

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「LiNbO₃ を利用した小型加速度センサーの開発」

研究開発成果等報告書

平成25年3月

委託者 東北経済産業局

委託先 株式会社八戸インテリジェントプラザ

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
- 1-3 成果の概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 センサー素子加工技術の開発

- 2-1 研究目的および目標
- 2-2 研究内容
- 2-3 研究成果
 - 2-3-1 テーマ①切削技術の確立
 - 2-3-2 テーマ②犠牲層形成プロセスの確立
 - 2-3-3 テーマ③犠牲層除去プロセスの確立

第3章 センサーシステムとパッケージング開発

- 3-1 研究目的および目標
- 3-2 研究内容
- 3-3 研究成果
 - 3-3-1 テーマ④ 気密封止パッケージング技術の確立
 - 3-3-2 テーマ⑤ 回路設計の検討
 - 3-3-2-1 センサー素子の設計
 - 3-3-2-2 集積回路・演算回路の設計
 - 3-3-2-3 パッケージング
- 3-4 試作結果のまとめ

第4章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

現在、自動車業界では2012年、2014年に欧米で新モデルから装着義務化されるなど、横滑り制御装置(ESC; Electronic Stability Control)への関心が高まっている。その装置の急激な普及拡大に伴い、それを構成する際に不可欠である加速度センサーの益々の小型化や低コスト化が強く求められている。また、加速度センサーと角速度センサーを組み合わせた慣性センサーモジュールや、さらには慣性モジュールとエアバックモジュールとの統合など、自動車メーカーによる安全性能向上のための「システム統合」へのニーズも高まっている。こうした動きは、専用のハウジングが不要であることや取り付けスペースが小さくて済むこと、取り付け工数が安価になること、電気配線が簡素化(配線ミス低減および安価)できることなど、システムとしても小型化および低コスト化に大きく貢献でき、かつ高品質で省消費電力化も期待できるためである。

自動車用加速度センサーは大きく分けて現在2種類存在する。一つはエアバックシステムに対応した衝撃センサーであり、もう一つはより低い加速度を検出するセンサー、すなわち横滑り用センサーである。横滑り用センサーは、車のハンドルがとられるような横滑りを起こす数G程度の加速度を検出することが求められ、低い加速度領域であるが故に高い精度(高感度、高分解能)が求められている。この性能を満足するためには現在主流であるMEMS技術を利用した静電容量タイプやピエゾ抵抗タイプのセンサー素子を大きくする手法もあるが、市場ニーズである「小型化」と相反してしまう問題がある。また、従来のセンサーではLSIの高集積化に頼る小型化手法が採られており、アンプ、A-Dコンバータ、DSPなどを集積した高度で大規模なLSIの開発コストが製品全体のコストを上げる要因となっている。また、従来タイプのセンサー素子はアナログ出力であるため車が止まっているときはセンサー素子からの信号も止まり、センサーが正常動作しているのか判別が難しい側面もあり、安全性を高める上でボトルネックになっている。さらに電源電圧変動や熱雑音の影響、A-D変換の誤差など、高分解化にも課題があった。

今回我々が研究開発に取り組んだ加速度センサーは、高い電気機械結合係数を有するLiNbO₃を使用し、機械的応力(歪み)を直接電気信号に変換できる表面弾性波(Surface Acoustic Wave、以下SAWと呼ぶ)という発振現象を励起して、加速度に応じた発振周波数の変化を捉える計測原理を具現化したものである。センサー素子の挙動を電圧レベルではなく周波数という時間軸で検知できるためA-Dコンバータや低ノイズのアンプ回路のような大面積を要する回路が不要となる。これにより信号処理ICをコンパクトにすることができるとともに、動作時に発生する熱雑音の影響も受けづらいなどの効果により高精度(高感度)な検知が可能になる。センサー素子の構造も同様にシンプルにすることができる。他社のMEMS方式では必須であった特殊なガス処理などの高額な装置やインフラを整備する必要がなく、一般的な半導体装置で製造可能である。そのため、より小型、低コストで、高精度・高品質な姿勢制御(安心・安全制御)センサーを実現可能である。

多摩川精機株式会社(以下、TSC)と多摩川モバイル電装株式会社(多摩川ジャイロトロンクス株式会社、以下TGCと合併した存続会社。以下TME)は、LiNbO₃を利用してナビゲーションシステム用やESC用の角速度センサーの設計・製造を手がけている。この角速度センサーで蓄積したLiNbO₃の知見を本加速度センサーに応用することにより、今後拡大するであろうESC用小型加速度センサーの市場に同社らがいち早く参入し、社会に安全・安心を低コストで提供することを目指し

ている。また将来的には加速度センサー単体のみならず、最近自動車用センサーとしては高いニーズを有する、角速度センサーと組み合わせたコンバインセンサーとしても、グループ内で生産できるようになる。

上記を踏まえた基盤技術高度化目標

高額な半導体装置を使用し、複雑な構造を持ったMEMS加速度センサーの代替として、比較的安価な装置で製造することができ、かつシンプルな構造にすることができるLiNbO₃ 材を利用した高性能な加速度センサーの開発を行う。とりわけ、センサー製造工程で重要である①切削工程、②犠牲層形成および③犠牲層除去、④気密封止工程について、難削材であるLiNbO₃の微細で高精度な切削加工方法、高速・高効率な犠牲層形成ならびに除去方法、さらにはセンサー特性を高品質に保つための封止雰囲気検討、さらに高効率な封止方法について、量産プロセスの研究を行い、その技術を確立する。さらに⑤A-Dコンバータを廃した低コストでコンパクト、広いダイナミックレンジを有するASIC (Application Specified Integration Circuit)の開発を行う。

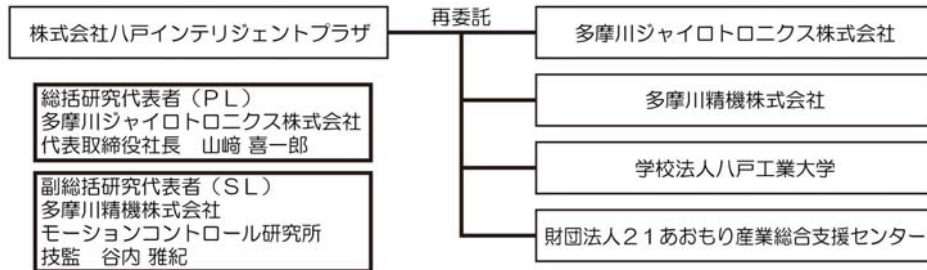
表－1 開発目標仕様

ダイナミックレンジ	5G
初期中点温度特性	±90mg
出力感度	800LSB/g (14bit)
感度誤差	±4%
直線性	1%FSR
出力ノイズ	11mg/rms
サイズ	7×5×3mm

