



極低温における超音波流量計測に向けた計測システムの開発

Fukumoto Shintaro

福本 伸太郎^{*1}

当社は、約 -200°C の極低温環境下における非接触式液体流量計測システムの研究開発を行っている。計測対象は、宇宙分野のロケット用エンジン燃焼試験設備で使用される液化天然ガス (LNG)、液体酸素 (LOX)、液体窒素 (LN_2) などの極低温液体である。従来、これらの液体の流量は配管内に設置されたタービン流量計によって計測されているが、タービンの空回りを防止するために、試験前の予冷に多大な時間とコストを要するという課題がある。そこで、非接触式流量計測法として超音波流量計測に着目し、広温度範囲に対応した超音波プローブを用い、100 サンプル毎秒 (S/s) でサンプリング可能な計測システムの開発をした。さらに、流量計測の校正設備において常温の灯油の計測を実施した。その結果、開発した超音波流量計と校正用の標準器の相対誤差は、 $\pm 5\%$ 以下であった。

キーワード： 超音波流量計、伝搬時間差法、極低温、高速計測、クランプオン型

1. はじめに

非破壊検査は一般に常温で実施されることが多く、超音波による計測においては、通常の探触子には電気信号と機械振動を相互に変換できる性質 (圧電効果) のある圧電素子が用いられている。この圧電素子の両面には接着剤で電極が取り付けられている。しかし極低温や高温では、通常用いられる有機系接着剤は劣化や性能低下を生じるため、広い温度範囲で安定な接着手法が必要である。本稿における探触子では、接着の安定性を向上させる目的で、有機系の接着剤の代わりに金属接合による取付けを施した。圧電素子には、 -273°C

から約 1200°C まで圧電効果の損なわれることのないニオブ酸リチウムを用いており、図 1 に示すような構造になっている^{(1),(2)}。

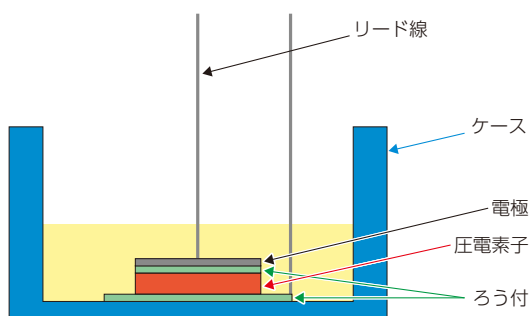


図 1 極低温用の超音波探触子の内部構造

*1：計測事業部 計測技術部 福浦グループ

極低温環境下における流量計測の適用先は、航空・宇宙・防衛関連分野が多く、ロケットなどのエンジン燃焼試験設備で用いられている、液化天然ガス (LNG) や液体酸素 (LOX)、液体窒素 (LN₂) などの流体をターゲットとしている。一般的にこれらの流量計測は、管内埋め込み式のタービンフローメータによって計測されている。しかしながら、タービンの空回りを防ぐためには試験前の予冷作業が必要であり、また機器の校正にも時間とコストがかかることが問題となっている。そのため、非接触での計測手法への代替が望まれている。本稿では非接触での流量計測として、超音波式流量計測に着目し、広い温度範囲で使用可能な超音波探触子を用いた計測システムを開発し、さらに

流量計の校正設備における計測結果についても報告する。

2. 計測システムの開発

2.1 探触子の作製

まず広い温度範囲での安定性および流体に入射する角度（屈折角）について検討した。前項の通り、一般的な超音波探触子は、圧電素子の接着部にエポキシ系樹脂を使用しているため、-50℃程度が温度限界である。そのため、-273℃から約1200℃まで圧電効果があるニオブ酸リチウムを用いて、純チタンの台座（超音波探触子のウェッジ）に直接アルミ系のろう材で取り付けけた。アルミ

