

芦ノ湖の水温および酸素・水素同位体比の測定結果

板寺一洋*

Water temperature, oxygen and hydrogen isotope ratios in Lake Ashi

by

Kazuhiro ITADERA*

1. はじめに

芦ノ湖は箱根古期外輪山の内側に位置するカルデラ湖で、面積 6.9km²、湖岸延長 21km、湖面標高 724.5m、最大水深 40.6mである(国土地理院、GIS・国土の情報(<http://www.gsi.go.jp/gis.html>)による)。この湖は箱根カルデラの面積の約1割を占めるほか、約1.8億m³と見積もられている貯水量は、湖面への年間降水量の約7年分に相当する。このため、湖水が箱根カルデラ内の地下水や温泉に大きな影響を与えると見られており、箱根地域の地下水・温泉資源の保護対策にとって、湖の水収支、特に湖水による地下水の涵養量の算定は重要な課題である。

芦ノ湖の水収支については、箱根水質調査団(1975)が、芦ノ湖流域の降水量と蒸発散量、および用水による流域外への流出量に基づく水収支計算により、湖水が地下へ浸透する量を年間13.4～15.2×10⁶m³と見積もっている。これに対してMatsuo *et al.* (1979)は、湖水が周辺の地下水と比較して重い酸素・水素同位体比を示すことを根拠とし、湖から地下水としての流出はないものとして水収支計算を行っている。このように、今のところ、湖の水収支について確実なことは分かっていない状況にある。

芦ノ湖には大きな流入河川がないため、湖水は、湖面への直接降雨と流域斜面からの流入地下水によって維持されている。したがって、周囲の地下水に比べて重い値を示す湖水の同位体比形成機構を明らかにすることも、湖水の循環や水収支の実態を解明するために重要な課題であると考えられる。

そこで本稿では、湖水の酸素・水素同位体比の3次元分布を測定し、付近にもたらされた降水の同位体比と比較を行った結果等について報告する。

2. 調査方法

2.1. 雨水の採水

雨水の採水には、簡易雨量計((有)吉野計器製作所製SY-SR-11)を用いた。採水の方法は板寺(2002)と同様であるが、蒸発の影響を緩和するため、採水器の漏斗部につり用の浮子を入れた。この機材を芦ノ湖岸(P1)および、中央火口丘の駒ヶ岳山頂部(P2)に設置し(図1)、原則月一回の回収により、2004年6月からの約半年間の計10期間の雨水試料を得た。

2.2. 湖水温の測定と採水

2004年9月1日および12月21日に芦ノ湖における深度別の水温測定と採水を行った。調査地点として、最大深度と見られる付近を含め、湖を縦断する形で6地点を選定した(図1)。

水温の測定は、メジャー付きのサーミスター温度計を用い、目的の深度までセンサーを降下させながら行った。

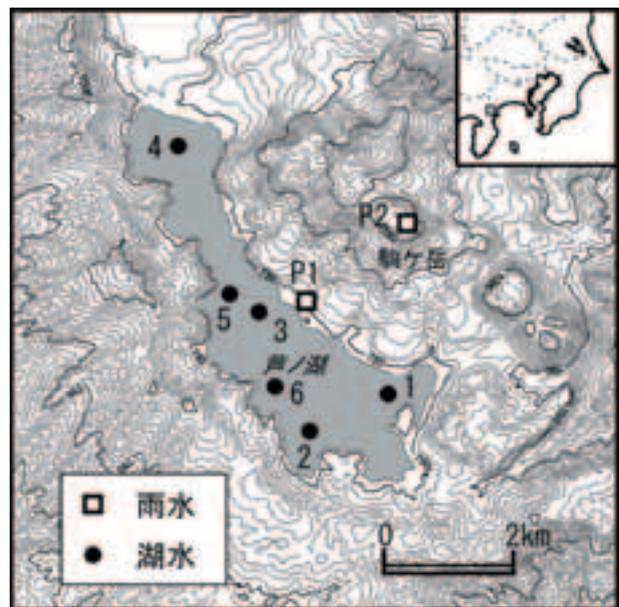


図1 雨水(□)と湖水(●)の採取地点

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田586
報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第38巻, 35-42, 2006.

湖水の採水は、宮本理研工業株式会社製の万能採水器(容量2リットル)を用いた。この採水器は、ステンレス製の容器と一方弁の組み合わせにより、水中を降下しているときは容器が水が通り抜けるが、引き上げる際に蓋がしまり、目的の深度の採水ができるようになっている。この採水器にメジャーおよびロープを取り付け目的の深度まで沈めた後、引き上げることにより、深度5m間隔で採水を行った。

2.3. 酸素・水素同位体比の分析

酸素・水素同位体比の分析は、試料水と所定の条件下で同位体平衡に達した炭酸ガス・水素ガスを、軽元素質量分析装置PRISM(現micromass社製)に導入し行った。測定のための標準試料として研究所で作成した蒸留水($\delta^{18}\text{O}=-8.52\text{‰}$ 、 $\delta\text{D}=-54.1\text{‰}$)を用いた。試料の前処理等、詳細については板寺(2002)を参照されたい。

