のボロン拡散層端部の剥離

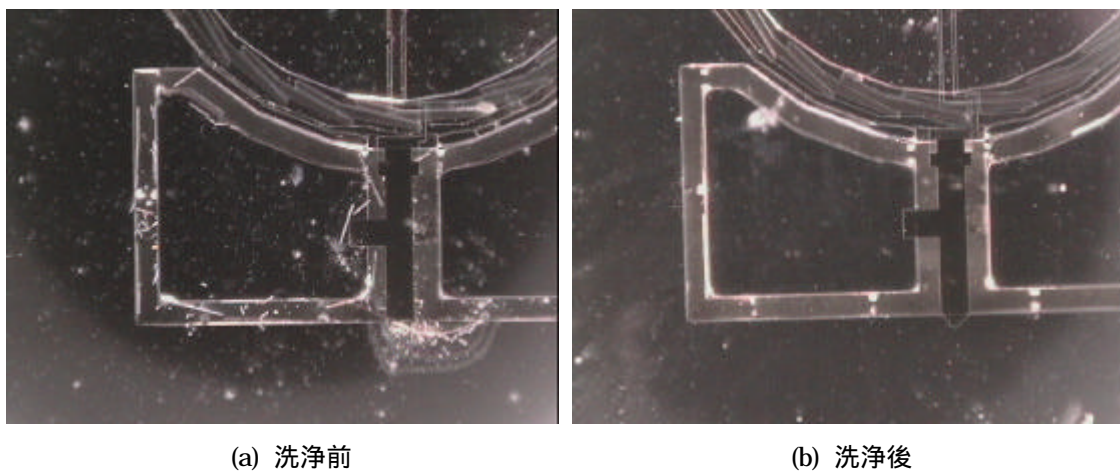


Fig.6 洗浄によるゴミ・付着物の除去

プロセス上、ボロン拡散層端部の剥離・折損を完全に防ぐのは困難である。そこで、この問題点を解決するために、レーザー支援エッチング後に洗浄を行い、破片を取り除くこ

ととした。おもりを支えるカンチレバーが非常に弱く、またおもりとガラスとのギャップが $3\mu\text{m}$ と非常に狭いため、洗浄時にカンチレバーの破壊やおもりの貼り付きが生じる可能性があることから、これまでこの段階では洗浄を行っていなかった。しかし、上述したような問題が判明したことから、やはり洗浄が必要であると判断し、洗浄後に表面張力が小さく揮発性の薬品で置換することによって、貼り付きの問題を防ぐこととした。この洗浄の効果を Fig.6 に示す。洗浄前に見られる細かい破片が除去された様子が観察され、組み立て工程での歩留まりが大きく向上した。

- 陽極接合時の接合不良や貼り付き

陽極接合時には数百～1kV 程度の電圧を印可するため、おもりとガラスの間にも静電引力が働き、おもりがガラスに貼り付いてしまう問題が発生し、歩留まりを大きく低下させる。また、接合面の状態によっては接合不良が生じることもあり、やはり歩留まりは低下する。

おもりの貼り付きを防ぐために、おもり表面への SiO_2 ストップの形成によって接触面積の減少を図る対策や、ガラス面とおもりが等電位となるようなショート配線(この配線は後にレーザーによって切断する)の形成などの対策を取っている。これに加えて、陽極接合時の接合パラメータ(温度や印可電圧など)の最適化を行うと共に、真空封止を考慮した制御性の高い接合装置を導入することで、歩留まりの向上を図った。

前述したレーザー支援エッチング後の洗浄によって接合面の表面状態が改善された事とも相まって、これまで 1000V 程度かけていた電圧を、400～600V 程度まで下げても確実に接合を行うことが可能なことを確認した。これまでの対策に加え、電圧を下げることでより静電引力を抑えた結果、貼り付きが生じる素子を 1 割以下に抑えることが可能となり、大幅に歩留まりが向上した。

- 配線取り出し時の導通不良・ショート

センサー組み立て後に、電極取り出し用の穴に導線を挿入し導電性エポキシで固定する配線作業を行う。測定信号を取り出し、外部回路に接続するために必要な作業であるが、この段階で確認した際に、導通の不良やショートが生じている素子が多く、歩留まり低下の大きな原因となっている。

このような配線の問題が生じる原因として、フォトリソグラフィやリフトオフなどの、配線部分に関するマイクロプロセスの失敗によるセンサー内部での不良に加え、Fig.7 に示すようなガラスの欠けや接合面での付着物による不良が考えられる。

(a)のガラスの欠けは、サンドブラスト加工によって配線取り出し用の穴を開けるときに生じる。穴の断面形状が、Fig.7 に示したようにテーパの付いた形になるため、下面での端部が鋭角となり、欠けやすくなる。この状態で Si と接合し、配線を取り出すための Al をスパッタすると、欠けた部分で Al が断線してしまい、導通が取れなくなる。導電性接着剤を穴に詰めて配線を取り付けるときに導通が取れれば問題無いが、実際には穴が小さいことや接着剤の粘度が大きいことから、穴内部に完全に接着剤を満たすことは不可能である。また、サンドブラスト以外の方法で垂直に近い側壁を持つ穴を開けて、ガラスの欠けを防ぐ方法も考えられる。1mm 程度の厚さのガラス板に、数百 μm の直径の穴を垂直に近い角度の断面形状で、高密度に開ける事が可能な加工法として、フェムト秒レーザーによる加工が有効と考え、本プロジェクトにおいてフェムト秒レーザー加工装置を購入し、適用に向けての検討を行っている。ただしこの場合、側壁が傾斜している場合に比べ、スパッタした Al が穴の側壁に付着する効率が低下するため、断線が生じやすくなる点に注意を要する。

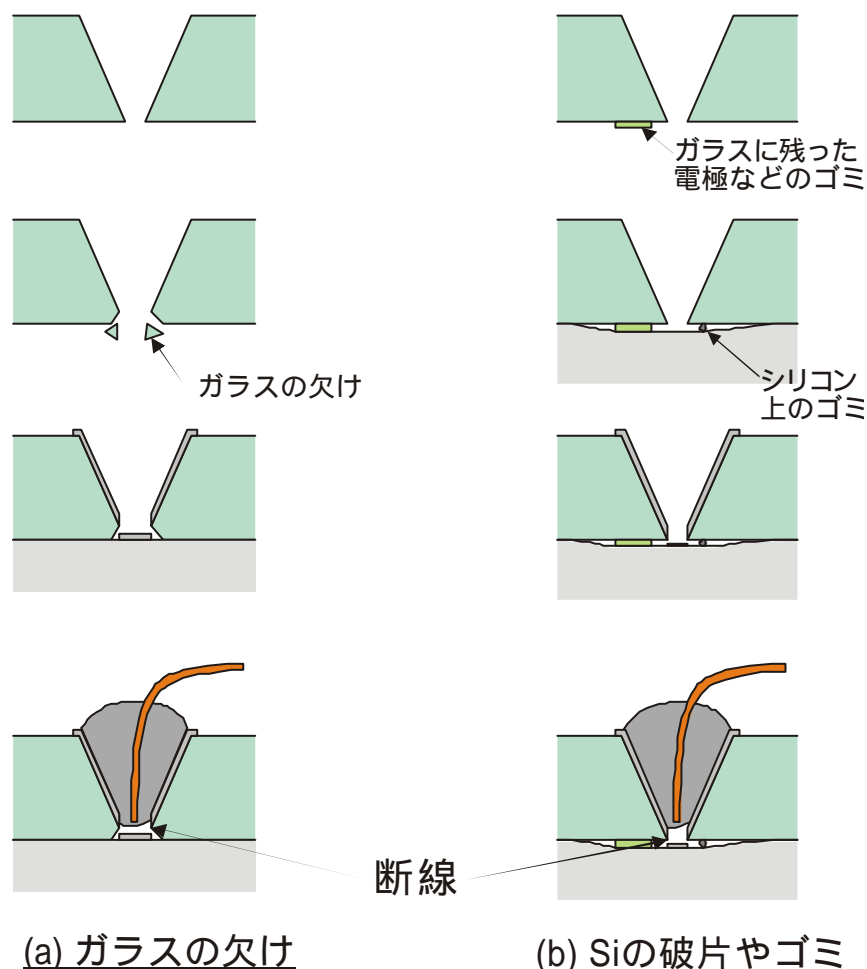


Fig.7 配線の導通不良の原因

この問題を根本的に開発するために、(株)HOYAにて開発中であった、W配線をガラス中に埋め込んだ配線ガラスの使用を検討していたが、配線を埋め込んだガラスの研磨が困難な点や、ガラスとW配線の境界面での密着を保つことが難しい点などから、実用化を断念したとのことで、使用が不可能となった。現状では穴加工時の取り扱いに注意して欠けを防止すると共に、Alを厚めにスパッタすることで断線を防ぐことで対策を取っている。

また、(b)のSi破片やゴミの問題については、前述したレーザー支援エッチング後の洗浄によって、かなりの部分が改善された。

以上のようなプロセスの改善によって、センサーの製作歩留まりは大幅に向上した。Fig.8に完成したセンサーの写真を示す。実際には量産性の面での問題や、(株)アカシでの生産設備との兼ね合いの問題等が残るものの、実用化の目処が立った。これによって、平成13年度内での市場への投入を目指すことになる。

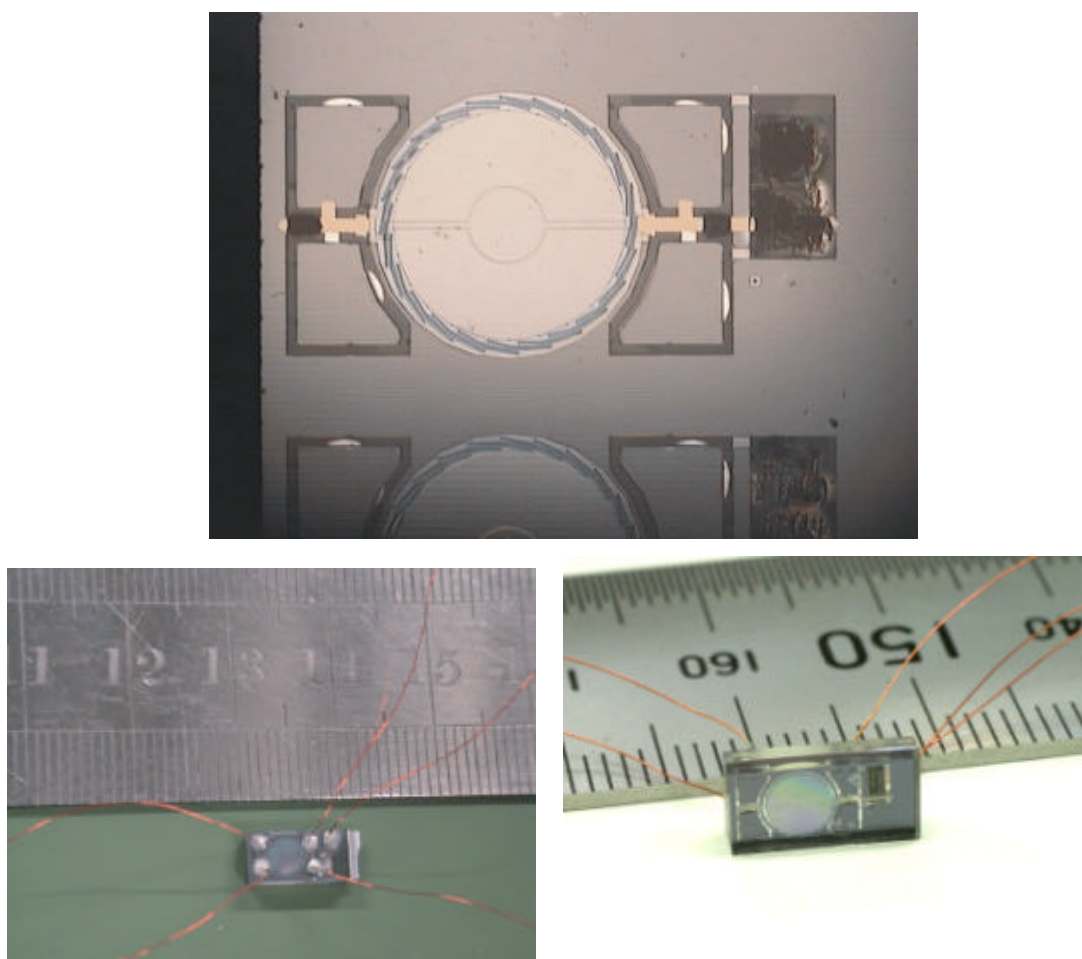


Fig.8 完成したサーボ型超高感度容量型加速度センサー

(ii) 新規プロセスの開発

上述してきた従来プロセスは、本プロジェクト以前から開発を行っていることからある程度の実績を有しており、基本的なプロセスは固まっていると言って良い。電気抵抗が低く EPW によってベースとなる Si との選択エッチングが可能であるというボロン拡散層の特性を生かし、比較的簡単なプロセスでセンサを製作できるという大きな利点を有している。歩留まりの低下に関していくつかの問題は存在するものの、(i)で示したように本プロジェクトで大幅な改善が見られている。

しかし、センサーを市販し実用化するためには、これまで検討してきたような技術的な問題の他に、実際にこのプロセスを量産ラインに適用することが可能かどうかという問題が存在する。

現在東北大学側で使用しているマイクロ加工プロセスの設備は、主に工学部機械・知能径共同棟クリーンルームと、東北大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリーのクリーンルームに設置されているものを使用している。これらのクリーンルームには、対象とするウェハサイズこそやや小さいものの、マスク作成からフォトリソグラフィ、熱処理、CVD、スパッタ、蒸着、陽極接合など、マイクロ加工に必要な設備はほぼ不足無く揃っている。これに対し、市販段階で実際に生産を行うことになる(株)アカシにはこれほどの多種の設備が揃っている訳ではないことから、不足する部分については外部発注するか、プロセスの変更を必要とする事になる。

