

# 液体の水のクラスターに関する誤解について

山形大学理学部物質生命化学科 天羽優子

## 1 はじめに

この二十年、「クラスターの小さい水はおいしくて体に良い」「水処理によって水のクラスターを小さくできる」という間違った説が世間に広まっていたが、液体や溶液を専門に研究している人達は、研究の間ではこの説を全く相手にしていなかった。さらに、水処理によって水を「活性化」できるとされ、「活性化」された水が人にとって有用であるという宣伝が広く行われていた間、水の研究者の間で「活性化」が取り上げられたことは無かった。

私が、水クラスターの話をもっと知ったのは1990年頃で、この話が登場して間もない頃であった。1993年頃に参加した研究会では、水クラスターの話のもとになった水の $^{17}\text{O}$ -NMRの $T_2$ 緩和時間が、pH7付近で、pHに敏感に依存するという指摘があった。私は、NMRで水クラスターを評価する話はこれで決着がついたと考えていた。ところが、その数年後に、酒造会社に就職した後輩から、「クラスターの小さい水で酒を造るとおいしいという話について確認せよ、と上司に言われた」という話を聞き、水クラスターの話がまだ続いていたことに驚いた。そこで、「水のクラスター ―伝搬する誤解―」を書いて、ウェブで公開した[1]<sup>1</sup>。その後も、液体の水のクラスターを小さくするという俗説は、既成事実として出回り続けている。

水のクラスターの話がここまで流行したのは、一体何が原因だったのか、今後どうすればいいのかについて考察してみたい。

## 2 「水のクラスター」の本来の意味

「クラスター(cluster)」は学術用語で、物理学辞典(改訂版、培風館、1992)によると、「[1]原子核で、局所的に強く相関(相互作用)しあっている核子(陽子と中性子)の部分的な小集団」「[2]複数個の原子、分子の集合体」の意味がある。学術用語としての、[2]の意味での「クラスター」は、「孤立した原子、分子と凝集系の橋渡しをするもの」と位置付けられており、凝集系である液体の内部に「クラスター」が存在することはそもそも想定されていない。研究対象としての「水のクラスター」は、気相中における水分子数個から数十個集まった塊で、微小な液滴を断熱膨張させたり、液体表面をイオン化して水分子の塊を引きはがすことで作られ、質量分析などの測定が行われている。

「水クラスター」を用いて、水の評価をすることのきっかけとなったのは、松下氏の報文である。報文の中では、当時のまずい水の例として練馬区の水道水を、おいしい水の例として昭島市水道水を取り上げ、 $^{17}\text{O}$ -NMRの線幅を測定し、それぞれ124 Hzと84Hzという結果を得た。このデータの解釈として、「対象としている分子の運動が速くなると、緩和時間は長くなるので、結局、信号の線幅が狭くなるのは分子が活発に運動していることを示すことになる。水の場合は、平

<sup>1</sup> 来年度以降は、[www.cm.kj.yamagata-u.ac.jp](http://www.cm.kj.yamagata-u.ac.jp)に移転予定。

均的に分子集団の小さい割合が増加し、運動が活発化したと解釈される。」とされた。さらに、「よりおいしい水に変えるためには、なんらかの方法で水の分子集団を小さくしてやれば良いことになる。」と主張した。ここから話が発展して、「クラスターの小さい水はおいしくて健康によい」「水に何らかの処理をすることで水クラスターを小さくできる」という間違った説が広まった [2, 4, 3]。

