



荒川
20XX

「調和型都市圏
水利用システム」の
実現に向けて





20世紀における、都市部への人口集中、産業構造の変化、そして、地球温暖化による気候変動に伴う影響を受けて、渇水、洪水、水質汚濁などの深刻化が懸念されています。人類のみならず、多くの生命にとって水は大切な財産。その貴重な水資源を、将来どのように利用していくべきか、需要と供給のバランスがとれた水利用システムをどのように構築していくか、その課題解決が急がれています。私たちは、戦略的創造研究推進事業(CREST)の研究領域である「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」において、「気候変動に適應した調和型都市圏水利用システムの開発」という研究課題に平成21年から取り組んできました。従来の都市水利用システムを見直し、将来の気候変動にも適應可能な都市圏水利用システムを提示すること、これがこのプロジェクトの大きな目的です。

水利用をデザインする

研究対象流域として「荒川」を調査・研究対象に据え、表流水や地下水のみならず、雨水や再生水など、多様な水資源の量・質を把握しながら、水利用の用途と各水資源の持続可能な活用とのベストマッチを「水利用デザイン」というフレームの中で見出すことを目指して研究を進めてきました。本冊子では、20XX年における荒川流域の水利用の将来像をイメージしながら、代表的な成果をご紹介させていただきました。これらの成果をもとに、荒川流域における水の実務に関わる方々と協働しながら、よりよい調和型都市圏水利用システムの構築を目指していきたいと思っております。

Contents

荒川 20XX 「調和型都市圏 水利用システム」の 実現に向けて

- 4 「調和型都市圏水利用システム」実現のための研究
- 6 ① 荒川流域の水資源
 - 6 荒川の水資源
 - 8 荒川の水質
 - 10 地下水・雨水・再生水
- 12 「ハノイ・ホン川流域プロジェクト」
- 14 ② 荒川流域の水利用
 - 14 表流水・雨水の利用
 - 16 地下水・再生水の利用
- 18 ③ 水利用のデザイン
 - 18 水利用システムのデザインに向けた合意形成の支援
 - 20 水利用システムのシナリオ作成ツールの構築
- 22 対談・研究成果を荒川の水利用にどう活かすか
研究代表・古米弘明／荒川上流河川事務所所長・河村賢二

「調和型都市圏水利用システム」 実現のための研究

表流水、地下水、雨水、再生水など多様な水資源の量・質を予測し、持続的かつ調和のとれた水利用システムの構築を目指すため、流域水資源、地下水、雨水、水質評価、水利用デザインの5つのグループが多角的な調査・研究を行いました。

都市雨水管理・利用

- Q 雨水の水質は? p15
- Q 都市に降る雨の活かし方は? p14
- Q 水資源としての雨水の可能性は? 将来の雨水利用のポテンシャルは? p10

- Q 荒川の表流水汚染の要因を知るには? p8

雨水

表流水

再生水

地下水

流域水資源の将来予測

- Q 2060年、荒川の流量はどうか? p7
- Q 将来、荒川での渇水は起こりやすくなるか? p7
- Q 気候変動に伴う荒川流域の降水量変化は? p6

- Q 荒川の糞便汚染の実態は? p9

- Q 温暖化がダム湖の水質に及ぼす影響は? p8

地下水管理・利用

- Q 地下水はどこから来るのか? p10
- Q 地下水の汚染を「見える化」するには? p11
- Q 将来の荒川の水質は水道水源として大丈夫か? p14
- Q 地下水をいかに使うか? 汲み上げ続けても大丈夫か? p16

水利用デザイン

- ➡ 「水利用システムのデザインに向けた合意形成の支援」 p18
- ➡ 「水利用システムのシナリオ作成ツールの構築」 p20

水質リスク評価と新規水質指標の創出

- Q 再生水の消費期限は? p17
- Q 再生水の消毒剤を減らすには? p17
- Q 下水処理水が荒川の有機物に与える影響は? p9
- Q 下水処理水も水資源? p11

荒川との比較研究
ハノイ・ホン川流域での調査・研究
日本の水利用の研究や知見をアジアの他の都市にも活かす
p12



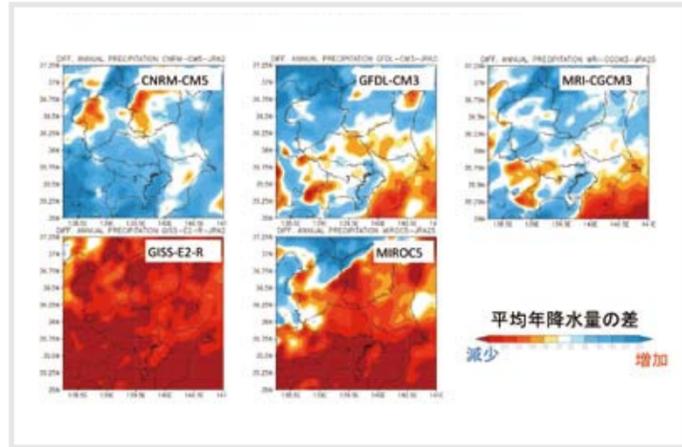
荒川流域の水資源

① 荒川の水資源

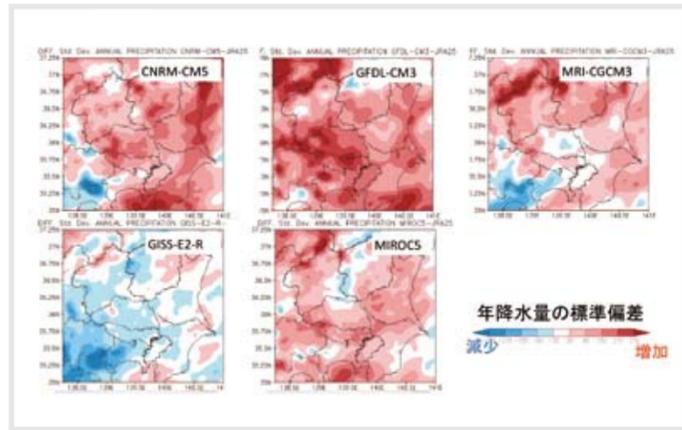
荒川の水資源をどう活用していくかを考える上で、将来的な水量の予測を立てることは非常に重要です。降水量変化や渇水の可能性など、荒川の流量の変化を予測します。

Q 気候変動に伴う荒川流域の降水量変化は？

降水量の変化は、河川流量をはじめとする表流水の量や質に多大な影響を及ぼします。荒川流域でも、降水量は季節によって変化するのはもちろん、年々その量に変化があります。では、将来的な気候変動に伴って、流域における降水量はどのように変化していくのでしょうか。その予測のため、「気候モデルによる温暖化実験の結果」、「疑似温暖化手法」、「領域気象モデルによる力学的ダウンスケーリング」を用いて検討しました（5つの気候モデル／CNRM-CM5、GFDL-CM3、MRI-CGCM3、GISS-E2-R、MIROC5による温暖化実験結果を使用し、温暖化シナリオとして、RCP4.5を使用）。その結果、使用する気候モデル(GCM)によって将来の降水量予測は大きく異なりました。しかし、多くの気候モデルで、荒川流域での年間降水量の標準偏差は拡大することが予測され、降水量が極端に多い年、極端に少ない年、というように、年ごとに変動の幅が大きくなることを想定する必要があります。(流域水資源グループ)



◀ 将来気候と現在気候における平均年降水量の差 (mm)
現在気候と将来気候での平均年降水量の差を表したもので、赤は減少、青は増加を示す。将来気候のダウンスケーリングに使用する5つの気候モデル(GCM)によって結果は大きく異なることがわかる



◀ 将来における年降水量の年々変動の変化
多くの気候モデルにおいて荒川流域での年降水量の標準偏差が拡大するという予測に、年々変動の幅が拡大され、極端に降水量が多い年、少ない年が発生する可能性が示唆される

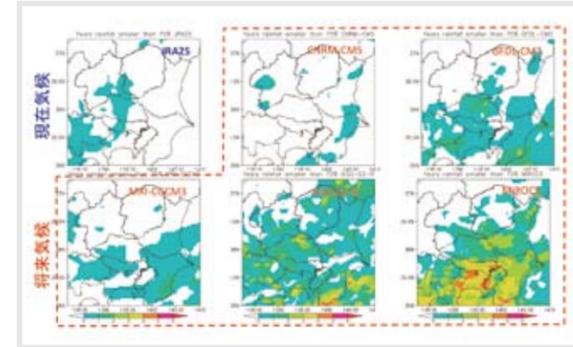
Q 将来、荒川での渇水は起こりやすくなるか？

安定した水道水源の確保を考える上で、渇水の起こる頻度や規模(程度)が将来どのようになるのかわかることは非常に重要です。そこで、前項目でも用いた、「気候モデルによる温暖化実験結果+疑似