質量分析による同位体比の測定精度は、酸素について $\pm 0.1\text{‰}$ 、水素について $\pm 1\text{‰}$ である。試料水の酸素・水素同位体比(δ 値 V-SMOW)は、これらの測定結果と、平衡温度下における同位体分別係数により算出するため、最終的に算出される δ 値の精度は酸素が $\pm 0.1\text{‰}$ 、水素が $\pm 3\text{‰}$ 程度となる。

3. 結果

3.1. 雨水の酸素・水素同位体比

表1に調査期間を含む約半年間(2004年6月から2005年1月まで)の試料採取期間ごとに、雨水の同位体比と回収量から換算した降雨量を示した。図2は、雨水の同位体比の推移を示したグラフである。期間中、雨水の酸素同位体比は -6‰ 前後から -10‰ 前後の値、水素同位体比は -30‰ 前後から -50‰ 前後の値で推移していた。両者の推移のパターンは似通っており、6月から9月は横ばい、

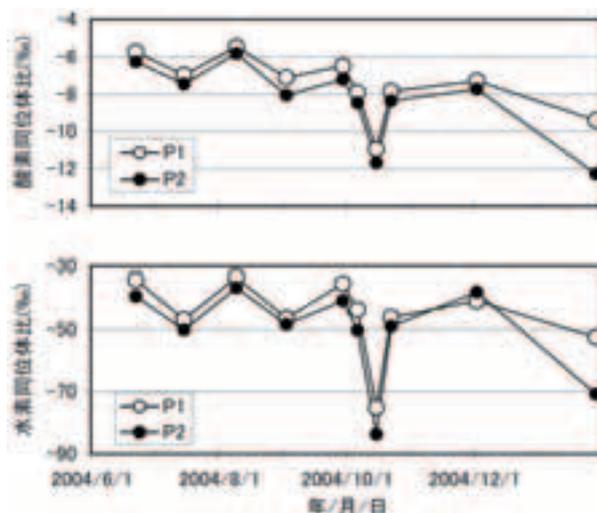


図2 雨水の酸素・水素同位体比の推移(2004年6月～2005年1月)

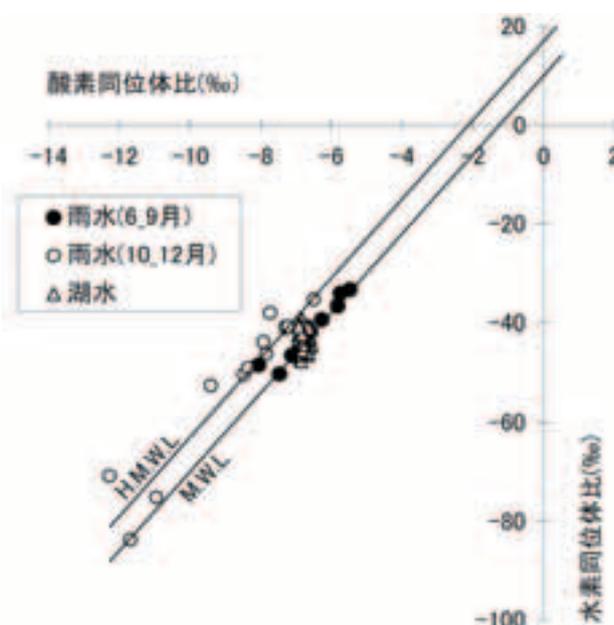


図3 雨水・湖水の酸素・水素同位体比の関係を示す δ ダイアグラム(M. W. L. はCraig(1961)の天水線、H. M. W. L. はMatsuo *et al.* (1985)による箱根の天水線)

表1 雨水の酸素・水素同位体比 (P1、P2は図1のとおり)

期間	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)		δD (‰)		換算降水量(mm)	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2
04/06/04 ~ 06/22	-5.7	-6.3	-34.1	-39.4	125.2	151.8
06/22 ~ 07/15	-7.0	-7.5	-46.8	-50.2	172.6	176.5
07/15 ~ 08/09	-5.5	-5.8	-33.3	-36.7	360.6	484.2
08/09 ~ 09/02	-7.1	-8.1	-46.4	-48.4	377.3	438.9
09/02 ~ 09/29	-6.5	-7.2	-35.3	-40.8	266.9	192.4
09/29 ~ 10/06	-7.9	-8.5	-43.7	-50.3	176.5	242.6
10/06 ~ 10/15	-10.9	-11.7	-75.1	-83.7	319.2	196.3
10/15 ~ 10/22	-7.8	-8.4	-46.1	-49.0	175.5	196
10/22 ~ 12/02	-7.3	-7.7	-40.9	-38.0	300.7	104.2
12/02 ~ 05/01/28	-9.4	-12.3	-52.5	-70.8	181.5	138.8
調査期間計					2456.0	2321.7
調査期間の降水量加重平均値	-7.5	-8.0	-46.0	-49.0		