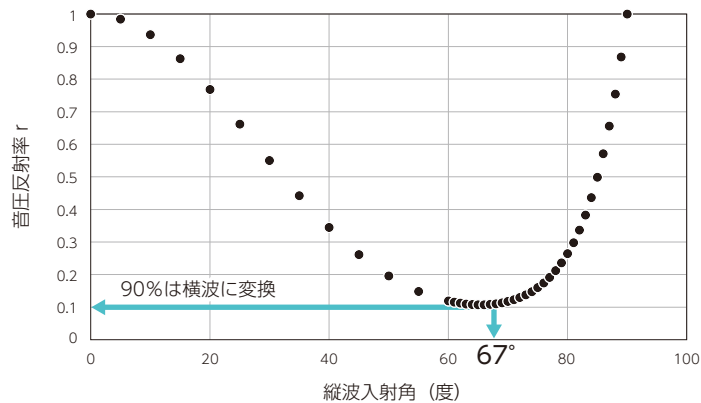


図2 チタンから真空への反射率（≒空気）

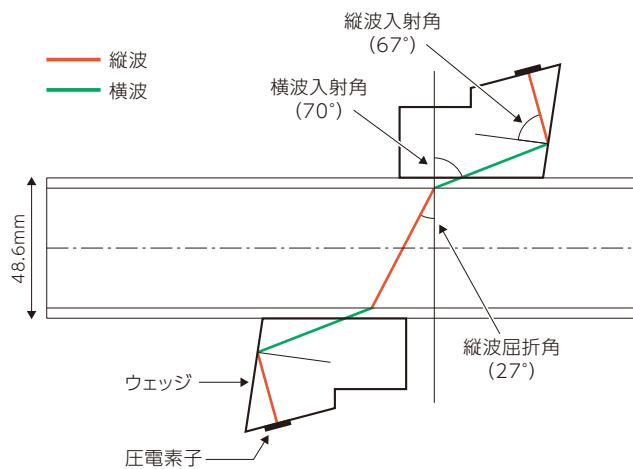


図3 配管へ設置したときの配置

合金は低温における耐力が室温より大きく、脆化による破損が起こらないことから、使用可能であると判断した⁽³⁾。

また本手法では、超音波の伝搬時間から流速を算出する。つまり流れの上流側と下流側に超音波探触子を設置し、上流側から発信した超音波を下流側で受信したときの伝搬時間と、下流側から上流側への伝搬時間を計測し、これらの時間差から流速を求める。このとき、精度の良い計測をするためには伝搬時間差が大きくなるように屈折角が大きいたことが望ましい。しかしスネルの法則により、物体の中を音波が進む速度、すなわち音速は物体により異なり、その境界では音速差が小さいほど屈折角が大きい。低温流体は水よりも音速が低く、配管材（SUS304）との音速差が大きくなり、屈折角が小さくなってしまう。この問題を解決するために、一般的な射角の探触子よりも屈折角を大きくできるように、ウェッジ内において超音波がモード変換する構造とした。屈折角の目標値を30°以上と設定し、音圧反射率や通過率によるエネルギー効率も考慮した。図2にチタンから真空（≒空気）への反射率を示す。図2より、縦波入射角が67°のとき、音圧反射率が0.1であることから初めに発信された縦波の約10%が反射し、残りの約90%は横波へモード変換される。これより、図3のような配管内に水（音速：1480m/s）がある場合、屈折角が27°となる設計とした。図4に作製した極低温用の超音波探触子を示す。

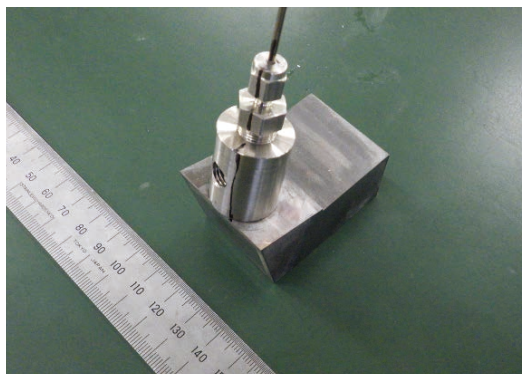


図4 作製した極低温用の超音波探触子

2.2 計測装置の開発

2CH パルサーレーザバ（JPR-600C）を使用し、流量値取得間隔が100S/s、かつ波形信号を取得できる計測システムを作製した。図5に計測系の構成を示す。このパルサーレーザバにより得られた各方向の超音波信号は100MHzでサンプリングしており、相互相関関数を用いて時間差の算出をする。次に得られた時間差の値を用いて流量値を算出する。算出式（1）を以下に示す。ここで、 Q は配管の流量[L/s]、 L は送受信子間の距離[m]、 θ は流体への入射角（屈折角）[°]、 c は静止流体中の音速[m/s]、 Δt は2つのプローブ間の送受信の時間差[s]である。

$$Q = \pi r^2 \times \frac{c^2 \Delta t}{2L \cos(90 - \theta)} \dots\dots\dots (1)$$