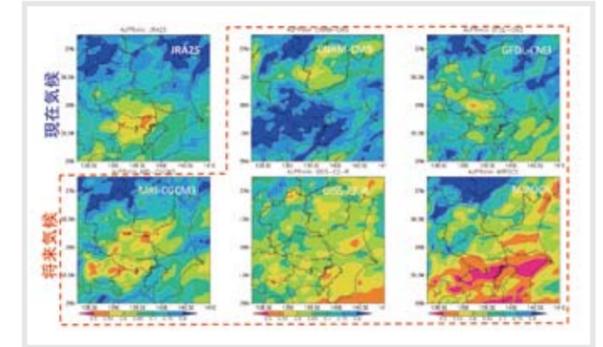
温暖化手法+領域気象モデルによる力学的ダウンスケーリング」によって得られた結果を「渇水」という視点で見てください。年降水量が現在気候の平均年降水量の75%を下回る年(回)が

どれだけ出てくるかを予測したところ、現在気候に比べて「降水量が少なくなる年の頻度」は高くなると予測されました。また、現在は年降水量が平均年降水量の75%を下回ることのない地域でも、将来

においては75%を下回る可能性があるという結果が出ています。特に水不足が問題となる夏季には、土壌の乾燥や貯水量の低下が懸念されます。(流域水資源グループ)



▲ 荒川流域周辺での少雨年の発生頻度
現在気候と、5パターンの将来気候モデルとをそれぞれ比較。黄色→赤色の地域ほど、少雨年の発生頻度が高くなると予測される



▲ 対象とした11年間の夏季最小積算降水量の最小値の分布
用いた気候モデルの中では、GISS-E2-R、MIROC5で顕著に少ない時期が見られる。年初から夏までの積算降水量が少ない場合には、現在よりもその程度が激しくなる(降水量が少なくなる)

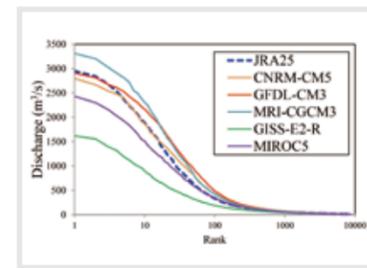
Q 2060年、荒川の流量はどうなる？

降水量の変化に伴って、荒川の河川流量はどのように変化していくのでしょうか。流域内の降雨分布や地形・地質などの不均一性を考慮できる「分布型水文モデル」に

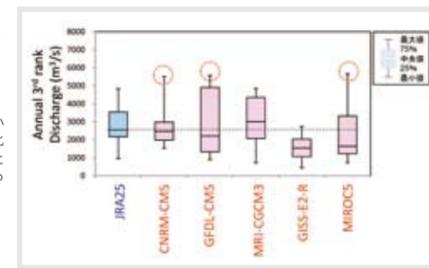
前述の降水量の将来予測結果を与えることにより、2060~2070年頃の河川流量がどのようになるのかを予測してみました。2000~2010年の現在気候との

比較では、降水量の変化と同様に、気候モデル(GCM)により、流量の増加/減少傾向は異なります。しかし洪水流量に着目して、その最大値を見てみると、増加し

ているケースが多く見られます。将来気候においては、洪水規模が増大する可能性があると考えられます。(流域水資源グループ)



◀ 現在気候/将来気候のもとの流況曲線
※ 時間単位流量/秋分瀬取水堰地点
日々の流量を降順:大→小の順に並べかえてグラフ化したもの。降水量の変化と同様に、気候モデルによって結果が大きく異なる



◀ 洪水(年間上位3位平均)流量の変化
※ 時間単位流量/秋分瀬取水堰地点
各年上位3位までの流量の平均値を示したものである。グラフ中の箱型(色が塗ってある部分)、線の大きさ・長さ、その値の年々変動の大きさを示す。中央値を見ると、現在気候と比較して増加/減少のどちらの傾向もみられるが、最大値では増加しているケースが多くみられる



谷口 健司
金沢大学理工研究域
環境デザイン学系
准教授

様々な変化の可能性を考慮して研究を続けていくことが重要

地球温暖化により様々な気候の変化が考えられる中、私たちは将来の降水量変化について調べました。そこで得られた結果は、将来における平均的に使える水の量や渇水の程度を想定し、水利用計画を立てる際に役立つものと考えています。しかし、複数の異なる温暖化予測には大きなばらつきが見られ、降水量が増加するのか減少するのか、そして、渇水の程度は現在に比べて激しくなるのか、といったこ

とを判断するには非常に難しいものとなりました。今後は不確実性(ばらつき)を含む予測から、どのように有用な情報を抽出するかを考える必要があります。また、今回はひとつの温暖化シナリオ(温暖化の程度)に基づいた研究でしたが、他のシナリオによる予測結果も活用し、様々な変化の可能性を考慮することや、新たな温暖化予測をフォローしながら研究を続けていくことが欠かせないと考えています。



石平 博
山梨大学国際流域
環境研究センター
准教授

気候変動予測の結果を流域水資源に関する情報に「翻訳」する

都市における安全・安心な水の安定的な供給を今後も継続的に行っていくためには、将来起こり得る地球規模での気候変動が、地域・流域スケールでの気象条件の変化を通じて河川の水量・水質にどのような影響を及ぼすのかを見積もり、それに基づいた水利用計画を考える必要があります。私たちは、地球温暖化に伴う気候条件の変化を流域スケールの詳細な気象情報へと変換(ダウンスケール)し、その情報

から河川の水量・水質の変化を推定する方法の開発に取り組みました。都市圏の水利用に関する温暖化への適応策をより具体的に検討するために、地球規模での気候変動予測の結果を流域水資源に関する情報に「翻訳」する技術へのニーズは今後さらに高まることが予想されます。本研究で開発した手法の改善・改良や応用に関する研究を継続していきたいと考えています。



荒川流域の水資源

② 荒川の水質

水資源を考える上では、荒川の水がどの程度汚染されていて、そして、その汚染が何に由来するものなのかを把握することが重要です。多角的な調査で、荒川の水質を研究します。

Q 荒川の表流水の汚染要因を知るには？

地理的な要素を扱うことのできるGISと呼ばれる情報システムに、荒川の汚染に関係がありそうな要因の情報をデータベース化しました。それを用いて、一般細菌数のデータに関して分析を進めたところ、各河道地点における一般細菌数の平均値や最高値などと、その地点の集水域の特徴を示す値との間に強い相関関係があることが示されました。「上流域に人口や家畜が多い河川では河川水が汚染されている」という関係性が明らかになり、汚染との関係が説明しにくい特定の要因(地質など)にも、河川の汚染と相関関係があることが示されました。

また、統計的な分析の結果、各地点の一般細菌数出現頻度を

示すパラメータを集水域の特徴を示す数値で説明できることがわかりました。これは、右図のように集水域のデータベースがあれば、任意の河道地点に対して細菌数の濃度頻度を推定することができ、水質の予測や水利用者の感染リスク評価ができることを意味しています。将来、集水域の状況が変化した場合でも、河川水質の予測や評価を行うことができます。このように汚染要因の把握と水質の評価に集水域データベースが役立ちます。(流域水資源グループ)

▶ 汚染の可能性のある河川、感染リスクの評価

荒川流域のすべての河道の一般細菌による汚染度を計算し、河川の水を直接に摂取してしまった場合の感染リスクを評価。図は汚染が最も高いと思われる時の汚染濃度と、その時に直接摂取してしまった場合の感染リスクのマップ。ここで示した評価の範囲では、汚染濃度がかなり高い時であっても感染のリスクはリスクの判定基準を超えないことが示された。



▲ 荒川・利根川流域の表流水に関連する汚染要因を探る

河川水質データと流域の特徴を示す情報(上記132項目の集水域情報をデータベースとして整備した)から統計的な関係を分析



Q 温暖化がダム湖の水質に及ぼす影響は？

1日35万m³の水道用水を供給している浦山ダムを対象に、浮遊物質(SS)やクロロフィルa(Chl.a)を含む水質予測を行い、ダム湖内と

下流河川における水質変化を検討しました。将来のダム湖の水温予測においては、表層で2.8℃、中層で2.0℃、底層で1.6℃高くなり、

将来、水面近くの暖かい層と底付近の冷たい層の水温差が大きくなり成層が強固になるため、ダム湖の水質悪化につながることを示唆

します。また、ダム湖の大きな水質問題にアオコがあります。アオコとは、植物プランクトンの異常増殖

様々な変化の可能性を考慮して研究を続けていくことが重要

上記で紹介できなかった研究成果に、ダム下流の河川における影響があります。ダム湖の水質が変化するという事は、下流の河川にも影響があるということです。将来気候では大雨の回数が増えるため、多量の土砂が河川を通じてダム湖にもたらされ、ダム湖全体に濁りが広がる機会が増えます。そのため、下流河川への濁水の放流期間が大幅に増加することが予想されます。また、ダム湖の水温が上昇する

