

中国、ミャンマーと日本の飲用水中元素濃度

猶原 順・翟 小葉

岡山理科大学工学部生命医療工学科

(2019年10月30日受付、2019年12月9日受理)

1. 緒言

近年、各種疾患とミネラル類、特に微量元素との因果関係が注目されるようになってきた¹⁾。ヒトの健康は必須元素の欠乏や有害微量元素の暴露により、左右されることが知られている。必須元素は、欠乏すれば欠乏症を呈するが、過剰に存在しても生体に悪影響を与える。これに対し生体に必須でないものは非必須元素と呼ばれ、生体における存在量がわずかであれば作用を示さない。このうち、過剰生体に有害な作用を与える元素は有害元素と呼ばれている²⁾。ヒトの体の有害元素 (As、Pb、Cd、Mn、Zn など) は、そのほとんどが食事及び飲用水由来である。

中国はこの10数年ほどで飛躍的な経済発展を遂げた。しかし、急速に発展している一方、環境問題も深刻化している。地域格差や食品の安全のみならず、人が生きていくために絶対必要な水の安全にまで影響を及ぼしている。中国では水道水は一般的に直接飲用されず、主に洗濯、食材や食器の洗浄、炊事等に使用されている。ペットボトルやガロン瓶入りの飲用水が市販されており、脱ミネラルした水が一般的である。

東南アジアや南アジアの一部地域では環境水中のAs濃度が高い地域が知られている。Asは、自然環境中では硫黄含有鉱物である硫ヒ鉄鉱や黄鉄鉱中に最も一般的に含まれ、これが発生源となることが多い。地表面のAsの大部分は、鉱物の風化作用を経て土壌や水中に供給される。また、地表水への供給は、温泉などの自然現象の他、人為的な地下水の汲み上げ等が大きな原因となる。一般的には、地表水や海水中でのAsの含有量は少なく、0.00x mg/L程度に存在するのみである³⁾。しかし、自然由来の地下水As汚染はバングラデッシュからインドにまたがるベンガル低地など東南アジアや南アジア地域で深刻である⁴⁻¹³⁾。Asを含んだ地下水の長期の飲用は、皮膚がんやはい、膀胱、腎臓などの発がんリスクを高めることが知られている¹⁴⁾。

本実験では、新興国、発展途上国、先進国の代表として中国、ミャンマー、日本で飲用されている飲用水をICP-MSで測定し、その中の元素濃度を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

2・1 試料の採取

中国の水道水は、上海市、山東省 (済南市、青島市、東営市、青州市、煙台市、蓬萊市)、四川省 (成都市) で採取した。ミャンマーの試料は、ヤンゴン管区の地下水 (井戸水) を採取後、一定量の硝酸を添加し保存した。日本の試料は、岡山理科大学の水道水を採取した (図1)。採取した試料のうち、水道水はろ過せず、河川水、湖沼水、井戸水はろ過を行った。

表1に採取した水試料の国、地域と水の種類を示した。中国ではホテル、レストラン、空港、病院など水道水を採取した。ミャンマーでは、全て井戸水を採取した。日本では、水道水を採取した。



図1 試料採集地点

表1 試料採取地点の状況と試料水の種類

採取地点			水の種類
中国	上海市	上海貴都	ホテル1（水道水）
		貴都飯店	ホテル2（水道水）
		貴都飯店	ホテル3（水道水）
		街角	レストラン1（水道水）
		高さん宅	レストラン2（水道水）
	山東省	済南市	済南龍都国際大酒店
			済南麗天大酒店
		青島市	青島市中国海洋大学-嶗山校区
			青島市一居匠館-青島市香港東路83-1
			青島市南京飯店-青島市市南区南京路39
			青島市流亭国際空港
		東営市	東営市大海匠館
			東営市広利川
			東営市漁港水
		青州市	常さん宅
			將軍山庄
			康宝山泉-青州市
		煙台市	ホテル
		蓬萊市	ホテル
	四川省	成都市	大妙
			皇城現小吃-武侯祠大街259
			大病院
			小病院
			ホテル
			パンダ保護センター
ミャンマー	ヤンゴン地域	村長井戸	井戸水1
	ザローン村	村長向い井戸	井戸水2
		村長隣り井戸	井戸水3
		入口井戸	井戸水4
		深井戸	井戸水5
		小学校井戸	井戸水6
		病院井戸	井戸水7
		病院隣り井戸	井戸水8
		病院向い井戸	井戸水9
日本	岡山	岡山理科大学B1号館	水道水

