

湖沼環境と次世代エネルギーシステムの調和 －琵琶湖環境とエネルギーモデル－

Matching of Lake Environments and Future Energy Systems － Lake Biwa Environment and Energy Model －

熊谷 道夫* 青田 容朗** 伊藤 靖彦***

Michio Kumagai Yasuaki Aota Yasuhiko Ito

* Lake Biwa Environmental Research Institute

** Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University

*** Department of Environmental System Science, Faculty of Engineering, Doshisha University

Abstract

Many large lakes in the world are suffering from the global warming, especially in the last two decades. One of the most serious problems is the deficiency of dissolved oxygen in the hypolimnion due to depression of vertical mixing in winter. The rise of air temperature is gradually spreading from high to low latitudes, and winter air temperature continues to increase. Lake Biwa, the largest lake in Japan, is also facing this problem, the drastic decreasing trend in dissolved oxygen concentration in the deep layer after 1985. For the sake of conserving lake environments and developing more comprehensive solutions, the authors designed a standard model to combine lake conservation and future energy systems, based on deep water electrolysis to decompose the water into oxygen and hydrogen with solar energy. The oxygen produced is able to be supplied into low oxygen water near the bottom, and the hydrogen is also to be used as a by-product energy source. This is a challenging approach and requires more refinement and testing for practical application of this model, but it is a key prospect for energy poor societies with valuable water bodies such as Shiga Prefecture in Japan.

Key words: Lake; Environment and energy; Electrolysis; Oxygen and hydrogen

1 はじめに

- * 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター
- ** 金沢大学 自然計測応用研究センター
- *** 同志社大学 工学部環境システム学科

琵琶湖の深水層における溶存酸素濃度の低下が最初に指摘されたのは、1970年代の前半であった。滋賀県水産試験場の中は、定期観測の結果から、水深 80

m付近の溶存酸素濃度の年最低値が、1960年代後半から次第に減少してきていることを初めて明らかにした¹⁾。この時期は、ちょうど、琵琶湖で富栄養化が急速に進行し始めた頃に対応しており、1977年には、初めて淡水赤潮が発生したので、まさに先駆的な警告であったといえよう。1980年に富栄養化防止条例が施行され、集水域からの栄養塩（とくにリン）の流入に一旦歯止めがかかったかに思われたが、1980年代後半から、再び溶存酸素濃度が低下してきている。このことは、地球温暖化の傾向とよく対応しており、レマン湖などでは寒い冬のあとに暖冬が続くと急激な低酸素状態が発生することが報告されている²⁾。IPCC(気候変動に関する政府間パネル2007)によると、21世紀には、世界の平均気温が、1.4℃から5.8℃上昇するといわれており、琵琶湖深水域が慢性的な低酸素状態に陥る可能性は非常に高いといえる³⁾。

本稿では、琵琶湖における地球温暖化の進行と環境変化の関係についてのべるとともに、低酸素状態を解消するために、湖水の水電解による深水域への溶存酸素供給と、あわせて得られる水素ガスの有効利用を基本とした環境とエネルギーの調和を目指した琵琶湖環境とエネルギーモデルの概要について報告する。

2 地球温暖化と琵琶湖

彦根気象台のデータによると、過去100年間で約1.5℃気温が上昇しており、とくに、過去20年間に約1.0℃という大きな気温上昇がおこっている。滋賀県全体の変化を示すために、琵琶湖周辺8ヶ所で得られた1979年から2006年までのアメダスデータを用いて気温上昇率を求めた(Fig. 1)。これによると、虎姫で最大(年間約0.07℃の上昇)で、大津で最小(年間約0.01℃の上昇)であった。図中で、赤く染まった地点が、気温上昇が大きく、虎姫、東近江、今津の順であった。気温の時系列データを調べると、1990年まで大津の年平均気温は、彦根より約0.5℃高かったが、現在では大津と彦根の気温はほぼ同一になっている。一方、虎姫は今津と1995年ころまでは同じ平均気温であったが、今では約0.5℃高い状態が続いている。今津や虎姫は農村地帯であることからして、この気温上昇は、ヒートアイランド効果によるものではないといえる。これは推測だが、琵琶湖の貯熱効果が、虎姫や今津の気温上昇を加速している可能性もある⁴⁾。

一方、Fig. 2 からわかるように、琵琶湖湖底付近における冬の水温は、1960年頃までは比較的高かった

が、1962年から1984年頃にかけて6.0℃前後の低い状況が続いていた。ところが、1985年以降急激に水温上昇が続き、1990年頃までには2.0～2.5℃ほど上昇した。その後、水温は7.5℃前後と、高い数値で推移している。このような水温変化は、湖底付近の水質や生態系に何らかの影響をおよぼすと思われるが、確定的な検証はまだおこなわれていない。ただ、Fig. 3に示したように1985年以降、琵琶湖湖底付近の溶存