と下流への放流水温も上昇します。これらは下流河川に住む魚などの生物に影響を与えます。幸いダムには、水質を保全するために、ダム湖の任意の深さから水を取ることができる選択取水設備というものがありません。しかし、この運用によってもダム湖や放流水の水質が大きく変化するので、将来のダム湖の水質問題を回避あるいは軽減するために、さらに賢いダムの運用管理が求められます。

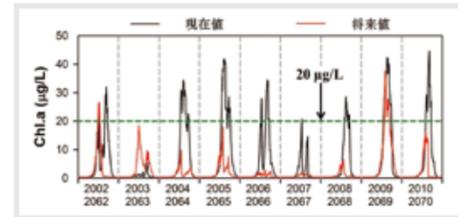


矢島 啓
鳥取大学大学院
工学研究科
准教授

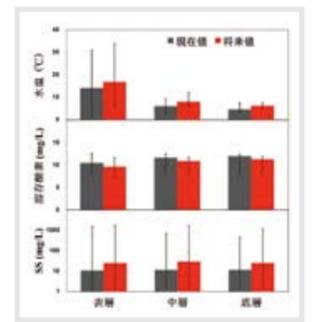
により水面が緑色になり、悪臭を放つ現象ですが、この植物プランクトンの指標となるChl.a濃度は将来低くなるのが予想されました。水温の上昇は植物プランクトンの増加につながると思われますが、本研究では、将来の気温上昇に伴った水温の上昇がかえって植物プランクトンの増殖に適さなくなること、また頻度の高い出水とダム湖の表層からの取水により表層付近にいる植物プランクトンが排

出されること、さらに出水後に残留する濁水により光合成が阻害されることといった要因から、植物

プランクトンは増加しにくくなる予測されます。(流域水資源グループ)



▲クロロフィルa濃度の比較/現在気候と将来気候
表層の日平均濃度が20µg/L以上を超える日数は、9年間で現在気候では370日、将来気候では66日と、将来的にChl.a濃度は減少すると予測される



▲ダム湖内における現在と将来の水質変化
予測された気象データと浦山ダムへの流入量データをバイアス補正し、ダム湖の水質予測を行った

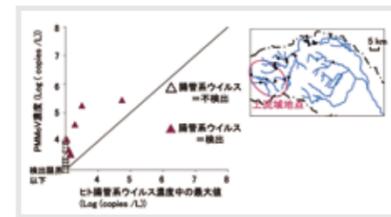
Q 荒川の糞便汚染の実態は？

今回の調査では、アイチウイルス(AiV)をヒト糞便汚染起源を推定する指標に、トウガラシ微斑ウイルス(PMMoV)をヒト糞便汚染指標の有無を推定する指標とし、荒川流域におけるAiVの定量、PMMoVの定量および起源推定の調査を行いました。その結果、AiVは他の腸管系ウイルスと同様

に下流地点から検出され、一方、PMMoVはヒト腸管系ウイルスに比べ高濃度で存在しており、AiVと同様に人口の少ない上流域地点では、PMMoVは検出されませんでした。PMMoVは雑排水中では検出されない(あるいはごく低濃度である)ことが多く、荒川流域においてPMMoVが最も高濃度で

あるということから、ヒト糞便による汚染の可能性が高いとい

う結果を示します。(水質評価グループ)

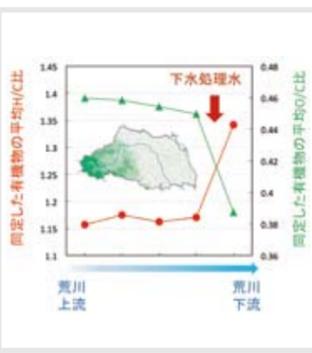


▲ 荒川におけるPMMoVとヒト腸管系ウイルスの関係
腸管系ウイルスを検出した試料において、PMMoVの濃度が高いことが確認され、水環境中のPMMoVがヒト由来である可能性が示唆された

Q 下水処理水が荒川の有機物に与える影響は？

荒川の有機物組成が流下に伴ってどのように変化しているかを調査・分析しました。従来は複雑な有機物組成を解析する手法に限界ありましたが、本研究では、高分解能・高精度を特徴とする「フーリエ変換質量分析計」を利用して、有機物の特徴を分子レベルで明らかにすることを試みました。上流から下流にかけての有機物の組成変化を詳

細に評価した結果、下水処理水が流入した地点では、有機物分子の平均H/C比(炭素に対する水素の比)が上昇する一方で平均O/C比(炭素に対する酸素の比)は減少する様子が観察され、下水処理水の流入によって水中の有機物組成が大きく変容する様子をとらえることができました。(水質評価グループ)



▲ 荒川における河川流下に伴う有機物組成の変化
下水処理水の影響を受けて、河川水中の有機物組成が大きく変容している

最新の学術分野を理解する“虫の眼”と社会に役立てる“鳥の眼”

ハノイでは、都市近郊を流れる河川において、様々なウイルスが流入している様子を調べることができました。旧正月の季節には池からアヒルがいなくなったり、汚染の季節変動なども文化的な活動の影響を受けるのだな、などと感じて、興味深い経験をさせていただきました。また荒川の家畜雑排水の研究では、協力していただいたご家庭には感謝の気持ちでいっぱいです。今回のプロジェクトではいろいろと面白い

研究をさせていただきました。水中の病原微生物を調べるために、分子生物学などの最先端の学術分野を深く細かく理解する“虫の眼”と、人々の生活の中でどのような水が必要か、どのような技術が必要か、どのように社会に役立てるか、という社会を俯瞰しながら考える“鳥の眼”の両方が必要だと感じます。その両方の眼が活かされていると感じたとき、充実した研究ができていると思います。



片山 浩之
東京大学大学院
工学系研究科
准教授



荒川流域の水資源

③ 地下水・雨水・再生水

都市圏の水利用を考えるにあたり、地下水、雨水、そして再生水をいかに活用していくかも重要なポイントです。水資源として安全に活用する上で必要な調査・研究を行いました。

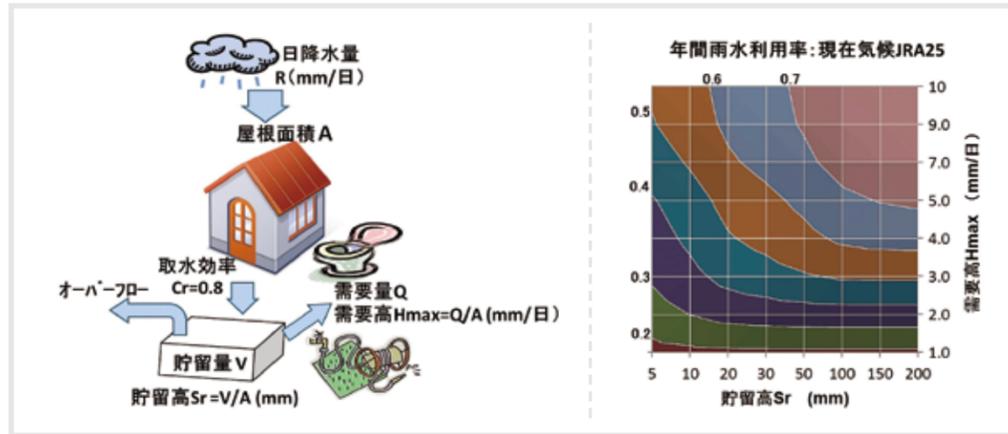
Q 水資源としての雨水の可能性は？ 将来の雨水利用のポテンシャルは？

貯留する規模を大きくすればするほど、またたくさん使うほど年間に利用できる雨量は大きくなります。例えば、荒川流域では貯留高20mm、需要高4mm/日の場合、年間雨水利用率は約0.5であるのに対し、貯留高50mm、需要

高9mm/日の場合は約0.7です(現在気候モデルJRA25の2000年～2010年の平均)。荒川流域の住宅系・非住宅系の建物すべてに、それぞれ屋根面積に対し貯留高20mm、50mm規模の貯留槽を設置し、住宅系で

