

# 高度浄水処理水を超える水道水質ニーズとリスク管理のゆくえ

Consumers' needs for the quality of drinking-water treated with advanced process  
and the future of risk management

伊藤 禎彦 (京都大学)

Sadahiko ITOH (Kyoto Univ.)

## 1. 水道水質に対する市民の評価とニーズ

浄水処理プロセスにおいていわゆる高度処理の導入が進められてきており、わが国で何らかの高度処理が行われている水道水は平成 18 年度現在で 25.5% (浄水量ベースで見た百分率) に達している。関西地方でも、オゾン・活性炭処理を備えた高度処理プロセスを、例えば大阪市では 2002 年に、大阪府では 2000 年に導入を完了した。この結果、水道水の安全性に関する指標値が改善されたほか、臭気・味といったおいしさも大きく向上した。

この結果、市民向けイベントにおいて「きき水アンケート」を行うと、水道水とボトルウォーターの区別がつかないか、前者の方をよりおいしく感じるとする結果がしばしば報告される。これはいわば高度浄水処理プロセスの実力ということができ、水道事業者が自信を深める場面である。

しかし水道水利用の実態はどうだろうか。図 1 を見ていただきたい。これは大阪市民を対象として、日常的に飲用している水について回答を求めた結果である<sup>2)</sup>。飲用形態が水道水直接という人の割合は全体で 20% 程度、女性ではわずか 12% であった。科学的に見て十分安全な水道水を供給しているにも関わらず、特に女性では 8 人に 1 人しかそれを利用しないという事実は、水道事業体に重い課題を突き付けていると認識する必要がある。

この例のように、高度処理を導入してから数年あるいはそれ以上が経過したにもかかわらず、市民はなお水道水質に不安を抱き続けており蛇口になかなか回帰してくれない、あるいは水道水離れがさらに進行しているように見える、という悩みを抱えた水道事業体は少なくない。図 2 は、大阪市における異臭味に対する苦情件数の統計<sup>3)</sup>であるが、皮肉なことに、高度浄水処理の全量導入が完成し水道水質が大きく改善した時期から苦情件数が増大してきている。市民の水道水質に対する見方が厳しくなりそのニーズも増しているとみることができそうである。

我々は、このような市民の意識に関する社会心理学的な分析を行うとともに、科学的に安全な水道水を安心して飲用してもらうためのコミュニケーション手法に関する検討を行ってきた。図 3 は水道水に対する満足度の因果モデルを構築した結果である<sup>2)</sup>。構成概念間の数値 (因果係数) は関係の強さを意味する。本モデルにより、どの因子に働きかければ満足感が効果的に向上するかを議

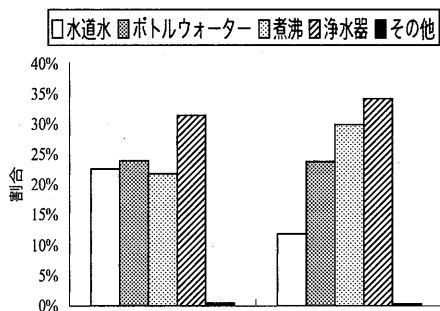


図 1 飲用形態の割合<sup>2)</sup>  
(2005 年 11~12 月京都大学調査、対象：大阪市)

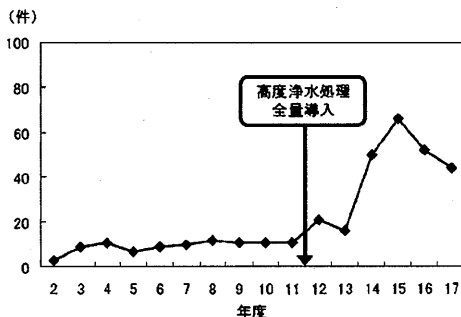


図 2 異臭味に関する苦情件数<sup>3)</sup>  
(お客様の請求(苦情・問合せ)により  
水質試験所が水質試験を行った件数)

論することが可能となる。こうした分析を通して、市民とのコミュニケーションといったソフト面だけではなく技術的課題（ハード面）についても整理した。

以上の経緯や事情、今後の方向性を大阪市河谷幸生氏に紹介していただく。特に、高度浄水処理を導入したにもかかわらず、なぜ新たに「大阪市水道おいしい水計画」<sup>3,4)</sup>を作成する必要があったのか、新規に実験プラントを建設し本年度から調査研究を開始するがその目的は何かのかなどに注目していただきたい。顧客満足度という指標で見た場合、オゾン・活性炭という高度処理プロセスが決して終着点ではなく、水道技術の長い歴史からみるとひとつのステップにすぎないことが理解されるであろう。

