

平成２７年度革新的ものづくり産業創出連携促進事業

（戦略的基盤技術高度化支援事業）

「超音波を用いた自動車用マフラー等気密容器漏れ検査装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成２８年　３月

委託者　四国経済産業局

委託先　一般財団法人 四国産業・技術振興センター

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-1-1 研究の目的	1
1-1-2 研究の概要	1
1-1-3 実施内容	2
① 超音波による気泡検出のためのアルゴリズム確立	2
② 気密容器漏れ検出装置の実用機製作	4
③ 実証試験	4
④ プロジェクトの管理・運営	4
1-2 研究体制	5
1-2-1 研究組織及び管理体制	5
1-2-2 研究員及び管理員	6
1-2-3 経理担当者及び業務管理者	7
1-2-4 研究開発推進体制	8
1-3 成果概要	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口	9
第2章 本論	10
2-1 超音波による気泡検出のためのアルゴリズム確立	10
2-1-1 アルゴリズム開発（データ処理の高速化）	10
2-1-2 気泡半径と気泡上昇速度の関係式	12
2-1-3 ノイズ対策	16
2-1-4 総合判断のためのアルゴリズムの開発	17
2-2 気密容器漏れ検出装置の実用機製作	21
2-2-1 専用センサーの製作	21
2-2-2 装置表面の脱泡	21
2-2-3 超音波の水槽内乱反射対策	21
2-3 実証試験	23
最終章 全体総括	27

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

1-1-1 研究の目的

自動車業界においてはマフラー・燃料タンクなどの溶接加工品で、気密性を要する部品については、溶接欠陥に基づく漏れ等の確認検査が行われている。特にマフラーの気密検査は国内外問わず全メーカーの全工場で、水没式による全数の目視検査が行われており、自動溶接により数カ所溶接された後、両端を封鎖して空気により内圧をかけ検査液中に水浸し、直ちに目視で気泡の有無を判定する。1工場当たり20~30ラインの検査ラインがあり、1ライン当たり1日約1,000個の製品検査を行っている。全品目視による検査のため、検査の信頼性が十分でない（バラツキが生じる）などの課題を抱えている。

そこで、超音波を用いた自動車用マフラー等気密容器漏れ検査装置を研究開発し、現在の目視検査を、定量的な判断が可能なシステムに置き換え、世界をリードする日本の自動車産業の更なる国際競争力強化に繋げる。(図1)

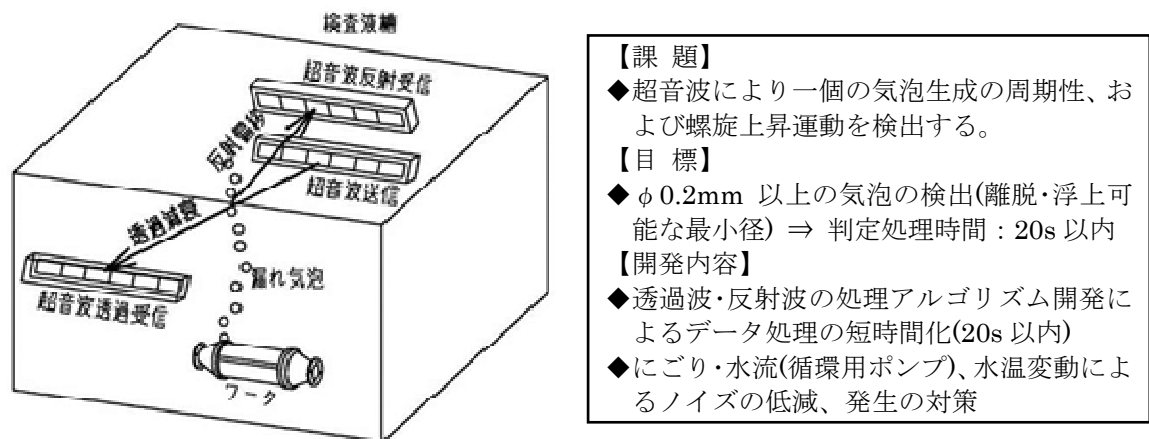


図1 研究開発する新技術

1-1-2 研究の概要

自動車業界では、マフラー・燃料タンクなどの気密性を要する部品については、欠陥に基づく漏れの確認検査が必須である。例えばマフラーは全品目視による検査を実施し、漏れの有無を確認しているが検査にバラツキが生じるなどの課題がある。そこで、漏れた0.2mm以上の気泡の周期性と上昇運動を検出原理とした超音波を用いた自動検査装置を開発し、自動車部品だけでなくガスボンベ等気密性が求められる製品全般への応用を目指す。

1-1-3 実施内容

高度化目標は「溶接部診断技術・検査技術の向上」として、超音波を用いた新しい気密容器漏れ検出装置を開発する。気泡の大きさとして0.2mm以上の気泡検出が可能な検査装置を開発し、検査工程やラインレイアウトをほとんど変えることなく導入できる装置とするため、技術的目標値は次のとおりとする。

○反射波での検出サイズ： $\phi 0.2\text{mm}$ ～ 約3mm

設定理由：欠陥から生じた気泡が離脱・上昇するための最小径は、0.2mmであり、この値を検出目標とする。これまでの実験の結果、検出可能な値である。

○透過波での検出サイズ：約 $\phi 3\text{mm}$ 以上

設定理由： $\phi 3\text{mm}$ 以上の気泡は、透過波での減衰により気泡の検出を可能とする。

○判定（処理）時間：20秒以内

設定理由：目視で行われている検査時間と同等またはそれよりも短いことを目標とする。

具体的には、次の研究課題を設定して研究開発を行う。

① 超音波による気泡検出のためのアルゴリズム確立

平成26年度は、新たに考案した検出方法を含めたアルゴリズムを開発し、基礎的な実証試験および高機能化を図った。

平成27年度は、これまで開発したアルゴリズムの実証試験を行い、その結果に基づき高機能化を検討する。

①-1 アルゴリズム開発（データ処理の高速化）

①-1-1 透過波の場合（株式会社パル技研、産業技術総合研究所）

1 センサーあたりの処理時間2.5秒を、0.2秒に削減するため、透過波のみを抽出するために同期検波方式を用いた。具体的には、送信信号と透過受信信号から得られる信号強度の低下から、気泡を検出するアルゴリズムを開発し、この変動値とその周期性を検出するアルゴリズムを平成26年度に開発した。図2に透過受信信号のイメージ図を、図3に透過波処理フロー図を示す。

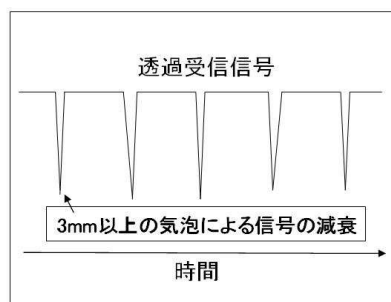


図2 透過受信信号のイメージ図

【透過波の処理アルゴリズムの開発】

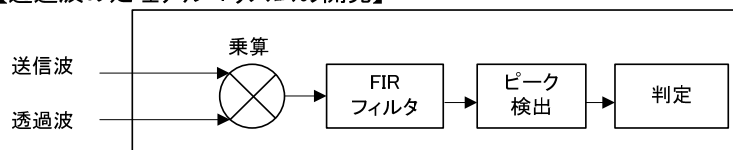


図3 透過波処理フロー図

① - 1 - 2 反射波の場合（株式会社パル技研、産業技術総合研究所）

反射波受信信号を同期検波し、1 センサーあたりの処理時間 2.5 秒を、0.2 秒に削減する。小さな気泡を検出するために、気泡が無く、水槽内も安定した状態での観測結果を基本波形として記憶し、検査時の波形との差分を算出する。平成 26 年度に、これらをハードウェア言語として FPGA に実装し、高速化を図り、その結果の連続性判定をソフトウェアで判断した。図 4 に反射信号の周波数分析結果（イメージ図）を、図 5 に反射波透過波処理フロー図を示す。

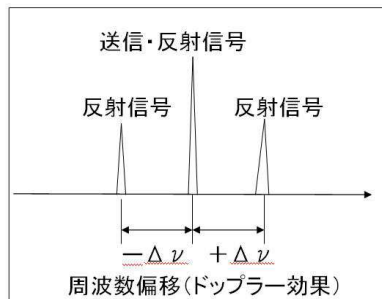


図 4 反射信号の周波数分析結果（イメージ図）

【反射波の処理アルゴリズムの開発】

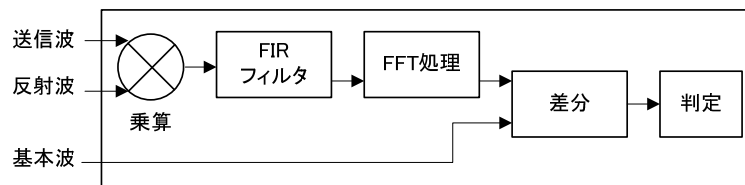


図 5 反射波透過波処理フロー図

① - 2 ノイズ対策

① - 2 - 1 にごり、水流（中道鉄工株式会社、株式会社パル技研、産業技術総合研究所）

受信信号とノイズの比を、1/1000 ($=-60\text{dB}$) 以下に削減するため、ポンプ配線等と送受信センサーケーブルの電圧差に対する電氣的対策を行うなど、ノイズを低減した。