屋根面積に対し1日に最大4.4mm(トイレ)、非住宅系で9.3mm(トイレ・散水)の雨水利用を行った場合、現在気候では1年間に貯留槽容量の約33杯分の雨水利用が可能。また、将来気候において悪いケースでも約28杯分の雨水

利用が可能であるという予測が立ちます。※現在気候モデルJRA25より再現した2000年～2010年の少雨年、将来気候5モデルより再現した2060年～2070年の少雨年を対象として試算(都市雨水管理・利用グループ)



◀ 雨水利用率の試算
流域の住宅系、非住宅系含むすべての建物では、雨水の貯留高や需要高が増えれば雨水利用率も増える

Q 地下水はどこから来るのか？

地下水の持続的な利用のためには、地下水の起源(雨水が河川水か、どの地域から涵養されてい

るか)や平均滞留時間(地表から浸透して井戸に到達するまでの時間)の把握が重要です。そこで、

地下水の水分子を構成する酸素・水素原子の安定同位体を利用し、周辺地域の雨や地表水と比較する

ことで、地下水の主要な涵養源や涵養域を調べました。その結果、荒川中流域の地下水の主な起源



林 武司
秋田大学教育文化学部
教授

絶えず変化する「地下水の在り方」を継続的に調査する

地下水は適切に利用しなければ、汲み上げすぎで枯渇したり、地盤沈下が発生したりします。地下水を適切に、持続的に利用し続けるためには、地下水の在り方、すなわち「地下水がどこで涵養されて、どこへ行くのか」、また「どれくらいの時間をかけて移動しているのか」を把握することが重要です。このため、井戸から地下水を採取して様々な化学組成を調べたり、井戸の掘削記録や学術調査によって得ら

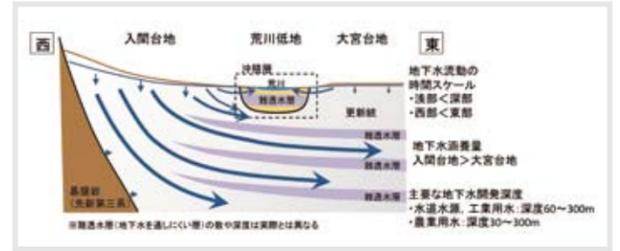
れた地下地質情報から帯水層(地下水の取水層)の分布構造を把握するなどして、様々な情報を蓄積する必要があります。また、地下水の在り方は、気候変動や各地域での地下水利用によって絶えず変化しています。このため、地下水資源を維持・管理していくために、研究機関と自治体や国が連携して調査・監視を継続し、変化を把握して地下水利用の適切な方策を検討し続けていくことが必要です。

は、周辺の台地上に降る雨や、入間台地上を流れる河川に由来するものであるということがわかりました。

また、地下水に含まれる放射性同位体や、フロン類などの化学物質の濃度を把握することにより、平均的な滞留時間を概算しました。その結果、荒川周辺の地下水の平均的な滞留時間は、地下

20～50mで20～50年程度、地下150m付近で50～70年以上と推測されます。長期に渡る地下水揚水によって地下水の流れが変化し、滞留時間の短い＝若い地下水(数年～10年程度)と、滞留時間の長い＝古い地下水(数十年以上)が地下で混合されるようになってきたと考えられます。

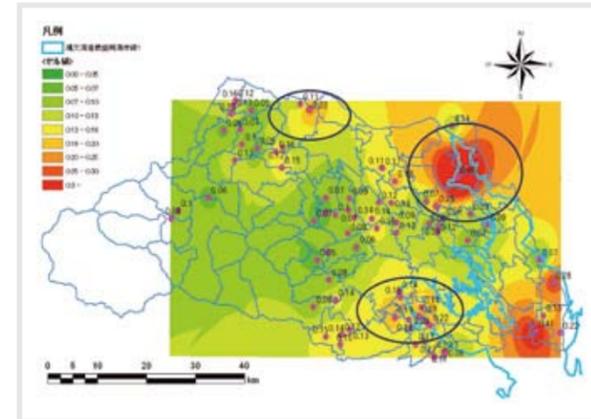
(都市地下水利用・管理グループ)



▲ 荒川中流域の地下水涵養・流動機構の模式図

水道用水・工業用水は、水質・水温がより安定している深い帯水層からの取水が望ましい。ただし基本的に、地下深部の地下水ほど滞留時間が長くなるので、開発深度を拡大させることは好ましくない

Q 地下水の汚染を「見える化」するには？



地下水の汚染状況を明らかにし、汚染源(自然の地層から由来する汚染か、人間活動に由来する汚染か)を推定するために、調査の結果を地理情報システム(GIS)により示し、「見える化」することを目指しました。

地下水の汚染の状況は地表からはわからないため、埼玉県内の荒川中流域にある複数の地下水観測井戸や使用中の井戸から採水し、自然の地質による汚染と、人間活動による汚染の両方が考えられる汚染物質として、臭化物イオン(Br-)を対象に地下水の水質を

調査しました。

自然由来(海水由来)のBr-は、同時に分析したCl-との濃度の比が一定であるため、人為的な汚染との区別が可能です。人為的な汚染が疑われた場合は、地下の地層や、地表の土地利用の状況、都市、工場など人間活動の状況を調べてその結果をGIS上に表示することにより、汚染源が見えてきます。これにより、Br-濃度が高く、水利用に留意が必要な地域や、適切な水処理が必要な地域を一目で把握できるようになります。(都市地下水管理・利用グループ)

Q 下水処理水も水資源？

下水処理水は、用途を選べば高度処理して再生水として利用できる水資源になり得ます。しかし、現在の下水処理水の再利用率は全国平均でわずか2%にすぎず、まだまだ利用は進んでいないのが現状です。

現在、さいたま新都心のビル群のトイレでは、洗浄水に下水処理水を再生水として使用しています。都心では、水を遠く離れたところから引いてくるよりも、都市の中にある水資源として再生水を使用の方がはるかに効率的です。

また、再生水は気候変動の影響を受けにくい、量的にも安定的な供給が見込めるという利点もあります。調和型の水利用を考える上で欠かせない選択肢のひとつです。(水質評価グループ)



さいたま新都心では、トイレ洗浄用水に再生水が導入されている



屋井 裕幸
公益社団法人
雨水貯留浸透技術協会
技術第二部長

「雨水は資源」という本来の考え方に立ち返る

荒川流域において、水の適切な貯留規模と需要量を想定すると、流域の降雨量のうち、少雨年においても年間85.5mmほどの雨水利用が可能だと推測されます。これは現在の荒川流域の水道水使用量の18%に相当します。今回の研究で、将来においてもこの雨水利用ポテンシャルは極端には目減りしないことがわかりました。近代日本の雨水対策は、雨水を「厄介者」として扱い、「早く下水道や川へ排除してし

まおう」という考え方に立って進められてきた感があります。これは本来の「雨水は資源」という考えの対極にあります。気候変動と人口減少、それに伴う土地利用の変化が予想される日本においては、都市に降る雨水を厄介者として扱うのではなく、所々に留め置いたり、時にはなだめて地下へ浸み込ませたり、適切に利用しながら上手に長くつきあうことが大切と考えています。

ハノイ ホン川流域プロジェクト

日本の水利用の研究や知見をアジアの他の都市にも活かす

ハノイはホン川流域の低地にあり、荒川低地に位置する東京と似た地形にあることから、東京の水利用、水源開発、水マネジメントの経験が活かせる可能性があります。

さらに、ハノイにおける持続可能な水マネジメントの事例は、アジアの他の国と都市にも適用できる可能性を持っています。



ハノイ市の水道計画について解説する水道局職員



ハノイの水道用地下水井戸

多様な水源から、多様な方法で水を供給するハノイ

アジアの都市人口は急速に増加しており、なかでもベトナムの首都であるハノイは人口の増加率が高く、都市域の拡大につれて水需要が急増しています。これに対して、水供給施設の建設は遅れがちで、水不足が常態化し、住民は多様な水を利用しています。将来の気候変動は、渇水や洪水など様々な問題を引き起こす可能性があり、日本の水利用における経験や研究はハノイにも活かせると考えます。また、ハノイでは、多様な水源から、多様な方法、

多様な浄水処理法により水を供給しており、これらの水供給が、将来の人口減少を控えた日本の水供給と水管理の方法に重要な示唆を与える可能性もあります。



渇水による河川水位の低下

2 ハノイの重要な飲用水源である地下水が抱える課題は？

ハノイでは、飲用水源として地下水が重要な水資源となっています。そこで、ハノイの地下水の流れ、ため池からの地下水涵養量、地下水水質の特長などについて現地調査を行いました。その結果、ため池からの浸透は地下水涵養にとって重要である一方、その浸透水や土壤中に多く含まれるヒ素と有機物が地下水のヒ素汚染に寄与している可能性を示しました。