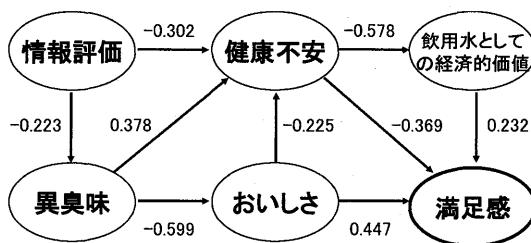


図3 「水道水に対する満足感」の心理モデル<sup>2)</sup>

## 2. 残留塩素規定の見直しとリスク管理高度化の必要性

図3の分析によって、満足感には水道水の「異臭味」や「おいしさ」が大きく影響していることがみとれた（もうひとつは「健康不安」）。市民感覚からすれば至極当然のことである。高度処理によって、かび臭や下水臭などがほぼ解決された今、塩素消毒によって生成するカルキ臭が残された大きな問題ということができる。

水道事業体はこれまで「塩素のにおいは安全のしるし」という立場をとり続けてきた。水質基準上もカルキ臭は規制の外に置かれている。水質基準項目の「臭気」および水質管理目標設定項目の「臭気強度」は、カルキ臭を除く臭気を測定するものである。そこには、塩素で消毒しているのだから少しのカルキ臭があるのは当然という考え方がある。しかし上述したことから、少なくとも現在のわが国の水道において、水道水にカルキ臭があるのは当然とする考え方では、人々はさらに勝手に水道から離れていってしまうのではないか。「水道ビジョン」<sup>5)</sup>が掲げる「市民が喜んで支える水道」とは反対の方向に向かっているのではないかと危惧されるどころだ。

このような問題意識を踏まえて、国立保健医療科学院 島崎大氏に紹介いただく内容は、各国消毒の現状、厚生労働省を含む日本の動き、平成17年度から行われてきている厚生労働科学研究の目的と内容<sup>6,7)</sup>などである。その中には、群馬県片品村の特区申請例（2007年に構造改革特別区域の認定申請として、残留塩素濃度基準を0.05 mg/L程度とするよう規制緩和する要望が提出されたもの）も含まれよう。給水栓水で0.1 mg/L以上の残留塩素（遊離型の場合）を求めているわが国の規定を今後も維持するかどうかという検討が始まっている点に注目していただきたい。

もちろん、塩素は消毒剤として人々の衛生を長年にわたって確保してきたという実績があるのであって、これを安易に手放すのは誤りである。我々の研究室では、塩素使用の継続を前提として、塩素を使用してもカルキ臭のない水道水を得る可能性について検討を行っている。「おいしい水指標」のひとつとして水道水の臭気強度の目標値の設定、カルキ臭前駆物質の分解・除去、微生物的安定性の観点から、極低濃度の塩素存在下で許容できるAOC（Assimilable Organic Carbon: 同化可能有機炭素）濃度の探索などである。

仮に、残留塩素濃度を最小限としたりなくしたりすることを考えた場合、微生物感染リスクがゼロではないという現実と直面することになる。もちろん現在でも感染リスクはゼロではありえないが、少なくとも計算上、感染リスクは増大すると評価されることとなる。許容リスクレベルを設定し、リスクのアセスメントとマネジメントを高度化させていくという覚悟が必要になる。

この点で実務上、世界でもっとも進んでいるのがオランダである。よく知られているようにこの国では浄

表1 オランダにおける微生物に関する水道水質基準 (2001 年施行) <sup>9)</sup>

| 番号 | 項 目                                                              | 基準値                |
|----|------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 1  | QMRA によって、腸管系ウイルス、クリプトスポリジウム、ジアルジアの年間感染リスクが $10^{-4}$ 以下と評価されること |                    |
| 2  | 大腸菌と腸球菌                                                          | 0 CFU/100 mL       |
| 3  | アエロモナス                                                           | 1000 CFU/100 mL 以下 |
| 4  | 22°C における形成集落数                                                   | 100 CFU/100 mL 以下  |
| 5  | 大腸菌群とクロストリジウム                                                    | 0 CFU/100 mL       |

