

酸素同位体比と湿度を 利用した湖の蒸発率推定法の提案

PROPOSAL OF METHOD FOR ESTIMATING THE EVAPORATION RATE
IN LAKE BY USING OXYGEN ISOTOPIC RATIOS AND HUMIDITY

宮路和葉¹・井伊博行²・宮原啓³

Kazuha MIYAJI, Hiroyuki II and Satoshi MIYAHARA

¹学生会員 和歌山大学大学院 システム工学研究科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

²正会員 博(理) 和歌山大学教授 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

³学生会員 和歌山大学 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

In this paper, a new method for estimating the evaporation rate in lakes and ponds was proposed using oxygen isotopic ratio and humidity. Oxygen isotopic ratio changes with evaporation rate. Evaporation rate is defined as amount of evaporated water divided by amount of water before evaporating. However, the change of oxygen isotopic ratio of water depends on also many parameters such as temperature, partition coefficient, humidity and oxygen isotopic ratio of vapor. In laboratory test, the relationship between humidity, evaporation rate and oxygen isotopic ratios of water was clarified. Oxygen isotopic ratio/evaporation rate decreases with humidity under the same water and then oxygen isotopic ratio/evaporation rate can be estimated from only humidity. Therefore, evaporation rate in an actual lake can be calculated from oxygen isotopic ratio and humidity based on the relation.

Key Words : *evaporation, oxygen isotopic ratio, humidity, lake*

1. はじめに

「水の惑星」である地球で、今後、水をめぐって争いが起こると言われている。地球温暖化や世界各地で起きている異常気象、世界の人口増加、発展途上国の急速な農業化・工業化などによって、世界の水問題は深刻になっている。そこで、水の使用可能な量を知り、私たちは限りある水を計画的に使用していかなければならない。そのためには、湖や池に貯水した水を使用する必要がある。貯めた水の蒸発率を評価することは水の運用上、必要である。また、直接測定が難しい湖や池からの漏水量や地下浸透量の推定には、蒸発量が試算上、必要である。

同位体を用いた蒸発に関する研究は Allison et al.¹⁾, Gibson et al.²⁾ などによって以前からなされており、蒸発量を求める方法も少なくはない。しかし、同位体を用いた蒸発に関する式には様々なパラメーターを含んでおり、値が分からないパラメーターもあるので、実用化されていない。過去の研究では全てのパラメーターを考慮しよ

うとしていたが、実際、全てのパラメーターを考慮することは大変難しく、無理がある(例えば、乾燥地の ϵ^* を用いて乾燥地でない日本の池田湖の蒸発量が試算されている³⁾)。過去の研究では、その解決策として、湖沼付近で蒸発パン等を利用して蒸発実験を行っている。これは、湖沼と蒸発パンの蒸発時の環境条件(微気象条件)が全て同じになるので、全てのパラメーターを考慮することができる。しかし、長期的に実験を行う必要があり、実験期間中は現地にいなければならないので困難である。蒸発に伴う同位体比の変化の式(式(2)参照)によると、蒸発によって水の同位体比は一方的に重くなるのではなく、空気中の水蒸気の同位体比と湿度によって支配される。狭い乾燥器の中では、大気中の水蒸気の同位体比の値は、蒸発させる水の同位体比によって決まるので、現地の対象となる湖水を用いて乾燥器内で蒸発実験を行えば、器内の空気中の同位体比は、現地の大気中の同位体比と大きくずれないと考えられる。