また、ハノイの一般家庭を170カ所以上訪問し、現地で広く普及している家庭用浄水装置の効果を検証したところ、浄水装置で処理した後も飲用水中のヒ素濃度がWHOのガイドライン値を超過しているケースが見られるなど、現状の課題が明らかになりました。

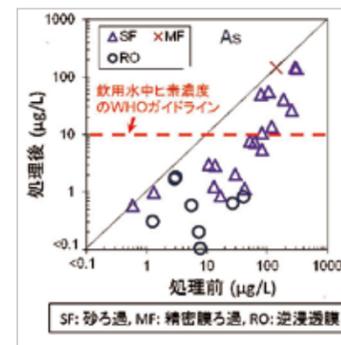
さらに、浄水場から各家庭の屋上貯水槽を経由して蛇口に届くまでの水質変化を調査した結果、水道管路

網や貯水槽の内部で残留塩素が著しく減少しており、ハノイにおける現在の水供給システムが微生物の混入や再増殖に対してきわめて脆弱であることがわかりました。

(都市地下水管理・利用グループ)



土壌コア、間隙水、地下水の採取と分析



地下水を原水とする水道水中のヒ素濃度と家庭用浄水装置の効果

ハノイで広く普及している家庭用浄水器の効果を検証。砂ろ過や精密膜ろ過処理の後でも、ヒ素濃度がWHOのガイドライン値を超えるケースがあることがわかり、浄水装置の適切な選定と維持管理などの課題が浮き彫りとなった。

3 ハノイでの水利用の実態は？

ハノイ市内および郊外において水利用実態調査(用途別水使用量の把握)を実施しました。小型水量メータによる計測および電子端末によるアンケートでの実態把握で、用途ごとに地域差、住民の水意識による使用量への影響の有無を確認することができました。また、アンケートでの使用量把握の正確性が用途ごとに評価できたことを受け、郊外部で今後の詳細な水需要の予測が可能となりました。



台所へのメータ設置例
洗濯機へのメータ設置例



集落の変容

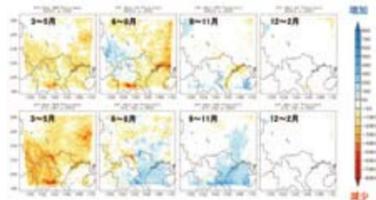
水環境の実態については、まず、集落の変容について調査。集落の高密度化による水面の埋め立て、そして街路における常態的な浸水が見られました。そうした集落での水環境は、近代的な水道が近年通ったものの、いまだ水質が悪いこと、雨水を使い続ける世帯もあるが、若い世代はそれを好まないことなどが明らかになりました。コミュニティ・ミーティングでは、こうした情報をフィードバックしながら、集落の水利用の状況や背景を理解しました。今後、コミュニティにおける自主マネジメントの可能性を高めていくことが重要です。



ハノイで行われたコミュニティ・ミーティングの様子

1 ハノイ・ホン川流域の降水量及び流量はどのように変化するか？

現在気候と将来気候の比較を表したものの、春・夏に降水量の減少がみられるが、秋・冬の変化は小さい



ホン川流域周辺における季節別降水量の変化

大都市ハノイの水源は、現在、主として地下水に依存していますが、今後の水需要増加へ対応するため、表流水の利用量も増加していくことが予想されます。では、将来の気候変動にともないハノイ・ホン川流域の降水量、流量はどのように変化するのでしょうか。

温暖化予測結果に基づくホン川流域周辺での降水量の変化(現在気候と将来気候の差)は、春・夏の変化が顕著で、変化の傾向は季節ごとに異

なり、秋・冬の変化は小さいと推測されました。この予測に基づいた、ハノイ地点の河川流量の将来予測は、雨季前半(5~7月)でホン川の流量が減少し、それに伴い河川水位が低下するというもので、ハノイ地下水帯への影響が懸念されます。河川水位の変化により、河川と周辺地下水の水交換量に変化し、河川から地下水帯への補給量が減少する可能性があります。

(流域水資源グループ)

水利用の用途ごとにきめ細かい需要予測が可能になる



大瀧 雅寛
お茶の水女子大学大学院
人間文化創成科学研究科
教授

ハノイ郊外や市内の家庭を戸別訪問し、用途ごとの水使用量を測定するという現地調査は困難を伴うもので、収集できたデータはかなり貴重なものと言えます。このデータを基に将来変化すると考えられる用途、そうでない用途というように、用途ごとにきめ細かい水需要予測が可能になると考えています。また用途ごとに求められる水質も違います。従って水道水、地下水、雨水を使い分けると

いうような多源給水を考える上でも、それぞれの必要量を想定できるなど水資源管理上有用なデータとなりました。そもそも使用者にとって、水使用量は全量として把握しているのかは把握しにくいものです。このような情報を使用者にフィードバックすることにより、節水意識の向上など、効率的な水利用の推進に役立てられるという展開も考えられます。

ハノイの水道ではヒ素と微生物による健康リスクが課題



小熊 久美子
東京大学大学院
工学系研究科
准教授

ハノイの地下水は、場所や深さによってヒ素濃度が大きく異なるため、水源井戸の適切な設置や、原水水質に応じたきめ細やかな浄水プロセスの検討が望まれます。水不足が懸念される中、ため池底泥の浚渫は、地下浸透量の増加だけでなく、地下水のヒ素汚染の抑制にも有効な可能性があります。

ハノイの水道水では、ヒ素と微生物による健康リスクが特に重要ですが、現行の家庭

用浄水装置では十分に対応できていません。利用方法の改善に加え、装置の規格化や第三者機関による認定制度の導入など、制度面の対応も望まれます。また、ハノイでは屋上貯水槽の利用が一般的ですが、貯水槽滞留中に水質劣化を生じています。短期的には、貯水槽の適切な維持管理の徹底が、長期的には、貯水槽を要しない安定した水供給システムの確立が求められます。



荒川の水利用

① 表流水・雨水の利用

様々な水資源を具体的にどう利用していくかをデザインするために、各種水資源の水質や水量を知ることが大切です。荒川の表流水はもちろん、都市部に降る雨の活かし方も考えます。

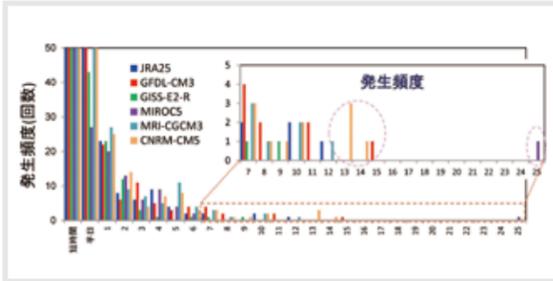
Q 将来の荒川の水質は水道水源として大丈夫か？

気候変動に伴う降水量の変化は、河川の水量だけでなく水質にも影響を与えます。そこで、水道水源としての適性(使いやすさ)を考える上で一つの基準となる「水の濁り」が、荒川ではどのように変化するかを調査・予測しました。

「生活環境の保全に関する環境基準」に照らし合わせ、水道水源としての適性(浮遊物質濃度SSが25mg/Lを超える/超えない)に水量の変化について検討した結果、現在気候と比較して、秋ヶ瀬取水堰地点においては温暖化時には

高濃度SS(懸濁物質、浮遊物質)が発生する継続日数が増えるケースが見られることが推測されます。また、年総流出量は適用する将来気候モデルによって増えるケースと減るケースが見られましたが、水道水に適した河川水量

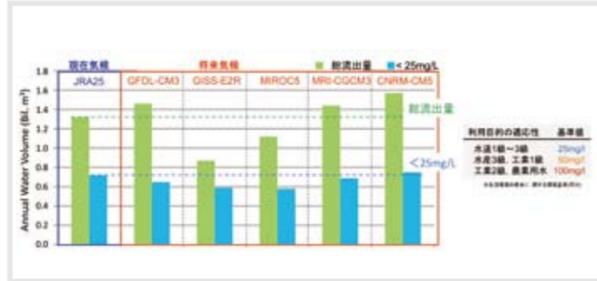
については、5つの将来気候モデルのうち1つのケースを除き、減少傾向を示しました。これは、年総流出量が増えたとしても、必ずしも水道水源に適した水が増えるわけではないことを示しています。(流域水資源グループ)



