

水没式超音波リークテスターの開発

平尾友二*

抄 録

水没式リークテスターでは、水槽内に沈めた被検査物から漏れ出て水中内を上昇する気泡の有無や量から、目視で合否を判定する。本研究では、気泡が水中を上昇する際の揺らぎに着目して、漏れ出て水中内を上昇する気泡に超音波を横から照射することにより、気泡の有無と漏れ量を求める手法を用いた自動化の可能性について検討した。実験の結果、気泡による透過波の振幅減衰と反射波の周波数偏移から気泡の有無を検出できた。また、目視では見落としやすい微少な漏れ量について、ほぼ正確に漏れ量を算出することが出来た。

これにより、これまで困難とされてきた水没式リークテスターの自動化が可能であることと、この方法には多くのメリットがあることを報告する。

1 はじめに

機械部品の品質検査は、部品の使用目的の重要性によって異なる。配管部品などの場合には、引火性・溶解性・極温性など、使用対象の危険度によって気密性が重視される場合があり、リークテストと呼ばれる気密検査が全数で行われる。リークテスターには検出原理の違いから、図1のように水没式、差圧式、ガス拡散式の3種類がある。

水没式は水中に沈めた被検査物内に1割り増し程度の空気加圧をして、被検査物の欠陥から漏れ出る気泡の有無や量を検査員が目視で確認する検査方法で、装置が安価であるが自動化が困難とされ、未だに多くの企業で人手による目視検査が行われている。

差圧式は、基準品(合格品)と被検査物を同時に空気加圧した後、加圧流路を閉じて両被検査物間での差圧の有無や流量を比較することにより漏洩を判定するもので、環境温度や被検査物比熱などの影響を受けやすく、精度が悪いという欠点を有している。

ガス拡散式は、被検査物内に水素あるいはヘリウムガスを充填し、ガスセンサーで被検査物外に漏れ出したガスの有無を検知しようとするもので、多くの場合は被検査物を真空チャンバー内に入れることにより、チャンバー内へのガスの漏れ量を高精度に測定することができるが、装置が大がかりとなり、ランニングコストも高いという欠点を有している。特に、近年注目されているアルミ合金や炭素繊維な