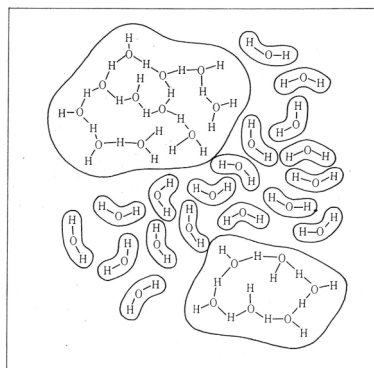


図 1: 水のクラスター。松下：「食品と開発」 vol.24 No.7 p.82。

一見解りやすい図であったため、その後、図 1 は引用され、あるいは描き直されて、水処理装置の宣伝に多用されることになってしまった。<sup>2</sup>

### 3 どこがどう間違っていたのか

そもそも、<sup>17</sup>O-NMR の線幅から得られるのは、水の中のプロトン交換（移動）速度であって、水分子そのものの動きやすさでもなければ、水クラスターのサイズでもない。プロトン交換速度は、pH7 付近で水の pH に依存するため、<sup>17</sup>O-NMR の線幅の変化は、pH7 付近の水の pH の違いと対応している [5]。分子運動の指標になるのは、線幅と結びついている  $T_2$  緩和時間ではなく、 $T_1$  緩和時間の方である。

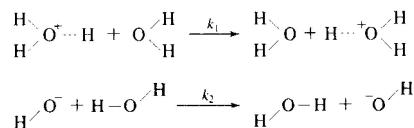


図 2: プロトン交換。上平「水の分子工学」 p.99.

上平らは、Halle と Karlström の式 [6, 7] を訂正し、次のような式を得た [5, 8]<sup>3</sup>。

$$M = i\omega_1 M_{eq} \tau_{ex} \{ (8S^2 + 5S + 4K^2) / 2S(4S^2 + 4K^2 - 1) \} \quad (1)$$

<sup>2</sup>一方、日本電子（株）は、水クラスターが NMR で測定できるという話が出回って間もない 1990 年に、[10] を出した。この情報が広まっていれば、NMR で水クラスターが評価できるという話はもっと早く消えたかもしれない。残念ながら自社製品ユーザー向けの媒体であったので、情報伝達の範囲が限られていて、十分に効果がなかったのかもしれない。

<sup>3</sup>修正した式は「水の分子工学」に掲載されているが、現在ではこの本が入手困難であるため、ここに引用しておく。Halle の論文にあたるつもりがないなら、数式部分は飛ばして読んでも差し支えない。

ただし、

$$S = \tau_{ex}/T_1 + 1/2 + i(\omega - \omega_0)\tau_{ex} \quad (2a)$$

$$K = 2\pi J_{OH}\tau_{ex} \quad (2b)$$

ここで、 $M$  は全複素磁化、 $\omega_1 = \gamma \vec{H}_1$ 、 $M_{eq}$  は平衡磁化、 $\omega$  は角周波数、 $\omega_0$  は共鳴角周波数、 $T_1$  は  $^{17}\text{O}$  のスピン-格子緩和時間、 $J_{OH}$  は  $^1\text{H}$  と  $^{17}\text{O}$  のカップリング定数である。プロトン交換が速い場合、 $^{17}\text{O}$  の半値幅  $H_W$  は、

$$H_W = H_{W(ex)} + H_{W(r)} \quad (3a)$$

$$H_{W(ex)} = 4\pi J_{OH}^2 \tau_{ex}, \quad H_{W(r)} = 1/\pi T_1 \quad (3b)$$

で与えられる。プロトン交換時間は、

$$\frac{1}{\tau_{ex}} = \frac{2}{3} k_1 C_{H^+} + \frac{k_2 K_W}{C_{H^+}} \quad (4)$$

で、 $K_W$  は水のイオン積、 $C_{H^+}$  は水素イオン濃度である。

図3は、25°Cにおける水の  $^{17}\text{O}$ -NMR の線幅と、 $^2\text{H}$  および  $^{17}\text{O}$  の  $T_1$  緩和時間の pH 依存性を示したものである。pH7は純水の測定である。その他の pH は、純水に、微量の NaOH と HCl を加えることで変化させている。

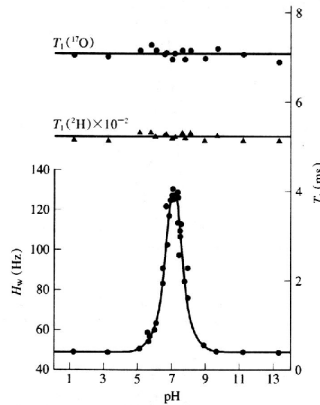


図 4.10 水の  $^{17}\text{O}$  スペクトルの半値幅  $H_w$ 、 $^2\text{H}$  と  $^{17}\text{O}$  の  $T_1$  と pH の関係 (25°C)  
(大河内正一、石原義正、荒井強、上平恒、水環境学会誌, 16, 411, Fig. 3 (1993))

