

## 34,000 年間における大気からの水銀降下量の変化

水野直治\*・保原 達\*\*・天野洋司\*\*\*

〔キーワード〕：水銀，大気汚染，火山放出物，地球規模，土壌汚染

## 1. はじめに

環境における水銀は地球規模の問題であり，また水銀汚染は水俣病で知られる深刻な神経系の病の原因として知られる（石牟礼 1987, Takahashi & Hirayama 1971）．水俣病は水銀を含む工場排水によって汚染された海からとれた魚類を食したことで発生した．1992 年の地球サミットで表面化したブラジル（赤木 1994）での水銀汚染は，金の採鉱において鉱石中の金を水銀と反応させ，アマルガムとして取り出し，水銀を加熱蒸発させることで金を得ていることに起因する．この方法は東南アジアなどの小規模な金の採取にも用いられている．

一方，農業面では過去に水銀入り農薬を使用した時期があり，土壌の水銀汚染の原因とみなされてきた（浅見 2001）．

水銀は常温で液体あるいは気体になる唯一の重金属元素である．そのため蒸発した水銀は大気から降り注ぎ土壌汚染の原因となる特徴を持っている．大気からの水銀付加量は火山活動や石油，石炭消費による水銀の放出と水銀の使用量から計算して年間 910~6,200t になると推定されている（Nriagu and Pacyna 1988）．しかしながら一般には水銀が大気から降下して土壌に蓄積することはあまり理解されていないばかりでなく，これらの実証は困難を極めている．湖の底質の分析や，南極の氷を 34,000 年前まで遡り水銀の分析定量を行っている（Vandal et al. 1993）がデータはばらつきが大きく，これらから水銀降下量の推定ができるものではなかった．

著者らは時代別の水銀降下量を知るため，火山放出物であるテフラを用いることを思いついた．水銀は高温では気化（沸点 356.9°C）するため，火山噴出物には存在できない．さらに北海道においてはほぼ 200 年前までほとんど工業活動がなく，人為的な

水銀汚染はなかった．また主要なテフラはすでに年代測定が完了していて，テフラの各層位は堆積後次の噴火があるまでの間，大気の水銀を堆積していくことになる．その期間は何千年あるいは何百年という年月で，年度あるいは季節によるブレは長時間の間に均一化される．水銀濃度も分析に適するまでに濃縮されていることが明らかになった（Hobara et al. 2009）．

そこでわれわれは 34,000 年前からのテフラにおける水銀の分布状態，大気からの水銀降下量の時代別変動とその特性を明らかにするとともに，水銀汚染が大気を介してグローバル化していることを広く知らせるためその調査結果をここに報告する．

## 2. 実験法

## 1) 実験材料

実験に用いたテフラは写真 1 の中の図 (a) に示した地点で最上部の有機物層を除き，層位別に採取した．すなわち，苫小牧，追分（現：安平町），夕張，富良野，芽室，網走である．試料は火山灰ばかりでなく，支笏湖と屈斜路湖の火砕流も含まれる．それぞれの噴火年代を表 1 に示した．写真 1 の (b) には樽前山の火山灰層を示した．この Ta-d の下には 17,000yBP 噴火の恵庭岳の火山灰層があり，その下には支笏湖が出来るときの厚い火砕流の堆積がある．AD1739 年噴火の Ta-a は網走や根室方面の別海町でも確認されるほど広範囲に分布する．

面積 79.6km<sup>2</sup>，平均水深 28.4m の日本最大のカルデラ湖である屈斜路湖の火砕流は膨大で，この堆積層は道東に広く拡がり，標高 800m の藻琴山も形成

表 1 各テフラの噴出年代

樽前山火山灰	(Ta-a) : AD 1739
	(Ta-b) : AD 1667
	(Ta-c) : 1,600yBP
	(Ta-d) : 8,900yBP
恵庭岳火山灰	(En-a) : 17,000yBP
	支笏湖火砕流 (Spfl) : 32,000yBP
屈斜路湖火砕流	(Kpfl) : 34,000yBP

\* 元酪農学園大学獣医学研究科 (Naoharu Mizuno)

\*\* 酪農学園大学環境共生学類 (Satoru Hobara)