▲高濃度SS発生頻度の変化

※秋ヶ瀬取水堰地点

青の棒グラフが現在気候での発生頻度を表す。それと比較して、温暖化時(他の色の棒グラフ)で高濃度SS継続日数の大きいケースが見られる



▲SS濃度別の年流出量

※秋ヶ瀬取水堰地点

年総流出量(緑の棒グラフ)については、温暖化実験(使用する気候モデル)によって増えるケース/減るケースが見られる。一方、SS濃度が低く水道利用に適した河川水量(水色の棒グラフ)は、CNRMのケースを除き、5~20%の減少傾向を示している

Q 都市に降る雨の活かし方は？

極端に市街化の進んだ東京において、100mm/hの豪雨が1時間降った場合、建築敷地からの雨水流量の占める割合は全体の

約6割、道路では約2割となります。そうした雨水をただ排除するのではなく、水資源の有効利用、地下水涵養、水害軽減及びヒートアイ

ランド現象の緩和という観点から、都市の水循環系の健全化を考えると、グーグルマップを利用し、雨水・再生水利

用施設等データマップなどを掲載、雨水利用の状況を紹介しています。(都市雨水管理・利用グループ)



▲都市での雨水利用イメージ

貯留浸透利用施設に貯められた雨水は、緑化散水やトイレ洗浄水など、様々な用途が考えられる



▲市街化と保水力・緑被率のバランス

市街化が進めば雨水の表面流出は増大するが、浸透施設、貯留施設を設置することで自然状態に近づけることは可能



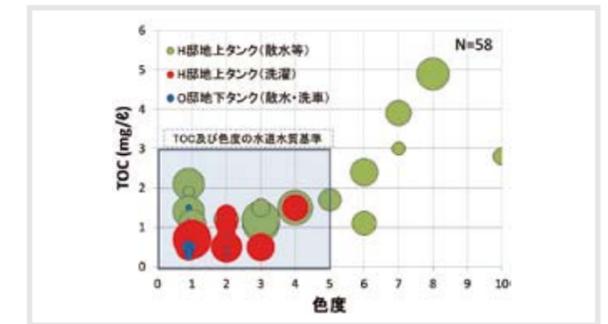
▲ゲーグルマップを利用した雨水・再生水利用施設等データマップ

グーグルマップを利用して、雨水・再生水利用施設や再生水供給施設の位置をアイコンで表示している。IDとパスワード登録により、自由に閲覧やデータ入力・更新が可能(<http://usui.strata.jp/rainwatermap/>)

Q 雨水の水質は？

雨水は腐りません。それは、もともと雑菌や不純物をほとんど含んでいないからです。雨はもともと、海や湖、池、沼、地表などから蒸発した水分であり、それが雲となって、雨や雪を降らせます。従って、雨の成分は蒸留水と同じなのです。雨は、通過する大気、屋根、貯める水槽などの汚れがどの程度あるかによって、水質が変わります。それらの汚れがほとんどなければ、良好な水質を維持することができるのです。屋根雨水については、初期雨水カット(雨

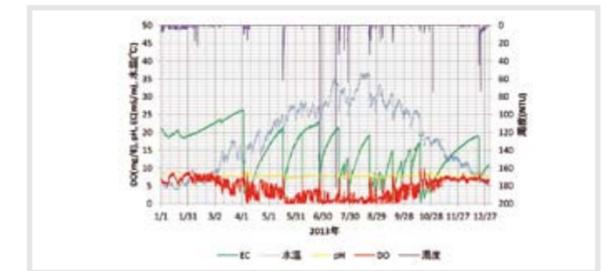
量の定率カット)を行うことにより、濁度は2度未満に、色度及びTOC(全有機炭素)は、水道水質基準に概ね適合できるまで維持することが可能です。また、一般細菌数はTOCが小さく滞留時間が長いと菌数が少なくなる傾向にあります。道路排水についても、初期雨水カット(定量カット:10mm/h)を行うことにより、貯留雨水の水質が維持でき、重金属濃度も問題の無い水質レベルでした。(都市雨水管理・利用グループ)



▲貯留雨水(屋根)の色度及びTOCと一般細菌数の分布

※2013年5月~2014年12月

円の大きさが一般細菌数を表している



▲道路排水の貯留水の水質モニタリング結果(2013年)

濁度は降雨により一時的に上昇するが、初期雨水カット(定量カット:10mm/h)を行うことにより、貯留雨水の水質が維持できる。初期雨水カットによりE.Cの濃縮は起こっていない



榊原 隆
国土交通省国土技術政策総合研究所
下水道研究部 下水道研究官

雨水利用を積極的に取り入れていくことが望まれる

雨水は最も身近な水資源であり、かつポンプ等の動力を必要とせずに入手可能であるという特長があります。一方雨水は気象や大気環境の状況により得られる水量や水質が左右され、また利用可能量も集水規模や貯留施設の容量に大きく依存するという制約もあります。これらの理由により、これまで雨水利用が十分に進んでこなかったと考えられます。

都市部でよく知られている雨水利用施設としては、両国国技館や東京ドームがあります。これらの施設は集水面積も広く、また貯留容量も大きく、トイレの洗浄に必要な水量のうち3割近

くを賄うことができている。また貯留された雨水が利用されることから雨水流出量の削減にもつながり、浸水対策にも寄与しています。このような大規模施設を、密集した住宅地や商業地のど真ん中に設置することは難しいですが、公園や街路の地下を有効利用すれば実現は不可能ではありません。具体的には、住宅や事業所ビルの屋根雨水と道路雨水を集め、近隣の公園や街路の地下に設置する貯留施設に貯留し、普段は植樹や街路の清掃に使う散水用水として、また、地震等の災害時には防災用水として活用するなどの

方法が考えられます。個人的な話になりますが、東日本大震災で数日間断水があったとき、近くの公園の地下に設置された防災用貯留施設に娘と水をもらいに行ったことがあります。2時間ほど並んでやっと水をもらえたときの安堵感忘れられません。

新しく開発される地域はもちろんのこと、再開発や区画整理等で既存のまちを作り替える計画の中で、雨水利用を積極的に取り入れていくことが望まれます。その際に今回のCRESTの成果を活用していただくことを期待します。



荒川の水利用

② 地下水・再生水の利用

将来的に持続可能な水利用を考える上で、地下水や再生水の適切な利用の方策を考えることは今後非常に重要です。下水処理水を高度処理した再生水など、具体的な水質評価が必要とされます。

Q 地下水をいかに使うか？ 汲み上げ続けても大丈夫か？

地下水は、身近な水源として、農業、水道、産業、ビル、家庭用など、様々な用途に使われていますが、過去の大規模な地下水利用は地盤沈下を招き、一部の地域では、地下水利用が規制されています。今後、限られた地下水をどのように利用すべきかを検討するため、荒川中流域の川島町にある地下水の水位観測井戸の観測データをもとに、地下水の揚水量と地盤沈下の関係を表すシミュレーションモデルを作成し、

地盤沈下の原因と、その対策について調査・研究を行いました。調査の結果、地下水位は、過去30年ほどで回復しつつありますが、農業用の地下水の用水により、最も深い300mの地下水帯層を除いて、80mと190mの地下水位が季節変動していることがわかりました。それにつれて、地盤も少しずつ沈下しています。季節的に変動が大きい地下水利用は、全体的に地下水位が回復しても、地盤沈下を引き起こす可能性があ

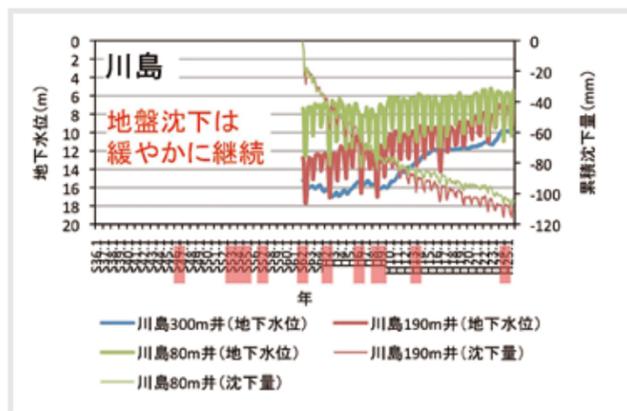
り、地下水利用に際しては、年間の総揚水量と、季節的な変動を管理する必要があります。

地下水利用の現状としては、生活用水、農業用水としての利用が中心で、渇水年には揚水量が増加し、地盤沈下はゆるやかに進行しますが、現状程度の地下水揚水量を維持できれば、長期的な地盤沈下量を小さく抑えることは可能です。また、地下水揚水の可能量は、水道用水・工業用水と農業用水の揚水量のバランスで決ま

