

# 青森・岩手県境地域の産廃不法投棄現場周辺で採取した 植物，土，水試料の同位体分析

村中 健\*・島 長義\*\*・高屋敷 英司\*\*\*  
小関 孝之\*\*\*・小野寺 みゆき\*\*\*\*・是川 浩志\*\*\*\*\*  
佐藤 詩織\*\*\*\*・鈴木 達也\*\*\*\*\*

## Isotope Analysis of Plant, Soil and Water Samples Collected around an Illegal Dumping Site of Industrial Waste at the Boundary between Aomori and Iwate Prefectures

Takeshi MURANAKA\*, Nagayoshi SHIMA\*\*, Eiji TAKAYASHIKI\*\*\*,  
Takayuki KOZEKI\*\*\*, Miyuki ONODERA\*\*\*, Hiroshi KOREKAWA\*\*\*\*,  
Shiori SATO\*\*\*\* and Tatuya SUZUKI\*\*\*\*\*

### Abstract

We analyzed nitrogen stable isotope ratio in plant and soil samples collected around an illegal dumping site of industrial waste at the boundary between Aomori and Iwate prefectures to study the influence of the leaching water from the illegal dumped waste. We also analyzed hydrogen stable isotope ratio in the rinsed water from a core sample of soil drilled near the leaching water plant and investigated tritium concentration in stream water sampled around the dumping site.

From these collected results, it was guessed that a stream used previously as a simplified water service is suspicious to be polluted by the leaching water from the illegal dumping site.

**Key words:** isotope analysis, dumped waste, leaching water, pollution, Aomori and Iwate prefectures

### 1. はじめに

青森・岩手県境地域に大量に不法投棄された産廃から滲出水が流出しており，周辺地域及び周辺流域水系への影響が懸念された。そのため，八戸工業大学では平成15年度から学内で「青森・岩手県境不法投棄産廃物の低環境影響処理技術に関する研究開発」というプロジェクト研究の体制を整え，文科省の私立大学学術研究高度化推進事業への申請・採択を得て研究を行っている<sup>1)</sup>。

その中で環境モニタリングとして，産廃不法投棄現場周辺の植物試料，土壌，及び水系試料について，環境同位体に着目した調査を行っている。具体的には，現場周辺で採取した植物試料及び土壌試料の窒素安定同位体比分析，土壌水の水素安定同位体比分析及び水系水試料のトリチウム濃度測定を行った。これらの環境同位体測定の意義，分析方法及び結果について報告する。

### 2. 環境同位体測定の意義

#### 2.1 安定同位体比分析

水素，炭素，窒素及び酸素の安定同位体組成を Table 1 に示す<sup>2)</sup>。水素には質量数1の軽水素の他に質量数2の水素安定同位体（重水素）が0.0156%存在する。炭素では炭素12の他に炭素13が1.11%，窒素では窒素14の他に窒素15が0.37%，酸素では酸素16の他に酸素17が0.037%，酸素18が0.20%存在する。このような安定同位体組成は固定されたものではなく，気象現象，火山活動，生物活動，又は人間活動による物質循環の中で同位体の割合は変動する。そこで，このような同位体比を計測することによって，それらの元素を含む物質の来歴に関する情報が得られることが次第に明らかになっており，安定同位体分析が地球化学，生態学，農学等広い分野で使用されるようになってきている<sup>3-7)</sup>。

##### 2.1.1 植物及び土壌試料の窒素安定同位体比分析

環境中の窒素安定同位体比は供給源ごとにある範囲の同位体比を示す。Table 2 にそれらの範囲を示す<sup>8)</sup>。ここで $\delta^{15}\text{N}$ は大気中窒素の窒素14と窒素15の濃度比を基準として(1)式で定義される。すなわち， $R = {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$ であり， $R_{\text{AIR}}$ はTable 1から計算される標準大気中の ${}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$ であり， $R_{\text{SAMPLE}}$ は試料中の ${}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$ である。