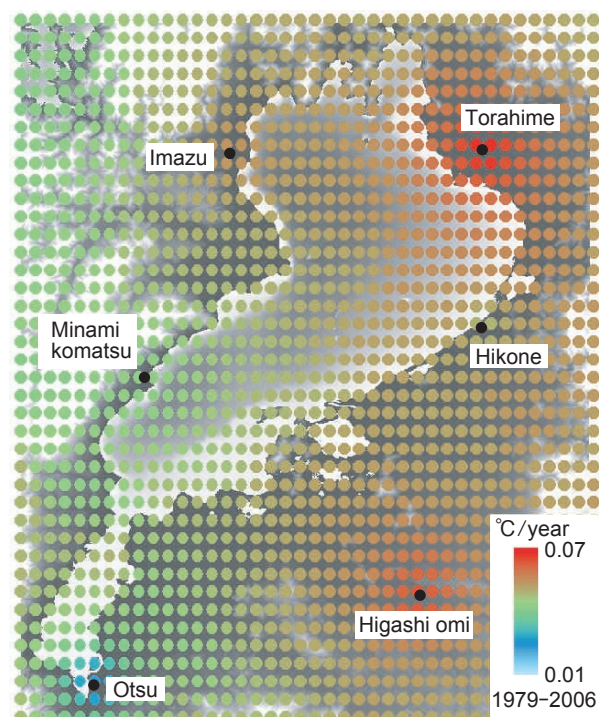


Fig. 1 Rate of air temperature increase around Lake Biwa calculated by AMEDAS meteorological data.

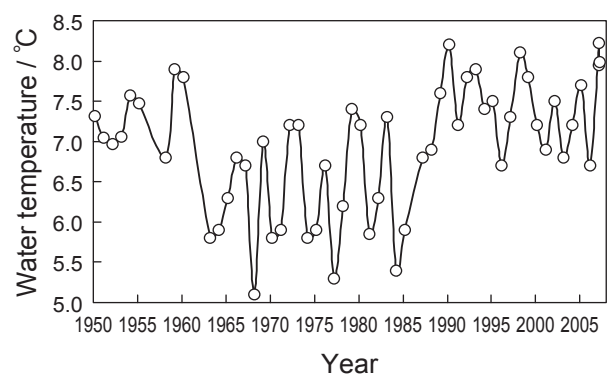


Fig. 2 Trend of water temperature near bottom at 80 m depth: data were collected by Shiga Prefecture Fisheries Experimental Station.

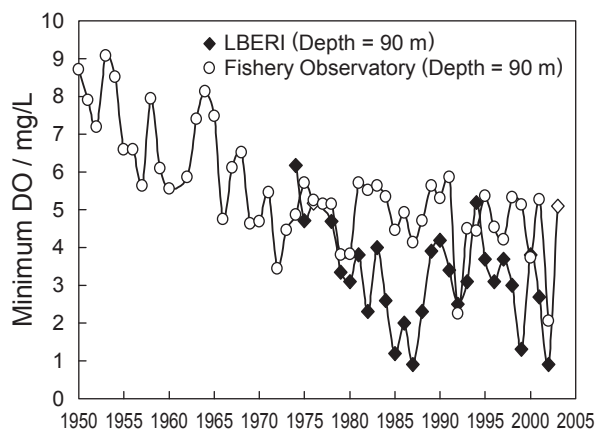


Fig. 3 Trend of annual minimum DO in the North Basin of Lake Biwa.

酸素濃度は低下してきている。また、水産試験場のデータによると、深水層で硝酸態窒素やリン酸態リンの濃度が増加してきている。さらに、琵琶湖の固有種であるイサザという魚の漁獲量が、冬の気温が高いと減少し、気温が低いと増加することも報告されている。

2006年の冬は雪が多く、湖底に十分に酸素が供給された。琵琶湖環境科学研究センターが所有している自律形潜水ロボット「淡探」を用いた調査によると、この年は、それ以前の年に比べて、湖底に住む生物が多くなったことがわかった。まさに気温と湖底環境は動的平衡状態であるといえる。ところが、2007年の冬は暖冬で、湖水が上下に混合する時期が遅れたために、3月末になってやっと酸素濃度が回復した。我々は、数値計算モデルを用いて、今後20年間で気温が1.0℃上昇する場合の琵琶湖深水層における溶存酸素濃度の変化を予測した。それによると、湖面冷却と風による強制混合のみを考慮した場合、約7年後に琵琶湖は無酸素化することがわかった。しかしながら、湖岸冷却や冷たい河川水（融雪水）の貫入を考慮すると、低酸素化傾向が遅くなることもわかった。このように、冬期の気温変化は、湖底付近の溶存酸素濃度に大きな影響を与える。IPCCの予測のように、今後も気温上昇が継続した場合、状況によっては、琵琶湖の北湖深水層で酸素がなくなる可能性も否定できないだろう。

3 琵琶湖環境とエネルギーモデル

琵琶湖の深い場所で溶存酸素が将来なくなること想定した場合、なんらかの修復技術を開発することは、大切なことである。既存の技術としては、空気や

酸素を直接湖底に吹き込む深層ばっ気が一般的であるが、琵琶湖のような大きな湖（最大水深104m、表面積670km²）で実施された事例がないことと、施設の維持管理経費が高額であること、注入した酸素バブルが底泥や湖底付近の栄養塩を上方に輸送することなどから、琵琶湖の実態に合わせた効果的な技術開発が望まれている。

さて、琵琶湖にふり注ぐ年間の太陽エネルギーは、滋賀県で使用する電力の約60年分である。このエネルギーの約45%が湖水を暖めるために使われており、温暖化の進行にともなって湖水はしだいに暖まりつつある。今後も琵琶湖の水温が上昇すると思われることから、我々は、太陽光エネルギーを活用して湖水を水電解し、酸素を湖底に供給することによって琵琶湖の酸素不足を解消するとともに、あらたなエネルギー源として水素を利用する実験をおこなっている。「琵琶湖環境とエネルギーモデル」と名づけたこのプロジェクトは、琵琶湖の環境問題と滋賀県のエネルギー不足を同時に解決しようとする、新たな試みとして期待されている。

