

200639023A

厚生労働科学研究費補助金

地域健康危機管理研究事業

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

平成19年3月

主任研究者 国包章一（国立保健医療科学院）

## 目次

研究班の構成	1
I. 総括研究報告書	
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	5
国包 章一	
II. 分担研究報告書	
1. 給配水過程における健康リスクに関する検討	15
船水 尚行、伊藤 竜生、野口 友寛	
2. 消毒副生成物によるリスクの総括的評価および塩素 使用と免疫毒性の関連に関する検討	39
伊藤 禎彦、大河内 由美子、高橋 恭介、石川 卓	
3. 給配水過程における健康リスクと消毒技術に関する 検討	49
西村 和之	
4. 消毒技術に関する検討（消毒代替技術間の消毒機構 の比較及びそれら代替技術の管理手法の開発）	61
大瀧 雅寛	
5. アニューラーリアクターを用いた配水管路内における 微生物再増殖制御に関する検討	69
国包 章一、島崎 大、高井 正子	
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	81
IV. 研究成果の刊行物・別刷	85

## 研 究 班 の 構 成

### 主任研究者

国立保健医療科学院水道工学部長

国 包 章 一

### 分担研究者

京都大学大学院工学研究科教授

伊 藤 禎 彦

お茶の水女子大学大学院人間文化研究科助教授

大 瀧 雅 寛

国立保健医療科学院水道工学部主任研究官

島 崎 大

県立広島大学生命環境学部教授

西 村 和 之

北海道大学大学院工学研究科教授

船 水 尚 行

### 研究協力者

京都大学大学院工学研究科

石 川 卓

北海道大学大学院工学研究科

伊 藤 竜 生

京都大学大学院工学研究科

大河内 由美子

国立保健医療科学院水道工学部

高 井 正 子

京都大学大学院工学研究科

高 橋 恭 介

北海道大学大学院工学研究科

野 口 友 寛

厚生労働科学研究費補助金

地域健康危機管理研究事業

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 総括研究報告書

平成19年3月

主任研究者 国包章一（国立保健医療科学院）

## 総括研究報告書

### 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

主任研究者 国包 章一 国立保健医療科学院水道工学部長

**研究要旨** わが国の水道では塩素消毒と残留塩素保持が義務づけられているが、これらは消毒副生成物の生成に伴う健康リスク増大やカルキ臭の発生に伴う快適性喪失の原因となっており、国民の水道水に対する不安や不信感の要因ともなっている。本研究では、水道水の安全性及び快適性のさらなる向上を目的として、わが国の水道の現状と最新の知見に照らして残留塩素保持の意義を再検討し、塩素消毒や残留塩素保持だけに依存しない新しい水道水質管理のあり方を明らかにする。本年度の主な成果として、水道原水から給配水系を包括的に表現し健康リスクを確率的に推算するシミュレーションモデルを構築し、消毒剤の残留効果が無い場合をもとに想定した配水管壁面等における微生物増殖量のシミュレーションを行い、その結果を基に病原微生物に関する健康リスクを定量評価した。消毒副生成物によるリスクの総括的評価に関する検討として、スワニー川由来天然有機物の塩素処理生成物を対象とした形質転換試験を実施し、その毒性がクロロ酢酸と同程度またはより強いことを明らかにした。高度浄水処理の各過程におけるエンドトキシン除去特性を明らかにし、ヒト表皮角化細胞を用いて精製リポ多糖及び浄水場から採取した試料による細胞毒性を評価した。病原微生物による水道水健康影響リスク評価の基礎データとして、家畜糞尿や生活排水の持つ病原微生物負荷量を把握するため、調査対象流域におけるヒト型クリプトスポリジウム・オーシストの流出量を測定した。レジオネラ菌やセレウス菌は検出されなかった。代替消毒剤として二酸化塩素に着目し、処理対象水中に有機物が共存する場合を考慮した二酸化塩素による消毒効果およびAOCの増加量を把握した。紫外線消毒法とオゾン消毒法が大腸菌へ及ぼす損傷レベルを比較したところ、前者では光回復能への光強度の影響は見られなかった。後者では、低pH域で残留オゾン濃度が高い条件の場合、外膜損傷だけで増殖可能なような損傷レベルの低い細菌を誤陰性としてしまう可能性が高いことを示した。オゾン曝気による消毒では外膜損傷に関して最も効果が高く、また酵素生成能力や増殖能力に関しても同程度の効果があることが分かった。アニユラーリアクターを用いた微生物再増殖実験を行い、異なる残留塩素濃度および試験片表面粗度における微生物の増殖速度、付着密度および流出濃度を明らかにした。

分担研究者	京都大学大学院工学研究科教授	伊藤禎彦
	お茶の水女子大学大学院人間文化研究科助教授	大瀧雅寛
	国立保健医療科学院水道工学部主任研究官	島崎 大
	県立広島大学生命環境学部教授	西村和之
	北海道大学大学院工学研究科教授	船水尚行

## A. 研究目的

水道における塩素消毒と残留塩素の保持は、トリハロメタン等消毒副生成物の生成に伴う健康リスクの増大や、カルキ臭の発生に伴う快適性の喪失をもたらすことが重大な欠点であり、また、先に水道水の汚染に起因して集団感染事故をもたらした原虫クリプトスポリジウムは、通常の条件では塩素消毒による不活化が全く期待できないこともよく知られている。本研究では、今日の水道における残留塩素保持の意義と必要性を、わが国の水道の現状と最新の知見に照らして再検討し、残留塩素に依存しない新しい水道水質管理のあり方を明らかにすることにより、水道水の安全性及び快適性のより一層の向上を図ることを目的とする。