るため、農業用水と水道用水・工業用水の取水層を分けることが望ましいと考えられます。農業用水は特定の季節に集中して揚水するため、地下水涵養が速やかに行われるよう、浅い帯水層から（ただし、沖積層の基底礫層など一部の帯水層ではヒ素等が検出されるので、水質の把握が必要）、水道用水・工業用水は、水質・水温がより安定している深い帯水層からの取水が望ましいと言えます。（都市地下水管理・利用グループ）



▲荒川中流域(川島)の地下水観測井戸
深さの異なる3つの井戸があり、それぞれの地下水位と地盤沈下量を観測した



▲地下水位別に見る累積沈下量
農業用の揚水により、80mと190mの地下水位が季節変動する。それにつれて、地盤も少しずつ沈下している



滝沢 智
東京大学大学院
工学系研究科
教授

地下水の水位と水質の「見える化」をさらに進めていく

地盤沈下対策として地下水の総揚水量が管理されるようになってからは、多くの地域で地盤沈下が沈静化したものの、完全に沈下が止まったというわけではありません。引き続き、地盤沈下に注意しながら地下水の利用を行う必要があります。また、本研究では、季節的に揚水量が大きく変動すると、年間の総揚水量が少なくても地盤沈下を引き起こすことが示されました。この知見を今後の地下水利用に活かす

ため、揚水量の平準化を促す必要があります。地下水の利用においては、水質にも注意が必要です。地下水の汚染には、ヒ素などの自然に由来するものと、硝酸性窒素、各種の微量汚染物質など、人間活動に由来するものがあります。地下水の汚染を防止するとともに、地下水の観測体制を強化して、地下水の水位と水質の「見える化」をさらに進めていく必要があると考えます。

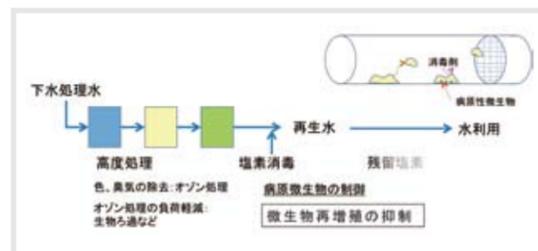
Q 再生水の消費期限は？

再生水を水資源として広く普及させていくためには、水質上の課題があげられます。サルモネラやクリプトスポリジウムなどの病原微生物のほかにも、消毒副生成物、医薬品類などの有害化学物質、バイオフィーム、日和見病原

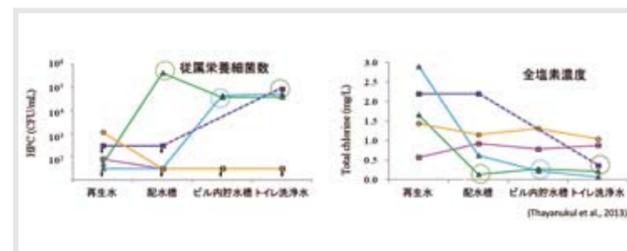
体などの微生物再増殖も障害になります。中でも、微生物再増殖のポテンシャルの把握や、再増殖低減のための方策は、再生水の消費期限を考える上で大きく関係してきます。再生水の給排水過程による微生物の再増殖を調べたと

ころ、5回の調査のうち3回、微生物再増殖が確認され、残留塩素が十分に残っている間は微生物再増殖は起こらず水質は保たれていましたが、貯留などにより残留塩素が低下した時に再増殖が起こることがわかりました。実際には、

再生水の造水時には3.0 mg/Lの残留塩素があっても、貯留時間が長引くにつれ、塩素は消費されてしまいます。そのため、再生水の消費期限をのばすには、塩素の再注入が必要となります。（水質評価グループ）



▲下水処理水の再生利用のための処理と再生水における微生物の再増殖



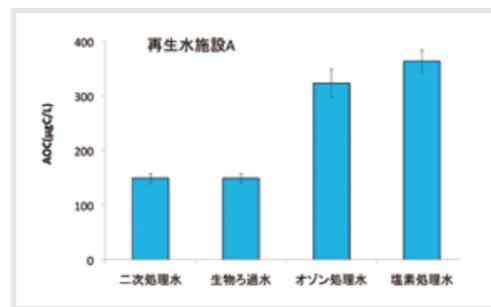
▲再生水給排水過程での微生物再増殖と残留塩素濃度
5回の採水のうち、3回で微生物再増殖を確認(再増殖は、貯留などにより残留塩素が低下した時)

Q 再生水の消毒剤を減らすには？

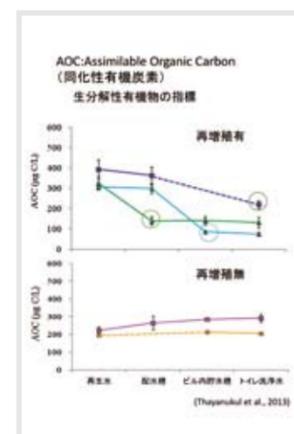
再生水の消毒剤を減らすには、微生物再増殖が起こらないような環境をつくるのが重要です。微生物再増殖が起こっているケースでは、生分解性有機物の指標である同化性有機炭素(AOC)濃度

も低下していることがわかり、生分解性有機物濃度を低く保てれば、微生物再増殖も低減できると推測できます。再生水を造る水処理の過程では、色や臭いを分解するためにオ

ゾン処理がよく用いられていますが、一方で、オゾン処理により生分解性有機物が増加し、微生物再増殖を促進してしまっているという側面があります。そこで、オゾン処理の後に生分解性有機物を除去するプロセスを入れることにより、微生物再増殖を抑制できるのではないかと考えます。再生水の造水プロセスを見直すことで消毒剤を減らすことができ、より効率的で、余計な副生成物の生成を抑えた処理法にできます。（水質評価グループ）



◀再生水処理過程におけるAOC変化
オゾン処理により、生分解性有機物が増加している



▲微生物再増殖と同化性有機炭素(AOC)の関係
再増殖はAOCの消費を伴い、生分解性有機物の低減が再増殖ポテンシャルの低減に有効だといえる



栗栖 太
東京大学大学院
工学系研究科
准教授

微生物増殖の制御が可能となるよう、研究を進めていきたい

将来変わりうる水質の評価、つまり水質変容ポテンシャルという観点を新たに提案し研究してきました。いったん消毒された水でも、消毒剤の効き目が切れると微生物増殖を起こして水質が変わります。微生物増殖のエサとなるのは生分解性の有機物です。自然の水でも、下水再生水でも、試料中に含まれる有機物は、どのような物質で構成されているか詳細にはわかりません。最新のフーリエ変換質量分析計

を用いて測定すると、数百~数千種の物質が検出されますが、それも一部。この中で生分解性の物質を特定すべく、実際に微生物による分解で評価したり、分解前後の試料を分析したりしました。本研究で、水質制御に向けた端緒をつかむことができたのではないかと思います。近い将来、生分解性有機物の全貌を捉え、微生物増殖の直接的な制御が可能になるように、さらに研究を進めていきます。



水利用のデザイン

① 水利用システムのデザインに向けた合意形成の支援

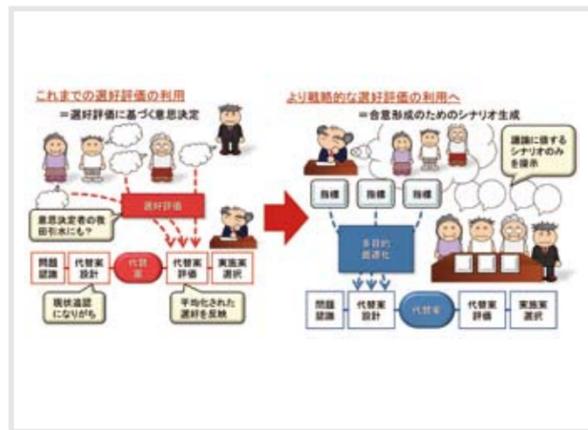
これまでの調査・研究で蓄積されたデータや知見に基づき、具体的な水利用システムのデザインを考える上で関係者の多様な選好をどのように反映させていくのか、円滑な合意形成の方法を考えます。

