

絶対に安全な水はあるか？ 感染症 vs 発がんリスク

1-1 背景

水道水の浄水処理過程、特に塩素による消毒過程で、多くの発がん性物質が生成される。発がん性物質が生成されるような処理過程が、なぜ許されるのかと疑問を抱く場合もあるに違いない。ただ塩素消毒の過程で生成する発がん性物質をゼロにしようとする、水道水の塩素消毒をやめざるを得ない。そうすると反対に、塩素によって除去されていた病原細菌やウイルス、原虫の影響で、感染症のリスクが大きくなってしまふ。つまりひとつのリスクを下げるともう一つのリスクが大きくなる問題(トレードオフ)が水道水には存在している。

2つの異なるリスクがトレードオフの関係にあるので現状、水道水の基準値はリスクゼロにはできず何かのリスクをある一定の値で許すようなレベルで決まっている。ということは、絶対安全な飲み水はないということだろうか。

日本の水道水がまずくなり始めたのは既に50年も前である。もちろん、全国どこでもまずいのではなく、今でも熊本、熱海、金沢などではおいしい水が飲める。水道水の味がまずくなったのは、水道水の原水の水質が悪くなったこと、水の需要が大きくなったために、水道水の処理方式が緩速ろ過方式から急速ろ過方式に代わり、大量の塩素を投入するようになったためである(左図)。これによりまずいだけでなく有害な発がん性物質が水道水に含まれることになった。外国の情報や一部の研究者の発表によって、一般の日本人がこのことを知るのは1980年代後半である。

はじめて水道水中に発がん性物質のクロロホルムが検出されたのはライン川流域のアムステルダムで、その後、ミシシッピ川を水源とするニューオーリンズでも検出された。この地域の水道水給水区域では発がん率が高いという疫学データも出されていたため大騒ぎになった。

水道水のおいしさを嗅ぐと、よく「塩素くさい」「カルキくさい」と聞くがこれは、水道原水に含まれていた有機物やアンモニアが、消毒用の塩素と反応して生成するクロラミンという物質によるにおいであるといわれている。このように塩素消毒によって生成する物質を「消毒副生成物」と呼んでいる。消毒副生成物で一番有名なのはトリハロメタンである(右図)。トリハロメタンはメタン(CH<sub>4</sub>)の4つの水素のうち3つが塩素や臭素等に置き換わった化合物の総称である。

もし、水道水のリスク要因がクロロホルムなどの消毒副生成物だけであるなら、クロロホルムなどの濃度をできるだけ下げることがリスク削減の観点から望ましい選択である。これはつまり、塩素投入量をできるだけ少なくすることであるが、塩素をある量以下にすると、消毒の効果がなくなり、細菌感染やウイルス感染のリスクが増大する。消毒の手段として塩素消毒しかないとなれば、塩素を減少させれば感染症のリスクが増えるというトレードオフの関係になっている。では感染症のリスクはどれくらいだろうか。それは、発がんリスクと比べて大きいのか、それとも小さいのか。

本演習課題ではこれら(リスク)トレードオフの関係にある問題についてあつかう。

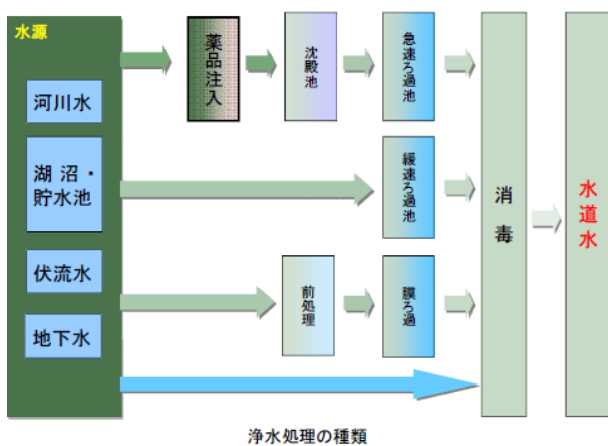


図 浄水処理の種類

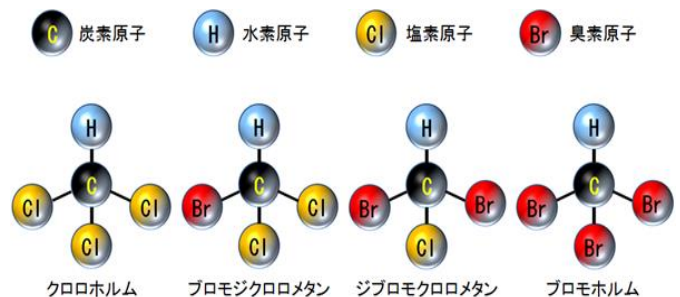


図 トリハロメタン類

## 1-2 演習課題（提出課題）

以下の3題について課題を提出してください。

1. 水道水中の感染症のリスクはどのくらいか計算する。
2. 塩素を加えることによって、どういう発がん性物質ができるのかそのリスクの大きさはどのくらいか計算する。
3. 感染症のリスクと発がんリスクの二つをどう扱うか(どのようにリスクマネジメントするか)を浄水過程における適切な塩素量を計算することで考える。

