

超音波液面計における板厚チューニング技術

Automatic Tuning Technology in Ultrasonic Level Meter

松原 喜重郎* 関根 良浩** 矢嶋 敏** 古澤 誠一**
Kijuro MATSUBARA Yoshihiro SEKINE Takashi YAJIMA Seiichi FURUSAWA

要 旨

LPガス消費量の多い業務・集合住宅向けを主体に導入が進んでいるバルク供給方式に必要なバルク貯槽・容器は形状・サイズ・供給メーカーが複数あり超音波液面計の設計要件で通常規定される貯槽鋼板板厚が規定出来ない情況であった。市場にあるバルク貯槽の鋼板板厚範囲内であれば最適計測条件に自動チューニングする技術を開発した。

ABSTRACT

Introduction of a bulk supply system is progressing by business use with many amounts of LP gas consumption.

The type, the size, and the supply maker of a bulk Storage tank have more than one. It was the situation that the bluk Storage tank steel plate thickness usually specified on the requirements for a design of a ultrasonic level gauge could not be specified.

The technology automatically tuned up to the steel board thickness of a bulk Storage tank was developed.

* リコーエレメックス株式会社 計量・計測事業本部
Measurement Equipment Division, Ricoh Elemex Corporation
** リコーエレメックス株式会社 技術統括室
Technology Management Office, Ricoh Elemex Corporation

1. 背景と目的

1-1 LPガスの供給形態

1-1-1 バルク供給方式

LPガスの需要家への供給形態が従来の容器交換方式から需要家先に設置された貯槽にローリー車からLPガスを直接充てんするバルク供給方式へとLPガス消費量の多い業務・集合住宅向けを主体に導入が進んでいる。バルク貯槽・容器は液化石油ガス法（液化石油ガスの保安の確保及び取引の適正化に関する法律）によりLP液残量の計測が義務づけられており液面計が設けられている。

1-1-2 バルク貯槽

バルク貯槽は、Fig.1のような鋼鉄製圧力容器内に液化プロパンガスが入っており、液部の最大容量は貯槽内容積の85%以下に保つことが液化石油ガス法で規定されている。バルク貯槽は形状・サイズ・供給メーカの組合せで50種を超えるタイプが市場にある。

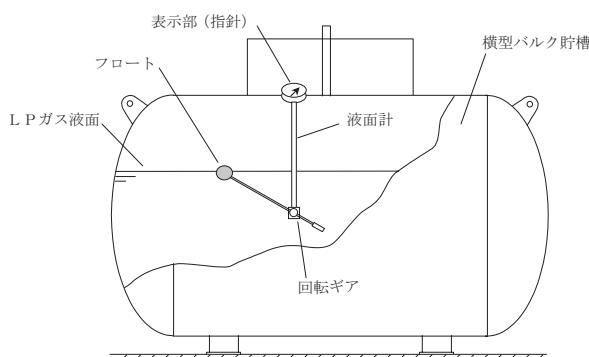


Fig.1 LPG Bulk Storage Tank.

1-1-3 液面計

液残量を計測する手段としては液面計が設けられており従来はFig.1に示すような機械式のフロート式液面計のみであった。高圧のバルク貯槽内部に設置された回転ギアによりフロートの上下動を表示部指針の回転角に変換する機構でバルク貯槽タイプ・サイズに応じ

た種類がある。また、電気式液面計としてFig.2に示すような超音波式液面計がある。バルク貯槽底面外壁にマグネットによるクランプオン方式を用いて音波センサを取り付けLP液への非接触測定とメンテナンス性の確保を両立させている。

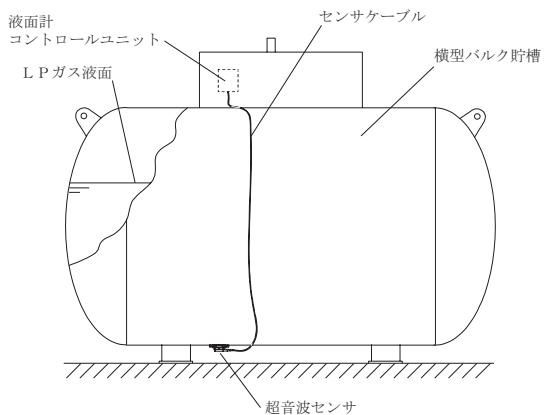


Fig.2 LPG Bulk Storage Tank.