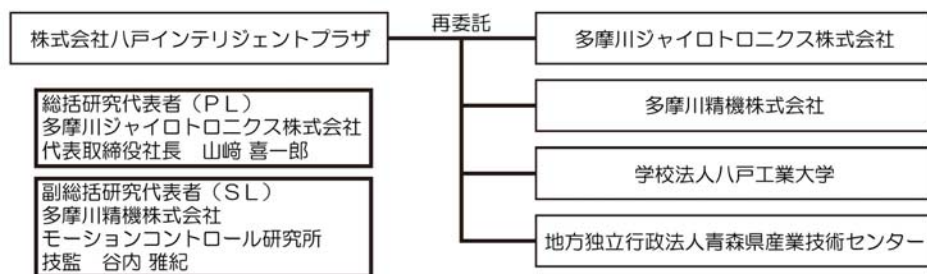
1-2 研究体制

(1) 研究組織

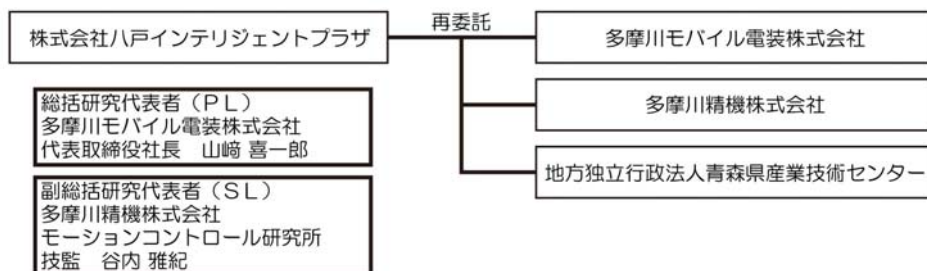
平成22年度



平成23年度



平成24年度

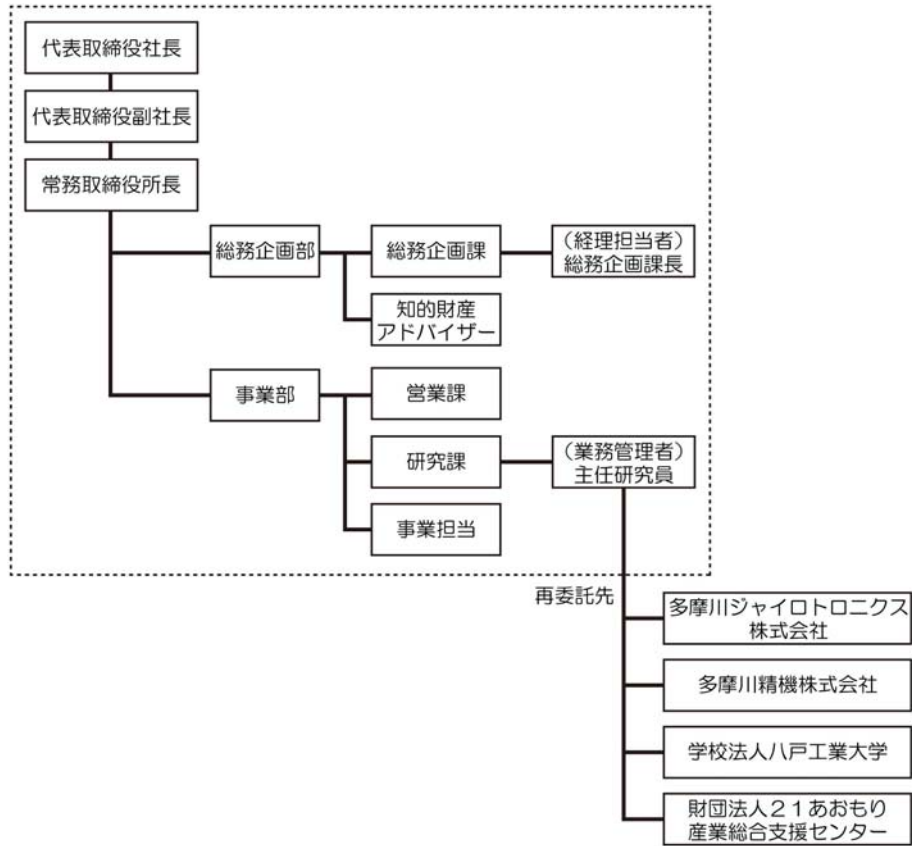


平成24年8月21日 多摩川ジャイロトロニクス株式会社と多摩川モバイル電装株式会社が合併し、存続会社は多摩川モバイル電装株式会社となった。

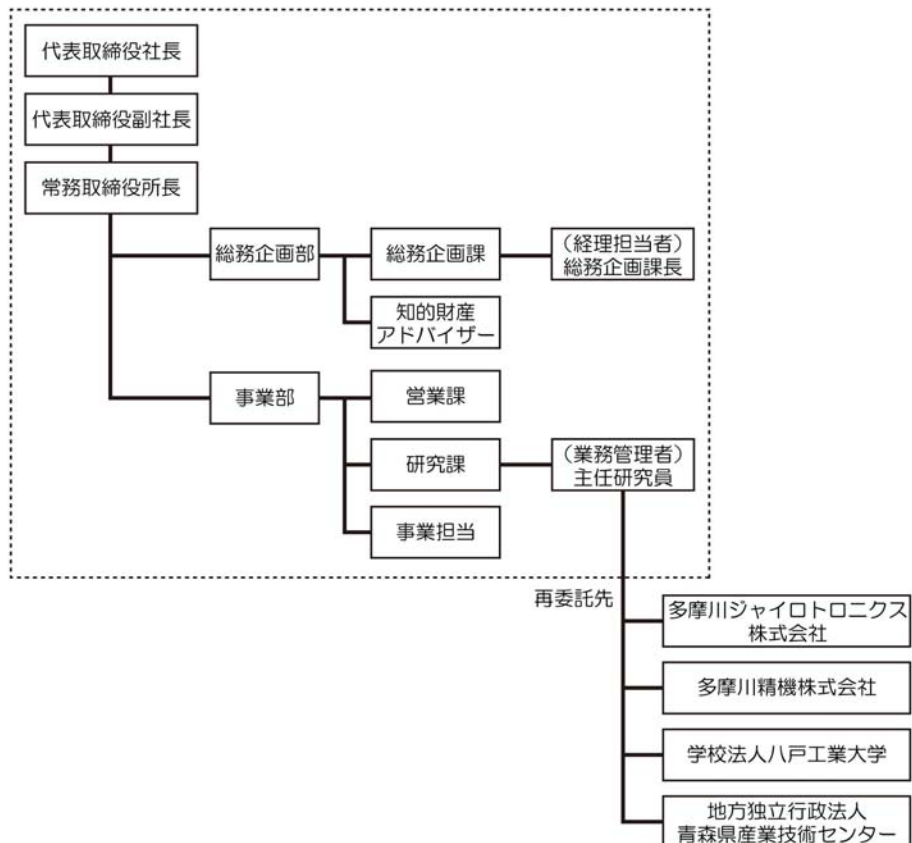
(2) 管理体制

① 事業管理者[株式会社八戸インテリジェントプラザ]

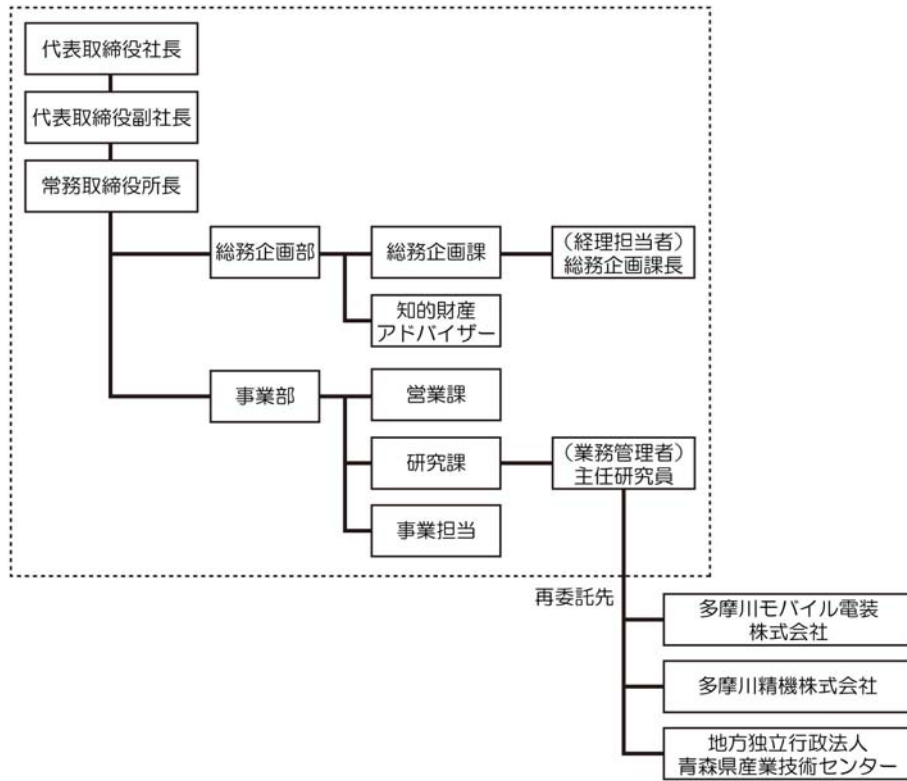
平成22年度



平成23年度



平成24年度

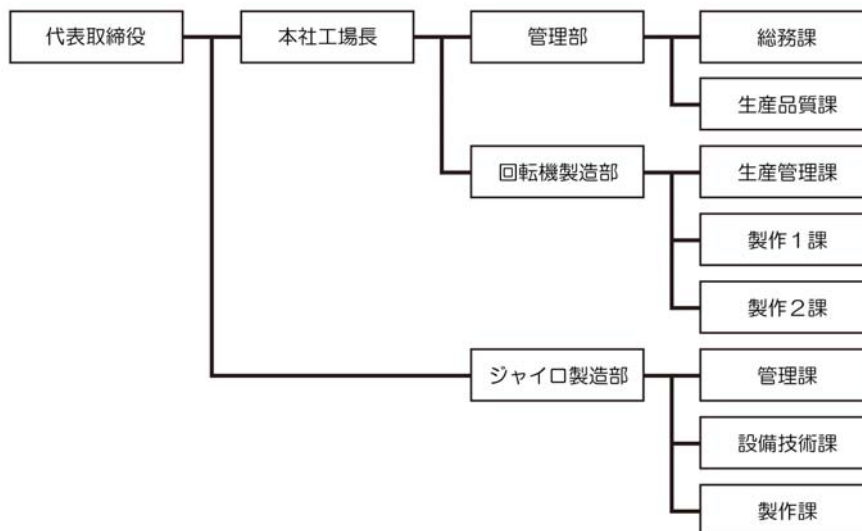


② (再委託先)