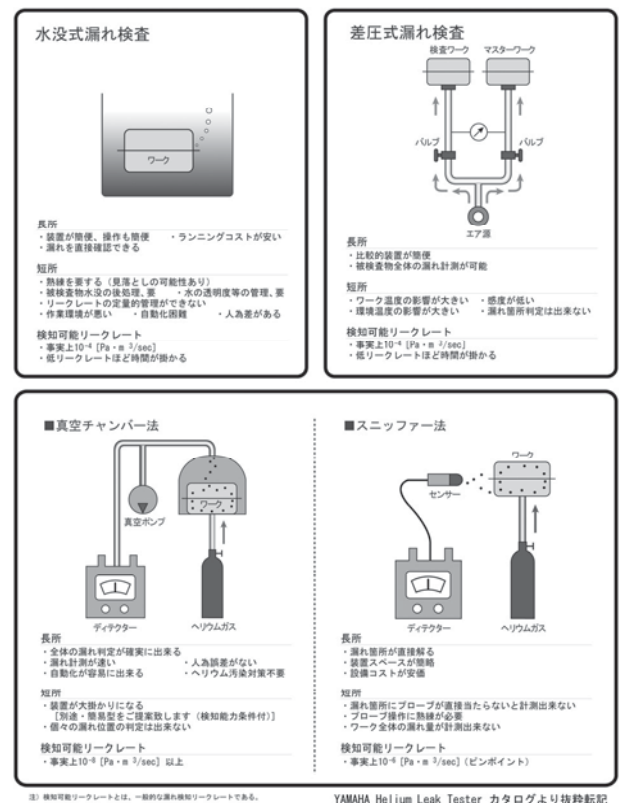


図1 リークテスト方式の特徴

どの軽量化素材材では、水素の着脱作用により漏れ量の検出精度が極めて低下する等の問題があり、適用が制約される。

2 手法の検討

水没式リークテスターでは、検査員が目視判定するため、合否結果の人為差や、水槽内の水の汚れに伴う見落としなどの問題を生じていた。

*電子技術課

超音波を使った自動化手法はこれまでもいくつか提案されており、漏れ出て水中内を上昇する気泡を一カ所に集めて細管の水位を超音波で測定することで漏れ量を自動判定する方法、空気と水の音響インピーダンスの違いから、水中の気泡に超音波を照射すると気泡表面の境界面ではほぼ全反射するという原理を利用して、水中内を上昇する気泡に、超音波を上から照射してその上昇速度から気泡の有無や量を検出するもの、超音波を横から照射して気泡からの反射の有無を検出するものなどがあるが、水中を浮遊するマイクロバブルや水没時に被検査物に付着していた気泡の離脱などによる誤検出や、漏れ量判定の精度の悪さから、実用には至っていない。

本研究では、気泡が水中を上昇する際の揺らぎ(横振動)に着目し、気泡の有無と漏れ量を求めるという新たな手法を活用して、水没式リークテスターの自動化の可能性について検討することとした。

3 実験装置

図2に示すように、実際のリークテスターと同様の水槽を用いて実験を行った。図3に水槽内の配置概要図を示す。水槽の中央部には、被試験物の代わりに、ノズルを交換することにより様々な気泡を発生できる気泡発生装置が設置され、超音波を照射する送信センサー、送信センサーと正面で向かい合い超音波を受信する透過受信センサー、超音波が気泡



図2 実験装置(水没式リークテスター)

と衝突することにより発生する反射波を受信する反射受信センサーが、それぞれタンクの両壁に取り付けられている。

送・受信センサーは、それぞれ幅10mm高さ20mmのリニアアレイセンサーチャンネルが10個水平方向に並べられた超音波センサーユニット各6個で構成され、センサー間のビーム距離が約600mmとなるように配置されているため、600mm×600mmの平面空間を横切る気泡を捉えられる構造となっている。

超音波は、この内の隣接する2つのリニアアレイセンサーチャンネル(20mm×20mm)を使って2MHzの正弦波で送信される。相対する2つの受信センサーは、送信センサーに対して5mm横方向にずれて配置されており、送信された超音波ビームの軸線上には、1つの受信リニアアレイセンサーチャンネル(10mm×20mm)が相対するようになっている。

漏れ出た気泡の検知は、各ユニット毎にこの送受信チャンネルを切り換えて、平面空間を漏れなくスキャンすることにより行う。

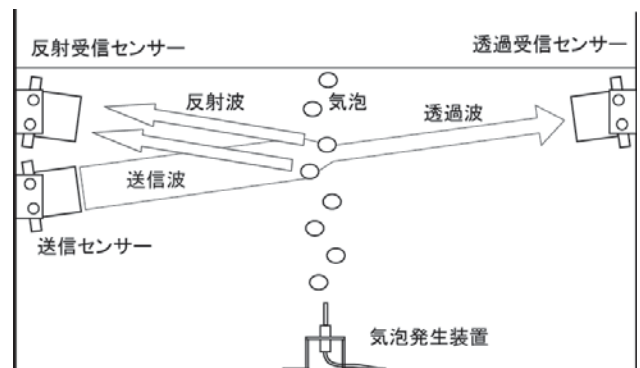


図3 超音波伝搬経路と送受信センサーの位置関係

図4に装置の回路ブロック図を、図5に製作した送受信回路基板を示す。送受信回路基板は、それぞれ10チャンネル分の回路が1枚に実装されており、超音波センサーユニットとペアで用いる。これは、超音波センサーユニットの特性が、チャンネル毎にばらつきを有しているため、基板上の回路でこのばらつきを一定範囲に収められるようにチャンネル毎に調整を行った。