上記の計算はLabVIEWで作成したプログラム

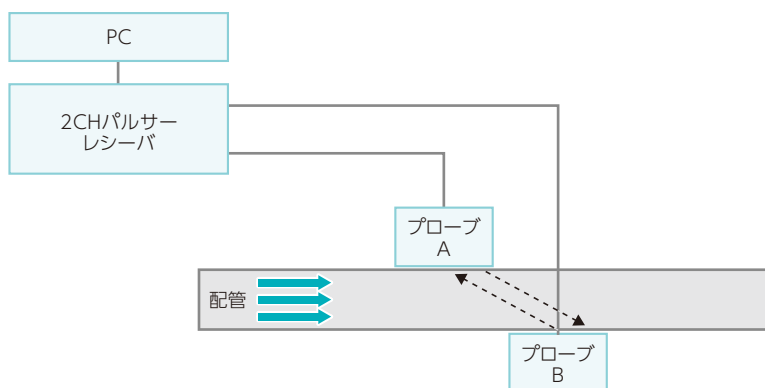


図5 計測系の構成図



図6 プログラムの操作画面

を用いた。このプログラムでは、超音波信号を読み込み、計測した2つの超音波信号の時間差を相互相関により算出する。また、算出した全ての時間差を1つのCSVファイルとして生成する。図6にプログラムの操作画面を示す。

3. 計測結果

3.1 概要および計測条件

計量法校正事業登録制度 (JCSS) の校正を実施している灯油検査ラインにおいて常温の超音波式流量計測を実施した。あらかじめ極低温用の超音波流量計および市販品の超音波流量計 (PT878) を40AのSUS304配管に設置し、ライン内に配

管を取り付けた。極低温用の超音波流量計の流量値取得間隔は100S/sであり、市販品は1～3S/sであった。

3.2 計測条件

試験流量は、20～1000L/minとした。試験は5通り実施し、いずれも初めに試験流量の最大

表1 試験工程

試験番号	流量 (L/min)
①	280,250,200,150,100,50,0
②	280,250,200,150,100,50,0
③	800,700,600,500,400,300,200
④	1000,700,400,300
⑤	130,120,110,100,90,80,70,60,50,40,30,20

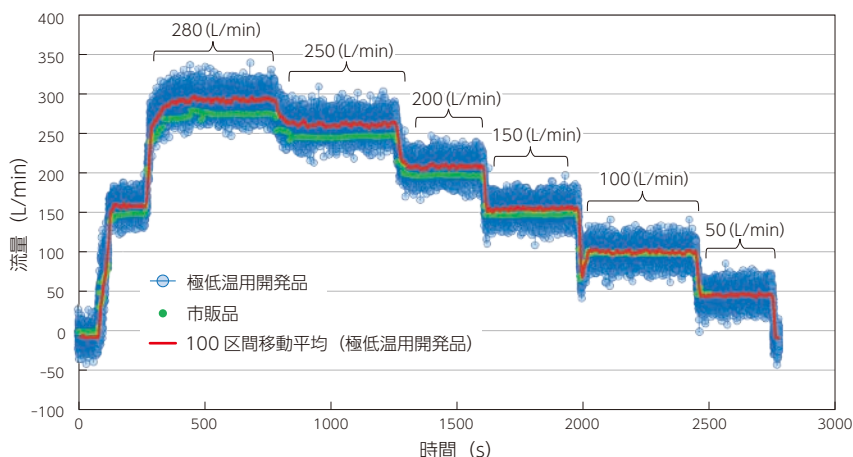


図7 試験①における流量計測結果

まで上げ、徐々に下げた。また各流量で定常状態になった後、120 秒程度の間流量を保持した。表 1 に各試験流量 (L/min) を示す。本設備には基準燃料油メータである容積流量計 (標準器) があり、積算体積を計測している。保持している時間における積算体積 (L) を時間で割ることで平均瞬時流量 (L/min) を算出し、この値と比較した。