平成20年1月7日受理

\* 大学院工学研究科機械・生物化学工学専攻/生物環境化学工学科・教授・異分野融合科学研究所併任

\*\* 大学院機械・生物化学工学専攻・研究生

\*\*\* 平成17年度生物環境化学工学科・卒研究生

\*\*\*\* 平成18年度生物環境化学工学科・卒研究生

\*\*\*\*\* 平成19年度生物環境化学工学科・卒研究生

Table 1 水素, 炭素, 窒素及び酸素の安定同位体組成

H	C	N	O
<sup>1</sup> H 99.9844	<sup>12</sup> C 98.89	<sup>14</sup> N 99.63	<sup>16</sup> O 99.763
<sup>2</sup> D 0.0156	<sup>13</sup> C 1.11	<sup>15</sup> N 0.37	<sup>17</sup> O 0.037
			<sup>18</sup> O 0.200

単位 (%)

Table 2 環境中の窒素安定同位体比  $\delta^{15}\text{N}$  (‰) 値の範囲

種類	$\delta^{15}\text{N}$ 値の範囲
大気 (基準)	0
化学肥料	-8~+3
有機肥料	+3~+15
家庭排水	+10~+14
下水処理水	+11~+17

単位 (‰)

$$\delta^{15}\text{N} = \left( \frac{R_{\text{SAMPLE}}}{R_{\text{AIR}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (\text{‰}) \quad (1)$$

Table 2 に示したように基準となる大気中窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  値を 0 (‰) とすると有機肥料の  $\delta^{15}\text{N}$  値は 3~15 (‰) と正の値を示す。

ところで、青森・岩手県境産廃不法投棄現場では収集産業廃棄物の中にパーク等の有機廃棄物が多く、産廃業者は有機廃棄物の堆肥化を試みていた。したがって、その影響が産廃土壌に及び、それが産廃からの滲出水量によって標高の低い地域に拡散することが考えられる。そこで、滲出水量の影響がある地域に生育する植物では、影響のない地域に生育する植物と比較して、植物中の窒素安定同位体比が大きい値を示すと推定され、そのことによって産廃からの滲出水量の影響のある地点とそうでない地点とが区別できるはずである。このような考えから産廃現場周辺で採取した植物試料(よもぎ)、及び土壌試料に関する窒素安定同位体比分析を行った。

### 2.1.2 土壌水の水素安定同位体比分析

降水の地下への浸透速度を調べる方法として土をボーリングコア試料として採取し、これを数 cm 間隔に切断して、含有水を取り出して酸素・水素安定同位体比を調べることが行われ、安定同位体比の鉛直プロファイルに年周期が観察されている<sup>9)</sup>。夏季には気温が高く質量の軽い元素の蒸発散が大きいので、夏季降水による土壌水の安定同位体比は他の季節の降水による土壌水よりも大きい値を示す傾向にあるためである。

我々は以前、八戸地域の降水の水素安定同位体比の特徴を調べたことがあり<sup>10)</sup>、その経験を生かして産廃滲出水量の地下浸透に関する情報を得るため土壌水の水素安定同位体比  $\delta\text{D}$  の鉛直プロファイルを求めることを試みた。 $\delta\text{D}$  は (2) 式で定義される。

$$\delta\text{D} = \left( \frac{R_{\text{SAMPLE}}}{R_{\text{SMOW}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (\text{‰}) \quad (2)$$

ここで  $R_{\text{SMOW}}$  は標準海水 (Standard Mean Ocean Water) に関する重水素と軽水素の組成比である<sup>1)</sup>。

## 2.2 環境放射能分析

炭素 14 及びトリチウムは自然界でも人工的にも生成する放射性核種であり環境分析に用いられている。このうち、炭素 14 は縄文時代等の遺跡発掘炭化物の年代測定に利用されている<sup>11)12)</sup>。一方、トリチウムに関しては核実験や原発運転に伴い環境中に放出されるので、環境水や生物体内の地域的、経時的な変動解析<sup>13)14)</sup>が行われており、又、トリチウムをトレーサーとして地下水涵養、河川水と地下水の関係に関する研究も行われている<sup>15)16)</sup>。