本研究では、室内実験の結果と、5月から10月の成層期には湖底の酸素がなくなり完全に嫌気化している琵琶湖南湖の浚渫窪地⁵⁾、および、近年の温暖化にともなって酸素低下が懸念されている琵琶湖北湖の深層部⁶⁾における現地小規模実験の結果について報告する。

4 実験方法

本実験では、(1)電極を湖底に沈めて湖水を直接電解し酸素を電極界面で溶解させる方法（直接電解式と呼ぶ）と、(2)固体高分子膜を用いたPEM式電解槽の陽極に精製水を送水して飽和の溶存酸素水を得る方法（PEM式と呼ぶ）を試験した。いずれの方法も、より多くの酸素を溶存させることと、消費電力を少なくすることが課題である。直接電解式は、生成酸素が電極界面で湖水と直接接触するので、酸素は微細気泡となって溶解されやすいが、湖水の直接電解なので極間抵抗が大きく、多くの電力を必要とする。一方、PEM式は、IR損が小さくエネルギー効率は良好であるが、原料水に湖水は使用できない欠点がある。また、電解槽に純水を供給する必要があるが、本研究では狭雑イオンやけんだく物の少ない雨水を原料水とした。雨水の不純物イオン量は、水道水や湖水の量の約1/10であり、プランクトンなどの生物も含まれな

いので、イオン交換樹脂やフィルターの交換時期はけた違いに延長され、大量に必要とする純水の製造コストを大幅に削減できることがわかった。

4.1 直接電解式を用いた室内実験

直接電解式の実験には3種類の電解槽を用いた。

最初の実験では、有効面が5 cm × 10 cmの白金メッキチタン平板を電極に使用した。電極材料は市販のイオン水生成器などと同じであり、強制通水しない点が異なる。10 cmの長手方向を立てて、その表面を生成ガスが上昇するように電極板をセットした。実験室におけるビーカーテストにより、湖水を直接水電解できることを確認した。

この電解槽を用いて、湖底で予想される低水温への影響や、生物への影響を調べた。ヒメダカ9匹を5 cm × 10 cmの電極と同じ水槽内に投入し、感電性や電解生成物の毒性を予備的に調べたが、短時間(3 hr)では、死亡には至らなかった。

次の実験では、電解槽の両極で発生するガスを混合させないで、水素ガスを回収できるように装置を改良した。電極の寸法は5 cm × 20 cmで、セパレータは用いていない。電極表面をガスが上昇する距離が長いと酸素と水素が混ざりやすくなるので、電極板の短い方(5 cm)を立てて長手方向(20 cm)を横に配置した。電極表面で発生したガスは短時間で電極上面に到達し、直ちに電極背面に抜けるように工夫した。この電解槽を用いて実験したところ、電流効率は62～76%と向上したが、水素ガスの完全な分離回収は現在検討中である。たとえば、混合防止用のセパレータを使うと水素ガスの回収は容易になるが、一方で沈殿物の生成により通電阻害が予想される。

さらに、より多くの酸素を生成するようにフィールド実験用電解槽を作製した。陽陰極はそれぞれ7枚ずつを並列に配置した多層構造とした。水素は、電極上部で一旦捕集して実験系外に放出できる構造となっている。単純な構造だが、湖水中により多くの酸素を溶存させる手段としては有効であることがわかった。

4.2 直接電解式を用いた南湖窪地における小規模野外実験(底泥なしの場合)

琵琶湖南湖にある浚渫窪地(500 m × 500 m × 12 m)で、2006年9月に現地実験をおこなった。電解槽には上述の多層構造フィールド実験用電解槽を用いた。実験方法をFig. 4に示す。70 Lポリバケツに電解槽を1台設置し、1回で約2時間の電解実験を1日2回繰り返し、2日で、合計4回の実験をおこなった。負荷としては、約2 Aの定電流電解をおこなった。バ

ケツ内にセットした機材は、溶存酸素モニター、湖水交換用のポンプ、水質測定サンプリング用のペリスタポンプ(29 sec/ml)である。

4.3 PEM式水電解を用いた室内実験

実験装置のフローをFig. 5に示す。本実験の水電解槽は、主にガスクロマトグラフィー用酸素製造機などに使用されているPEM式である。通常の水素製造システムと異なる点は、多くの酸素を水に溶存させるために大量の純水注入が必要となることである。原料水としては、高価な上水や不純物の多い湖水を使用せずに雨水を利用した。ただし、雨水にも微量の不純物が含まれているので、市販のろ過装置やイオン交換樹脂等を用いて精製した。この精製水をポンプで強制的に陽極側へ送り込んだ。送水量は多いほどよいが、電解槽内の圧力損失やポンプの能力を考慮して2 L/min前後とした。

陽極から排出される加圧水は、飽和溶存酸素と残留酸素ガスが混入した気液混合相となっている。この高圧水の酸素濃度を蛍光式DO計で測定した後、残留した余剰の酸素を、大量の雑用水に溶解させてから、再度大気圧下で溶存酸素濃度を測定した。