## B. 研究方法

### 1. 給配水過程における健康リスクに関する検討

前年度は(1) 検証対象物質（病原微生物）の選定、(2)原水水質＋処理系＋消毒系＋配水池＋配水管網＋給水系におけるリスクファクターの同定と要素モデルに関する文献調査を実施した。今年度は前年度の成果をふまえ、水源域＋原水水質＋処理系＋消毒系＋配水池＋配水管網＋給水系を包括的に表現し、健康リスクを確率的に推算するシミュレーションを実施するための、具体的数値、要素モデルの同定を目的として、水道システムの類型化と計算モデルのコード化を行った。

### 2. 消毒副生成物によるリスクの総括的評価および塩素使用と免疫毒性の関連に関する検討

#### (1)消毒副生成物によるリスクの総括的評価に関する検討

クロロ酢酸類および Suwannee River Natural Organic Matters (SRNOM)塩素処理水中の全有機ハロゲン化合物を対象として、2段階形質転換試験および非2段階形質転換試験を実施した。また、昨年度実施した文献考察の成果と前述の形質転換試験結果との相関性を利用して、SRNOM 塩素処理水の毒性推定を試みた。

#### (2)塩素使用と免疫毒性との関連性に関する検討

近畿地方の高度浄水処理施設を対象として採水調査を行い、プロセス毎のエンドトキシン除去特性を調べた。また、ヒト表皮角化細胞を用いて *E. coli* 由来の精製リポ多糖による細胞毒性試験を行った。さらに、水道水および前述の浄水場から採取した水試料の分画・濃縮を行い、各画分の細胞毒性試験を同様に行った。

### 3. 給配水過程における健康リスクと消毒技術に関する検討

広島県北部の酪農地帯を流れる一級河川江の川水系に属するA類型指定の西城川の平子、川手と、同比和川の比和川橋を調査地点として、水中のクリプトスポリジウム等病原微生物に関する現地調査を実施した。試料は、河川水 200L をポリタンクで採水後、実験室内でポリエチレン製 MF 中空糸膜モジュールを用いて濃縮した。濃縮試料は2分割

し、公定法による顕微鏡観察と東和科学（株）製 *C. parvum* 検出キット（RNA 検出法）による *hsp86* 領域に基づく定量を行った。さらに、別途に採水した 40L 試料から遺伝子（DNA）を抽出し、PCR により *hsp70* 領域を増幅してホモロジー検索による遺伝子型の同定を行った。また、水道水が生活排水に汚染された場合を想定して、二酸化塩素が生活排水中に存在する有機物（AOC）に及ぼす影響を検討すると共に、大腸菌の野生株を用いた二酸化塩素による不活化実験を行った。

#### 4. 消毒技術に関する検討（消毒代替技術間の消毒機構の比較及び、それら代替技術の管理手法の開発）

##### (1) 紫外線処理後の大腸菌の光回復実験

大腸菌（NBRC3301）を用いて濃度約  $10^6$  CFU/ml のリン酸緩衝液を作成し、紫外線を照射した。光源として低圧水銀ランプ（20W 東芝殺菌ランプ）およびパルスキセノンランプ（岩崎電気社製）を使用した。各照射条件にて大腸菌不活化速度を測定し、各条件とも大腸菌が 99%不活化となるように照射回数を設定した。紫外線による不活化処理後、大腸菌溶液に蛍光灯を照射した。蛍光灯の光強度は光回復の指標となる 365nm の線量率で測定した。

##### (2) オゾン処理による大腸菌の損傷レベルの推定

オゾン溶解水による大腸菌の不活化実験として、オゾン発生装置を用いて発生させたオゾンを、pH を調整したリン酸緩衝液に通気して、オゾンを溶解させた。充分通気して溶解させた後、高濃度の大腸菌（ATCC3301）溶液を溶解させ、大腸菌濃度の変化を測定した。またオゾン曝気による大腸菌の不活化実験として、オゾン発生装置を用いて発生させたオゾンを、pH を調整したリン酸緩衝液に通気させながら、上記と同様の高濃度大腸菌溶液を溶解させ、大腸菌濃度の変化を測定した。大腸菌の測定は 4 通りの培地による培養法とした。

#### 5. アニュラーリアクターを用いた配水管路内における微生物再増殖制御に関する研究

##### (1) 残留塩素濃度による微生物再増殖性の相違

水道水にチオ硫酸ナトリウムまたは次亜塩素酸ナトリウムを添加し、各系統の試料水の遊離塩素濃度がそれぞれ 0.0mg/L、0.1mg/L、0.5mg/L 前後となるように調整し、44 日間連続的にアニュラーリアクターへ通水した。流入量を 10mL/分に設定し、滞留時間を約 100 分（容積約 1L）とした。試験片の材料はポリカーボネイトとした。流入水、流出水および試験片表面に付着した微生物を定期的に採取し、一般細菌と従属栄養細菌を測定した。通水開始後 34 日目は、全ての系統において一時的に遊離塩素濃度を 1.0 ~ 1.2mg/L に上げ、形成された生物膜の剥離状況および回復状況を調べた。

##### (2) 表面粗度による微生物再増殖性の相違

表面粗度の異なるすりガラス 2 種類と普通のガラスを試験片として用い、試験片の表面粗度を 3 段階に設定した。全ての系統の試料水の遊離塩素濃度が 0.0mg/L 程度とな

るように調整し、48日間連続的にアニュラーリアクターへ通水した。通水開始後23～24日目および36～38日目に全ての系統において遊離塩素濃度を0.9～1.3mg/Lおよび0.7mg/Lに上げた。

(倫理面への配慮)

