

酸素・水素同位体比を利用した湖の蒸発率推定法の提案 PROPOSAL OF ESTIMATION METHOD FOR EVAPORATION RATE IN LAKE BY USING OXYGEN AND HYDROGEN ISOTOPIC RATIOS

宮路 和葉¹・岡田 啓²・井伊 博行³

¹和歌山大学大学院システム工学研究科（〒640-8441 和歌山県和歌山市栄谷930）

²和歌山大学大学院システム工学研究科（現・竹中工務店）（同上）

³和歌山大学教授 システム工学部（同上）

1. はじめに

水資源を管理する上で、蒸発率を把握することは重要である。気象観測では蒸発パン（ある期間内の蒸発量を測定する装置）を用いて蒸発率を算出する。しかし、湖に水が流入してから流出するまでの間に、蒸発と共に地下浸透が起こっており、実際の湖や池では、流入量と流出量からだけでは、滞留時間の推定が難しい。また、流入量や流出量は時間と共に変動するので連続的に測定する必要がある、容易ではない。それゆえ、滞留時間を正確に推定できないため、蒸発パンで測定した蒸発量から湖の蒸発量を推定することは困難である。

水の酸素・水素同位体比は降水起源の場合、天水線（ $\delta D = 8 * \delta^{18}O + 10$ ）上にあるが、蒸発が起ると、その割合に応じて、天水線から離れ、同位体比は高くなる。蒸発前の流入する河川水の同位体比と蒸発後の湖の同位体比を比較することで、蒸発の割合を推定する方法を提案する。

2. 実験・分析の概要

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実験を行った。実験期間中の温度と湿度は、記憶計（佐藤計量器製作所SK-L200TH II）により1時間おきに記憶した。室内、屋外共に直径170mm、高さ300mm、口の直径75mm、容量5Lのポリビンに約5000g、直径126mm、高さ245mm、口の直径75mm、容量2Lのポリビンに約2000g、水道水を入れ、蒸発させた。水道水を蒸発させている期間中、蒸発量を把握するために数日おきに残量水の採水と残量水の質量を測定した。

酸素と水素の同位体比の測定は、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（ $\delta^{18}O$ ）が $\pm 0.1\text{‰}$ 、水素同位体比（ δD ）が $\pm 1.0\text{‰}$ である。酸素と水素の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¹⁾。計算式を式（1）に示す。 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。

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

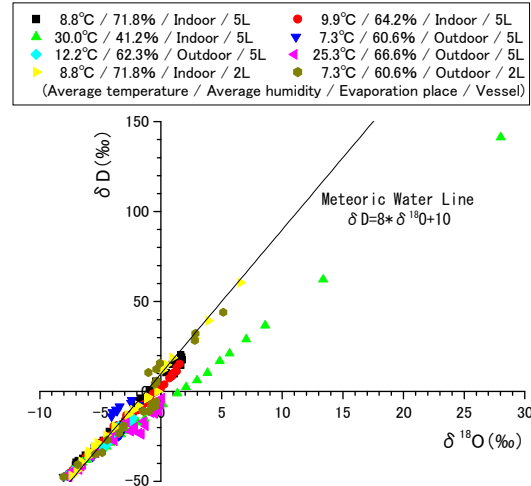


Fig.1 Change of $\delta^{18}O$ and δD with the evaporation

3. 蒸発実験による $\delta^{18}O$ の変化

蒸発に伴う同位体比の変化は式（2）で表される。

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

δ_L は湖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 は水面の温度下での飽和水蒸気圧に対する相対湿度、 δ_A は大気中の水の同位体比、 ϵ^* は大気中の水の伝送に伴う動的同位体効果の平衡蒸気圧比、 a は水面の水の活量、 $\alpha_{vap-liq}$ は共存する水蒸気と水の間の同位体分布係数、 $e_{i,L}$ 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 は大気中の重水の拡散に対する抵抗を表している。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²⁾。湿度を決めれば、同位体比 / 蒸発率は決まり、気体の同位体比の値は、狭い乾燥器の中では実験水の同位体比によって決まる。つまり、どの実験でも同じ実験水を用いていれば、気体の同位体比は同じになる。以上のことから、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。

Fig.1は、蒸発に伴う $\delta^{18}O$ と δD の変化のグラフである。左下のプロットが蒸発前の同位体比であり、

蒸発前の値（初期値）は、 $\delta^{18}\text{O}$ が $-8.03\sim-7.38\text{‰}$ 、 δD の値は $-47.43\sim-46.75\text{‰}$ である。また、Table.1に蒸発実験の条件をまとめた。降水起源の同位体比は天水線（ $\delta\text{D}=8*\delta^{18}\text{O}+10$ ）上にあるが、蒸発が起これと、その割合に応じて天水線から離れ、その傾き（ $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ ）は5～6になる。今回の蒸発実験の結果、傾きは4.79～7.48であるので、実際に蒸発が起きているとグラフからも読み取れる。蒸発が進むにつれて、 $\delta^{18}\text{O}$ と δD の値が大きくなっている。

Fig.2に蒸発率と $\delta^{18}\text{O}$ の関係を示す。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。蒸発率が高くなるにつれて、 $\delta^{18}\text{O}$ の値は大きくなっている。蒸発率0～50%の間では、同じ蒸発率に対する $\delta^{18}\text{O}$ の値は同じような値を示している。しかし、蒸発率50%以降では、同じ蒸発率に対する $\delta^{18}\text{O}$ の値にばらつきが見られた。室内と屋外では、大気中の同位体比が違う条件にもかかわらず、ほぼ同じ関係式上にプロットされた。これは、1)大気中の同位体比の影響が小さい、2)実験水が水道水であり、雨が降った場所に近く、大気中の水の同位体比も水道水と平衡に近い状態であるので室内実験と大気中の同位体比が大きく違わない、の2つの可能性がある。今後、水の同位体比が当地域と異なる水を用いた屋外実験を行って確認する。