フロート式液面計と超音波式液面計の特徴比較をTable 1に示す。

Table 1 Comparison of level Gage.

	フロート式液面計	超音波式液面計
精度	±5%FS	←
価格	◎	○
メンタナンス性	△	◎
双方向通信	×	◎
鋼板厚の影響	なし	あり
特徴	故障時はLPガスを空にする必要有	電池で10年稼動 貯槽温度を表示可

バルク供給方式ではバルクローリーの計画配送から液面計の残量警報接点出力によるオンコール配送、さらには監視センターからの双方向通信による正確な残液量検針データと需要家毎のガス消費パターンデータをもとにした予測配送へと管理手法が高度化している。標準で双方向通信機能を備えている超音波式液面計を導入することにより配送経費の削減と保安上のリスク削減（ガス切れ防止）を同時に計れるメリットがある。

1-1-4 バルク貯槽用液面計の貯槽鋼板厚

超音波式液面計ではバルク貯槽鋼板に超音波を通過させるのでTable 1にも示したように鋼板板厚の影響を受ける。バルク貯槽は1.8MPaの内部圧力に耐えられるよう設計されており使用鋼板材料の材料特性値に安全係数を加味して使用鋼板厚を貯槽メーカ各社で設定している。Table 2に代表的な貯槽メーカ3社の貯槽サイズ／貯槽タイプ別のバルク貯槽鋼板板厚（図面値）を示す。貯槽サイズが同じならば各社とも同等の鋼板板厚と見られるが、この図面値は設計中心値であり実際にはJIS G 3193で規定されている許容差となり980kg貯槽サイズで標準的な10.5mm厚の鋼板の場合では±0.6mmのバラツキが想定される。また、豎型バルク貯槽はfig.2の横型バルク貯槽を90度回転した形状であり超音波センサの取り付け箇所の鋼板はお椀型にプレス加工され図面値よりさらに0.3～0.5mm程度薄く最大9.4～11.1mmのバラツキ範囲が想定される。

Table 2 Tank steel plate thickness.

貯槽サイズ	A社		B社		C社	
	豎型	横型	豎型	横型	豎型	横型
295kg	6.5t	6.5t	7.0t	7.0t	6.6 t	6.6 t
490kg	8.0t	8.0t	8.0t	8.0t	8.0t	8.0t
980kg	10.3t	10.3t	10.2t	11.0t	10.5t	11.0t
2900kg	---	13.6t	---	13.4t	---	13.5t

1-1-5 バルク貯槽用液面計の貯槽鋼板厚対応

バルク貯槽の底部に超音波センサを設置し鋼板との音響整合をとつて超音波を通過させる超音波液面計にとって鋼板板厚バラツキに対する許容範囲の設定は設計要件の一つでありJIS規格公差に対応して周波数帯域別にバリエーションを揃えた「リベル」を開発・発売した。リベルの市場実績から貯槽鋼板板厚のバラツキが想定以上に大きいこと、バルク貯槽メーカの追加機種投入などの市場動向も考慮し鋼板板厚バラツキに対する許容範囲を今後は設計要件として規定できないと判断した。「リベル」の継続商品として「リベルII」の開発にあたり市場で導入実績の高い300kg～2900kg

のバルク貯槽を網羅する5～15mmの鋼板板厚に対応できる自動チューニング技術の開発が必要不可欠な技術として明確になった。

2. 技術

2-1 測定方式

2-1-1 理論検証

超音波液面計では送受信型超音波センサを用いコントロールユニットからの電圧印加により発生した超音波が鋼板→LP液→LP液界面→LP液→鋼板→超音波センサと伝播する。この時の伝播遅延時間とLP液の伝播音速を用い距離を算出する。鋼板を通過し易い超音波周波数は理論的に求められ鋼板板厚－最適通過周波数はFig.3に示すような特性となる。

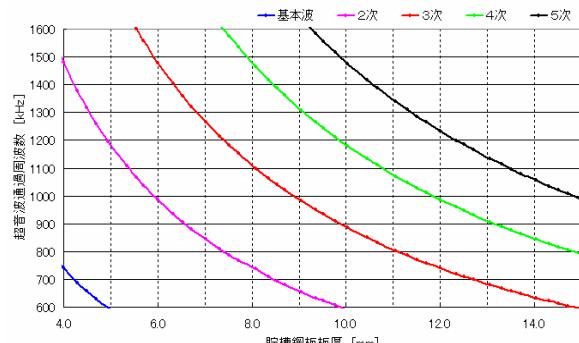


Fig.3 Thickness-Pass Frequency.