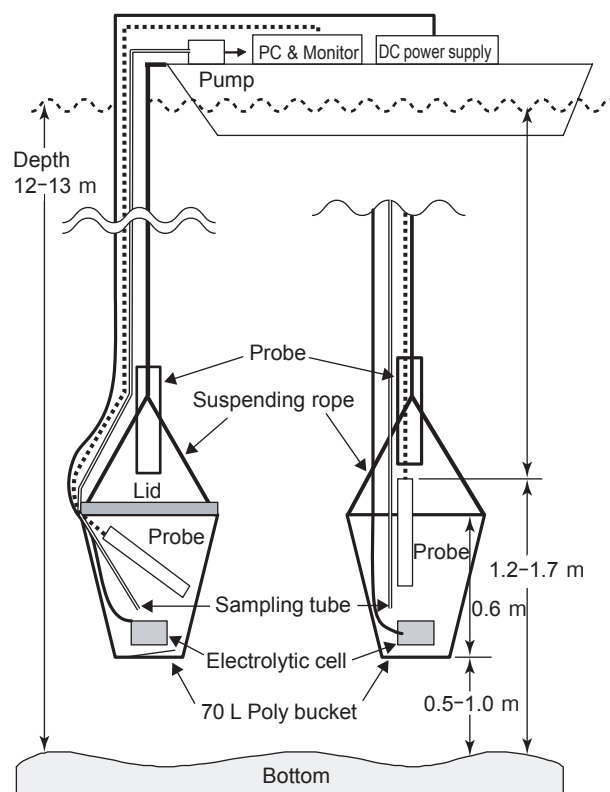


Fig. 4 Field experiment scheme with direct type water electrolysis.

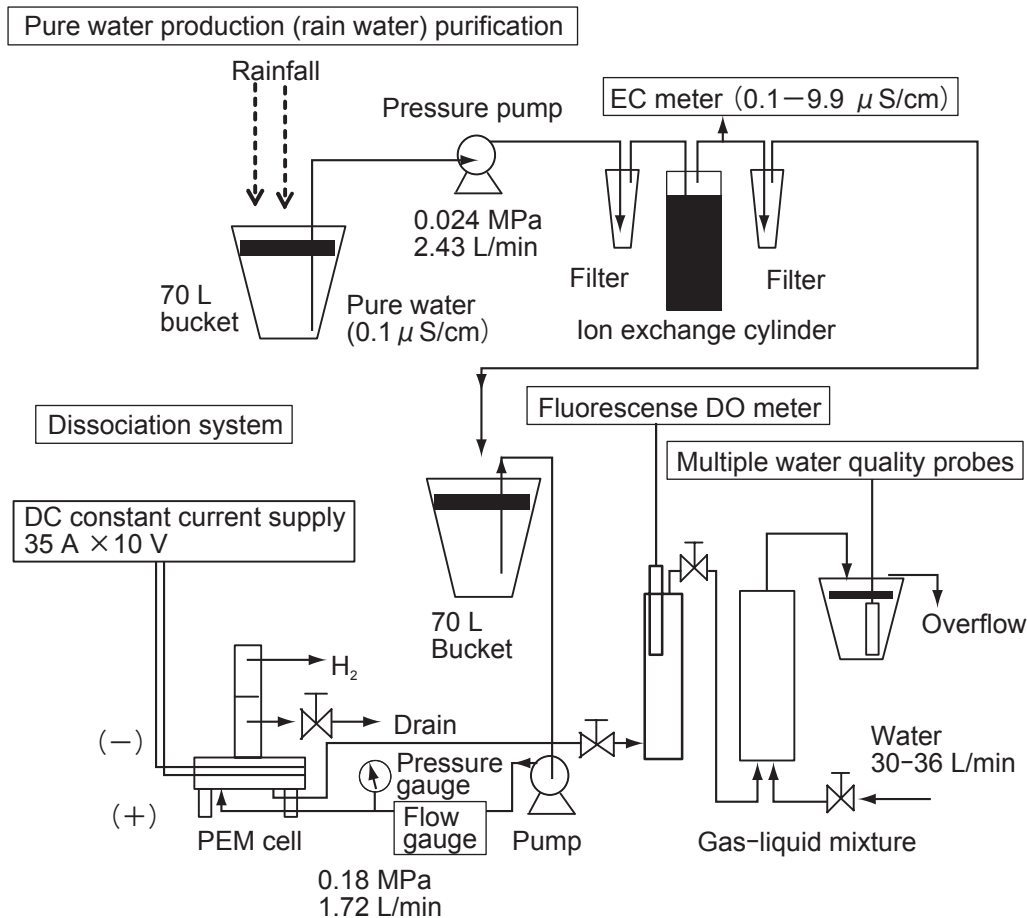


Fig. 5 Flow of experiment with PEM type water electrolysis.

4.4 南湖窪地での小規模野外実験（底泥ありの場合）

直接電解式と PEM 式の両電解方法を用いて、実際のフィールドではどのような溶存酸素の上昇が得られるかを比較する (Fig. 6)。2006 年におこなった底泥の存在しない湖水だけのポリバケツ実験を一步進めて、南湖浚渫窪地の湖底泥上にセットしたケージ (1 m × 1 m × 1 m) の中で底泥を含んだ系での実験をおこなった。直接電解式は、多層構造電解槽 3 台をケージ内に設置した。PEM 式は、湖上で作った溶存酸素水を湖底に注入する方式を選択した。