そこで、本研究では、全てのパラメーターを考慮して計算するのではなく、湿度をメインに同位体を用いた蒸

表-1 蒸発実験の要点

実験 case	蒸発場所	容量	平均温度 ()	平均湿度 (%)	$\delta^{18}\text{O}$ の 初期値(‰)	δD の 初期値(‰)	$\delta^{18}\text{O}$ と δD の 関係式	蒸発率と $\delta^{18}\text{O}$ の 関係式
case1	低温恒温器内	5L	8.8	71.9	-7.7	-47.0	$y = 6.87x + 6.48$	$y = 0.16x - 7.57$
case2			9.9	64.2	-7.7	-47.2	$y = 6.46x + 3.07$	$y = 0.13x - 7.13$
case3			19.8	69.9	-8.1	-47.2	$y = 5.21x - 3.94$	$y = 0.17x - 7.97$
case4			24.8	75.1	-8.0	-47.4	$y = 6.02x - 1.28$	$y = 0.13x - 7.68$
case5			30.0	41.2	-7.8	-47.0	$y = 5.19x - 7.17$	$y = 0.27x - 10.1$
case6	屋外	5L	7.3	60.6	-8.0	-47.4	$y = 7.36x + 8.64$	$y = 0.18x - 7.57$
case7			12.2	62.3	-7.8	-46.9	$y = 6.04x - 0.79$	$y = 0.19x - 7.71$
case8			25.3	66.6	-7.7	-47.2	$y = 4.79x - 9.55$	$y = 0.16x - 7.94$
case9	低温恒温器内	2L	8.8	70.7	-7.4	-46.8	$y = 7.48x + 8.83$	$y = 0.16x - 7.69$
case10			19.8	69.9	-8.1	-47.2	$y = 5.57x - 2.57$	$y = 0.15x - 7.47$
case11			24.8	76.7	-8.0	-47.4	$y = 5.28x - 4.92$	$y = 0.15x - 7.83$
case12	屋外	2L	7.3	60.6	-8.0	-47.4	$y = 7.39x + 5.48$	$y = 0.20x - 7.61$

発に関する式を簡略化し、現地で実験を行わなくても、湖の蒸発率を推定する方法の実現を目的としている。ここでの蒸発率とは、蒸発量を蒸発する前の水量で割ったものである。この方法の最初の提案として、2008年に原理を紹介したが⁴⁾、この論文は、蒸発時の大気中の同位体比の違いについて議論しなかった。しかし、今回は、大気中の水蒸気の違いによる影響やその影響を取り除く原理を紹介する。

2. 実験・分析の手法

(1) 蒸発実験

蒸発実験は、低温恒温器（サンヨー MIRI153）内と和歌山大学システム工学部B棟の屋上の常に日光が当たる場所で行った。蒸発実験は全部で12回行い、それぞれの実験をcase1～case12と表した。表-1に蒸発実験の要点をまとめた。左から、実験case、蒸発場所、サンプルを入れた容器の容量（大きさ）、蒸発期間中の平均気温、蒸発期間中の平均湿度、酸素同位体比の初期値（蒸発前の値）、水素同位体比の初期値、酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）と水素同位体比（ δD ）の関係式、蒸発率と酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）の関係式である。実験期間中の低温恒温器内の温度と湿度は、1時間おきに記憶計（佐藤計量器製作所 SK-L200TH）により記憶し、そのデータを使用した。実験case6、case8、case12の実験期間中の温度と湿度は、気象庁の気象データを使用した⁵⁾。

水道水は、容量5Lのポリビンと容量2Lのポリビンに入れ、容器の大きさにより、蒸発の仕方が異なるのかを観測した。低温恒温器内、屋外共に、容量5Lのポリビン（直径170mm、高さ300mm、口の直径75mm）に水道水を約5000g入れ、蒸発させた。同様に、容量2Lのポリビン（直径126mm、高さ245mm、口の直径75mm）に水道水を約2000g入れ、蒸発させた。水道水を蒸発させている期間中、蒸発量と蒸発による酸素同位体比・水素同位体比の値の変化を把握するために、数日おきに残量水の採水と質量を測定した。蒸発実験に使用した水道水は、

2005年11月1日と2008年3月4日に和歌山大学の水道から採水し、その後、50Lのタンクに貯留し、同位体比を安定させるために数日置いたものである。2005年11月1日に採水した水道水は、case1、case2、case5、case6、case7、case8、case9、case12に使用した。また、2008年3月4日に採水した水道水は、case3、case4、case10、case11に使用した。

(2) 分析手法

酸素同位体比・水素同位体比は、水素・炭酸ガス平衡法によって前処理を行った後、同位体比測定用質量分析装置（Finnigan Mat Delta Plus）で測定した。測定誤差は、酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）が $\pm 0.1\text{‰}$ 、水素同位体比（ δD ）が $\pm 1.0\text{‰}$ である。酸素同位体比・水素同位体比は平均標準海水（SMOW：Standard Mean Ocean Water）に対する千分偏差（‰）で表示する^{6), 7)}。計算式を式 (1) に示す。

$$\delta = (R_s - R_{st}) / R_{st} \times 1000 \quad (1)$$

R_s はサンプル水の同位体比、 R_{st} は標準海水の同位体比を表す。

3. 蒸発実験による同位体比の変化

(1) 蒸発に伴う酸素同位体比と水素同位体比の変化

蒸発に伴う同位体比の変化は式 (2) で表される^{8), 9), 10)}。

$$\frac{d\delta_L}{d\ln f} = \frac{h_A(\delta_L - \delta_A)/(1 + \delta_L) - \varepsilon^*}{(a - h_A)(a \cdot \alpha_{\text{vap-liq}} \cdot e_{i,L}/e + e_i/e)} \quad (2)$$