Fig.3に示した鋼板板厚と通過周波数の関係が成立しているかの検証として、φ300mm試験水槽、水深1mにて5mm～15mmまでの範囲を0.2mmステップでテスト鋼板を用い実験した。その結果、関係が成立している事が確認できた。

鋼板厚8.5mmでの超音波エコーのオシロスコープ波形例をFig.4に示す。12Vの矩形波を50μs印加し40dBの増幅器を介しエンベロープ検波した波形で、通過周波数の最適値より50kHz高いf=1100kHz、最適値のf=1050kHz、最適値より50kHz低いf=1000kHzのエコー波形を上から順に並べている。

周波数f=1050kHzでのエコー波形が波高値、反射エコー時間とも大きく最適であるといえる。

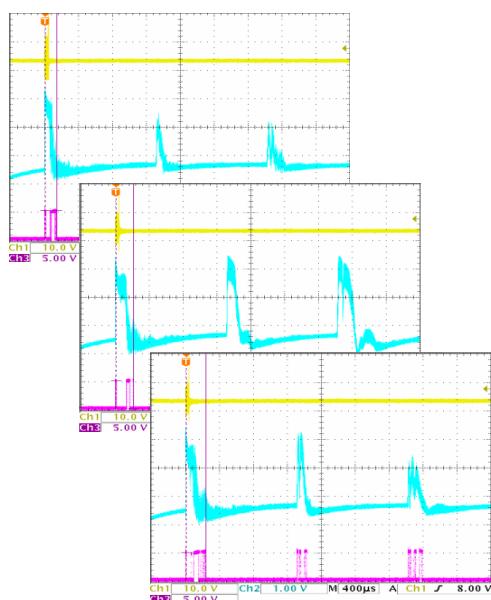


Fig.4 Echo oscilloscope wave form.

2-2 要素技術

2-2-1 超音波センサ

Fig.3に示すように、鋼板板厚5~15mmを効率良く通過する超音波周波数帯はおよそ800~1200kHzでありこれに対応した送受信タイプの超音波センサが必要である。バルク貯槽は寒冷地の冬季に-25°C以下まで液温が下がる場合もあり超音波センサに求められる使用温度範囲は-30~+60°C、屋外で冠水の可能性も考えられるので保護等級IP67を満たす構造が必要である。超音波センサ断面図をFig.5に示す。

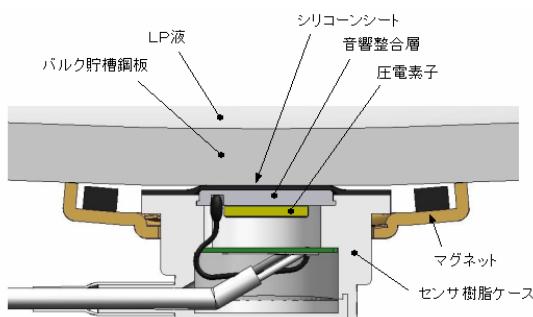


Fig.5 Ultrasonic Sensor.

2-2-2 音響設計

超音波センサと被測定物の音響結合を取る手法としてはシリコーングリス等を用いるのが一般的である。最適通過周波数の確認実験を当初はシリコーングリス結合で行ったが最適通過周波数から外れた超音波周波数でエコー感度が最大となることが散見された。

超音波センサの静特性の解析手法として周波数-インピーダンス特性があるがFig.6のようにセンサ単体では単峰の共振・反共振特性を示していたものが鋼板に取り付けると幾つものスプリリヤスが現れ、エコー感度の得られる周波数も複数になった。

この現象を理解するために圧電素子から見た負荷の影響として厚み縦振動を行う圧電素子の圧電方程式と縦波波動による波動方程式とを連性したモデル式を考案し圧電子の周波数-インピーダンス特性の変化を数値シミュレーションにて検証した。