送信源となる2MHzの正弦波は、水晶発振子とトランジスタを使った無調整発振回路で生成され、送信チャンネル間の同期を取るために、1つの送信回路

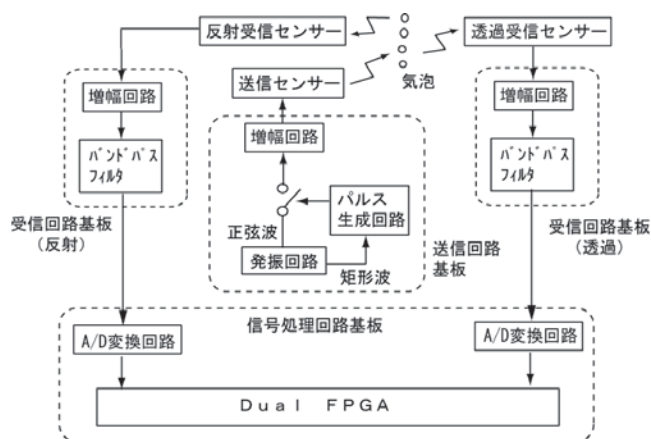


図4 リークテスターの回路ブロック図

基板にのみ実装され、オペアンプを使ったボルテージフォロワで他の送信回路基板に分配されている。送信チャンネルの切換にはアナログスイッチを、超音波センサーの駆動にはパワーオペアンプによる増幅回路を用いている。

受信回路は、差動入力型のインストルメンテーションアンプ（計装増幅）で構成して SNR の改善を図り、出力の切り換えにはアナログマルチプレクサを用いた。出力部にはバタース型アクティブバンドパスフィルタと差動ドライバを搭載し、信号処理基板とのアナログデータ伝送時のノイズ低減を図った。この結果、受信回路の SNR は 120dB 以上を確保している。

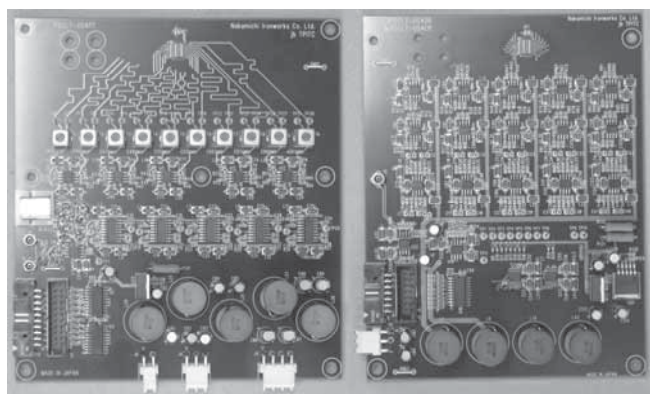


図5 製作した送(左)・受信(右)回路基板

図6に信号処理回路基板のブロック図を示す。信号処理回路基板は、2個のFPGAと12個のA/D変換器および各種インターフェースで構成されており、透過・反射受信回路基板で増幅された受信信号は、100MHzでA/D変換されてFPGA2に取り込まれる。

FPGA2には、透過受信信号から振幅の変化を、反射受信信号から位相の変化をそれぞれ算出する回路が6個並列で組み込まれており、その結果がメモリを介してFPGA1に送られる。

FPGA1には、Nios II CPUコアと周辺回路が組み込まれており、送受信チャンネルの切換タイミングの制御プログラム、FPGA2からメモリを介して送られた算出結果の繰り返し頻度や間隔から再現性の評価を行い漏れ出た気泡であるかどうかの判定を行うプログラム、基準値と比較して合否判定を行うプログラム、水質環境に伴って変化する気泡の軌道や音響特性を補正するためのオートチューニングやオートキャリブレーションプログラムのほか、シーケンサやメンテナンス用PCとの通信プログラムなどが搭載される。

