

# 全光学式液面計による非定常低温流体の長距離測定

## Long-range measurement of nonstationary cryogenic fluid using an all-optical liquid level sensor

○及川 敏之\*, 二村 宗男\*, 三浦 茂男\*, 岡本 洋\*

○Toshiyuki Oikawa\*, Muneo Futamura\*, Shigeo Miura\*, Hiroshi Okamoto\*

\*秋田県立大学

\*Akita Prefectural University

キーワード: 低温流体(cryogenic fluid), 全光学式液面計(all-optical liquid level sensor),

連絡先: 〒015-0055 秋田県由利本荘市土谷海老ノ口 84-4 秋田県立大学 知能メカトロニクス学科  
電気エネルギー応用工学研究室 岡本洋, Tel:(0184)27-2187, E-mail:okamoto@akita-pu.ac.jp

### 1. はじめに

2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて再生可能エネルギーの普及が進んでいる。その中で、再生可能エネルギーの貯蔵媒体として液体水素や、液化空気発電において液体窒素など低温流体が期待されている。これらの低温流体を管理するためには液面計が必要となる。既存の低温流体用液面計の原理として、差圧式<sup>1)</sup>、静電容量式<sup>2)</sup>、超電導式<sup>3)</sup>がある。しかし、いずれも部品や電気配線が液体水素に浸っている。これにより、伝熱による液体の損失、電気による潜在的事故リスクが問題となる。また、液体タンクの大きさによって使用できる液面計が限られる。

そのような問題の解決のため、本研究では液体と接触せず電気配線を使用しない、測定する容器の大きさを選ばない光ファイバーを用いた光学式液面計の開発を行っている。

### 2. 測定原理

Fig.1 に測定原理を示す。センサーには正三角形に配置された光ファイバー3本、レンズ、フ

ァイバーバンドルが配置されている。光ファイバーを通して光を液面に照射し、液面からの光の反射像がレンズ、ファイバーバンドルを通してファイバーバンドル端面に映る。映った反射像をカメラで観測する。反射像は3つの光点の三角形となり、液面が高いと反射像が大きく、低いと小さくなる。このセンサーと液面間の距離に応じて変化する三角形の大きさを用いて液面の高さを測定する。

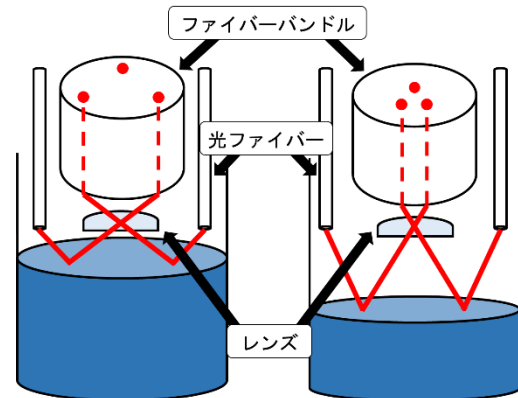


Fig.1 測定原理

### 3. 実験装置

Fig.2 に実験装置の全体図を示す. 今回の実験では液体窒素を使用している. 液体窒素タンクの口の部分に製作した全光学センサーを配置し、その上に反射像を観測するためのカメラを配置した.

Fig.3 に製作した全光学センサーを示す. センサーはアルミニウム製であり, 3本の光ファイバー, ファイバーバンドル, レンズが配置されている. 光ファイバーとファイバーバンドルの導入には Swagelok 社のウィルソンシール(商品名ウルトラトル)を使用した. 光ファイバーの先端は正三角形形状に配置されており, その中心にレンズが配置されている. レンズ側が液面側となり, 光ファイバーの先端から液面に光を照射し, 液面からの反射像をレンズ, ファイバーバンドルを通してタンク外側のファイバーバンドルの端面より反射像を観測する.