多摩川ジャイロロニクス株式会社(平成22年～平成24年8月20日まで)



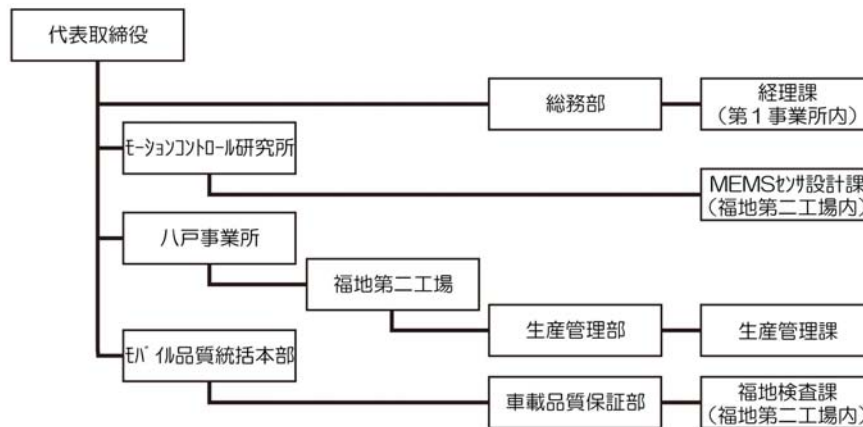
多摩川モバイル電装株式会社(平成24年8月21日より)



多摩川精機株式会社(平成22年度, 平成23年度)



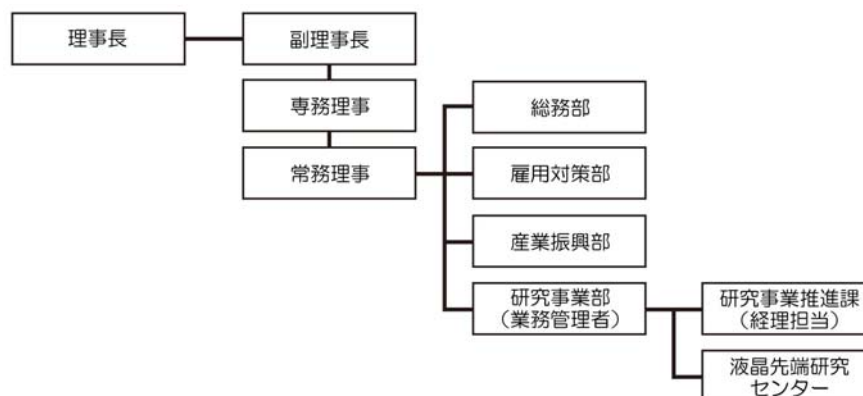
多摩川精機株式会社(平成24年度)



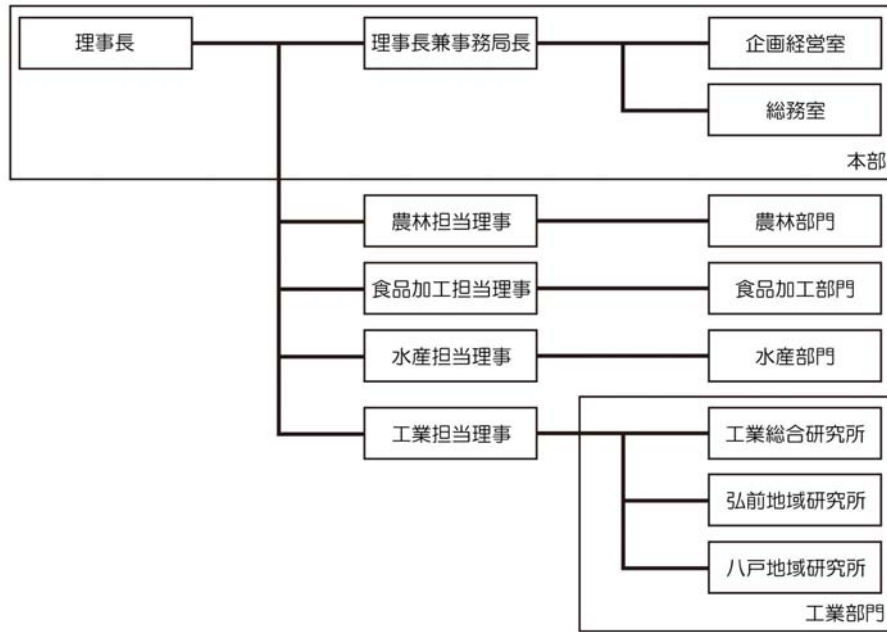
学校法人八戸工業大学(平成22年度, 平成23年度)



財団法人21あおもり産業総合支援センター(平成22年度)



地方独立法人青森県産業技術センター（平成23年度，平成24年度）



(3) 研究員及び管理員（役職・実施内容別担当）

【事業管理者】株式会社八戸インテリジェントプラザ

○管理員（平成22年度～平成24年度）

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
齊藤 政雄	総務企画課 課長	⑥
林崎 公彦	研究課主任研究員(営業課長兼務)	⑥

【再委託先(研究員)】

多摩川ジャイロトロニクス株式会社⇒平成24年8月21日より多摩川モバイル電装株式会社
(平成22年度)

氏名	所属・役職	実施内容(テーマ番号)
山崎 喜一郎	代表取締役 社長	PL ⑤-1
佐々木 政彦	設備技術課 課長	①-1、①-2、②-1、③-1、④-2
今井 彰	設備技術課 主任	①-1、①-2、②-1、③-1、④-2
三戸 誠一	設備技術課	①-3、②-1、③-1、④-1、④-2
榎本 貴史	設備技術課	⑤-1

(平成23年度)

氏名	所属・役職	実施内容(テーマ番号)
山崎 喜一郎	代表取締役 社長	PL ⑤-1
佐々木 政彦	設備技術課 課長	①-1、①-2、②-1、③-1、④-2
今井 彰	設備技術課 主任	①-1、①-2、②-1、③-1、④-2
三戸 誠一	設備技術課	①-3、②-1、③-1、④-1、④-2
榎本 貴史	設備技術課	⑤-1

(平成24年度)

氏名	所属・役職	実施内容(テーマ番号)
山崎 喜一郎	代表取締役 社長	PL ⑤-1
佐々木 政彦	設備技術課 課長	①-2、⑤-1
今井 彰	設備技術課 主任	①-2、⑤-1
榎本 貴史	設備技術課	⑤-1

多摩川精機株式会社

(平成22年度)

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
谷内 雅紀	モーションコントロール研究所(MC研)技監	SL ⑤-1
阿部 昭浩	MC研 MEMS センサ設計課 主任	②-1、③-1、④-1、④-2、⑤-1
太田 和弘	MC研 MEMS センサ開発課	⑤-1
荒屋 和貴	MC研 MEMS センサ設計課	①-1、①-2、①-3、②-1、③-1
加藤 隆志	MC研 MEMS センサ設計課	④-1、④-2、⑤-1
松井 友弘	MC研 MEMS センサ設計課	⑤-1

(平成23年度)

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
谷内 雅紀	モーションコントロール研究所(MC研)技監	SL ⑤-1
阿部 昭浩	MC研 MEMS センサ設計課 主任技師	②-1、③-1、④-1、④-2、⑤-1
太田 和弘	MC研 MEMS センサ開発課	⑤-1
荒屋 和貴	MC研 MEMS センサ設計課	①-1、①-2、①-3、②-1、③-1
加藤 隆志	MC研 MEMS センサ設計課	④-1、④-2、⑤-1
松井 友弘	MC研 MEMS センサ設計課	⑤-1

(平成24年度)

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
谷内 雅紀	モーションコントロール研究所(MC研)技監	SL ⑤-1
阿部 昭浩	MC研 MEMS センサ設計課 主任技師	⑤-1
田中 浩	MC研 MEMS センサ設計課	⑤-1
荒屋 和貴	MC研 MEMS センサ設計課	①-2、⑤-1
松井 友弘	MC研 MEMS センサ設計課	⑤-1

