

水素エネルギー産学官連携共同研究

熊谷道夫・早川和秀・焦春萌・辻村茂男・伊藤靖彦¹⁾・田坂明政¹⁾・福中康博²⁾・伊藤博³⁾・細田尚⁴⁾・杉山雅人⁵⁾・伴修平⁶⁾・朴虎東⁷⁾・北澤大輔⁸⁾

1. はじめに

琵琶湖の深水域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80m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。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言えよう。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(特にリン)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。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℃気温が上昇すると言われており、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言える。

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述べるとともに、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、併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、特に、過去20年間に約1.0℃という大きな気温上昇が起こっている。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(図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、気温上昇が大きい地点は、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言える。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。

一方、図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℃前後の冷た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及ぼすと思われるが、確定的な検証はまだ行われていない。ただ、図3に示したように1985年以降、琵琶湖湖底付近の溶存酸素濃度は低下してきているし、水産試験場のデータによると、深水域で硝酸態窒素やリン酸態

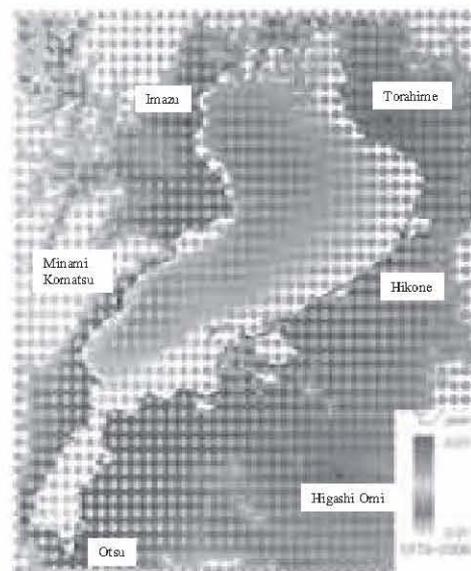


図1 琵琶湖周辺における気温上昇率(アメダスによる)

1) 同志社大学工学部、2) 京都大学大学院エネルギー科学研究科、3) (独)産業技術総合研究所、4) 京都大学大学院工学研究科、5) 京都大学総合人間学部、6) 滋賀県立大学環境科学部、7) 信州大学理学部、8) 東京大学生産技術研究所

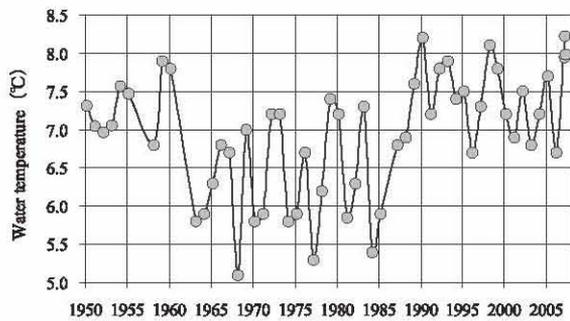


図2 3月における湖底(80m)水温の変化(水産試験場データ)

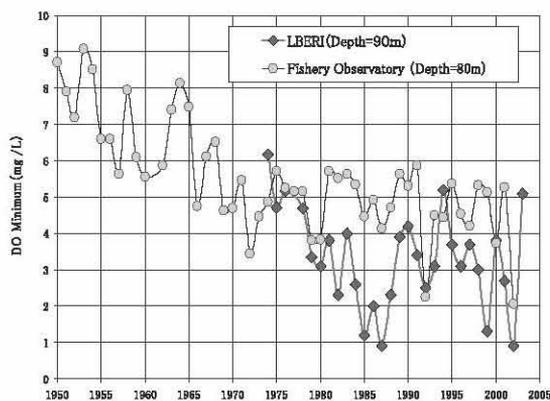


図3 琵琶湖北湖における年最低溶存酸素濃度の変化

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型潜水ロボット「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言える。ところが、2007年の冬は暖冬で、湖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曝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、温暖化の進行に伴って湖水は次第に暖まりつつある。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共に、あらたなエネルギー源として水を利用する実験を行っている。「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、および、近年の温暖化に伴って酸素低下が懸念されている琵琶湖北湖の深層部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

水電解法としては、工業的なアルカリ式や固体高分子膜を用いたいわゆるPEM式がある。一方、家庭用のアルカリイオン水生成器などの水電解法では、水に直接電極を接触させるので酸素が溶解しやすいのが特徴である。