P1、P2は図1のとおり

表2 湖水温の調査結果(単位(°C)、地点1から6は図1のとおり)

深度(m)	2004/9/1						2004/12/21					
	地点1	地点2	地点3	地点4	地点5	地点6	地点1	地点2	地点3	地点4	地点5	地点6
0	22.4	22.5	22.4	22.6	22.4	22.8	11.5	11.4	11.4	11.9	11.2	11.1
2	22.3	22.3	22.3	22.6	22.4	22.5	11.5	11.4	11.4	11.8	11.3	11.3
4	22.2	22.3	22.3	22.5	22.3	22.4	11.4	11.4	11.4	11.6	11.4	11.2
6	22.2	22.2	22.2	22.5	22.2	22.3	11.4	11.4	11.4	11.5	11.4	11.2
8	22.2	22.2	22.2	22.5	22.2	22.3	11.4	11.3	11.3	11.5	11.3	11.3
10	22.2	22.1	22.1	22.4	22.0	22.1	11.3	11.3	11.3	11.4	11.3	11.3
12	22.2	20.9	21.1	21.5	20.7	21.2	11.3	11.3	11.3	11.4	11.3	11.3
14	15.4	15.7	15.2	16.4	14.4	14.8	11.3	11.3	11.3	11.4	11.3	11.3
16	11.7	11.2	11.9	11.7	12.4	11.5	11.3	11.3	11.3	11.4	11.3	11.3
18	9.8	9.6	10.6	10.1	10.7	9.8	11.3	11.3	11.3	11.4	11.3	11.3
20	8.6	8.6	9.7	9.6	9.4	8.8	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3
22	8.3	8.2	9.0	8.5	8.8	8.3	11.2	10.8	11.3	9.1	10.8	10.6
24	7.8	8.0	8.5	8.8	8.3	8.0	9.2	8.8	9.3	8.4	9.0	8.9
26		7.8	8.2		7.9	7.8	8.6	8.3	8.5	8	8.4	8.4
28		7.6	8.0		7.8	7.7		8.1	8.2		8.2	8.1
30		7.5	7.8		7.6	7.6		7.9	8.0		8.1	8.0
32		7.4	7.5		7.6	7.5		7.8	7.9		7.9	7.9
34		7.4	7.5		7.5	7.4		7.7	7.7		7.8	7.8
36		7.3			7.5	7.3		7.6	7.6		7.7	7.7
38		7.2			7.4	7.3		7.5			7.6	7.6
40		7.1			7.3	7.2		7.4			7.5	7.5

単位(°C)