琵琶湖南湖に係留した実験調査船「はっけん号」の船上で、3 日間にわたって実験をおこなった。1 日目は直接電解法を 2 回、2 日目は PEM 式電解法を 2 回、3 日目は両方法を同時に 1 回おこなった。この実験では、電源も含めて、可能な限り独立的なシステムを満たすように組み合わせをおこなった。すなわち、電力は船上に設置した太陽電池パネルから得た。実験が中断しないようにバッテリーに蓄電した電力を、各方式の電解槽に供給してケージ内の溶存酸素濃度を上昇さ

せた。PEM 式の水素は完全に捕集可能なので、捕集後、荏原バード製の 1 kW 燃料電池に直接供給し、発電で得られた電力を用いてカセットラジオや扇風機を試験的に駆動させた。

4.5 北湖深層部での小規模野外実験（底泥ありの場合）

実験装置の写真を Fig. 7 に示す。南湖で使用したのと同様の底部を開放した 1 m³ のケージ内に直接電解槽を 1 台だけセットした。ケージ内には環境モニターとカメラおよび湖水サンプリングチューブを取り付けて、北湖の水深 90 m 地点で、酸素濃度が 1 mg/L 以下の深層部に直接電解式の電解槽を沈めて水電解をおこなった。種々の都合で、PEM 式電解実験はおこなわなかった。

琵琶湖北湖の深層部で実験をおこなう場合は、電源と電解槽までのケーブルの IR 損が無視できない。しかも、観測船の位置が風向変化によって定まらないから、水深の 30% 増し程度は IR 損を見込んでおく必要がある。定電流電源の電源電圧は、湖底電解槽のセル

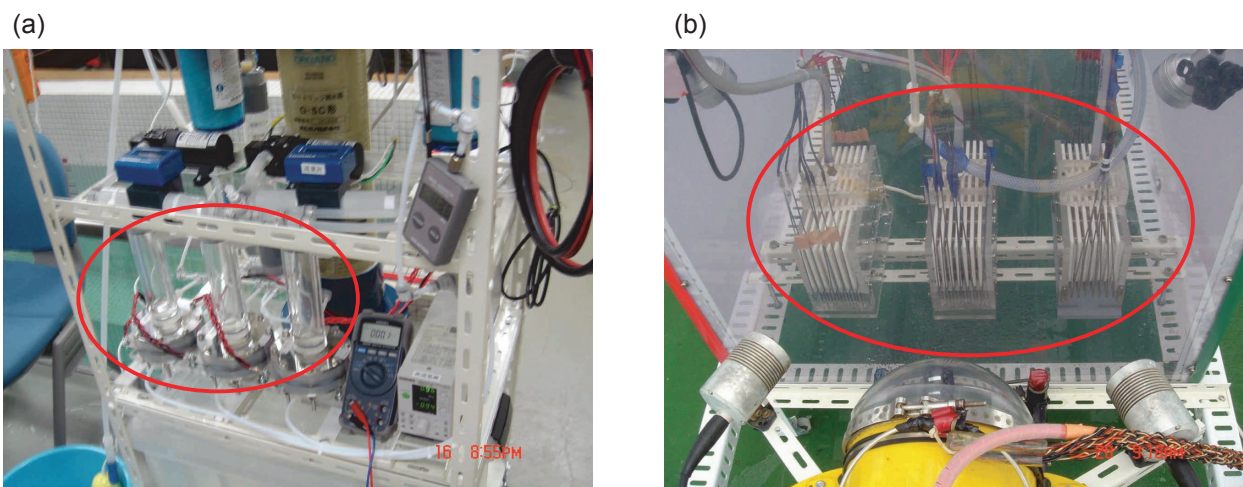


Fig. 6 External appearance of water electrolysis apparatus with polymer electrolyte membrane type (a) and direct type (b) for feeding oxygen gas to increase DO in the deep layer and valuable hydrogen gas of by-product to fuel cell system.

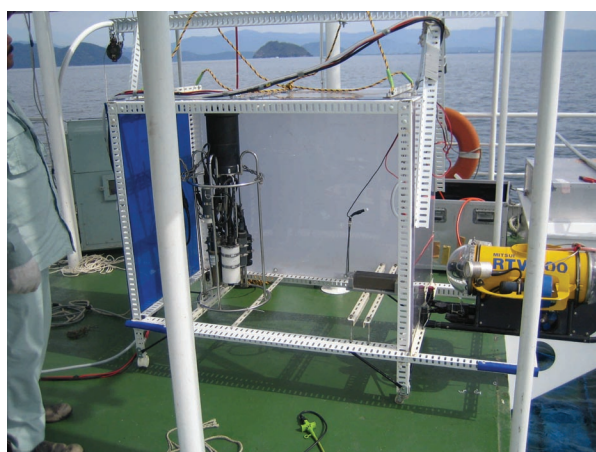


Fig. 7 Test cage for water electrolysis in the North Basin: monitoring probe (left), electrode (middle), and camera (right).