\*\*\* 元酪農学園大学酪農学部 (Yoji Amano)



表2 苫小牧市植苗における土壌特性と土壌水銀含有率

テフラ	層位	土性	深さ cm	容積重 g/cm <sup>3</sup>	土量 m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup>	土壌重 t/m <sup>2</sup>	Hg 濃度 ng g <sup>-1</sup>	面積当たり HG mg m <sup>-2</sup>	面積当たり HG μg m <sup>-2</sup> /年
Ta-a	A	S	0-5	0.95	0.05	0.045	34	1.5	
Ta-a	C	S	19	0.91	0.14	0.127	10	1.3	
計 (266)								2.8	10.5
Ta-b	2A	S	24	1.09	0.05	0.055	11	0.6	
Ta-b	2C	S	105	0.63	0.81	0.510	4	1.8	
Ta-c	3A	L	124	0.50	0.19	0.095	51	4.8	
Ta-c	3B	S	154	0.76	0.30	0.228	11	2.6	
Ta-c	3C	S	193	1.07	0.39	0.417	2	0.8	
計 (1,400)								10.6	7.6
Ta-d <sub>1</sub>	4A	CL	224	0.48	0.31	0.149	59	8.8	
Ta-d <sub>1</sub>	4B	L	249	0.75	0.25	0.190	32	6.1	
Ta-d <sub>1</sub>	4C	S	264	0.83	0.15	0.125	9	1.1	
Ta-d <sub>2</sub>	5C	S	439	0.56	1.75	0.980	19	18.6	
計 (7,300)								34.6	4.7
En-a	6A	CL	444	0.72	0.05	0.036	65	2.4	
En-a	6B	LiC	484	0.74	0.40	0.300	67	20.1	
En-a	6C	G	579	0.60	0.95	0.570	32	18.1	
計 (8,000)								40.6	5.1
Spfl	7B		630	0.91	0.51	0.464	95	44.2	
Spfl	R1		680	0.90	0.50	0.450	16	7.4	
Spfl	R2		880	0.68	2.00	0.136	1	0.2	
Spfl	R3		1580	0.69	7.00	0.483	N.D.	N.D.	
計 (15,000)								51.8	3.5

注：( ) 内は累積年数、深さは地表からの深さである。

いることがわかる。それ以下での水銀は痕跡程度である。火山噴出物は本来岩石の粉末または粒子であって、土壌のように陽イオンの吸着能力はない。そのため多少下層への流出があるのもやむを得ないが、その移動は極めて低いことがこれらのデータは示している。この中で Ta-d のみ下層で高い値を示した。この原因については現在のところ不明であるので、この問題は今後の研究課題としたい。

表2には苫小牧におけるテフラ別の層位、土性、地表からの深さ、土量、水銀濃度、面積当たりの水銀量を示した。またそれぞれのテフラの表面が露出して、水銀を受容していた累積年数と m<sup>2</sup> 当たりの年間水銀降下量も示した。このデータから人類が活動を始めた2千年ほど前から水銀の降下量の増大していることが明らかになった。これを棒グラフにしたのが図2である。単位は地球面積当たりの年間降下水銀量をトン数とした。これからも人類の文明活動が始まる前は安定して低い値であったが、有史時代に入ってから急に水銀降下量の増大したことが明らかになった。

## 2) 地球面積当たりの水銀降下量

これまでは苫小牧でのデータのみで説明した。ここで地域別の偏りを除くため道内各地から広く試料を集めて分析し、同じ方法で集計し、その結果を表3に示した。3万年以上前の氷河期のデータは道東を屈斜路湖の火砕流 (Kpfl : 34,000yBP)、道西を支笏湖の火砕流 (Spfl : 32,000yBP) で求めた。

表3でみると、有史以前は北海道の西側である苫小牧や追分以降降下水銀量が多いが、有史に入ってから苫小牧だけ水銀の降下量が低い傾向にある。したがって、水銀の降下量は時代によって、また場所によって振れが認められるがこの平均値をもとめ、その結果を図3に示す。これから34,000年前から水銀の降下量がどのように変化してきたかわかる。すなわち、人類の文明の始まる前の地球上に降り注ぐ水銀の量はおおむね1,500t/年 (1543±805t/年) 前後で推移してきたのが、有史に入ってからこの値は急激に増大してきたことを現している。この値は1600yBPから産業革命までに3倍にもなっていて、それから現代にかけてほぼ2倍になったことを示す。