① - 2 - 2 水温変動（中道鉄工株式会社、株式会社パル技研、産業技術総合研究所）

水温変動による信号変動を、1/10 ($=-20\text{dB}$) 程度に削減するため超音波センサーと超音波発振部及び受信信号増幅部の熱変動への対応について検討した。液温や室温（送受信回路基板雰囲気温度）の変化に伴う、センサー及びアナログ回路の特性変化（温度ドリフト）を調べ、温度ドリフトを押さえると共に、基板の排熱冷却などを考慮した設計開発を行い、さらに特性の変化を自動補正するアルゴリズムの開発を行った。

① - 3 総合判断のためのアルゴリズムの開発

（中道鉄工株式会社、株式会社パル技研、産業技術総合研究所）

現在の目視検査に置き換わる定量的な判断を可能とするため、波形解析部及び判定処理部を平成 26 年度に開発した。なお、透過波では連続した大量の漏れを検出し、反射波では微少な漏れを検出するアルゴリズムの開発を行った。

② 気密容器漏れ検出装置の実用機製作

下記 3 項目については平成 25 年度より研究してきた成果を基に 26 年度に実用機を開発し、平成 27 年度は、開発した実用機を用いた実証試験を実施した。

② - 1 専用センサーの製作（中道鉄工株式会社、株式会社パル技研、産業技術総合研究所）

② - 2 装置表面の脱泡（中道鉄工株式会社、産業技術総合研究所）

② - 3 超音波の水槽内乱反射対策

（中道鉄工株式会社、株式会社パル技研、産業技術総合研究所）

③ 実証試験（中道鉄工株式会社、株式会社パル技研、産業技術総合研究所）

平成 27 年度は、開発した実用機を検査現場に設置して実証試験を行ない、必要に応じて改良・改善も検討する。また、実証試験のなかで、特定客先カスタマイズおよび客先インタフェースの作成などを行い、現場に則したソフトウェアの修正を行った。

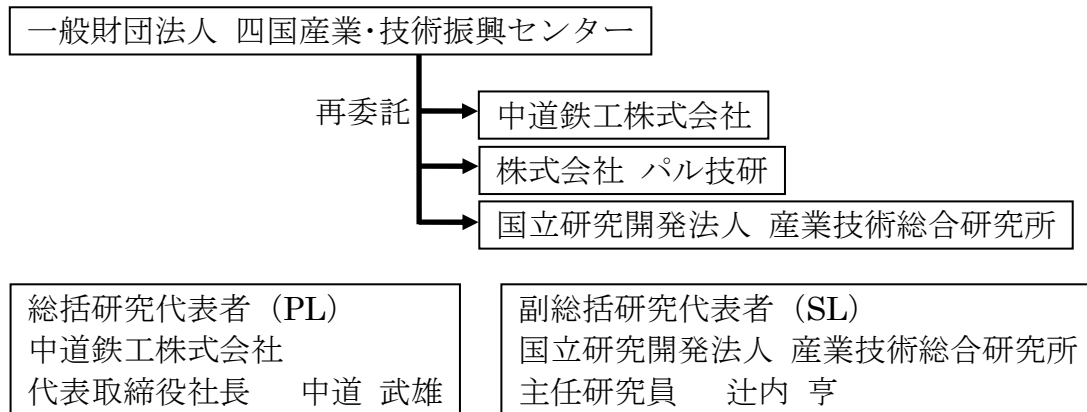
④ プロジェクトの管理・運営（四国産業・技術振興センター）

本プロジェクトの効率的かつ円滑な推進を図るため、研究計画全体の企画、進捗管理、研究推進会議の開催、研究成果のとりまとめを行う等研究開発を統括する。

1－2 研究体制

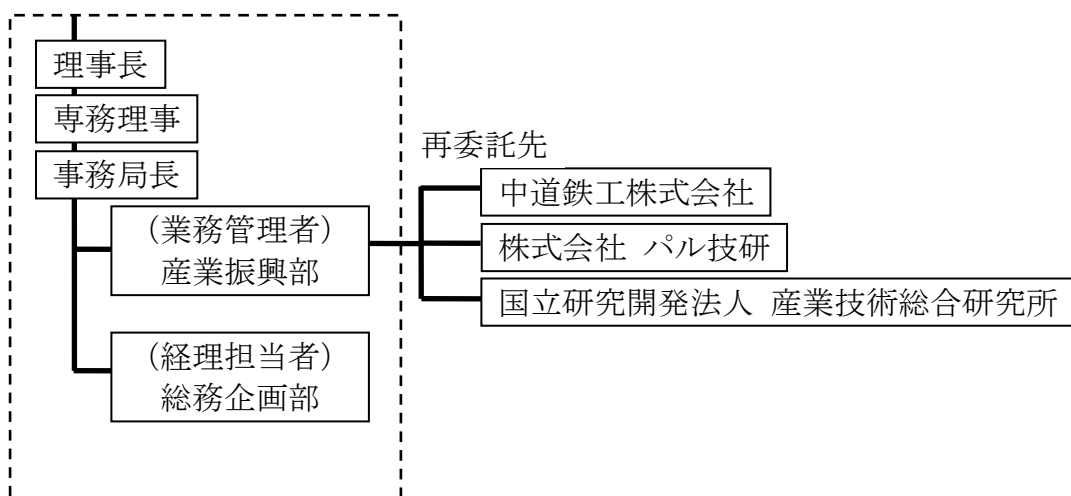
1－2－1 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）



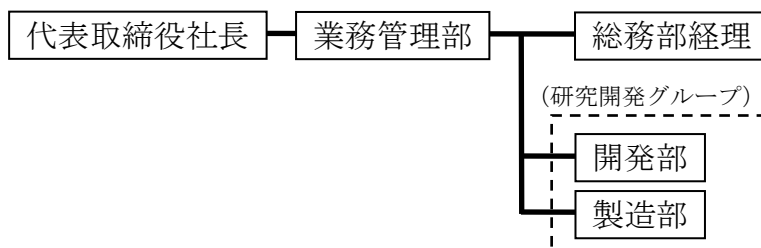
2) 管理体制

① 事業管理者〔一般財団法人 四国産業・技術振興センター〕

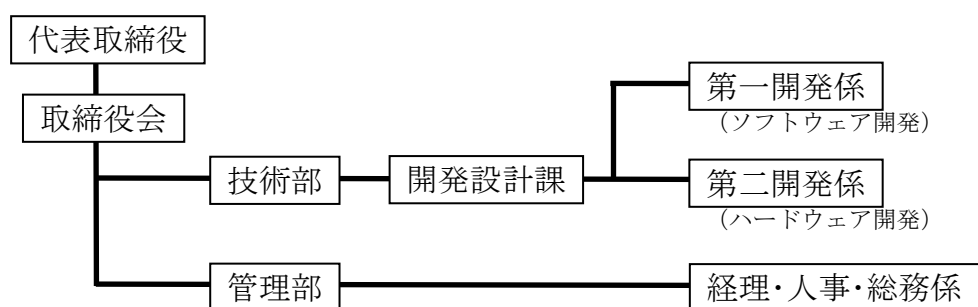


② 再委託先

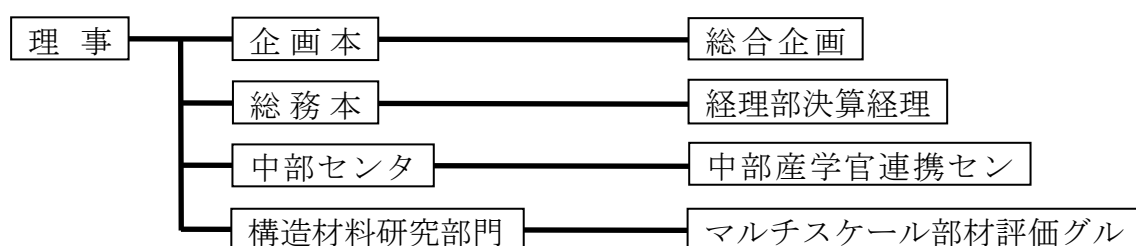
- ・ 中道鉄工株式会社



・株式会社 パル技研



・国立研究開発法人 産業技術総合研究所



1-2-2 管理員及び研究員

【事業管理者】 一般財団法人 四国産業・技術振興センター

・管理員

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
兵頭 正洋	産業振興部長	④
工藤 陽一	産業振興部 部長	④
田中 道恵	産業振興部 部長	④
渡辺 泰弘	産業振興部 課長	④
平井 昌代	産業振興部	④
瀬戸 昌子	総務企画部	④

【再委託先（研究員）】

・中道鉄工株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
中道 武雄	代表取締役社長	③（①、②の対応含む）
竹中 健二	開発部 開発一課 主任	③（①、②の対応含む）
高橋 香士	開発部 開発三課	③（①、②の対応含む）
濱口 貴史	開発部 開発三課	③（①、②の対応含む）
中岡 信司	開発部 開発一課	③（①、②の対応含む）