2・2 前処理

飲用水は、0.45 μ m ポアサイズのディスミック（DISMIC、ADVANTEC 以下 DISMIC）を用いてろ過し、1mL をピペットで取り、マイクロテフロン容器に入れ、正確に有害金属測定用硝酸（SIGMA-ALDRICH）6mL を添加し、密閉した。各試料はマイクロウェーブ試料分解装置（Multiwave3000:Anton Paar 製）にセットし、30 分間分解した。分解条件を以下に示した。

分解条件

- ・最高出力：600W
- ・最高温度：150℃
- ・最高気圧：10bar
- ・昇温時間：10 分
- ・分解時間：20 分
- ・冷却時間：20 分

分解した試料をテフロン製分解容器からビーカーに移し、あらかじめ milli-Q Labo（MILLIPORE 以下 milli-Q 水）で洗浄したシリンジと 0.45 μ m の DISMIC を使い、メスフラスコへろ過をした。この時、容器中の成分をなるべく残さ

ないようにするためテフロン製分解容器の中とビーカーの中を milli-Q 水で 2、3 回洗浄し、繰り返し作業を行った。ろ液は 100ml メスアップを milli-Q 水を用いてメスアップし、洗浄された容器に移変えた。その後、冷蔵庫（4℃）で保管した。

2・3 測定

前処理を行った試料溶液は、ICP-MS により以下の条件で元素分析をした。測定した元素は、Li、Be、Na、Mg、Al、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、As、Se、Rb、Sr、Ag、Cd、In、Cs、Ba、Hg、Tl、Pb、Bi、Th、U の 31 元素である。

ICP-MS の条件

- ・プラズマガス流量：18.0L/min Ar
- ・補助流量：1.8L/min Ar
- ・ネブライザーガス流量：1.0L/min Ar
- ・サンプリング位置：6.5mm
- ・パワー：1.4kW
- ・ポンプ回転数：3rps
- ・繰り返し回数：5 回

この実験に使用した水は全て、Milli-Q 水でろ過・精製した水を用いた。器具は全て 4%の硝酸に一日以上浸漬した後、水道水、蒸留水、Milli-Q 水の順に洗浄し、乾燥したものを用いた。

3. 実験結果及び考察

3・1 標準試料 SRM1643e（河川水）による ICP-MS の正確度

表 2 に ICP-MS による標準試料 SRM1643e（河川水）の各元素の測定濃度とその回収率を示した。測定濃度と SRM1643e の保証値の差が 5%以内の元素を濃い青色に、10%以内の元素を薄い青色とした。ほとんどの元素で測定濃度と SRM1643e の保証値の差が 10%以内であり、Al、Cr、Na、V ではほぼ 100%の回収率であった。必須元素の Ca や Fe はやや回収率にばらつきが見られ、それぞれ、89.8%、116.6%であったが、大きな差ではなかった。最も回収率が低かった元素は Te の 62.4%であったが、なぜこの様に低い回収率となったかは不明である。

