

近畿大学理工学部 正員○江藤剛治

近畿大学理工学部 正員 竹原幸生

1. はじめに

水中の物体や粒子と水の相互運動は3次元性が強い。3次元運動の計測にはPTV (particle tracking velocimetry) などの可視化計測が有効である。透明性が高く、水と屈折率の等しい材料で物体を作れば、光が直進し、物体に遮られることなく、物体の向こう側の水や他の物体の運動も可視化計測することができる。点計測でもレーザ流速計のような光学計測においては水と水中物体の屈折率を合わせることができれば非常に有効な実験手段となる。著者らは、このような技術を Refractivity Matching (屈折率マッチング) と呼んでいる。

当初、屈折率が純水の屈折率 1.333 に等しい透明固体材料に関する文献調査を行ってきたが、これまでのところ実用性の高い材料は見つかっていない。水に薬品を加えれば通常屈折率は上がる。それでも石英(純粋ケイ酸)ガラスの屈折率 1.458 以上にすることは困難である。石英ガラスは通常のガラスの中では屈折率が最も低い。プラスチック材料やある種の結晶の中には透明で屈折率が 1.4 前後の低いものがある。現在のところ、水と物体の屈折率を合わせようとするれば、低屈折率透明材料を用いると同時に、水に薬品を加えて屈折率を上げる(高屈折率水溶液)という方法を用いざるを得ない。

水に薬品を加えれば屈折率だけでなく他の物性も変わる。密度、粘性などは実験結果の補正に必要である。波高計などの計測器を併用するためには、電気伝導度や誘電率などが大きく変化するので、抵抗器やコンデンサーなどを変える必要がある。ほとんどの薬品は実験後そのまま放流すれば汚染の原因となる。屈折率についても、温度や光の波長依存性があり、わずかの差でも物体の周辺部を接線方向から見るときに不都合を生じる。

本報告では水の屈折率を上げるため、いくつかの薬品を選び、その水溶液の物性について調べた。また、低屈折率透明体としてシリコンゴムを用いる場合を例にして計測手法を紹介する。

2. 対象物質

手近な溶質としては塩化ナトリウム、しょ糖、グリセリンがある。しょ糖やグリセリン水溶液は非常に粘性が高くなるので、屈折率を上げる目的には適さない。飽和塩化ナトリウムの屈折率は 1.381 である。低屈折率材料の屈折率は 1.4 前後であるから、塩化ナトリウムが使えるのは非常に屈折率が低い材料に限られる。その場合でも飽和に近い水溶液の安定性には問題がある。ヨウ化ナトリウム、ヨウ化カリウムの水溶液は粘性が大きく変化せず、飽和時には石英ガラスの屈折率 1.458 に近い高い屈折率を得ることができる。以上より、これらの溶液について水理実験に直接関係があると考えられる物性についてとりまとめた。

3. 試験法と結果

屈折率はナトリウムD線(波長 589.3 nm)の屈折率で定義される。当然、温度や圧力、電場・磁場などにより変わる。

屈折率の測定は、アッペ屈折率計を用い著者らが測定した。溶液の屈折率の温度依存性を調べる場合を除いて、物性試験中は周囲の温度は 20℃前後に保つように努力した。

調査および計測結果の例を図-1および表-1に示す。

ヨウ化ナトリウム、ヨウ化カリウムを用いる場合の2~3の注意事項を述べておく。

①比較的に濃い溶液を1~数日放置すると淡黄色に着色する。これはヨードが分離するためである。長期間使用すると水槽も着色するようである。分離したヨードには殺菌性(当然弱い毒性)がある。

②着色溶液を無色透明に戻すには極少量のチオ硫酸ナトリウムを加え、分離ヨウ素を中和すれば良い。

Takeharu Etoh, Kohsei Takehara

- ③実験終了後溶液を排水するときにも水処理を必要とする。
- ④水道水を用いる場合に比べて金属の腐食性が大きくなるので、器機の種類、器機や実験室の管理においては塩水を用いる場合と同様の防錆に対する考慮が必要である。
- ⑤電気的な特性が大きく変わるので、電気的なセンサーを用いた計測器を併用する場合はコンデンサーや抵抗器などを変える必要がある。

4. シリコンゴムを用いた低屈折率透明体

シリコンゴムには製法や混合物によって多くの種類がある。低屈折率で透明度を上げたものに信越化学社製 KE-106、KE-108 がある。次のような特徴、長所がある。

- ①屈折率は KE-106 で 1.408、KE-108 で 1.406 と非常に低い（著者らの測定）。
- ②化学的安定性も比較的高く毒性もほとんどない。
- ③KE-108では2種の粘性の低い液を混合し、型に入れて 24 時間放置するだけで良いので整形も極めて簡単である。KE-106 は 150℃に熱すれば 30 分で固まる。

このようにシリコンゴムは物体周囲の流れや浸透流の実験には極めて有効である。しかしながら次のような不都合な点がある。

- ④強度が十分でない。弾性のある、もろい消しゴムのような透明体である。
- ⑤比重が1前後である。水の屈折率を 1.40～1.41 にするには、ヨウ化カリウムであれば約 36 ～ 39 %の水溶液とする必要がある。従ってシリコンゴムは水上に浮かんでしまう。
- ⑥水溶液と屈折率の波長依存性が異なる。よって完全に屈折率を合わせようとするれば、レーザーなどの単一波長の光源を用いる必要がある。

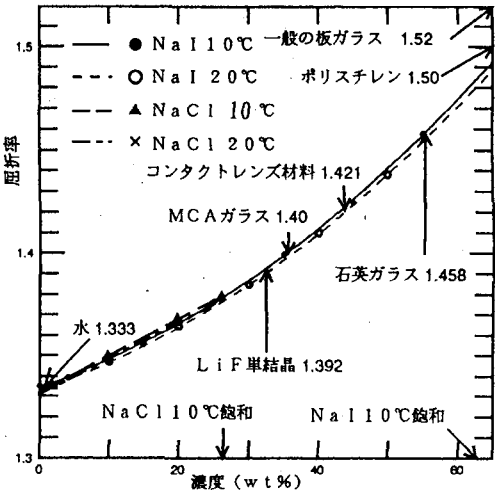
第4の問題に関して、より柔らかい、あるいは硬いシリコンゴムもあるが、透明性が落ち、屈折率も上がる。

第5の比重の問題も大きい。たとえばシリコンゴムで粒子を作っても、水中で浮かぶので、移動床実験や液状化の実験には使えない。

5. 適用例

適用例として以下のようなものがある。

- (1)振動流によるテトラポッド周辺の流れと乱れの計測
（大阪工業大学井田助教授が計測）
- (2)自由浮上球と流れの相互運動（著者らが計測中）
詳細は発表時に報告する。



図－1 屈折率と濃度の関係
（点は実測値、曲線は最小自乗法により近似した2次曲線）

表－1 屈折率を上げる物質

化合物	溶解時の水溶液		飽和濃度*1 (w t %)	飽和時の屈折率*2
	色	熱反応		
ヨウ化カリウム	40%付近から黄濁する。	吸熱	57.6	1.453(1.456)*3
ヨウ化ナトリウム		発熱	62.8	1.484(1.496)
ヨウ化リチウム	白濁	発熱	61.1	(1.490)
塩化ナトリウム	透明	なし	26.31	1.381

注) *1 飽和濃度は化学便覧による10℃でのものである。
 *2 飽和時の屈折率は実測した各点に最小自乗法により近似した式に化学便覧の飽和濃度を当てはめた値。
 *3 括弧内の数字は化学便覧による値。