ダで施行されている水質基準のうち、微生物に関する項目を表 1 に示す<sup>9)</sup>。いくつかの微生物名が並んでいるが、注目されるのは、腸管系ウイルス、クリプトスポリジウム、ジアルジアについてその感染リスクを年間  $10^{-4}$  以下とする項目が存在することである。このような項目は世界中でオランダにしか存在しない。そしてこれを可能にする手法が、微生物の定量的リスク評価 (Quantitative Microbial Risk Assessment; QMRA) と呼ばれるものである<sup>10,11)</sup>。

すなわち各水道会社 (2008 年現在オランダ国内に 10 社) は、法律によって、自分たちが供給する水道水の微生物感染リスクを定量評価し提示することが義務付けられている。そして、感染リスクが年間  $10^{-4}$  以下の安全な水道水を供給する義務を負う。

QMRA 手法を展開するこの分野では、水道水中大腸菌などの測定結果がゼロであることをもって、微生物感染リスクもゼロであると主張するのは、非常に初歩的なレベルと認識されている。これは、微生物に係る一般的な検査水量 (1 mL~10 L) と、感染リスクを年間  $10^{-4}$  以下を達成するのに必要な微生物濃度レベルを比較するだけでも容易に理解できることである。たとえば大腸菌の場合、検査水量は 100 mL であり、これを 1 年間行っても検査した水量は 36.5 L にしかならない。これに対し感染リスク  $10^{-4}$  年に対応する微生物濃度レベルは  $100 \sim 10,000 \text{ m}^3$  の中に数単位である (ものが多い)。通常の検査でゼロという測定値をいくら積み重ねてもリスク管理の必要水準には遠く及ばないのである (この議論は正確には微生物を特定して行う必要がある。しかし感染に必要な摂取微生物数には閾値はないと仮定するので、本質的に差は生じない)。この分野では、ゼロという測定値は微生物が本当にいないのではなく、非常に小さい値で存在しうると考える。

上述した水道における将来課題に取り組んでいくためには、やはり、リスクと正面から向き合い、これを管理していくという姿勢が避けられない。

### 3. 微生物リスクと化学物質リスクの統一評価へむけて

微生物感染リスクの評価について述べたが、これを題材として将来の飲料水の安全管理・リスク管理の方向性について考えてみたい。

塩素消毒は、微生物リスクを低減させるが、水道水中にトリハロメタンなどの化学物質による発がんリスクを新たに作りだすことは周知のとおりである。消毒技術とはこのようなジレンマの中にある技術である。概念を図 4 に示す。

この図の概念をもとに、消毒効果の定量的評価、消毒剤の最適注入量の決定、代替消毒剤の選択などが行えると良い。このような消毒における化学物質リス

水処理過程および配水過程に塩素を使用していない。2005 年には、最後の塩素消毒が UV 処理に置き換えられた<sup>8)</sup>。

このためこの国では、微生物感染リスク管理に関する実務を高度に展開している。2001 年からオランダ

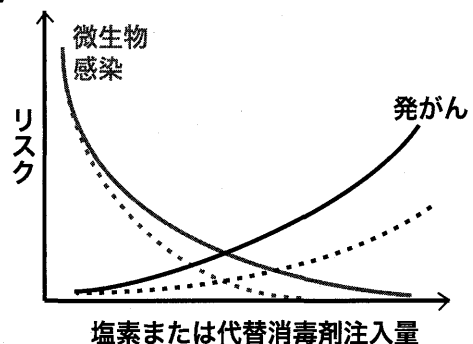


図 4 消毒にともなうリスクの低減と生成概念図  
(破線は塩素代替消毒剤として望ましい特性を示す)

クと微生物リスクをどうバランスさせるかという問題は従来から議論されてきた。また、図に描いた破線は、代替消毒剤として望ましい特性を示している。すなわち、微生物リスクが速やかに低減し、副生成物に起因するリスクが生成しにくい特性をもつ消毒剤があれば好都合というわけである。しかし実は、これら进行评估する作業は容易なことではない。縦軸のリスクを定量化しようとする際、化学物質リスクと微生物リスクの内容・質が異なり、同一の指標を用いた評価が困難だからである。

微生物リスクから考えてみよう。微生物による健康影響は、一般に、感染→罹患→死亡の順をたどる。感染とは、ヒトの体に微生物が住み着いて増えることを意味し、必ずしも症状をとまなうわけではない。そして感染したヒトのごく一部が病気の状態となる。さらにそのごく一部のヒトが死亡する場合がある。そして微生物リスクの評価では、エンドポイントを感染という段階に設定する。