3・2 中国の飲用水

表 3 に中国の上海市、山東省、四川省と岡山市の飲用水の Al、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Cd、Pb 濃度の平均値を示した。上海市、山東省と岡山市を比較すると、Pb では僅かに岡山市の水道水で高い値を示したが、Al、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Cd 濃度は上海市と山東省で高い値を示した。四川省と岡山市を比較すると、Cu、Pb では岡山市の水道水で高い値を示したが、Al、Fe、Zn、As 濃度は四川省で高い値を示した。しかし、いずれも日本と中国の水道水の水質基準値を超える元素はなかった。Al は、中国の四川省の 66.3μg/l とほかの地域より 3 倍以上程度高い値であった。Mn は、中国の上海市の 37.4μg/l と山東省、四川省、岡山市比べると、それぞれ 10 倍、90 倍、108 倍非常に高い濃度であった。上海の Mn 濃度が高かった理由は、取水にいる河川（黄浦江）が大都市の上海市の中心にあり、周辺に人口が集中にしていることと、工場からの排水があることで高くなったと考えられる。Fe は、中国の上海市の 153μg/l と山東省、四川省、岡山市比べると、それぞれ 1.6 倍、2.0 倍、4.3 倍高い濃度であった。Fe には水道の障害として、給水管の老朽化による赤水、異臭味、錆コブによる通水不良がある。また、Fe は生体の必須元素で、欠乏すると貧血症状が現れる。人に対する毒性はほとんど無いが、水が着色（赤水）したり、異臭味を与える。Cu は、中国の上海市の 80.6μg/l と山東省、四川省、岡山市比べると、それぞれ 5.8 倍、47 倍、24 倍非常に高い濃度であった。Zn は、中国の上海市の 155μg/l と山東省、四川省、岡山市比べると、それぞれ 1.5 倍、10 倍、25 倍非常に高い濃度であった。Cd と Pb はほとんどの地点で基準値の 10 分の 1 と下回る。図 2 に中国の水道水中の As 濃度を、図 3 に Mn 濃度を、図 4 に U 濃度を示した。日本の水道水中 As 及びその化合物の水質基準値は 10μg/l 以下と定められている。今回測定した採取地点の水道水中の As 濃度は東営市の 2 試料でこの値を超えていた。それ以外の地域では基準値を超えることはなかった。東営市は土地資源が豊富で勝利油田などの石油やそのほかにも天然ガス、地熱が豊かである。そのため工場設立に最適で工場排水が大きく関係していると考えられる。As は比較的土壌由来の場合が多いが、人為的な汚染も考えられる。日本の

水道水中の Mn と U とその化合物の水質基準値は、それぞれ 50 $\mu\text{g/l}$ 、2 $\mu\text{g/l}$ 以下と定められている。Mn と U の濃度は、それぞれ 4 試料、6 試料で、この値を超えていた。上海の 4 地点で Mn の値が日本の水道水の水質基準値より高いことから、工場排水による汚染が考えられる。上海市の水道水はいずれも着色していた。Mn は水が黒色となる原因である。上海ではかなりの地点で日本の水道水の水質管理目標設定値よりも上回っていることより、黄浦江の水や、この河川水を上水道の原水としている上海市内の水道水は Mn 濃度が高く、日本の水と比較して色が黒っぽいということが考えられる。U はごく微量だが、岩石や海水中にも分布する。そのため第一級港を有する東営市は海水の影響や、やはり工場排水の影響でウランが基準値以上検出されたと考えられる。済南市は石炭・鉄・カリウム・石灰石・花崗岩などの地下資源が豊富であるため、岩石（主に花崗岩）に含まれるウランの影響を強く受けていると考えられる。基準値を超えた地域周辺は鉱山や油田が多いことより As や U の濃度が高くなったと考えられる。

また、彭雪梅ら¹⁵⁾は中国山西省の大同市の水道水を分析している。Al、As、Hg の濃度はそれぞれ 395 $\mu\text{g/l}$ 、104 $\mu\text{g/l}$ 、14.2 $\mu\text{g/l}$ であり、中国の基準値(Al: 200 $\mu\text{g/l}$ 、As: 10 $\mu\text{g/l}$ 、Hg: 1 $\mu\text{g/l}$)を超えると指摘した。大同市の水道水の Hg の濃度はほかの地域を比べると十倍以上、Al と As は百倍以上非常に高い値を示した。それは、大同市が土地資源が豊富で石炭やグラファイトなど豊かであって、自然由来と考えられる。しかし、大同市は石炭、電力エネルギーとして工業都市で、都市建設一方、環境問題も深刻化していて、人為的な汚染も考えられる。