学校法人八戸工業大学

(平成22年度)

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
佐藤 松雄	工学部機械情報技術学科 教授	①-1、①-2

(平成23年度)

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
大黒 正敏	工学部機械情報技術学科 教授 学科長	①-1、①-2

財団法人21あおもり 産業総合支援センター 液晶先端技術研究センター

(平成22年度)

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
村井 博	駆動設計グループリーダー	⑤-1

地方独立行政法人青森県産業技術センター 八戸地域研究所

(平成23年度)

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
村井 博	エレクトロニクス部 研究員	⑤

(平成24年度)

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
村井 博	機械システム部 主任研究員	⑤

(4) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理者】

株式会社八戸インテリジェントプラザ

平成22年度～平成24年度

(経理担当者)総務企画課長

斉藤 政雄

(業務管理者)研究課主任研究員(営業課長兼務)

林崎 公彦

【再委託先】

多摩川ジャイロロニクス株式会社

平成22年度～平成24年度(平成24年8月20日まで)

(経理担当者)管理課 課長

笹川 一哉

(業務管理者)代表取締役 社長

山崎 喜一郎

多摩川モバイル電装株式会社

平成24年度(平成24年8月21日から)

(経理担当者)管理課 課長

西国 忠彦

(業務管理者)代表取締役 社長

山崎 喜一郎

多摩川精機株式会社

平成22年度

(経理担当者)総務部 経理課 課長

武馬 憲二

(業務管理者)八戸事業所 福地第二工場 工場長

和田 一久

平成23年度(平成23年9月20日まで)

(経理担当者)総務部 経理課 課長

武馬 憲二

(業務管理者)八戸事業所 福地第二工場 工場長

和田 一久

平成23年度(平成23年9月21日から)

(経理担当者)総務部 経理課 課長

武馬 憲二

(業務管理者)八戸事業所 (MC研)MEMS 設計課 主任技師

阿部 昭浩

平成24年度

(経理担当者)総務部 経理課 課長

武馬 憲二

(業務管理者)モーションコントロール研究所(MC研)技監

谷内 雅紀

学校法人八戸工業大学

平成22年度～平成23年度

(経理担当者)法人事務局財務課 課長

長浜 沖夫

(業務管理者)社会連携学術推進 課長

大野 和弘

財団法人21あおもり 産業総合支援センター

平成22年度

(経理担当者)研究事業推進課 主幹

齋藤 清英

(業務担当者)研究部 部長(研究推進課長兼務)

岩本 紳一郎

地方独立行政法人青森県産業技術センター 八戸地域研究所

平成23年度

(経理担当者)分析技術部 主事

漆坂 由美子

(業務管理者)エレクトロニクス部 部長

小野 浩之

平成24年度

(経理担当者)分析技術部 主事
(業務管理者)機械システム部 部長今野 玲奈
佐々木 正司

(5)他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

研究推進会議 委員(平成22年度)

氏名	所属・役職	備考
山崎 喜一郎	多摩川ジャイロロニクス株式会社 代表取締役 社長	PL
和田 一久	多摩川精機株式会社八戸事業所 福地第二工場 工場長	
佐藤 松雄	学校法人八戸工業大学 工学部 機械情報学科 教授	
村井 博	(財)21あおもり 産業総合支援センター 駆動設計 Gr.リーダー	
林崎 公彦	株式会社八戸インテリジェントプラザ 研究課 主任研究員	
小野 浩之	地方独立行政法人青森県産業技術センター 部長	
		アドバイザー

研究推進会議 委員(平成23年度)

氏名	所属・役職	備考
山崎 喜一郎	多摩川ジャイロロニクス株式会社 代表取締役 社長	PL ~H23/9/20まで H23/9/20~
和田 一久	多摩川精機株式会社八戸事業所 福地第二工場 工場長	
阿部 昭浩	多摩川精機株式会社八戸事業所(MC研)MEMS 設計課 主任技師	
大黒 正敏	学校法人八戸工業大学 工学部 機械情報学科 学科長	
小野 浩之	地方独立行政法人青森県産業技術センター 部長	
村井 博	地方独立行政法人青森県産業技術センター 主任研究員	
林崎 公彦	株式会社八戸インテリジェントプラザ 研究課 主任研究員	

研究推進会議 委員(平成24年度)

多摩川ジャイロロニクス株式会社⇒平成24年8月21日より多摩川モバイル電装株式会社

氏名	所属・役職	備考
山崎 喜一郎	多摩川モバイル電装株式会社 代表取締役 社長	PL SL
谷内 雅紀	多摩川精機株式会社 モーションコントロール研究所(MC研)技監	
村井 博	地方独立行政法人青森県産業技術センター 主任研究員	
林崎 公彦	株式会社八戸インテリジェントプラザ 研究課 主任研究員	

平成22年度

アドバイザー氏名	主な指導・協力事項
小野 浩之	ASIC開発に係る回路設計

1-3 成果の概要

LiNbO₃を利用した小型加速度センサーを開発するため、参画機関が連携して研究開発を進め、特性の改善と小型化を行ったセンサー素子、および機能集積を高めた信号処理回路を開発し、小型パッケージにそれらを内蔵した加速度センサーを試作した。

まず、センサーの検出素子である SAW 素子の製造プロセスを確立するため、難削材である LiNbO₃ の研削加工、および犠牲層の形成/除去、封止に関わる量産条件の研究を行い、素子加工から封止までの量産プロセス開発は、予定通り完了した。信号処理回路の開発では、その過程で SAW 発振回路が影響を及ぼしあう「カップリング」現象などの対策を行い、改善効果を FPGA ボードで評価・検証した。さらに、この知見を反映して集積化した ASIC (Application Specified Integration Circuit) を試作し、素子と組合せワンパッケージ化し、評価を行った。その結果、平成23年度時点では感度誤差が目標仕様に達していなかったが、それは加速度印加時の動的な安定性不足が起因していることを知見として見出した。これらの課題解消を目的として、SAW 素子の電極パターン設計の改善を行い、結晶方位を変更し対策した。また、小型化のため、発振に関わる抵抗、コンデンサなどの外付け部品を ASIC に内蔵させ、安定的に自励発振ができる回路構成とした。同時に、温度補償に関わる開発を行い、この機能も ASIC に内蔵した。

これら、センサー素子、ASIC、パッケージング方法などの研究開発の結果を統合し、小型パッケージにセンサー素子と ASIC を内蔵した加速度センサーを実現した。そのセンサーを実際に動作させ、電気的性能の評価と設計の妥当性を確認した。その結果、要求をほぼ満足するセンサー性能を得ることができた。ただ、サイズは若干目標に及ばず、一部の特性(温度特性)は多少改善の余地を残した。今後は、さらにセンサー素子の小型化を進めていくとともに、電気的特性の更なる向上を目指して継続検討していく。

以下、テーマ毎の成果を示す。

① 切削(による微細加工)技術の確立

テーマ①の目的は、センサー素子に加速度を検知するための錘を正確に作りこむことである。加工精度が不足し、錘の重量がばらつくと、センサー特性(検出感度)のばらつきを生む。そのため、精度の高い加工が必要である。しかし、LiNbO₃ は硬脆材料であり、劈開や異方性を有するため、シリコン材に比べチップングやクラックが発生しやすく、加工が難しい。

このテーマにおいて、最も重要なのは加工に使用する切削刃(砥石・ブレード)であり、チップング量や寸法精度を満足するよう、切削刃(砥石)の条件選定を行った。また2番目の課題は、スライサー(工作機械)の切断レシピ(切削刃の回転数と送りによる負荷速度など)を被削材にあわせて、最適化することである。

このため、切削刃の振れを可視化できる装置(工具先端位置測定システム:ジェイコア)を導入し、切削刃の動きを解析し、加工条件の最適化を図った。3番目の課題として、特にLiNbO₃は、劈開や異方性を有することから、固定が緩いと加工精度を妨げるため、適正な固定法・固定テープの選定を行った。これらの活動の結果、目標としていた加工精度を実現することが出来た。

② 犠牲層形成の量産プロセスの確立

本センサー素子の検出部は100~50 μ mに加工し、脆い構造であるため、製造プロセス内のストレスで破壊する恐れがある。この検出部の機械的強度を確保し保護するため、2軸ロボットを用いて、検出部に犠牲層材料で穴埋めする装置を開発し、これを用いて量産性の検証を行い、良好な条件を見出した。