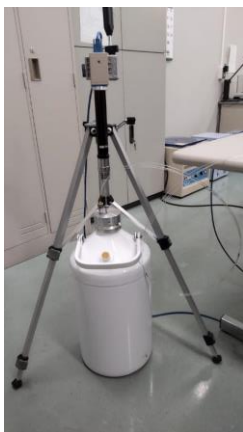


Fig.2 実験装置全体図

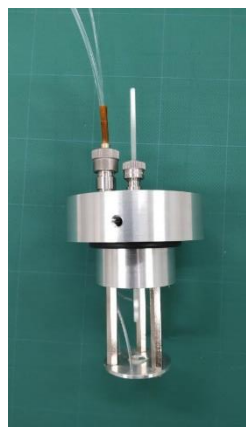


Fig.3 全光学センサー

### 4. 実験

#### 4.1 定常状態での実験

実験では液面とセンサー間の距離を計測したのち, 光を液面に照射して反射像を撮影し, 画像処理にて光点間の距離を計測する. それによって液量と反射像の大きさの関係を求めることが出来る. Fig.4 に液面が定常状態で観測した反射像を示す. この時の液面からセンサーのレンズまでの距離は(a)が 12 cm, (b)が 21 cm である. これより液面が高ければ三角形が大きく, 液面が低ければ三角形が小さくなるのが分かる. 観測した画像より MATLAB ソフトを用いた画像処理にて光点の位置, 光点間の距離を求める. Fig.5 に求めた液量と反射像の大

きさの関係を表したグラフを示す<sup>4)</sup>.

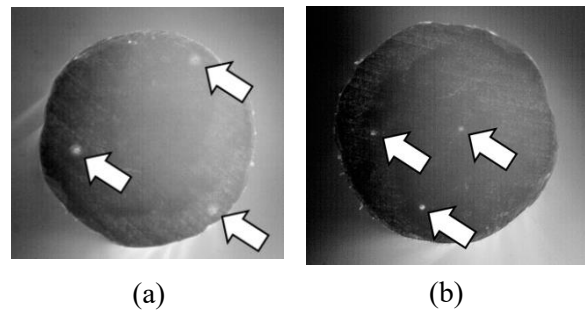
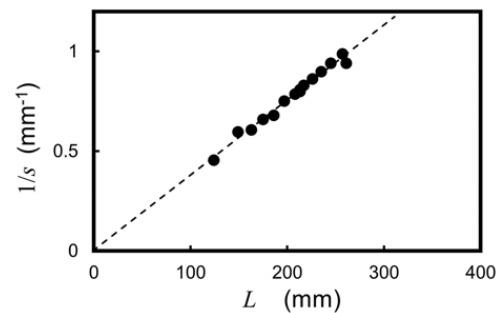


Fig.4 定常状態での反射像



s: 反射像の光点間のファイバーバンドル上の距離  
L: 液面とセンサーまでの距離

Fig.5  $s^{-1}$ の液面に対する依存性

#### 4.2 非定常状態での実験

Fig.6 に照射用カップラーを示す. 光ファイバー3本に安定した光を供給するために製作した. 光源には赤色半導体レーザーを使用した. レーザーの光が, レンズを通して固定されている光ファイバーの先端に集光するように設計した. また, レーザービームの反射を防ぐため, カップラー本体は黒色塗料でコーティングしている. また, 3つのレーザーは個別に点灯させることが可能である. 液面計は液体の充填時や地震などの災害時など, 液面が非定常状態での測定が必要となる. 非定常状態の場合, 反射像の光点は動いてしまうため, 複数の画像データを平均化して位置を計測する. しかし, 3つの光点を用いると液の揺れ動きが激しい場合に互いに重なるため, 平均化して計測するのは困難である. そのため, 画像データには光点1つずつの反射像が必要である. レーザーはインターフェース(NI USB-6002)を通して PC と接続しており, Python を用いて順番に 0.1 秒ずつ点滅するようにプログラムしている. 観測に使用しているカメラは 1 秒間に 100 コマ撮影することが可能なため, 1 秒間にそれぞれの光点の反射像を約 30 枚撮影することが可能となる.