表2 標準試料SRM1643e（河川水）によるICP-MSの正確度（回収率）

元素	保証値 ($\mu\text{g/l}$)	測定値 ($\mu\text{g/l}$)	回収率 (%)
Al	141.8 \pm 8.6	142.9	100.8
Ag	1.062 \pm 0.075	0.935	88.0
As	60.45 \pm 0.72	55.04	91.1
B	157.9 \pm 3.9	147.4	93.4
Ba	544.2 \pm 5.8	514.8	94.6
Be	13.98 \pm 0.17	13.22	94.6
Bi	14.09 \pm 0.15	13.25	94.0
Ca	32300 \pm 1100	29014	89.8
Cd	6.568 \pm 0.073	6.31	96.1
Co	27.06 \pm 0.32	26.58	98.2
Cr	20.4 \pm 0.24	20.4	100.0
Cu	22.76 \pm 0.31	21.75	95.6
Fe	98.1 \pm 1.4	114.4	116.6
K	2034 \pm 29	2231	109.7
Li	17.4 \pm 1.7	19.3	110.9
Mg	8037 \pm 98	9111	113.4
Mn	38.97 \pm 0.45	38.07	97.7
Mo	121.4 \pm 1.3	115.2	94.9
Na	20740 \pm 260	20935	100.9
Ni	62.41 \pm 0.69	61.25	98.1
Pb	19.63 \pm 0.21	18.77	95.6
Rb	14.14 \pm 0.18	13.85	97.9
Sb	58.3 \pm 0.61	76.74	131.6
Se	11.97 \pm 0.14	11.23	93.8
Sr	323.1 \pm 3.6	312.2	96.6
Te	1.09 \pm 0.11	0.68	62.4
Ti	7.445 \pm 0.096	7.260	97.5
V	37.86 \pm 0.59	38.39	101.4
Zn	78.5 \pm 2.2	90.4	115.2

表3 上海市、山東省、四川省と岡山市の飲用水の有害元素濃度 ($\mu\text{g/l}$)

	Al	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Cd	Pb
上海市	21.5	37.4	153	80.6	155	1.4	0.058	0.235
山東省	20.2	3.84	94.8	13.8	101	1.68	0.058	0.068
四川省	66.3	0.417	75	1.7	15	0.633	0.014	0.021
岡山市	17.4	0.346	35.9	3.29	6.19	0.346	0.014	0.302
基準 ¹⁾	200	50	300	1000	1000	10	10	10
基準 ²⁾	200	100	300	1000	1000	10	5	10

