

7. 高が水、然れど水

くの字型の分子が網目状に絡み合った水

太陽を周回する 10 個の惑星の中で、大きな脱出速度を持ちしかも大気の温度が低い木星や土星や天王星や海王星では脱出分子量が極めて小さな値ですから、分子量の最も小さな水素やヘリウムの分子でもほとんど惑星から脱出することがなく、宇宙の元素組成をほぼ維持してきました。これらの惑星に対して、大きさが小さくしかも太陽に近い金星と火星では脱出速度が小さく大気の温度が高いために、水素やヘリウムばかりでなくメタンやアンモニアや水まで惑星外に飛び去ってゆきました。地球は、適当な半径の軌道を周回する適当な大きさの惑星ですから、水素やヘリウムなどの小さな分子量の分子は宇宙の彼方に飛び去ってしまいましたが、酸素や窒素は宇宙に脱出することなく地球に残存して大気の主成分を構成しました。さらに、水もほとんど脱出することなく地球に残りましたが、地表の環境では水は液体の状態が存在しますから、海が地球の 70%を覆う豊かな水の惑星になったと思われまます。このような極めて多くの偶然が重なって、地球という水の惑星が生まれたことを神に感謝すべきではないでしょうか。

水の分子は水素 2 原子と酸素 1 原子で構成されている地球上に存在する分子としては 6 番目に小さな分子量 18 の極めて小さな分子ですが、水の氷点は 0°C 、沸騰点は 100°C ですから、地球上では主に液体の状態で存在します。中東などの油田で産出する石油は非常に大量に自然界に存在する液体ですが、そのような大量の石油も大型のタンカーを海に浮かべて運搬していますから、海の水の量に比べれば石油は微々たる量に過ぎません。水は地球上に普遍的に存在する圧倒的に大量に存在する液体です。

原子は質量の重い中性子と陽子が原子核となって中心に座り、原子核の正電荷を打ち消すようにその周囲に陽子と同じ数の軽くて負電荷を持つ電子が広く分布しています。2 つの原子が接近すると一方の原子の原子核と他方の原子に属する電子が静電的に相互作用して静電的な引力が働きますから、電子は両方の原子核に引き付けられるような力を受けます。結果として 2 つの電子がそれぞれ静電的な引力により 2 つの原子核を引き付け両原子が共有結合と呼ばれる結合で結び付けられます。このとき働く静電的な引力は原子核と電子が持つそれぞれの電荷の積に比例し、原子核と電子の間の距離に反比例します。水は酸素と水素の 2 つの異なる原子が共有結合していますから、それぞれの原子核の正電荷も原子半径も異なります。そのため、酸素原子に属する電子と水素の原子核の間に働く静電的な引力と酸素の原子核と水素原子の電子に働く静電的な引力は当然異なってきます。そのため両者の原子核が電子を引き付ける力にも差が生じて、原子間で電子の偏りが生まれまます。結果として、結合に関与する 2 個の電子は若干酸素の原子核に引き付けられますから、酸素原子の近くに電子が引き付けられて、酸素原子は負電荷を帯び、水素原子は結合することにより電子が若干減少して正電荷を帯びます。

このように結合の間に電荷の偏りのある分子を電場の中に置きますと、分子の電荷と電

場の間には双極子モーメントと呼ばれる力が働きます。この双極子モーメントの測定結果から、水の酸素－水素結合は 67.2%の共有結合の性質と 32.8%のイオン結合の性質を持つものと算定されます。さらに、水の分子は 104.45° の結合角でブーメランのようにくの字型に水素 2 原子が酸素 1 原子と結合した構造を持っていることが結論付けられます。

一般に、直接結合した原子の間には一定の距離が保つようにエネルギーの安定化が起こりますが、直接結合していない原子の間にも電子の交換に由来する van der Waals 力と呼ばれる相互作用やわずかに原子上に存在する電荷による静電的な引力などの分子間力と呼ばれる相互作用が起こります。他方、分子の持つ運動エネルギーは低温では小さく温度が高くなるほど大きくなり激しく運動します。分子の間に働く分子間力と分子の持つ運動エネルギーの釣り合いの度合いにより、分子が集合した物質は固体と液体と気体のいずれかの状態になります。温度が低いため分子の運動エネルギーが分子間力よりはるかに小さいときには、固体の状態になり、分子間距離が小さくなるように分子は整然と規則的に並んでほとんど動くことが出来なくなります。分子間力とほとんど同じ程度まで分子の運動エネルギーが大きくなりますと、分子は整然としたその配列を保つことが出来なくなり、液体となって物質の中を分子は自由に動き回るようになります。さらに分子の運動エネルギーが分子間力よりもはるかに大きくなりますと、分子は物質の中の分子間力のしがらみから開放されて、気体となって自由な世界に飛び出してゆきます。