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、②PEM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、電極界面で生成酸素が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、本研究では雑種イオンや懸濁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との交換時期は桁違いに延長され、大量に必要な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 5cm×10cm 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。10cm 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の影響や、生物への影響を調べた。ヒメダカ 9 匹を 5cm×10cm 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 (3hr) 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 5×20cm 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 (5cm) を立てて長手方向 (20cm) 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様に工夫した。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障害が予想される。

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 (500m×500m×12m) で、2006 年 9 月に現地実験を行った。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。実験方法を図 4 に示す。70L 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 回の実験を行った。負荷としては、約 2A の定電流電解を

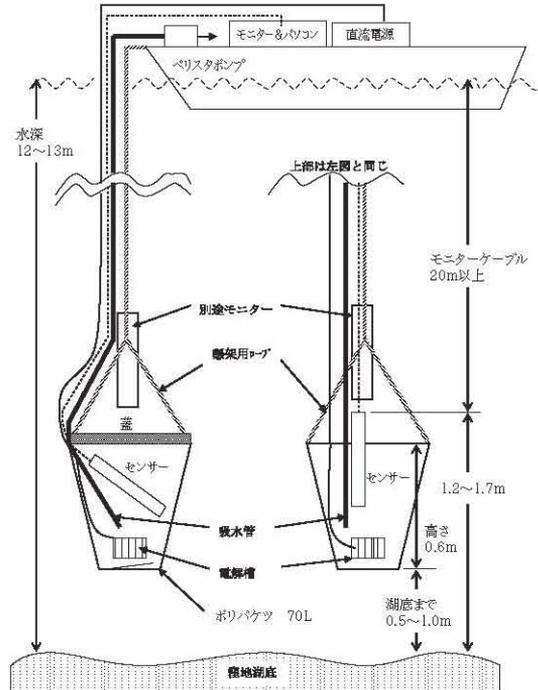


図 4 小規模野外実験方法

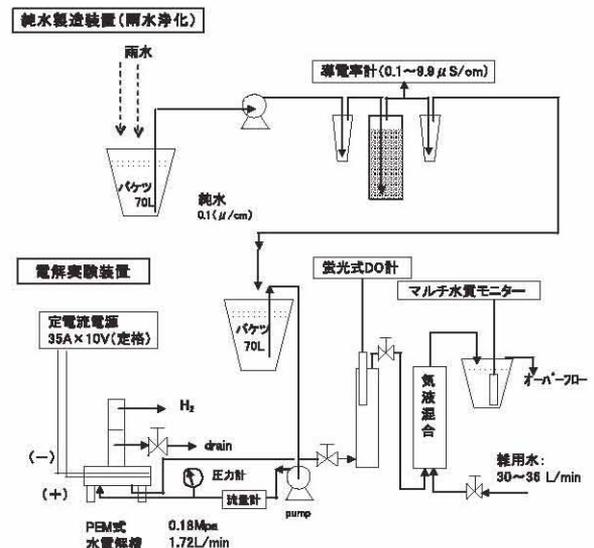


図 5 実験装置のフロー図

流した。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図 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水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。本実験での水圧は最高で 1.8 気圧であり、琵琶湖湖底の水圧である 10 気圧より小さいが、実用に際して湖底に送水するのに必要な圧力は、10 気圧ではなくて水深約 100m で生じる小さな圧力損失分のみと予想されるため許容範囲であろう。

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（図 6）。2006 年に行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（1m×1m×1m）の中で底泥を含んだ系での実験を行った。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行った。1 日目は直接電解法を 2 回行い、2 日目は PEM 式電解法を 2 回行い、3 日目は両方法を同時に 1 回行った。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行った。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 1kw 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）

実験装置の写真を図 7 に示す。南湖で使用したのと同様の底部を開放した 1m³ 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 90m 地点で、酸素濃度が 1mg/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行った。種々の都合で、PEM 式電解実験は行わなかった。

琵琶湖北湖の深層部で実験を行う場合は、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の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 2.55~12mm²、長さは 133~150m で、室温 22°C で 6~7.5A を通電すると抵抗値は 1.0526Ω 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°C、湖底で 8°C、平均で 15°C だった。陸上予備実験での気温 22°C と湖水温 15°C の温度換算係数は 0.97163（化学便覧）なので、水温 15°C での抵抗を計算すると 1.0227Ω（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。