基準¹⁾：日本の水道水の水質基準値

基準²⁾：中国の水道水の水質基準値

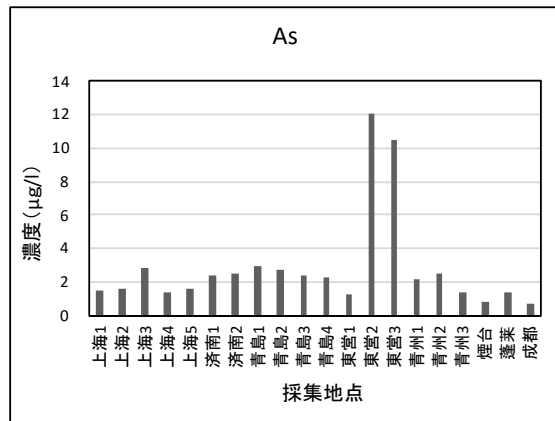


図2 水道水中のAs濃度

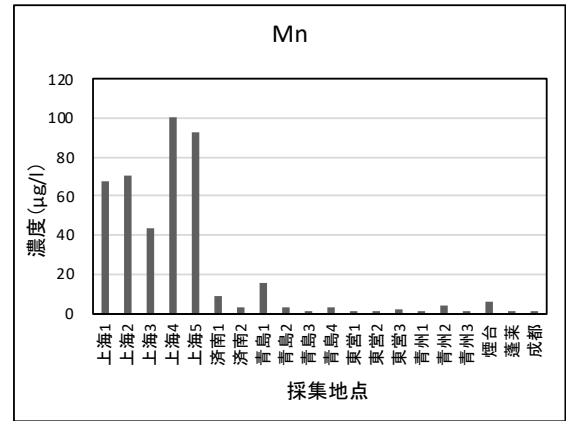


図3 水道水中のMn濃度

3・3 ミャンマーの飲用水

表4にミャンマーと岡山市の飲用水のAl、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Cd、Pb濃度の平均値を示した。ミャンマーと岡山市を比較すると、ミャンマーの飲用水Al、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Cd、Pb濃度の平均値はすべて岡山より高い値を示した。その中、Al、Mn、Fe、As濃度の平均値は日本の水道水の水質基準値を超えていて、岡山の平均値よりそれぞれ14倍、298倍、53倍、51倍と非常に高い濃度であった。

図5にミャンマーの井戸水中のAs濃度を示した。浅井戸①②③の浮遊物質(SS)を含む全量の試料ではSSを含まないろ過試料よりAs濃度は高い値を示した。このことは、この地下水中にはSSを多く含み、SS中にAsが存在していたことを示している。浅井戸④⑤⑥と深井戸①②のSSを含む全量の試料ではSSを含まないろ過試料よりAs濃度は、大きな差は認められなかった。これは地下水中にSSをほとんど含んでいないか、SSが存在していて、SS中のAs含有量が少ないことを示している。浅井戸からの地下水と深井戸からの地下水を比較すると浅井戸からの地下水中のAs濃度は高く、深井戸からの地下水中のAs濃度は低い値を示した。ミャンマーの井戸水は最大で50.7 μg/lと高く、日本の水道水の水質基準値(10 μg/l)を超えていた。ミャンマーヤンゴン地域では

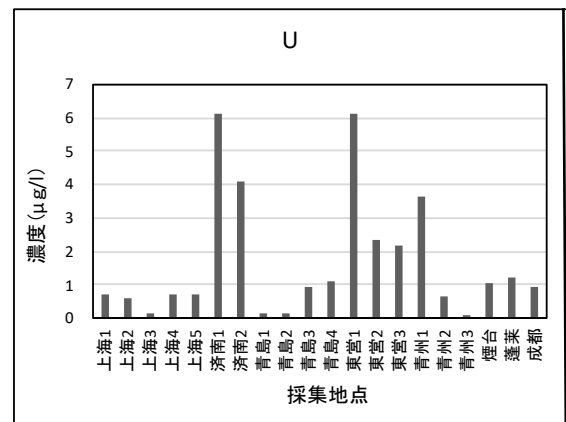


図4 水道水中のU濃度

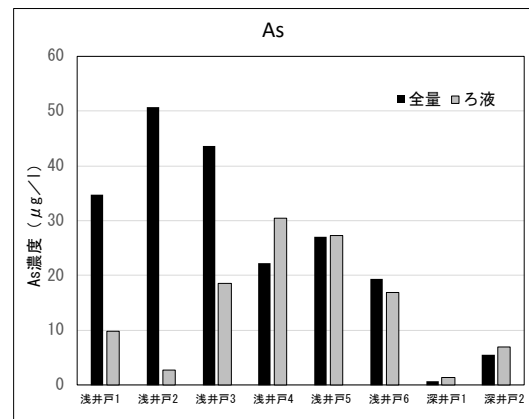


図5 ミャンマーの井戸水中のAs濃度 (μg/l)

表4 ミャンマーと岡山市の飲用水の有害元素濃度(μg/l)