### 図 3: $^{17}\text{O}$ -NMR の半値幅。上平「水の分子工学」 p.101.

測定した範囲では、 $^2\text{H}$  および  $^{17}\text{O}$  共に、 $T_1$  緩和時間は純水の値から変化していない。これは、pH 調整のために加えた NaOH や HCl が微量であるため、水分子の熱運動にはほとんど影響しないことを示している。

一方、 $^{17}\text{O}$ -NMR の線幅は、pH7 で極大値となっている。これを、プロトン交換速度に直すと、pH7 でプロトン交換速度が急激に遅くなっていることになる。

Yamanaka らは、超純水製造装置における水処理の各段階で水を取り出し、 $^{17}\text{O}$  の  $T_1$ 、 $T_2$  緩和時間及び誘電緩和の緩和時間を測定した [9]。

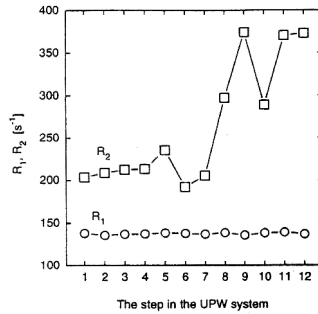


Fig. 4  $R_1$  and  $R_2$  of water in UPW system. 1, city water; 2, carbon filter; 3, membrane filter; 4, ultra violet sterilizer; 5, reverse osmosis membrane; 6, RO reject; 7, primary pure water; 8, membrane degasifier; 9, mixed bed ion exchanger; 10, ultra-violet oxidizer; 11, cartridge polisher; 12, UPW

図 4: 水処理の各段階での NMR の緩和時間 [9]

図 4 では緩和時間の逆数をプロットしており、 $R_1 = 1/T_1$ 、 $R_2 = 1/T_2$  で、右側にいくほど、水の純度が高くなる。水処理の各段階を通じて、 $T_1$  緩和時間はほとんど変化しないが、 $T_2$  緩和時間は大きく変わっていることがわかる。

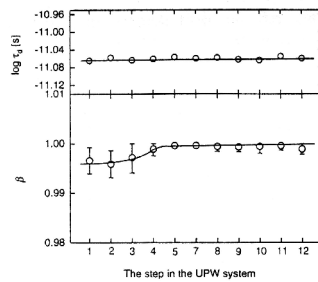


Fig. 2  $\tau_d$  and  $\beta$  of water in UPW system. 1, city water; 2, carbon filter; 3, membrane filter; 4, ultra violet sterilizer; 5, reverse osmosis membrane; 7, primary pure water; 8, membrane degasifier; 9, mixed bed ion exchanger; 10, ultraviolet oxidizer; 11, cartridge polisher; 12, UPW

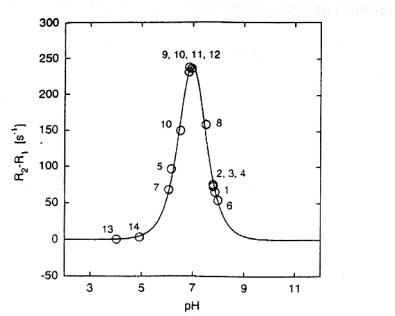
図 5: 水処理の各段階での誘電緩和時間 [9]

同じ水に対して、広帯域誘電分散の測定を行い、誘電緩和時間を求めた結果を図 5 に示す。Cole-Cole 式を用いて緩和パラメータを求めたので、 $\tau_d$  が緩和時間、 $\beta$  は緩和時間の対称的な拡がりを示し、 $\beta = 1$  が単一緩和時間に対応する。誘電緩和は、水分子数十個が協同的に動くときの特徴的な時間と対応していると考えられており、粘性と同様の温度依存性を示す。もし、液体の水分子のクラスターサイズが変わるようなことがあれば、緩和時間は速くなるはずである。実験結果は、水処理の全ての段階で緩和時間はほぼ一定で、不純物の影響とみられるわずかな対称拡がりが見られるというものであった。