人体試料を用いた実験や動物実験等倫理上問題となるような実験や調査は行っていない。

## C. 研究結果と考察

### 1. 給配水過程における健康リスクに関する検討

シミュレーション対象の類型化として、水道統計にある浄水量、大腸菌群数、過マンガン酸カリウム消費量を指標とした主成分分析により、その規模から3種類に分類した。類型化されたシステムは以下のように整理された。

類型 I：浄水量平均 40,000m<sup>3</sup>/day 程度の大規模システム。処理方式は凝集沈殿＋急速ろ過＋塩素消毒。

類型 II：浄水量平均 3,000m<sup>3</sup>/day 程度のシステム。処理方式は凝集沈殿＋急速ろ過＋塩素消毒。

類型 III：浄水量平均 1,300m<sup>3</sup>/day 以下の小規模システム。処理方式は塩素消毒のみ。

類型ごとに下記のような平均、標準偏差の対数正規分布で原水水質特性を表現可能であることを確認した。

類型 I： 過マンガン酸消費量：平均：10<sup>1.09</sup>、標準偏差：10<sup>0.31</sup>

大腸菌群数：平均：10<sup>4.36</sup>、標準偏差：10<sup>0.65</sup>

類型 II： 過マンガン酸消費量：平均：10<sup>0.61</sup>、標準偏差：10<sup>0.35</sup>

大腸菌群数：平均：10<sup>1.95</sup>、標準偏差：10<sup>1.85</sup>

類型 III： 過マンガン酸消費量：平均：10<sup>-0.25</sup>、標準偏差：10<sup>0.38</sup>

大腸菌群数：平均：10<sup>-1.43</sup>、標準偏差：10<sup>1.15</sup>

上記の過マンガン酸カリウム消費量と DOC、そして DOC と BDOC のおおよその関係をおおよそこれまでの測定結果より求めた。また過マンガン酸カリウム消費量と大腸菌群数について、その処理効率を水道統計より概算し、その平均値と標準偏差を類型ごとに求めた。さらに2005年度の検討結果をもとに、配水池、管網、貯留槽における塩素・有機物の消費、微生物増殖モデルを定式化し、そのコード化を行った。

配水過程での消毒剤の残留効果が無い場合を対象にシミュレーションを行った。パイプや高架水槽壁面付着微生物量の経日変化を計算した結果、壁面微生物量は約1週間程度で安定することがわかった。また、その濃度は現状の原水水質（それにとまなう浄水水質）の差に大きく影響されない結果であった。配水管網内の有機物濃度、微生物濃度の空間分布の計算結果より、管網の中流域で有機物が消費され、かつ、微生物濃度が最大となることが示された。また病原性微生物に関する現状のリスク推算を行った。計算では、50年間の DALY の期待値を算出し、WHO の許容値と推算結果を比較した。その結果、カンピロ



バクター、ノロウイルス、クリプトスポリジウムのすべてにおいて許容値内であった。

## 2. 消毒副生成物によるリスクの総括的評価および塩素使用と免疫毒性の関連に関する検討

### (1)消毒副生成物によるリスクの総括的評価に関する検討

SRNOM 塩素処理水の毒性は、染色体異常試験よりも形質転換試験において高く評価されることがわかった。また、形質転換率 0.1 超過濃度と慢性毒性試験データを用いて、SRNOM 塩素処理水の毒性推定を行ったところ、クロロ酢酸と同程度かより強いことが示された。

### (2)塩素使用と免疫毒性との関連性に関する検討

エンドトキシンは急速ろ過プロセスにおいて良好に除去されるものの、活性炭処理ではむしろ増大し、高度浄水処理水中でも約 10 EU/mL の濃度で残存した。また、微生物細胞の状態により、遊離エンドトキシンの存在割合が変化することが示された。一方、ヒト表皮角化細胞を用いた細胞毒性試験結果からは、低分子親水性有機物画分には細胞毒性が見られなかったのに対して、エンドトキシンを含む高分子有機物画分に強い細胞毒性が確認された。なお、浄水処理によりこの毒性は確実に低減するものの、活性炭処理後においてもなお大腸菌由来精製 LPS を上回る細胞毒性が確認された。

## 3. 給配水過程における健康リスクと消毒技術に関する検討

顕微鏡観察法と RNA 検出法により定量を行った結果、100L 相当の試料中から顕微鏡観察法では *Cryptosporidium* を検出していないが、RNA 検出法では、2 地点、3 試料で 1～5 個/100L のオーシストが検出された。これらの結果は、約 270 頭の肉牛が飼育されている流域面積約 42km<sup>2</sup> の比和川流域から最大 48 個/s、同じく約 300 頭の牛が飼育されている 131km<sup>2</sup> の西城川流域から最大 50 個/s のヒト型のオーシストが流出していると推定させた。また、水道水が生活排水に汚染された場合、十分な接触時間や添加濃度が得られない場合には、二酸化塩素処理により AOC が増加する可能性があり、二酸化塩素の消費や AOC の増加は、二酸化塩素の大腸菌に対する消毒効果において接触時間により大きく影響する可能性が示された。

## 4. 消毒技術に関する検討（消毒代替技術間の消毒機構の比較及び、それら代替技術の管理手法の開発）

紫外線消毒法においては、これまで損傷レベルを暗回復能力から検討したので、今回は光回復能力から検討を行った。結果として 0.1～1,000mW/cm<sup>2</sup> の範囲では、大腸菌の光回復能への光強の影響は見られなかった。しかし保存株への紫外線耐性が低く変わったと同時に光回復能力も抑制されており、この点の相関性が考えられた。オゾン消毒法においては、4 種の培養測定法の結果を比較することによって、不活化機構の推定を行った。オゾン溶解水による消毒では、pH が中性から低 pH 域においては、オゾン分解が抑制され残留オゾ