また、仮に装置を揃えたとしても、そのまま量産に適用するのが困難なプロセスも存在する。例えば、再現性が悪く安定した生産が難しいプロセスや、手間がかかりすぎて大量生産が困難なプロセスなどがこれに当たる。その一例として、Si アイランドを分離するためのレーザー支援エッチングは、装置自体が一般的なものでない上、センサー素子一つにつき多数存在する犠牲ばりを、一本ずつ切断する必要があることから、非常に手間がかかることになる。このため、本来は多数のセンサーを一括で安価に生産できるマイクロ加工プロセスの利点を損なっている。

そこで本プロジェクトでは、従来プロセスの改良と並行して、新規にプロセスの開発を行うこととした。開発に際しては、極力(株)アカシの設備で対応可能なプロセスを検討すると共に、従来プロセスの問題点を出来る限り解消することを目指した。このセンサーの基本構造を Fig.9 に、プロセスチャートを Fig.10 に示す。以下、この新規プロセスの要点について述べる。

- カンチレバーをボロン拡散層から CVD SiO₂ 層に変更

(i)でも述べた様に、現在使用しているボロン拡散装置では、拡散層の深さにばらつきが生じる問題がある。さらに、Si 上のボロン拡散層の厚さを正確に測ることが困難なため、センサーが完成するまで、正確なカンチレバーの厚さが判明せず、特性のばらつきが生じる原因となる。また、(株)アカシにはボロン拡散装置が導入されておらず、量産の際には外部にこの部分のプロセスを依頼することとなる。

以上の点を考慮して、新プロセスにおいては、ボロン拡散層の代わりに CVD SiO₂ 層をカンチレバーの材料として用いることとした。CVD で製膜した SiO₂ 層は、厚さの均一性では必ずしもボロン拡散層に比べて優れているとは言えない。しかし、光干渉を用いた測定法で正確に厚さを測定することが可能なため、製膜直後に膜厚を測ることが出来る。また、仮にこの時点で厚さにばらつきがあったとしても、プロセスの初期段階であり、かつ SiO₂ と Si が選択的にエッチングできることから、SiO₂ を全剥離してから再度プロセスを行うことが可能である。このような利点から、新プロセスでは SiO₂ をカンチレバー材として用いる。

ただし、ボロン拡散層とは異なり、SiO₂ 層は導電性を有していないため、電極として金属膜を用いる必要がある。電極材料としては、通常 Al や Au/Cr、Pt/Ti などが用いられるが、その後のプロセスでの耐薬品性や耐熱性を考慮する必要がある。Pt/Ti はこの点で最も優れているが、適当なエッチング液が存在しないため、パターニングにはリフトオフを用いざるを得ず、量産プロセスにおいては望ましくない。また、Au/Cr や Pt/Ti などの多層膜では、2 種類の材料を連続して製膜できるスパッタあるいは蒸着装置が必要となり、(株)アカシにおいて装置の導入が必要となる。

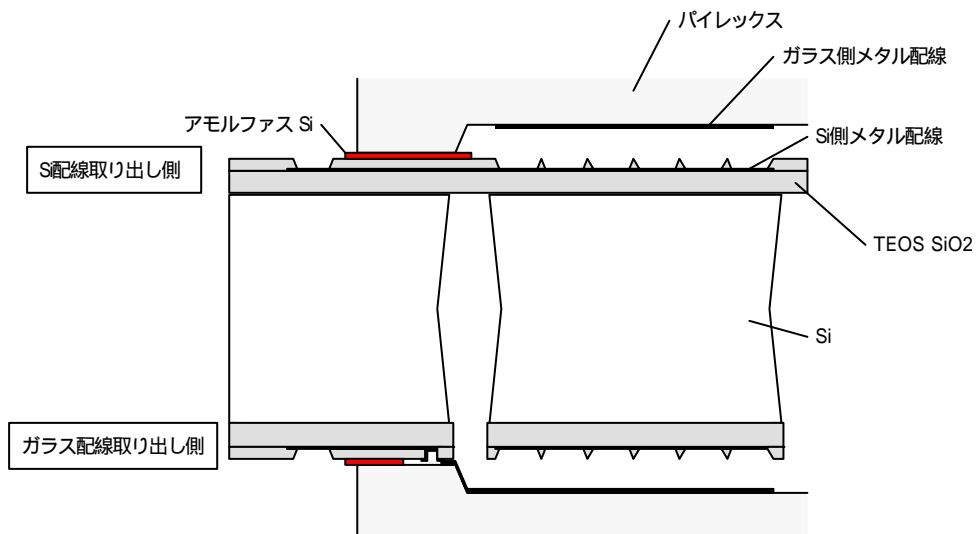


Fig.9 新規に開発するセンサの基本構造

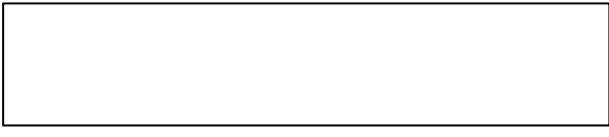
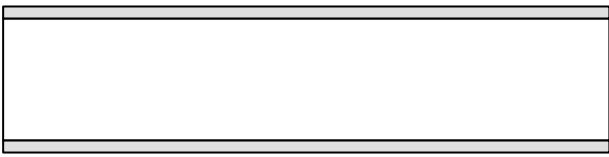
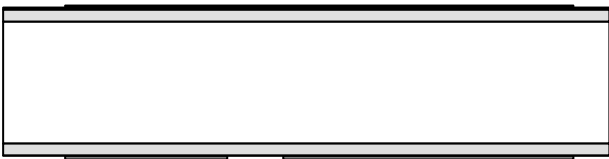
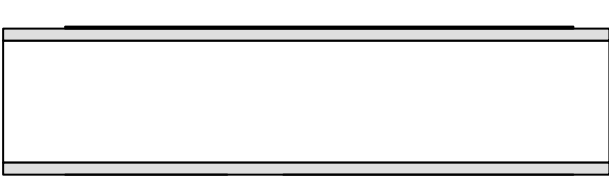

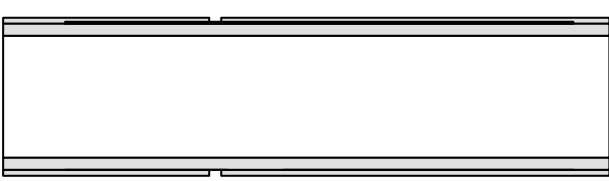
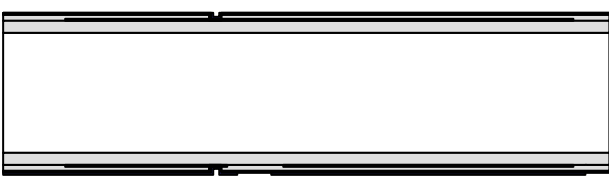
1		Si ウェハ(厚さ 400 ミクロン、両面研磨) ダイシング(22 x 20mm) RCA 洗浄
2		SiO2 CVD(TEOS-CVD)
3		W スパッタ フォトリソ
4		W エッチング レジスト剥離
5		SiO2 CVD パフ研磨 SiO2 ウェットエッチング
6		フォトリソ SiO2 ウェットエッチング (アライメントマーク&コンタクト) レジスト剥離
7		Cr スパッタ フォトリソ Cr ウェットエッチング レジスト剥離

Fig.10 新たに開発するセンサのプロセスチャート(その 1)

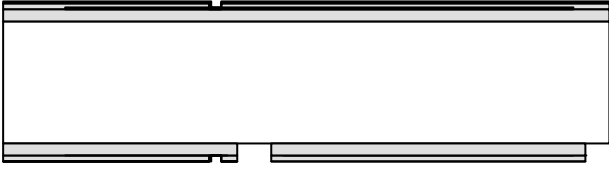
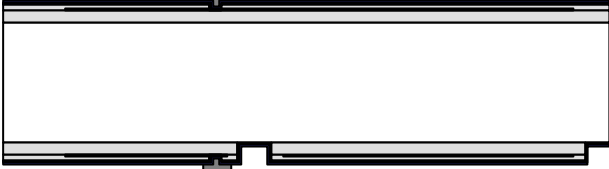
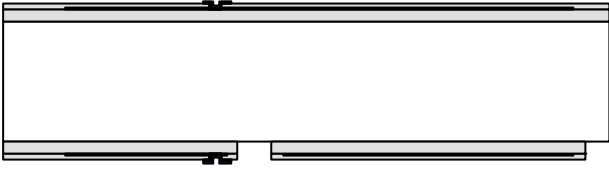
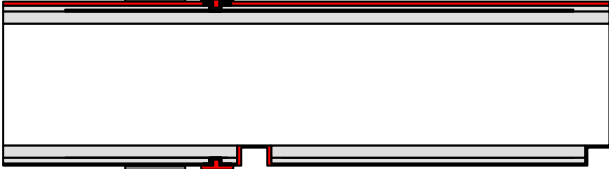
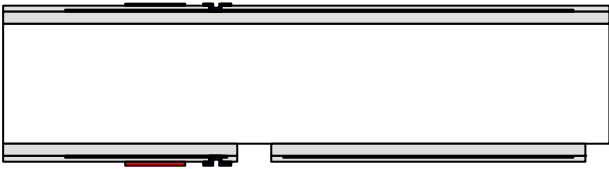
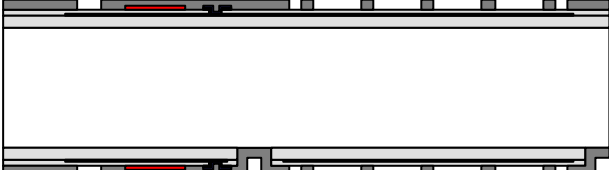
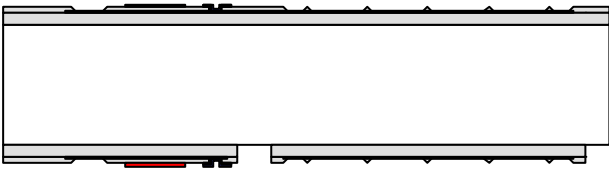
8		SiO ₂ RIE SiO ₂ ウェットエッチング Cr 剥離
9		W スパッタ Cr スパッタ フォトリソ
10		Cr ウェットエッチング W ドライエッチング レジスト剥離
11		Si スパッタ フォトリソ
12		Si ドライエッチング レジスト剥離
13		フォトリソ
14		SiO ₂ ウェットエッチング (ストッパー&コンタクトホール) レジスト剥離

Fig.10 新たに開発するセンサのプロセスチャート(その 2)

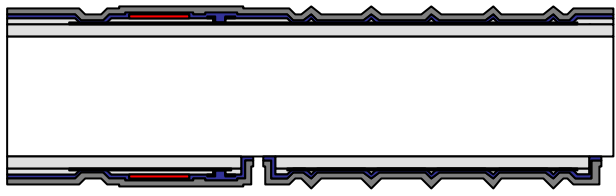
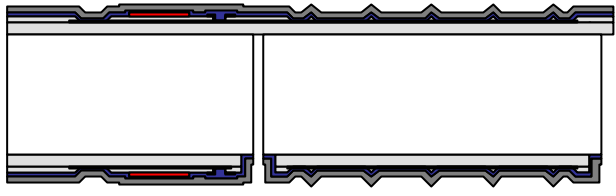
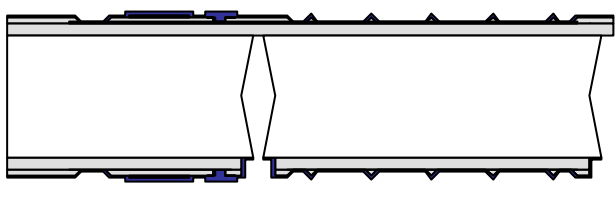
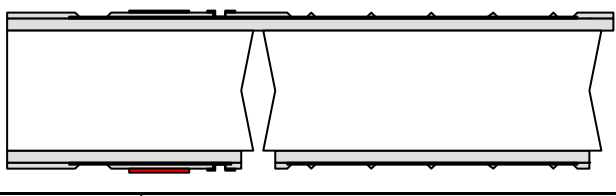
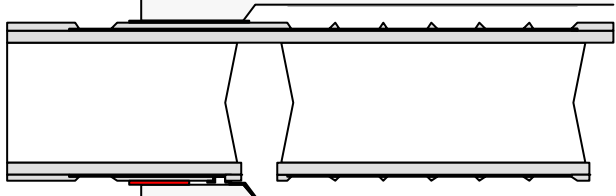
15		Cr スパッタ フォトリソ Cr ウェットエッチング
16		Si ドライエッチング
17		レジスト剥離 50:1 ふっ酸処理 Si ウェットエッチング
18		Cr 剥離
19		陽極接合

Fig.10 新たに開発するセンサのプロセスチャート(その 3)

新規プロセスにおいては、電極としての金属層や陽極接合のためのアモルファス Si 層など、従来のプロセスに比べて金属等の薄膜を製膜する工程が増えていることから、東北大で新たに(株)エイコー・エンジニアリング製のマルチターゲット・スパッタ装置を導入した。この装置により、これまでと比べて良好な膜質のスパッタ膜を、効率良く製膜できるようになり、プロセスの開発と進行に大きく寄与している。

使用する電極材料として本プロセスでは、当初 Au/Cr 膜を用いて試行を行ったが、上述したような装置の問題や陽極接合時の耐熱性などの問題から、適用が難しいと判断した。その他、これまで東北大側で一般的に用いてきた材料についても検討を行ったが、いずれも今回のプロセスで採用するには問題があることから、最終的には W(タングステン)の単層膜を用いることとした。ただし、W は東北大のマイクロマシン・プロセスではあまり実績がないため、最終的に採用可能かどうかはプロセスの結果を見て判断する必要がある。

- 配線を Si 基板面内で横方向に取り出す構造

従来のプロセスでは、容量検出のための電極は、上面のガラスに穴を開け、この穴を通して外部に取り出していた。これまでも述べたように、この構造は歩留まり向上において大きな問題となっている。さらに Si アイランドを用いる構造から、アイランドを分離するためのレーザー支援エッチングを行う必要があり、生産性の向上の面からも問題となる。