生起した感染事象を死亡リスクに変換する場合、従来、感染後の罹患率、死亡率データを参考にして、しばしば感染したヒト（または罹患したヒトを対象とする場合もある）の死亡率を1%や0.1%に設定するということが行われてきた<sup>12, 13)</sup>。

しかし、リスク評価の対象を死に限定するこの方法では、定量化されない多くの健康影響を見過すことになってしまう。微生物に感染し発症した場合、下痢や発熱が1週間程度続くがその後快復することが多く、死に至るケースはほとんどないという微生物も多い。したがって死亡リスクだけを評価指標とすると、微生物感染による健康影響のごく一部をとらえるに過ぎず、過小評価してしまう可能性が高い。微生物の種類によって疾患の深刻さや死亡率が大きく異なる点が特徴であり、同じ病原体でも種によって毒性が大きく異なることもあるのである。

一方、化学物質の場合も、健康影響の種類は実に多様であるが、毒性評価にあたっては病変が起きたか否かに評価ポイントがあり、病変の重みづけは通常なされないと考えることができる。わずかにTDI (Tolerable Daily Intake ; 耐容1日摂取量) 算出のための不確実係数を設定する際に、発がん性といった毒性の種類が重篤である場合に10を追加するくらいである（非発がん病変に対し10以外の値が設定される場合もある）<sup>14)</sup>。

生起した健康影響を死亡リスクに変換する場合、がんは原則として致死的であると考え、発がんリスクをそのまま死亡リスクとみなす（異なる考え方をとる場合もある）。しかし非発がん影響の場合、そもそも（死亡）リスクにカウントされないということになる。

以上のような問題点を解決する指標の一つが障害調整生存年数 (Disability-adjusted Life Years : DALYs) である。DALYs は、特定の疾病要因による異なった健康影響をそれぞれ評価して統合する、または異なる要因の影響を比較するための共通の指標になりうるものである<sup>13, 15)</sup>。

DALYs は、早期死亡によって失われた生存年数 (Years of Life Lost : YLL) と、障害をもって生存する年数 (Years Lived with Disability : YLD) との和で表し、障害の重篤度で重み付けを行っている。その単位は年である。

$$\text{DALYs} = \text{YLL} + \text{YLD} \quad (1)$$

損失生存年数 YLL は、ある集団における生存年数の全損失を意味し、次式で表される。

$$\text{YLL} = \sum_i e^*(a_i) \sum_j d_{ij} \quad (2)$$

ここに、 $i$  : 異なる年齢層に対する添字、 $j$  : 異なる症例群に対する添字、 $d_{ij}$  : 年齢層ごとの致命的な症例数、 $e^*(a_i)$  : その年齢層の平均余命。

障害生存年数 YLD は、ある集団における症例数に疾病の平均継続時間と疾病の重篤度を反映する 0（完全に健康）から 1（死亡）の重み係数を乗じて、次式で表す。

$$\text{YLD} = \sum_j N_j L_j W_j \quad (3)$$

ここに、j: 異なる症例群に対する添字、N: 患者数、L: 疾病の継続時間、W: 重篤度。重篤度は、表 2 に示す七つの障害等級<sup>15)</sup>に分類されている。

すなわち DALYs は、疾病と傷害によって引き起こされる死亡に加えて、死亡にまでは至らないが、日常生活に種々の制限が加わり健康的な生活が阻害されることを定量化しているといえる。

この DALYs を指標として、現在、世界でどのような取り組みが進行中であるかを東京大学 渋谷健司氏によって紹介いただく。特に、世界の疾病負担 (Global Burden of Disease : GBD) の定量化、そ

の中における DALYs の役割に注目していただきたい。DALYs が、地球規模の環境問題に対応していく際のひとつの指標であることが理解されるであろう<sup>16,17)</sup>。上水道のみならず、環境工学分野にいる者として、その考え方・手法を学びたい。

さて筆者は、水道水中の化学物質および微生物のガイドライン値・基準値が、将来この DALYs という指標によって統一化される方向にあると考えている。

すでに DALYs を用いて、図 4 に示す消毒処理のジレンマの評価に成功した例がある。塩素では不活化できないクリプトスポリジウムをオゾンで不活化することを想定しよう。一方、オゾン処理によってさまざまな副生成物が生成する<sup>18)</sup>が、ここでは発がん物質である臭素酸イオンをとりあげる。この利害得失に対して、Havelaar ら<sup>19)</sup>は DALYs を指標としてオランダにおける評価を試みた。この成果は、わが国の水質基準設定過程で検討されたクリプトスポリジウム等耐塩素性病原微生物対策の考え方に生かされている<sup>18,20)</sup>。