環境水中のトリチウム濃度はこれまで六ヶ所村に建設された再処理施設との関連で建設前のバックグラウンド調査<sup>17)</sup>や試料水の電解濃縮前処理の研究<sup>18)19)</sup>を行ってきたので、その技術を生かして県境産廃不法投棄現場周辺水系のトリチウム濃度測定を行い、水系の差異を調べた。

## 3. 分析方法

### 3.1 試料採取

青森・岩手県境産廃不法投棄現場周辺の試料採取場所を Fig. 1 に示す<sup>20)</sup>。採取地点として (1) 産廃不法投棄現場 (457), (2) 現場近くにあるため池 (443), (3) 滲出処理施設 (366), (4) 以前に使われていた簡易水道水源 (旧水源) 付近 (241), (5) 現在の簡易水道水源 (新水源) (215), (6) 杉倉川の杉倉川橋付近 (200), (7) 熊原川の平成橋付近 (150) である。ここで採取地の後のカッコ内の数字は標高 (m) を示す<sup>21)</sup>。産廃からの滲出水量は導管で滲出処理施設に集められ、水処理後に放流されて

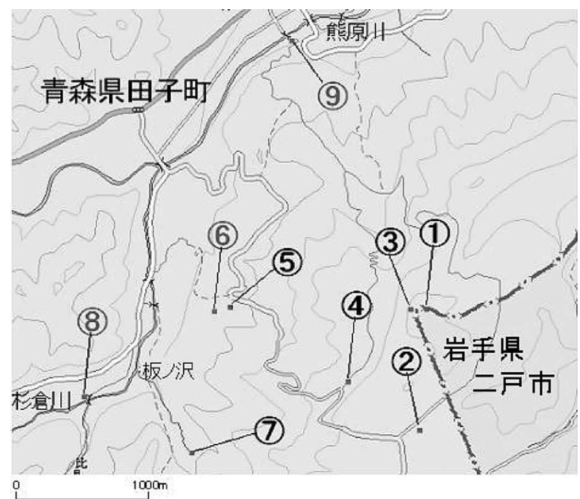


Fig. 1 試料採取地点

いる。旧水源は水処理施設よりも約 125 m 位低い標高にあり、水処理施設が完成する前は滲出水の影響が懸念された地点であった。また、新水源はその影響がないと考えられる地点、河川水のうち、杉倉川橋付近は上流域で産廃滲出水の影響がないと考えられる地点、熊原川の平成橋付近は下流域に位置する。

窒素安定同位体比を測定するための植物試料としていろいろな場所に生育が見られる“よもぎ”を選んだ。試料採取は 2005 年 5 月から 2007 年 9 月までに 9 回行った。土壌試料は 2006 年 9 月と 11 月に採取した。又、水系トリチウム分析のための水試料は上記採取地点のうち (2) ため池、(4) 旧水源、(5) 新水源、(6) 杉倉川橋付近、(7) 平成橋付近の 5 地点で 2005 年 7 月に採取した。

土壌水の水素安定同位体比分析のためにボーリングを行った地点は (3) 滲出水処理施設付近で、この施設が竣工する前に稼働していた仮設水処理施設の近くの地点であり、青森県の担当部署を通して地権者の許可を得て、2005 年 11 月に地下 10 m まで直径 5 cm のコア試料を業者に委託して採掘した。

### 3.2 安定同位体比分析

#### 3.2.1 前処理

窒素安定同位体比測定のための植物試料は乾燥、微粉化後、約 4 mg をスズカプセルに包んで約 2 mm 角の測定試料を各採取試料につき、3 個作成した。

窒素安定同位体比測定のための土壌試料は乾燥機で 30°C、48 時間乾燥し、その後、網目が 2 mm 角の篩で粗い砂を取り除き、スズカプセルに約 5 mg を封入して測定試料とした。