③ 犠牲層除去の量産プロセスの確立

実装を終えたセンサー素子から犠牲層材料を除去する際に、それが検出部に残渣として残った場合、検出部が機械的歪みを発生しなくなり、センサーの検出感度を悪化させてしまうことが懸念される。このため、犠牲層材料の除去方法について検討し、その結果、最適な犠牲層プロセスを確立することができた。

④ 気密封止・パッケージング技術の確立

封止後に水分や接着剤からの脱ガスが、センサー素子の櫛歯電極上へ吸着した場合、SAWの伝搬速度が変化し、センサーとして性能を発揮できなくなる恐れがある。このため、封止前製品の水分除去や密閉空間での雰囲気など封止環境の最適条件に係る研究を行った。大気暴露の状態でも、短期的には大きな変動は無かったが、熱サイクルで特性変動する現象も観測され、使用温度より低い露点温度(-40℃以下)のドライエア封止が必要との結論に達した。また、安定的に気密を保持するための工法を評価し、良好な特性および気密性が得られ、安価で高品位な封止ができることを確認した。

⑤ 回路設計の検討

センサーを小型化するためには、回路の集積化は必須である。まず始めに、発振回路の集積化のため、SAWを励起するセンサー素子の設計と発振回路の特性確認を行った。

当初はSAWフィルタとして、業界の実績や論文の報告例が多いLiNbO₃の128° Yカットを使ったSAW発振子を製作し評価したが、素子を小型化すると、自励発振が安定せず、発振しない現象も見られた。このため、結晶方位を変更し、小型化しても安定発振をさせる事ができた。さらに集積化の予備実験としてインバータアレイICを使用し、同時に自励発振させたところ、望ましくないことに発振回路同士の相互干渉(カップリング)が認められた。このため、アイソレーションについても種々検討を行い、その結果、1軸方向

について加速度感度を得る事ができた。さらに複数軸(XYZ)を1素子で検出できるように、SAW 素子および発振回路をさらに拡張し、三次元の加速度感度が得られる配置を考案し、特許として出願した。SAW 素子と発振回路を複数並べることは、相互干渉のリスクをより高めることになるが、さらにアイソレーション対策をとることで、SAW 加速度センサーとしては、世界で初めて1素子での複数軸の加速度検知を実現することができた。発振条件を素子毎に調整しアイソレーションを図るため、平成23年度試作の ASIC においては、抵抗・コンデンサなどの受動素子を外付けし、定数を調整できる設計とした。平成24年度の改良型 ASIC においては、この定数を決定し、温度補正機能とともに ASIC に内蔵化した。前者の受動素子の内蔵化は成功した一方、温度補正演算の結果については結果として目標に若干及ばず、改善の余地を残した。また、パッケージサイズに関しては、発振回路の受動素子の内蔵化などによる、ASIC 集積度の向上、及び素子の小型化が寄与し、目標には届かなかったものの、平成24年度試作品は平成23年度に対して、体積比で1/10(7.8mm×7.8mm×3.1mm)の小型化を実現した。

今後は補完研究としてSAW素子の高周波化を行い、センサーの小型化の改善を図る予定である。追加対策を行えばパッケージサイズの小型化と温度特性改善の両立は達成可能である。しかしこれらの改善はASICのプロセスルールの変更や素子パターニングの細線化を伴うため、半導体メーカーとの協業が必要である。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

- ① 株式会社八戸インテリジェントプラザ
研究課主任研究員 林崎 公彦
E-mail: info@hachinohe-ip.co.jp
Tel: 0178-21-2111
Fax: 0178-21-2119

- ② 多摩川モバイル電装株式会社
代表取締役社長 山崎 喜一郎 (PL)
E-mail: kiichiro-yamazaki@tme.tamagawa-seiki.co.jp
Tel: 0178-60-1601
Fax: 0178-60-1605

- ③ 多摩川精機株式会社
モーションコントロール研究所 技監 谷内 雅紀
E-mail: masanori-yachi@tamagawa-seiki.co.jp
Tel: 0178-60-1563
Fax: 0178-60-1566

第2章 センサー素子加工技術の開発

2-1 研究目的および目標

テーマ①「切削技術の確立」の目的は、センサー素子に加速度を検知するための錘を作りこむことである。加工精度が悪ければ、錘の重量がばらつき、センサーの電気特性(検出感度)のばらつきを生む。そのため、素子の個体差が無いよう加工精度を寸法公差に収める必要がある。具体的な目標としては、【チップング量 $10\mu\text{m}$ 以下】、【形状寸法公差 $\pm 20\mu\text{m}$ 以下】、【1素子の加工時間 10sec 以下】を達成することとした。また、加工後の素子検出部は薄板の形状で割れやすいため、製造プロセス中での機械ストレスに耐えるように、犠牲層による補強を検討した。具体的目標は、補強が出来ることは勿論のこと、犠牲層形成に【形成時間 $10\text{秒}/\text{個}$ 】、実装後の犠牲層除去に【除去時間 $20\text{秒}/\text{個}$ 】の量産性も確保する事とした。

2-2 研究内容

LiNbO₃ は難削材であり、劈開面を有するため、シリコン材に比べチップングやクラックが発生しやすく加工が難しい。この際、最も重要なのは、加工に使用する切削刃(砥石・ブレード)であり、センサー素子のチップング量や寸法精度を満足する切削刃(砥石)の砥粒の粒径や密度を最適化する検討を行った。また2番目に重要なテーマは、スライサー(工作機械)の切断モード(切断レシピ)を被切削材にあわせて、最適化することであり、これまでは切削加工後のワークを解析し、切削性の良否を判断していたが、切削刃の振れを可視化できる装置(工具先端位置測定システム:ジェイコア)を導入することで、加工条件の調査を、より効率的に行えるようにした。3番目に切削加工を行うときに使用する、固定テープの検討を行った。特に LiNbO₃ は、異方性を有するため、固定方法によっては、予期せぬ劈開方向へ逃げる動きをし、加工精度を妨げることになる。このことから、粘着力等を違がえた切削加工テープを用い、検討を行った。

次に切削加工で薄くなった検出部を補強するため、犠牲層材料で穴埋めし、実装後にその犠牲層を除去する方法の検討を行った。各種犠牲層材料を使用し、これらのプロセスを安価で高速に実現するため、手法を検討し、その検証を行った。

2-3 研究成果

2-3-1 テーマ①切削技術の確立

切削刃(砥石・ブレード)の砥粒の粒径や密度について最適化を行い、結果として高い形状安定性を実現した。また2番目の課題である、スライサーの切断モードの最適化については、ジェイコアで切削刃が取り付けられたスピンドル共振を起こさずに、安定な形状を維持し続ける加工条件を見出した。この研究により、切削の安定を図るためには、スピンドルの恒温化も重要であることが新しい知見として得られた。3番目の固定テープについては、粘着力を適正化させ、長期間切削加工検討(ライフテスト)を行っても、高精

度を維持できる固定テープの条件を見出した。これら、加工条件の最適化の結果、目標としたチップング量 $\pm 10 \mu\text{m}$ 、形状加工寸法 $\pm 20 \mu\text{m}$ および $10\text{sec}/1$ 素子の加工時間を達成することが出来た。

工具先端位置測定システム【ジェイコア】の外観を図-1に、高精度スライサーへの設置状態を図-2に示す。ジェイコアは原理的には光学的投影計測であり、a)LED証明で切削歯を照らし、b)CCDカメラで受像する。これをc)制御用PCで数値化するものである。なお、ジェイコアを高精度スライサーへ設置する際は、専用のマウンターに d)ジェイコアを取付け、マウンターを高精度スライサーに設置する形とした。