電圧とケーブルの IR 損に振り分けられる。使用した電力ケーブルの断面積は $2.55 \sim 12 \text{ mm}^2$ 、長さは $133 \sim 150 \text{ m}$ で、室温 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ で $6 \sim 7.5 \text{ A}$ を通電すると抵抗値は $1.0526 \text{ } \Omega$ であった。これは電源電圧の約 30% の損失に相当する。さらに、銅線の抵抗値は、温度によって変わる。琵琶湖の水温は実験当日、表面で $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 、湖底で $8 \text{ }^\circ\text{C}$ 、平均で $15 \text{ }^\circ\text{C}$ だった。陸上予備実験での気温 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ と湖水温 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ の温度換算係数は 0.97163 (化学便覧) なので、水温 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ での抵抗を計算すると $1.0227 \text{ } \Omega$ (3% 減) と推測できた。この値は、電源電圧からセル電圧を間接的に求める場合に使用した。

5 実験結果と考察

5.1 直接電解式の室内実験結果

最初の基礎実験に用いた電解槽では、有効面積 50 cm^2 の電極 ($10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$) 2 枚を極間 6.5 mm で対面配置させ、表面湖水 9 L を静置状態で水電解をおこなったところ、直流 6 V で 0.0813 A が流れた。5.5 時間の通電中に水上置換法で捕集された水素体積 (標準状態) から電流効率を計算すると 42% であった。これを改善するために極間を 4.6 mm に小さくすると電流効率は 60% となった。もし、水の理論分解電圧 1.23 V 、電流効率は 100% の場合の理論的エネルギー効率を 100% と定義すれば、この実験で得られたエネルギー効率は 12% となった。湖水の導電率は低いので、投入エネルギーの $60 \sim 70\%$ は両電極間の IR 損に消費されていることになる。

さらに、発展させた実験では、有効面積が 2 倍の電極 ($20 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} = 100 \text{ cm}^2$)、極間 4.5 mm の電解槽を用いた。その結果、セル電圧 $5.93 \sim 6.20 \text{ V}$ 、電流値 0.184 A の条件で、2 時間の通電をおこなったところ、水素生成の電流効率は 72% となった。

最後に、本格的な実験として、陽陰極それぞれ 7 枚ずつからなる多層構造の電解槽 (有効面積 $100 \text{ cm}^2 \times 13$ 面、極間 4.5 mm) を用いた実験では、セル電圧 6 V で 1.8 A の電流が得られた。両ガスは分離していないので電流効率は、測定できなかったが、理論上は、 2 A を 1 時間通電すると酸素が 0.597 g 生成するはずなので、 70 L バケツの無酸素水を 8.5 mg/L まで回復

させる能力があるものと推測された。

また、これらの電極を用いて生物の耐性実験をおこなった。用いた生物は、メダカ、モノアラガイ、カワニナ、シジミ、バクテリアであった。1週間程度の実験をおこなったが、バクテリアの活性が低下したのみで、その他の生物の生残率には影響がみられなかった。

5.2 南湖浚渫窪地での小規模野外実験結果（底泥なしの場合）

琵琶湖南湖浚渫窪地における小規模野外実験を、2日間で4回おこなった。電解槽（多層形1台）への電力は $2.14 \text{ A} \times 7.8 \text{ V} = 16.7 \text{ W}$ であった。1日目（2006.9.14）の酸素上昇量は 4.7 mg/L/hr および 6.0 mg/L/hr であった。2日目（2006.9.22）は 6.1 mg/L/hr および 5.8 mg/L/hr であった。これら4回の値の平均値は 5.65 mg/L/hr であり、初めての湖水実験としては、比較的再現性がよかった。70 Lバケツ内で増加した酸素量は 0.396 g/hr であり、通電量から計算される酸素生成量（ 0.639 g/hr ）を100%とすれば、その内の62%が溶解したことになる。残りの38%は、未溶解の酸素ガスと電流効率の不足分である。

5.3 PEM式水電解の室内実験結果

PEM式に投入する精製水を作る場合に重要な指標は導電率である。コストは不純物イオンの量にほぼ比例するから、導電率が小さいほど不純物イオン量は少なく、精製コストは安価になる。各種原料水の導電率を実測値と比較すると、水道水（大阪市）は $179 \mu\text{S/cm}$ 、琵琶湖水は $120 \mu\text{S/cm}$ 、雨水は $15 \mu\text{S/cm}$ であった。いずれの水も、イオン交換処理後は $2 \mu\text{S/cm}$ となった。このことから、雨水を使用すれば1/10程度の処理費用ですむことが予想される。

PEM式水電解の電圧—電流特性を調べた。定格電流 35 A でのセル電圧は 2.34 V 、そのときの精製水の水温は $21 \text{ }^\circ\text{C}$ であった。商用的な水電解装置のように陽極水を循環させながら沸点近くで運転すれば、必要な電圧は 1.9 V 程度である。しかし、水素だけでなく、飽和溶存酸素水を得る目的だと、常温では高水温になると酸素はほとんど溶解しないので高温では稼働できない。

PEM式電解槽の陰極から水素が発生するので、水上置換法で水素を捕集し電解槽の電流効率を調べた。定格電流 35 A （ 0.7 A/cm^2 ）では98%が得られた。したがって、本電解槽の低温操業における水素の電力原単位は 5.8 kWhr/Nm^3 と計算できる。市販の高温形PEMでは 4.5 kWhr/Nm^3 といわれているので、少し効率は低下するが、使用可能な範囲といえる。

一方、陽極側で得られる酸素の溶解効率について調べた。高圧下（ 0.182 MPa ）にある蛍光式DOモニターの値は 67 mg/L であった。酸素の溶解効率は、酸素の物質収支から計算した。流入してくる酸素は原料純水分と電解生成分（電流量から計算）、流出する酸素は未溶解の酸素ガスと溶解した酸素分（DOモニター値×原料水流量）である。全流入酸素量の 191 mg/min に対して溶存酸素量は 116 mg/min となり、発生酸素全体の61%が溶解していたことがわかった。