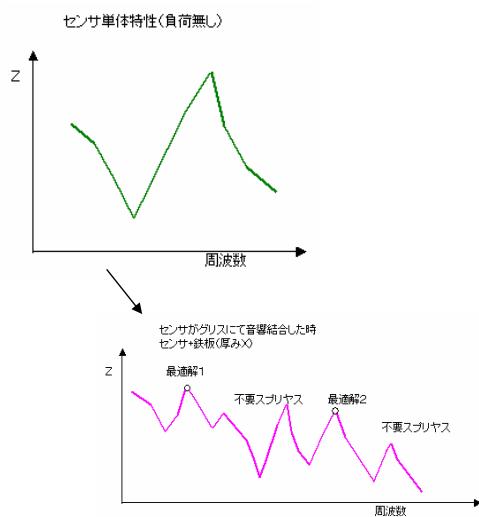


Fig.6 Frequency - Impedance.

Fig.7に超音波センサが鋼板に音響結合した状態のモデルを図示する。結合材Z2がシリコーングリスに相当する。実際のバルク貯槽では防錆の目的で0.1~0.3mmの塗装があるのでFig.7のモデルではZ2' として組み込んでいる。

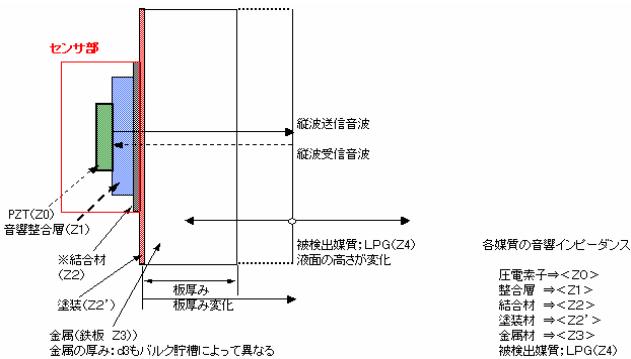


Fig.7 Match layer model.

検証結果をFig.8, Fig.9に示す。横軸が周波数、縦軸がインピーダンス比である。

Fig.8はセンサ単体にて音響整合層：Z1を適切な値にした場合のシミュレーション結果で圧電素子の反共振点周波数：faに一致した解がある。

Fig.9は音響整合層：Z1をFig.8の1/3にした場合のシミュレーション結果で超音波センサとしての反共振周波数が圧電振動子の反共振周波数からシフトしている事がわかる。

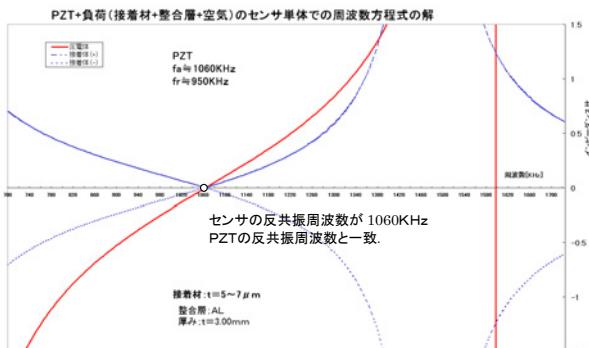


Fig.8 Freq. - Z ratio.

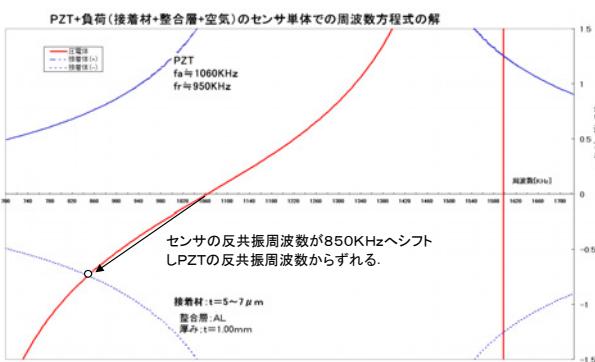


Fig.9 Freq. - Z ratio.