分子の中に電荷の偏りがありくの字型に曲がった水の分子が集合する時には、わずかな電荷を帯びている水素原子と酸素原子の間の静電的な引力の他に、水の酸素原子が水素陽イオンと配位結合する性質を持っています。そのため、水分子の水素原子が隣の水分子に結合を変更してゆく交換が瞬時に起こるため、水素原子は原子価が 1 でありながら、あたかも水素原子が 2 つの酸素原子に結合しているような性質を示します。この瞬間的な配位結合による引力と分子の間に働く静電的な引力を総合して水素結合といい、水の場合には約 6kcal/mol と見積もられています。1Lの液体の水は 3.3×10^{25} 個の水分子が集合していますが、液体の水は沢山のくの字型に曲がった水分子が水素結合により互いに引き付け合い、3次元の網目状に絡み合った一塊として挙動すると考えられます。水の分子間で引き付け合い絡み合うこの水素結合は大きな分子間力として働きますから、水の分子が集合した時には分子の間に働く分子間力と分子の持つ運動エネルギーの釣り合いの度合いが他の多くの物質とは異なってきます。そのため多くの物質と異なり、固体と液体と気体の間の状態変化を含めて、水はかなり特異な挙動や性質を示します。水は地球上の至るところに存在し、極めて普遍性が高く生活に密着した液体ですから、水が標準的な性質を示す代表的な液体のように思われますが、意外に特異的な挙動や性質を示す例外的な物質として認識すべきかと思えます。

あらゆる自然現象や日常生活に関わる水

多くの水分子が集合している液体の水は沢山のくの字型に曲がった水分子が水素結合

により互いに引き付け合い、3次元の網目状に絡み合っ一塊になっています。この網目状の一塊に絡み合っているしがらみから、水分子の飛び出すことは容易ではありませんから必然的に気体になり難く沸点が高くなっています。また、水素結合で整然と水分子が結ばれた氷の結晶からその強い分子間力に打ち勝って分子が自由に運動する液体の状態になるためには大きな運動エネルギーを必要としますから、融点も高くなります。水素結合を含めてこの強い分子間力で絡み合っている液体が運動するためには大きな運動エネルギーを必要としますから、加えられるエネルギーが運動エネルギーに費やされてしまい、温度の上昇にあまり費やされません。結果として水は大きな比熱を持ち、暖め難く冷め難い性質を示します。特に状態変化を伴う融点や沸点においては、大きなエネルギーが分子間力の変化に費やされますから、大きな融解熱や気化熱を要します。さらに、分子の並び替えにより分子の間隔が変化しますから、水は4°Cの液体の時に最も体積が小さくなり、結晶化する結氷に際して体積の膨張が起こります。しかも、水分子が3次元の網目状に絡み合っ一塊になっていますから、液体の状態でも水分子の運動が制限され、高い表面張力と粘性を示します。

水はその分子同士が水素結合などの分子間力により3次元の網目状に強く絡み合っ一塊になっていますから、高い沸点と融点を示し、大きな比熱と融解熱と気化熱を持ち、高い表面張力と粘性を示し、温度上昇に際して複雑な体積変化を伴います。水は他の多くの物質と比較していくつかの特異な性質を示していますが、当然、液体が持つ沸点上昇や凝固点降下や浸透圧などの基本的な性質も示しています。このように独特の性質を示す水が地球の表面の70%を覆っていますから、地球の自然は大きく水の性質に依存しています。大きな融解熱と気化熱を示す水に大量の食塩などが溶け込んでいますから、太陽から供給されるエネルギーが大きく変化しても、海水は凍結も沸騰もすることなく水温が0~100°Cに保たれます。しかも結氷により大きな体積膨張を伴い、4°Cの液体の時に最も体積が小さく比重が重くなり沈殿しますから、北極海や南氷洋においても氷山は海上に浮かび、深海の海底では対流することもなく水温が4°Cの液体として保たれます。

さらに、水が大きな比熱を示しますから、海水は温まり難く簡単には冷えません。そのため、太陽からのエネルギーが大量に供給される夏季でも海上では比較的気温が上がりませんが、エネルギー供給の少ない冬季でも気温があまり下がりにませんから、気候が温暖になります。これに対して、海水に被われていない大陸では、夏季は気温の上昇が大きく、冬季は厳しい寒気に包まれます。このように夏季と冬季で海上と陸地の間に相対的な気温の逆転が起こりますから、大気の大気対流する方向も逆転し、日本では夏季は太平洋高気圧から南風が吹き込み、冬季は西高東低の気圧配置になって大陸から寒気が吹き込みます。さらに、海上の水蒸気を多く含む大気の大気対流により沿岸部に多くの降水がもたらされます。