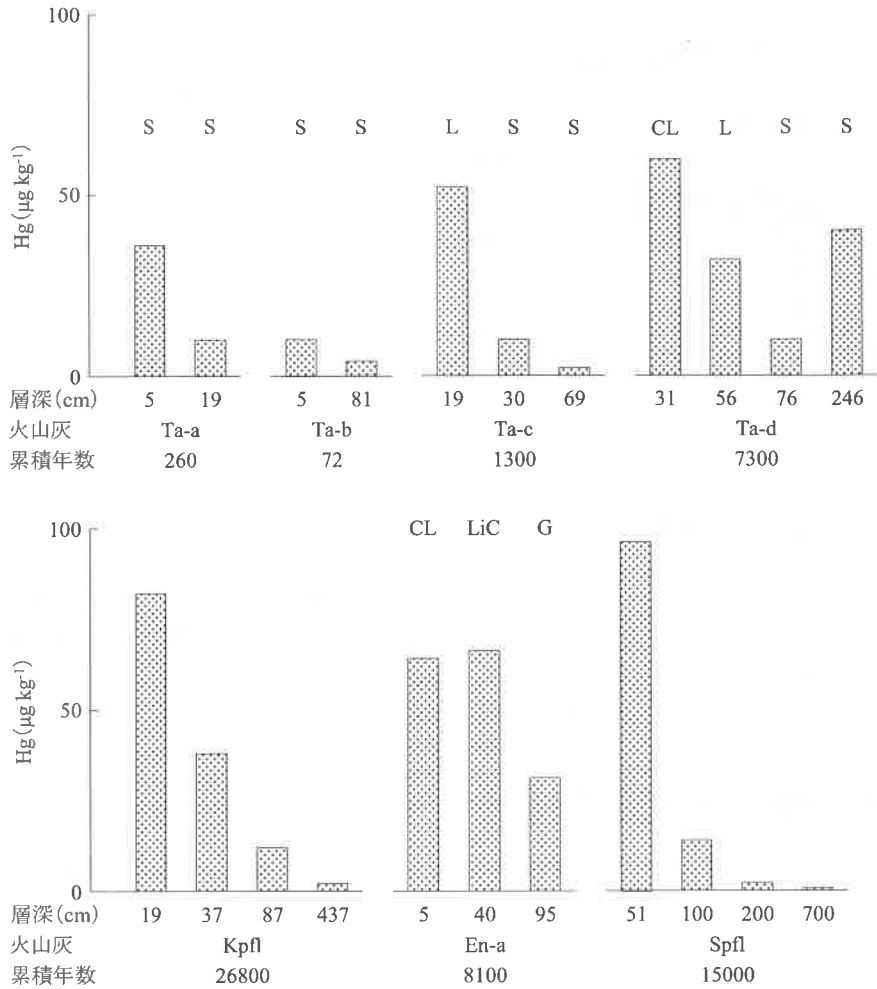


図1 火山噴出物の深層による水銀濃度の変化

#### 4. 考察

##### 1) 土壌および岩石の水銀濃度

USA の農地土壌中水銀濃度の平均値は 0.03~0.15mg/kg であるが (Steinnes 1992), その範囲は 0.01~4.60mg/kg とその差が著しく大きいのが特徴である。これは他の国でも同じ傾向にある。このような変動の大きい重金属, たとえば銅, 亜鉛あるいは鉛などの変動係数はせいぜい 50%程度であるから (水野ほか 1977), 水銀は明らかに他の土壌中重金属と異なることがわかる。日本の農地の水銀濃度も平均値が 0.18~0.33mg/kg の範囲にあり, その範囲は ND~5.4mg/kg (環境庁水質保全局 1974) とその幅の大きさに驚く。