Fig.10にシリコーングリスによる音響結合にて鋼板厚：Z3=5.3mmの時の塗装：Z2'の影響を検討した結果を示す。塗装厚みが0.35mmと0.5mmの解析値を示すが0.35mmの条件ではクロス解が発生しないため感度低下が生じる事がわかる。

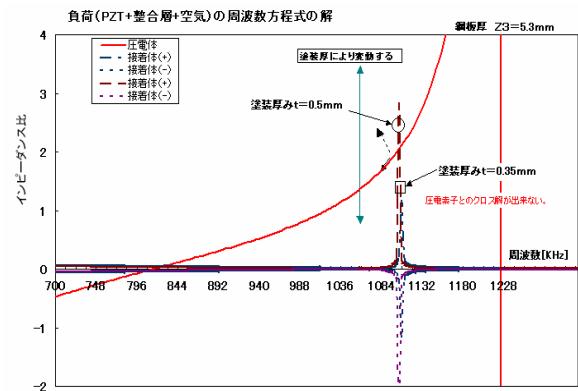


Fig.10 Freq. - Z ratio.

Fig.5の超音波センサは周波数帯域および音響整合条件が成立するように音響整合層の材質・寸法を設定し鋼板と超音波センサとの間にシリコンシートを介在させた音響結合方式を取っている。これによりFig.11に示すように貯槽鋼板に取り付けてもセンサ単体のインピーダンス特性と同等となり鋼板厚み・塗装厚みの影響もほとんど受けず鋼板の理論通過周波数で超音波の伝播効率が最良となる。



Fig.11 Frequency - Impedance.

超音波センサを使用周波数帯域内に共振点を持たせない方式も超音波探傷器等で使用されており超音波液面計としても原理的には可能であるが、電気一機械変換効率が低くリチウム一次電池で10年間稼動の市場要求を満たすには共振点の使用は避けられない。前述した音響整合条件を満たす超音波センサにすることにより実現できた。

2-2-3 液面計回路

Fig.3の理論通過周波数の確認実験から超音波センサの駆動周波数発生回路は600～1300kHzの周波数範囲で分解能1kHz、周波数精度は設定周波数の±5kHzが必要であることが判った。超音波液面計の商品コンセプトはリチウム一次電池で10年稼動であるので消費電力を抑えつつ機能を確保することが課題であった。

Fig.12に回路ブロック図を示す。

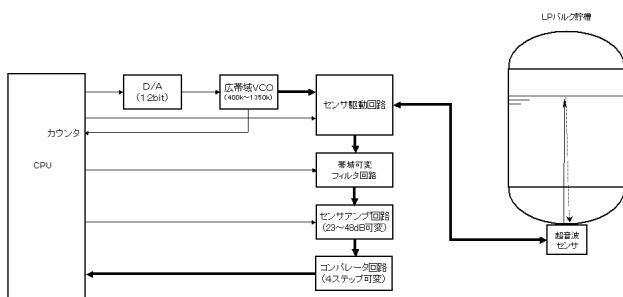


Fig.12 Circuit block.

広帯域VCO回路と12ビットD/Aコンバータで構成され発信回路系の消費電流は2mAとローパワーを実現している。広帯域VCOはCR発信回路タイプでCPUの内蔵カウンタで周波数校正し±1kHzの周波数精度を得ている。

電池消費電流の制約が無ければ10MS程度のA/Dコンバータを用いエコー波形をメモリに取り込み解析処理する手法が有用であるが、電池消費電流を抑えこむため低消費電力の可変センサアンプ・コンパレータ回路を用いて遅延時間計測とエコー波形解析を行っている。

3. 成果

3-1 板厚自動チューニング

3-1-1 エコー感度と残響時間の両立

超音波液面計では計測範囲が製品仕様として規定されている。計測下限値は超音波センサの自己残響時間で制約を受け、最大検出距離はエコー感度により決まる。

Fig.13に駆動周波数—第1エコー波高値の特性を示す。鋼板板厚：6.3mm、水深1mで駆動周波数を5kHzステップで変化させ各周波数でのエコー波高値をオシロスコープにて計測しグラフ化したものである。駆動周波数=945kHzがエコー波高値のピークでFig.3の最適通過周波数に合致している。また、Fig.14に駆動周波数—残響時間の特性を示す。超音波液面計としてはエコー波高値が50mV以上、残響値が250μs以下ならば計測範囲を満たせる。