・株式会社 パル技研

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
山田 浩	取締役 営業・技術担当兼務役員	③（①、②の対応含む）
岡田 英二	技術部 部長	③（①、②の対応含む）
佐藤 義幸	技術部 開発設計課 第一開発係 係長	③（①、②の対応含む）
塩田 英司	技術部 開発設計課 第一開発係 主任技師	③（①、②の対応含む）
佐野 拓治	技術部 開発設計課 第二開発係 係長	③（①、②の対応含む）
和泉 琢哉	技術部 開発設計課 第二開発係	③（①、②の対応含む）

・国立研究開発法人 産業技術総合研究所

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
兼松 渉	構造材料研究部門 総括研究主幹	③（①、②の対応含む）
辻内 亨	構造材料研究部門 マルチスケール部材評価グループ 主任研究員	③（①、②の対応含む）

1－2－3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理者】

一般財団法人 四国産業・技術振興センター

（経理担当者） 総務企画部長

松岡 義史

（業務管理者） 産業振興部長

兵頭 正洋

【再委託先】

・中道鉄工株式会社

（経理担当者） 総務部

岡田 智子

（業務管理者） 代表取締役社長

中道 武雄

・株式会社 パル技研

（経理担当者） 管理部 経理・人事・総務係

藪内 真由美

（業務管理者） 技術部 部長

岡田 英二

・国立研究開発法人 産業技術総合研究所

（経理担当者） 総務本部 経理部 決算経理室 室長

山口 洋二

（業務管理者） 構造材料研究部門 総括研究主幹

兼松 渉

1－2－4 研究開発推進体制

【研究推進会議】

本研究開発を推進するために重要な事項を審議、決定等を行う。

役割	氏名	所属・役職	備考
委員長	中道 武雄	中道鉄工株式会社 代表取締役社長	PL
副委員長	辻内 亨	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 構造材料研究部門 マルチスケール部材評価 グループ 主任研究員	SL
委員	竹中 健二	中道鉄工株式会社 開発部 開発一課 主任	
委員	山田 浩	株式会社 パル技研 取締役 営業・技術担当 兼務役員	
委員	岡田 英二	株式会社 パル技研 技術部 部長	
委員	佐野 拓治	株式会社 パル技研 技術部 開発設計課 第二開発係 係長	
委員	兼松 渉	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 構造材料研究部門 総括研究主幹	

【アドバイザー】

上記研究推進会議へ出席するとともに、研究開発の実効性向上、成果の市場適合性向上等に対する助言を適宜行う。

機関名・氏名	所在地・代表者	主な指導・協力事項
株式会社 ユタカ技研 生産本部 技術開発室 ・小林 祐二 ・青木 敏英	静岡県浜松市東区豊町 508 番地 1 代表取締役社長 岡本 稔	製品情報、作業方法と 試作機の評価など
日本電波工業株式会社 技術統括本部 ・野原 明浩	埼玉県狭山市上広瀬 1275 - 2 代表取締役社長 竹内 寛	超音波センサー製作 と特性評価支援など
国立大学法人 香川大学 名誉教授 ・服部 哲郎	香川県高松市林町 2217 - 20 学長 長尾 省吾	FPGA(特種集積回路) 関連技術支援など

1－3 成果概要

超音波を用いた新しい気密容器漏れ検出装置は、気泡の大きさ 0.2mm 以上が検出可能で、検査工程やラインレイアウトをほとんど変えることなく導入できる装置とするため、技術的目標値は次のとおりとした。

○反射波での検出サイズ：φ0.2mm ～ 約 3mm

設定理由：欠陥から生じた気泡が離脱・上昇するための最小径は、0.2mm であり、この値を検出目標とする。

これまでの実験の結果、検出可能な値である。

○透過波での検出サイズ：約 φ3mm 以上

設定理由：φ3mm 以上の気泡は、透過波での減衰により気泡の検出を可能とする。

○判定（処理）時間：20 秒以内

設定理由：目視で行われている検査時間と同等またはそれよりも短いことを目標とする。

① 超音波による気泡検出のためのアルゴリズム確立

各課題を継続して研究するとともに、データ処理を高速化して、透過波、反射波を同時にそれぞれ 5 チャンネル計測するために、信号処理基板の試作、アルゴリズムを開発した。また、気泡上昇速度と周波数偏移量の理論式を作成し、気泡検出範囲の考察に利用した。気泡径と周波数偏移量の理論式を作成し気泡径（漏れ量）の予測が可能となった。

さらに、気泡検出範囲を 400mm 以上とするために、新方式を考案した。

② 気密容器漏れ検出装置の実用機製作

各テーマを継続して研究するとともに、最適配置等による低コスト化を実現した専用センサーを開発、装置表面の脱泡と超音波の水槽内乱反射対策を施した装置を開発、実証試験を行うために実用機に施工した。また、①のアルゴリズム確立の結果を反映した新方式のセンサー、信号処理基板に関してリークテスター本体装置の一部改造を実施した。

③ 実証試験

特定客先のマフラーに特化して種々の追加・改良要望に迅速に対応・処置ができるようにするため、検査現場ではなく中道鉄工㈱において下記の装置改良や各研究機関において担当箇所の対応処理を実施した。

- ・超音波による気泡検出のためのアルゴリズム関連
- ・気密容器漏れ検出装置の実用機改善・改良
 - ・電源ノイズ対策
 - ・信号処理制御箱内の温度管理(信号処理制御箱内の部品の損傷の防止)
 - ・超音波センサーの損傷の防止
 - ・装置表面の脱泡
 - ・超音波の水槽内乱反射対策 等

1－4 当該研究開発の連絡窓口

一般財団法人 四国産業・技術振興センター 産業振興部 兵頭、田中
Tel 087-851-7081、Fax 087-851-7027、E-mail：step@tri-step.or.jp

第2章 本論

2-1 超音波による気泡検出のためのアルゴリズム確立

2-1-1 アルゴリズムの開発(データ処理の高速化)

信号処理基板(実用機)とFA パソコンを用いて、超音波センサーを同時に多チャンネル計測する実用機を作成した。その外観図を図6に、実用機の基板写真を図7に示す。



図6 信号処理制御箱外観図

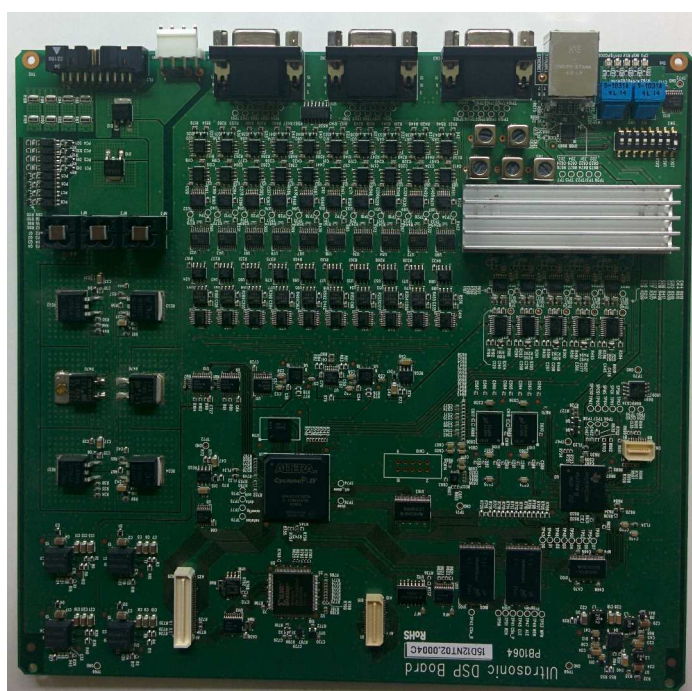


図7 信号処理基板外観(実用機)