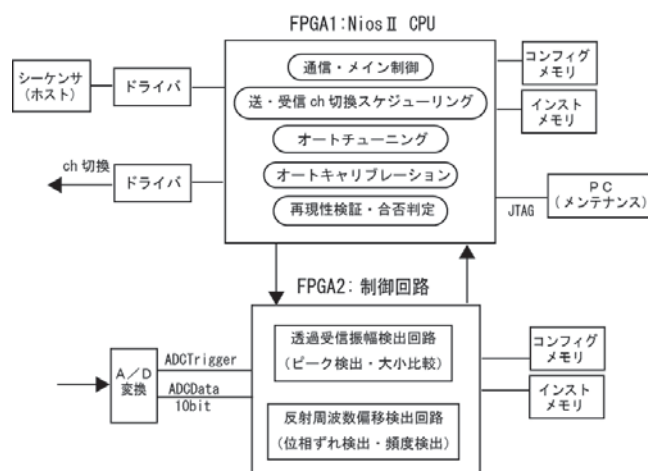


図6 信号処理回路基板とFPGAのブロック図

4 実験結果と考察

水中を上昇する気泡に超音波を横方向から照射すると、図7に示すように、比較的大きい気泡が超音波ビーム内を横切るときには、超音波が遮られて透過側で受信される超音波のパワーが減少して容易に検出できるが、超音波の送信パワーやビーム幅に比べて小さな気泡の場合には、図7のように音の回折により減衰域が補間される為、透過側で受信される超音波のパワーはほとんど減少しない。

実験の結果、透過受信センサーでは、気泡の大きさが直径5mm以上の単発気泡の場合には、図8のように、気泡サイズに応じた透過受信電圧の減衰が観測され、その減衰度から漏れ量を求めることがで

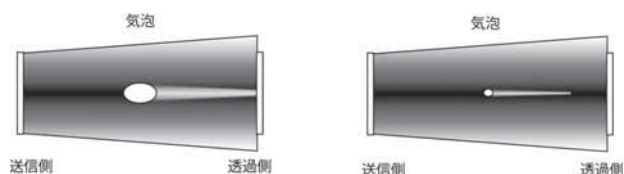


図7 超音波ビームと気泡の関係

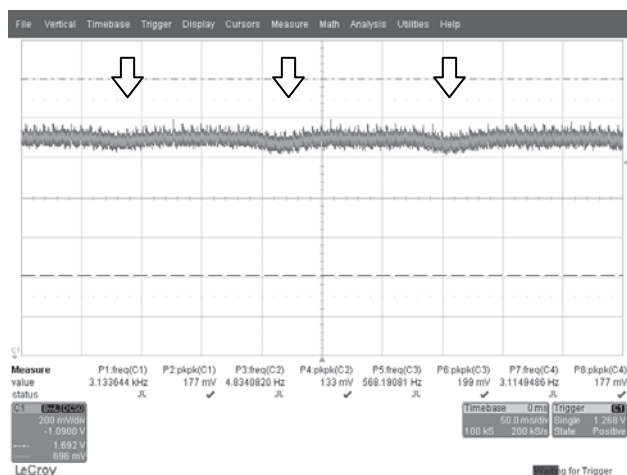


図8 直径5mmの気泡による透過受信電圧の変化

きた。しかし、それ以下の気泡サイズでは、透過受信電圧の減衰が観測されたものの、SNRやA/D分解能の制約により減衰度からプログラムで漏れ量を求めることは困難であった。

10cc/min以上の複数の気泡が大量に漏れるような場合には、気泡が送信波を横切るときに超音波が遮られて、透過受信電圧の減衰が頻発し、容易に気泡（漏れの有無）を検出できたが、その減衰度は安定しておらず、正確な漏れ量を求めることは困難であった。これは、乱反射による信号強度の錯乱によるものと考えられる。

一方、気泡によって遮られた超音波は消失するわけではなく、気泡表面の境界面で反射し、送信側にエコー（反射波）として戻ってくる。この反射波は、気泡表面が球形状を成しているために放射状に拡散してしまいあまり強くはないが、気泡の大きさを反映しているため、反射受信センサーで、図9に示すような信号の変動として観測された。しかし、波形が歪んでおり、波形の繰り返し再現性に乏しいことなどから、反射受信電圧の変化としては正確に気泡サイズを特定することが出来なかった。これは、参考文献にもあるように、反射波が気泡の横振動により、周波数偏移を生じていることと、反射波の強さ