誘電緩和の結果と、線幅に対応する  $R_2$  を比べると、全く無関係に変化していることがわかる。つまり、 $^{17}\text{O}$  の線幅は、分子運動を全く反映していないことになる。

さらに山中らは、製造過程の水と、超純水に炭酸ガスを吹き込んで pH を変化させた水について、

$R_2 - R_1$  の pH 依存性を求めた。



**Fig. 5** pH dependence of  $R_2 - R_1$ . 1, city water; 2, carbon filter; 3, membrane filter; 4, ultra violet sterilizer; 5, reverse osmosis membrane; 6, RO reject; 7, primary pure water; 8, membrane degasifier; 9, mixed bed ion exchanger; 10, ultraviolet oxidizer; 11, cartridge polisher; 12, UPW; 13, UPW bubbled with  $\text{CO}_2$  (pH 4.0); 14, UPW bubbled with  $\text{CO}_2$  (pH 4.9). Value calculated by Eqs. (3) and (4) is given by solid line

図 6: pH 依存性 [9]

pH7 付近で、 $R_2 - R_1$  が極大値を示している。そもそも、 $R_1$  は処理の段階でほとんど変化しなかったため、 $R_2 - R_1$  の pH 依存性は  $R_2$  の pH 依存性を反映していることになる。

$^{17}\text{O}$ -NMR の線幅は、 $^{17}\text{O}$  の  $T_2$  緩和時間に結びついた量であり、プロトン交換速度の指標である。このことは、1983年に Halle らが報告していたのであり [6, 7]、松下が水のクラスターの話を持ち込む余地など、最初から無かったのである。

いわゆる水クラスターの大きさの評価と称して行われた  $^{17}\text{O}$ -NMR の線幅の測定は、単に pH7 付近の pH の変化を測定していたに過ぎず、しかも、線幅しか見ないのであれば pH が 7 より増えても減っても変化の仕方は同じなので、普通の pH メーターを使った方がむしろ得られる情報は多かったはずである。

#### 4 クラスターの考え方では融点と沸点を説明できない

NMR の知識が無くても、クラスターの考え方では水の性質を説明できないことが、融点と沸点の値からわかる。

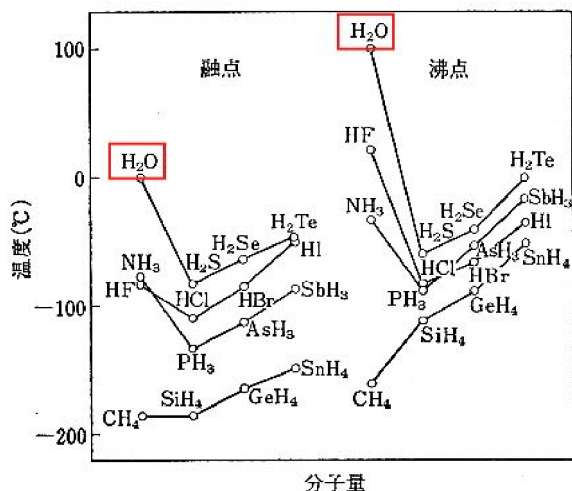


図 3-1 同族列元素に属する水素化合物の融点と沸点 (Pauling, 1960)

図 7: 鈴木敬三「水および水溶液」(共立全書)より。

図 7 は、水素の同族化合物の融点と沸点を示したものである。高校化学の教科書や参考書にも、この図は掲載されている。分子量にくらべて、水の融点と沸点は際だって高い。これは、水分子間に強い水素結合が存在することによるという説明がなされている。もし、何らかの処理によって、液体の水の水素結合が切れたままになることがあったら、水の融点と沸点が目立って低下するはずである。しかし、「クラスターが小さい」と称する水において、そのようなことは起きていなかった。水溶液をつくっても、通常の水溶液の性質を逸脱するような融点や沸点の変化は無かった。