δ_L は水中での水の同位体比、 f は初めの水に対して残った水の割合、 h_A は水面温度における飽和水蒸気圧に対する相対湿度、 δ_A は大気中の水蒸気の同位体比、 a は水面の水の活量、 ε^* は $a\varepsilon + \varepsilon$ (ε : 平衡蒸気圧比、

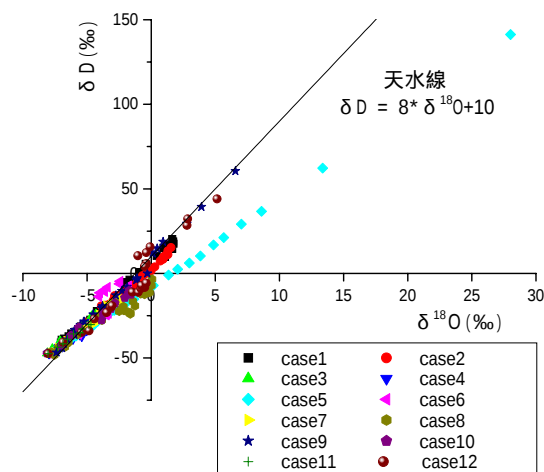


図-1 蒸発に伴う酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) と水素同位体比 (δD) の変化

ε : 平衡蒸気圧比の変化量), $\alpha_{\text{vap} - \text{liq}}$ は水面における水蒸気と水の間の同位体分配係数, $e_{i,L}$ は水中の重水の拡散に対する抵抗, e は定数で大気中の水蒸気の拡散に対する抵抗, e_i は重水の拡散に対する抵抗を表している。水面の水の活量 a は実質的に蒸発に関与する分子あるいはイオンの割合で, 理想溶液では活量は1であり, 理想溶液から離れると1より小さくなる。式 (2) より, 蒸発によって水の同位体比は一方向的に重くなるのではなく, 空気中の水蒸気の同位体比と湿度によって支配される⁸⁾, ⁹⁾, ¹⁰⁾。湿度を決めれば, 同位体比 / 蒸発率 (式 (2) の左辺) は決まる。また, 大気中の水蒸気の同位体比の値は, 狭い低温恒温器の中では実験水の同位体比によって決まる。つまり, どの実験でも同じサンプル水を用いていれば, 大気中 (低温恒温器内) の水の同位体比はほぼ同じになる。以上のことから, 水の同位体比・蒸発率・湿度のパラメーターが重要であるので, それらの関係を調べた。

蒸発に伴う酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) と水素同位体比 (δD) の変化のグラフを図-1に示す。x軸が酸素同位体比の値, y軸が水素同位体比の値を表しており, 左下のプロットが蒸発前の同位体比である。グラフ中の直線は, 天水線 ($\delta\text{D} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$) を表している。また, 蒸発前の同位体比の値 (初期値) は, 酸素同位体比が $-8.1 \sim -7.4$ ‰, 水素同位体比は $-47.4 \sim -46.8$ ‰の範囲であった。

降水起源の水の同位体比は, 天水線 ($\delta\text{D} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$) 上に分布する。しかし, 蒸発が起これると, 蒸発の割合に応じて天水線から離れ, その傾き (水素同位体比/酸素同位体比) は $4 \sim 6$ になる²⁾, ¹¹⁾。今回の蒸発実験の結果, 傾きは $4.79 \sim 7.48$ であり, 蒸発が起きているので, 天水線 ($\delta\text{D} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$) 上にはプロットされなかった。また, 蒸発が進むにつれて, 酸素同位体比と水素同位体比の値は大きくなった。