ン濃度が高くなるが、このような状況では、外膜損傷だけで増殖可能なような損傷レベルの低い細菌を、誤陰性としてしまう可能性が高いことがわかった。オゾン分子による反応では、外膜損傷には効果があるもの、代謝能力の抑制や酵素生成能力の抑制には至らないような弱い不活化力しか発揮できないためと考えられた。一方 pH を上げるとオゾンが分解され酸化力が強く殺菌力が強いと考えられる活性ラジカル種によるダメージによって、酵素生成能力の抑制に効果が見られたためと考えられた。オゾン曝気による消毒では、外膜損傷に関して最も効果が高いが、それと同程度に酵素生成能力および増殖能力に関して抑制能力を発揮していることがわかった。またオゾン溶解水の場合のように損傷レベルが低く増殖可能な細菌を、誤陰性としてしまう可能性は低いといえる。

#### 5. アニュラーリアクターを用いた配水管路内における微生物再増殖制御に関する研究

遊離塩素濃度を3段階（0.5mg/L、0.1mg/L、0.0mg/L）に設定して比較した結果、塩素濃度が高いほど微生物の再増殖が抑制されたが、管内面に付着する生物膜や流出水中の微生物濃度は、いずれの塩素濃度においても、通水開始当初は増加していくものの15~20日程度で定常状態となり、それ以降は増加しなかった。定常期における従属栄養細菌の付着量は、残留塩素濃度0.0mg/Lの場合に比べて、0.1mg/Lでは2log程度、0.5mg/Lでは3log程度抑制され、定常期における従属栄養細菌の流出水中濃度は、残留塩素濃度0.0mg/Lの場合に比べて、0.1mg/L、0.5mg/Lともに2log程度抑制された。また、微生物の付着量および流出水中の微生物濃度が定常に達した後、有効塩素濃度を1.0~1.2mg/Lとして1日中通水したことにより、いずれの遊離塩素濃度の場合も微生物の付着量および流出水中の微生物濃度は一時的に減少したが、5日前後で残留塩素濃度を高める前の数値前後まで回復した。管内の表面粗度については、ガラス製の試験片を加工して表面粗度を3段階（すりガラス2種類と普通のガラス）に設定し、残留塩素なしで通水したところ、生物膜の形成速度は表面が細かい程速くなった。付着した微生物濃度は普通の平滑なガラスと比較すると、表面が細かいすりガラスは2桁、粗いすりガラスは1桁大きくなった。

#### D. 結論

わが国の水道水の安全性は、塩素消毒によって確保されていると言っても過言ではない。水道における塩素消毒は、水系感染症の予防に大きな役割を果たしている。水道水の安全確保におけるこのような塩素消毒の効果は、もとより正当に評価されるべきである。しかしながら、水道における塩素消毒には、以前から指摘されているように、副生成物の生成を初めとして、水道水の安全性や快適性の面でいくつかの問題点があることも事実である。本研究は、これらの問題点を見据えつつ、現状における水道水の安全性を客観的・科学的に評価するとともに、塩素消毒や残留塩素の確保だけに依存しない新しい水道の水質管理のあり方につき模索するものである。

本年度の研究による成果の概要は以下のとおりである。すなわち、牧牛地域におけるクリプトスポリジウム等病原微生物の河川流出量を調査して、定量的に明らかにした。紫外

線消毒およびオゾン消毒による大腸菌の不活化と回復に関する一連の実験を行い、回復能力を評価するとともに、不活化機構につき推定した。代表的な水中有機物を一定条件下で塩素処理した結果生成される副生成物の毒性を、形質転換試験によって評価した場合、その毒性は染色体異常試験による場合より高く、クロロ酢酸と同程度かより強いことを示した。塩素処理を含めた浄水処理の各過程における水中のエンドトキシンの変動、並びに、その細胞毒性との関係を明らかにした。水中の有機物と二酸化塩素との反応において、接触時間や二酸化塩素添加量が十分でない場合には、AOCが増加する可能性があることを明らかにした。水道水の給配水過程における微生物学的リスク評価のシミュレーションモデルを構築して、その適用性を確認するとともに、消毒剤の残留効果がない場合を想定した配水管壁面等における微生物増殖量のシミュレーションを行い、その結果を基に病原微生物に関する健康リスクを定量評価した。配水過程における微生物再増殖につき室内実験を行い、付着微生物量が2～3週間で定常状態に達すること、定常状態における付着微生物量は水中の残留塩素濃度レベルや壁面の粗度に応じて異なること、付着微生物量は残留塩素濃度の一時的な上昇によって急減するが、その濃度が元のレベルに戻ると速やかに回復することなどを明らかにした。

最終年度にあたる来年度は、上記のような研究をさらに継続して行い、それぞれの成果を取りまとめるとともに、これらの成果を総合して、残留塩素なしを実現する上で必要となる条件などを具体的に明らかにしたい。

#### E. 健康危険情報

なし

#### F. 研究発表

別添のとおり

#### G. 知的所有権の取得状況

##### 1. 特許取得

なし

##### 2. 実用新案登録

なし

##### 3. その他

なし

厚生労働科学研究費補助金

地域健康危機管理研究事業

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 分担研究報告書

平成19年3月

分担研究報告書 1

給配水過程における健康リスクに関する検討

分担研究者 船水 尚行  
研究協力者 伊藤 竜生、野口 友寛

## 給配水過程における健康リスクに関する検討 2006年度報告

研究分担者 船水 尚行 (北海道大学大学院工学研究科環境創生工学専攻教授)  
研究協力者: 伊藤 竜生 (北海道大学大学院工学研究科環境創生工学専攻助手)  
野口 友寛 (北海道大学大学院環境創生工学専攻修士課程2年)