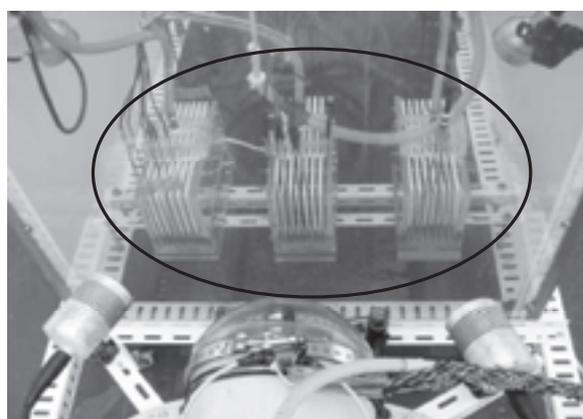
5. 実験結果と考察

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 50cm² の電極（10cm×5cm）2 枚を極間 6.5mm で対面配置させ、



電解質膜による水電解
PEM



直接水電解

図 6 副産物として水素を生成する 2 種類の水電解法試験

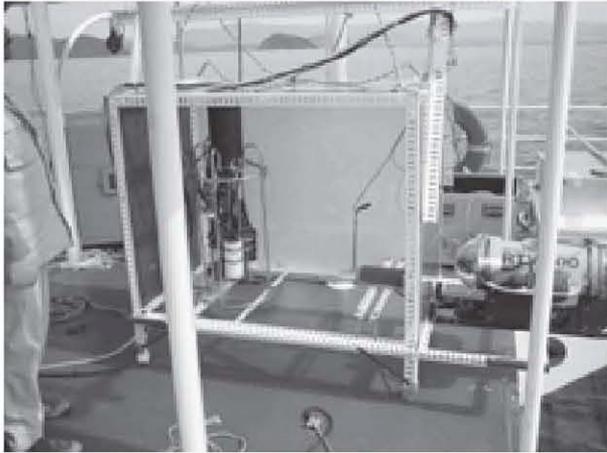


図7 北湖での水電解実験装置：左から多項目水質計、電極、監視カメラ

表面湖水 9L を静置状態で水電解を行ったところ、直流 6V で 0.0813A 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 4.6mm に詰めると電流効率は 60%となった。もし、エネルギー損失が全くなければ、水の分解電圧 1.23V に対して電流効率は 100%となるが、この場合を理論的エネルギー効率 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 60~70%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（20cm×5cm=100cm²）、極間 4.5mm の電解槽を用いた。その結果、セル電圧 5.93~6.20V、電流値 0.184A の条件で、2 時間の通電を行ったところ、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 100cm²×13 面、極間 4.5mm）を用いた実験では、セル電圧 6V で 1.8A 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、2A を 1 時間通電すると酸素が 0.597g 生成するはずなので、70L バケツの無酸素水を 8.5mg/L まで回復させる能力があるだろうと推測された。

また、これらの電極を用いて生物の耐性実験を行った。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 週間程度の実験を行ったが、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 回行った。電解槽（多層型 1 台）への電力は 2.14A × 7.8V = 16.7W 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 5.8mg/L/hr であった。これら 4 回の値の平均値は 5.65mg/L/hr であり、初めての湖水実験としては、比較的再現性が良かった。70L バケツ内で増加した酸素量は 0.396g/hr であり、通電量から計算される酸素生成量（0.639g/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ファクターは導電率である。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（天津市）は 179 μS/cm、琵琶湖水は 120 μS/cm、雨水は 15 μS/cm であった。いずれの水も、イオン交換処理後は 2 μS/cm となった。このことから、雨水を使用すれば 1/10 程度の処理費用で済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 35A でのセル電圧は 2.34V、その時の精製水の水温は 21℃であった。商用の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 1.9V 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、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 35A（0.7A/cm²）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 5.8kwhr/Nm³ と計算できる。市販の高温型 PEM では 4.5kwhr/Nm³ と言われているので、少し効率は悪くなるが、使用可能な範囲と言える。

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（0.182MPa）にある蛍光式 DO モニターの値は 67mg/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 191mg/min に対して溶存酸素量は 116mg/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）