これらの問題を解決するため、新規プロセスでは、配線を Si 基板上で横方向に取り出す構造として、ガラスの穴開けや Si のアイランド構造を必要としない構造とした。SiO₂ 層の上にパターニングした配線の上にもう一度 SiO₂ を CVD で製膜し、配線を埋め込む事で、この構造を可能とした。この SiO₂ 上に Si をスパッタし、パイレックスガラスと陽極接合して、ギャップの形成と真空封止を行う。

ただし、単純に配線上に SiO₂ と Si を製膜しただけでは、接合面に W 配線の厚さ分(～2000)の段差が存在するため、接合したときに間隙が生じ、ここから真空封止が破れてしまう。この問題を避けるため、配線上に SiO₂ を製膜した後研磨を行って、段差を取り除くこととした。

以上述べた様に、従来のプロセスでの問題点を解決し、一括生産が可能な点、さらに(株)アカシにおいて実行可能な点に極力配慮して新規プロセスの開発を行った。実際にこのプロセスの試行を行ったが、本年度ではセンサーの完成には至らなかった。このプロセスはこれまでのプロセスとは大きく異なるため、プロセス全体での実績が全く無いことから、プロセスを途中まで進めた段階で酸化膜や金属膜の選択的エッチングが上手くできないこ

とが発覚し、プロセスを変更する必要があった点や、W スパッタや研磨の工程など、東北大学のグループで初めて行う工程の条件出しに手間取った点などが原因として挙げられる。また、新規プロセスについては、組み立てにおける歩留まりや特性のばらつきに対する問題は少なくなっているが、従来プロセスと比べて工程数が多く、複雑なプロセスとなっている点も、プロセスの完成に時間がかかる要因となった。このため、今年度の成果としては、Si 層のプロセスにほぼ目処が立ったことに留まる。今後センサーを完成させ、特性評価を行うことで、従来プロセスによるセンサーとの比較を行うことになる。

(b) センサー駆動用電子回路の開発とハイブリッド化

(株)アカシにおいても、実際に検出器に組み込むためのセンサー駆動用サーボ回路の設計・製作を行うと共に、その特性評価を行っているが、これとは別に、東北大学において、回路の低雑音化のための検討を行った。

東北大学で現在、容量検出のために用いているダイオードブリッジ回路の概略図を Fig.11 に示す。C₁,C₂ がセンサーの上部・下部電極で形成される静電容量に相当する。この C₁,C₂ の容量差によって、二つのバッファ・コンデンサ C₀ に貯まる電化量に差が生じるため、最終的には V_{out} に、センサの上下電極の容量差、つまり AE などの弾性波によるおもりの変位に対応した電圧が出力される。

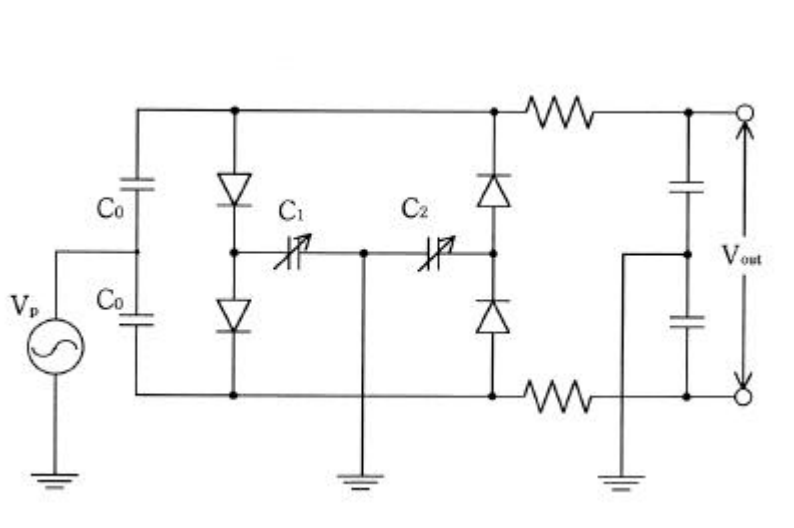


Fig.11 ダイオードブリッジ回路の基本部

この回路はほとんどの部品が受動素子で構成されており、比較的簡単な構成で高精度に容量を検出できる回路となっている。また、容量差が直流電圧として出力されることから、サーボ回路へ発展させることが容易となっている。しかし一方で、ダイオードを含む非線

形回路となっていることから、回路の理論的な解析が難しく、測定結果に及ぼす回路部の要因を考察することが困難となっている。そこで本プロジェクトにおいては、代表的な回路シミュレータである PSpice を用いて、実際の測定回路において想定されるいくつかの要因について検討を行った。PSpice 解析に用いた回路図を Fig.12 に示す。この回路中において、評価対象となる要素以外については理想状態を仮定し、対象素子のみの影響を調べた。

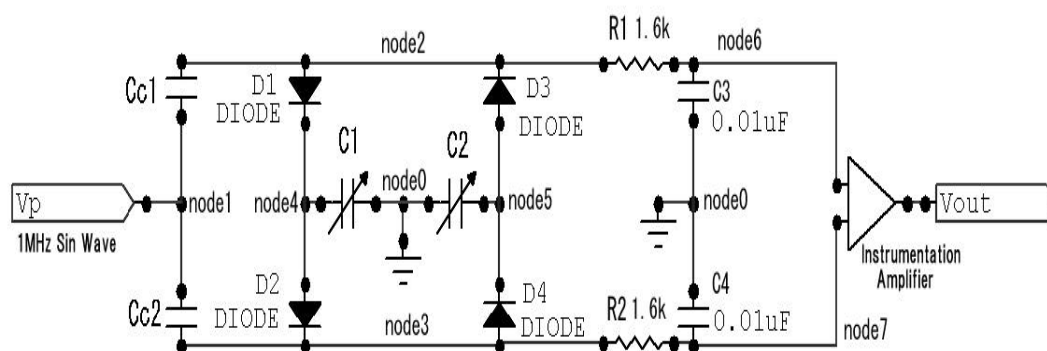
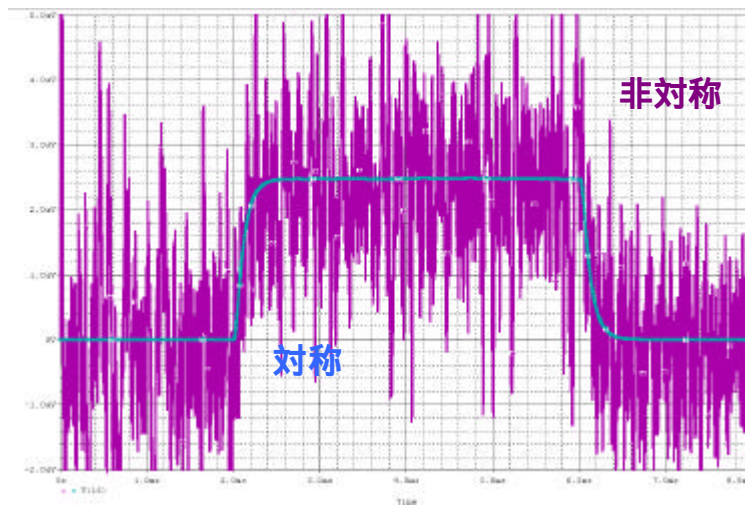


Fig.12 PSpice で使用したネットワークリストの回路図

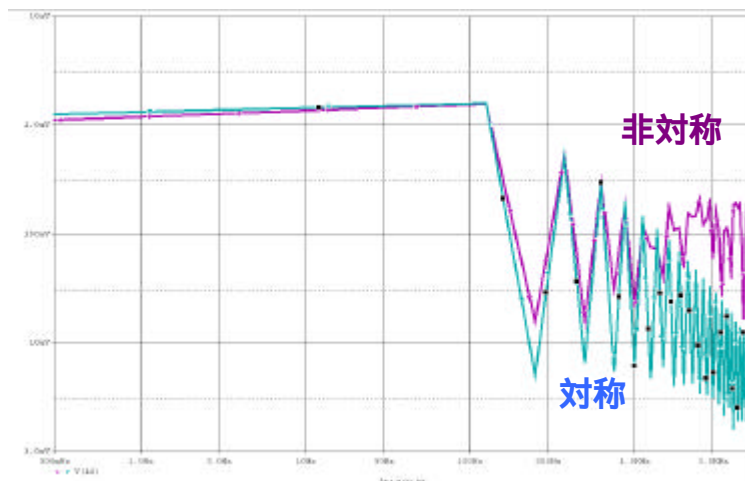
(i) 回路パラメータの対称性に関する検討

Fig.11 の測定回路では、最終的に 2 つの端子間の電圧差 V_{out} を検出するが、この出力はそれほど大きくないため、実際には Fig.12 に示すように、この端子間で差動増幅を行い、出力を得ることになる。差動増幅を行う場合、対象に設計されている 2 つの端子に関わる回路要素の特性が完全に一致していれば優れた特性を示すが、特性のばらつきにより対称性が崩れたときには、本来生じるはずのない出力が表れてくる。この影響を調べた。

Fig. 12 において、 C_{C1} , C_{C2} に矩形波状の変動を与えたときの変化を、 C_{C1} と C_{C2} 、 R_1 と R_2 、 C_3 と C_4 がそれぞれ全く同じ値を持つ場合と、 C_2 , R_2 , C_4 をそれぞれ 0.1% だけ小さく変化させた場合の出力波形と周波数特性を Fig.13 に示す。この図より明らかなように、回路の対称性が崩れると、高周波の雑音成分が大きく出力されている。実際の回路製作においては、抵抗やコンデンサ素子の選別を行うことで、0.1% 程度まで合わせることは可能であるが、それでも今回示したような雑音が生じうることについては注意を要する。



(a) 出力波形



(b) 周波数特性

Fig.13 検出回路の対称性によるシミュレーション結果の変化

(ii) バッファ用コンデンサとセンサの容量に関する影響

Fig.12 のダイオードブリッジ回路においては、バッファ用コンデンサ (C_{C1} , C_{C2}) とセンサ部の容量 (C_1 , C_2) の容量比が大きいと、出力信号の応答速度が遅くなることが知られている。この点を PSpice を用いて検証したところ、測定周波数帯域を 1kHz 程度と設定した場合、容量比は 1:100 ~ 1:1000 の範囲で回路を製作する必要があることが分かった。

また、様々な影響をなるべく排除するように注意しながら実際に回路を製作して、センサ部の容量によって観測される雑音がどのように変化するかを計測した。この場合、実際のセンサーを回路に接続すると、微小な振動の影響やセンサー内部のインピーダンスによ

る影響などを受けてしまうため、固定容量のコンデンサを選別して接続し、測定を行った。バッファ用コンデンサとセンサーに相当するコンデンサの容量比を 1:1000 に固定し、全体の容量を変化させた際の雑音成分のパワースペクトル密度を Fig.14 に示す。この結果より、センサー容量を増やすことで低雑音化される可能性があることが分かる。しかし、マイクロ加工プロセスを用いている本プロジェクトにおいては、寸法的な面から容量を増加させる場合の制約が存在し、既に可能な限り電極面積を大きくすることで容量を大きくしている。このため、センサー構造の変更により低雑音化するのは困難だが、センサーの大量生産が可能な利点を生かして複数のセンサーを並列に接続し、全体としての容量を増やすことで低雑音化することが期待できる。

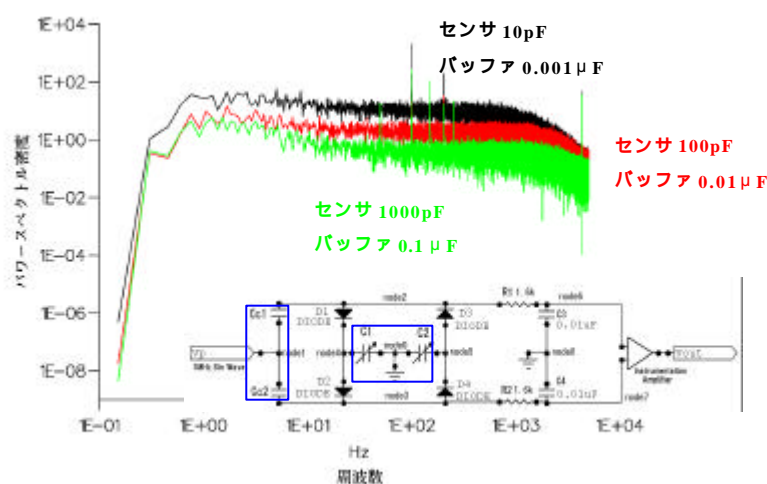


Fig.14 バッファコンデンサとセンサの容量による雑音成分の変化

(iii) ダイオード特性の影響

Fig.12 の回路において重要な役割を果たすダイオードは半導体デバイスの一種であり、抵抗やコンデンサなどの単純な素子に比べて回路動作に影響を及ぼすパラメータを数多く有している。このため、パラメータが異なる種々のダイオードが市販されており、必要とされる回路特性に適した物を選んで使うこととなる。

ダイオードを選ぶ上で検討する必要があるパラメータとして、カットイン電圧や端子間容量、逆回復時間などが挙げられる。これらのパラメータを変えたときの回路動作の違いについては比較的容易に PSpice によって解析できるが、ここでは実際に市販されているダイオードの中からいくつかを選び、実際に回路を組んで動作を確認した結果を示す。

整流用ダイオードとして東芝製の 3GZ41、高速スイッチング用として同じく東芝製の 3GH41、ショットキー・バリア型として International Rectifier 社の 30WNQ04FN の 3 種類を選び、それぞれのダイオードでの雑音レベルの違いを測定した。その結果を Fig.15 に示す。この結果より、この 3 種類の中では逆回復時間が速くカットイン電圧が低いショットキー・バリア型のダイオードが最も優れていることが分かる。ただし、ショットキー・バリア型のダイオードは一般的に耐電圧や耐電流が小さく、また高耐圧・坑耐電流タイプでは端子間容量が大きい場合があるので注意を要する。