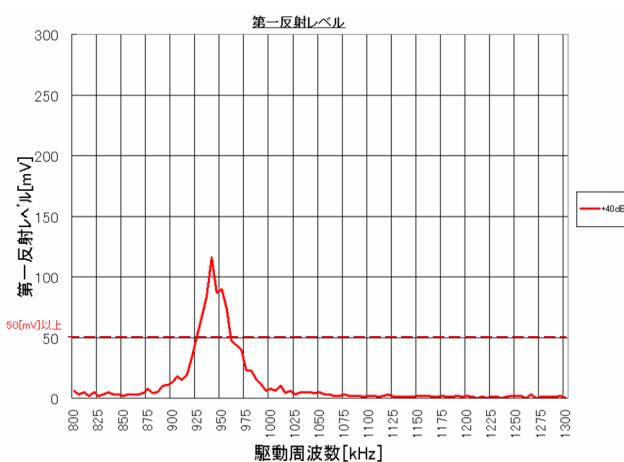


Fig.13 Frequency—Sensitivity.

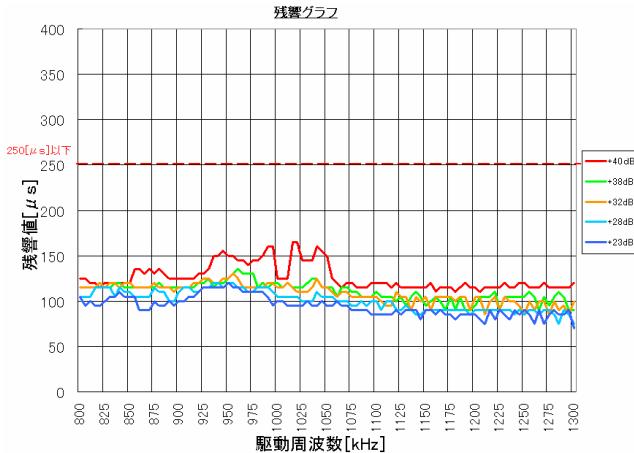


Fig.14 Frequency-Reverberation.

超音波を液面に向けて発射するとLP液中の伝播時間だけ遅れて再び超音波センサに戻ってくる（Fig.4参照）この時、周波数を変化させても出現確立の高い遅延時間位置にある最初のエコーを第1エコーと仮定する。LP液中で超音波はすぐに減衰しないでLP液内で反射を繰り替えし仮定した第1エコーの2倍の遅延時間のところに第2エコーが、3倍の遅延時間のところに第3エコーが現れるはずで、このように高次のエコーの有無を確認して第1エコーを確定する。

リベルⅡでは可変ゲインアンプ・コンパレータの組合せを5ステップ用意している。最初に最大感度のステップ1で周波数スキャンを実施し第1エコー時間領域にエコーを確認できた周波数に1カウントの重み付けを与える次に感度を1ステップ下げ同様に周波数スキャンしエコーを確認できた周波数に2カウントの重み付けを与える。最低感度のステップまで順次周波数スキャンしそれぞれの感度ステップで3カウント、4カウント、5カウントとゲイン設定と逆比例のカウント値を与える。ここで各周波数毎にカウント値を積み重ねるとFig.15のような周波数カウント値のデータが作成でき（=スコアグラフ）Fig.13のエコー波高値と相似のデータとなる。最低感度のカウント値（Fig.15では青色のカウント値）の中点が鋼板の最適通過周波数である。

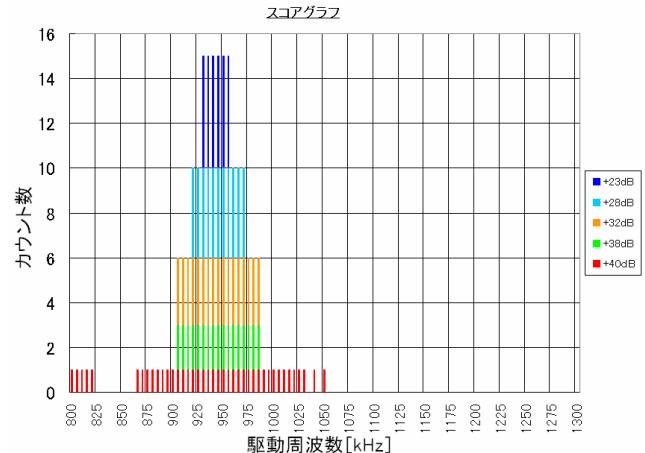


Fig.15 Frequency-Score value.