実験結果を図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。1000L 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, 6.53mg/L/hrであった。さらに、電極実験1と2の電解電流は22.59A（3台並列の合計）、セル電圧は19.38V（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35A（定格に設定、3台直列接続）、セル電圧は7.23V（2.41V/セル×3セル直列接続）であった。電力は、電極実験が438W、PEMが253W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, 76whr/NL、PEM1, 2は72, 55whr/NLとなる。酸素側の理論的電力原単位、5.89whr/NL（1.23V、電流効率100%）に対する電力効率（溶解効率を含む）は、電極実験1, 2では3.9, 7.8%、PEM1, 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、電極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）

実験結果を図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0.57mg/L、2回目は13:58-14:53で、DO上昇分は0.74mg/Lであった。消費電力は、1回目が6.67A, 16.4V（49.2whr）で、2回目が7.27A, 16.7V（111.3whr）であった。電力原単位を計算すると、1回目が123whr/NL、2回目が215whr/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

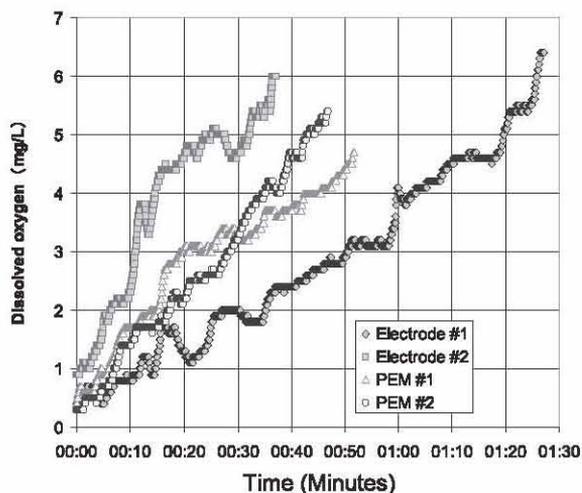


図8 南湖窪地における野外小規模水電解実験の結果（2007年7月18日～20日）

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、滋賀県で年間に使用する電力量 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電力量の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）となって空気の運動（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引き起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（図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 ℃であったが、琵琶湖北西部に位置する今津では -3.6 ℃であった。

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

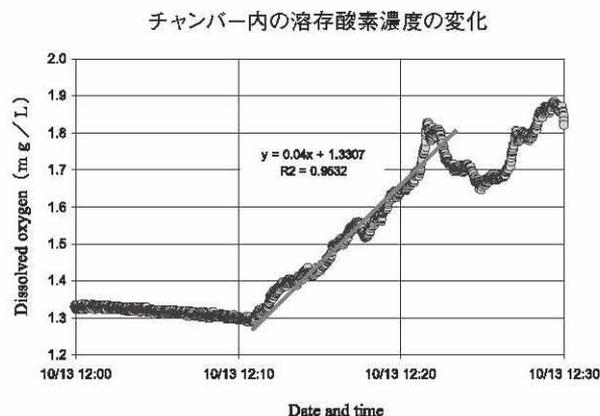


図9 北湖深層部における小規模野外水電解実験の結果（2007年10月13日）

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℃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伴い、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 年にわたる議論を重ね、水電解による酸素供給の試験を行ってきた。

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行った。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 0.01～0.25mg/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、5cm×10cm の電極を挿入して水電解を行った結果、2～20mg/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行う必要がある。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、先にも述べたように、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行い、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及ぼす影響についての評価を行っているが、傾向としては、動物プランクトンから上位の大型動物に対して悪影響はなく、コントロールと比較して、生存確率に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(糸ミズなど)には影響が出そうである。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。

最後に、深層曝気による酸素供給法と PEM 式および電極式のコストを比較してみる(表 1)。計算条件としては、湖底付近の溶存酸素濃度が低い水塊(1000 万トンと 1 億トンの場合)の溶存酸素濃度を 1mg/L だけ回復させることを想定している。