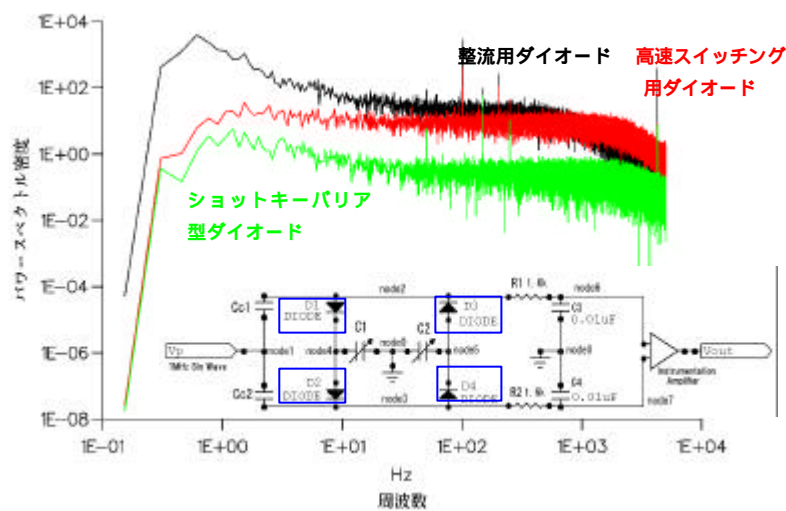


Fig.15 特性の異なるダイオードによる雑音成分の変化

実際に地下弾性波を測定する際の雑音については、センサー内部インピーダンスの影響や外来の電磁波などによる影響などについても検討する必要がある。しかしながら、以上の検討により、高精度測定を行う目的で雑音の少ない回路を製作する場合に、どのような点に配慮すべきかがある程度明らかになり、回路部分の雑音レベルをこれまでの数分の一にまで低減できる見通しが得られた。

(c) 多成分化の検討

坑井内で地下弾性波を多成分計測するための検出器には、水中深さ数千メートルでの水圧に耐えうる防水性と耐圧性、数百の周囲温度に耐える耐高温特性、さらには耐腐食性などが要求される。この様な特性に加え、機械的強度や固有共振周波数、さらにはコスト面での検討を行い、3次元粒子変位の測定に必要な3成分のセンサーを組み込んだ検出器パッケージングの設計を行った。設計した小型3軸弾性波検出器の構造と寸法を Fig.16 に示

す。

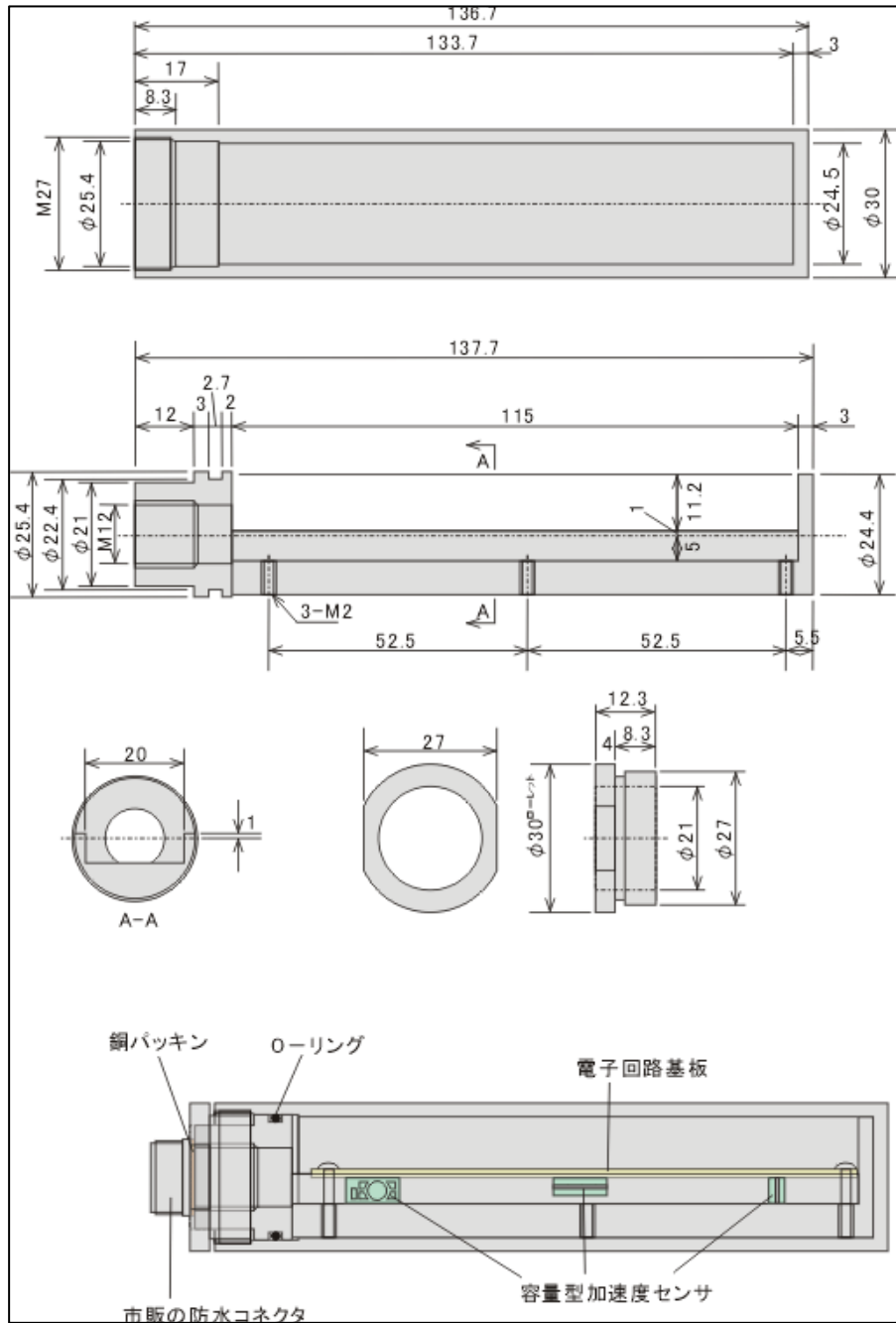
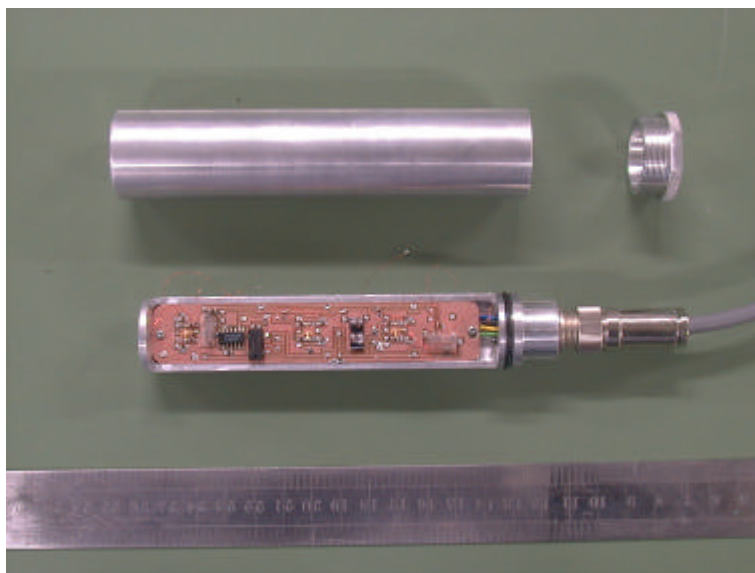


Fig.16 東北大学で設計した小型 3 軸弾性波検出器

検出器にはセンサーと電子回路をマウントするための空間が確保されており、この外側の構造部分の材質はアルミ合金となっている。防水については O リングを用いて電子回路部に水が侵入しないようにし、検出器とケーブルの接続部には銅パッキンを用いて防水している。ケーブルは 8 芯のシールドケーブルを使用し、市販の防水コネクタを使用して接

続している。組み込む電子回路はサーボ型の物で、表面実装タイプの IC や受動素子を用い、 $20 \times 100\text{mm}$ の空間に収まるように設計し、この基板上に X,Y,Z 各軸の測定を行うための 3 個のセンサを固定している。実際に回路部分を組み込んで製作した検出器の外観写真を Fig. 17 に示す。



(a) 検出回路をマウントした状態

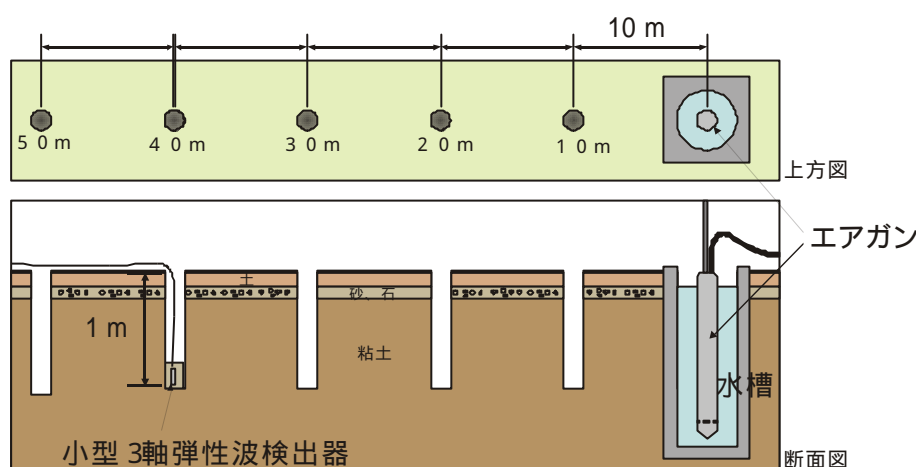


(b) カバーをかぶせた状態

Fig.17 製作した 3 軸弾性波検出器の外観写真

試作した測定器を、実験室で加振器等を用いて動作確認した後、東北大学工学部内テストフィールドでその性能を評価した。テストフィールドの概略について Fig.18 に示す。お

よそ 2 m 四方、水深 3 m 程度の水槽に人工的な弾性波の発生源としてエアガン(Bolt 社製、DHS5500) を設置し、エアガンの圧力を 70 ~ 90 kg/m² として弾性波を発射した。検出用として深さ約 1 m、直径 75 cm の穴を、10 m 間隔でエアガンから 50 m 離れたところまでの 5 本掘り、そこに検出器を挿入し、上から砂を穴に入れることで検出器を後で取り出せる程度に軽く埋める様にして固定した。このとき、検出器の傾きが極力無いように固定し、エアガンのある方向、弾性波が到来する方向に X 軸が向く様に固定した。なお、穴を掘った際にこのフィールドではほとんどが粘土層でできている地盤であることが分かった。それぞれの穴でエアガンからの弾性波を検出器で検出し、その信号を記録することを繰り返した。



(a) テストフィールドの概略



(b) エアガンと水槽



(c) 検出器と計測用の穴

Fig.18 東北大学工学部内テストフィールド

各測定地点で得られた、X, Y, Z 成分の波形を Fig.19 に示す。各地点での到達時間の差より、このフィールドでの P 波の伝搬速度はおよそ 500m/s と計算される。50m の地点では、

波の減衰が大きいため、雑音の多いZ軸での信号検出が困難であった。また Fig.20 に、10m地点における X, Y, Z 各成分の信号でのパワースペクトルを示す。この図より、信号の主要なパワーが 200Hz までにあることが分かり、エアガンを設置した水槽と粘土質の地盤による減衰により、200~300Hz 以上の波がほとんど観測されない状態となっている。