注: NDは「検出されず」である。ゼロとは異なる。

一方, 岩石の水銀含有率は Steinnes (1992) によると, 火成岩の玄武岩, 花こう岩も平均値は 0.004mg/kg 以下と極めて小さいが, 報告者にもよるが水成岩は砂岩; 0.012mg/kg, 石灰岩; 0.049mg/kg, 頁岩; 0.045mg/kg となり, その範囲は 0.010~0.300mg/kg となり, 火成岩より一桁高い値となる。なぜ火成岩より水成岩で高くなるのか, これは水銀の性質と密接な関係があろう。すでに指摘したように, 水銀は沸点が 360°Cであるため, 容易に気化する。これが高温になるテフラに水銀が含まれない原因であるが, 火成岩で水銀含有率が低いのも同じ原理である。

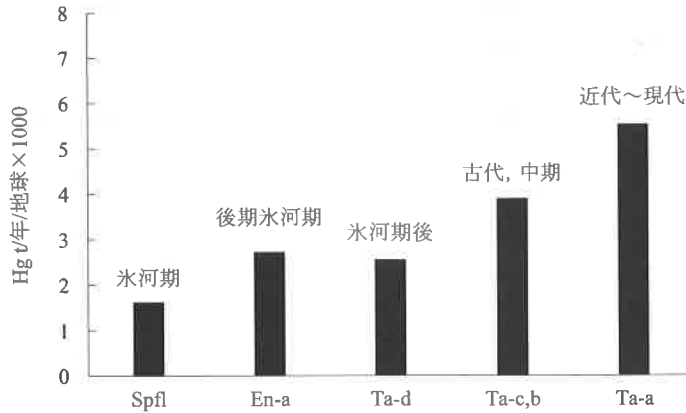


図2 苫小牧市植苗における時代別水銀年間降下量の推移

表3 3万4千年にわたる地球に降下する水銀量の地質年代別の変化

地点	氷河期 Spfl : 15,000年 Kpfl : 26,800年	後期氷河期 En-a : 8,000年	後氷河期 Ma-f : 5,200年 Ta-d : 7,300年	古代・中期 Ta-b,c : 1,400年	近代~現代 Ta-a : 266年
苫小牧	1734	2601	2397	3878	5355
追分		2397		7650	8619
夕張		1173		6661	8058
富良野					7854
芽室		612		3468	6732
網走	408		1020	1377	6528
平均値	1071	1696	1709	4610	7191

単位：t/地球/年

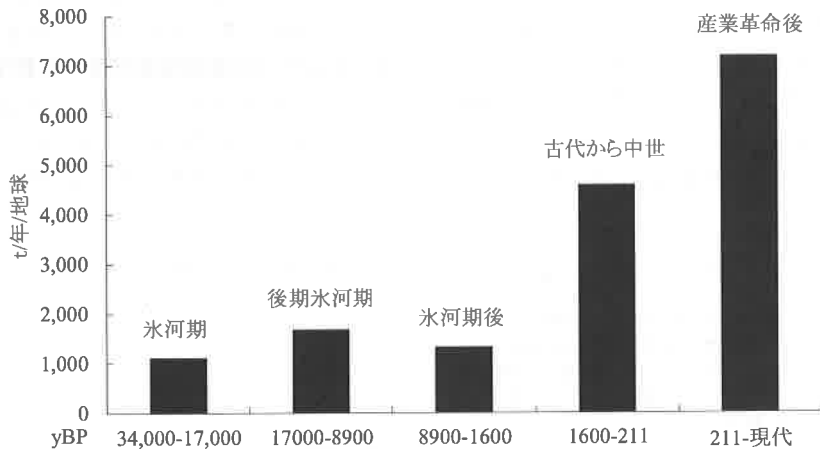


図3 34,000年前から現代までの全地球における降下水銀量の平均値

## 2) 循環する水銀

地球を循環する水銀量は、Lindqvistら(1984)によると総量で年間2000~17,000トンと見積もられている。これらは2000年の世界の水銀使用量が

14,000tであることと、火山や石炭、石油などから出る量を考慮して計算された妥当な数値かも知れない。しかし使用する水銀の全てが蒸発するわけではないので、実際はそれより低い値になるのは当然で