傾き (水素同位体比/酸素同位体比) が一番大きかったものは, case9であり, 7.48 であった。傾きが一番小さ

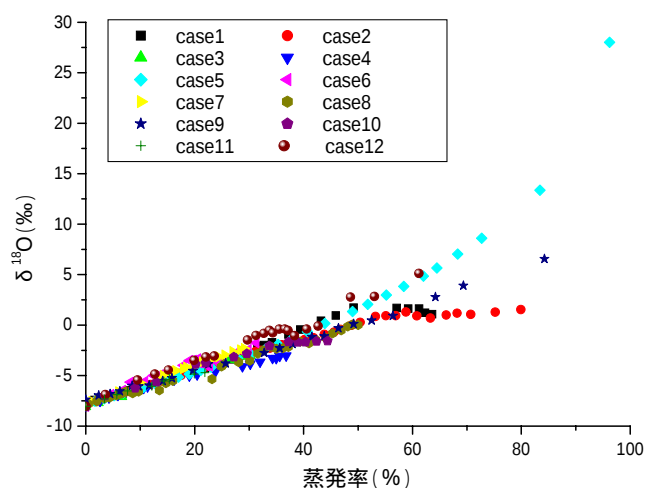


図-2 蒸発率と酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) の関係

かったものは, case8であり, 4.79 であった。

屋外で蒸発したもの (case6, case7, case8, case12) は湿度が高くなると, 水素同位体比/酸素同位体比が小さくなった。蒸発期間中の平均気温は同じではあるが容量が違うもの, つまり, case1とcase9, case3とcase10, case6とcase12を比較すると, 5Lのポリビンで蒸発したもの (case1, case3, case6) の方が水素同位体比/酸素同位体比が小さかった。反対に, case4 (容量5L) とcase11 (容量2L) を比較すると, case11 (容量2L) の方が水素同位体比/酸素同位体比が小さかった。

(2) 蒸発率と同位体比の関係

図-2に蒸発率と酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) の関係を示す。x軸が蒸発率, y軸が酸素同位体比の値を表している。また, ここでの蒸発率とは, 実験開始からの積算の蒸発量をサンプルの水量で割ったものである。どのサンプルも蒸発率が高くなるにつれて, 酸素同位体比の値も大きくなっている。傾き (酸素同位体比/蒸発率) が一番大きかったものは, case5であり, 傾きは 0.27 であった。傾き (酸素同位体比/蒸発率) が一番小さかったものは, case2とcase4であり, 傾きは 0.13 であった。

case1 (蒸発期間中の平均気温 8.8 、平均湿度 71.9%) は, 蒸発率 50% あたりから, 酸素同位体比の値は増加せずに減少している。同様に, case2 (蒸発期間中の平均気温 9.9 、平均湿度 64.2%) は, 蒸発率 55% を超えると酸素同位体比の値はあまり増加していない。

蒸発率が $0 \sim 40\%$ の間では, 同じ蒸発率に対する酸素同位体比の値は, おおよそ同じような値になっている。しかし, 蒸発率が 40% を超えると, 同じ蒸発率に対する酸素同位体比の値にはばらつきがあった。これは, サンプル水に含まれる塩濃度が影響していると考えられる。塩濃度とは, 水の中に溶けているイオンの濃度のことである。水中の塩濃度が増加すると, 水の活量が小さくなる⁸⁾, ¹²⁾。よって, サンプル水の蒸発により, 塩濃度が増

加し、ずれが生じたと考えられる。

そこで、蒸発率0～40%の範囲で低温恒温器内と屋外に分けて考察する。図-3に低温恒温器内における蒸発率と酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の関係を示す。x軸が蒸発率、y軸が酸素同位体比の値を表している。

蒸発期間中の平均気温8.8℃と同じであるcase1(平均湿度71.9%)とcase9(平均湿度70.7%)の傾き(酸素同位体比/蒸発率)は0.16であり、等しくなった。蒸発期間中の平均気温19.8℃、平均湿度69.9%と同じであるcase3(容量5L)とcase10(容量2L)の傾き(酸素同位体比/蒸発率)は、case3が0.17、case10が0.15であり、case3の方が傾き(酸素同位体比/蒸発率)は大きい。反対に、蒸発期間中の平均気温24.8℃が同じであるcase4(容量5L)とcase11(容量2L)の傾き(酸素同位体比/蒸発率)は、case4が0.13、case11が0.15であり、case11(容量2L)の方が傾き(酸素同位体比/蒸発率)は大きい。

case4(蒸発期間中の平均気温24.8℃・平均湿度75.1%)は、蒸発率0～20%ぐらいまでは、他のサンプルと同じように蒸発に伴って酸素同位体比が変化している。しかし、蒸発率20%を超えたあたりから、傾き(酸素同位体比/蒸発率)が緩やかになっている。case1(蒸発期間中の平均気温8.8℃・平均湿度71.9%)は、蒸発率30%あたりから傾き(酸素同位体比/蒸発率)が大きくなった。case2(蒸発期間中の平均気温9.9℃・平均湿度64.2%)は、蒸発率の変化量に対して酸素同位体比の変化量が一定である。