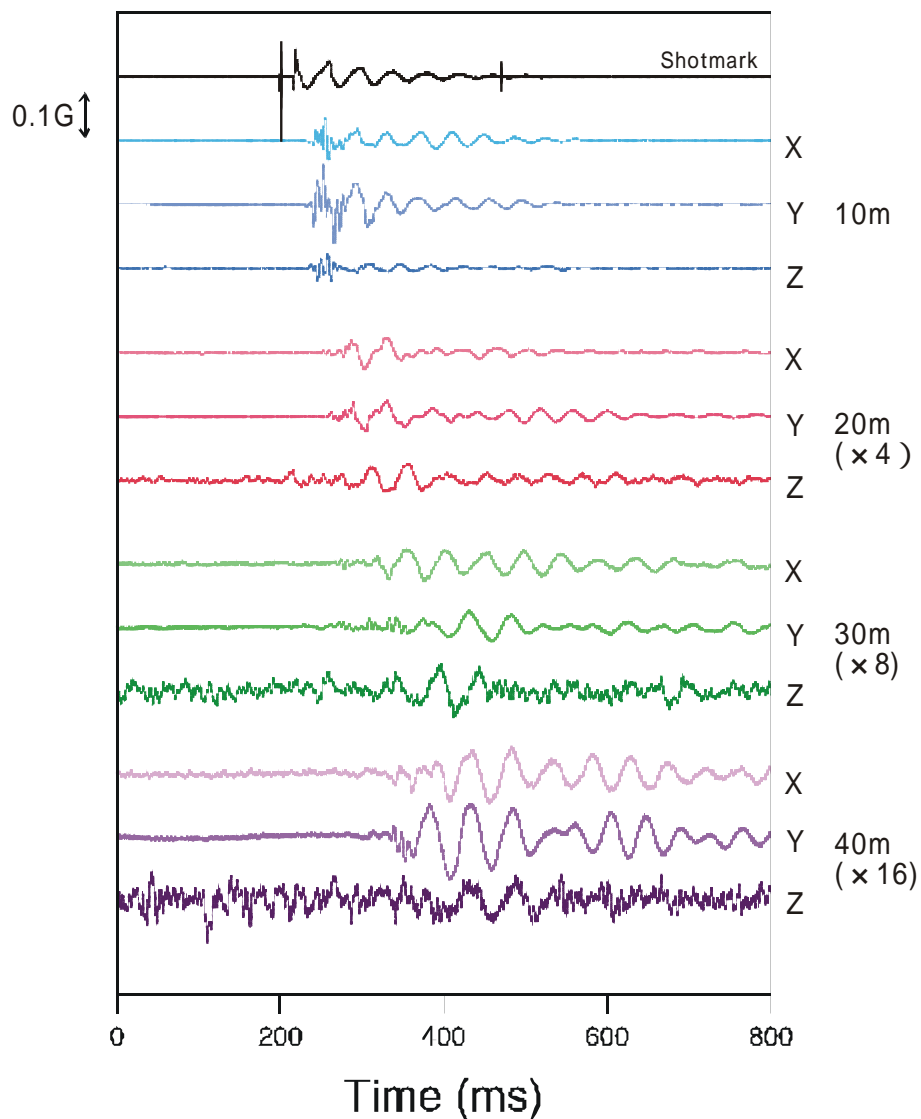


Fig.19 製作した 3 軸弾性波検出器で観測した波形

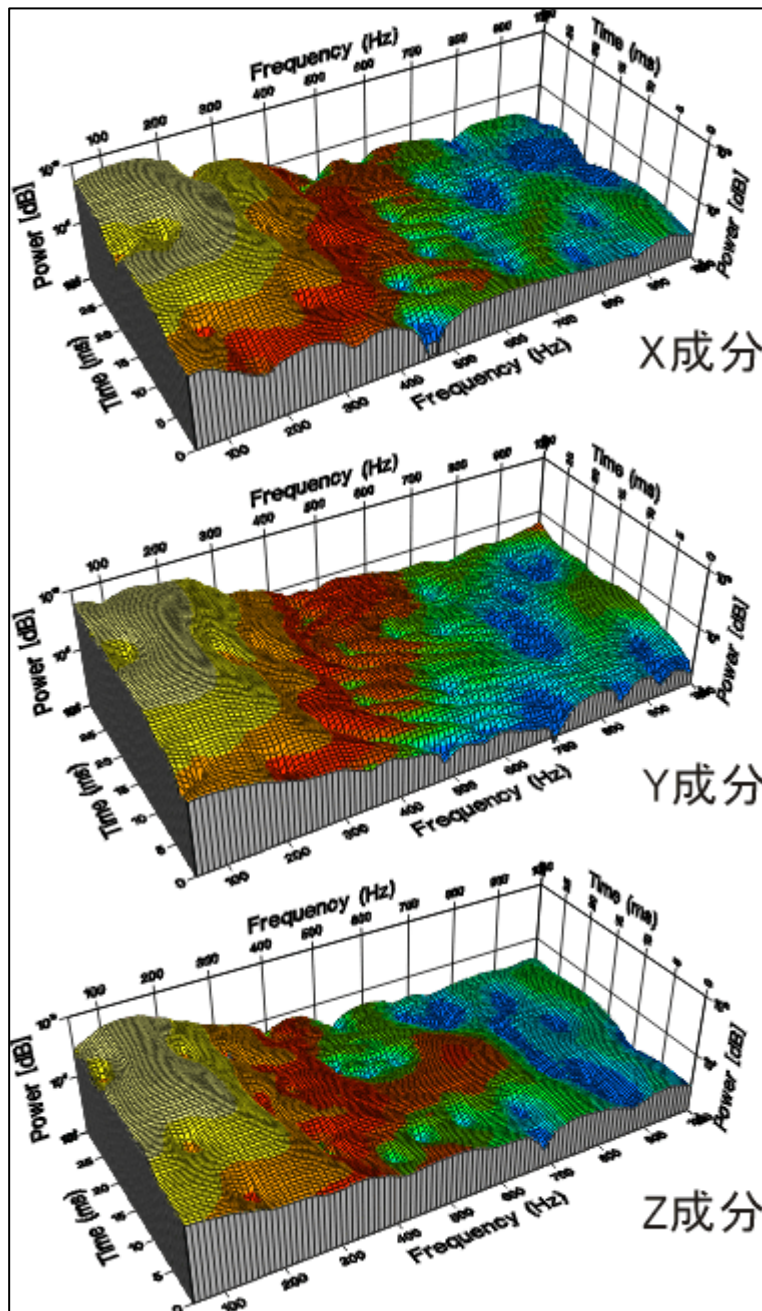


Fig. 20 10m 地点で測定した信号のパワースペクトル

次に、スペクトル行列解析法による弾性波到来方向の推定を、10m 地点での測定結果より行った結果を Fig.21 に示す。スペクトル行列解析法とは新妻、森谷らが考案したもので、弾性波到来に伴い検出された 3 次元パーティクルモーションの方向とその直線性を、周波数領域上で定量的に評価する手法である。Fig.21 を見ると、10m 地点では 300Hz 程度の周波数帯域まで寄与率が高く一定の方位角を示している。伏角もある程度フラットな特性を示している部分が存在しており、この部分で 10° 程度を示していて、ほぼ正しい値を示し

ている。しかし、伝搬距離が延びるにつれて減衰が大きくなり、雑音成分が支配的になって、正しい方位角の推定が不可能となっている。これらの結果より、センサーの高感度化や検出回路の低雑音化に今後更なる検討が必要であるものの、本弾性波検出器により3次元粒子運動軌跡を検出可能であることが示された。

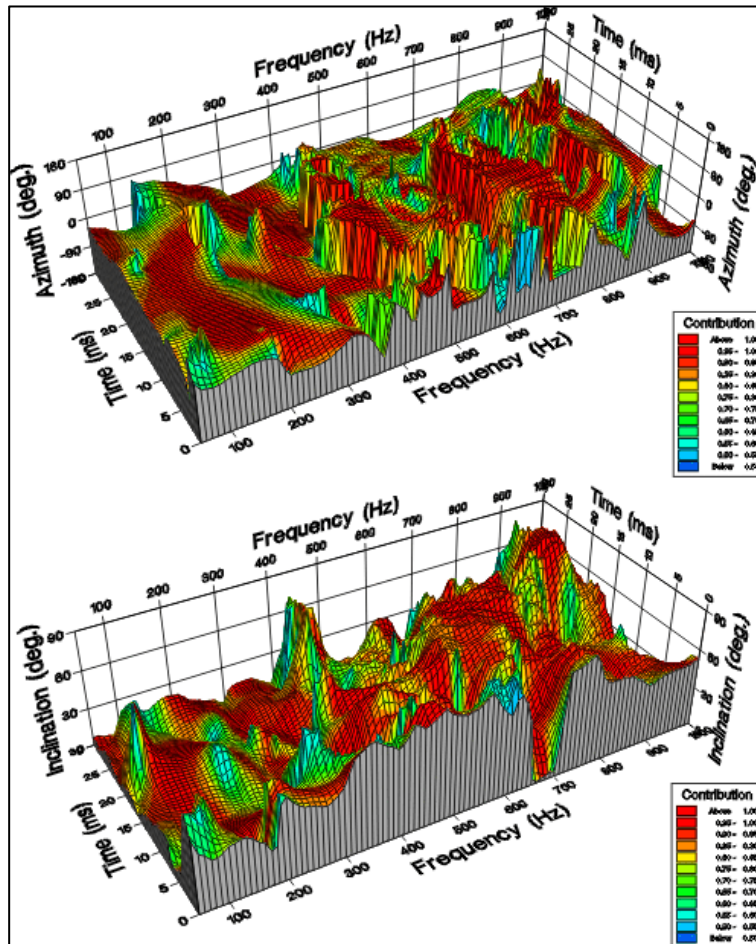


Fig. 21 10m 地点における方位角、伏角の推定値

(d) 地下弾性波検出用マイクロゾンデを用いた地下計測法の検討

本センサーが組み込まれた地下弾性波検出用マイクロゾンデ（株アカシが開発）の設置法について検討を行なうとともに、そのキャリブレーション、耐環境試験を株アカシと共同で実施した。また本ゾンデを用いたコヒーレンス波計測法、アレイ計測法について検討を行なった。

(2-2) (株)アカシ

(a) 製品として目標とする仕様の策定

(株)アカシの従来の地中検出器及び本プロジェクトで開発を行うセンサー（仮称：V407）の概略仕様及び外観図を Table 1 及び Fig. 22 に示す。

(株)アカシの従来製品は、用途を地震計に特化しているため、周波数範囲を低く抑え分解能を良くしている。しかし、AE 波等を用いた構造欠陥及び防災機器等では、より高い周波数に対応した信号検出が求められており、汎用性を高めるためには広帯域化を行う必要がある。よって、周波数範囲の仕様を DC ~ 1,000Hz に拡大した。また、分解能については、通常の振動計測に必要とされる分解能が、 $1 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ であるので、目標製品仕様を $1 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ の分解能とした。

Table 1 製品仕様の比較

仕様項目	単位	従来製品		開発品
		JEP-4B3	JEP-7B3	V407
寸法	mm	90 × 540	63.5 × 733	20 × 200
質量	kg	15	12	0.3
周波数範囲	Hz	DC ~ 400Hz	DC ~ 400Hz	DC ~ 1000
分解能	m/s ² / Hz	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-5}

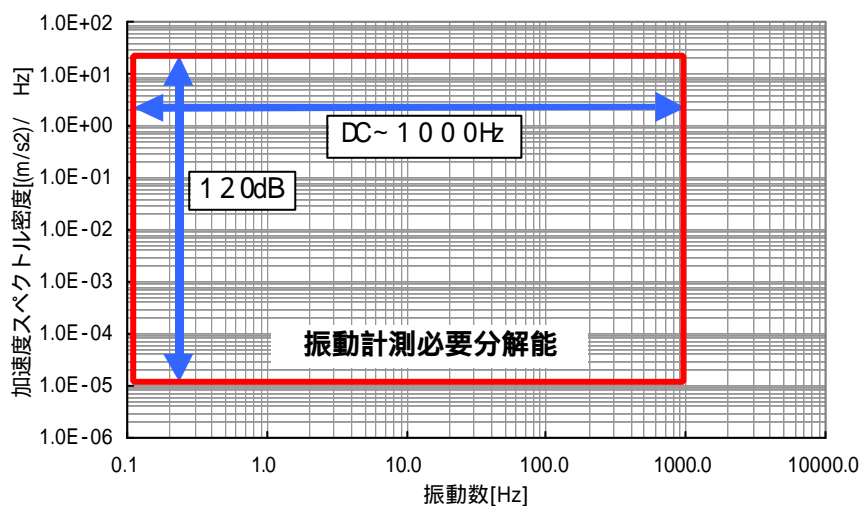


Fig. 22 目標分解能及び周波数特性

(b) マイクロ加工技術の習得とプロセスの検討

現在の所、本プロジェクトで使用するマイクロセンサーは、東北大学において製作している。しかし、地下弾性波検出器として実用化するには、(株)アカシ側においてセンサーを生産する必要がある。しかし、(株)アカシにおいては、これまでにマイクロ加工技術を用いたセンサーを開発した実績がないため、このような加工技術に習熟しているとは言い難い。

そこで、実用化の際にスムーズに生産を行えることを目的として、東北大学において実際にマイクロセンサーの加工プロセスを体験する事で、マイクロ加工技術の習得を図った。Fig. 4 に示したマイクロセンサーの加工プロセスを全て行うことで、マイクロ加工技術の一般的な技術を獲得することができた。

また、この経験から得られた知見を元に、センサーを量産する際のプロセス上の問題点や不足している設備などについての検討、並びにプロセスの一部の発注が可能な外注先の調査を行い、新規に設備を導入すべきか、外注に出すべきかと言った判断を行った。

さらに、今回製作するマイクロセンサーの加工プロセスにおいて、技術的な鍵となる Si の Deep RIE を自社にて行うために、STS 社製の ICP-RIE 装置を新規に導入した。これに伴う装置仕様の策定と装置の立ち上げ、並びに加工条件の確認を行い、センサーの生産に必要な準備を整えた。

(c) センサー駆動用電子回路の開発とハイブリッド化

電子回路部については、東北大学においても開発や低雑音化を行っている。これとは別に、(株)アカシにおいては、実際に市場に投入することを念頭に置いた電子回路の開発を行った。

(i) 回路概要

本回路は、正弦波発振部、検出部、フィルタ部、ゲイン調整部の4つより構成される。本回路のブロック図を Fig.23 に示す。正弦波発振部は、検出部駆動に用いる正弦波の発振を司る。検出部は、メカ部の静電容量の変化を検出し、電圧出力する部分である。フィルタ部は、検出部より出力される信号から、不要な高調波成分（その多くは、正弦波発振部にて作られる検出部駆動波形である）を取り除く部分である。ゲイン調整部は、センサーの仕様に基づいた出力となるよう、微調整を行う部分である。

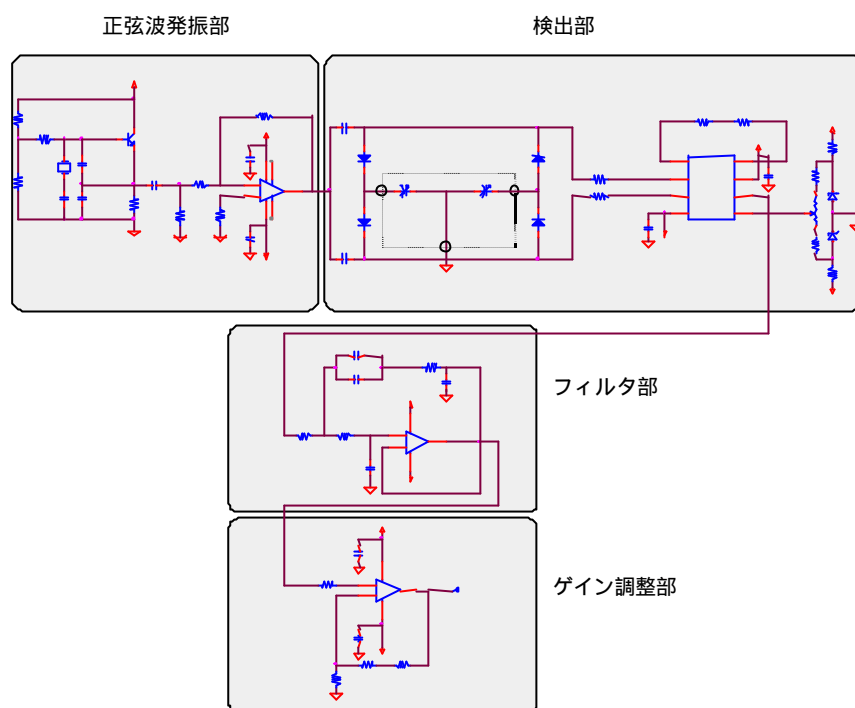


Fig.23 センサー駆動用電気回路のブロック図

(ii) 正弦波発振部

本回路で発振される正弦波により、検出部を駆動しメカ部の静電容量変化を捉える。この回路において重要な点は、波形歪みを極力少なくすることと、安定した波形を供給できることである。ここで作られる波形により、センサーの分解能や安定性が決まるため、ここでは、周波数精度と動作安定性の高いコルピッツ型水晶発振回路を採用している。検出部のゲイン - 周波数特性より、本回路では 100kHz の発振回路とした。本回路にて使用されている回路を、Fig.24 に示す。