3.3 計測結果

図 7 に試験①における流量計測結果を示す。青プロットは極低温用開発品の流量算出結果、赤プロットは結果に単純移動平均処理 (100 区間) をしたもの、緑プロットは市販品の結果である。この結果より、極低温用開発品、市販品ともに試験流量の変化と同様の結果が得られた。

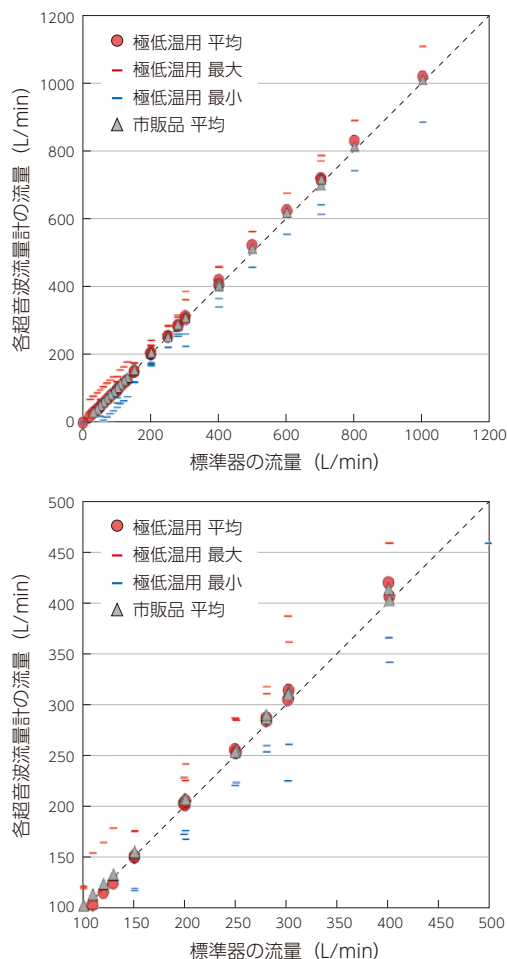


図 8 標準器に対する各超音波流量計の計測結果
(上：試験流量全体、下：100-500L/min)

また、図 8 に標準器に対する各超音波流量計の計測結果 (上：試験流量全体、下：100-500L/min) を示す。標準器の結果を横軸に、各超音波流量計の結果を縦軸とした。極低温用開発品の結果は平均 (赤丸)、最大値 (赤バー)、および最小値 (青バー) を示している。その結果、超音波流量計で得られた流量値は、1000L/min まで線形性を示し、容積流量計と同等の傾向であった。また極低温用の超音波流量計と標準器の相対誤差は、 $\pm 5\%$ 以下であった。また、100 ~ 300L/min の流量ではいずれも $\pm 2\%$ 以下だった。

4. おわりに

本稿では非接触での流量計測として、超音波式流量計測に着目し、広い温度範囲で安定して使用可能な超音波探触子を作製し、2CH パルサーレーシーバを使用することで、流量値取得間隔が 100S/s、かつ波形信号を取得できる計測システムを作製した。また、常温の灯油検査ラインの流量計測では、極低温用の超音波流量計と標準器の相対誤差は、 $\pm 5\%$ 以下であった。

現在までに、極低温における LNG、および LOX の流量計測を複数回実施している。今後、続報として報告し、既設のタービンフローメータの代替となりうるか検討していきたい。

参考文献

- (1) 三島宏行、吉川和夫、熱田美道、荒川敬弘：高温・低温用超音波探触子の開発と高温下の割れ監視技術、非破壊検査、第 38 巻、第 10 号、1989 年 10 月、pp.904-908
- (2) T.Arakawa *et al.*: Application of Brazed-Type Ultrasonic Probes for High and Low Temperature Use, Nondestructive Characterization of Materials, Vol.7 No.1, 1992.6, pp.263-272
- (3) 佐治重興、堀茂徳：アルミニウム合金の極低温における機械的性質、軽金属、第 39 巻、第 8 号、1989 年、pp.574-583



計測事業部 計測技術部
福浦グループ

福本 伸太郎

TEL 045-791-3518