もし、水素結合の量が変わったならば、赤外吸収やラマン散乱のスペクトル、誘電緩和の緩和時間と複素誘電率の値、蒸発熱、粘性といったさまざまな量が、全て矛盾なく変化するはずである。しかし、クラスターが小さくなったと称する水で、そのような報告は無かった。

## 5 液体の空間的構造はどうやって調べるのか

原子や分子の空間的な配置を知るには、その配置の空間スケールと同程度かそれ以下の波長の波を使うしかない。つまり、X線か中性子線を使って、散乱実験を行うことになる。

分子や原子が規則的に並んでいる結晶の場合は、面間隔を  $d$  とすると、Bragg の条件

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (5)$$

を満たす時に散乱が観測される。 $\theta$  は入射ビームの角度、 $\lambda$  はビームの波長で、 $\lambda \leq 2d$  でなければならない。この条件は、図 8 のように表すことができる。図では、面は 2 つしか描いていないが、実際には多数の面が並んでおり、散乱ビームは強め合って鋭いピークが出てくる。結晶であれば、いろいろな方向から見ると、面間隔  $d$  が異なる散乱の面が同時に複数あるので、結晶構造によって、特定の角度  $\theta$  のところに散乱ピークが観測されることになる。

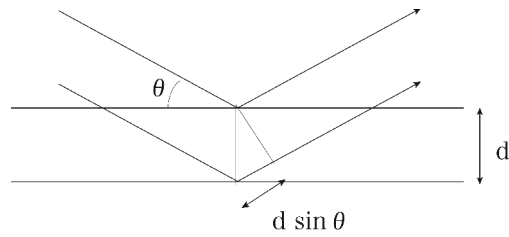


図 8: Bragg の条件。

特定の角度  $\theta$  は、散乱ベクトルが作る  $\vec{k}$  空間の特定の  $\vec{k}$  の値と対応している。素性のはっきりしている物質であれば、散乱強度の  $\theta$  依存性を見るだけで、結晶の出来具合がわかってしまう。未知の物質の構造決定をする時には、周期構造の存在を前提にして計算を行うことになる。

ところが、液体では、原子や分子の配置は、図 9 のの模式図のようになる。

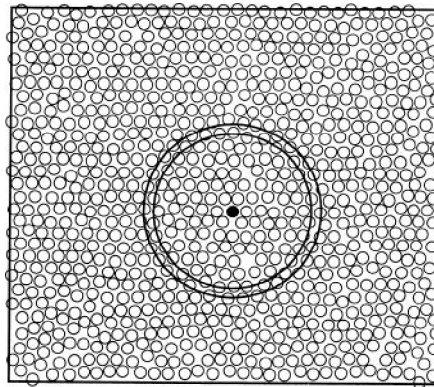


Fig. 2.3.1. Typical atomic configuration in a hard-sphere fluid. The pair distribution function can be obtained by choosing an arbitrary particle as the origin and counting the number of atoms whose centers lie within a distance  $dr$  of a circle of radius  $r$  of the origin.

図 9: 液体の模式図。Principles of condensed matter physics, Chaikin & Lubensky, Cambridge より。

このような不規則な系に X 線や中性子線を入射させても散乱は起きるが、図 8 のような散乱が起きる面を想定することはできない。分子や原子の並び方がバラバラであるため、散乱強度の角度分布に含まれている空間配置の情報は、 $\vec{k}$  空間全体にばらまかれてしまう。液体では、固体のときのように散乱強度の  $\theta$  依存性を見ただけでは、何もわからない。

このため、液体の散乱実験では、得られた散乱データから、動径分布関数 (radial distribution function) を計算する。計算の具体的方法は、例えば、文献 [11] に詳しく書かれているので、ここでは動径分布関数の意味を図 9 を用いて説明する。