Fig.7 にレーザー用電源回路を示す. 半導体レーザーへの入力にパルスやスパイクが発生するとレーザーの寿命が短くなる. そのため, 電源電圧がスムーズにオンオフするようにベッセル特性を持つローパスフィルタ回路を設計した. 回路は 4 次フィルタであり, カットオフ周波数が約 18 Hz, 時定数がステージ 1, 2 ともに約 8 ms の緩やかな応答になるよう設計している. また, 使用レーザーの動作電流は 12 mA であり, 通常のオペアンプでは出力が小さい. そのため, ローパスフィルタ回路にパワーオペアンプを用いたボルテージフォロワを接続し 12 mA の出力を可能としている.

Fig.8 に液面が非定常状態の時に観測した反射像を示す. 観測データでは光点を一つずつ観測することができており, これらを平均化することによって光点の位置を求められると考えられる.



Fig.6 照射用カップラー

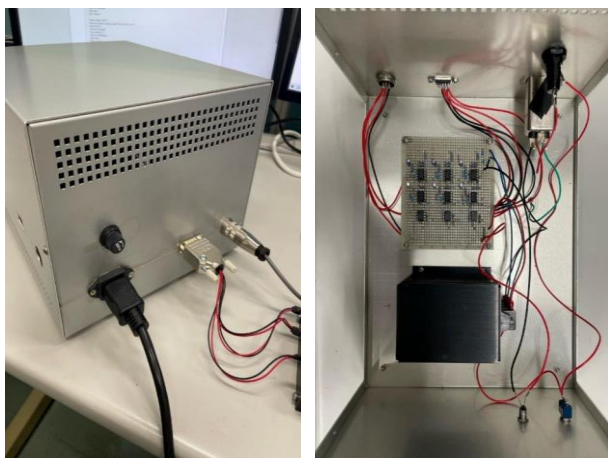


Fig.7 レーザー用電源装置

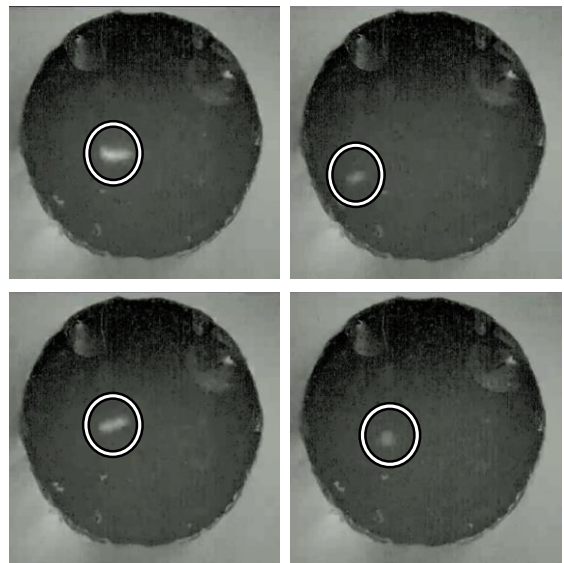


Fig.8 非定常状態での反射像

#### 4.3 長距離測定

Fig.9 に液面とセンサー間が長距離時の実験のために製作したチューブを示す. 長さはそれぞれ 1 m であり, 連結させて最大距離 2 m とすることが可能である. チューブ内部での光の反射を防ぐために, 黒くコーティングしてある.

Fig.10 は液面ではなく鏡からの反射像をチューブを使用して観測した画像である. チューブを使用する際の長距離測定の実験において, 光点の反射像をファイバーバンドルに映すためには液面に対してセンサーが垂直になっている必要がある. 液面は重力によって地面と水平になるが, タンクやチューブが傾いていると反射像の観測は困難となる. そのため, 長距離での実験の時は液面とセンサーが垂直になる調整が必要となる.