はじめに、クリプトスポリジウムによる感染者 1 人あたりの健康影響度は  $1.03 \times 10^{-3}$  DALYs と求められた。その内訳をみると、YLL =  $0.0937 \times 10^{-3}$ , YLD =  $0.937 \times 10^{-3}$  と、YLD の方が YLL より 1 オーダー大きかった。クリプトスポリジウム感染では、死亡よりも水様性下痢症状による健康影響の方が主体であるということの意味する。微生物感染の影響を死亡リスクだけで評価すると、リスクを過小評価してしまう例といえる。

次に、オゾン処理による臭素酸イオンの生成に伴う DALYs が評価された。臭素酸イオンは遺伝子障害性を有する発がん物質であり、生涯を通じた発がんリスク増分が  $10^{-5}$  (1/100,000 人)となるレベルで基準値 (WHO ではガイドライン値) が設定されている。水道水に基準値濃度の臭素酸イオンが含まれているとし、その摂取によって生起する腎細胞がんを評価対象とした。この結果、腎細胞がんの年間の DALYs は  $1.4 \times 10^{-6}$  DALYs と計算された。なおこの場合、YLD は YLL に比べて十分小さいので YLD は無視できる量である。すなわち、発がん物質である臭素酸イオンによるがんの許容発生率  $10^{-5}$  は、障害調整生存年数でみると  $1.4 \times 10^{-6}$  DALYs に相当する (年間値として算出していることに注意) ということになる。

いま仮に、原水中クリプトスポリジウムオーシストの濃度を 1 個/10L とする。これを無処理のまま給水したとすると、年間の感染確率は  $1.5 \times 10^{-4}$  年と求められる (Hass らが示した用量反応関係式を用いる)<sup>18)</sup>。上記の通り、感染者 1 人あたりの健康影響度は  $1.03 \times 10^{-3}$  DALYs であるから、1 人あたりの年間の健康影響度は  $1.5 \times 10^{-4}$  DALYs と計算される。水道水中濃度が 1 個/10L であった場合には、それが供給されている地域においてこれだけのリスクが存在するということである。

さて、この  $1.5 \times 10^{-4}$  DALYs という値は、上記の臭素酸イオンによる腎細胞がん生成に関する  $1.4 \times 10^{-6}$  DALYs の値を大きく上回っている。すなわち、オゾン処理を行ってクリプトスポリジウムを不活化することは、たとえ基準値濃度レベルの臭素酸イオンを生成したとしても大きな利益があることを意味している。

また、次のように指摘することもできる。すなわち、クリプトスポリジウムオーシストを 1 個/10L 濃度で含む水道原水に対して、オゾン処理に限らず、浄水処理で 2 log の除去 (99%除去) を行えば、概ね  $10^{-5}$  発

表 2 障害等級と疾病事例<sup>15)</sup>

| 等級 | 重み        | 事例          |
|----|-----------|-------------|
| 1  | 0.00~0.02 | 顔面白斑、低体重    |
| 2  | 0.02~0.12 | 下痢、咽頭炎      |
| 3  | 0.12~0.24 | 不育症、関節炎、狭心症 |
| 4  | 0.24~0.36 | 切断、聴覚消失     |
| 5  | 0.36~0.50 | ダウン症候群      |
| 6  | 0.50~0.70 | うつ病、盲目      |
| 7  | 0.70~1.00 | 精神病、痴呆、四肢麻痺 |

がんリスクレベルから計算される DALYs と同程度となることがわかる (ただし、上記の例では DALYs は腎細胞がんに対する値であることに注意)。すなわち、発がん物質に適用されているリスク管理レベルと同等水準を求めるならば、原水中クリプトスポリジウムオーシスト濃度が 1 個/10 L である場合には、2 log 除去の性能を有するろ過処理等の浄水処理操作が必要であると指摘することができる。

以上は DALYs という指標を用いることで、化学物質と微生物という異なるリスク因子を比較した例である。そして病原微生物に対する浄水処理上の制御目標レベルを設定することもできている。DALYs という値を用い、統一的に、基準値というリスクの許容レベルを設定することが可能になることが理解できよう。

DALYs を用いたこのような取り組みは、水分野よりも食品の安全評価の分野でより進んでいる。WHO (世界保健機関) と FAO (国連食糧農業機関) とのジョイントプロジェクトも存在し、当面評価対象とする化学物質と微生物を選択した上で DALYs 指標を用いた GBD の定量化の試みが進められている<sup>21)</sup>。