3-1-2 貯槽鋼板板厚範囲での確認

周波数カウント値による鋼板最適通過周波数の調整アルゴリズムで鋼板厚5~15mmの範囲で破綻がないか確認した。その結果、次の判断条件の導入により最適通過周波数に正しく調整することが確認できた。

- ① 最大カウント値の中心周波数でおかつ残響時間が規格以下の周波数。（事例 Fig.15）
- ② 最大カウント値のピークが同レベルで2個以上あつた場合はカウント値の周波数幅が広い周波数帯域の中心周波数でおかつ残響時間が規格以下の周波数。（事例 Fig.16, Fig.17）

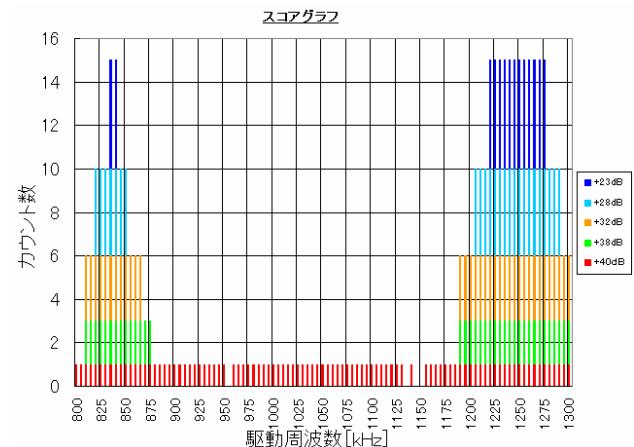


Fig.16 Ultra Frequency-Score value.

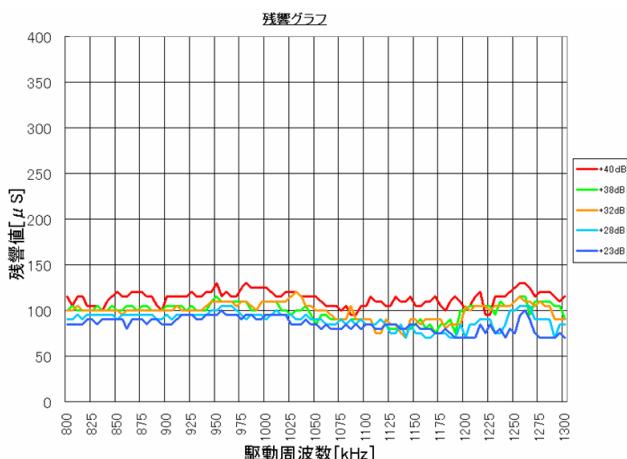


Fig.17 Frequency-Reverberation.

3-2 超音波液面計

今回開発した板厚自動チューニング技術を活用したバルク貯槽用超音波液面計「リベル II」を商品化した。

従来機種の「リベル」では消費電力の制約から超音波測定系の効率を優先する必要があり5~15mmの鋼板厚範囲を6種類の超音波センサタイプ、2種類のセンサ保持金具、約50種類のコントロールユニットタイプの組合せで実現していたので、生産効率・メンテナンス性に改良の必要があった。

今回開発した板厚自動チューニング技術と任意貯槽設定機能の採用でリベル II では1種類の超音波センサ・コントロールユニットと2種類のセンサ保持金具で実現し電池寿命も10年と倍増している。また、従来機のリベルで散見されたバルク貯槽板厚バラツキに起因する動作不具合も板厚自動チューニング技術により解決でき課題の一つであったメンテナンスコストの抑制も達成できた。

4. 今後の展開

バルク貯槽用超音波液面計の貯槽鋼板板厚に対する自動チューニング技術について紹介したがバルク配達システムは現在の消費量の多い業務・集合住宅向けから一般消費世帯向けの小型バルク貯槽へと緩やかではあるが拡大している。バルク貯槽サイズで300kg以下

の小型バルク貯槽は鋼板板厚も5mm以下と薄くリベル II では対応出来ない。

小型バルク貯槽は貯槽コストも安いため超音波液面計も安価に提供することを求められており小型バルク貯槽に適したシリーズ拡充が今後の課題である。

5. 謝辞

最後に、本開発にご協力いただきました素材メーカ様や試験装置メーカ様をはじめとした関連する多くの方々にご指導、ご支援をいただきましたことを心より感謝いたします。