水素安定同位体比測定のための土壌ボーリングコア試料は 30 cm 刻みに分割し、高速冷却遠心機 (50A-IVD、佐久間製作所) で 4°C、7,500 rpm の回転数で 30 分間脱水して土壌水を得た。

#### 3.2.2 測定

窒素安定同位体比は元素分析計で測定試料を燃焼・還元して窒素ガスを生成し、これを安定同位体比質量分析計 (Delta Plus, サーマフィッシャーサイエンティフィック社) に導入して測定を行う。測定標準試料としてはグリシン (昭光通商) を用いた。

また、水素安定同位体比は水試料約 1.2 μL をマイクロシリンジでクロム粉末を用いた熱分解前処理装置 (H/Device, サーマフィッシャーサイエンティフィック社) に注入し、水を熱分解して水素ガスを得<sup>10)</sup>、上記の安定同位体比質量分析計で測定する。

### 3.3 トリチウム分析

#### 3.3.1 試料水の蒸留処理

トリチウム以外の放射性核種や含有有機物などの不純物を除去し、不純物付着によるトリチウム電解濃縮装置

の故障を防ぐため、トリチウム分析法<sup>22)</sup>に基づき常圧蒸留法を用い試料水の精製処理を行った。そのマニュアルでは試料水 70 ml に対し KMnO<sub>4</sub>、Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> をそれぞれ 0.1 g 添加することになっているので、試料水量に合わせてその割合で薬品の添加量を調節した。蒸留後の試料水に KMnO<sub>4</sub> 等が混入するため、混入物除去を目的とし蒸留後の試料水を薬品無添加で再度蒸留した。この処理により各試料水の蒸留後の電気伝導率は 10 μS/cm 以下の値を示した。

電解濃縮処理後の試料水中に残っている不純物ならびに濃縮装置から溶出するイオン<sup>23)</sup>による液体シンチレーション計数測定への影響を防ぐため、電解濃縮後、薬品を添加せずに再び常圧蒸留して不純物の除去を行った。

#### 3.3.2 電解濃縮処理

近年の環境水中におけるトリチウム濃度は、液シンの検出限界の観点から前処理として試料水の電気分解によりトリチウム濃度を濃縮する電解濃縮処理が必須である。本研究では、市販のトリチウム電解濃縮装置 (Tripure XZ027, Permelec Electrode) を用い、初期水量  $V_i=1,000$  g から最終水量  $V_f=50$  g、体積減容倍率 20 倍の条件で電解濃縮処理を行った。この電解濃縮装置は最大電流 50 A という大電流での電解濃縮が可能であり、最終水量は水位センサーで水位を感知し自動的に装置を停止させる。電流値 50 A の電解では、水素ガスと酸素ガスの発生量が多く試料水位が上下し、変動が激しくなるため水位センサーによる自動停止位置に誤差が生じる。又、試料水量が少なくなるため、試料水温度が上昇する。そのため、ある程度電解が進行したら電解電流を低下させる必要がある。本研究では、初期水量 1,000 g から 150 g までを電流値 50 A で、150 g から最終水量 50 g までを電流値 20 A に設定し電解を行った。

#### 3.3.3 トリチウム濃度測定

電解濃縮により試料水中ではトリチウムと共に重水素が濃縮される。この関係は (3) 式として定義される。(3) 式から装置定数  $k$  を求め (4) 式に適用することで環境試料水の電解前トリチウム濃度を算出することができる<sup>24)</sup>。

$$k = \ln(T_f/T_i) / \ln(D_f/D_i) \dots\dots\dots (3)$$

$$T_i = T_f / (D_f/D_i)^k \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $T_i$ : 電解前トリチウム濃度 [Bq/L],  $D_i$ : 電解前重水素濃度 [%],  $T_f$ : 電解後トリチウム濃度 [Bq/L],  $D_f$ : 電解後重水素濃度 [%] である。

