



# 球体のはなし



柴田順二（芝浦工業大学名誉教授）

● **自然環境と生態系** 環境アセスメントを始めとして、エコロジーに対して殊更喧しい昨今の世相である。とは言え、地球温暖化などはカオスで人智の及ばぬ自然現象と見られ、因果関係の立証は容易なことではない。そのためこの種の問題と対峙した時、先入観や情緒論など非科学的な世論が横行しかねない。もちろん、地表の約7割を占める海洋が地球環境や生態系にとって大きな役割を演じていることだけは確かである。例えば、海水密度の微妙な変化が対流・移流、ひいては海流にまで影響を及ぼす。したがって、世界規模での海水の密度（塩分濃度）や水温変化の追跡によって、気候変動や海洋変質を解明する端緒を開くことができるはずであり、既に WOCE や Argo 計画などの国際協力プロジェクト（米、英、日、独など30カ国以上が参加）が1990年来、この調査を継続している。

● **水/海水の密度とその変化** 純水の密度は温度の低下と共に増加し、摂氏4°Cで最大値（0.99997 g/cm<sup>3</sup>）を示すことが知られている。しかし、1°Cの温度変化がもたらす水の密度変化は僅か0.00001 ~ 0.0002 g/cm<sup>3</sup>程度に過ぎない（表1）。一方、標準平均海水 SMOW（Standard Mean Ocean Water）の密度は1.025とされるが、一般には水温、塩分濃度、水圧などにより1.020 ~ 1.030の範囲で変動する。したがって、その追跡には密度変化0.0005 g/cm<sup>3</sup>程度の計測感度、測定分解能： $10^{-4}$  ~  $10^{-5}$  が必須な前提条件となる。「ものづくり」の

表1 純水密度の温度変化

純水の密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	
2°C :	0.999 <u>94</u>
4°C :	0.999 <u>97</u>
6°C :	0.999 <u>94</u>
8°C :	0.999 <u>85</u>
10°C :	0.999 <u>70</u>
12°C :	0.999 <u>49</u>

世界に譬えるならば、精密・超精密領域を軽く越えた、ナノ技術に相当する測定の難易度である。

● **水/海水の密度測定器** 熱帯魚や海洋・水生生物の飼育水を作るに際し、浮秤（浮標）型比重計が使用されている。代表的な赤沼式海水比重計の仕様によれば、測定精度は有効数字4桁（相対測定精度 $10^{-3}$ ）と言ったところであろうか。これでは、水棲生物の環境や生態系を調査するに必要とされる水密度の測定感度を確保することは難しい。それでは如何にして水/海水密度の慣用器具による測定精度（ $10^{-3}$ オーダー）を2桁アップさせ、 $10^{-5}$ オーダーの測定分解能を保証することができるであろうか？ それには密度標準球を用いての浮力測定法に頼るのが、今日での常套手段となっている。

● **球体による液体密度の精密測定法** 水/海水密度の精密測定には至って単純・原始的ながら、密度標準物体による浮力測定法に勝るものは無い。この方式を応用した比重天秤の原型を図1に示している。なお今日では、図2の測定原理に基づく電子天秤型に替っている。ここ

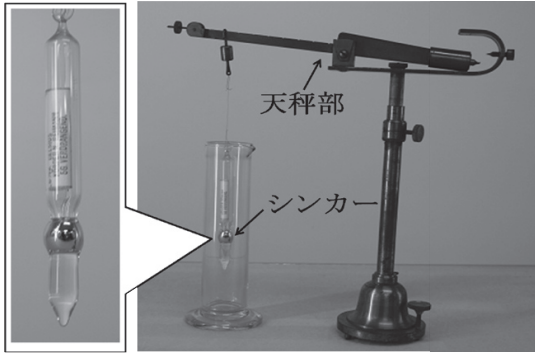


図 1 モール氏比重天秤

では、水に沈める標準物体の厳密な密度値  $\rho_m$  (= 質量  $M$  / 体積  $V$ ) を予め知っておくことが必要であり、それには供される標準物体密度精度の信頼性について検討しておかなければならない。物体密度の決定にはその質量  $M$  と体積  $V$  の計測が必要である。前者に関しては、高精度の質量測定機器により直接測定することで十分対応が可能である。想像以上に難関なのが、直接測定が難しい後者(体積  $V$ )への対応である。一般的には、長さ測定を介して体積を算出する間接法に頼ることになる。長さ測定のみから正確な体積を求められる形体として、ファセット角度や稜・角を持たない球体が最適と結論される。ただしこの前提として、球体が完全なる真球体でなければならないのである。したがって、この球体の真球度をどこまで高められるかが、浮力による密度計測法にとっての最大の技術課題となるのである。

● **標準球とその真球度** 液体の密度  $\rho_w$  を  $10^{-5}$  の精度(有効数字 6 桁)で測定することは、如何にして球体密度  $\rho_m$  の精度  $10^{-5}$  を確保できるかに掛っている(図 2)。球体密度  $\rho_m$  を特定するに際し、質量 ( $W$ ) や球体直径 ( $2r$ ) の測定精度  $10^{-5}$  には何ら問題はない。体積  $V$  の精度 ( $10^{-5}$ ) 確保に当たって問題となるのが、幾何学

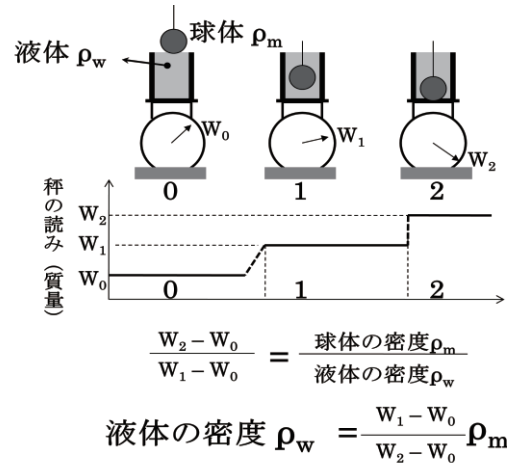


図 2 浮力による液体密度の測定

的誤差である。球の体積  $V$  を算出する公式 ( $V = 4\pi r^3 / 3$ ) が完全真球を前提としたものであることから体積精度の議論にとって、供される球体にどれ程の真球度を付与できるかが問われているのである。例えば、直径  $\phi 20\text{mm}$  の球体に対する許容真球度の概算値を算出すると求められる真球度は約 250 nm 以内と見積もられる。

● **標準球の研磨加工** 現実問題としては、体積誤差を許容値内に収めるべく基準球体を  $10^{-6}$  程度以内の真球度に磨きあげなければならないことであるが、それは正に「真球を極める」世界であり、今日のハイテク加工技術を駆使しても簡単に成就できるものではない。この加工工程での決め手は、言うまでもなく球面ラッピングという研磨技能である。ともあれ、グローバルな水環境変化の科学的な追究は「真球」という理想球体とそれを創成する研磨技術を抜きには遂行し得なかった、という事実を知った時、これまで歯牙にもかけなかった真球テクノロジーに対する評価や価値観が少し変わってくるのではなかろうか。