### 研究要旨

#### 研究目的

残留塩素に依存しない系においてリスク値を一定以下にするため方策を検討する。このために、原水水質から処理系、そして給配水系を包括的に表現し、健康リスクを確率的に推算するシミュレーションモデルを構築する。

#### 研究方法:

2005年度は (1) 検証対象物質(病原微生物)の選定, (2) 原水水質+処理系+消毒系+配水池+配水管網+給水系におけるリスクファクターの同定と要素モデルに関する文献調査を実施した。

2006年度は前年度の成果をふまえ、水源域+原水水質+処理系+消毒系+配水池+配水管網+給水系を包括的に表現し、健康リスクを確率的に推算するシミュレーションを実施するための、具体的数値、要素モデルの同定を目的として、シミュレーション対象の類型化と計算モデルのコード化を行った。

#### 研究結果:

(1)シミュレーション対象の類型化: 水道統計にある浄水量, 大腸菌群数, 過マンガン酸カリウム消費量を指標とした主成分分析により, その規模から3種類に分類した。類型化されたシステムは次のように整理される:

類型 I: 浄水量平均40,000m<sup>3</sup>/day 程度の大規模システム。処理方式は急速ろ過方式。

類型 II: 浄水量平均3,000m<sup>3</sup>/day 程度のシステム。主要処理方式は急速ろ過方式

類型 III: 浄水量平均1,300m<sup>3</sup>/day 以下の小規模システム。主要処理方式は消毒のみ。

(2) 類型ごとの原水水質変動特性: 類型ごとに下記のような平均, 標準偏差の対数正規分布で原水水質特性を表現可能であることを確認した。

類型 I: 過マンガン酸消費量: 平均:  $10^{1.09}$ , 標準偏差:  $10^{0.31}$

大腸菌群数: 平均:  $10^{4.36}$ , 標準偏差:  $10^{0.65}$

類型 II: 過マンガン酸消費量: 平均:  $10^{0.61}$ , 標準偏差:  $10^{0.35}$

大腸菌群数: 平均:  $10^{1.95}$ , 標準偏差:  $10^{1.85}$

類型 III: 過マンガン酸消費量: 平均:  $10^{-0.25}$ , 標準偏差:  $10^{0.38}$

大腸菌群数: 平均:  $10^{-1.43}$ , 標準偏差:  $10^{1.15}$

(3) 過マンガン酸消費量, 大腸菌群数とリスク評価に必要なパラメータの関係: 過マンガン酸カリウム消費量と DOC, そして DOC と BDOC のおおよその関係をこれまでの測定結果より求めた。

(4) 処理効率の変動特性: 過マンガン酸カリウム消費量と大腸菌群数について, その処理効率を水道統計より概算し, その平均値と標準偏差を類型ごとに求めた。

(5) 配水池, 配水管網, 給水系のうちの貯留水槽のモデル: 2005 年度の検討結果をもとに, 配水池, 管網, 貯留槽における塩素・有機物の消費, 微生物増殖モデルを定式化し, そのコード化を行った。

(6) 消毒剤の残留効果が無い場合を対象にシミュレーションを行った。パイプや高架水槽壁面付着微生物量の経日変化を計算した結果、壁面微生物量は約 1 週間程度で安定することがわかった。また、その濃度は現状の原水質(それにとまう浄水質)の差に大きく影響されない結果であった。配水管網内の有機物濃度、微生物濃度の空間分布の計算結果より、管網の中流域で有機物が消費され、かつ、微生物濃度が最大となることが示された。

(7) 病原性微生物に関する現状のリスク推算を行った。計算では、50年間のDALYの期待値を算出し、WHOの許容値と推算結果を比較した。その結果、カンピロバクター、ノロウイルス、クリプトスポリジウムのすべてにおいて許容値内であった。

#### 今後の研究計画

2007年度はこれまで開発したシミュレーションモデルを用い、類型化した3つの規模の異なるシステムについて、下記の検討を行う予定である。

- (1) 長期シミュレーションによる残留塩素非依存系の健康リスク評価
  - ・ 平常時、火災時、制限給水時(時間給水、減圧給水等)、管路事故時について各要因の健康リスクへの寄与を定量的に評価
  - ・ それぞれの生起確率を用いて50～100年スケールでの健康リスクの総合化を図る
- (2) 残留塩素系と非残留塩素系の比較
  - ・ 平常時について、残留塩素系と非残留塩素系についてDALY値を用いた比較
  - ・ シミュレーション対象は各類型から選択
- (3) 給配水系の構造・消毒法と健康リスクの関係

## A. 研究目的（3年間にける研究構想と2006年度研究目的の関係）

本研究では、次の大きなQuestionを用意している：

- (1) 残留塩素に依存しない系において、給配水系ではどのようなリスク要因があるか？ また、それぞれの要因の健康リスクへの寄与度はどの程度か？
- (2) 残留塩素に依存する系としない系ではDALYを評価指標とした場合にどの程度の差が生じるか？
- (3) 残留塩素に依存しない系において、リスク値を一定以下にするためには給配水系は現状のままでよいか？ 運転管理法はどうか？ 改善の方策は？

これらの検討を実施するためには、Hazard Identification 段階で対象とすべき病原微生物と化学物質（副生成物）を定め、これらの対象物が給配水系でどのように変化するか（管網内での反応、コンタミネーション、微生物の regrowth）を給配水系の流況（圧力・滞留時間分布）との関係で考察し、給水栓における対象物質の濃度分布から健康リスクの確率特性を求めることになる。