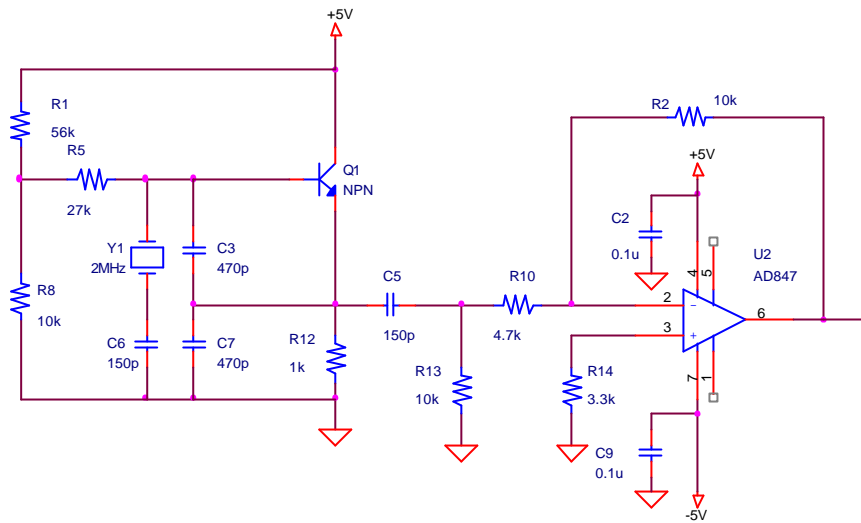


Fig.24 正弦波発振部

(iii) 検出部

本センサーにおいて、求める加速度はその静電容量の変化によって現れる。よって、検出部はダイオードブリッジを用いた静電容量検出回路と、その差を求める計装アンプにより構成される。本回路にて使用されている回路を Fig.25 に示す。

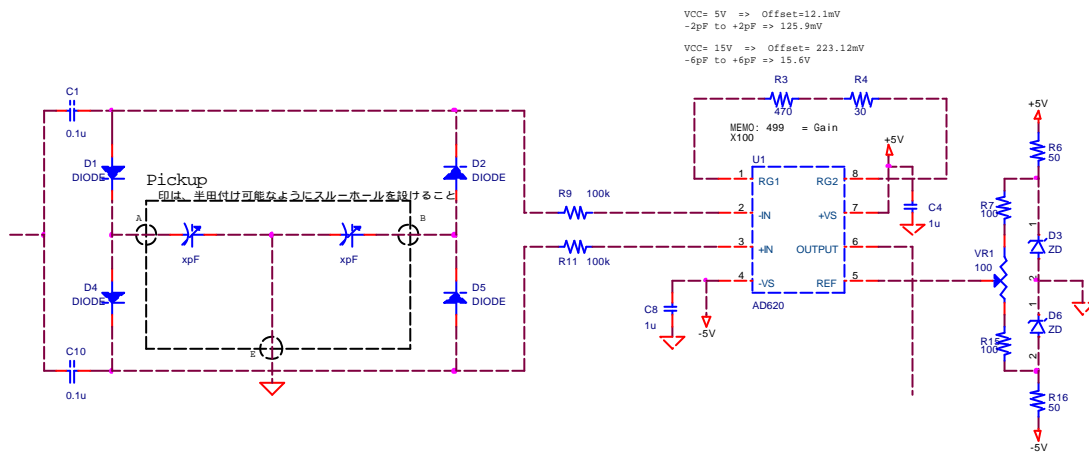


Fig.25 検出部

センサー構造部の静電容量のばらつきにより、加速度が0の場合でも出力値が0とならないオフセットが発生する。計装アンプにおいて、このオフセットの除去も行う。

(iv) 検出部の動作解析

本回路を、電気回路シミュレータにて解析した結果を Fig.26, 27 に示す。Fig.27 の上側

のグラフが、周波数特性、下側のグラフが時間軸波形である。それぞれ、メカ部静電容量が $\pm 29.4\text{m/s}^2$ (= 6G の変化) 変化した場合のグラフである。

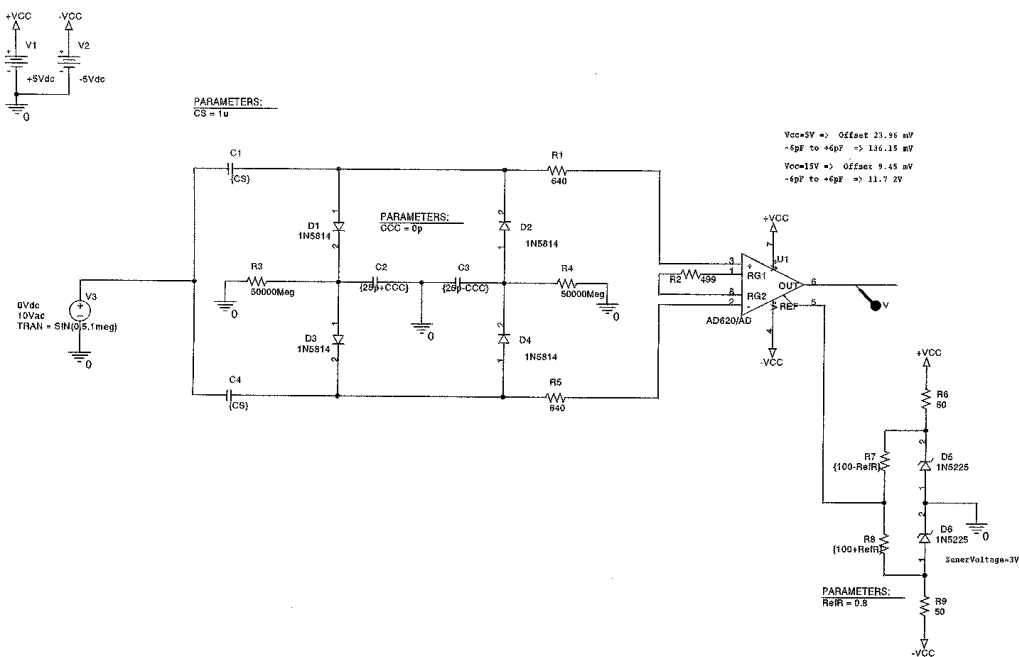


Fig.26 検出部シミュレーション回路

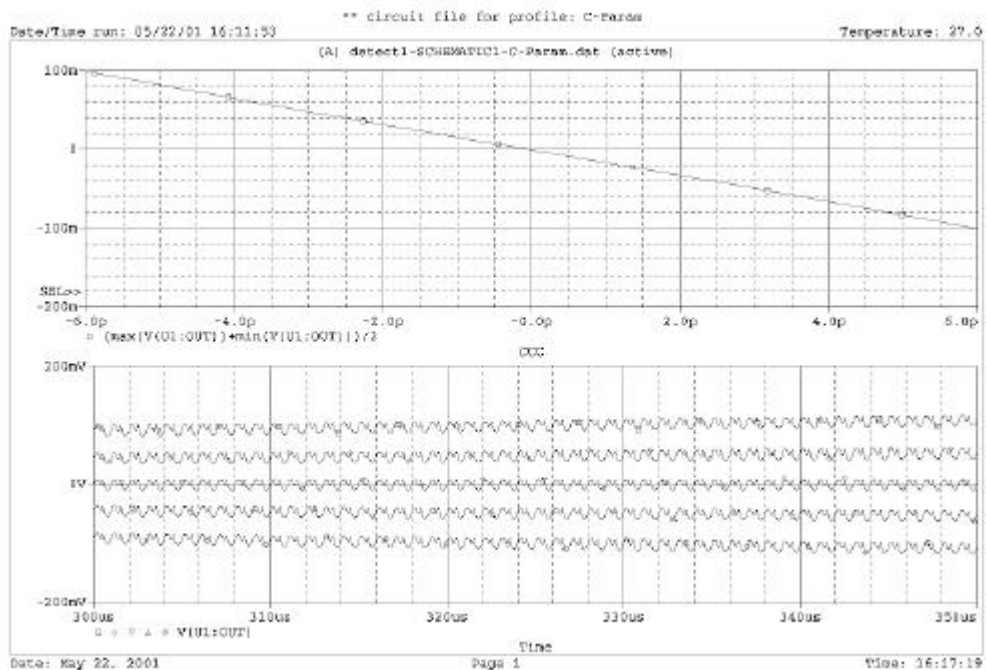


Fig.27 検出部のシミュレーション結果

上側のグラフより、検出部単体の感度は、 $0.136\text{V}/(\text{m}/\text{s}^2) = 1.33\text{V}/\text{G}$ であることが分かる。また下側のグラフより、出力波形に 100kHz の波が含まれていることが分かる。この波は、正弦波発振部により発振された信号である。この波を除去するために、フィルタ回路が必要となる。

本回路は、構成する素子の特性のばらつきの影響を受けやすい。

オフセットの調整は、本回路の計装アンプの調整機能により除去する。

(v) フィルタ部

本回路の目的は、検出部からの出力に含まれている高調波成分（主に正弦波発振部により発振された信号）を除去することである。ただし、仕様である 1kHz までフラットな特性をもつ必要がある。本回路においては、 22kHz 、ゲイン 1 倍の 2 次のローパスフィルタとする。本回路を、電気回路シミュレータにて解析した結果を Fig.28, 29 に示す。

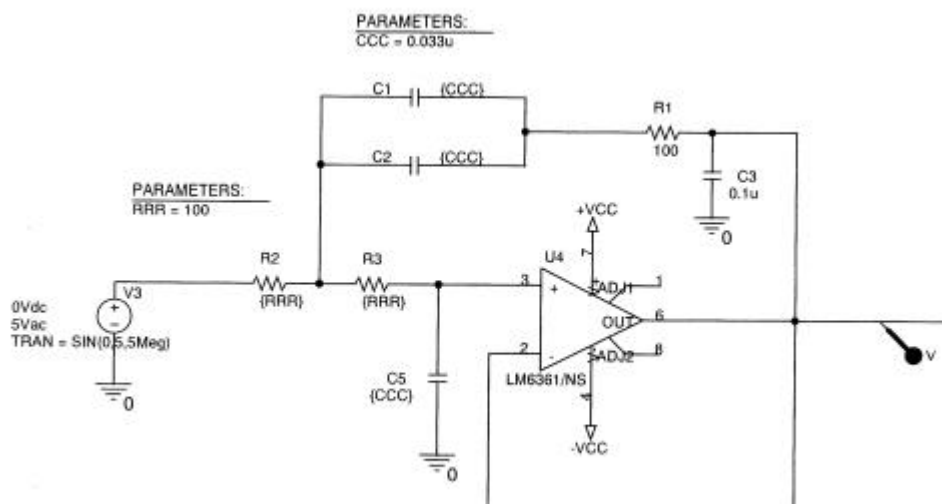


Fig.28 フィルタ部シミュレーション回路

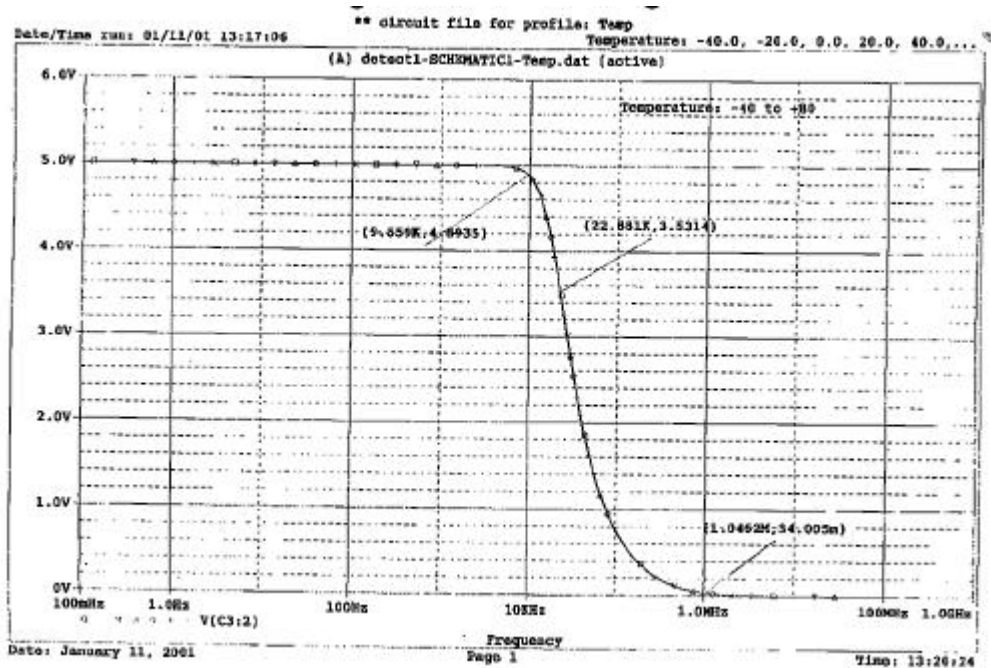


Fig.29 フィルタ部のシミュレーション結果

(vi) ゲイン調整部

本回路は、検出部単体の感度 $0.136\text{V}/(\text{m}/\text{s}^2) = 1.33\text{V}/\text{G}$ を、要求仕様である $0.306\text{V}/(\text{m}/\text{s}^2) = 3\text{V}/\text{G}$ となるよう、増幅・調整する働きを持つ。