図-1 工具先端位置測定システム【ジェイコア】外観

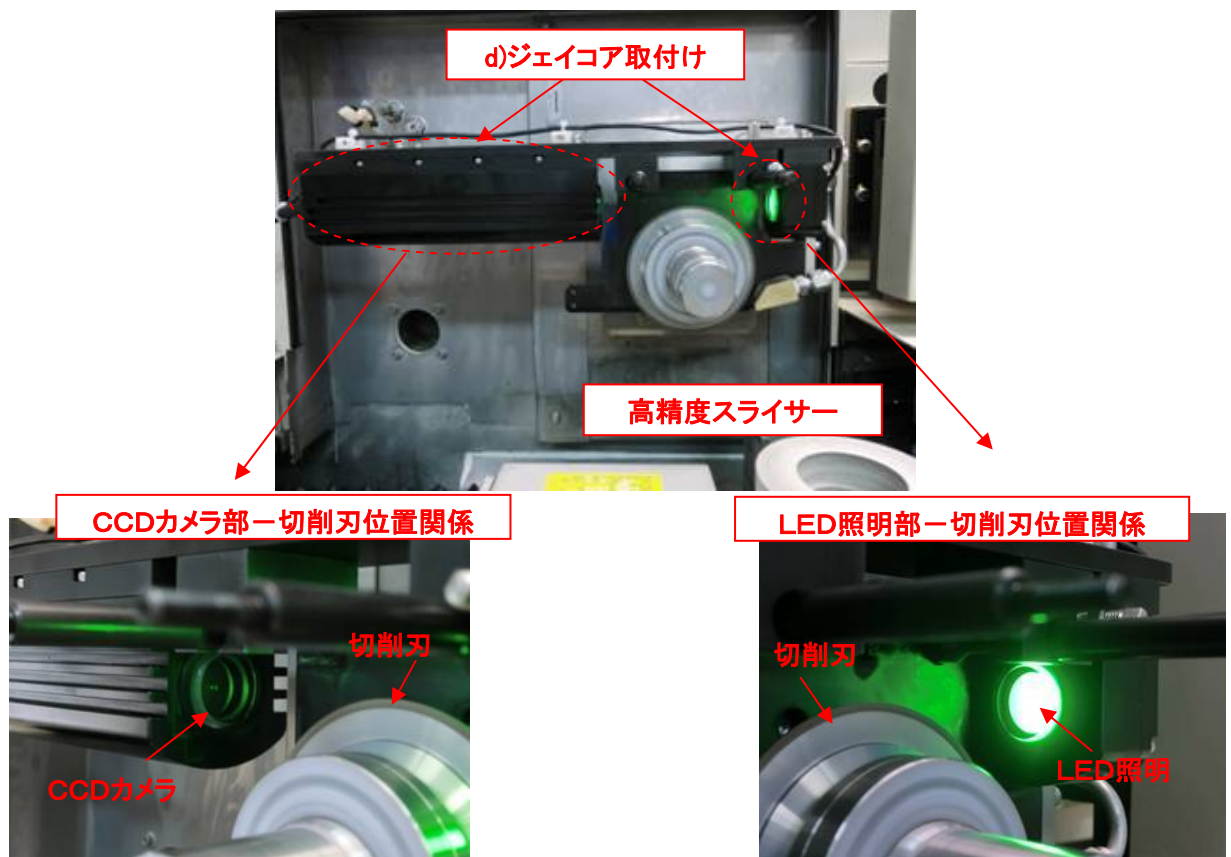


図-2 工具先端位置測定システム【ジェイコア】高精度スライサーへの設置状態

2-3-2 テーマ②犠牲層形成の量産プロセスの確立

製造プロセス中においてセンサー素子の検出部にかかる機械的ストレスを回避するため、切削加工で薄くなった梁の上(チップ裏面溝)へ犠牲層材料で穴埋めし、補強する方法の検討を行った。最適材料を探すため、ベンダーから情報を収集し、製膜の容易さや量産性について、各種犠牲層材料を使用し検討を行った。また、安価で高速に犠牲層形成するため、2軸ロボットを用いた犠牲層形成装置を開発した。この結果、目標とした【形成時間10秒/個】より早いプロセスを実現することが出来た。

<犠牲層形成装置>

犠牲層形成装置として準備した卓上型3軸ロボット装置の外観を図-3に示す。

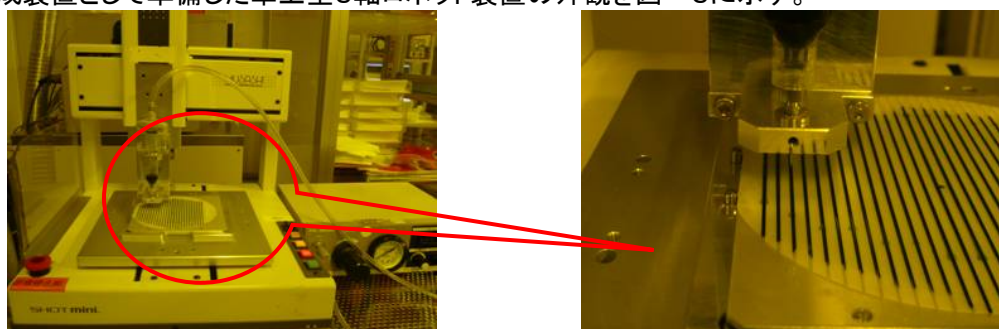


図-3 犠牲層形成装置(装置:武蔵エンジニアリング製卓上型3軸ロボット、品名:SHOTmini)

<犠牲層形成評価>

表-2に犠牲層形成評価結果を示す。条件①及び条件②は、樹脂の裏面付着及び個片切断後の素子ワレ不良の発生は無く、評価結果は合格であった。条件③は、樹脂が裏面に這い上がった状態となっており、評価結果は不合格であった。

表-2 犠牲層形成評価結果(①~③は塗布プログラムの違い)

	条件①	条件②	条件③
作業数	215	215	215
良品数	215	215	0
樹脂裏面付着(NG)数	0	0	215
個片切断後 素子ワレ不良発生数	0	0	0
評価結果	合格	合格	不合格

2-3-3 テーマ③犠牲層除去の量産プロセスの確立

センサー素子実装後に犠牲層を除去する方法について検討した。実際に犠牲層を形成したセンサーを使用し、剥離液にて犠牲層を高速に除去できるかどうか、剥離条件を検討し、その犠牲層残渣を調査した。これらテーマ②、テーマ③などの条件選定の結果、目標としたプロセス時間【除去時間20秒／個】を達成する最適な犠牲層プロセスを確立することができた。

▽犠牲層除去評価

表-3に犠牲層除去状態を示す。条件②～条件④の犠牲層除去部分を元素分析した結果、ニオブ酸リチウム部分のEDSスペクトラムと同等になっている事から、犠牲層材料の残渣は無いと判断した。条件①のサンプルでは犠牲層材料の残渣が確認された。

表-3 犠牲層除去評価結果(①～④は剥離時間を変えている)

	条件①	条件②	条件③	条件④
作業数	240	240	240	240
良品数	178	240	240	240
犠牲層残渣数	62	0	0	0
評価結果	不合格	合格	合格	合格

第3章 センサーシステムとパッケージング開発

3-1 研究目的および目標

水分や接着剤からの脱ガスなどがセンサー素子の櫛歯電極上へ吸着した場合、SAW の伝搬速度が変化し、不要な出力が発生することにより、センサーとして十分な性能を発揮できなくなる恐れがある。このため、封止前製品の水分除去および脱ガス、さらには密閉空間での雰囲気や露点など封止環境の最適条件を調査し、高品位で経年劣化のない封止パッケージング技術を確立することを目的とする。

また、小型で安価なセンサーシステムに統合するためには、SAW 素子からの信号処理方法を開発し、その処理回路を ASIC に集積化する必要がある。この目的のため、小型センサー素子・発振・検出回路の集積化と、それらを小型ワンパッケージ化するための試作を行い、目的の仕様に合致するかの確認することを目標とした。

3-2 研究内容

封止については、前述の通り湿気の影響と、どの程度の湿気除去の必要があるかを確認するため、封止前製品の水分除去および脱ガス、さらには密閉空間での雰囲気や露点など封止環境の最適条件に係る研究を行った。上記の封止雰囲気において、センサーの長期信頼性評価を実施し、周波数特性とインピーダンス特性の変化量を信頼性試験前後で確認した。また、安価で確実に気密封止できるようにするために、封止方法の検討を行った。研究の実施中に欧州の金融危機が発生し、貴金属の価格が高騰した。このため、当初検討していた Au を大量に使用する Au-Sn 封止(ダイレクトシーム溶接)などの工法はコストメリットがなくなったと判断せざるを得なくなり、やむなく Au を使わない封止方法の検討を行った。

信号処理回路の開発では、1軸方向の加速度感度を得るためには少なくとも2個の発振回路が必要であることから、まず、発振回路の集積化の実現可能性を調査した。予備実験としてインバータアレイ IC を使って複数の素子を同時に自励発振させたところ、望ましくないことに発振回路同士の相互干渉が認められた。加速度感度を得るためにはこの影響は取り除かなくてはならない。そこで、素子や回路でのアイソレーションについても種々検討を行った。それと同時に演算回路も複数軸に対応させるように拡張し、FPGA などにより演算動作の確認を行った。また、検出感度を向上させるため、ウェハを厚くし錘の慣性を大きくすることで、センサー感度の向上を図った。これは、①で言及した加工精度に影響を与える対策ではあったが、目標とする加工精度の見込みは得られていたため、その後はこの構造で検討を進めていくこととした。また、新たにわかった左右検出感度の誤差について、その原因追求を行った。発振条件を SAW 素子毎に調整し、アイソレーションを図るため、1次試作の ASIC は抵抗・コンデンサなどの受動素子を外付けし、定数を調整可能な設計とした。これに対し、センサーシステムを小型化するためには、発振条件を固定化し、外付け部品を ASIC へ内蔵化する必要がある。また、温度特性の補正についても内蔵化し、これらの組み込みにより、安定度の高いセンサーを実現することを目指し開発を推進した。