気泡信号処理箱の内部のブロック図を図8に示す。

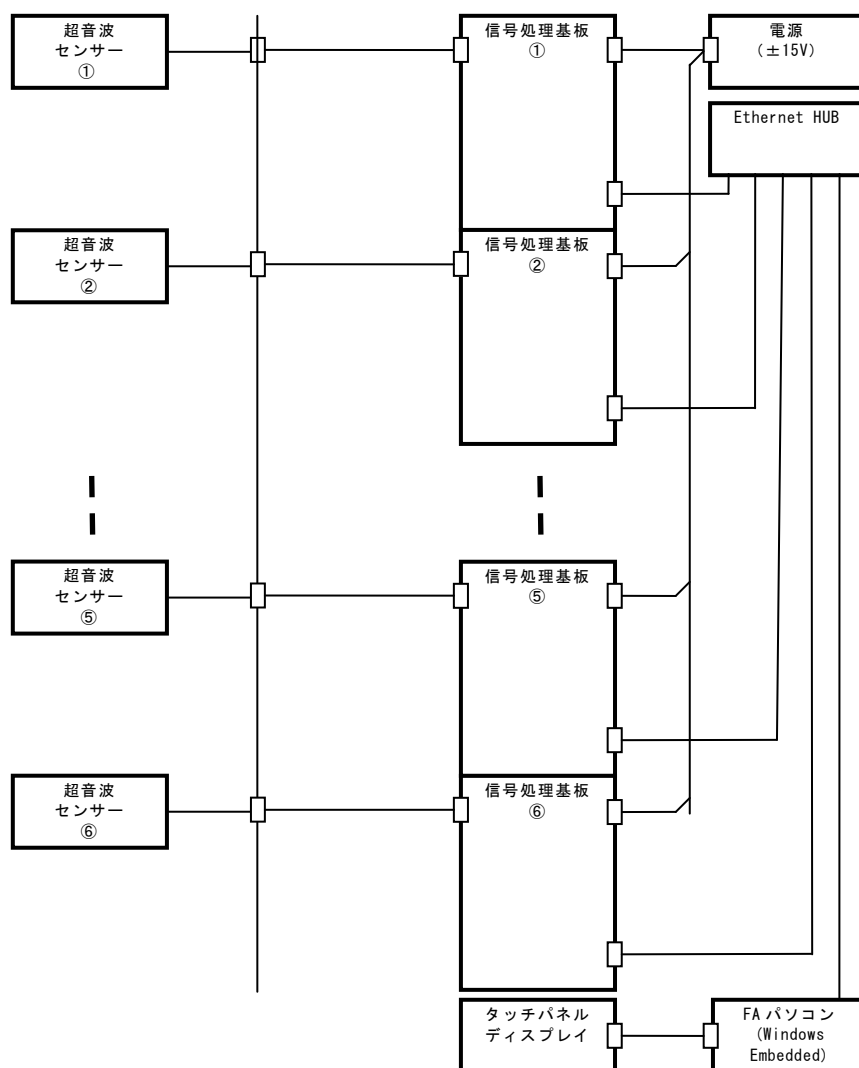


図8 気泡信号処理箱の内部のブロック図

2-1-2 気泡半径と気泡上昇速度の関係式

気泡径と周波数偏移量の理論的考察として、水中の気泡の上昇速度の理論式ならびに気泡からの反射波の周波数偏移について以下の検討を行った。

清浄な液体中の気泡の運動方程式は、次式

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_l \right) U \right] dt = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_l g - C_D \cdot \frac{1}{2} \rho_l U^2 \cdot \pi R^2 \quad (1)$$

で与えられる(文献1)。ここで R :気泡半径、 ρ_l :水の密度、 g :重力加速度、 C_D :抵抗係数、 U :気泡の上昇速度、である。この式を変形すると、気泡の加速度は、次式

$$\frac{dU}{dt} = 2g - \frac{3}{4} \frac{U^2}{R} C_D \quad (2)$$

抵抗係数 C_D は、気泡表面における吸着物の有無により異なり、次の諸式で表される。

(a) 清浄な液体中の場合(文献2)

$$C_D = \frac{24}{Re} \left\{ \frac{2}{3} + \left[\frac{12}{Re} + 0.75 \left(1 + \frac{3.315}{\sqrt{Re}} \right) \right]^{-1} \right\} \quad (3)$$

($Re \leq 100$)

ここで Re はレイノルズ数であり、液体の動粘性係数 ν と気泡半径 R 、上昇速度 U との間に次の関係がある。

$$Re = \frac{2UR}{\nu} \quad (4)$$

(4)式を代入した C_D の式を(2)式に代入することで、気泡半径と気泡上昇速度の関係式を得る。

気泡半径と気泡上昇速度の関係式の例として、(2)式は

$$\frac{dU}{dt} = 2g - \frac{9\nu}{R^2} \left\{ \frac{2}{3} U + U^2 \left[\frac{6\nu}{R} + 0.75 \left(U + \frac{3.315}{\sqrt{\nu U / 2R}} \right) \right]^{-1} \right\} \quad (5)$$

と表される。

次に、ある気泡半径における気泡の位置と上昇速度を、初期位置を 0 m、初期速度を 0 m/s として、微分方程式の数値解として求める(文献3、4)。ここで簡単のためにオイラー法により解を求めた。これは時刻 t における系の状態 $\{x_1(t), x_2(t)\}$ (ここでは位置と速度) から時刻 $t+\Delta t$ における系の状態 $\{x_1(t+\Delta t), x_2(t+\Delta t)\}$ を求めることを繰り返して任意の時刻の系の状態を知る方法である。

$$\begin{cases} x_1(t+\Delta t) = x_1(t) + f_1(x_1, x_2, t)\Delta t \\ x_2(t+\Delta t) = x_2(t) + f_2(x_1, x_2, t)\Delta t \end{cases} \quad (6)$$

(5)式の解の例として半径 0.3 mm (直径 0.6 mm) の上昇速度の時間変化を図9に示す。レイノルズ数は 77.9 である。終端速度は 0.13 m/s、終端速度になるまでの時間は 0.067 s、そのときの位置 (上昇距離) は起点から 7.9 mm 上方であった。ここで時間間隔 $\Delta t = 5 \times 10^{-4}$ (s)、動粘性係数 $\nu = 1.0 \times 10^{-6}$ (m²/s)、重力加速度 $g = 9.8$ (m/s²)とした。

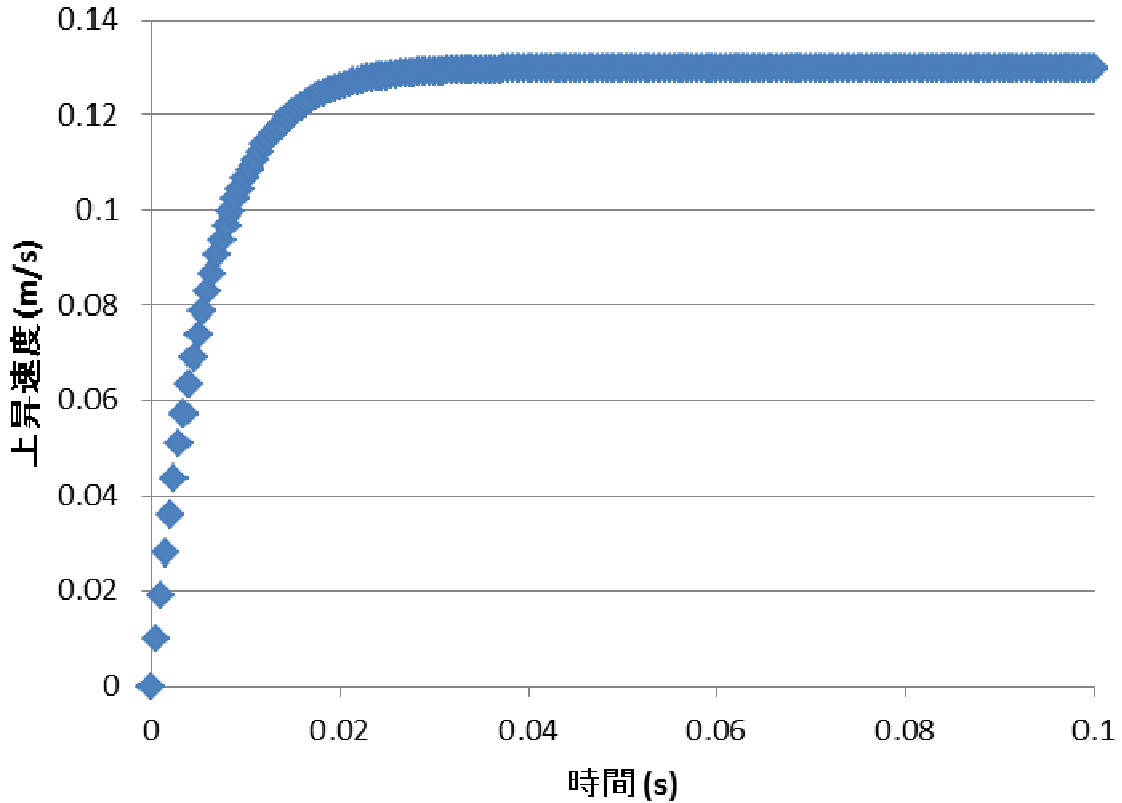


図9 清浄な液体中を上昇する気泡の上昇速度の時間依存性 (気泡直径:0.6 mm)

(b) 不純物を含む液体中を上昇する気泡の場合

C_D は以下のように表される (文献2、5)。

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.1935 Re^{0.6305}) \quad (7)$$

(20 < Re ≤ 260)

終端速度を求める際には、(4)式を代入した C_D の式を(2)式に代入することで、気泡半径と気泡上昇速度の関係式を得ることが可能である。不純物を含む液体中を上昇する気泡の場合、終端速度に達するまでの上昇過程における速度については、履歴力を含めた詳細な計算が必要である (文献2)。