図-4に屋外における蒸発率と酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の関係を示す。x軸が蒸発率、y軸が酸素同位体比の値を表している。低温恒温器内で蒸発したものに比べて、屋外で蒸発したものは、ばらつきが見られた。蒸発期間中の平均気温7.3℃と平均湿度60.6%が同じであるcase6(容量5L)とcase12(容量2L)の傾き(酸素同位体比/蒸発率)は、case6は0.18、case12は0.20であり、case12(容量2L)の方が傾き(酸素同位体比/蒸発率)の値は大きい。

case6(蒸発期間中の平均気温7.3℃、平均湿度60.6%、容量5L)は、蒸発率20%を境に酸素同位体比の値は一時減少し、蒸発率23%あたりからまた増加している。case12(蒸発期間中の平均気温7.3℃、平均湿度60.6%、容量2L)は、蒸発率35%を超えると、酸素同位体比の値は減少している。case7(蒸発期間中の平均気温12.2℃、平均湿度62.3%)は、蒸発率の変化量に対して、酸素同位体比の変化量がほとんど一定である。case8(蒸発期間中の平均気温25.3℃・平均湿度66.6%)は、蒸発率8～14%、16～23%、25～30%の間で酸素同位体比の値は増加せず、あまり変化がない。

(3) 湿度と同位体比と蒸発率の関係

図-5に湿度と酸素同位体比の変化量($d\delta^{18}\text{O}$)/蒸発率の関係を示す。x軸が湿度、y軸が酸素同位体比の変化量/蒸発率を表している。また、酸素同位体比の変化量/蒸