また、パッケージサイズに関しては、センサー小型化に向けて、発振回路の周辺部品の内蔵化、及び、ALU 構成によるロジック回路の統合による ASIC 集積度の向上、及び素子小型化について活動した。

3-3 研究成果

3-3-1 テーマ④気密封止パッケージング技術の確立

パッケージ内雰囲気において、センサーの長期信頼性評価を実施し、周波数特性とインピーダンス特性の信頼性試験前後の変化量を確認した結果を表-4に示す。大気暴露の状態でも、大きな変動は無く、短期的には暴露の状態でも問題は無いことが明らかになった。しかし、常湿状態で熱衝撃等の熱ストレスを加えるような評価を行うと、特性変動する現象も観測され、大気暴露している状態では、その性能が保てないことも分かった。結論としては、封止雰囲気ガスは、使用温度範囲内の最低温度より低い露点温度（-40℃以下）のドライエアが必要である。

また中長期的に安定した封止条件を確実に実現できるようにするために、封止方法の検討を行った。シーム溶接方法ベンチマーク結果を表-5に示す。シームリングを使用する従来の抵抗溶接による封止方法や、シームリングを廃したダイレクトシームによる封止方法、あるいはレーザーなどで封止する方法など、加速度センサーを高品位に保ちつつ安価に封止できる封止方法の検証を行った。研究期間中の欧州金融危機の影響などで、貴金属が高騰し、当初検討していた Au-Sn 封止（ダイレクトシーム溶接）はコストメリットがなくなり、代替となる封止方法の検討を行った。結果、新たに選定した Ni クラッドリッドを使用した封止方法において、良好な周波数特性とインピーダンス特性、および気密性を確認することができ、より安価で高品位な封止方法である確認がとれた。

表-4 封止ガス選定結果まとめ

雰囲気ガス	設備へのガス導入方法	ランニングコスト	初期特性	長期信頼性	総合評価
大気 (空気)	自然導入	◎	◎	△	△
ドライエア (空気)	工場内既設置	◎	◎	◎	◎

表-5 シーム溶接方法ベンチマーク結果

方法	LID構造	PKG構造	溶接構造
ダイレクトシーム			
シーム溶接 +Niメッキリッド			
シーム溶接 +Niクラッドリッド			

シーム溶接作業に使用した溶接機の外観を図-4に示す。

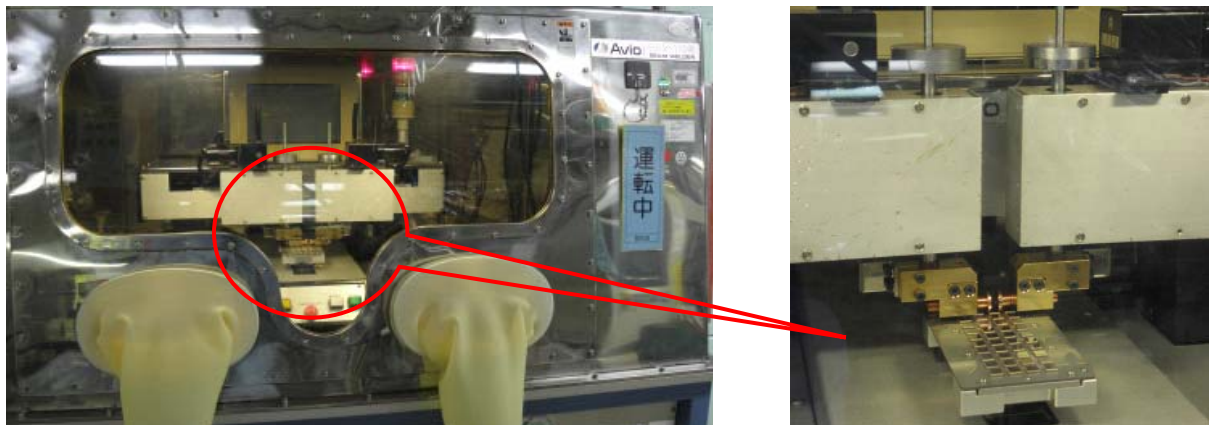


図-4 マニュアルシーム溶接機 日本アビオニクス製 NAW-1105 (多摩川精機所有)

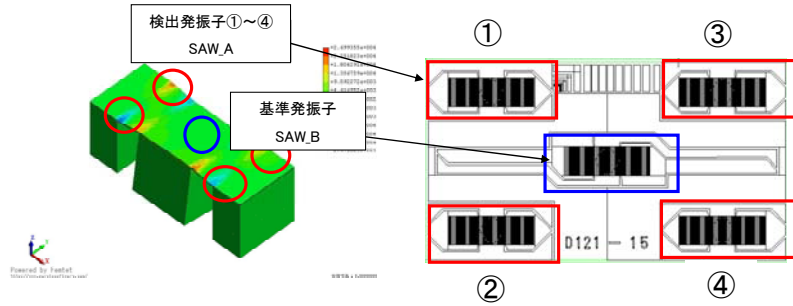
3-3-2 テーマ⑤ 回路設計の検討

3-3-2-1 センサー素子の設計

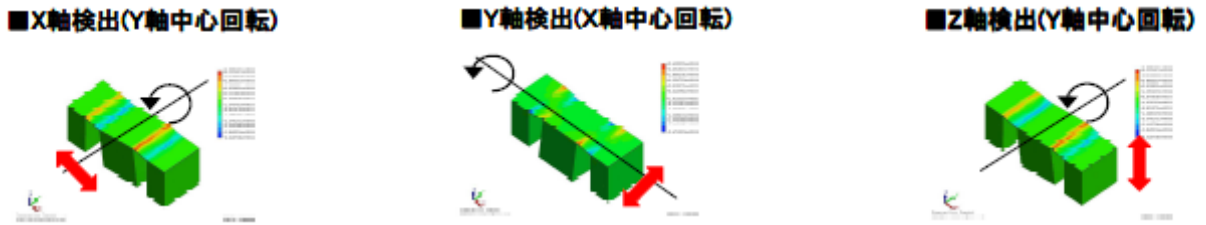
予備実験により明らかになった発振回路同士の相互干渉の影響を取り除くため、素子でのアイソレーション方法について検討を行い、成果として相互干渉を最小化する技術を確認した。これらの改善により、1軸方向の実用的な加速度感度を得る事ができた。さらに三次元方向に適用できるよう、センサー素子上に複数の SAW 発振子を最適に配置する方法を考案し、特許として出願した。この技術により SAW 方式加速度センサーとしては世界で初めて1素子での複数軸の加速度検出を達成した。

電極の配置図を図-5に、特許出願した SAW3軸加速度センサー原理図と加速度検出の姿態を図-6に

それぞれ示す。センサー素子を搭載した発振回路を回転させることで±1Gの重力加速度を測定した。測定は基準発振子 SAW_B と検出發振子 SAW_A の周波数の差分演算を行なう。

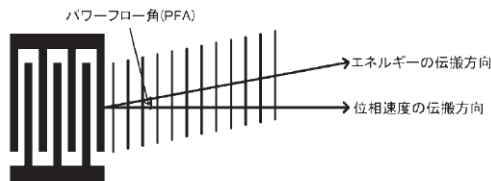


図—5 電極配置図



図—6 特許出願した SAW3軸加速度センサー原理図と加速度検出の姿態

新たに見つかった現象として、左右傾斜時の出力の大きさが非対称になる、いわゆる感度誤差が大きく発生することが明らかになったが、この原因はエネルギー伝播の斜行、パワーフロー角(PFA)に起因している可能性が見出された。PFA とは図—7に示すように、弾性表面波の位相速度とエネルギーの伝搬方向の違いを表す角度である。



図—7 パワーフロー角概念図

従来使用していた41° Y カットの PFA は-7° で斜行しており、理想0° からずれている。このため、PFA が0° となる64° Y カットを使用すれば、SAW のPFAが改善し、感度誤差が抑えられるとの仮説を立てた。その結果、図—8の通り、非対称性は無くなり、感度誤差を大きく改善する事ができた。また、当初は非線形性の補正の必要を考えていたが、この改善により直線性が得られたため、非線形性に関わる補正の検討は不要となった。