5.4 南湖窪地での小規模野外実験結果（底泥ありの場合）

実験結果をFig. 8に示す。直接電解式の電極実験1と2は酸素上昇勾配に差が生じたのに対して、PEM1と2では大きな差が見られなかった。1000 Lケージ内における溶存酸素上昇勾配は、電極実験1と2、PEM1と2の順に、それぞれ 4.13 、 8.24 、 4.99 、 6.53 mg/L/hr であった。さらに、電極実験1と2の電解電流は 22.59 A （3台並列の合計）、セル電圧は 19.38 V （3台の平均値、ケーブルIR損補正後）であった。PEM1と2の電解電流は 35 A （定格に設定、3台直列接続）、セル電圧は 7.23 V （ $2.41 \text{ V/セル} \times 3 \text{ セル直列接続}$ ）であった。電力は、電極実験が 438 W 、PEMが 253 W である。

以上の結果から、電力原単位を計算すると、電極実験1、2は 152 、 76 Whr/NL 、PEM1、2は 72 、 55 Whr/NL となる。酸素側の理論的電力原単位、 5.89 Whr/NL （ 1.23 V 、電流効率100%）に対する電力効

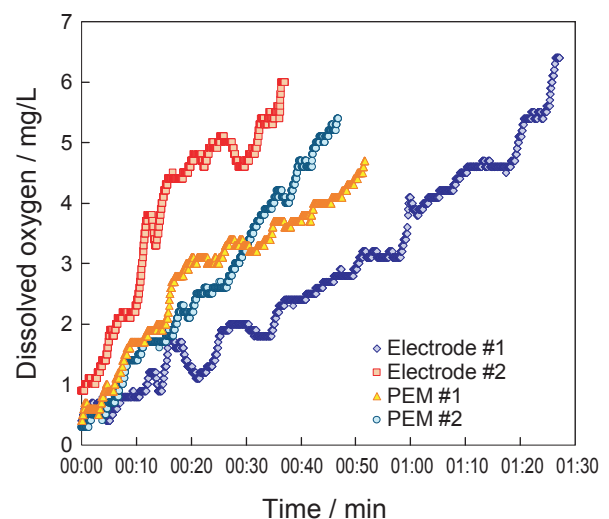


Fig. 8 Promising results of water electrolysis experiments in the South Basin during July 18–20, 2007.

率（溶解効率を含む）は、直接電解実験1, 2では3.9, 7.8%, PEM式1, 2では8.2, 10.7%となっている。これらの効率が低い理由は、直接電解実験では極間抵抗が高く、PEMでは酸素が溶解できずに気体のままケージに送り込まれたためと思われる。

5.5 北湖深層部での小規模野外実験結果（底泥あり）

実験結果を Fig. 9 に示す。1日で2回実験した。1回目は電解時間が12:03～12:30で、DO上昇分は0.57 mg/L、2回目は13:58～14:53で、DO上昇分は0.74 mg/Lであった。消費電力は、1回目が6.67 A, 16.4 V (49.2 Whr) で、2回目が7.27 A, 16.7 V (111.3 Whr) であった。電力原単位を計算すると、1回目が123 Whr/NL、2回目が215 Whr/NLとなった。電力効率ではそれぞれ、4.8, 2.7%と小さな値となっているが、このことは、琵琶湖の湖底泥が大量の酸素を吸収している可能性を示唆している。実際に、湖底から引き上げた泥が硫化水素の臭気を放つ現象が観察される場合があった。すなわち、水電解で発生した酸素が、溶存酸素濃度の上昇に使用されるまでに、各種の還元物質の酸化に利用されたことが考えられる。

6 まとめ

琵琶湖北湖に注がれる太陽の年間全天日射量は、約 6.8×10^{14} kcal である。これは、電力量に直すと約 7.9×10^{11} kWh となり、滋賀県で年間使用する電力量 1.25×10^{10} kWh (2002年実績) の約60倍に値する。また、わが国における年間の総発電量の78%にも達する。驚くほど多くのエネルギーが、太陽から琵琶湖に注がれていることがわかる。ただ、このエネルギーのすべてが湖に吸収されるのではなく、湖面で反射されて大気中に逸散するものもある。また、いったん湖水に吸収されたエネルギーも、水の蒸発（潜熱）や熱伝導による熱交換（顕熱）となって空気の流れ（対流）を生じ、降水現象や風の変化などといった天気の変化をひきおこすために使われる。

一方、琵琶湖に取り込まれた太陽エネルギーのほとんどは、湖水を温めるために使われる。春から夏にかけて、湖は暖められ水中に熱が蓄積される。一方、秋から冬にかけて、冷却によって湖の熱は大気へと伝わり、水温は低下する。逆に、暖まった大気は、琵琶湖周辺の気候を穏やかに保つことになる (Fig. 1)。例えば、2004年2月11日には滋賀県南部に位置する信楽地方で最低気温が -8.0 °C であったが、琵琶湖北西部に位置する今津では -3.6 °C であった。

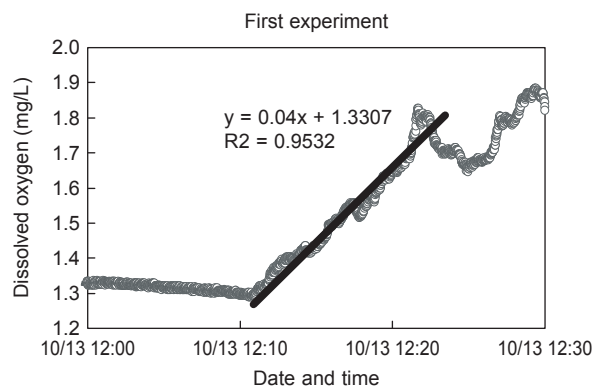


Fig. 9 Result of the first water electrolysis experiment in the North Basin of Lake Biwa on October 13, 2007.