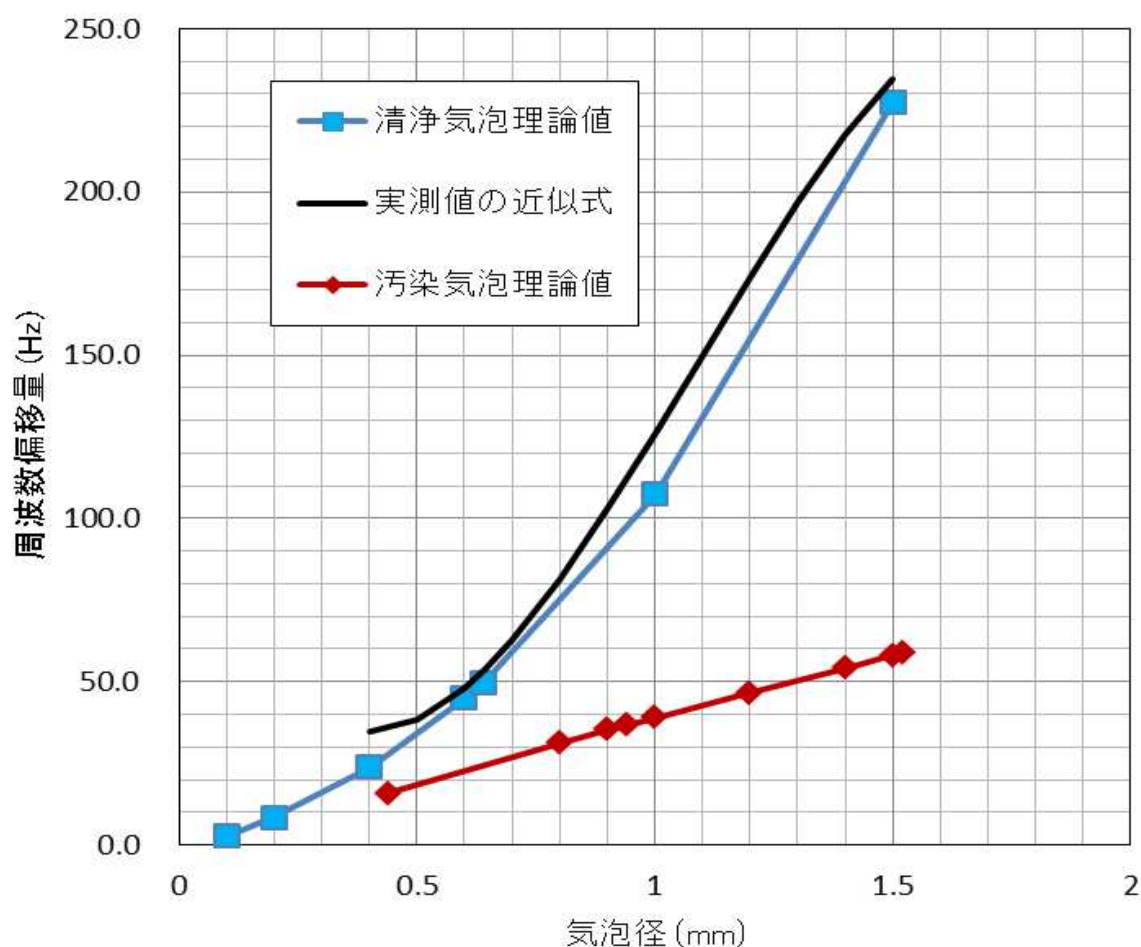


図 10 周波数偏移量の気泡径依存性

気泡径と周波数偏移の関係式について以下に述べる。例として汚染気泡の場合、泡径と周波数偏移の関係式は、速度 U を媒介とする上述の(7)式、ドップラーの(8)式と周波数偏移に関する(9)式からなる。(7)式で泡径 R を与えて U を求め、その U を代入した(8)式と(9)式から周波数偏移量 Δf を得ることができる。清浄気泡についても同様に気泡径と周波数偏移の関係式を得ることができる。

$$f = \frac{c - U \sin \theta_2}{c - U \sin \theta_1} f_0 \quad (8)$$

$$\Delta f = f - f_0 \quad (9)$$

図 10 に清浄気泡および汚染気泡における周波数偏移量の気泡径依存性をそれぞれ示すとともに、H26 年度に報告された、中道鉄工㈱での周波数偏移量の気泡径依存性実測値に関する近似式との比較をおこなった。今回計算した清浄気泡、汚染気泡に関する理論値を四角、菱形でそれぞれ示す。同図内の実線は、中道鉄工㈱での実測値の近似式を表す。近似式の値は、気泡径の共通する範囲で清浄気泡理論値に比較的近い値を示しているのがわかる。ゆえに中道鉄工㈱での実験に用いられた水槽内の水

は清浄であったことが推察される。ここで、清浄気泡で気泡径の大きい場合に、レイノルズ数の制限を超えた気泡径の条件での計算値もプロットしていることに注意したい。

参考文献

1. 高木、松本、混相流 10 巻 3 号 (1996) 264-273
2. 高木、宇田、渡邊、松本、日本機械学会論文集 (B 編) 69 巻 686 号 (2003) 2192-2199
3. 鈴木、Excel で学ぶ微分方程式、オーム社、第 6 章
4. <http://brain.cc.kogakuin.ac.jp/~kanamaru/lecture/vba2003/12-differential01.html>
5. R. Clift, J. R. Grace and M. E. Weber: Bubbles, drops, and particles, 1978, Academic Press, p.112

2-1-3 ノイズ対策

S/N 比を改善させるため、信号処理基板に実装したフィルタの見直しを行った。

超音波センサーからの信号をインスツルメンテーションアンプで受信した後、シングルエンドの信号に変換した後に、ハイパス・フィルタを追加することで、ノイズを低減させた。

図 11 にフィルタ変更前後の波形を示す。

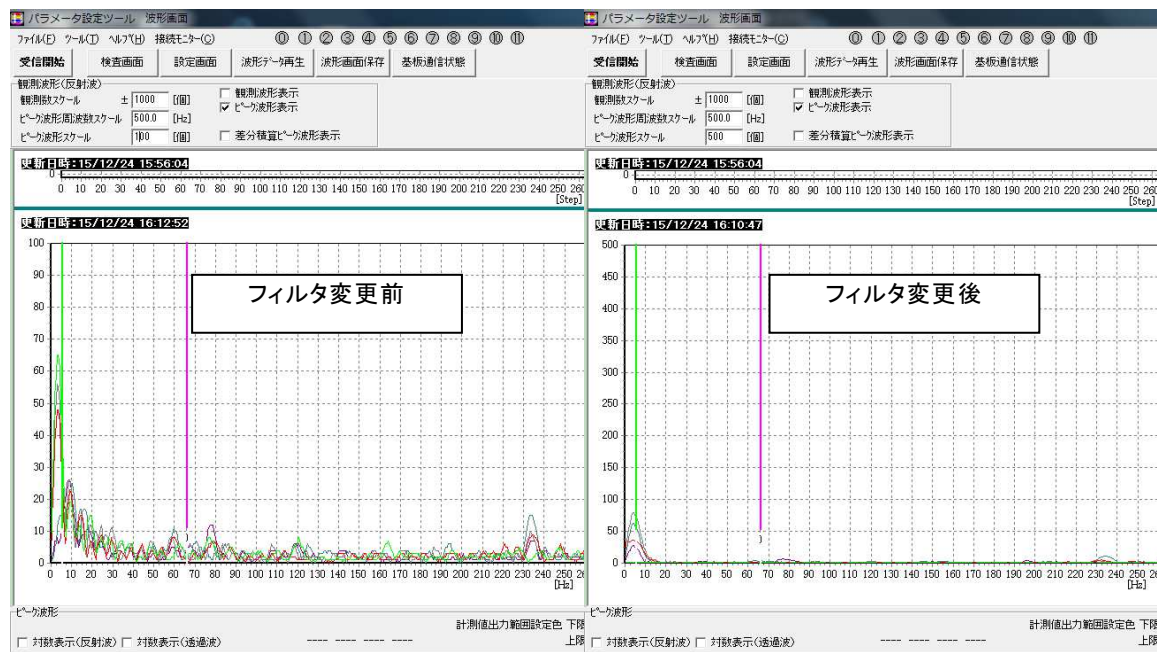


図 11 フィルタ変更前後の波形

○にぎり、水流(中道鉄工株式会社、株式会社パル技研、産業技術総合研究所)

信号処理基板にノイズフィルタを実装することで、最大 $1/100000$ (-80dB)までノイズを低減する回路を設けた。

○水温変動(中道鉄工株式会社、株式会社パル技研、産業技術総合研究所)

温度特性の良い部品の選定や排熱冷却を考慮した回路基板設計等を実施することにより、変動による信号変動を $1/10$ (-20dB)まで低減することができた。また、実測データおよび理論値から、特性の変化を自動補正するアルゴリズムを開発した。

2-1-4 総合判断のためのアルゴリズムの開発

信号処理基板(実用機)とFA パソコン(Windows Embedded)を組み合わせた泡の検出アルゴリズムの概要を図 12 に示す。

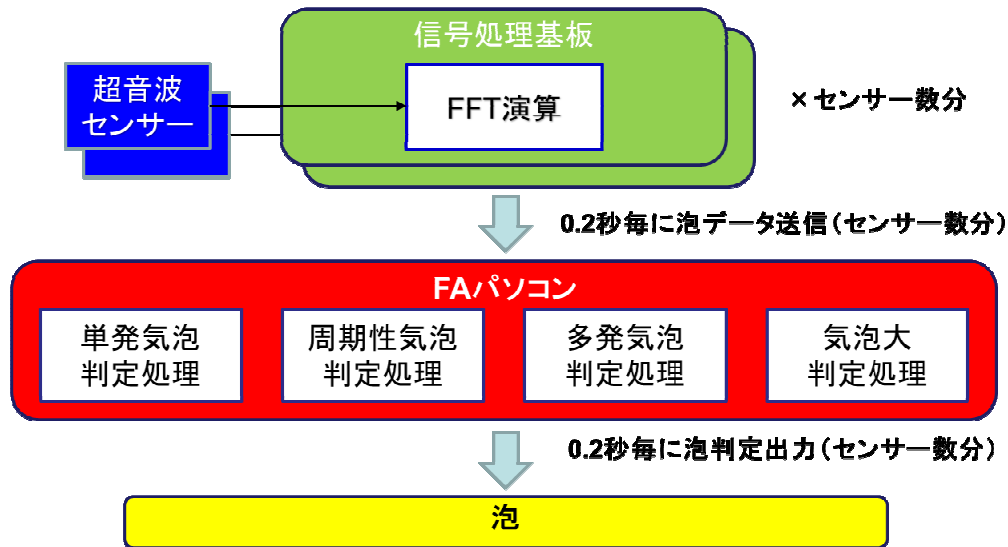


図 12 検出のアルゴリズムブロック図の概要説明

○信号処理基板について

- ・反射波の信号をFFT 演算する。
- ・FFT 演算した泡データをパソコンへ送信する。

○FA パソコンについて

0.2 秒毎に受信したセンサーのチャンネル分の泡データと泡判定の閾値を用いて、4種類の判定処理にて気泡を検知する。(図 13)