あろう。著者らのここに提出した実測数値である年間7,000tという値はLindqvistらの最高値のほぼ1/2である。

これまで、地球上に戻ってくる水銀量を信頼できる方法で測定した報告は存在しなかった。したがってこれまで重金属が大気を介して巡回して供給されるとの意識はほとんどの人たちになかったものと考えられる。ここで忘れてならないことは大気から供給されるということは土壌においては地表から濃度が高くなるということである。そのため、これまでの一般的な重金属汚染のように、下層土と比較して論議することは成り立たない。

このように大気と地上を巡回する低濃度の物質を正確に把握するには火山性放出物が最適な材料であると思われる。ただし、火山から放出されるときに水銀のように熱で飛散して含まれていないことが条件である。

### 3) 農用地土壌の水銀汚染について

日本では1953年から1968年の15年間に2,400tの水銀がいもち病などの農薬に使われたといわれる(浅見 2001)。日本の農地面積はほぼ500万haである。現在、その内の54%が水田であるが、現在は米過剰対策のための減反は4割に上っているので、水銀農薬が使用されていた時期は現在より水田の割合は高い。そこで1953-1968年は農地の全面積に水銀農薬を使用したとして計算すると、土壌に対する水銀上昇の計算上の寄与率はつぎのようになる。

以上はあくまで計算上である。このように2000tの水銀が5,000,000haの農地に散布されたとしたら、作土の水銀濃度は0.2~0.3mg/kg程度上昇したこと

になる。以上は2,000tの水銀を5,000,000haの全農地に散布したとしての計算である。

しかしながら環境庁水質保全局の調査では畑、水田双方の土壌ともHg 3mg/kgを超える土壌が出ているし、林地でも5mg/kg近い値が報告されている。これをみても水銀の高い値がすべて農薬による値であるとは考えにくい。特に林地ではこのような水銀系の農薬は通常使わないからである。したがって天然供給の水銀がかなりあることも認識すべきである。

今回の調査で部分的には15,000年間大気に晒されていたEn-aのA層で、0.2mg/kg近いHgの上昇のあったことも認められている(Hobara et al. 2009)。ここより15kmほどの距離の地点でもこれに近いデータがでていところから、これは調査エラーではない。

同じ期間での土壌水銀の上昇は開けた平野よりも谷間のような地形で高い値が出ている。しかもこれらの水銀が高くなった期間は大気からの水銀供給が現在の5分の1の時代の氷河期である。このように大気からの降水水銀がある以上、水銀の汚染と非汚染の線引きを心土の含有率を基準にして行うのは妥当ではない。明らかに地表ほど高い濃度になるのであり、農地土壌の水銀蓄積の原因は再考する必要がある。特に年代の古い土壌地帯ではその大気からの供給比重が大きいからである。

### 4) グローバル環境保全対策の重要性

土壌の水銀汚染は大気からの供給のあることは紛れもない事実である。これで注目しなくてはならないのは世界各地でいまだ金の採鉱やその他に水

計算による農地土壌に対する農薬による水銀濃度の上昇値の試み

条件：使用水銀量；2,000t  
農地面積；5,000,000ha  
1ha当たり土壌量；2,000t  
(深さ20cmとして計算)

計算式：

$$\begin{aligned} \text{水銀濃度 Hg (mg/kg)} &= \frac{\text{Hg 2,000t}}{5,000,000\text{ha} \times 2,000\text{t (土壌量)}} \\ &= \frac{1\text{t}}{5,000,000\text{t}} = \frac{1\text{mg}}{5\text{kg}} = 0.2\text{mg/kg} \end{aligned}$$

故に5,000,000haの農地に水銀農薬で水銀2,000tが入ったとしたら農地土壌の全水銀濃度は0.2mg/kgの上昇になる。ただしこれは可溶性水銀を示さない。

銀を使用していることである。これまで南アメリカや東南アジアなどでの水銀の使用は遠い国の問題で、我々には関わりのないことだと楽観してきた。しかしそれら遠い国の水銀も蒸発し、大気に供給され、ジェット気流にのって世界に拡散し、再び地上に戻ってくるのである。これらの水銀の使用を止めなければ日本ばかりでなく、世界中が水銀に汚染されることは明らかである。

土壌の水銀蓄積は環境問題が地域や国内問題だけでない時代に入ったことを示す一つの例である。大気汚染は中国の PM2.5 や亜硫酸ガスだけでないことをこの調査研究結果が示している。今後は世界の環境問題にも目を向けるべきであろう。