## 1. 水道水中の感染症のリスクはどのくらいか計算する

水道水の感染症のリスクはどのくらいになるのか?

ヒトの感染症は、細菌、ウイルス、原虫などによっておきる。赤痢、疫痢、コレラなどは細菌によるもので、先進国ではすでに過去の問題と認識され、今ではウイルスや原虫による感染症の制御が水道関係者の課題になっている。特に近年、クリプトスポリジウムなどという難しい名前原虫が問題になることがあるが、これは水道水消毒の宝刀とも言える。塩素処理があまり有効ではないからである(耐塩素性病原微生物)。

米国環境保護局は、1989年に表流水処理規則を発令し、感染症のリスクを年間 $10^{-4}$ 、つまり感染者が1万人中1人以下に抑えることを目標にすべきだという方針が出された。このような背景から我が国では現在、原虫(ジアルジアランブリア (Giardia lamblia))の感染リスクを $10^{-4}$ 以下に抑えることを目標に浄水管理が行われている。従って、ここではジアルジアの感染リスクを計算する。



図 ジアルジア原虫

感染症のリスクを計算するとき、次の4ステップを踏む。

1. 水道水中から人が1日に摂取するジアルジアの個数( $q$ 個/日)を調べる。

2. 1日の摂取で感染症にかかる確率( $P_d$ )と $q$ との関係を知る。ジアルジアの場合、研究の結果、以下の式で表わされる。

$$P_d = 1 - (1/\exp(0.0199 \times q))$$

$P_d$ が分かった場合、1年間に感染する確率 $P_y$ (年間感染リスク)は、

$$P_y = 1 - (1 - P_d)^{365}$$

(1年間一度も感染しない確率は、毎日感染しない確率の365乗でそれを1から引いた値が、1年間に1回またはそれ以上感染する確率であるので、上式が導かれる。)

3. 次に感染した人が発病にいたる確率( $I$ )を調べる。すると発病リスクは  $P \times I$ となる。

4. さらに、発病者の死亡率( $M$ )を調べる。死亡リスクは  $P \times I \times M$ となる。

ここでのジアルジアのリスク計算では $I=1.00$ 、つまり感染した人は必ず発病すると仮定し、さらに $M=0.01$ 、つまり発病した人の死亡率は1%と考える。

実際の計算

ある郊外都市における水道原水中のジアルジアの個数が1個/Lであった。1人1日2Lの水道水を飲むとすると $q$ と $P_d$ の値から、河川水をそのまま飲めば1日飲んだだけで?%の人がジアルジアで発病するリスクがある。また、年間の発病リスクを計算すると?となる。?の値を求めてください。(例えば、多摩川 調布堰上の河川水(2001年11月)はジアルジアの個数は14個/L)

参考表 原虫類検出による水道の給水停止事例 (保坂(2006)より引用)

場所	浄水処理	浄水の検出状況 (ジアルジア)
平成9年 鳥取県 三山口簡易水道	塩素消毒のみ	2個/10L
平成10年 福井県 永平寺町	急速濾過処理	2個/20L
平成12年 青森県 三戸町蛇沼地区	塩素消毒のみ	5個/20L

2. 塩素を加えることによって、どういう発がん性物質ができるのかそのリスクの大きさはどのくらいか計算する。

感染症を防ぐという立場に立てば、できるだけ塩素をたくさん投入して消毒強度を大きくすればよいが、塩素消毒の強度を上げると副生成物による人への健康リスクが大きくなる。