図 9 の中央の黒く塗った粒子を中心とし、半径  $r$  と  $r + \Delta r$  の円を描く。円形の幅の中に入っている液体の粒子を数えて、平均密度を計算する。 $r$  の大きさをを変えてこの操作を行い、円形の帯の中に入っている粒子の密度が  $r$  にどう依存するかを求めたものが、動径分布関数である。

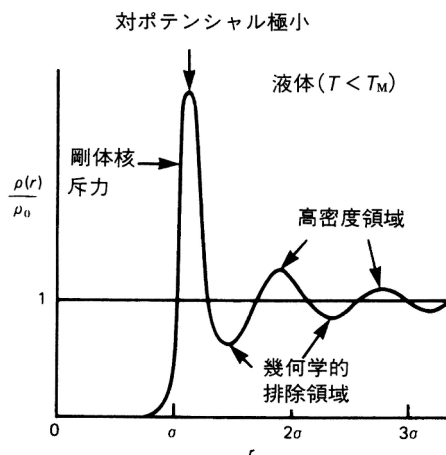


図 10: 動径分布関数。「分子間力と表面力 (第 2 版)」イスラエルアチヴィリ (朝倉書店) より。

$r$  が 0 に近いところは、中心となった粒子が存在するので、それ以上周囲の粒子が近づけない。このため、排除体積効果で動径分布関数は 0 になる。中心の粒子に隣り合った粒子は、中心の粒子の引力を受けるため、それなりに密に詰まっている。中心から遠くなるにつれて、構造の乱れの影響によって、だんだん詰まり方がはっきりしなくなって、密度の変化がみられなくなり、動径分布関数の値は一定の値に近づいていく。中心の粒子としてどれを選んでも似たような動径分布関数が得られることになり、実際の実験では液体全体をまとめて測定している上に分子運動の影響もあるため、結果として均された動径分布関数を得られることになる。多原子分子の場合も、動径分布関数は概ね図 10 の形であるが、さらに分子の構造を反映した細かい山や谷が出てくる。動径分布関数を再現できるような分子の配置を計算によって求め、分子同士の配置や、イオンの周りの溶媒の配向を推定し、それを液体の構造と考えることになる。

周期的構造の存在を前提にして行う結晶の構造決定と、動径分布関数から分子の原子間距離を求める液体構造の研究では、同じ X 線回折という手法を使っているが、中身は全く別物である。

液体の散乱実験からは、最近接分子がどう配置しているか、その次がどうなっているか、といったことがわかるだけで、遠くの方がどうなっているかはよくわからない。従って、液体の水の中のクラスターの分布がどうなっているかといったことは、X 線や中性子の散乱実験をしてもわからないのである。

## 6 X 線回折をめぐる誤解

$^{17}\text{O}$ -NMR の線幅では、液体の水の空間的構造の情報は得られないということが知られてきたにもかかわらず、「クラスターの小さい水が良い水である」「何らかの処理によってクラスターの小さい水を作ることができる」ということが既成事実化してしまったために、今度は、X 線回折で、水クラスターが変わったことを実証しようとする論文が出されるに至った [12]。

Shimokawa らは、遠赤外線を照射した水の X 線回折の測定を行い、水の O-O 原子間距離である 0.28 nm に対応する散乱角  $2\theta = 30^\circ$  において、遠赤外線の照射後と照射前で散乱強度が倍になることから、遠赤外線の照射によって液体の水の構造が変化したと報告した。測定結果は、図 11 のようになる。 $2\theta = 22^\circ$  と  $2\theta = 24^\circ$  の鋭いピークは、fluorocarbon film によるものであると書かれていた。



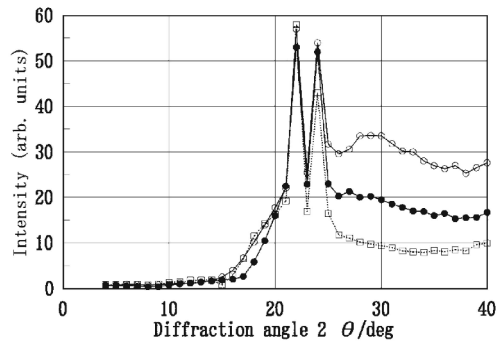


Fig. 1. X-ray diffraction patterns for water with and without FIR light irradiation, and using fluorocarbon film as background. Water with FIR light (○), water without light (●), and fluorocarbon film (□).