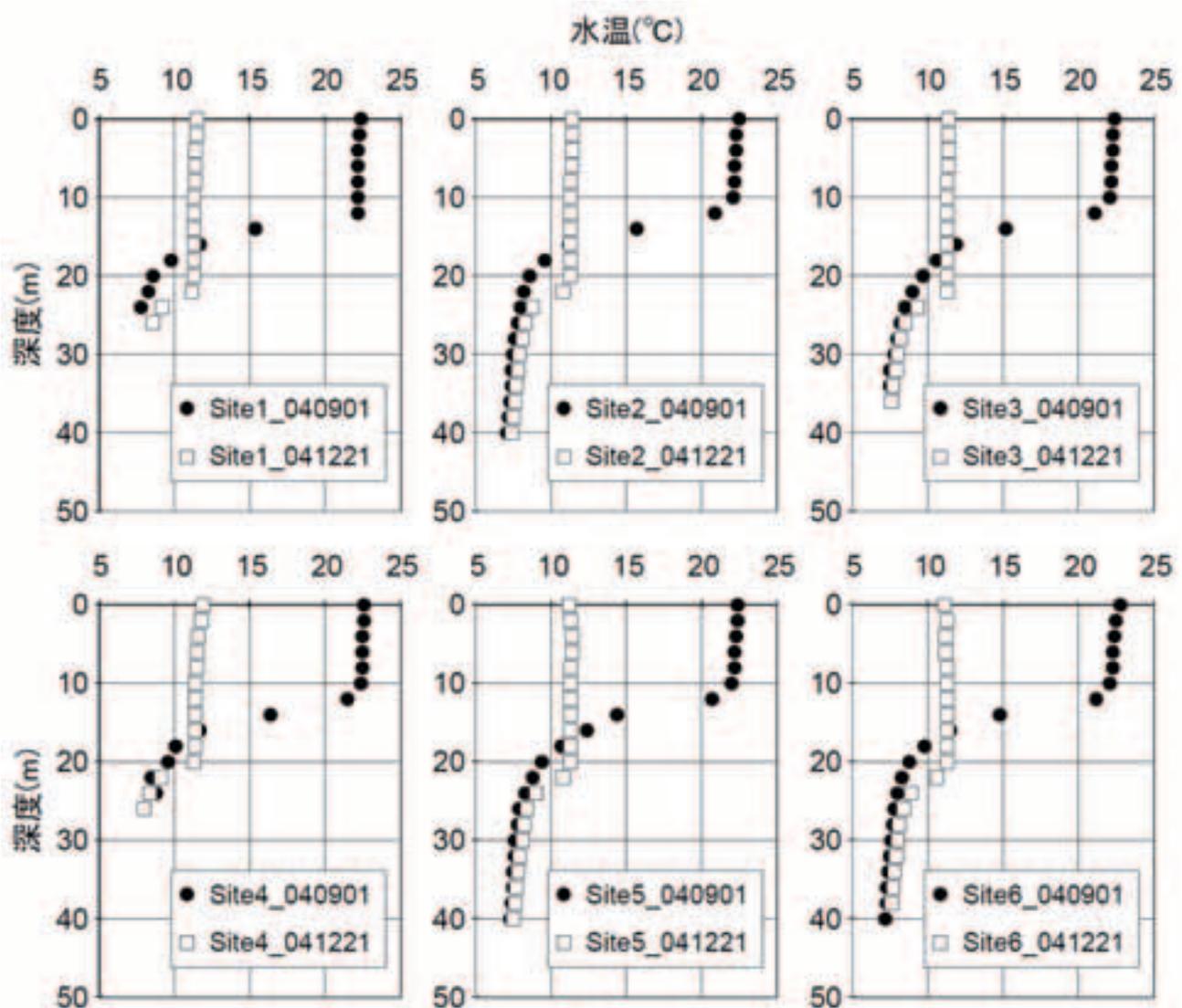


図4 湖水温の鉛直分布

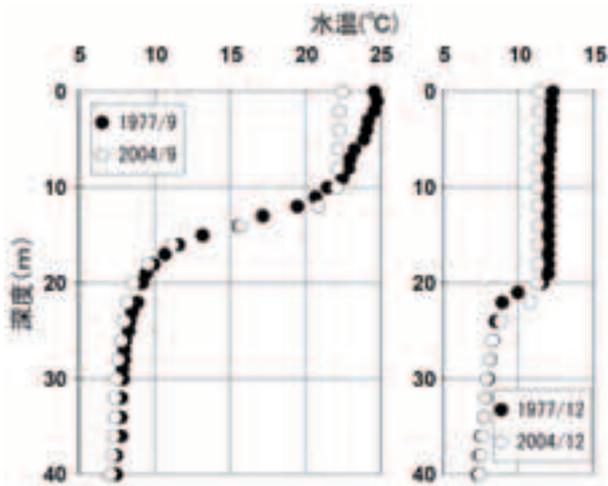


図5 横山・柳内（1987）と今回の湖水温調査結果の比較

10月以降は低下傾向となっている。また、10月6日から15日の期間の雨水は、酸素・水素とも同位体比が低くなっているが、これは10月9日に東日本に上陸した台風22号に伴う多量の雨の影響によるものと考えられる。

酸素同位体比を横軸、水素同位体比を縦軸にとったδダイヤグラム(図3)によれば、雨水の酸素・水素同位体比は、6から9月はCraig(1961)の天水線に、10月から12月はMatsuo *et al.* (1985)が報告している箱根の天水線に沿う傾向を示している。このような傾向は箱根地域の降水の酸素・水素同位体比を調査した板寺(2002)にも報告があり、降水の源である水蒸気の起源が異なることを示している。

3.2. 湖水温

湖水温の調査結果を表2に示した。図4は、調査地点ごとに水温の鉛直分布の状況を示したグラフである。2回の調査結果とも、調査地点による違いは顕著ではない。9月の調査結果では、表層から10m付近までは22°C前後のほぼ一定の値を示している。深度10m付近から20m付近まで温度が急低下する温度躍層が確認された。それ以降では7~8°C台の値で、深さとともに徐々に水温が低下している。

12月の調査結果においては、表層から深度22m付近まで11°C台前半の一定の値を示しているが、深度25m付近まで温度が急に低下している。温度躍層は9月の結果ほど顕著ではない。さらに深部では、7~8°C台の値で深さとともに徐々に水温が低下し、9月と同様のプロファイルとなっているが、水温は12月の方が若干高く、表層の循環がより深部に及んでいることを示している。

図5に、本調査の地点2における水温測定結果を、横山・柳内(1987)が、1977(昭和52)年に今回とほぼ同様の地点で行った水温測定結果とともに示した。2回の調査結果を比較すると、温度躍層の出現深度や躍層以降の水温に顕著な違いは認められない。ここで比較したのは9月と12月の結果だけであり、また、測定に用いた温度計の器差については把握していないが、この期間、芦ノ湖における水温の分布および、その年変化の状況は、大きく変わっていないものと推察される。

表3 湖水の酸素同位体比測定結果(単位‰)、地点1から6は図1のとおり)