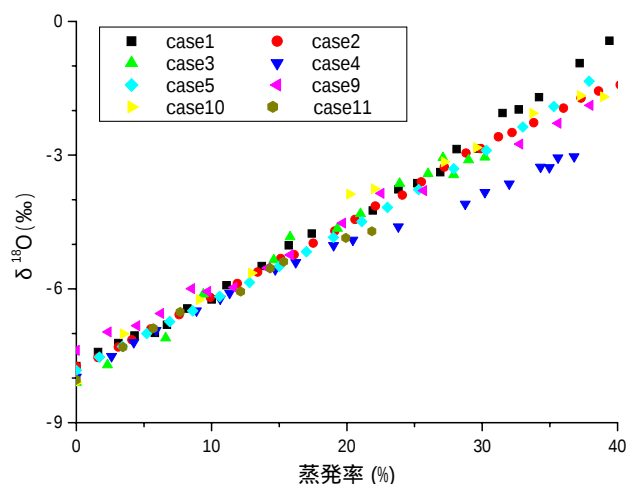


図-3 低温恒温器内における蒸発率と酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の関係

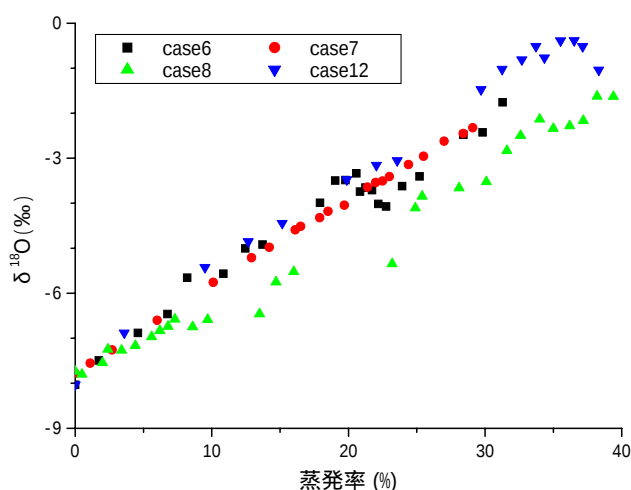


図-4 屋外における蒸発率と酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の関係

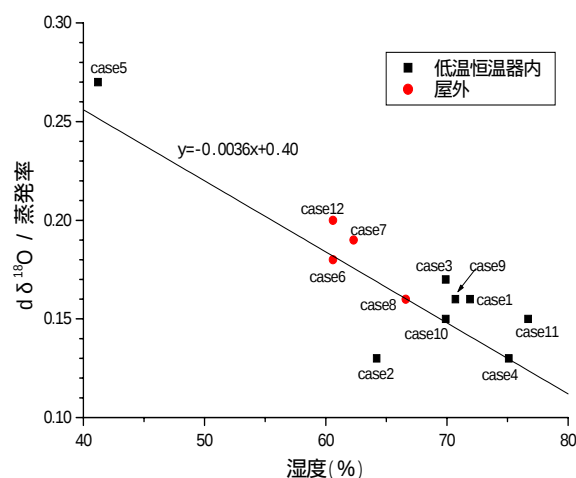


図-5 湿度と酸素同位体比の変化量($d\delta^{18}\text{O}$)/蒸発率の関係

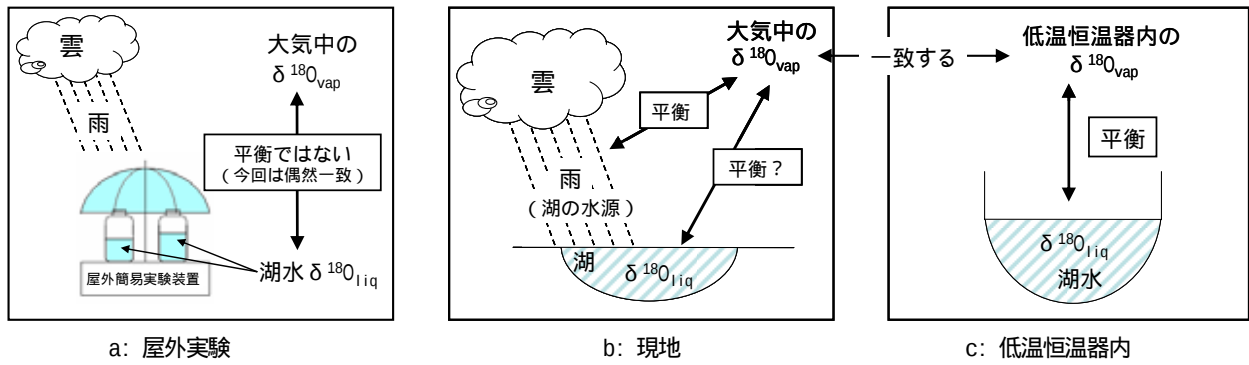


図-6 大気中の水蒸気の酸素同位体比の値 ($\delta^{18}O_{vap}$) と水の酸素同位体比の値 ($\delta^{18}O_{liq}$) の関係

発率は、式 (2) の左辺を表している。湿度と酸素同位体比の変化量/蒸発率には負の相関関係があり、その関係式は $y = -0.0036x + 0.40$ であった。湿度が高くなると、酸素同位体比の変化量/蒸発率の値は小さくなっている。蒸発期間中の平均気温7.3 と平均湿度60.6%が同じであるcase6 (容量5L) とcase12 (容量2L) を比較すると、同じ湿度でも容量が異なれば、酸素同位体比の変化量/蒸発率の値は違った値を示している。

低温恒温器内と屋外では、大気中の同位体比が違う。それにもかかわらず、ほぼ同じ関係式上にプロットされた。これは、大気中の同位体比の影響が小さい。もしくは、サンプル水が和歌山の水道水であるので、和歌山市の大気中の水蒸気の同位体比も市内の水源から由来する水道水と平衡に近い状態にあり、低温恒温器内をみたしている大気中の水蒸気の同位体比と屋外の大気中の同位体比が大きく変わらないことが考えられる。

4. 蒸発率推定法

酸素同位体比における重水 ($\delta^{18}O$) の水と水蒸気の間同位体分配係数は、式 (3) のように表すことができる^{8), 9), 10)}。

$$\alpha_{vap-liq} = \frac{(1 + \delta^{18}O_{liq} / 1000)}{(1 + \delta^{18}O_{vap} / 1000)} \quad (3)$$