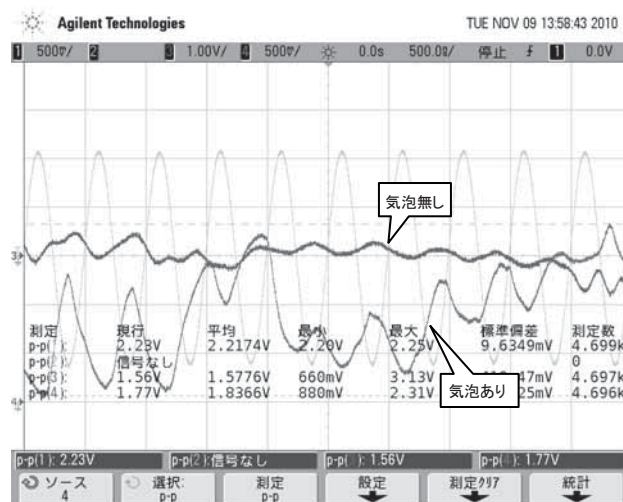


図9 気泡の有無による反射波の変化

（上：気泡なし，下：気泡有り，後：2MHz 源信）

が距離による減衰を有しているためと考えられる。

そこで、スペクトルアナライザ（Agilent N9000A）を用いて周波数偏移とパワーの計測を行った。その結果、透過受信センサーでは気泡に伴う変化は観測されず、気泡の有無を検出できなかったが、反射受信センサーでは、図10に示すように、直径0.1～3mmの気泡で周波数偏移とスペクトル強度に相関が認められ、漏れ量を求めることができた。

しかし、直径3mm以上の気泡ではスペクトル強度の再現性が低く、漏れ量を求めることはできなかった。これは、気泡表面からの反射波が放射状に拡散することや、水中を上昇する大きな気泡は浮上力と水圧による複雑な形状変化を伴うことなどから、3mm以上の大きな気泡では反射量が大きく変動してしまい再現性が低下したためと考えられる。

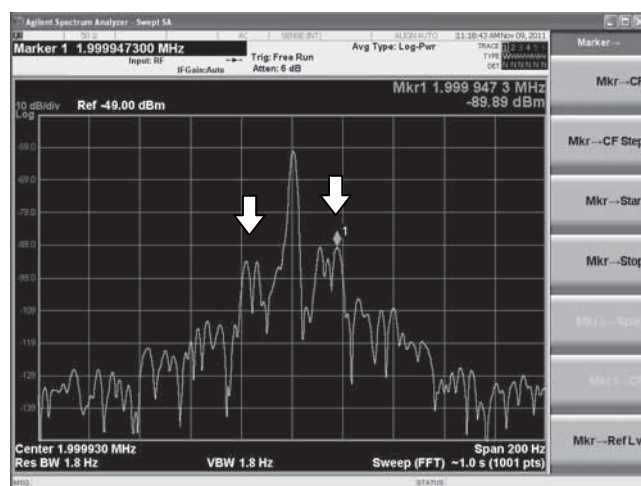


図10 $\phi 0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ の気泡によるパワースペクトル

次に、反射受信センサーの増幅回路に直接スペクトルアナライザを繋いで計測した場合には、浮遊するマイクロバブルさえも検出できたが、試作した検出装置のアルゴリズムでは、直径 0.1mm 以下の気泡では、正確な漏れ量を求められなかった。これは、直径 0.1mm の気泡のパワースペクトル強度が-60dB 弱程度であるのに対して、処理に用いた FPGA の演算時のノイズが、図 11 に示すように、アイドリング時に比べて+10dB 程度あったため、SNR が低下して 0.1mm の気泡が漏れ量を正確に算出できる限界となったものと考えられる。

また、反射受信センサーでは、直径 0.1~3mm の複数の気泡が混在して漏れ出るような場合においても、それぞれの気泡サイズ毎に周波数偏移が確認されそれぞれのサイズ毎の気泡数によってスペクトル強度が変化を示す為、漏れ量と相関が認められ、ほぼ正確な漏れ量を求めることができた。