深度(m)	2004/9/1						2004/12/21					
	地点1	地点2	地点3	地点4	地点5	地点6	地点1	地点2	地点3	地点4	地点5	地点6
0	-6.6	-6.7	-6.6	-6.7	-6.7	-6.7	-6.8	-6.9	-6.9	-6.8	-6.8	-6.8
5	-6.6	-6.6	-6.6	-6.7	-6.6	-6.6	-6.8	-6.9	-6.9	-6.8	-6.8	-6.8
10	-6.6	-6.6	-6.7	-6.7	-6.7	-6.7	-6.8	-6.8	-6.9	-6.9	-6.8	-6.8
15	-6.6	-6.6	-6.8	-6.8	-6.6	-6.6	-6.7	-6.9	-6.8	-6.9	-6.9	-6.8
20	-6.5	-6.7	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8
25	-6.8	-6.9	-6.7	-6.9	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.9	-6.8	-6.8
30		-6.9	-6.7		-6.8	-6.8		-6.8	-6.9		-6.9	-6.8
35					-6.7			-6.8	-6.8		-6.8	-6.9
40					-6.7	-6.8		-6.8			-6.9	-6.9

表4 湖水の水素同位体比測定結果(単位‰)、地点1から6は図1のとおり)

深度(m)	2004/9/1						2004/12/21					
	地点1	地点2	地点3	地点4	地点5	地点6	地点1	地点2	地点3	地点4	地点5	地点6
0	-44.4	-42.5	-40.9	-46.3	-42.9	-44.4	-40.8	-45.6	-43.8	-44.2	-43.4	-42.2
5	-44.7	-41.0	-44.2	-45.6	-40.6	-44.4	-42.5	-43.9	-42.2	-44.4	-44.7	-44.1
10	-43.3	-43.9	-43.4	-46.0	-42.7	-40.9	-42.5	-44.1	-43.8	-45.6	-42.4	-45.6
15	-41.4	-42.8	-42.7	-42.0	-43.1	-44.4	-41.3	-42.6	-45.4	-45.2	-42.6	-45.5
20	-40.8	-45.4	-42.8	-42.2	-42.3	-43.8	-39.3	-42.9	-44.4	-44.5	-44.1	-44.2
25	-43.3	-43.8	-44.8	-42.4	-43.5	-44.4	-42.8	-46.2	-43.2	-44.7	-40.7	-41.4
30		-45.2	-45.0		-41.6	-42.5		-47.6	-40.4		-44.1	-42.2
35					-43.3			-46.3	-43.3		-44.8	-40.3
40					-43.5	-43.8		-41.6			-43.0	-40.7