図 11: 水の  $\theta - 2\theta$  散乱の間違った利用法。Shimokawa[12] より。

既に述べたように、液体の構造による X 線の散乱は、散乱角度と散乱強度の関係を見ただけでは何もわからない。不規則な構造による散乱は、特定の散乱角度でのみ起きるわけではないからである。

図 11 では、 $2\theta = 25^\circ$  から  $2\theta = 40^\circ$  の範囲に渡って、遠赤外線照射しなかった水の散乱強度が小さくなっている。X 線散乱の散乱強度は物質の電子密度に比例するので、広い角度範囲にわたって散乱強度が全体に低いというのは、そのまま素直に解釈すれば、遠赤外線照射した水とそうでない水で、電子密度が倍違うということになる。これは、あり得ない結果である。一方、液体の X 線回折の実験では、試料の位置調整に熟練が要求され、調整がまずいと散乱強度が変わってしまう。このことに注意を払わずに、横軸が  $2\theta$  のままで散乱強度の違いから水の構造の違いを議論するというのは、意味をなさない。

電子密度の変化と矛盾のない散乱強度の測定値を得た上で、動径分布関数を求めた後に、液体構造について検討すべきである。

## 7 モデルか指標か？

図 1 のような水のモデルが乱暴に過ぎるとしても、水素結合ネットワークに組み込まれた水とそうでない水、ネットワークの内部の水と端の水、氷が崩れた構造の水と別の構造の水、といったふうに、水の中に異なる状態の部分が存在し、ある温度と圧力のもとで平衡状態になっているというモデルは、当分使われ続けるだろう。水溶液を考えると、溶質の影響が及んでいる水とバルクの水に分けて考えたとしても、それほど悪い近似ではないだろう。

ただし、これらのモデルは、ある物理化学的な測定結果が、温度や圧力や溶質の濃度にどのように依存するかを説明するためのものであって、水の評価をするための指標になるものではないことに注意すべきである。

液体の水が異なった状態の間の平衡状態として近似的に記述できるとしても、その平衡状態は、温度と圧力と溶質によって決まるのであって、何らかの処理を行った結果、同じ温度・圧力・組成のもとで異なった状態が実現するということを意味しない。

また、簡単なモデルは実験結果の一部分しか説明しないこと、実験で得られるのは水の性質の一部分でしかないことも理解しておく必要がある。

例えば、文献 [3] には「北海道大学の荒川泓教授は、純水の 25 °C における構造は 5 分子であるという学説を発表している。」という記述がある。しかし、文献 [13] によれば、この話は、水分子の 5 量体と単量体の間に平衡が成り立っていると考えると、中性子線回折で得られた水の構造因子の温度依存性の特徴がうまく説明できるというものである。つまり、最近接分子が作る短距離秩序をどう考えるかという話である。長距離秩序については測定からはわからないため、水分子が 5 量体と単量体の混合物なのか、測定可能な範囲でだけそのように見えていて、実際にはもっと大きなネットワーク構造なのかは、何とも言えないのである。このモデルが、うまく回折実験の結果を説明するからといって、水が 5 量体と単量体の混合物であるとはいえないし、5 量体と単量体の比率を水の評価の指標として使うこともできない。

## 8 おわりに

日本機能水学会の定義によれば、機能水とは「人為的な処理によって再現性のある有用な機能を獲得した水溶液の中で、処理と機能に関して科学的根拠が明らかにされたもの、及び明らかにされようとしているもの」と定義されている。

「水溶液」である以上は、その性質は溶質の種類と量と、水溶液が置かれた温度と圧力によって決まってしまう。水溶液の性質を理解して利用するのに、「水のクラスター」のような「物理的変化」を持ち込む必要は全くない。まずは、水分子以外の物質の種類と量を評価することが重要で、液体構造にまで踏み込むのであれば、溶質の周りの水の配置を回折実験で調べたり、計算機実験をしたりといった手法を個別に使っていかなければならない。