	Al	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Cd	Pb
ミャンマー	246	103	1919	4	50.6	17.8	0.209	0.46
岡山市	17.4	0.346	35.9	3.29	6.19	0.346	0.014	0.302
基準*	200	50	300	1000	1000	10	10	10

基準*: 日本の水道水の水質基準値

地表に近い浅井戸からの地下水は、深井戸よりも入り As に汚染されていた。ミャンマーの地下水中の Mn 濃度は高く 61.5µg/l であり、日本の水道水の水質基準値(50 µg/l) を超えていた。

地下水の As の挙動と地下水汚染については、吉村ら¹⁶⁾が総説しており、河川上流部の沖積層中の As を含む岩石が風化、侵食され、運搬後下流に堆積することで、地下水に溶出される^{13,17,18)}。特に今回実験結果でも示したように、浅井戸でその濃度が高くなったと考えられる。

4. まとめ

中国（上海市、山東省、四川省）の水道水、ミャンマー（ヤンゴン地域）の井戸水及び日本（岡山市）の水道水を採取し、ICP-MS で水中の元素濃度を測定した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. ICP-MS による標準試料 SRM1643e（河川水）の各元素の測定濃度とその回収率を求めた。ほとんどの元素で測定濃度と SRM1643e の保証値の差が 10%以内であり、Al、Cr、Na、V ではほぼ 100%の回収率であった。必須元素の Ca や Fe はやや回収率にばらつきが見られ、それぞれ、89.8%、116.6%であったが、大きな差ではなかった。最も回収率が低かった元素は Te の 62.4%であった。
2. 上海市、山東省と岡山市を比較すると、Pb では僅かに岡山市の水道水で高い値を示したが、Al、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Cd 濃度は上海市と山東省で高い値を示した。四川省と岡山市を比較すると、Cu、Pb では岡山市の水道水で高い値を示したが、Al、Fe、Zn、As 濃度は四川省で高い値を示した。しかし、いずれも日本と中国の水道水の平均値は、日本の水質基準値を超える元素はなかった。
3. 中国水道水中元素のうち、As は東営市で、Mn は上海市で、U は東営市で日本の水質基準値を超えていた。
4. ミャンマーの飲用水 Al、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Cd、Pb 濃度の平均値はすべて岡山より高い値を示した。その中、Al、Mn、Fe、As 濃度の平均値は日本の水道水の水質基準値を超えていた。浅井戸からの地下水と深井戸からの地下水を比較すると浅井戸からの地下水中の As 濃度は高く、深井戸からの地下水中の As 濃度は低い値を示した。

参考文献

- 1) 木村 美恵子、微量元素と健康、生活衛生、**43**、1、7-14、1999
- 2) 篠原 厚子・千葉 百子、微量元素の健康への影響、応用物理、**70**、7、823-826、2001
- 3) 安藤 正典、インド・バングラディッシュにおける地下水ヒ素汚染と健康影響、*J. Natl. Inst. Public Health*、**49**、3、266-274、2000
- 4) 藤縄 克之・青木 陽士・伊庭 崇博・守屋 やす子・宮沢 清治・荻上 宏、自然由来のヒ素による地下水汚染に関するフィールド研究、土木学会論文集 G、**63**、4、241-254、2007
- 5) 吉村尚久、“ヒ素汚染”の特別号に寄せて、地学教育と科学運動、特別号、1、1997
- 6) 工藤周一、寺崎紘一、バングラデシュ地下水ヒ素汚染問題の解明をめざして-シャムタ村ヒ素汚染調査報告-、地学教育と科学運動、特別号、25-34、1997
- 7) 柴崎達雄、広域地下水汚染の諸問題-農地の塩害からヒ素地下水汚染まで-、地学教育と科学運動、特別号、70-73、1997
- 8) 応用地質研究会ヒ素汚染研究グループ、地下水ヒ素汚染問題への今後の取り組み、地学教育と科学運動、特別号、116-119、1997
- 9) 新潟大学地下水ヒ素汚染研究グループ、地下水ヒ素汚染の起源物質を含むバングラデシュシャムタ村ボーリング試料の構成鉱物とその特徴、地球科学、**54**、94-104、2000
- 10) 山村尊房、飲料水のヒ素問題に関する世界的関心と WHO の対応、地下水学会誌、**42**、4、315-328、2000