## 4. 結果と考察

### 4.1 植物試料の窒素安定同位体比

Table 3 に採取したよもぎの  $\delta^{15}\text{N}$  値を示す。“—”は

Table 3 採取したよもぎの  $\delta^{15}\text{N}$  値

試料採取地点	2005年				2006年			2007年	
	5月	6月	9月	10月	5月	9月	11月	5月	7月
① 現場	7.29	3.23	8.88	4.69	3.15	2.15	1.20	3.75	-0.20
② 現場付近池	-	-	-	-	3.20	-0.18	-0.13	1.91	1.15
③ 水処理施設付近	-	-	-	5.82	4.80	2.80	6.51	5.09	3.23
④ 旧水源	-	2.29	-1.07	-1.55	5.75	3.05	2.01	3.38	5.51
⑤ 新水源	-	-	-	-	-0.26	-0.87	0.30	-1.27	-0.39
⑥ 杉倉川橋付近	-	-	-1.26	-	-0.70	-0.02	1.51	-0.82	-2.78
⑦ 平成橋（熊原川）付近	4.06	-0.57	-0.80	3.23	0.40	2.35	1.10	0.70	0.83

単位 (%)

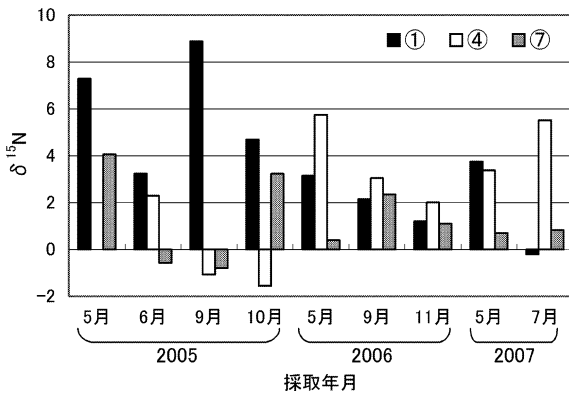


Fig. 2 採取したよもぎの  $\delta^{15}\text{N}$  の経時変化

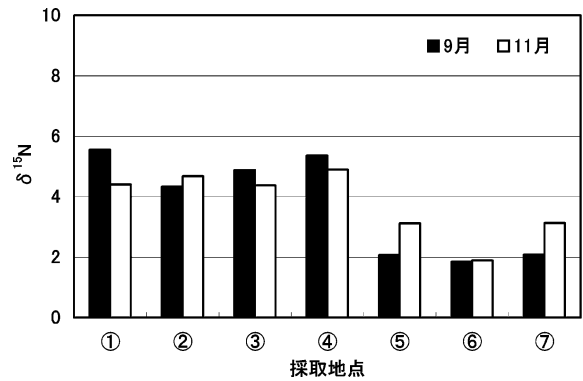


Fig. 3 採取した土壌の  $\delta^{15}\text{N}$

Table 4 採取した土壌の  $\delta^{15}\text{N}$  値

試料採取地点	2006年	
	9月	11月
① 現場	5.55	4.40
② 現場付近池	4.33	4.68
③ 水処理施設付近	4.88	4.37
④ 旧水源	5.36	4.90
⑤ 新水源	2.07	3.12
⑥ 杉倉川橋付近	1.84	1.90
⑦ 平成橋（熊原川）付近	2.09	3.13

単位 (%)

試料を採取していないことを示す。Table 3 のデータのうち、① 不法投棄現場、④ 旧水源、⑦ 平成橋付近で採取した試料の  $\delta^{15}\text{N}$  値の経時変化を Fig. 2 に示した。この図から平成橋付近のよもぎの  $\delta^{15}\text{N}$  値は大気中窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  値すなわち、0% 前後の値を示しているのに対し、現場に生育しているよもぎの  $\delta^{15}\text{N}$  値は減少傾向にあり、又、旧水源付近に生育しているよもぎの  $\delta^{15}\text{N}$  値はやや高くなってきているように見受けられるので継続した観察が必要である。