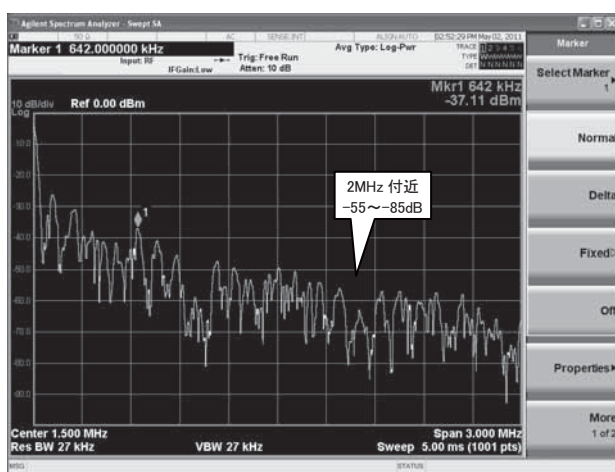
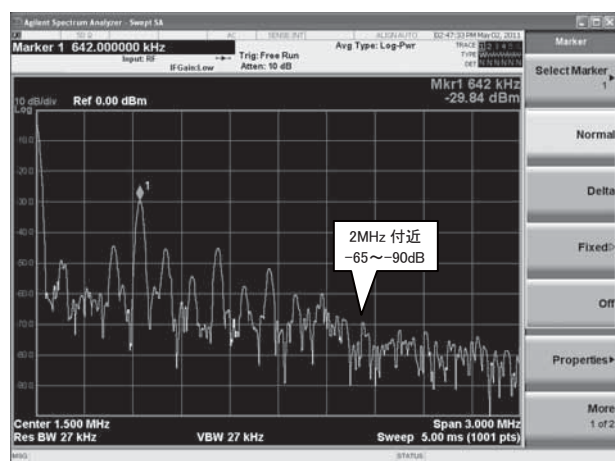


図 11 アイドリング時の FPGA のイズ(上)と演算時の FPGA のノイズ(下)の比較

5 まとめ

リーク検査工程において、水温や粘度・密度などの水質環境は経時的に変化していくが、その変化は被検査物単位での変化となり、その量は僅かで大きく変化しないと考えられる。従って、連続した限定時間内においては、気泡の発生とその上昇軌道は一義的で再現性を示すものと仮定できるので、頻繁なオートキャリブレーションやオートチューニングを組み込むことによって、気泡が水中を上昇する際の揺らぎに着目して、漏れ量を求めるという手法は適用可能と言える。

水没式リークテスターに本研究の方法を用いると、水中を上昇する際に形状変化を伴う比較的大きな気泡の場合には透過側での受信信号の減衰変化から、形状変化を伴わない小さな気泡の場合には反射側での受信周波数偏移の変化から、それぞれ漏れの有無を自動検出できる。また、合否基準は、微少漏れ量で規定されることから、微少漏れ量を正確に算出できる本研究の方法は優れている。

さらに、水中を上昇する気泡の揺らぎ（横方向の振動）を超音波の周波数偏移量として検出しているため、被検査部表面に付着していた気泡の離脱による誤検出は検出される周波数偏移の繰り返し再現性の違いから、水中を漂うマイクロバブルや汚濁物質による誤検出はこれらの振る舞い（横方向の運動速度）の差異から、それぞれ区別して排除することができるというメリットも有している。

謝辞

この報告書の作成にあたり、装置の開発にご協力いただきました皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) G.Ryskin, and L.G.Leal: "Numerical Solution of Free-Boundary Problems in Fluid Mechanics. Part2. Bouyancy-Driven Motion of A Gas Bubble through A Quiescent Liquid", J.Fluid Mech., Vol.148, pp19-35(1984)
- 2) P.G.Saffman: "On the rise of small air bubbles in water", J.Fluid Mech., Vol.1, pp249-275(1956)
- 3) 平尾友二: 「超音波による水中を上昇する気泡の揺らぎ計測」 徳島県立工業技術センター研究報告, vol. 20, pp5-8(2011)