飲料水の安全評価の分野では、例えば WHO では数年前から取り組んできているが、現在までに数種類の微生物と化学物質を取り上げて定量化作業が行われた<sup>22)</sup>。

DALYs の定量評価はそれ自体チャレンジングな試みであり、水道水中の化学物質および微生物のガイドライン値・基準値が、DALYs 指標によって統一化されるのは決して近い将来とはいえない。しかし、確実にその方向に向かって歩が進められているのは事実であり、今後も注目していきたい分野である。また DALYs の定量評価は、国・地域を限定して行うのが現実的であり、わが国での調査研究の推進が望まれるところである。

## 参考文献

- 1) 日本水道協会水道統計編集委員会: 水道統計の経年分析 (平成 18 年度), 水道協会雑誌, Vol. 77, No. 8, pp. 103-141, 2008.
- 2) 伊藤禎彦, 城征司, 平山修久, 越後信哉, 大河内由美子: 水道水に対する満足感の因果モデル構築と満足感向上策に関する考察, 水道協会雑誌, Vol. 76, No. 4, pp. 25-37, 2007.
- 3) 大阪市水道局: 大阪市水道おいしい水計画—スマイルウォータープロジェクト— アクションプラン, 60p., 2007.
- 4) 大阪市水道おいしい水計画推進会議: 大阪市水道おいしい水計画 スマイルウォータープロジェクト基本プラン, 20p., 2006.
- 5) 厚生労働省健康局: 水道ビジョン (平成 20 年 7 月改訂), 60p., 2008.
- 6) 厚生労働科学研究費補助金健康科学総合研究事業, 残留塩素に依存しない水道の水質管理手法に関する研究 平成 18 年度総括・分担研究報告書, 2007.
- 7) 厚生労働科学研究費補助金研究成果等普及啓発事業研究発表会, 残留塩素に依存しない新しい水道システムの構築に向けて, 31p., 2007.
- 8) Smeets, P., Medema, G., van Dijk, H., The Dutch Secret: Safe drinking water without chlorine in The Netherlands, Symposium on Alternative Approaches to Disinfection for Drinking Water, 18p., 22-23 September, 2008, Ontario, Canada.
- 9) Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden 53p., 2001.
- 10) Medema, G., Loret, J. F., Stenstrom, T.-A., Ashbolt, N. eds.: MICRORISK, Quantitative Microbial Risk Assessment in the Water Safety Plan, 2006.
- 11) Haas, C. N., Rose, J. B., Gerba, C. P. 著, 金子光美監訳: 水の微生物リスクとその評価, 技報堂出版, 452p., 2001.
- 12) 金子光美編著: 水質衛生学, 技報堂出版, 579 p., 1996.
- 13) Fewtrell, L., Bartram, J., 金子光美, 平田強監訳: 水系感染症リスクのアセスメントとマネジメント, WHO のガイドライン・基準への適用, 技報堂出版, 434p., 2003.
- 14) 厚生科学審議会生活環境水道部会水質管理専門委員会: 水質基準の見直しにおける検討概要, 2003.
- 15) Murray, C. J. L., Lopez, A. D.: *The Global Burden of Disease and Injury Series*. Vol. 1, 2. Harvard

School of Public Health on behalf of the World Health Organization and The World Bank, Cambridge, MA., 1996.

16) World Health Organization The Global Burden of Disease: 2004 Update, 146p., 2008.

17) Van Lier, E. A., Havelaar, A. H., Disease burden of infectious diseases in Europe: a pilot study, RIVM report 215011001, 2007.

18) 伊藤禎彦, 越後信哉: 水の消毒副生成物, 技報堂出版, 325p., 2008.

19) Havelaar, A. H., De Hollander, A. E. M., Teunis, P. F. M., Evers, E. G., Van Kranen, H. J., Versteegh, J. F. M., Van Koten, J. E. M., Slob, W.: Balancing the risk and benefits of drinking water disinfection: Disability adjusted life-years on the scale. *Environ. Health Perspect.*, Vol. 108, No. 4, pp. 315-321, 2000.

20) 厚生科学審議会: 水質基準の見直し等について (答申), 2003.

21) World Health Organization: WHO Initiative to Estimate the Global Burden of Foodborne Diseases, A summary document, 2008.

22) Havelaar, A. H., Melse, J. M.: Quantifying public health risk in the WHO Guidelines for Drinking-Water Quality; A burden of disease approach, RIVM report 734301022, 2003.