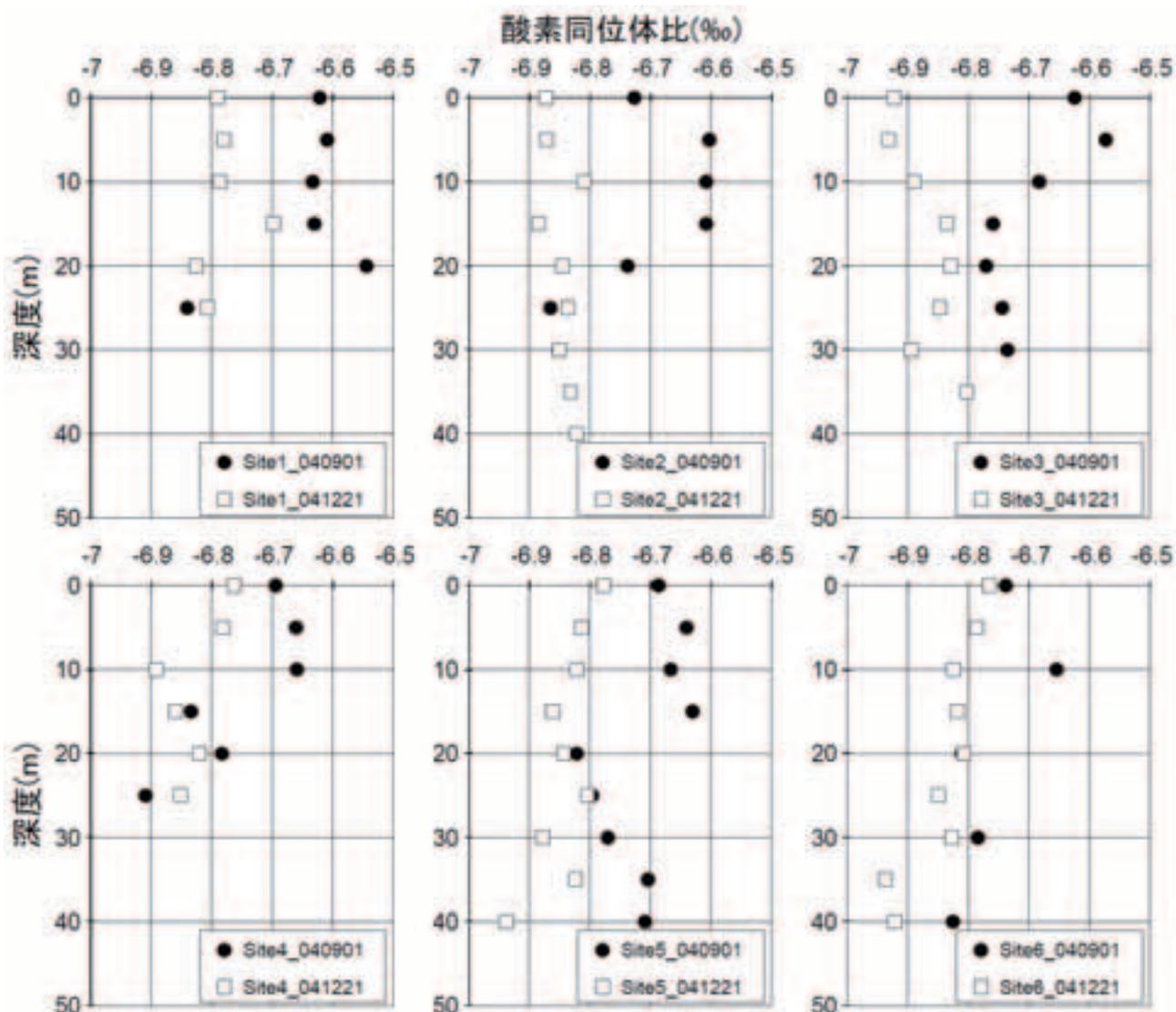


図6 湖水の酸素同位体比の鉛直分布

3.3. 湖水の酸素・水素同位体比

湖水の酸素・水素同位体比の分析結果を表3および4に示した。今回測定した湖水の酸素・水素同位体比を δ ダイアグラム(図3)上にプロットし、雨水の同位体比の変動幅と比較すると、湖水が空間的にも時間的にも極めて均一な同位体比を示しており、降雨イベントごとに湖面に降る雨水が湖水の同位体比を変動させる効果は極めて小さいものと考えられる。

湖水の酸素同位体比の鉛直分布を示した図6によれば、9月の調査結果において、各地点とも同位体比が急変する部分が認められる。その深度は地点ごとに異なるものの、表層の10から20m付近までが若干重く-6.7‰付近の値であり、それ以深では-6.8‰前後の値であった。同位体比が急変する深度は、温度躍層の深度と対応しているものと思われる。12月の調査結果では、各地点とも深度による酸素同位体比の変化は小さく-6.8～-6.9‰前後の値であり、9月の結果に見

られたような同位体比の急変部は認められなかった。

水素同位体比の鉛直分布(図7)については、深度にとりもなう変化の状況が調査地点ごとに異なっている。一方、調査時期による違いについては、酸素同位体比に認められたような調査地点に共通する様な特徴は認められなかった。上述した水素同位体比の測定精度を考慮すると、各調査地点とも、水素同位体比が、鉛直方向にほぼ一様な値を示しており、また、2時期の調査結果に有為な差が認められないと考えるのが妥当かも知れない。

表5に、湖水の酸素・水素同位体比を、温度躍層が見られた深度よりも浅部(9月は10m以浅、12月は20m以浅)と深部(9月は20m以深、12月は25m以深)の平均値を示した。Matsuo *et al.* (1979)が1972(昭和47)年に採取した試料について報告している湖水の酸素・水素同位体比の平均値は、それぞれ-6.9‰、42.6‰である。これと表4の結果を比較すると、9月の浅部の酸素同位体比(-6.7‰)が、わずかに重い結果となっているが、それ以外につい