(vii) 全回路の検証

本回路の総合的な動作の検証結果について、以下に挙げる。検証は、電気回路シミュレータにて行なった。Fig.31, 32 に結果を示す。

Fig.31 におけるシミュレーションの結果は、メカ部の静電容量が $\pm 15\text{m}/\text{s}^2$ 相当の変化をした場合の回路挙動を検証したものである。メカ部の静電容量変化は、 $10\text{m}/\text{s}^2$ 当り 2pF の変化という理想値で行った。結果は、要求仕様通り $0.3\text{V}/(\text{m}/\text{s}^2)$ の感度を持つことが確認された。分解能においても、回路単体として $1 \times 10^{-7}(\text{m}/\text{s}^2)/\text{Hz}$ の能力を持つことが検証された。

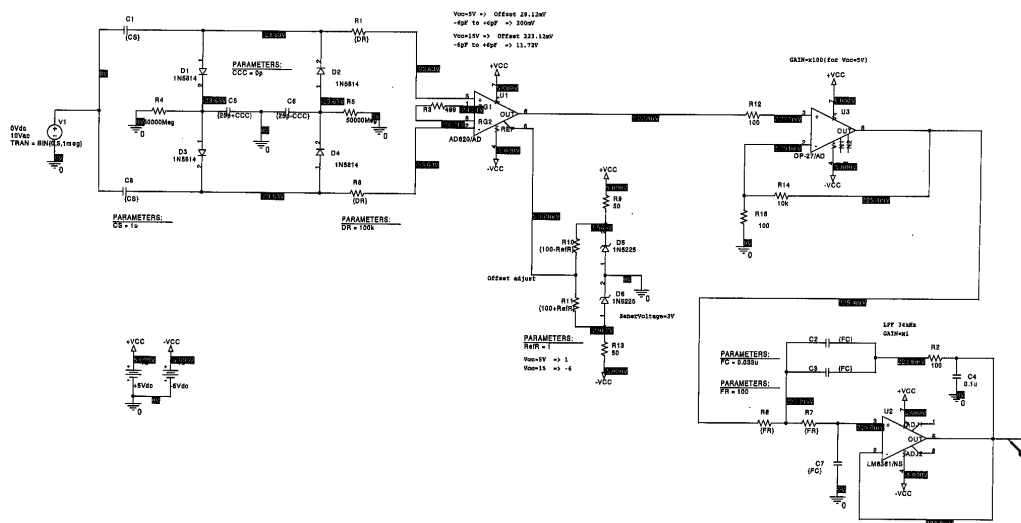


Fig.30 全体のシミュレーション回路

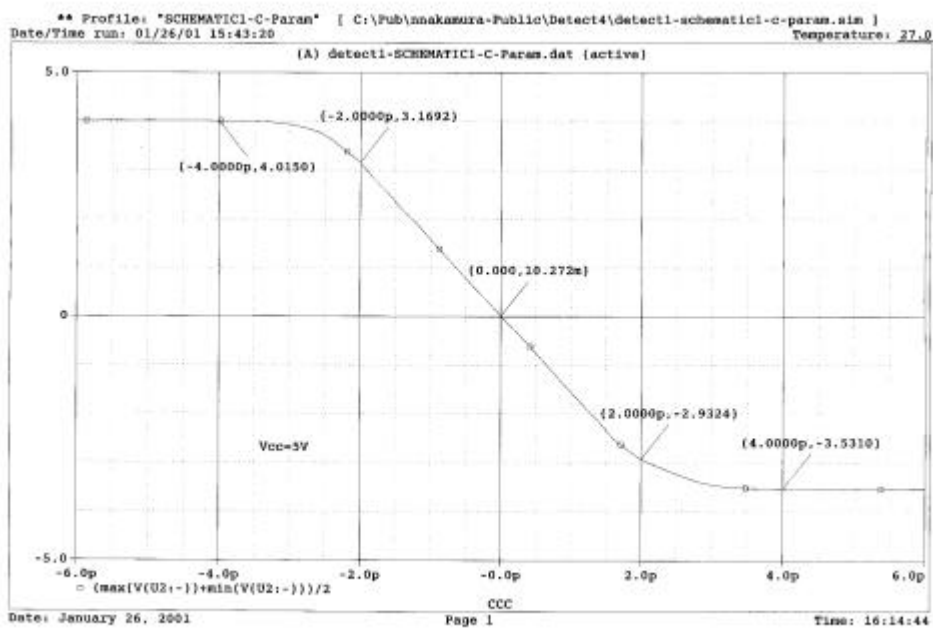


Fig.31 全回路のシミュレーション結果

(viii) センサー駆動用電子回路の動作試験

本回路における分解能測定試験の方法について記す。この測定試験は、加速度測定システム一式により常時微動を計測することにより行うものである。測定場所として、常時微

動が低レベルである当社の標準調整室において、振子型除振台にて行った。

本測定試験の結線概要図を Fig.32 に示す。機器構成として、振子型除振台、FFTアナライザ、直流安定化電源により成されている。測定手順は以下の通り

- 1) 測定可能な分解能を調べるために、測定機器の分解能を測定する。
- 2) 分解能測定を行う加速度センサーを用いて常時微動を測定する。
- 3) 縦軸に加速度スペクトル密度、横軸に周波数とするグラフを作成する。

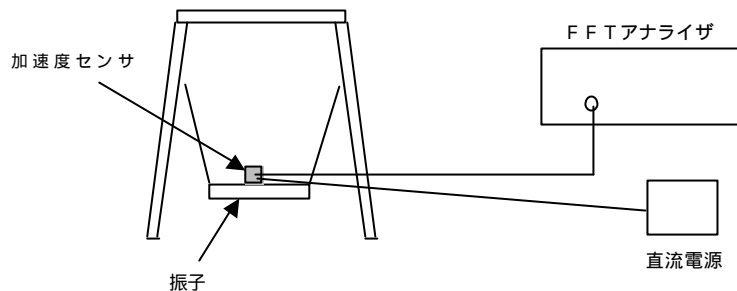


Fig.32 分解能測定試験

分解能測定試験の結果は、Fig.33 のグラフのようになった。この結果から、100Hz から1kHz の周波数領域においては、目標である $1 \times 10^{-5} \text{ (m/s}^2\text{) / Hz}$ の分解能を持つことが分かった。また 2kHz 以上においては、仕様を上回る分解能を示しており、10kHz においては、 $1 \times 10^{-5} \text{ (m/s}^2\text{) / Hz}$ の分解能を記録した。しかし、低周波数領域(100Hz 以下)においては、目標の分解能を満たすことができなかった。

マイクロ加速度センサ 分解能比較

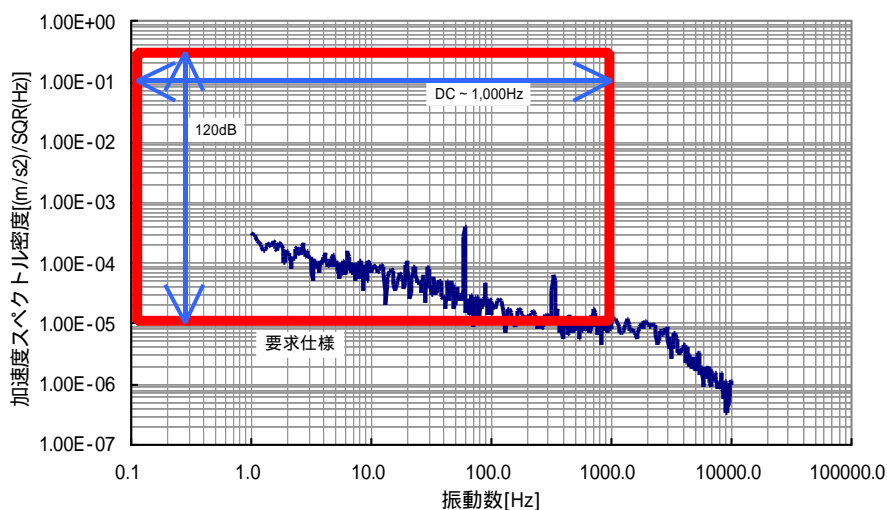


Fig.33 分解能測定試験の結果

本件について考察すると、分解能低下の原因となるノイズには、高域ではフラットな特性をもっていたものが、低域においてのみ 10dB/dec の傾きを持って発生する特徴があることがわかる。上記の特徴から、このノイズは $1/f$ 雑音の特徴と合致することがわかる。このノイズは、使用する部品の持つ固有のものであるため、使用する部品の再検討することによりある程度は軽減できる。今後の課題として、使用する電子部品の選定及び低ノイズ O P アンプによる回路自身の設計の見直しを行い、この低周域における分解能の向上を図る。

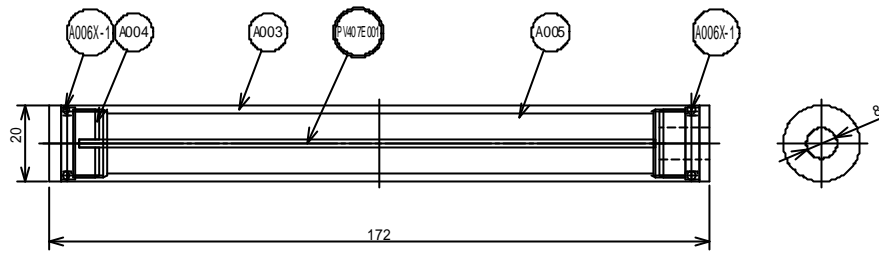
(d) パッケージング技術の開発

東北大学においても、製作したセンサーの特性評価を行うために、基本的なパッケージングの開発を行っている。これに対し(株)アカシでは、実際に使用される状況を想定し、本センサーを大量設置することが十分考えられることから、コスト及び故障率の低減という観点より、部品点数を削減し量産性を考慮したパッケージングの開発を行った。

(i) 構造

本加速度センサーは、広帯域・地下弾性波計測システムとしての利用を想定しているため、その使用環境として、坑井内となる。坑井内での計測では、水などの液体により満たされている場合が多い。そのため、パッケージングには防水構造が必要となる。また、この液体が水以外の高い酸性を持つ液体である場合も考慮しなくてはならない。よって、腐食性の少ない材料が好ましい。さらに、数 1000 メートルの地下において使用される場合には、数 100 気圧の水圧が加わるため、防水はもちろんのこと耐圧性も必要とされる。また、地熱地域などに掘削された坑井内においては、内部温度が数 10 度以上となることもあり、温度に対する耐性を考慮する必要がある。加えて、本加速度センサーは、マイクロマシニング技術による小型化が最大のメリットであるため、パッケージングも小型化、特に設置工事費用の削減効果を考慮して、その径の小さいものが求められる。さらに本センサーの使用される周波数範囲である DC ~ 1,000Hz における動作を満たす必要がある。

以上の条件を考慮し、外側ケースはアルミ合金を採用した。20 のアルミ製パイプ両端にネジを切り、同じくアルミ製の蓋で閉めるものとした。このアルミ製の蓋には、センサー駆動電気回路の基板を差し込む溝と、防水性を確保するための O リングを取り付ける溝が切っである。本パッケージングの特長である部品点数の大幅な削減によるコスト及び故障率の低減を図ることができ、本センサーの利点である大量設置における効果を推進するものとする。パッケージングの外観を、Fig.34 に示す。



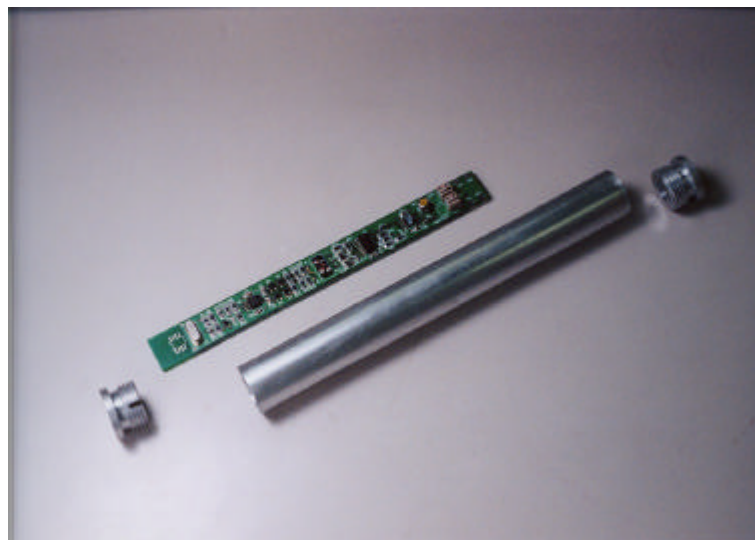
(a) パッケージ概要



(b) パッケージの外観



(c) パッケージと電気回路基板



(d) パッケージの全部品

Fig.34 (株)アカシにおいて開発した検出器のパッケージ

(ii) 従来のパッケージングとの比較

ここでは、マイクロ加速度センサーの最大の利点である小型化に焦点を当て、従来機とのパッケージングサイズの比較を行う。

Fig.35 (a)が長さ方向、(b)が直径における従来機との比較写真である。一番上より、従来機、マイクロ加速度センサー、タバコの箱（大きさ比較のため）である。本パッケージングにおいて、仕様である 20×200 より小型の 20×172 を実現することができ、そのため従来の地震計測機器と比較して、長さで3分の1、直径で5分の1、体積にすると75分の1の小型化に成功した。

これにより、将来実用化されるであろう、細い径の坑井を安価に掘削するマイクロドリリング技術との連携も容易となり、地下マイクロセンシング構想の実現が可能となった。また、質量も約50分の1となったため、設置現場への輸送の面でも有利となる。交通機関の整備されていない環境への埋設など、広い範囲での適応が考えられる。



(a) 長手方向

(b) 直径方向

Fig.35 従来機とのパッケージング比較

(e) 広帯域・高感度マイクロ地下弾性波計測システムの設計

上述したように、センサー・電子回路・パッケージングの開発の進行を受け、実際にこれらを組み込んだ、広帯域の地下弾性波を高感度に計測できるシステムの設計・開発を行った