Fig.3に湿度と $d\delta^{18}\text{O}$ （蒸発による $\delta^{18}\text{O}$ の変化量）/蒸発率の関係を示す。湿度と $d\delta^{18}\text{O}$ /蒸発率には負の相関関係があることが確認でき、その関係式は $y = -0.0039x + 0.4224$ であった。湿度が高くなると $d\delta^{18}\text{O}$ /蒸発率の値は小さくなっている。

4. 蒸発率推定法

蒸発率の推定は、Fig.3の湿度と蒸発による $\delta^{18}\text{O}$ の変化量/蒸発率の関係を利用する。蒸発中の平均湿度に対する $d\delta^{18}\text{O}$ /蒸発率の値 a を関係式から導くと、式(3)が得られる。

$$\frac{d\delta^{18}\text{O} \text{ (蒸発による } \delta^{18}\text{O} \text{ の変化量)}}{\text{蒸発率}} = a \quad (3)$$

蒸発による $\delta^{18}\text{O}$ の変化量である $d\delta^{18}\text{O}$ は測定できるので、蒸発率を算出することができる。また、湖への年間流入量に蒸発率をかけて、湖の面積で割ると、年間蒸発量を得ることができる。

5. まとめ

本研究では、水資源を管理する上で重要な蒸発率を $\delta^{18}\text{O}$ を用いて算出することを目的とした。蒸発によって水の同位体比は、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おり、本研究では湿度に着目し、蒸発実験を行った。蒸発率と $\delta^{18}\text{O}$ の関係から、蒸発率が高くなるにつれて $\delta^{18}\text{O}$ の値は大きくなっている。蒸発率0～50%の間

Table.1 Condition of the evaporation experiment

Evaporation place	Vessel	Average temperature (°C)	Average humidity (%)	Initial value		Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD	Relationship between evaporation rate and $\delta^{18}\text{O}$
				$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)		
Indoor	5L	8.8	71.8	-7.73	-46.98	$y = 6.87x + 6.48$	$y = 0.16x - 7.57$
		9.9	64.2	-7.74	-47.15	$y = 6.46x + 3.07$	$y = 0.13x - 7.13$
		30.0	41.2	-7.83	-46.97	$y = 5.19x - 7.17$	$y = 0.27x - 10.1$
Outdoor	5L	7.3	60.6	-8.03	-47.43	$y = 7.36x + 8.64$	$y = 0.18x - 7.57$
		12.2	62.3	-7.77	-46.9	$y = 6.04x - 0.79$	$y = 0.19x - 7.71$
		25.3	66.6	-7.74	-47.15	$y = 4.79x - 9.55$	$y = 0.16x - 7.94$
Indoor	2L	8.8	71.8	-7.38	-46.75	$y = 7.48x + 8.83$	$y = 0.16x - 7.69$
Outdoor	2L	7.3	60.6	-8.03	-47.43	$y = 7.39x + 5.48$	$y = 0.20x - 7.61$

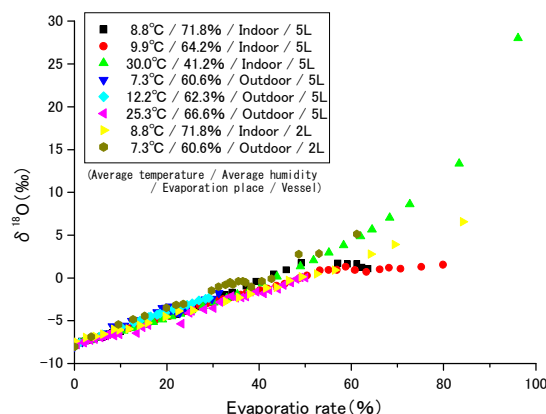


Fig.2 Relationship between evaporation rate and $\delta^{18}\text{O}$

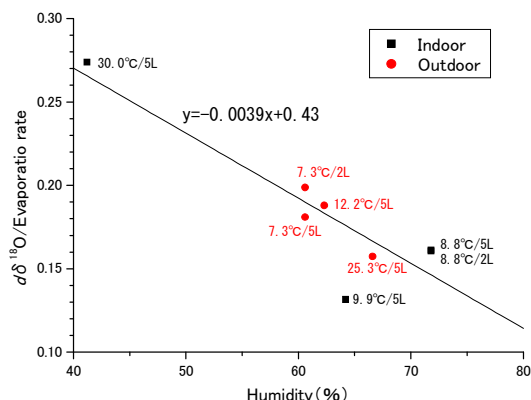


Fig.3 Relationship between humidity and $d\delta^{18}\text{O}$ / evaporation

では、同じ蒸発率に対する $\delta^{18}\text{O}$ の値は同じような値を示している。しかし、蒸発率50%以降では、同じ蒸発率に対する $\delta^{18}\text{O}$ の値にばらつきが見られた。また、湿度と $d\delta^{18}\text{O}$ /蒸発率の関係から、湿度が高くなると $d\delta^{18}\text{O}$ /蒸発率の値は小さくなる傾向がある。よって、蒸発量を推定したい場所の平均湿度と蒸発による $\delta^{18}\text{O}$ の変化量である $d\delta^{18}\text{O}$ （湖に流入する前と後の水の同位体比の変化）が分かれば、蒸発率を推定できると考えられる。

参考文献

- 1) 多賀光彦・那須淑子共著：地球の科学と環境，pp.132-133, 1994
- 2) 立見辰雄編：現代鉱床学の基礎，pp.110-113, 1977.
- 3) 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，2008.