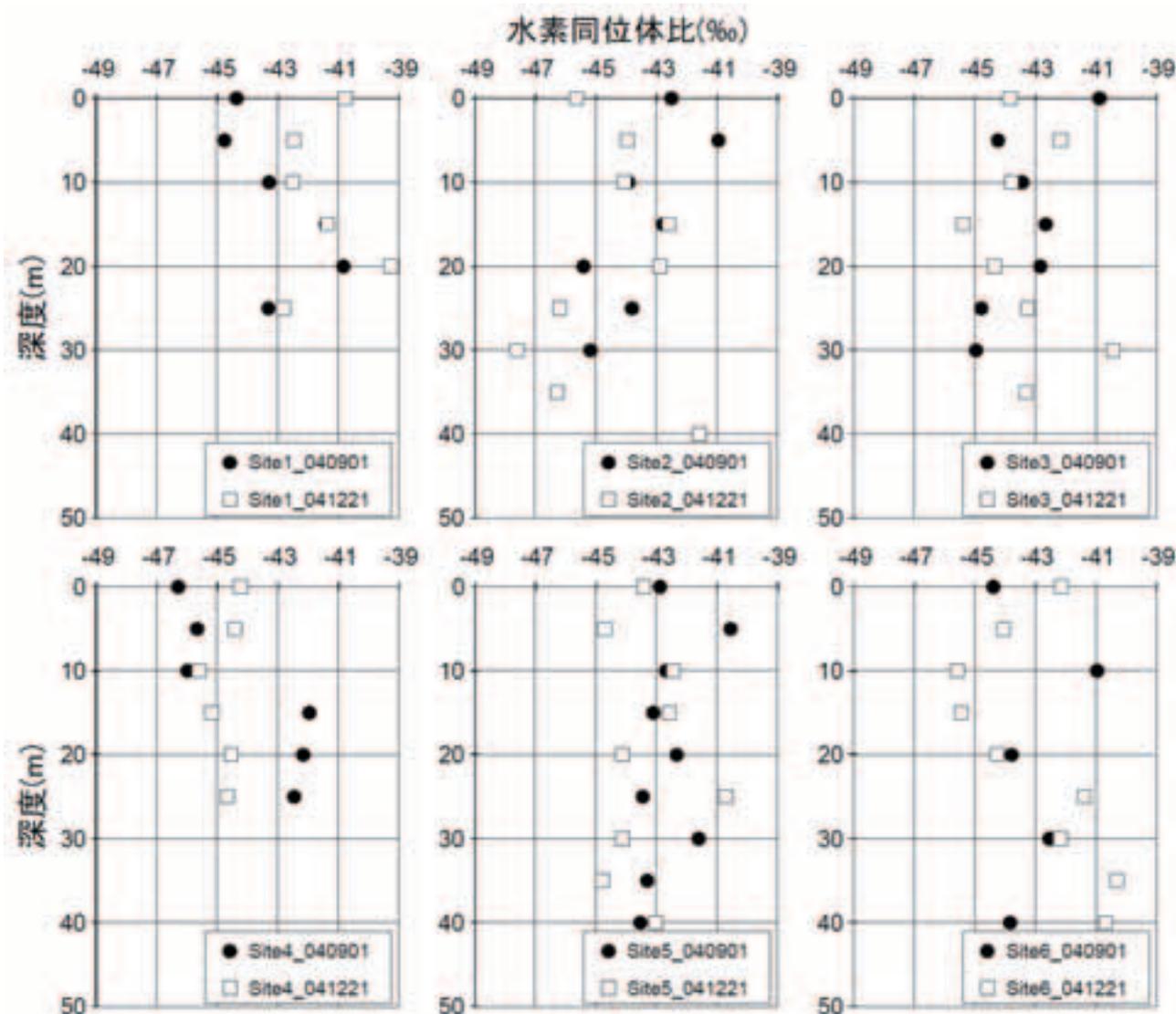


図7 湖水の水素同位体比の鉛直分布

ては有為な差が認められないことから、水温と同様、酸素・水素同位体比についても、Matsuo *et al.* (1979)の調査以降、長期間にわたって安定していたことが推定される。

4. 考察

湖水の同位体比が、周囲の天水より重くなる主な要因

表5 温度躍層より浅層・深層における湖水の酸素・水素同位体比の平均値

	$\delta^{18}\text{O}$	δD
2004/09/01($\leq 10\text{m}$)	-6.7	-43.4
2004/09/01($\geq 20\text{m}$)	-6.8	-43.3
2004/12/21($\leq 20\text{m}$)	-6.8	-43.6
2004/12/21($\geq 25\text{m}$)	-6.9	-43.1
Matsuo <i>et al.</i> , (1979)	-6.9	-42.6

単位(‰)

として、蒸発にともなう同位体比の変化(同位体効果)を挙げることができる。酒井(1977)は、湖が蒸発にともなう同位体効果のモデルを応用するのに適したフィールドであると述べ、日本各地の湖について、湖水の同位体比が、それぞれの地域の雨水に比べてどれほど重いのかについて検討している。

図8は、その結果に、今回の調査結果を重ねてプロットしたものである。地域の雨水の同位体比としては、P1およびP2における降水量加重平均値(表1)および、Matsuo *et al.* (1979)における雨の平均値を用いている。P1、P2における平均値は約半年間の調査によるものであり、Matsuo *et al.* (1979)による平均値は標高1050m地点における結果である。そのため、初期値として適当な雨水の同位体比については別に検討は必要であるものの、今回の結果は、酒井(1977)が例示した他の湖と同様に勾配5の傾向に沿ってプロットされており、芦ノ湖の湖水についても、蒸発にともなう同位体効果の影響を認める

表6 芦ノ湖の水収支

面積 (km ²)	年降水量		年蒸発(散)量		深良用水からの流出			斜面から流入		備考
	(mm)	($\times 10^4 m^3$)	(mm)	($\times 10^4 m^3$)	(m ³ /sec)	(mm)	($\times 10^4 m^3$)	(mm)	($\times 10^4 m^3$)	
6.9	3081	2126	765	528	1.36	6216	4289	3900	2691	箱根水質調査団(1975)
			913	630				4048	2793	
	3000	2070	913	630	1.36	6216	4289	4120	2849	Matsuo et al.(1979)
			1000 ^{※2}	690				1.36 ^{※2}	6216	
3448 ^{※1}	2379	1000 ^{※2}	690	1.67 ^{※4}	7633	5267	5185	3577		