大気から湖水に入る年間の熱エネルギーは 3.05×10^{14} kcal で、湖水から大気へ出る年間の熱エネルギーは 3.03×10^{14} kcal である。したがって、琵琶湖に注がれる全天日射量の約45%が正味の水温上昇として使われることになる。加熱と冷却の間に少し差があるのは、湖が少しずつ暖まってきていることを示している。実際、25年間で琵琶湖内に蓄積した熱量は 5.0×10^{13} kcal であり、その結果水温は約1.8°C上昇している。これは過去25年間における滋賀県の平均気温上昇とほとんど同じであり、琵琶湖の水温変化が地球温暖化傾向と同調していることを裏付けている。

つまり、地球温暖化の進行にともない、琵琶湖には多くの熱量が蓄積されることになる。このことは、琵琶湖の上下循環を弱め、湖底への酸素供給量を減少させる。琵琶湖における理想的な環境を実現するためには、太陽光による自然エネルギーをうまく制御し、湖内における冬期循環を促進し、深水層の溶存酸素濃度を十分供給するための最適な方法を見つけ出すことである。そのために、我々は琵琶湖北湖低酸素化問題検討委員会（平成14年度～16年度、委員長浦環東大教授）および琵琶湖環境とエネルギー検討委員会（平成17年度～19年度、委員長伊藤靖彦同志社大学教授）を設置し、過去6カ年にわたる議論を重ね、水電解による酸素供給の試験をおこなってきた。

琵琶湖水の水電解の妥当性を検証するために、湖底泥と湖水が共存する系の室内水電解実験と、琵琶湖南湖浚渫窪地および北湖低酸素水域における現地小規模電解実験をおこなった。室内実験から、湖底泥による溶存酸素消費速度は、琵琶湖北湖および南湖の両方において、水温が高いほど速くなるが、おおよそ0.01

～0.25 mg/L/hrの範囲になることがわかった。今後、地球温暖化が進行し、湖底水温が高くなると、底泥における酸素要求量(SOD)は、さらに大きくなることが予想される。

一方、これらの底泥および湖水が共存する柱状堆積物試料の中に、5 cm × 10 cmの電極を挿入して水電解をおこなった結果、2～20 mg/L/hrの酸素増加があることがわかった。この数値の変動は、水温やSODの強さに依存すると思われるので、今後さらに検証実験をおこなう必要がある。ただし、電極面積や電流値にも依存するが、酸素消費速度のほぼ100倍の供給速度があるので、水電解が湖底への酸素供給に十分貢献することが示唆された。また、先にものべたように、種々の室内実験および野外小規模実験の両方において水電解実験をおこない、その有効性と実用可能性を示すことができた。

同時に、水電解が水質や生態系へおよぼす影響についての評価をおこなっているが、傾向としては、動物プランクトンから上位の大形動物に対して悪影響はなく、コントロールと比較して、生存確率は高くなる傾向が見られた。しかし、バクテリアや植物プランクトンへの成長阻害や、低酸素を好む生物(糸ミミズなど)には影響がでそうである。これは、水電解によって過酸化水素水や次亜塩素酸、オゾンなどが発生する可能性のあることや、純酸素の生成による過飽和な酸素濃度障害が原因しているかもしれない。今後さらに実験とシステム改良を重ね、生物への影響が少ない電極を開発する必要がある。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、琵琶湖北湖低酸素化問題検討委員会(平成14年度～16年度)および琵琶湖環境とエネルギー検討委員会(平成17年度～19年度)の各委員には格別のご支援とご協力を賜った。また、琵琶湖環境科学研究センターのスタッフおよび、実験調査船「はっけん号」の乗組員には、実験の実施に際して積極的な協力をいただいた。あわせて、御礼申し上げます。なお、本研究は、滋賀県水素エネルギー産学官連携共同研究事業の一環として実施した。

文 献

- 1) 中賢治, びわ湖深層の全循環期前の溶存酸素量の永年変化について, 陸水学雑誌, **34**,41-43 (1973).
- 2) 熊谷道夫, 石川可奈子, 焦春萌, 青田容明, 琵琶湖の深刻な問題. 編集: 熊谷道夫, 石川可奈子, 世界の湖沼と地球環境, 古今書院, 21-32 (2006).
- 3) IPCC, Climate Change 2007-The Physical Science Basis, Cambridge University Press (2007).
- 4) M. Kumagai, Lake Biwa in the context of world lake problems, Baldi Memorial Lecture, Verh. Internat. Verein. Limnol. 30, (2007) in press.
- 5) 熊谷道夫, 前田広人, 大西行雄, 鉛直循環と無酸素層の形成—琵琶湖南湖浚渫窪みの例—, *Jpn. J. Limnol.*, **47**, 27-35 (1986).
- 6) 由水千景, 西村洋子, Kim Chulgoo, 永田俊, 琵琶湖北湖深水層における溶存酸素の消費速度, 琵琶湖北湖低酸素化問題検討委員会最終報告書, 21-30 (2005).