#### 4.2 土壌試料の窒素安定同位体比

Table 4 及び Fig. 3 に 2006 年 9 月と 11 月に植物試料

を採取した地点の土壌の  $\delta^{15}\text{N}$  値を示す。現場、現場近くのため池の傍、水処理施設付近、旧水源付近では 4% ~ 5% 程度、新水源、杉倉川橋付近、平成橋付近では 2% ~ 3% 程度の値を示した。土壌の  $\delta^{15}\text{N}$  値は植物試料の  $\delta^{15}\text{N}$  値と比較して変動が少ないように見られる。また、これらの値はよもぎの  $\delta^{15}\text{N}$  値と比較してやや高い値を示している。この傾向は植物の根から窒素成分が吸収される際に窒素 14 の方が窒素 15 よりも吸収されやすいという同位体分別によると考えられる。しかし、土壌の  $\delta^{15}\text{N}$  値が植物の  $\delta^{15}\text{N}$  値の変動とどのように関連しているかについては測定回数が少ないので明確ではなく、さらに測定を進める必要がある。

#### 4.3 土壌水の水素安定同位体比

Table 5 にボーリング採取した土コア試料から得た土壌水の  $\delta\text{D}$  値を示す。8 m より深い部分の試料は採掘に外部から水を投入したため測定から除外した。 $\delta\text{D}$  として -46.2‰ ~ -60.8‰ の範囲の値を得た。Fig. 4 にボーリング採取した土コア試料から得た土壌水の  $\delta\text{D}$  の鉛直プロファイルを示す。以前、八戸地域で採取した降水の  $\delta\text{D}$  を測定しているが、それらの単純平均値は -53.8‰ であった<sup>10)</sup>。深さ 1 m 以内の土壌水の  $\delta\text{D}$  値がこの値より大きいのは表層土壌中の水分蒸発の際の同位体分別によると推定される。深さ 1 ~ 3 m の土壌水の  $\delta\text{D}$  値は降

Table 5 ボーリング採取した土コア試料から得た土壌水の  $\delta D$

深さ (m)	$\delta D$ (‰)	深さ (m)	$\delta D$ (‰)
0-0.33	-48.8	4.00-4.33	-60.2
0.33-0.66	-47.5	4.33-4.66	-59.4
0.66-1.00	-46.2	4.66-4.00	-59.6
1.00-1.33	-54.7	5.00-5.33	-60.8
1.33-1.66	-55.7	5.33-5.66	-60.8
1.66-2.00	-54.5	5.66-6.00	-57.9
2.00-2.33	-54.3	6.00-6.33	-58.1
2.33-2.66	-54.5	6.33-6.66	-59.1
2.66-3.00	-54.0	6.66-7.00	-59.2
3.00-3.33	-56.4	7.00-7.33	-58.4
3.33-3.66	-55.7	7.33-7.66	-57.3
3.66-4.00	-56.9	7.66-8.00	-

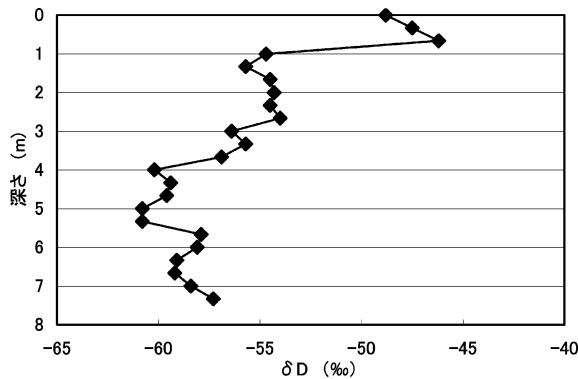


Fig. 4 ボーリング採取した土コア試料から得た土壌水の  $\delta D$  鉛直プロファイル

水の平均値に近く、深さが 4 m 以下では  $\delta D$  値が低下している。

今回の測定では年周期の指標となる  $\delta D$  値の明瞭なピークが観察されなかったのは、採掘の仕方と土コアの区分が 30 cm と長かったためではないかと考えている。今後、試料採掘の方法を改良し、土壌コア間隔を短くして測定データを増やすことによってクリアな測定結果が得られるものと思われる。