水は沢山のくの字型に曲がった水分子が水素結合により3次元の網目状に絡み合っ一塊に集合していますから、物質が溶質として水の中に溶け込むときには水素結合の安定化を犠牲にしなければなりません。そのため、水素結合の編目の中にでも安定に入り込む

このできるイオン性の塩や酸や塩基の他に、水と水素結合できるアルコール類やアミン類は水の3次元の網目状に絡み合っ一塊の中に溶け込むことができますが、電子の偏りの少ない炭化水素などの油はほとんど溶け込みません。水との仲の良し悪しは水素結合により決まり、水の仲良しは油と仲違いし、油は油の仲間と仲良くします。

地球上の全ての生物は非常に多くの複雑な機能を担う種々の物質が生命活動を維持しています。簡単な物質から生命活動の維持に必要な複雑な物質へ変化してゆくときには、多くの元素の集合してゆく出会いの反応が主体となります。純物質の分子の動きは限られています。溶液では溶質の分子はその溶液の中を自由に動き回ることが出来ますから、溶媒に溶けた2種類の溶質の分子は容易に衝突することができ、出会いの反応が進行します。地球上に存在する液体はほとんど水だけに限られていますから、必然的に生物は水に良く溶ける物質を素材として出会いの反応を繰り返しながら水の中で誕生し進化してきました。しかも、生物が水に溶け易い身体をしていたのでは海の中を泳いでいる間に溶けてしまい生物の複雑な組織を維持できませんから、生物自体は水に溶けない形をしています。

人間も生物の一種に過ぎませんから、水に溶ける素材から水に溶けない身体を作り上げています。肉や野菜や穀物の中に含まれる蛋白質やでんぷんや脂肪を消化器官で水と反応させてアミノ酸やブドウ糖や脂肪酸やグリセリンなどの素材に分解し、水に溶ける状態で体内に吸収しています。水に溶けたこれらの素材は血管を通して運ばれて身体の各部で再びそれぞれの機能を担う複雑な物質に変化して生命活動を維持しています。このような食に関する事ばかりでなく衣に関しても住に関しても、あらゆる面で水の性質が日常生活に関わっています。水なくしては1日の生活も続けることはできませんが、2011年3月の東日本大震災の折に三陸海岸を襲った大津波のように多数の人間の命を一瞬にして飲み込むような恐ろしい力も持っています。

本書では人間の生活の中で深く関わっている水を一つの物質として化学の知識を織り交ぜながら独善的に調べ、水素原子と酸素原子により構成される水分子の性質から派生する水の持つ特異的な性質を見てきました。さらに、その水の特異的な性質が地球の自然現象や日常生活に与えている種々の影響についても考えてきました。このようにあらゆることに影響を与える水の基本的な性質を化学的な知識と技術をもとに、日常生活の中で有効な利用を考えることは極めて有意義なことと思われま。本書で水の基本的な性質を少しでも深く知ることにより、何か一つでも化学の研究や教育に役立つものが見つけ出せば良いと思っております。また、逆に多くの化学的な技術や知識が日常生活を快適にする新たな水の利用を生み出す助けになれば、本書はさらなる意義を持つことになると思われま。本書が水に関する基礎知識を深める上で貢献できればよいと思っております。