今後、間違った説が出てくることはあり得るが、それに振り回されないためには、以下のようなことに留意してはどうだろうか。

1. その測定を裏付ける（査読を通った）研究論文があるか？
2. 主張されている「変化」は他の測定方法でも同様に観測できて、矛盾のない結果になっているか？
3. 実験結果を説明するための「モデル」を「指標」として使おうとしていないか？
4. 実験や計算に標準的な方法が使われているか？

これだけ長い間、根拠のない「水クラスター」の話が企業に広まり続けていることに、液体の研究者としては困惑している。機能水の魅力的な性質を見つけたとして、それを「水クラスター」で説明しても、それは何の説明にもなっておらず、「水クラスター」という考え方をすることの発展性もない。企業の技術者の方々には、物質の変化に立ち戻って、健全な技術開発を行っていただきたいと願うばかりである。<sup>4</sup>

## 参考文献

- [1] 天羽優子：「水のクラスター — 伝搬する誤解 —」、  
[http://atom11.phys.ocha.ac.jp/water/water\\_cluster.html](http://atom11.phys.ocha.ac.jp/water/water_cluster.html).

<sup>4</sup>液体構造についての基礎的な解説書として、[15, 16] がある。

- [2] 松下和弘：「食品を NMR でみる—分子レベルでとらえた「味」の違い—」、現代化学、(1989) 62-67.
- [3] 松下和弘：「水の状態評価と味覚・熟成度の解明」、食品と開発、**24**(1989) 82-85.
- [4] 松下和弘：「遠赤外線と NMR 法」微弱エネルギー研究会編、人間と歴史社 (1989)、ISBN4-89007-055-9.
- [5] 上平恒：「水の分子工学」、講談社 (1998)、ISBN4-06-153378-9.
- [6] B. Halle and G. Karlström, *J. Chem. Soc. Faraday Tras.* **79**(1983) 1031.
- [7] B. Halle and G. Karlström, *J. Chem. Soc. Faraday Tras.* **79**(1983) 1047.
- [8] 大河内正一、石原義正、上平恒、水環境学会誌 **17**(1994)517.
- [9] K. Yamanaka, A Shimizu, S. Sugai, S. Mashimo, "DYNAMIC STRUCTURE OF WATER IN ULTRA PURE WATER PRODUCING SYSTEM OBSERVED BY DIELECTRIC AND  $^{17}\text{O}$ -NMR RELAXATIONS", *J. Chem. Eng, Jpn.* **29**(1996)421-426.
- [10] 日本電子 (株) 分析機器技術本部 NMR グループ：「水の味と  $^{17}\text{O}$  NMR の信号幅との関連性について」、日本電子ニュース、**31**(1990)14-16.
- [11] M. Magini, G. Licheri, G. Piccaluga, G Paschina and G. Pinna, "X-RAY DIFFRACTION OF IONS IN AQUEOUS SOLUTIONS: HYDRATION AND COMPLEX FORMATION", CRC Press, (1988), Florida, ISBN0-8493-6945-2.
- [12] S. Shimokawa, T. Yokono, T. Mizuno, H. Tamura, T. Erata and T. Araiso, "Effect of Far-Infrared Light Irradiation on Water as Observed by X-Ray Diffraction Measurements", *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**(2004) pp. L545-L547.
- [13] 荒川泓：「水・水溶液系の構造と物性」、北海道大学図書刊行会 (1989)、ISBN4-8329-9261-1.
- [14] 財団法人機能水研究振興財団：「機能水とは」  
<http://www.fwf.or.jp/kinousui.html>
- [15] M. H. March and M. P. Tosi, "Introduction to Liquid State Physics", World Scientific, (2002), ISBN981-02-4639-0.
- [16] Jean-Louis Barrat and Jean-Pierre Hansen, "Basic Concepts for Simple and Complex Liquids", Cambridge University Press, (2003), ISBN0-521-78953-2.