$\alpha_{vap-liq}$ は水面における水蒸気と水の間同位体分配係数、 $\delta^{18}O_{vap}$ は大気中の水蒸気の酸素同位体比の値、 $\delta^{18}O_{liq}$ は水の酸素同位体比の値である。 $\delta^{18}O / 1000$ は一般に1よりずっと小さいので、0と考えてもよい。よって、式 (4) が得られる^{8), 9), 10)}。

$$1000 \ln \alpha_{vap-liq} = \delta^{18}O_{vap} - \delta^{18}O_{liq} \quad (4)$$

$1000 \ln \alpha_{vap-liq}$ の値は温度により異なり、実験的に求められている。よって、水の酸素同位体比の値 ($\delta^{18}O_{liq}$) が

分かれば、式 (4) を用いて大気中の水蒸気の酸素同位体比の値 ($\delta^{18}O_{vap}$) を求めることができる。北海道釧路の水の酸素同位体比はおよそ-10‰¹³⁾、鹿児島県屋久島の海岸付近の水の酸素同位体比はおよそ-6‰であり¹⁴⁾、温度が20 の場合、 $1000 \ln \alpha_{vap-liq}$ の値は9.5である⁸⁾。このことから、日本の大気中の水蒸気の酸素同位体比の値は、-0.5 ~ 3.5の幅がある。よって、大気中の水蒸気の同位体比は、場所によって大きく変化することがわかる。

図-6に大気中の水蒸気の酸素同位体比の値 ($\delta^{18}O_{vap}$) と水の酸素同位体比の値 ($\delta^{18}O_{liq}$) の関係を示す。図-5の結果が同一直線上にあるのは、低温恒温器内と屋外の水蒸気の同位体比が偶然一致していたためと考えられる(図-6 a)。その理由としては、水道水の水源が実験を行った場所から遠くなく、屋外の大気中の水蒸気と平衡である雨水が水道水の水源となったためと考えられる。湖や池の蒸発率を推定するために、まず、現場の大気中の水蒸気の同位体比と一致するように、湖や池の水を用いて、低温恒温器内で蒸発実験を行う。そうすれば、湖や池の水の蒸発により、低温恒温器内の水蒸気の同位体比は現場の大気中の水蒸気の同位体比と平衡になり、一致する(図-6 b・c)。また、湖や池の水源は現場の雨水なので、大気中の水蒸気と湖や池の水の同位体比は平衡である。そして、低温恒温器内で蒸発実験を数回行い(大気同位体比が現地と同じになる)、酸素同位体比と蒸発率の関係を知り、図-5のような湿度と酸素同位体比の変化量/蒸発率の関係を求める。また、蒸発率を推定したい湖の平均湿度と蒸発による湖水の同位体比の変化量(蒸発前の湖水の同位体比の値と蒸発後の湖水の同位体比の値の差)を調べておく必要がある。蒸発前の湖水の同位体比の値は、湖に流入する河川の流入比とその河川の同位体比の値から推測することができる。

例えば、平均湿度が70.0%、酸素同位体比の値が蒸発により1‰変化したときの湖(滞留時間5年、面積100km²、体積3km³と仮定する)の蒸発率を推定する場合に、図-5の湿度と酸素同位体比の変化量/蒸発率の関係式を用いる。関係式 $y = -0.0036x + 0.40$ (x が蒸発期間中の平均湿度、 y が酸素同位体比の変化量/蒸発率)より、平均湿度70%のときの酸素同位体比の変化量/蒸発率の値は0.15

になり、式 (5) を得られる。

$$\frac{1\%}{\text{蒸発率}} = 0.15 \quad (5)$$

式 (5) より、湖に水が流入してから流出する間（滞留時間5年）に6.7%蒸発したことになり、年間蒸発量は約400mmとなる。年間蒸発量は、湖の体積に蒸発率をかけ、面積で割り、滞留時間で割って算出した。

5. おわりに

本研究は、湿度をメインに同位体を用いた蒸発に関する式を簡略化し、現地で実験を行わなくても、湖の蒸発率を推定する方法の実現を目的とする。蒸発により水の同位体比は空気中の水蒸気の同位体比と湿度によって支配されることが知られているので、水の同位体比・蒸発率・湿度に着目し、蒸発実験を行い、それらの関係を調べた。