### 終わりに

日本においても過去に大規模な水銀汚染があったことが知られている。奈良の大仏殿の建造から 50 年足らずで平城京が長岡京に遷都した原因は水銀にあったという説がある（日本経済新聞 2004）。大仏殿の金メッキに使用された多量の水銀に原因するといわれる。これは金と水銀を 1:5 の割合でアマルガムとして大仏殿に塗り、その後炭火で加熱して水銀を飛ばすと金メッキが完成する。大仏殿にはこの方法がとられたのである。“崇（た）り”という言葉が出たのはこの後だといわれる。大仏殿建造のあと、水俣病のような神経障害者が多数出たことがうかがわれる言い伝えである。水銀汚染は今後も発生する可能性を秘めている。しかもグローバル規模で拡散しているため、地球の裏側の汚染であってもわれ関せずとはいかない状態にある。

東日本大震災に続き、またしても大規模な自然災害が日本を襲った。御嶽山の噴火である。一方、北海道にはみなが愛していた秀麗な山が魔の山に変わった歴史がある。1926 年に十勝岳火山の泥流で 144 名の犠牲者と多数の役畜、家屋と千 ha におよぶ農地の被害を受けたのがそれである。著者の一人は 20 年前に泥流被災後 60 数年後にどのような状態になったか調査し、報告した（水野ほか 1992）。この調査で 60 数年経過しても泥流で流れ込んだイオウ

の約 80% が残存していることが明らかにされた。

火山国日本では避けては通れない宿命にある。一方、火山の噴出物は新しい土壌の原料の供給でもある。今回の報告のように火山放出物は地球規模の物質収支の重要な証拠ともなる。多くの火山噴火はここに示した樽前山を見てもわかるように、津波のような周期性は全く認められない。地球の年齢の 46 億年を 12 時間とするならば、人類にとって途轍もない時間である千年、万年という時間も、地球にとっては 1 秒にもならない時間であって、そのような過去に起きたことがいま繰り返されても不思議ではない。われわれはその自然の仕組みを知り、自然と上手に付き合う必要があることを痛切に感じる。

### 文献

- 赤木洋勝 1994：ブラジル・アマゾン流域の水銀汚染，地球環境ハンドブック，p.497，朝倉書店，東京。  
 浅見輝男 2001：日本土壌の有害金属汚染，299-300，アグネ技術センター，東京  
 Hobara S, Mizuno N, Amano Y, Yokota H and Taniyama H 2009: Mercury distribution in tephra soil layers in Hokkaido, Japan, with reference to 34,000year stratification, *Soil Science Plant Nutrition*, 55, 582-589.  
 石牟礼道子 1987：苦海浄土，わが水俣病，上 1-311，下 1-351，埼玉福祉会，新座。  
 国立天文台 2005：理科年表，p.563，丸善，東京。  
 Lindqvist O, Jernelov A, Johansson K and Rodhe H 1984: Mercury in the Swedish Environment, National Swedish Environment Protection Board, Report SNV PM 1816.  
 水野直治・兼田裕光・鎌田賢一・目黒孝司・土岐和夫・後藤計二 1977：北海道農用地の土壌成分，道農試資料，8，1-62。  
 水野直治・丸岡孔一・稲津 脩 1992：1926 年十勝岳泥流水田土壌のイオウと鉄の含有率，土肥誌，63，677-683。  
 日本経済新聞 2005：5 月 7 日（文化欄）。  
 Nriagu JO and Pacyna JM 1988: Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*, 333, 134-139.  
 Steinnes E 1992: Heavy Metals in Soils (Ed. Alloway BJ), Blackie Academic & Professional, p.245-259, London.  
 Takahashi H, Hirayama K 1971: Accelerated elimination of methyl mercury poisoning, *Nature*, 232, 201-202.  
 町田 洋・新井房夫 1992：火山灰アトラス [日本列島とその周辺]，p.235，東京大学出版会，東京。  
 Vandal GM, Fitzgerald WF, Boutron CF and Candelone J 1993: Variations in mercury deposition to Antarctica over the past 34,000 years. *Nature*, 362, 621-623.