- ・単発気泡判定 : 単発で発生する気泡の判定
- ・周期性気泡判定 : 周期的に発生する気泡の判定
- ・多発気泡判定 : 発生した気泡の数で判定
- ・気泡大判定 : 大きい気泡の判定

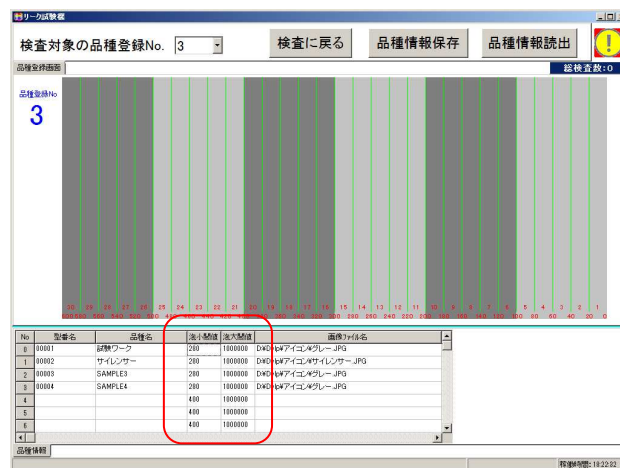


図 13 泡判定の閾値設定の画面例

2種類の気泡を検出した判定結果の画面例を図 14 に示す。



図 14 気泡を検出した判定結果の画面例

画面説明

[1]: 泡を検出したセンサーのチャンネルに赤枠印が表示される。

[2]: 泡の検出状況がリアルタイムに表示される。

【】は表示優先の順位

赤 色: 気泡大判定に用いるパラメータ値以上の気泡【1】

ピンク: その他の気泡判定に用いるパラメータ値以上の気泡【2】

超音波センサーの故障検知を判定する自己診断機能を搭載している。自己診断結果のパソコンの画面例を図 15 に示す。



図 15 自己診断の判定結果の画面例

画面説明

赤印: センサー異常を検出したセンサーのチャンネルに黄色印が表示される。

超音波センサーにより検出できる気泡の大きさとして $\phi 0.2\text{mm}$ 以上の気泡検出が可能であるかを調査した。 $\phi 0.2\text{mm}$ の泡の写真と検出時の検査画面を図 16 に示す。

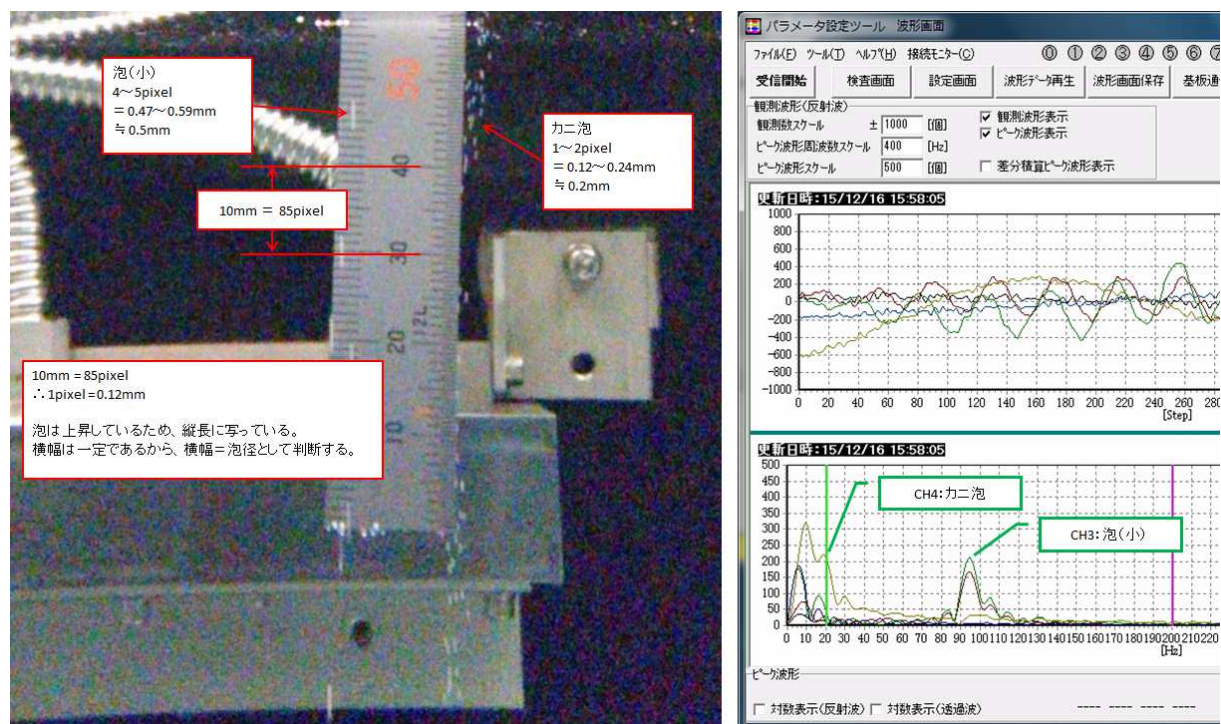


図 16 $\phi 0.2\text{mm}$ の泡の発生の様子と検出時の画面例

以上、開発したアルゴリズムの総合判定として、超音波センサーにより検出できる気泡の大きさとして $\phi 0.2\text{mm}$ 以上の気泡検出が可能であるかを調査した結果、0.2 秒毎のリアルタイムで $\phi 0.2\text{mm}$ 以上の気泡の有無の判定(処理)が十分に可能であることが確認できた。

よって、目標であった判定(処理)時間 20 秒以内も実現できた。

2-2 気密容器漏れ検出装置の実用機製作

下記図(写真)は完成した気密容器漏れ検出装置実用機である。

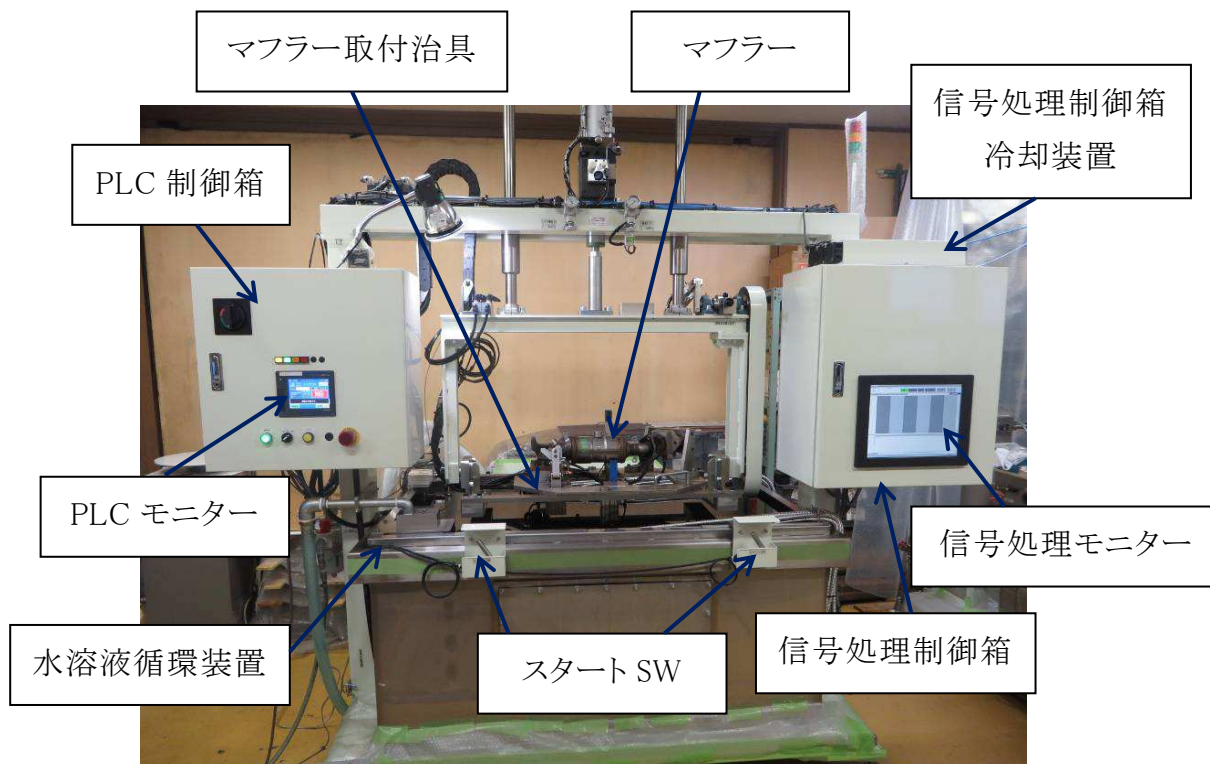


図 17 気密容器漏れ検出装置実用機(写真)