※1横浜地方気象台による平年値
 ※2板寺(2005)による推定値
 ※3箱根水質調査団(1975)による
 ※4平野ほか(1982)による

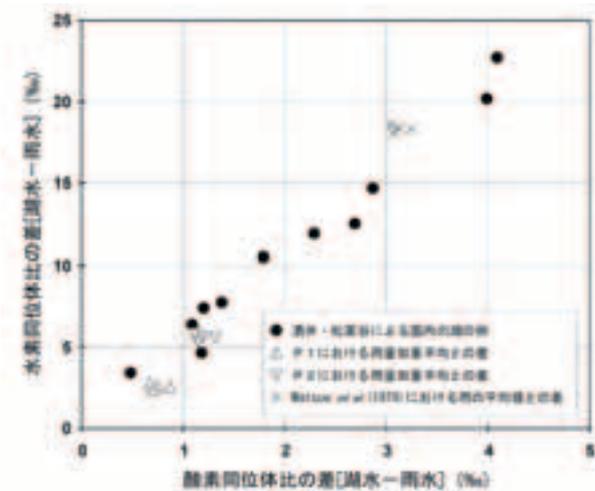


図8 日本各地における湖水と雨水の同位体比の差(酒井(1977)に加筆)

ことができる。

一方、芦ノ湖の湖水の同位体比は、9月に、表層部でわずかに重い値を示す傾向が認められたものの、極めて一定かつ均一な分布を示したほか、過去の調査結果と比較しても有為な差が認められなかった。このことは、芦ノ湖の湖水の混合が十分進んでおり、かつ同位体収支も定常状態にあることを示唆している。

従来の知見にもとづいて、芦ノ湖の水収支についてまとめた表6によれば、芦ノ湖の貯水量に経年的な変動がないとすれば、湖面を取り囲んでいる斜面から年間3700～5200mmの地下水が流入していることとなる。これと湖面への直接雨量と合わせると、湖に対する雨水起源の入力は年間7000mm以上となり、板寺(2005)が推定した年間蒸発量の7倍以上に及ぶ。一方、今回の調査結果においても、雨水の同位体比は大きく時間変動していることが示されている。湖水の同位体比の形成には、蒸発による同位体効果だけでなく、雨水起源の入力成分の同位体比が均一化される過程も大きく寄与していると考えられるべきであろう。

5. まとめ

2004(平成16)年9月と12月に、芦ノ湖の6地点において水温測定および湖水の酸素・水素同位体比の調査を行った。その結果は以下のとおりであった。

(1)水温の鉛直分布については、調査地点による違いは顕著ではなく、9月は深度10から20m付近、12月は22から25m付近で温度躍層が確認された。

(2)今回の調査結果を、横山・柳内(1987)が1977(昭和52)に実施した調査結果と比較したところ、水温と温度躍層の出現深度に大きな違いは認められなかった。

(3)雨水の同位体比の変動幅と比較すると、湖水の酸素・水素同位体比は極めて均一な値を示していた。

(4)湖水の酸素同位体比の鉛直分布については、9月の結果において、各地点とも表層の10から20m付近までが、それ以深よりも若干重い値を示す傾向が認められた。

(5)今回の調査結果を、Matsuo et al. (1979)が報告している湖水の酸素・水素同位体比の平均値と比較したところ、9月の温度躍層より上部の酸素同位体比が、わずかに重い結果となっているが、それ以外については有為な差が認められなかった。

(6)湖水の同位体比には、蒸発にともなう同位体効果の影響が認められた。ただし、湖の水収支を考慮すると、雨水起源の入力成分の同位体比が均一化される過程も、湖水の同位体比形成に大きく寄与していると考えられるべきである。

参考文献

- Craig, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters, *Science*, 133, 1702-1703.
- 箱根水質調査団 (1975) 箱根カルデラ河川流出水の溶存成分に対する温泉の影響について, *温地研報告*, 6 (2), 87-116.
- 平野富雄, 横山尚秀, 大木靖衛, 松尾禎士, 渡辺修一, 柳

- 内志保子 (1982) 芦ノ湖の水質と芦ノ湖周辺の地下水の水質, 温地研報告, **13**(5), 55-64.
- 板寺一洋 (2002) 箱根中央火口丘地域における降水の酸素・水素同位体比について, 温地研報告, **34**, 9-12.
- 板寺一洋 (2005) 箱根仙石原地域における蒸発散量の推定, 温地研報告, **37**, 51-56.
- 国土地理院GIS・国土の情報 <http://www.gsi.go.jp/gis.html>.
- Matsuo S., Kusakabe M., Niwano N., Hirano T. and Oki Y. (1979) Water Budget in the Hakone Caldera using hydrogen and oxygen isotope ratios, Proceedings of Advisory Group Meeting, 1977, IAEA, 131-144, 1979.
- Matsuo, S., M. Kusakabe, M. Niwano, T. Hirano and Y. Oki (1985) Origin of thermal waters from Hakone geothermal system, Japan, *Geochemical Journal*, **19**(27), 27-44.
- 酒井 均 (1977) 水および水溶液の同位体化学, 立見辰雄編, 現代鉱床学の基礎, 東京大学出版会, 257p.
- 横山尚秀, 柳内志保子 (1987) 箱根芦ノ湖の水温変化と湖水循環, 温地研報告, **18**(2), 65-72.