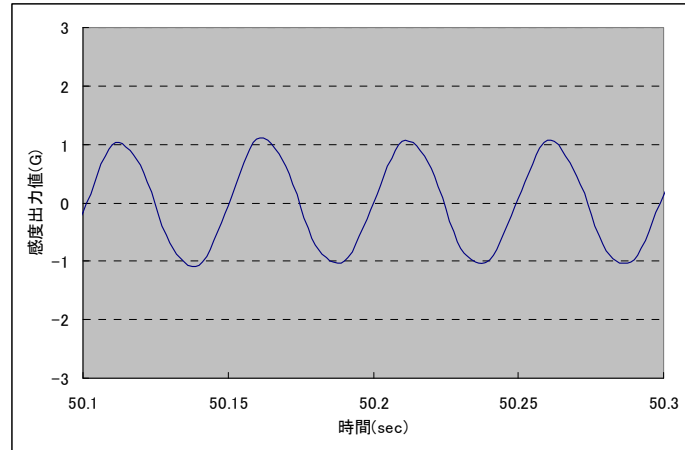


図-8 64° Yカット感度特性(加振評価)

3-3-2-2 集積回路・演算回路の設計

前記したように発振条件を SAW 素子毎に調整し、アイソレーションを図らなければならないため、発振回路の定数は、実測による条件調査する必要があり、1次試作の ASIC では抵抗・コンデンサなどの受動素子を外付けし、定数を調整可能とする設計とした。センサーシステムを小型化するためには、発振条件を固定化し、図-9に示すように、外付け部品を ASIC へ内蔵化するとともに、温度補正処理についても内蔵化し、安定度の高いセンサーを実現することを目指した。前者の外付け部品の内蔵については、素子側のパターンニングで周波数を離調するなどのアイソレーションの強化を図り、相互干渉を減らす対策を行った。同時に前記の SAW 斜行の対策と組み合わせ、これが直線性や非対称性の改善にも繋がり、目標(直線性1%FS)を達成することができ、感度誤差についても $\pm 3.5\%$ と目標仕様を達成する事が出来た。これらの改善検討により、受動素子の内蔵化の見込みが立った。一方、温度補正演算については、初期中点温度特性の改善と ASIC 内の温度補正演算回路の最適化(コストとの両立)の検討を行ってきた。これらをASICへ反映し、2次試作を行った。この結果、現状 $\pm 250\text{mG}$ と目標の $\pm 90\text{mG}$ には及ばず、今後の課題として残った。

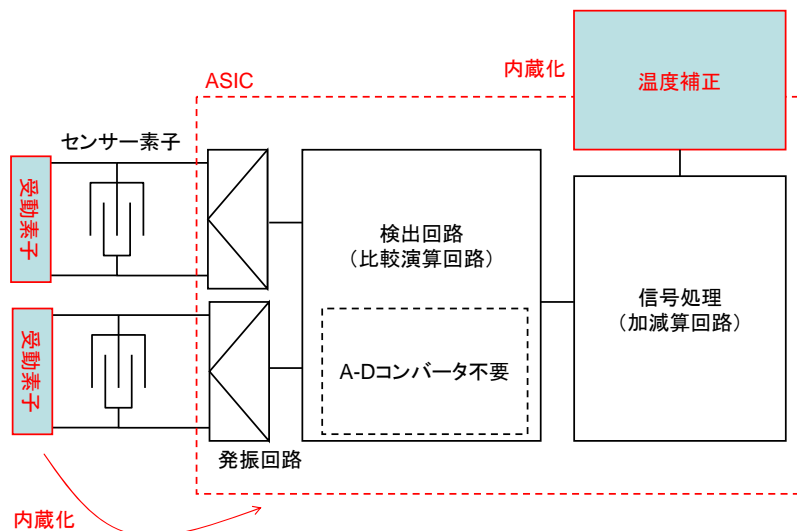


図-9 センサー回路ブロック概略図

3-3-2-3 パッケージング

パッケージサイズに関しては、センサー小型化に向けて、発振回路の周辺部品の内蔵化、及び、ALU(Arithmetic Logic Unit)構成によるASIC集積度の向上、及び素子の小型化を行い、結果として平成24年度のセンサー試作品は前年度試作品に対して、体積比で1/10(7.8mm×7.8mm×3.1mm)の小型化を実現した。しかし目標の7×5×3mmには、わずかに届かなかった。これは機能検証のためにASICに予備端子を設ける必要があったためであり、量産時には不要端子を取り除くことで問題なく小型化が可能である。

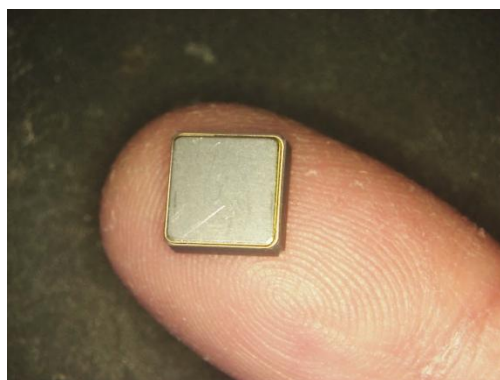


図-10 ASIC内蔵ワンパッケージ試作品
(7.8mm×7.8mm×3.1mm)

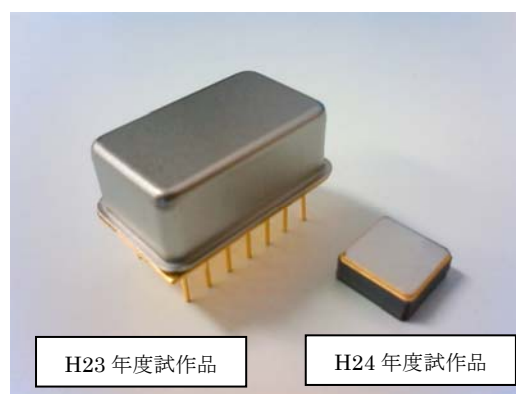


図-11 前年度試作品との外観比較
(12.5mm×20.3mm×8mm)

3-4 試作結果のまとめ

SAW発振子が影響を及ぼしあう「カップリング」現象の対策として、電源ラインの分離や駆動電流の抑制により、FPGAボードでの確認試作により改善効果が得られた。この改善を反映させた構成で集積化ASICを試作し、ワンパッケージ化し評価を行った。1次試作では感度誤差が目標仕様に達していないが、その原因は加速度印加時の動的な安定性にあることを見出した。これらの課題を解消するために、SAW素子の電極パターン設計を見直し、周波数特性最適化を行い、高S/N化を図った。また、感度誤差の元となっていた非線形性に関して、結晶の方位に由来するものである事を突き止めた。また、発振に関わる受動素子を内蔵し、外付け部品不要で、安定的な自励発振ができる回路構成を実現した。同時に、温度補償に関わる補正計算のアルゴリズムの開発を行い、これもASICに内蔵した。さらに、センサー素子の小型化のため、加工技術の研鑽、およびパッケージング方法などの研究開発の結果を統合し、小型パッケージにセンサー素子とASICを収めたセンサーを実現した。そのセンサーを実際に動作させ、電氣的性能の評価と設計の妥当性を確認した。その結果、要求をほぼ満足する特性を得ることができた。ただ、サイズと一部の特性については目標に若干及ばなかった。今後は、さらにセンサー素子の小型化を進めていくとともに、電氣的特性の更なる向上を目指して継続検討していく。

第4章 全体総括

LiNbO₃ を利用した小型加速度センサーを開発するため参画機関が連携して研究開発を進め、特性の改善と小型化を行ったセンサー素子、および機能集積を高めた信号処理回路の開発を行い、小型パッケージにそれらを内蔵した試作品を実現した。これにより本開発で提案する SAW 方式加速度センサーが既存の MEMS 方式に比べて車載用途で求められる小型化において優位性を持つことを実証した。また、難削材料である LiNbO₃ の加工技術の高度化を達成し、更に信頼性のあるパッケージング技術を開発したことにより、本加速度センサーの量産技術を確立した。

実際の試作センサーの電氣的性能を確認した結果、要求性能をほぼ満足するセンサー特性を得ることが出来た。サイズと一部の特性(温度特性)は目標に若干及ばなかったが、今後はセンサーの小型化と電氣的特性の更なる向上を目指して検討を継続していく。なお、これまで得られた知見を元に、さらに商品力を強化し、数年後を目途に製品化を目指していく予定である。このような安全・安心を提供する商品作りを進めることで、社会に貢献していきたいと考えている。

以上