2-2-1 専用センサーの製作

平成 26 年度の研究開発で気泡検出範囲を増加させるため新方式を考案し、新方式用の専用センサーを共同研究開発した。実用機で実証試験の結果、検出距離は 400mm 以上確保できていることが確認できた。

2-2-2 装置表面の脱泡

マフラー取付治具水平時の状態で取付治具を下降させると多くの気泡が付着した状態になるが、マフラー取付治具傾斜時のように取付治具を傾斜させ下降させると気泡の付着が減少することが確認できた。気泡の付着をできるだけ減少させ単発気泡判定を使用することにより付着気泡か漏れの気泡かは判別できると考えられた。

2-2-3 超音波の水槽内乱反射対策

図 18、19 は気泡径約 $\phi 0.5\text{mm}$ で吸音材の有無の時の反射受信波のデータである。図の赤丸の箇所で吸音材が乱反射を吸収していることが確認できる。 $\phi 0.2\text{mm}$ 以上の気泡検出には吸音材は必要不可欠であり、吸音材を取り付けることにより $\phi 0.2\text{mm}$ 以上の気泡検出は可能であることが確認できた。

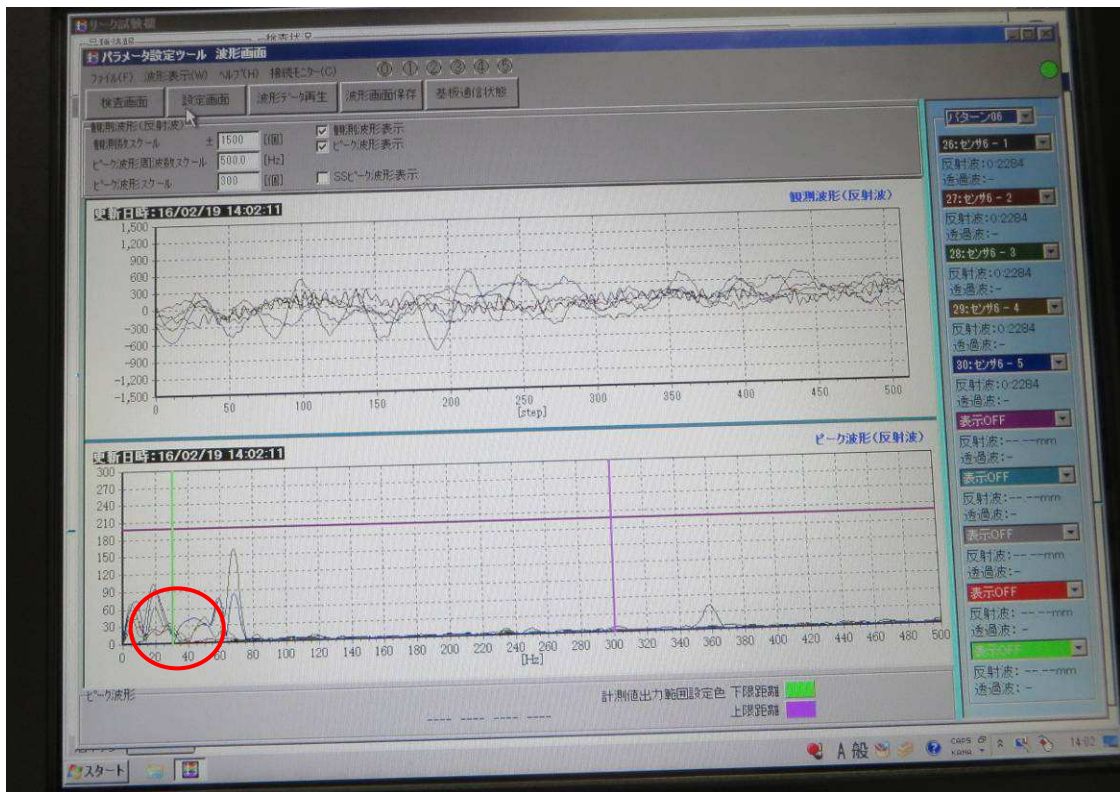


図 18 吸音材無(写真)

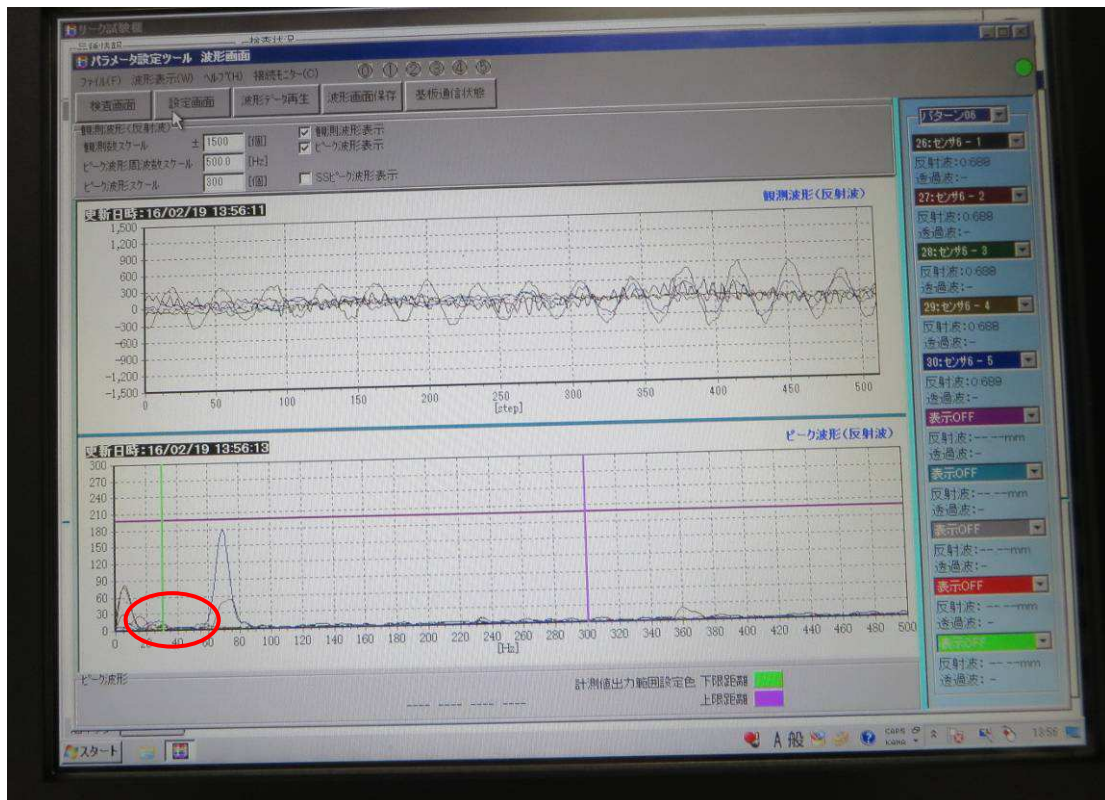


図 19 吸音材有(写真)

2-3 実証試験

1) 電源ノイズ対策

図 20 電源ノイズ未対策時のように 60、120、180Hz に電源ノイズが乗っていた。信号処理基板用電源の $\pm 15V$ の 0V をアースすることにより、図 21 電源ノイズ対策後のように電源ノイズが乗らなくなり、電源ノイズ対策ができた。

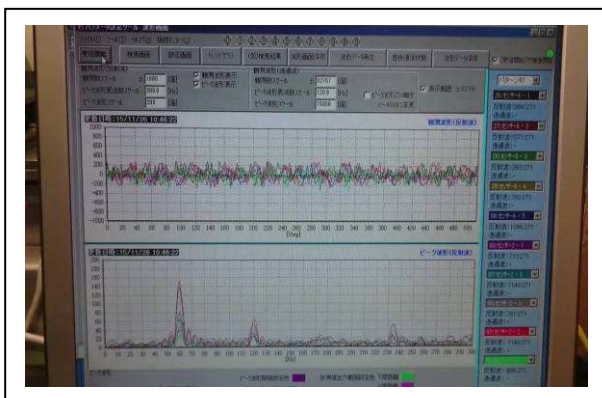


図 20 電源ノイズ未対策時(写真)