Fig.9 長距離測定用チューブ

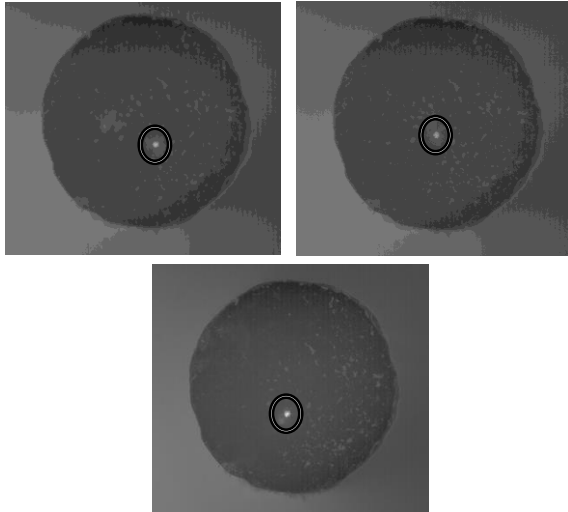


Fig.10 鏡からの反射像

## 5. 今後の課題

液面が非定常状態の観測では、観測データを平均化して光点の位置の計測を可能にすることが課題となる。平均化するためのアルゴリズムについては生体イメージング、天文学分野に先行研究がある<sup>5,6)</sup>。

長距離測定では、Fig.11 のようにセンサー、チューブ、液体窒素タンクを配置して実験を行ったが、反射像を観測することができなかった。光の強さは距離の2乗に反比例するため、1 m の距離で使用しているカメラで観測できない強さだったと考えられる。そのため、センサーの位置を可変式にしてどの高さから観測できなくなるか調査し、また照射用光ファイバーの先端にレンズを配置して集光した光を液面に照射することを今後進めていく。

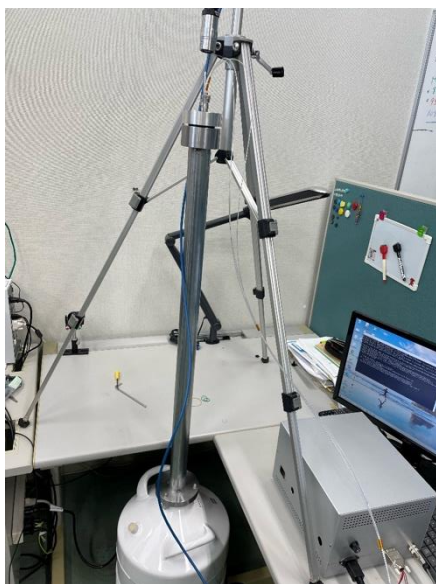


Fig.11 長距離測定実験全体図

## 参考文献

- 1) W. A. Olsen, A Survey of Mass and Level Gauging Techniques for Liquid Hydrogen. In: K.D. Timmerhaus (eds), Advances in Cryogenic Engineering, vol 8. Springer, Boston, MA. (1963).
- 2) Koichi Matsumoto, Masamitsu Sobue, Kai Asamoto, Yuta Nishimura, Satoshi Abe, and Takenori Numazawa, Capacitive level sensor for liquid hydrogen, Cryogenics **51**, 114-115 (2011).
- 3) Ch. Haberstroh and G. Zick, A Superconductive MgB<sub>2</sub> Level Sensor for Liquid Hydrogen, AIP Conference Proceedings **823**, 679 (2006).
- 4) Muneeo Futamura, Toshiyuki Oikawa, Shigeo Miura, and Hiroshi Okamoto, All-optical non-contact level sensor for liquid hydrogen, J. Phys. Conf. Ser, **2545**(1) 012033-012033 (2023)..
- 5) Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. Vol. 53, No. **182**, pp. 307-310, 2011
- 6) Biophysical Journal Volume **82** May 2002 2775-2783