- 11) 村瀬 誠、バングラデシュの飲み水の危機を救う持続可能な天水活用の推進、水利科学、**344**、36-52、2015
- 12) Chakroborti, D., A. Hussein and M. Alauddin, Foreword., *J. Environ. Sci. Health*, **A38**, 1, 11-15, 2003
- 13) 黒澤 靖 他、ベトナム・ハノイ周辺農村の地表水及び地下水におけるヒ素発生とその関連要因、熱帯農業、**49**、1、98-106、2005
- 14) 島田允堯、ヒ素に汚染された地下水の起源と問題点、資源地質、53、2、161-172、2003
- 15) 彭 雪梅・劉 永文・富 中華・田 海嬌、大同市自来水矿质元素分析（大同市水道水ミネラル元素分析）、山西大同大学学报（自然科学版）、3・2、5、2011
- 16) 吉村尚久、赤井純治、土壌および堆積物中のヒ素の挙動と地下水汚染、地球科学、3・2、137-154、2003
- 17) Acharyya, S. K., S. Lahiri, B. C. Raymahashay and A. Bhowmik, Arsenic toxicity of groundwater in parts of the Bengal basin in India and Bangladesh : the role of Quaternary stratigraphy and Holocene sea-level fluctuation., *Environ. Geol.*, **39**, 1127-1137, 2000
- 18) Campos, V., Arsenic in groundwater affected by phosphate fertilizers at Sao Paulo, Brazil., *Environ. Geol.*, **41**, 83-1137, 2002

CONCENTRATION OF ELEMENTS IN DRINKING WATER IN CHINA, MYANMAR AND JAPAN

Jun NAOHARA and Xiaoye ZHUO

*Department of Biomedical Engineering, Faculty of Engineering,
Okayama University of Science,
1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan*

(Received October 30, 2019; accepted December 9, 2019)

Tap water from China (Shanghai City, Shandong Province, Sichuan Province), well water from Myanmar (Yangon area) and tap water from Japan (Okayama) were collected, and the elemental concentrations in the water were measured by ICP-MS. As a result, the following became clear.

1. The concentration of each element in the standard sample SRM1643e (river water) by ICP-MS was measured, and the recovery rate was determined. For most elements, the difference between the measured concentration and the guaranteed value of SRM1643e was within 10%, and Al, Cr, Na, and V had almost 100% recovery. The essential elements of Ca and Fe showed slight variations in the recovery rates, which were 89.8% and 116.6%, respectively. The element with the lowest recovery was Te (62.4%) .
2. Comparing Shanghai City, Shandong Province and Okayama City, Pb showed slightly higher values in tap water in Okayama City. Al, Mn, Fe, Cu, Zn, As and Cd concentrations were higher in Shanghai City and Shandong Province than in Okayama City. When comparing Sichuan Province and Okayama City, Cu and Pb showed high values in tap water in Okayama City, but concentrations of Al, Fe, Zn, and As were high in Sichuan Province. However, in both cases, the average value of tap water in Japan and China did not exceed Japanese water quality standards.
3. Among the elements in China's tap water, the elements that exceeded Japanese water quality standards were As (Dongying City), Mn (Shanghai City), and U (Dongying City).
4. The average values of Al, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Cd, and Pb concentrations of drinking water in Myanmar were all higher than Okayama City. Among these elements, the average values of Al, Mn, Fe, and As concentrations exceeded the water quality standards for Japanese tap water. Comparing the groundwater from the shallow well with the groundwater from the deep well, the As concentration in the groundwater from the shallow well was high and the As concentration in the groundwater from the deep well was low.

Keywords : Essential element, Toxic element, drinking water, ICP-MS