索引

- あ**
- Einstein 10, 27
 アクチノイド金属元素 12
 Avogadro 28
 アミノ酸 88, 93, 97, 98, 99, 107
 雨冠 6
 アルカリ金属元素 14, 17
 アルカリ土類金属元素 14
 α 壊変 13
 Arrhenius 56
- い**
- イオン化エネルギー 14, 15, 16, 17
 イオン結合 ... 17, 20, 21, 23, 25, 26, 38, 60, 62, 69, 73, 87, 101, 102, 105
 イオン性界面活性剤 73, 75
 異性化 93
 陰イオン 14, 15, 16, 20, 21, 23, 61, 70, 74, 75, 82, 84, 87, 88, 101, 102
 陰イオン界面活性剤 74
- う**
- 海風 85, 86
 運動エネルギー .. 27, 38, 39, 40, 41, 44, 46, 48, 49, 51, 52, 78, 79, 105, 106
- え**
- ATP 93, 95, 96
 液化熱 42
 エステル結合 93, 99, 100, 101
 X線 21, 28, 29, 91, 98
 NADPH 91, 92, 93, 95, 96
 エネルギー不滅 37
 塩基性 62, 63, 64, 65, 66, 67, 71, 74, 88, 97, 100, 102
- エンタルピー 37, 38, 57, 58, 59, 62, 68, 69
 エントロピー 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 46, 48, 57, 58, 59, 60, 62, 68, 69, 77, 87
- か**
- 解糖 95, 96
 界面活性剤 .. 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 88, 89, 98, 101
 解離定数 25, 63, 67, 71
 核分裂 13
 可視光線 28, 29, 30, 35, 91
 加水分解 ... 70, 75, 96, 97, 98, 99, 100, 101
 加水分解酵素 97, 98, 99
 火成岩 82, 84
 活性化エネルギー 56, 57, 66, 88
 空の軌道 62
 還元 91, 92, 93, 95, 96
 感光物質 31
 γ 壊変 13
 γ 線 28, 29, 30, 91
- き**
- 希ガス元素 12, 16
 気化熱 42, 43, 44, 46, 85, 86, 106
 Gibbs 37
 キモトリプシン 97, 98, 100
 Cameron 80
 吸光係数 32
 吸熱反応 38
 凝固点降下 52, 53, 54, 106
 凝固点降下度 52, 54
 共役塩基 62, 63, 64, 66, 67
 共役酸 62, 63, 64, 65, 66, 67
 共有結合 17, 18, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 29, 32, 35, 38, 91, 104, 105

金属結合 38

く

Coulomb 9

くの字型 9, 25, 26, 33, 58, 68, 70, 104, 105,
106

グリセリン 68

グリセリンエステル 67, 70, 88, 100

け

結合エネルギー .. 18, 19, 22, 26, 29, 33, 38,
58, 91

結合距離 18, 19, 25, 32, 38

結合モーメント 23, 24

原子核 9, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 20, 29, 32,
104

原子爆弾 13

元素記号 11, 12, 82

こ

工業用水 7, 77

合金 51, 52

硬水 72, 74, 75, 103

降水量 3, 4, 5, 7

光電効果 27

コラーゲン 99

さ

最外殻電子 10, 12, 14, 16, 17

細胞膜 3, 76, 90, 101

酸化 . 24, 25, 33, 35, 43, 44, 46, 59, 61, 67,
70, 75, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 88, 91, 92,
93, 95, 96, 100, 103

3重結合 18, 60

三水(γ) 6

酸性 . 25, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 71, 73, 74,
75, 83, 88, 97, 102

酸素原子 .. 9, 17, 25, 32, 58, 60, 75, 87, 98,

100, 101, 104, 105, 107

3 態 40, 46

し

紫外線 28, 29, 30, 32, 35, 91

視覚中枢 31, 32

色相環 31

σ 結合 18, 20

質量数 12, 13

脂肪 67, 68, 70, 71, 88, 100, 101, 107

脂肪酸 ... 67, 68, 70, 71, 72, 73, 75, 88, 99,
100, 101, 107

自由エネルギー 37, 57, 58, 88

周期表 10, 11, 12, 16, 23

縮合 92, 95, 99, 100

主量子数 10, 14, 15, 16

Schrödinger 10

昇華 46

消化酵素 97, 98

蒸気圧 44, 45

状態図 41

蒸留 46

Jones 38

伸縮運動 32, 33, 35

浸透圧 77, 90, 106

振動数 27, 29, 80

す

水酸イオン 25, 97

水素結合 20, 25, 26, 29, 32, 33, 41, 43, 44,
47, 49, 58, 59, 60, 68, 69, 70, 73, 75, 87,
88, 100, 101, 105, 106

水素原子 12, 17, 20, 21, 22, 23, 25, 32, 58,
60, 62, 68, 75, 87, 100, 101, 104, 105,
107

水素陽イオン 12, 21, 25, 60, 62, 63, 65, 66,
67, 71, 75, 83, 105

水道3, 4, 6
スペクトル.....29, 30, 31, 33

せ

生活用水3, 4, 5, 6, 7, 77, 102
正4面体構造..... 24
静電的な引力 .9, 17, 20, 21, 25, 26, 38, 58,
104, 105
生物化学的酸素要求量..... 73
精油成分 67
赤外線.....28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 91
石鹸70, 71, 72, 73, 74, 76, 100
遷移金属元素10, 12