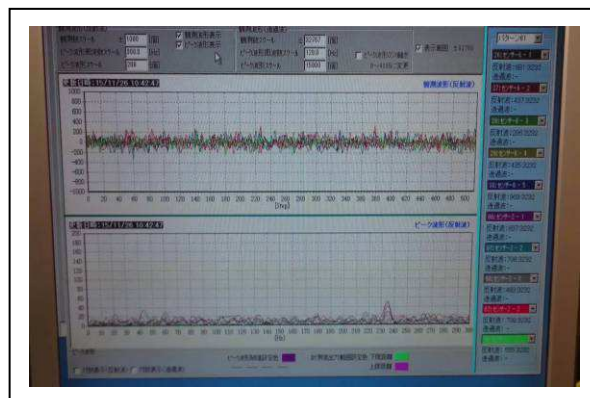


図 21 電源ノイズ対策後(写真)

2) 信号処理制御箱内の温度管理(信号処理制御箱内の部品の損傷の防止)

信号処理基板、電源($\pm 15V$ 、 $24V$)等の発熱により信号処理制御箱内の温度が上昇し信号処理制御箱内の部品の損傷をすることを防止するために図 22 の冷却装置を取り付けた。



図 22 冷却装置(写真)

さらに安全のため信号処理制御箱内に図 23 の温度センサーを設置し、PLC である設定温度以上になると信号処理制御箱のメイン電源を OFF にする回路を設置した。



図 23 温度センサー(写真)



図 24 PLC 温度設定画面(写真)

3)超音波センサーの損傷の防止

超音波センサーが水溶液に浸かっていない状態で超音波を送信すると超音波センサーの寿命が短くなる。それを防止するためにタンク内に図 25 のフロートスイッチを取り付けてPLCで制御を行い、超音波センサーが水溶液に浸かっている時だけ信号処理制御箱にメイン電源を供給するようにした。



図 25 フロートスイッチ(写真)

4)その他実用機の改善・改良

・水流

マフラーとマフラー取付治具が下降することにより生じる水溶液の攪拌と水溶液表面の波で受信信号が乱される現象はポンプによる水溶液の循環装置で水溶液の攪拌と水溶液表面の波を短時間で無くし、受信信号を安定化させ気泡の有無の検査が十分にできることを確認した。

5) 装置稼働試験

完成した気密容器漏れ検出装置実用機(図 17 参照)にマフラーを取り付け、装置稼働部を最適になるようにソフト変更、メカ調整を行いながら稼働試験を行った。

装置の動作はスタート SW ON でマフラー取付治具が傾斜して下降し水平状態に戻した後、PLC が信号処理部に検査スタート信号を送り、信号処理部が予備時間後検査を開始する。図 26 が検査中のマフラーの写真である。(気泡の漏れが有るマフラー)



図 26 マフラー検査時状態(写真)

検査結果は PLC 部には図 27 のように OK 又は NG で表示される。



図 27 PLC モニター 気泡の漏れが無い OK 時(写真)

信号処理モニターには気泡の漏れが有る時は図 28 のように漏れ位置も表示される。
 気泡の漏れが無い時は図 29 のように表示される。
 この表示により作業者は気泡の有無と漏れ位置が解る。

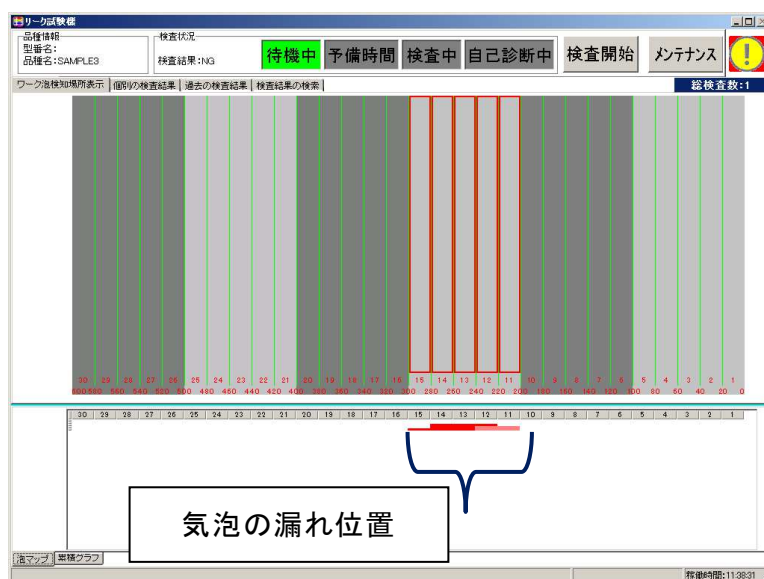


図 28 信号処理モニター画面 気泡の漏れが有る時(写真)

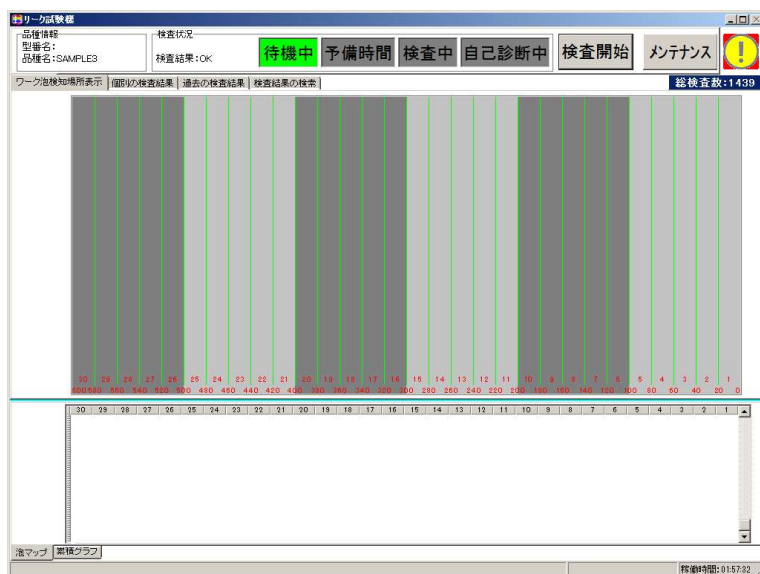


図 29 信号処理モニター画面 気泡の漏れが無い時(写真)

以上、開発装置の全体評価としての装置稼働試験において、スタート SW ON で PLC モニターにリーク漏れ検査結果が「OK」又は「NG」で表示され、さらに漏れが検出された場合、信号処理モニターには、漏れの検出位置も確認できる事を実証できた。

最終章 全体総括

自動車業界においてはマフラー・燃料タンクなどの溶接加工品で、気密性を要する部品については、溶接欠陥に基づく漏れ等の確認検査が行われている。特にマフラーの気密検査は国内外問わず全メーカーの全工場で、水没式による全数の目視検査のため、検査の信頼性が十分でない(バラツキが生じる)などの課題を抱えている。

今回の研究開発では、超音波を用いた自動車用マフラー等気密容器漏れ検査装置を研究開発し、現在の目視検査を、定量的な判断が可能なシステムに置き換え、世界をリードする日本の自動車産業の更なる国際競争力強化に繋げることを目指した。

開発する「超音波を用いた新しい気密容器漏れ検出装置」は、自動車部品だけでなくガスボンベ等気密性が求められる製品全般への応用を目指し、検査工程やラインレイアウトをほとんど変えることなく導入できる装置とするため、技術的目標値は次のとおりとした。

○反射波での検出サイズ： $\phi 0.2\text{mm}$ ～ 約 3mm

設定理由：欠陥から生じた気泡が離脱・上昇するための最小径は、 0.2mm であり、この値を検出目標とする。これまでの実験の結果、検出可能な値である。

○透過波での検出サイズ：約 $\phi 3\text{mm}$ 以上

設定理由： $\phi 3\text{mm}$ 以上の気泡は、透過波での減衰により気泡の検出を可能とする。

○判定(処理)時間：20 秒以内

設定理由：目視で行われている検査時間と同等またはそれよりも短いことを目標とする。

これらの目標を達成するために、「超音波による気泡検出のためのアルゴリズム確立」、「気密容器漏れ検出装置の実用機製作」および「実証試験」を実施した。

特に、気泡検出方法では、当初予定の気泡検出方法では、気泡の奥行き方法の位置により検出信号強度が変化するなどの欠点が明らかになり、この欠点を解消するため新たな検出方法を考案しそれに対応するアルゴリズムを開発・確立した。なお、本方法で得られた気泡径と周波数偏移量の実測値の近似式と清浄気泡理論値はよく一致していることが確認できた。

また、工場などの設置場所・環境や検査対象製品等の影響を受けるであろう水温、気温、電源等からのノイズや検査品付着泡、水槽内での超音波の乱反射等に関して対策・処理を検討・実施し夫々有効な対応技術であることを確認した。

その結果、実証試験において、 $\phi 0.2\text{mm}$ 以上の気泡に関して、0.2 秒毎のリアルタイムで気泡の有無の判定(処理)が十分に可能であることが確認でき、目標であった判定(処理)時間 20 秒以内も実現できた。さらに、気泡の有無だけではなく横方向における漏れ位置を表示する装置とした。

今後は、中道鉄工(株)において、川下企業立会の下、さらなる川下企業の要望(操作性等)を取り入れた実用機に改良・改善を行う予定である。その後、川下企業の検査場にて実証試験を行い改良・高機能化を図り、改良・高機能化された装置の商品化を行う予定である。

なお、装置の改良・高機能化の実施に関しては、今後の補完研究にて取り組む予定である。