空気曝気の場合は、純酸素注入に比べて溶解効率が悪いことと、湖底泥をかき混ぜる可能性が高いので、水質

表 1 酸素注入手法のコスト比較

| コスト要因・経済性(計算基準) | (※付帯設備は除く) | 単位 | PEM式 | 電極式(直接電解) | 曝気式(従来法) |
|---|---|-----------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 被処理水 1000万トン | | | | | |
| 運転費 | 消費電力量 = (必要酸素量)/(kwh当りの有効酸素量) 年間電力料金 = (開電・従量電灯B=20.70円/kwh) | kwh/年 円/年 | 4.46 × 10 ⁵ (923万円) | 7.35 × 10 ⁵ (1521万円) | 12.3 × 10 ⁵ 2550万円 |
| 設備費 | 使用ソーラーパネル面積 (3kw用, 23.08m ² で3,500kwh) | m ² | 2,934 | 4,836 | 深層曝気設備事例(1.5億) 水深8m以深の水量 = 180万トン |
| | 太陽電池発電能力 (0.13kw/m ²) | kw | 381 | 629 | |
| | 太陽発電システム (73万円/kw) | 円 | 2億 7800万円 | 4億 5900万円 | |
| | 電極面積当りの生成溶解速度 (⑨=⑩平均/⑪×10000) | g/h・m ² | 539 | 15.7 | DO改善実績=1mg/L |
| | 電極電流密度 | A/cm ² | 1 | 0.00591 | 圧縮機出力=44kW |
| | 必要電極面積(昼夜連続稼働)=(必要酸素量/(365×24))/⑩ | m ² | 2.12 | 72.7 | 運転期間=7ヶ月(210日) |
| 水電解槽価格 (SPE=500万円/m ² , 電極式=5万円/m ²) | 円 | 1060万円 | 364万円 | 深層曝気導入コスト | |
| 電源・その他 | 円 | 51万円 | 84万円 | 8億 3300円 | |
| 初期設備投資額 | 円 | 2億 8911万円 | 4億 6348万円 | 8億 3300円 | |
| 被処理水 1億トン | | | | | |
| 運転費 | 消費電力量 = (必要酸素量)/(kwh当りの有効酸素量) 年間電力料金 = (開電・工場等利用=13.82円/kwh) | kwh/年 円/年 | 4.46 × 10 ⁶ (8200万円) | 7.35 × 10 ⁶ (1億 200万円) | 12.3 × 10 ⁶ 1億 7000万円 |
| 設備費 | 使用ソーラーパネル面積 (3kw用, 23.08m ² で3,500kwh) | m ² | 29,340 | 48,360 | |
| | 太陽電池発電能力 (0.13kw/m ²) | kw | 3,810 | 6,290 | |
| | 太陽発電システム (73万円/kw) | 円 | 27億 8000万円 | 45億 9000万円 | |
| | 必要電極面積(昼夜連続稼働)=(必要酸素量/(365×24))/⑩ | m ² | 21.2 | 727 | 深層曝気導入コスト |
| | 水電解槽価格 (SPE=400万円/m ² , 電極式=4万円/m ²) | 円 | 8500万円 | 2900万円 | 83億 3000円 |
| | 電源・その他 | 円 | 510万円 | 840万円 | 83億 3000円 |
| 初期設備投資額 | 円 | 28億 7010万円 | 46億 2740万円 | 83億 3000円 | |
| 水素回収(1億トン処理時) | | | | | |
| 水素発生量(100%回収) | Nm ³ /年 | 1.4 × 10 ⁵ | 検討が必要 | 水素は回収できず | |
| 水素売却費(将来コスト 80円/Nm ³ 仮定) | 円/年 | 1120万円 | (~1120万円) | 0 | |
| 水質や生態系への影響 | | なし | 検討が必要 | 湖底の泥が巻き上がる | |
| 被処理水 1000万トンの場合 | | | 台船 50×50m | 台船 70×70m | 配電盤、湖底ケーブル |
| 被処理水 1億トンの場合 | | | 台船 170×170m | 台船 220×220m | 配電盤、湖底ケーブル |

に与える影響が大きい。また、商用電源を使うので、電気代などの維持管理費が高くかかる。太陽光パネルなどの高額な初期コストを考慮しなければ、水電解による方法は副次生産物として水素が回収できるので、収支としては利益を生み出す可能性があることがわかった。

文献

- 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).
- 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).
- IPCC: Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Cambridge University Press. (2007).
- Kumagai, M.: Lake Biwa in the context of world lake problems. Baldi Memorial Lecture. Verh. Internat. Verein. Limnol. 30, (2007) in press.
- 熊谷道夫、前田広人、大西行雄: 鉛直循環と無酸素層の形成-琵琶湖南湖浚渫程みの例一、Jpn. J. Limnol., 47, 27-35 (1986).
- 由水千景・西村洋子・Kim Chulgoo・永田俊: 琵琶湖北湖深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).

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。併せて、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。