そ

双極子モーメント21, 22, 23, 24, 25, 33, 35,
36, 105
相対湿度 45

た

堆積岩82, 84, 102
太陽系9, 78, 80, 81, 84, 89
脱出速度78, 79, 80, 81, 104
脱出分子量..... 80
脱水 95
脱炭酸..... 95
玉川上水 4
炭化水素 40, 41, 47, 58, 60, 67, 68, 69, 70,
71, 74, 75, 89, 96, 99, 101, 107
単結合18, 32
炭酸61, 64, 72, 83, 84, 96, 102
炭水化物 88
蛋白質26, 46, 51, 88, 93, 96, 97, 98, 99,
107

て

出会いの反応55, 56, 63, 86, 87, 88, 92, 93,
107

呈色反応83
電荷9, 12, 14, 15, 16, 17, 20, 21, 25, 35, 36,
38, 58, 59, 60, 68, 69, 70, 87, 101, 104,
105

電荷の偏り 21, 23, 25, 58, 68, 69, 70
電気陰性度 22, 23, 25
典型金属 12
電子9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20,
21, 23, 25, 27, 29, 32, 35, 38, 51, 58, 60,
62, 75, 104, 105, 107
電子親和力 15, 16, 17
電子対 62
電子の偏り 20, 21, 22, 23, 104
電磁誘導 27

と

同位元素 12, 13
凍結乾燥 46
土類金属元素 14

な

軟水 72, 102, 103

に

2重結合 18, 33, 60, 94
二重膜 76, 101
乳化 70, 73, 98, 101
Newton 9, 27

ね

熱力学の3法則 37, 55
粘性 39, 48, 49, 51, 106
粘度 49, 50

の

農業用水 7, 77

は	
配位結合	17, 20, 25, 26, 32, 62, 105
π 結合	19
波長 .	13, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35,
	91
発熱反応	38
ハロゲン元素	16, 17
半減期	12, 88, 89
半透膜	76, 77, 90
反応座標	56
反応速度定数	55, 56, 57, 63
万有引力	9, 78
万有引力定数	78
ひ	
pH	71, 72
非イオン性界面活性剤	73, 75
pKa	25, 63, 64, 65, 66, 71, 74
非金属元素	12
比熱	47, 85, 86, 106
標準光	30, 31
表面張力	48, 49, 50, 106
頻度因子	56, 58
ふ	
van der Waals 力	38, 58, 105
van' t Hoff	77
フォトン	27, 28
付加	95
Hooke	33, 34
沸点 .	39, 40, 41, 42, 44, 46, 51, 52, 53, 54,
	85, 106
沸点上昇	52, 106
沸点上昇度	52
ブドウ糖	61, 62, 75, 88, 91, 92, 93, 95, 96,
	107
Plank	10, 27

Brønsted	62, 66, 71
分液ロート	70
分子双極子モーメント ...	23, 24, 25, 35, 36
分子量	23, 40, 41, 43, 49, 51, 52, 53, 54, 59,
	77, 79, 80, 81, 100, 104
へ	
平衡反応	57, 83, 88, 99, 100
β 壊変	13
変角運動	33, 35
ほ	
Bohr	9
放射能	12, 28
飽和水蒸気圧	45
Pauling	22, 23
補酵素	93, 95, 96
補色	31, 32, 91
ま	
マイクロ波	28, 29, 35, 36, 91
Maxwell	27
Munsell	31
み	
水資源	5, 7, 8
め	
Менделеев	10, 16
も	
Morse	17
モノテルペン類	68
モル	28, 77, 92, 94, 96, 100
ゆ	
融解熱	43, 44, 46, 85, 86, 106
誘磁率	27
融点 .	39, 42, 43, 44, 46, 51, 52, 53, 54, 85,

99, 106	
誘電率.....	9, 27
油脂.....	59, 97, 99, 100, 101
よ	
陽イオン	12, 14, 16, 20, 21, 23, 25, 60, 61, 62, 63, 65, 66, 67, 70, 73, 74, 75, 82, 84, 87, 100, 101, 102
陽イオン界面活性剤.....	74
溶液.....	32, 36, 52, 54, 58, 62, 69, 70, 71, 72, 76, 77, 83, 84, 87, 88, 90, 97, 100, 107
溶解度.....	58, 59, 60, 61, 62, 72, 83, 84
溶質.....	58, 59, 60, 62, 69, 76, 77, 87, 90, 106, 107
溶媒.....	52, 53, 54, 58, 62, 63, 69, 71, 76, 77, 87, 88, 93, 107
ら	
ランタニド金属元素.....	12

り	
陸風.....	85, 86
理想気体の状態方程式.....	39, 77
両性界面活性剤.....	74, 75
リン脂質.....	101
る	
Lewis.....	62
れ	
Lenard.....	38
ろ	
ろ過.....	76
ろ紙.....	76
わ	
別れの反応.....	55, 56, 63, 88