#### 4.4 水系水試料のトリチウム濃度

Table 6 に産廃不法投棄現場周辺の水系水試料のトリチウム濃度を示す。表中の 1 回目, 2 回目とは測定の再現性を確認するため、同一採取試料水から 2 度ずつ蒸留, 電解濃縮の前処理を行い、測定バイアルを 2 本作成し、測定を行ったことを示す。1 回目と 2 回目試料間のトリチウム濃度の差異は少なく再現性が確認された。これらの平均値を Fig. 5 のように数直線上に示すと、旧水源付近の試料水のトリチウム濃度が他の 4 試料水と比較して約 0.1 Bq/L かそれ以上大きい値を示している。一般に環境水中のトリチウム濃度の違いは降水と地下水の混じり具合, 集水域の違いを反映していると言われている<sup>16)</sup>。したがって、旧水源付近の水系は新水源及び杉倉川、熊原川の河川水とは違った水が混合していると考えられる。

### 5. まとめ

青森・岩手県境産廃不法投棄現場周辺で採取した植物試料、土壌及び水系水試料の同位体分析を行い、以下の

Table 6 採取した水系試料のトリチウム濃度

試料採取地点	トリチウム濃度 (Bq/L)		
	1 回目	2 回目	平均
② 現場付近池	0.807 ± 0.071	0.771 ± 0.068	0.788 ± 0.049
④ 旧水源	0.940 ± 0.081	0.905 ± 0.078	0.922 ± 0.056
⑤ 新水源	0.809 ± 0.070	0.838 ± 0.072	0.823 ± 0.050
⑥ 杉倉川橋付近	0.771 ± 0.067	0.815 ± 0.071	0.792 ± 0.049
⑦ 平成橋 (熊原川) 付近	0.744 ± 0.066	0.708 ± 0.063	0.725 ± 0.046

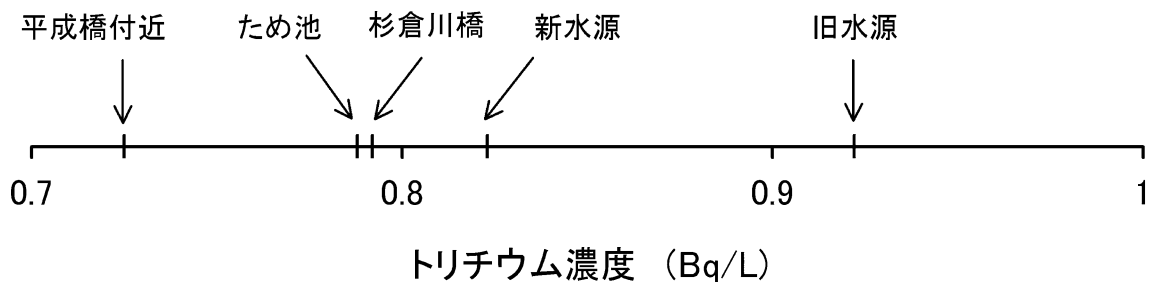


Fig. 5 採取した水系試料のトリチウム濃度

結果を得た。

- (1) よもぎの窒素安定同位体比の値は経時的に、現場内では低下しつつあるが、水処理施設付近、及び旧水源付近ではやや高くなる傾向が見られた。
- (2) 植物試料の窒素安定同位体比は土壌の窒素安定同位体比よりもやや高い値をとることを確認した。
- (3) ボーリンク土コア試料中の土壌水の水素安定同位体比の鉛直プロファイルを測定した。
- (4) 現場周辺水系のトリチウム濃度を測定し、旧水源付近で採取した水試料のトリチウム濃度が他の4試料水と比較して0.1 Bq/Lかそれ以上高く、水系の性状が異なることを確認した。
- (5) 上記(1)と(4)の結果から、旧水源付近は他の現場周辺と異なり、産廃からの滲出水の影響が懸念されるので、この場所でモニタリングの継続が必要である。