給水栓における対象物質の濃度分布に影響を与える要因として次の項目を想定する。

### (2) 浄水の水質（配水池へのInput）

浄水水質に影響を与える要因は

- ・ 原水水質とその変動パターン
- ・ 処理システムの構成と個々の処理効率とその変動パターン
- ・ 消毒法とその効率と変動パターン

### (3) 配水管網の規模・構造

- ・ 配水池容量
- ・ 配水系の絶対的な大きさ
- ・ 需要水量と管径のバランス
- ・ 配水管網の構造（配水池の数、ブロック化等、管径分布）

### (4) 給水系の構造と存在割合

- ・ 建物の規模とその分布（直結給水、高架水槽等の分布）
- ・ 需要水量の空間・時間分布

### (5) 給配水系の運転・利用状況

- ・ 通常状態
- ・ 火災発生時
- ・ 制限給水時（時間給水、減圧給水等）
- ・ 管路事故時、災害時（地震・水害）

また、シミュレーションモデルの構築にあたっては、

- ① 原水水質＋処理系＋消毒系＋配水池＋配水管網＋給水系 を総合的に扱うモデルフレームの構築（健康リスクの所在の定性的評価）
- ② Hazard Identification: 検討対象物質の設定 現状データより検討対象の病原微生物、副生成物としての化学物質を設定する。
- ③ 要素モデルの同定



- ・ 要素モデル： 原水水質モデル，処理ユニットモデル，消毒モデル，配水池内水質変化モデル，需要水量モデル，管網圧力分布・滞留時間分布モデル，給水系分布モデル
- ・ 現状データに基づく統計解析により同定

また，シミュレーション実施時には，以下の検討が必要となる。

#### (4) シミュレーション対象の類型化

- ・ 類型化の座標軸： 1. 原水水質， 2. 配水区の規模， 3. 需要形態・給水構造
- ・ ある程度，実態を反映したシミュレーション対象を設定したい。

#### (5) 長期シミュレーションによる残留塩素非依存系の健康リスク評価

- ・ 平常時，火災時，制限給水時（時間給水，減圧給水等），管路事故時について各要因の健康リスクへの寄与を定量的に評価
- ・ それぞれの生起確率を用いて50～100年スケールでの健康リスクの総合化を図る

#### (6) 残留塩素系と非残留塩素系の比較

- ・ 平常時について，残留塩素系と非残留塩素系についてDALY値を用いた比較
- ・ シミュレーション対象は各類型から選択

以上の計画のうち，2005年度に（1）検証対象物質（病原微生物）の選定，（2）原水水質＋処理系＋消毒系＋配水池＋配水管網＋給水系におけるリスクファクターの同定と要素モデルに関する文献調査を実施した。2006年度は前年度の成果をふまえ，水源域＋原水水質＋処理系＋消毒系＋配水池＋配水管網＋給水系を包括的に表現し，健康リスクを確率的に推算するシミュレーションを実施するための，具体的数値，要素モデルの同定を目的として，シミュレーション対象の類型化と計算モデルのコード化を行った。

## B. 研究方法

### (1) シミュレーション対象の類型化

日本の水道統計を用い，（1）主成分分析により給水区域，水量からシミュレーション対象の類型化を行い，平均的な浄水量，処理方式，配水区域面積の数値を定めた。（2）また，この類型化した対象をもとに，原水水質の変動特性，処理効率の大きさを定めた。加えて，（3）これまで測定されて，統計的数値を用いることが可能な水質項目（過マンガン酸消費量，大腸菌群数）とリスク評価に必要なパラメータ（BDOC，病原微生物濃度）との相関関係の統計的な検討を実施した。

### (2) シミュレーションモデルの構築

シミュレーションモデルの構築では，（4）原水水質の統計的性質の把握，（5）処理効率の変動特性の把握により，水源モデル（原水水質モデル），処理系モデルの同定を行った。また，（6）配水池，配水管網，給水系のうちの貯留水槽について，他栄養細菌の増殖，残留塩素消費をバルクの水，壁面についてシミュレーションするモデルのコード化を実施した。

原水から給水系にいたる検討のフレームを図－1のように設定し，総合的なシミュレーションモデル構築を念頭において，図中に記載した要素のいくつかについて文献調査を行い，これらのモデルならびにシミュレーションにおける必要数値に関する検討を実施した。