今、消毒副生成物の基準値をもとに年間発がんリスクを計算する。

消毒副生成物	基準値 ( $\mu\text{g/L}$ )	飲料水のユニットリスク* ( $\mu\text{g/L}$ ) <sup>-1</sup>	年間がんリスク
クロロホルム	60	$2.5 \times 10^{-9}$	
ブロモジクロロメタン	30	$2.6 \times 10^{-8}$	
ジブロモジクロロメタン	100	$4.3 \times 10^{-9}$	
ブロモホルム	90	-	
ホルムアルデヒド	80	-	
ジクロロ酢酸	40	$4.6 \times 10^{-8}$	
トリクロロ酢酸	300	$1.1 \times 10^{-8}$	
ジクロロアセトニトリル	80	-	
抱水クロラール	30	-	
			合計

\* 飲料水のユニットリスク：濃度 $1\mu\text{g/L}$ の消毒副生成物を含む水道水を毎日1Lずつ、一年間摂取しつづけた場合の発がん確率

基準値が設けられた消毒副生成物のうち、飲料水のユニットリスクが明らかになっているのは5物質のみである。データの無いものを考慮しなくてよいのかという議論は置いておき、今回はこの5物質の年間発がんリスクをそれぞれ計算する。その際、ヒトが一日当たり飲む飲料水の量は2Lとして計算してください。

これら5物質の合計値が飲料水中に含まれる消毒副生成物の年間発がんリスクとなる。

3. 感染症のリスクと発がんリスクの二つをどう扱うか(どのようにリスクマネジメントするか)を浄水過程における適切な塩素量を計算することで考える。

では、感染症のリスクと発がんリスクを比較してみる。そのためには初めに単位を揃えなければならない。今回比較する単位は死亡リスクとする。

○ 感染症のリスクを年間死亡リスクに変換した。先の問題1に書いたように死亡リスクは  $P \times I \times M$  で表わされるが、ここでジアルジアによるリスクを仮定し、 $P = P_y$ 、 $I = 1.00$ 、 $M = 0.01$ で計算する。

○ 発がんリスクはそのまま年間死亡リスクに変換できるとした。がんも治癒するケースが多いが、一度がんになった人はがんで死ぬことも多いので今回はこの仮定を採用する。

#### 実際の計算

ここでは、浄水の処理工程における適切な塩素量を死亡リスクを勘案することで判断する。

比較する処理工程（投入する塩素量）を、原水、物理的な処理のみ（塩素量 0）、塩素量 60mg・分/L、120 mg・分/L、390 mg・分/L、600 mg・分/L、とする。

#### 3.1 感染症の死亡リスク

塩素消毒量と原虫(ジアルジア)の関係は下表のようになることが知られている。

処理	原虫の個数 (q個/L)
原水	1
物理的な処理のみ (塩素量0)	$10^{-3}$
塩素量 60 mg・分/L	$10^{-4}$
120 mg・分/L	$10^{-5}$
390 mg・分/L	$10^{-9}$
600 mg・分/L	0

問題の1を参考に1人1日2Lの水道水を飲むとして、それぞれの処理工程の場合の年間感染リスクを計算し、そこから死亡リスクを計算してください（表の空白を埋めてください）。

処理	感染による死亡リスク
原水	$\approx 0.01$
物理的な処理のみ (塩素量0)	
塩素量 60 mg・分/L	
120 mg・分/L	
390 mg・分/L	
600 mg・分/L	

#### 3.2 消毒副生成物の死亡リスク

塩素消毒量と消毒副生成物の年間発がんリスクの関係には様々な議論がある。ここでは塩素消毒量の0.5乗に比例して増加するという考え方を採用することにする。つまり

$$Y = aX^{0.5} \quad (Y; \text{年間発がんリスク}, X; \text{塩素消毒量})$$

ここで、問題2で計算した合計年間発がんリスクは塩素消毒量が120 mg・分/Lの際の値である。この値を用いて上式に当てはめることでその他の塩素消毒量における年間発がんリスクを計算することができる（表の空白を埋めてください）。

処理	がんによる死亡リスク
原水	0
物理的な処理のみ（塩素量0）	0
塩素量 60 mg・分/L	
120 mg・分/L	
390 mg・分/L	
600 mg・分/L	

3.1と3. 2の計算結果をもとに二つのリスクの和を塩素消毒量ごとにまとめると以下のような表になる。つまり、リスクの和が最も小さくなる項目が適切な塩素量といえる。

処理	感染による死亡リスク	がんによる死亡リスク	リスクの和
原水			
物理的な処理のみ （塩素量0）			
塩素量 60 mg・分/L			
120 mg・分/L			
390 mg・分/L			
600 mg・分/L			

この表をもとに、適切な塩素量を計算してください。またその塩素量を考慮すると結局、水道水の基準値はリスクゼロではなく、どの程度の感染リスクと発がんリスクを許しているのかが分かる。