**謝辞：**本研究は私立大学学術研究高度化推進事業（ハイテク・リサーチ・センター整備事業）の補助を受けて行われました。又、試料採取の際に協力して頂いた青森県環境生活部県境再生対策室の方々に感謝致します。

## 文 献

- 1) 八戸工業大学循環型社会技術システム研究センター：「青森・岩手県境不法投棄廃棄物の低環境影響処理技術に関する研究開発」, 平成15年度選定私立大学学術研究高度化推進事業, ハイテク・リサーチ・センター整備事業, 中間報告書 (2006)
- 2) 酒井 均, 松久幸敬: 安定同位体地球化学, p. 5, 東京大学出版会 (1996)
- 3) K. Lajtha and R.H. Michner: Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science, Blackwell Scientific Publications, London (1994)
- 4) E. Wada, T. Yoneyama, M. Minagawa, T. Ando and B.D. Fry: Stable Isotopes in the Biosphere, Kyoto University Press Japan (1995)
- 5) J. Hoefs: Stable Isotope Geochemistry, 5<sup>th</sup>, Revised and Updated Edition, Springer-Verlag Berlin (2004)
- 6) J. ヘフス著, 和田秀樹, 服部陽子訳: 同位体地球化学の基礎, シュプリンガー・ジャパン (2007)
- 7) 長谷川周一, 波多野隆介, 岡崎正規編, 日本土壌肥科学会監修: 環境負荷を予測する—モニタリングからモデリングへ—, 博友社 (2002)
- 8) TORAY TECHNO 技術資料 No. 0402
- 9) 藪崎志穂, 田瀬則雄, 辻村真貴: 同位体科学, No. 2, pp. 41-44 (2006)
- 10) H. Sato, T. Muranaka, N. Shima and S. Takahashi: RADIOISOTOPES, Vol. 54, pp. 229-232 (2005)
- 11) 馬淵久夫, 富永 健: 考古学と化学をむすぶ, 第3章 考古学における<sup>14</sup>C年代測定, 東京大学出版会, pp. 55-82 (2000)
- 12) 中村俊夫, 福澤仁之編: 高精度年代決定法とその応用—第四紀を中心として—, 海洋出版株式会社, pp. 1-49 (1999)
- 13) 高島良正編: 環境トリチウムの変動測定とその解析, 昭和63年度文部省科学研究費報告書 (1989)
- 14) 高島良正編: 生物を含む環境トリチウムの変動解析, 平成元年度文部省科学研究費補助金報告書 (1990)
- 15) 日本地下水学会編: 21世紀の地下水管理, 雨水浸透・地下水涵養, 理工図書, pp. 69-73 (2001)
- 16) 榎根 勇: 地下水の世界, NHK ブックス, pp. 120-125 (1997)
- 17) 村中 健, 本田和也: 八戸工業大学紀要第16巻, pp. 169-175 (1997)
- 18) N. Shima and T. Muranaka: Proceedings of the International Symposium on Environmental Modeling and Radioecology, Rokkasho, Japan, pp. 247-250 (2006)
- 19) 島 長義, 村中 健: RADIOISOTOPES, Vol. 56, pp. 455-461 (2007)
- 20) <http://map.yahoo.co.jp>: Yahoo 地図情報 (一部改変)
- 21) 村中 健, 大嶋倫和, 小比類巻孝幸, 鮎川恵理: BUNSEWKI KAGAKU, Vol. 56, pp. 1177-1181 (2007)
- 22) 文部科学省: トリチウム分析法, pp. 4-5, (財)日本分析センター (2002)
- 23) 小金澤孝之他: RADIOISOTOPES, Vol. 53, pp. 277-285 (2004)
- 24) 垣内正久: RADIOISOTOPES, Vol. 48, pp. 79-86 (1999)