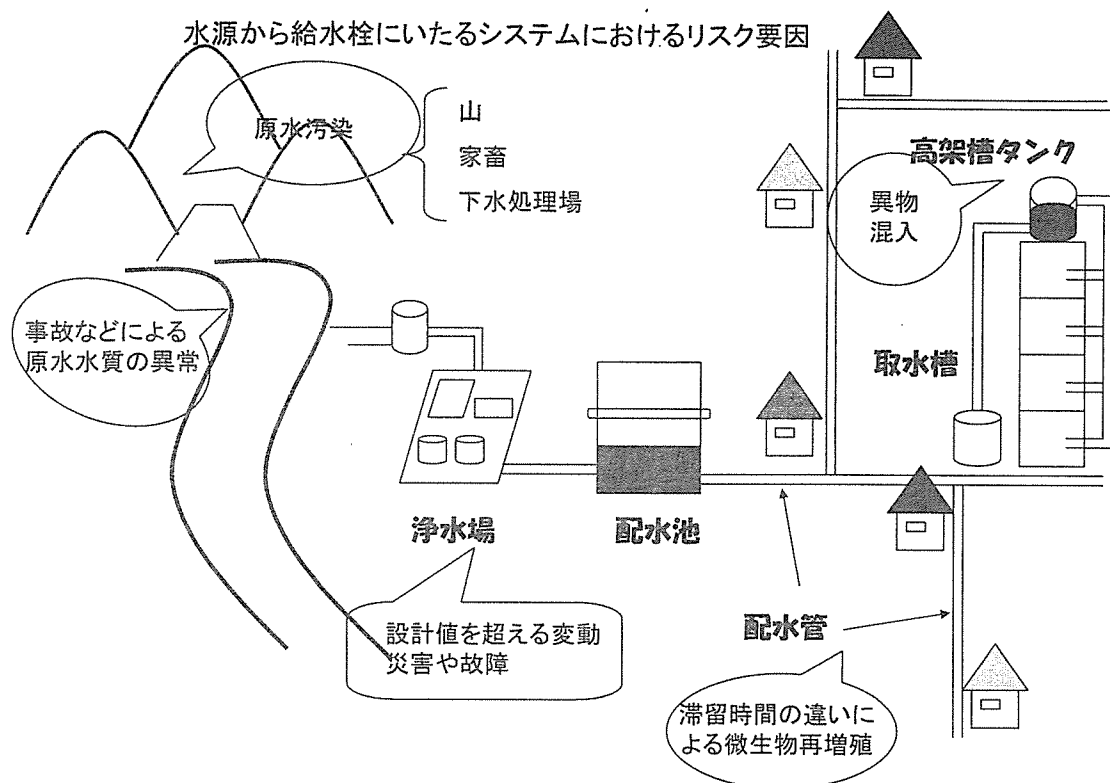


図-1 検討のフレーム

## C. 結果

### (1) シミュレーション対象の類型化

#### (1-1) 類型化の方法

日本水道統計 2003 のデータを用いて類型化を行った。原水水質で測定されている項目から、規模の要因として浄水量をまず選択した。また、リスク要因との関係から、大腸菌群数、過マンガン酸消費量、合計の3つを取り上げた。浄水量は配水区の規模を表現し、大腸菌群数と過マンガン酸消費量は水質の程度を表現している。大腸菌群数は微生物量、過マンガン酸消費量は微生物再増殖を考えたときの有機物量、消毒副生成物を考慮している。今回は消毒副生成物については考慮していない。

今回は配水区の規模や水質の程度によって日本の水道を大きく3つに分けることとした。

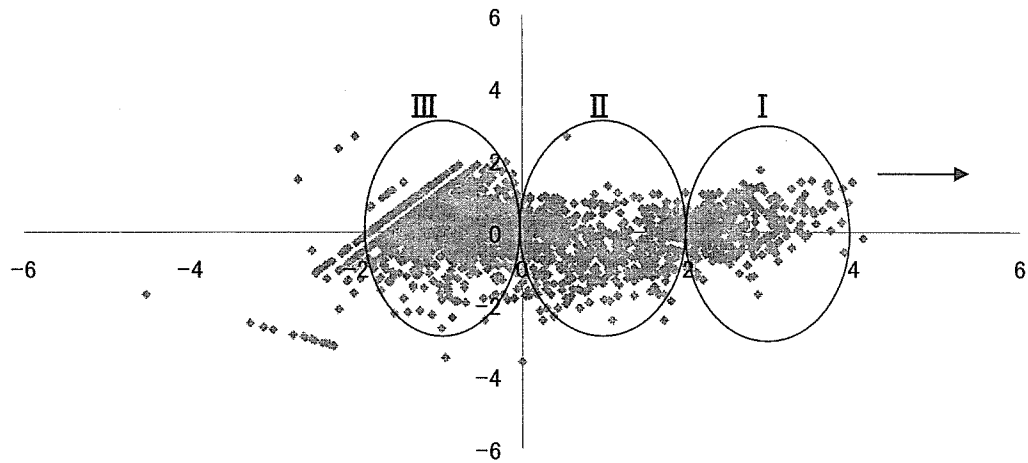
2109 の浄水場それぞれについて浄水量、大腸菌群数、過マンガン酸消費量を列挙し、それぞれの値の対数を取り (表 3-1 に一部を示す)、主成分分析を行った。

#### (1-2) 類型化の結果

2109 個の浄水場について、第1、第2主成分の得点値を用いてプロットした結果を図-2 に示す。図より、データは第1主成分上 (横軸) におおよそ分布しており、第1主成分値のみで、浄水場の特性を評価できることがわかる。第1主成分 (Z1) と浄水量(x1)、大腸菌群数(x2)、過マンガン酸消費量(x3)の関係は

$$Z1 = 0.49x1 + 0.61x2 + 0.61x3$$

の関係があり、すべての係数が正の値であることから、Z1 の値が大きくなればなるほど配水区が大きく、大腸菌群数、過マンガン酸消費量の値が大きくなり原水水質が悪いことを示している。



図—2 浄水場データの主成分分析結果

図—2の結果をもとに、シミュレーション対象を第1主成分値の大小により、3つのグループに分類した。類型Iは規模が大きくて、原水水質が悪いグループ（第1主成分値2以上）、類型IIIは規模が小さくて、原水水質が良いグループ（第1主成分値0以下）、類型IIはその中間のグループとすることができる。以下にこれらの3グループの規模、原水水質の特長を整理する。

(a) 類型I

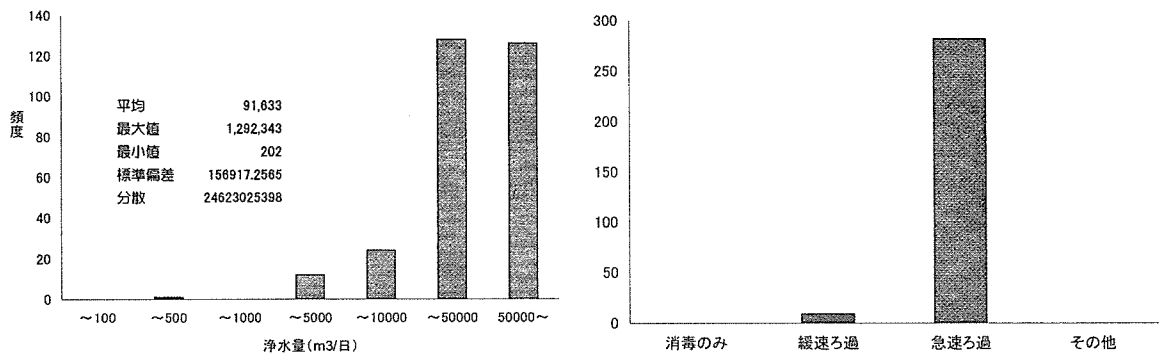
図—3に類型Iに分類された浄水場の浄水量, 処理方式の分布状況を示す。このタイプの浄水場は、浄水量が多く（平均40,000m<sup>3</sup>/day程度）、急速ろ過システムを採用している。