システム設計においては、マイクロ加速度センサーの特長を最も有利に活用できる地下マイクロセンシング構想へのステップアップを考慮に入れて行った。同構想においては、計測システムは複数存在し、集中的にあるいは分散的に処理をする必要が生じる。よって、システム設計においては、複数の計測システム間を柔軟に連結する機能を要求される。まず1地点における計測を司る、最小単位としての計測システムについて述べ、その後、その後に地

下マイクロセンシング構想への拡張を考慮した複数の計測システムの連携システムについて述べる。

(i) 広帯域・高感度マイクロ地下弾性波計測システム

ここでは、データロガー GPL - 01 と組み合わせた広帯域・高感度マイクロ地下弾性波計測システムを挙げる。システムの概要としては、Fig.36 に挙げるものとなり、実際のシステムとしては、Fig.37 のようになる。このデータロガーは、1台で3軸×3基分のデータを処理することができ、またそれ自身が内蔵する記録カードに逐次データ記録を行う他、Ethernet や RS-232C による通信機能を有する。

従来の地下弾性波計測システムでは、通信手段として電話回線を用いたものが多い。この電話回線は、1対1コミュニケーションを行なうものであるため、大量設置された場合には、複数の電話回線を用意するか、時間的に遅らせて順次処理を行なっていく必要があった。

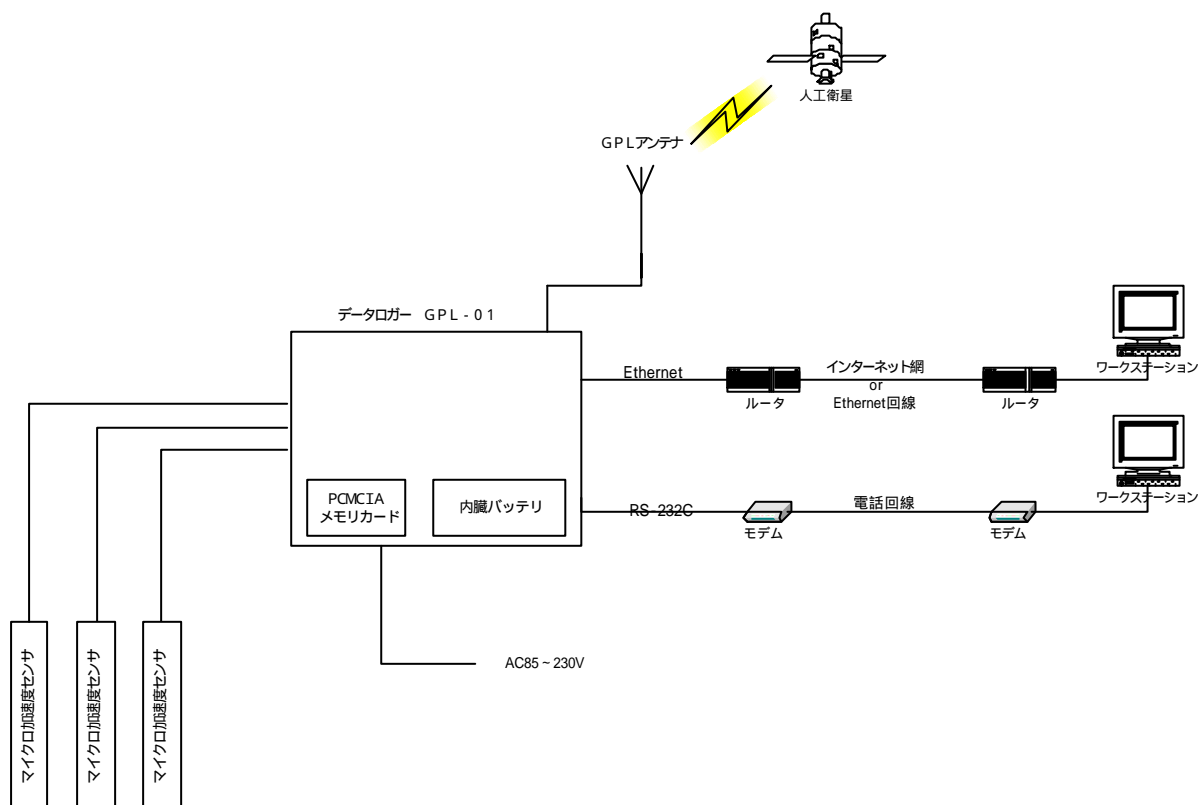


Fig.36 広帯域・高感度地下弾性波計測システム概略



Fig.37 試作した広帯域・高感度地下弾性波計測システム

これを解決する方法として、TCP/IP(Ethernet)を用いた通信手段がある。この方式では、通信データはパケットに分解され通信される。先に述べたとおり、大量設置が想定される本システムでは、TCP/IP(Ethernet)通信を主眼においたシステムを構築した。大量のセンサー出力を同期させる方法としては、GPS(Global Positioning System)による人工衛星からの時刻同期システムによって対応する。通信回線としては、通信路内障害に対する強度と汎用性の面から、インターネット網を使用する。インターネット網の汎用性により、通信回線としては、専用線その他、電話回線、ISDN網・光ケーブル・無線パケット網・携帯電話網・衛星通信回線などが利用できる。特に無線による回線が使えることは、設置条件をさらに広げることが可能となる。

(ii) 地下マイクロセンシング構想へのステップアップ

ここでは、複数の計測システムが稼働する地下マイクロセンシング構想へのステップアップについて述べる。システム概要図としてはFig.38のようになる。個々の計測システムは、(i)で述べたものと同システムであり、その相互結合をインターネット網あるいはLANネットワーク網を用いたものである。

従来の電話回線によるシステムにおいては多数の計測システムによる同時通信が困難で

あることに問題があった。それを解決する1つの方法がTCP/IPによるパケット通信である。TCP/IPは、それ自身が宛先と送信元の情報を持ち、ネットワーク網自体が通信経路切替装置の役割を担うこととなるため、多数同時通信において有利となる。

また Fig.38 では、1台のワークステーションが集中的にデータ管理をする例を挙げているが、先に述べたとおりネットワーク網自体が切替装置として機能するため、ワークステーションの数は事実上制限を受けない。よって、複数台における分散処理の他、複数台への同時通信の可能となる。今後の方針として、信号圧縮技術との組み合わせによる、更なる高速同時通信の開発を進めるものである。

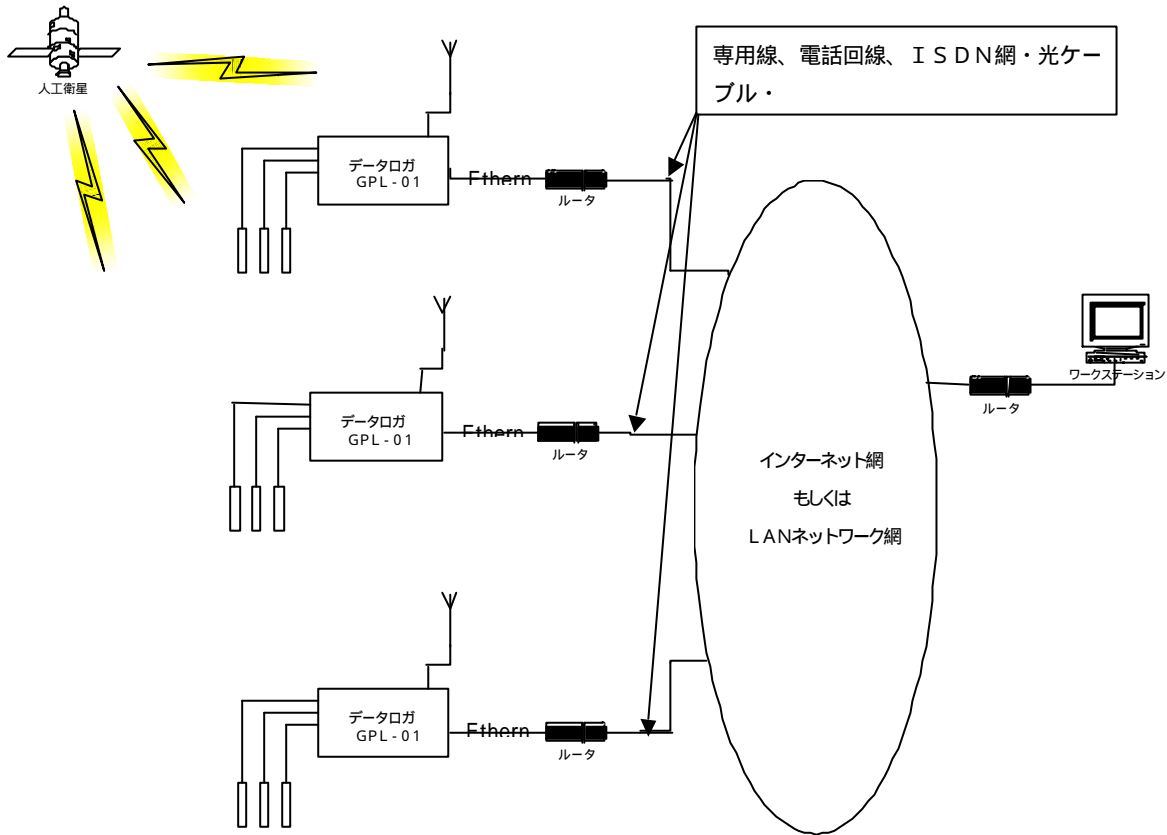


Fig. 38 地下マイクロセンシング構想へのステップアップシステム

まとめ

(1) 当該研究開発プロジェクト全体の進捗状況及び成果のまとめ

本研究では、東北大学地下マイクロセンシング構想の一環として開発された広帯域・高感度静電容量型加速度センサーの実用化を目的として、以下の項目について研究を実施した。

1. センサー製作時の歩留り向上のためのプロセスの検討

これまで開発してきたマイクロ加工プロセスを、歩留り向上ならびに信頼性向上の観点から再検討した。これにより実用化へ向けたプロセスを設計し、それに従いセンサーを試作した。これらの研究により、マイクロセンサー製作時の歩留まりを数%から70%程度まで大きく向上させることができ、実用化への見通しを得ることができた。

2. センサー駆動用電子回路の開発とハイブリッド化

(株)アカシと共同でセンサー駆動用サーボ回路の設計・製作を行なうと共にその特性を評価し、100~1kHzで目標分解能を達成した。また回路の低雑音化のための検討を行った。これにより、回路部分の雑音レベルをこれまでの数分の一にまで低減できる見通しが得られた。

3. 多成分化の検討

地下弾性波を多成分計測するためのセンサー・電子回路の構成とそのパッケージング法について検討した。本マイクロセンサーを組み込んだ3軸地下弾性波検出器を試作し、東北大学工学部内テストフィールドでその性能を評価した。これにより、今後更なる検討が必要であるものの、本弾性波検出器により3次元粒子運動軌跡を検出可能であることが示された。さらに、部品点数の削減及び組み立て工数の削減による、地中埋設パッケージの量産性向上を図った。

4. 地下弾性波検出用マイクロゾンデを用いた地下計測法の検討

本センサーが組み込まれた地下弾性波検出用マイクロゾンデ(株)アカシが開発)の設置法について検討を行なうとともに、そのキャリブレーション、耐環境試験を(株)アカシと共同で実施した。また本ゾンデを用いたコヒーレンス波計測法、アレイ計測法について検討を行なった。さらに、アカシ製データロガとマイクロ加速度センサーを組み合わせたシステムの開発を行った。

以上の成果により、商品化に向けて大きな足がかりを得ることができた。

(2) 今後の展開

本プロジェクトで東北大学・(株)アカシにおいて行った研究により、本地下弾性波検出器を今後 1 年程度で、商品として販売開始する見込みが得られた。一刻も早く本検出器を市場に投入し、地下弾性波計測における幅広い分野での実用化を目指すと共に、これまで実現が不可能だった高精度測定を実現することを目標とする。

また、平成 13 年度においても東北大学と(株)アカシにて共同研究を行い、

- より量産を考慮し、デザインを改良した第二世代センサーの開発
- センサー・測定回路の改良による、感度や周波数特性がより優れた検出器の開発
- パッケージングの品質と量産性の更なる向上

等の各種の改良を行い、より特性の優れた検出器を安価に、かつ多量に市場に投入することで、この分野における市場からの評価を獲得し、大きなシェアを得ることを目標とする。

キーワード

- | | | |
|-----------------|------------------------|----------|
| (1) 地下マイクロセンシング | (2) シリコン容量型マイクロ加速度センサー | (3) 微細加工 |
| (4) 坑井内弾性波計測 | (5) 多成分弾性波計測 | (6) 地震計 |
| (7) 3次元粒子運動軌跡 | | |

研究成果発表

著者名	論文表題			
新妻 弘明	マイクロセンサーによる地下弾性波計測			
雑誌名	巻	発行年	ページ	
振動技術		2 0 0 1	25 - 29	
著者名	論文表題			
Hiroshi Asanuma et al.	Miniaturized silicon capacitive accelerometer for downhole seismic measurement			
雑誌名	巻	発行年	ページ	
Proc. ASME InterPACK01		2 0 0 1	(in press)	
著者名	論文表題			
西澤 充智 ら	シリコン容量型マイクロ加速度センサを内蔵した小型3軸地下弾性波検出器の試作およびその性能評価			
雑誌名	巻	発行年	ページ	
物理探査学会第104回学術講演会論文集		2 0 0 1	(印刷中)	
著者名	論文表題			
新妻 弘明	地下マイクロセンシング技術			
雑誌名	巻	発行年	ページ	
超音波テクノ	12	2 0 0 0	2 - 7	
著者名	論文表題			
Mitsutomo Nishizawa et al.	Miniaturized downhole seismic detector using micromachined silicon capacitive accelerometer			
雑誌名	巻	発行年	ページ	
SEG Expanded Abstracts		2 0 0 0	(CD-ROM)	
著者名	論文表題			
西澤 充智 ら	シリコン容量型マイクロ加速度センサを用いた小型地下弾性波検出器の試作とその性能評価			
雑誌名	巻	発行年	ページ	
物理探査学会第102回学術講演会論文集		2 0 0 0	178 - 181	