蒸発実験の結果から、蒸発が進むとそれに伴い、酸素同位体比と水素同位体比の値は増加した。屋外で蒸発したものは湿度が高くなると、水素同位体比/酸素同位体比の値は小さくなった。反対に、低温恒温器内で蒸発したものは湿度が高くなると、水素同位体比/酸素同位体比の値は大きくなる傾向が見られた。蒸発率が0～40%の間では、同じ蒸発率に対する酸素同位体比の値は、おおそ同じような値になった。しかし、蒸発率が40%を超えると、同じ蒸発率に対する酸素同位体比の値にはばらつきがあった。また、湿度と酸素同位体比の変化量/蒸発率の関係より、湿度が高くなるにつれて、酸素同位体比の変化量/蒸発率の値は小さくなる傾向があった。低温恒温器内と屋外で蒸発実験を行ったが、ほぼ同じ湿度と酸素同位体比の変化量/蒸発率の関係式上にプロットされた。これは、水道水の水源が実験を行った場所から遠くなく、屋外の大気中の水蒸気と平衡である雨水が水道水の水源となったためと考えられる。

低温恒温器内で蒸発実験を行う際に重要なことは、現場の大気中の水蒸気の同位体比と一致するように、現場の水を用いることである。そうすると、現場の水の蒸発により、低温恒温器内の水蒸気の同位体比は現場の水の同位体比と平衡になり、現場の大気中の水蒸気と一致する。現場の大気中の水蒸気と現場の湖水の同位体比は、水の水源が現場の雨水であるので、大気と水の同位体比は平衡である。

湖水を用いた低温恒温器内での蒸発実験により、蒸発率と同位体比の関係を導き出すことで、湖や池の平均湿度と蒸発による同位体比の変化量（蒸発前と蒸発後の湖や池の水の同位体比の変化）から、蒸発率を推定するこ

とが可能である。

参考文献

- 1) Allison, G.B., Brown, R.M. and Fritz, P.: Estimation of the isotopic composition of lake evaporate., Jour. of Hydrol., 42, pp.109-127, 1979.
- 2) Gibson, J.J., Edwards, T.W.D., Bursey, G.G. and Prowse, T.D.: Estimating evaporation using stable isotopes: quantitative results and sensitivity analysis for two catchments in northern Canada, 24, pp.79-94, 1993.
- 3) Sofer, Z. and Gat, J. R.: The isotope composition of evaporating brines: effect of the isotopic activity ratio in saline solution, Earth Plane. Sci. Letters, 26, pp.179-189, 1975.
- 4) 宮路和葉・岡田啓・井伊博行・長林久夫：酸素同位体比を利用した猪苗代湖における蒸発率の簡易測定法の提案，水工学論文集，第52巻，pp.289-294, 2008.
- 5) 気象庁のホームページ：気象系統情報，過去の気象データ，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 6) 多賀光彦・那須淑子共著：地球の化学と環境，pp.132-133，1994.
- 7) International Atomic Energy Agency: Isotope Techniques in the Hydrogeological Assessment of Potential Sites for the Disposal of High-Level Radioactive Wastes. Vienna, Technical Reports Series 228., 1983.
- 8) 立見辰雄編：現代鉱床学の基礎，pp.97-117, 1977.
- 9) Fontes, J. -ch. and Gonfiantini, R.: Comportment isotopique an cours de levaporation de deux basins Sahariens, Earth Plan.Sci. Letters, 3, pp.277-374, 1967.
- 10) Pupezin, J., Jancso, G. and Van Hook, W.A.: Vapor pressure isotope effect in aqueous systems. I, Jour. Phys. hem., 76, pp.743-762.
- 11) 井伊博行, John Sherwood, FranStanitti, Nick Turcozy, 平田健正, 西川雅高：オーストラリア，ピクトリア州南西部の範乾燥地河川水の酸素・水素同位体比および溶存成分について，土木学会論文集，No.719 / -61, pp.1-9, 2002.
- 12) Taube, H.: Use of oxygen isotope effects in the study of hydration of ions, Jour. Phys. Chem., 58, pp.523-528.
- 13) 北野梓沙, 井伊博行, 今泉眞之, 土原健雄, 谷口正伸：酸素・水素安定同位体比による釧路湿原内の湧水の起源推定，水工学論文集，第51巻，pp.1099-1104, 2007.
- 14) 横田恭平, 井伊博行, 谷口正伸：屋久島の湧水期における酸素・水素安定同位体比と水質変化，水工学論文集，第52巻，pp.475-480, 2008.

(2008.9.30受付)