図—4には大腸菌群数と過マンガン酸カリウムの相関関係を示す。両者の間に顕著な相関関係は認められない。次に、これら二つの水質指標の変動特性の統計的特長を知るために累積度数分布をプロットした結果を図—5に示す。これらの結果から、原水の水質変動特性は対数正規分布に従っていることが確認された。類型Iに属する浄水場については、

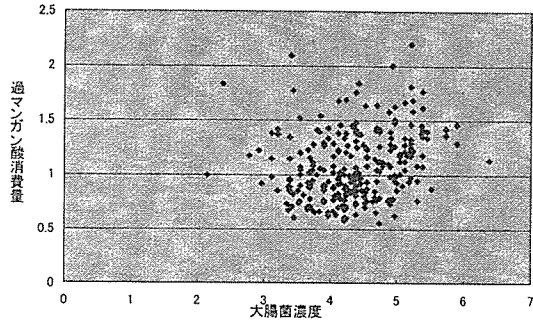
過マンガン酸消費量: 平均:  $10^{1.09}$ , 標準偏差:  $10^{0.31}$

大腸菌群数: 平均:  $10^{4.36}$ , 標準偏差:  $10^{0.65}$

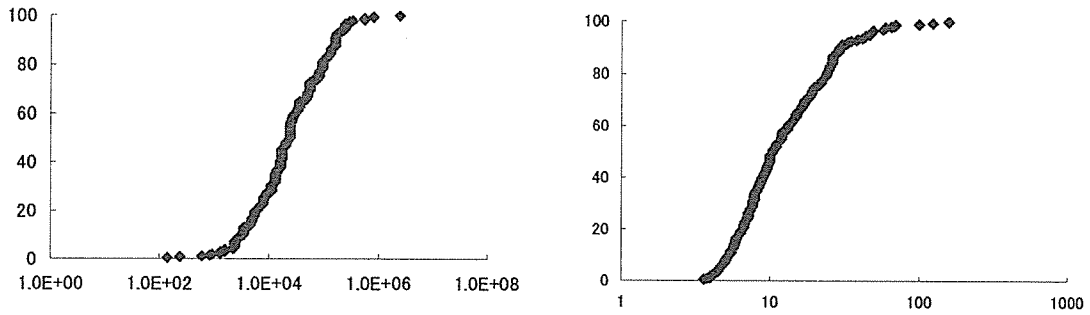
という数値を得た。



図—3 類型Iに分類された浄水場の浄水量, 処理方式



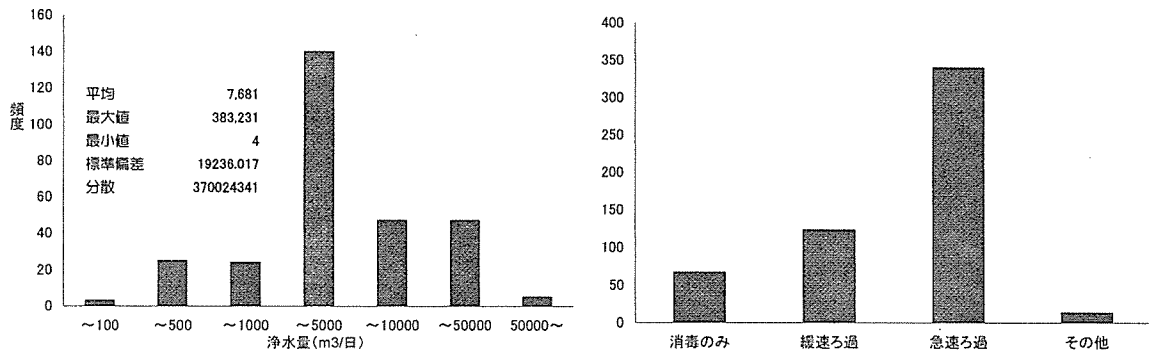
図—4 類型Ⅰ 浄水場原水水質



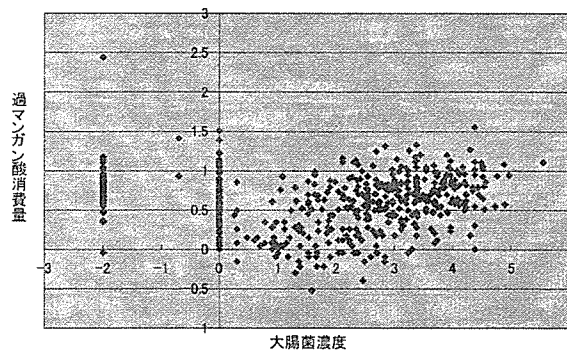
図—5 大腸菌群数, 過マンガン酸カリウム消費量の変動特性

(b) 類型Ⅱ

類型Ⅱについて、浄水量、処理方式の分布を整理して図—6に示す。類型Ⅱについては浄水量平均3,000m<sup>3</sup>/day程度のシステムで、主要処理方式は急速ろ過方式と特徴付けられた。



図—6 類型Ⅱに分類された浄水場の浄水量, 処理方式



図—7 類型Ⅱ 浄水場原水水質