Q 関係者の選好を水利用システムのデザインにどのように反映していくか？

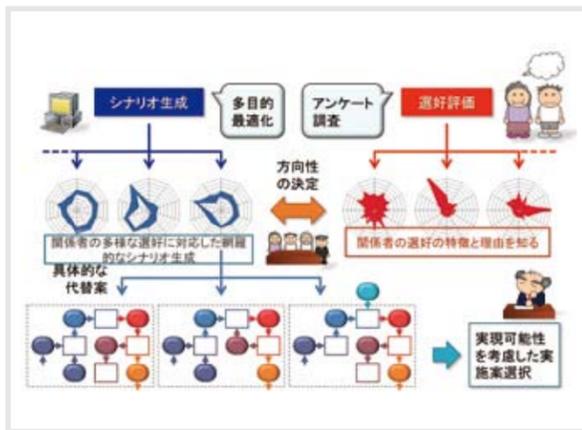
これまで行われてきた選好評価は、既に設計されているシナリオ(=代替案)に対する住民の選好を把握する形式で行われることが多く、住民の様々な選好の違いは、代替案の設計段階においては十分に反映されていなかったと言えます。その結果、現状追認となる代替案が設計されがちになり、平均的な住民選好のみが考慮されるような状況に終始していました。しかし本来は、多様な選好の存在を把握し、その情報を共有しながら、特定の意見に左右されことなく議論を進めていくべきではないかと考えます。つまり、様々な住民の選好に配慮した多様な代替案が設計され、それをもとに議論を進めていくことが、円滑な合意形成へと導くために必要なプロセスであると言えます。

そこで今回のプロジェクトで私たちが目指したのは、「住民や関係者の様々な選好に対応した網羅的な水利用システムのシナリオを生成できるツールを開発すること」でした。

さらに、アンケート等によって幅広い市民・関係者の選好に関する情報を収集し、その特徴を把握すると同時に、その選好を持つに至った理由・背景を探ることも重要だと考えました。様々な水利用のシナリオと多様な市民の選好を比較しながら、具体的な代替案を設計し、それをもとに議論を進めていくことが、よりよい代替案の設計と選定に役立つはずだと考えます。(都市水利用デザイングループ)



▲選好評価の利用法
まず合意形成のためのシナリオを生成し、様々な指標を軸に多目的最大化した代替案を設計することで、より客観的な議論が進んでいく



▲シナリオ生成と選好評価の連動
関係者の多様な選好に対応するシナリオを生成し、同時にそれぞれの関係者の選好特徴とその理由を把握することで、よりよい実施案の選択に近づける



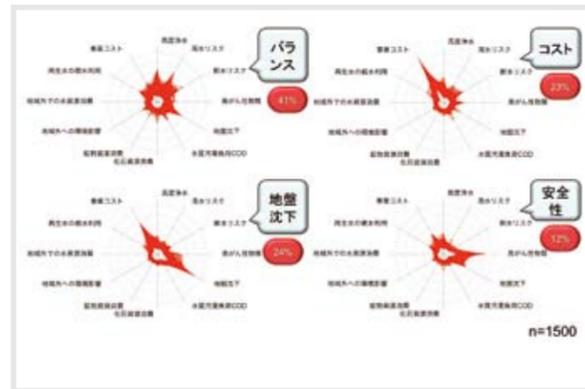
荒巻 俊也
東洋大学
国際地域学部
教授

住民参加を促進し、様々な市民の意見を合意形成の場で考慮する

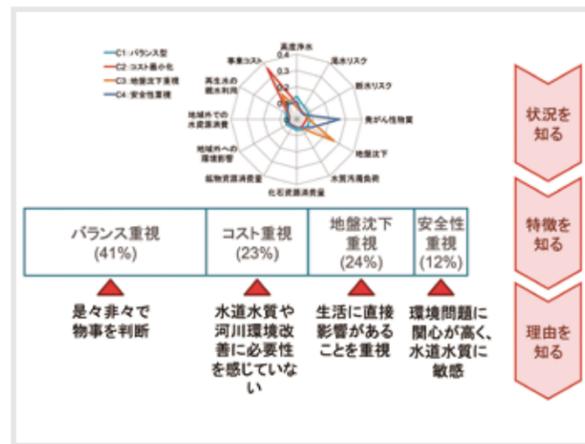
多様な市民の意見を集めようとした場合、10年前までは調査票を利用した訪問調査や郵送でのアンケート回収が行われていました。多大な労力を払いながら、様々な価値判断を持つ人たちの意見をバランスよく集めることは至難の業でした。しかし、今や多くの方がネットワークを通して、様々な情報にアクセスできるようになり、また、誰もが気軽に意見表明ができる時代になりました。私たちの研究でもオンライン

アンケートを活用していますが、これまで合意形成の場では意見表明をしなかった多くの方(サイレントマジョリティ)の意見を集めることが可能になりつつあります。オンラインならではの問題もありますが、様々な市民の意見を合意形成の場で考慮できるということは大きなメリットです。今後も住民参加を促進し、ユーザーオリエンテッドな社会資本の形成に寄与できればと思っています。

Q 関係者の選好をどのように把握するか？



▲選好パターンの類型化
コンジョイント分析で得られた個人別の選好パターンをクラスター分析によって類型化する



▲荒川流域での調査により分類された4つのグループ
それぞれのグループが何を重視しているか、また、何を重視していないか、選好の特徴を把握することができます

▶選好の背景の把握

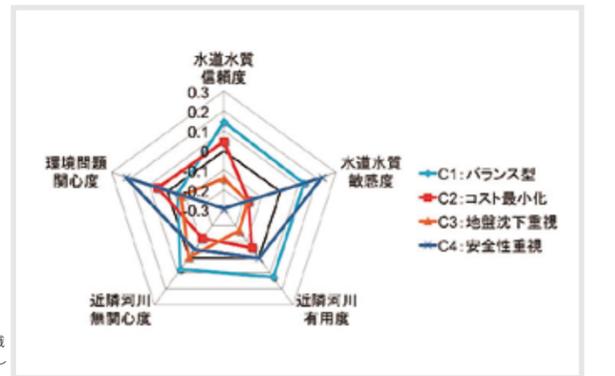
●水道水への意識 ●近隣河川への意識 ●環境問題全般に関する意識の質問(4段階)に対する回答データの主成分得点をグループ別に集計しレーダーチャート化。各グループの選好背景が把握しやすくなる

前述のような考えに基づき、住民や関係者の選好をどのように把握するか、そのプロセスを検討しました。

まず、オンラインアンケートにより水利用システムに関する地域住民の選好に関するデータを集め、それらのデータに対して、評価する属性ごとの価値の評価が可能であるコンジョイント分析を実施し、住民はどのような属性を重視しているのかを明らかにします。さらに、それらの情報から、住民を似たもの同士のグループに分類(類型化)することで、それぞれの選好パターンを把握します。

荒川流域での調査・分析では、「様々な項目をバランスよく評価するグループ」、「コストを減らすことを重視するグループ」、「安全性を重視するグループ」、「地盤沈下など生活に直接関係する要素を重視するグループ」というように、4つのグループに住民を分類することができました。そして、グループ間の水道水に対する意識、近隣河川に対する意識、環境問題に対する意識の違いに着目して、各グループがどのような特徴を持つかを評価する、という方法を用いました。

その結果として把握できる各グループの特徴として、例えば、「安全性を重視するグループ」は、環境問題への関心が高く、水質に敏感であるという特徴が見られ、「コストを重視するグループ」では、水道水の水質への信頼が高く満足している一方で、近隣河川に対して有用性を感じていないことから、これらの項目にコストをかける価値を見いだしていないという特徴が、さらに、「地盤沈下を重視するグループ」では環境問題や近隣河川に対して関心が低く、水道水質は気にならないことから、地盤沈下のように生活に直接影響がある属性を重視している、というように見えてきました。(都市水利用デザイングループ)



大塚 佳臣
東洋大学
総合情報学部
准教授

「声の大きい人」に振り回されない客観的な議論のために

水利用システムのように、公共性が高く、多様な側面を持つ対象に関する合意形成の場においては、お互いの価値観や利害が衝突して合意が得られないことがあります。そういった場合、相手が「何に」、そして「なぜ」こだわっているのかを知ることで、衝突の本質をお互いが理解することができ、根本的な解決に近づくことができます。

また、どのような好み(選好)を持った人がどれくらい

存在するのかといった情報を共有することで、いわゆる「声の大きい人」に振り回される、あるいは多数決で結論づけられるといった議論を防ぐことができます。水利用システムについて「だれが」「何を」「なぜ」好むのかを明らかにした本研究の結果と手法が、水利用システムを考える場において、お互いにWIN-WINとなるような解決策を見いだす一助となることを期待しています。



水利用のデザイン

② 水利用システムのシナリオ作成ツールの構築

地域住民の様々な選好、関係者の多様な意見に対応する水利用のシナリオを作成することが重要だということは先に述べたとおりです。最後に、そのシナリオを生成するツールの開発についてまとめました。

Q シナリオ生成ツールを構築するには？

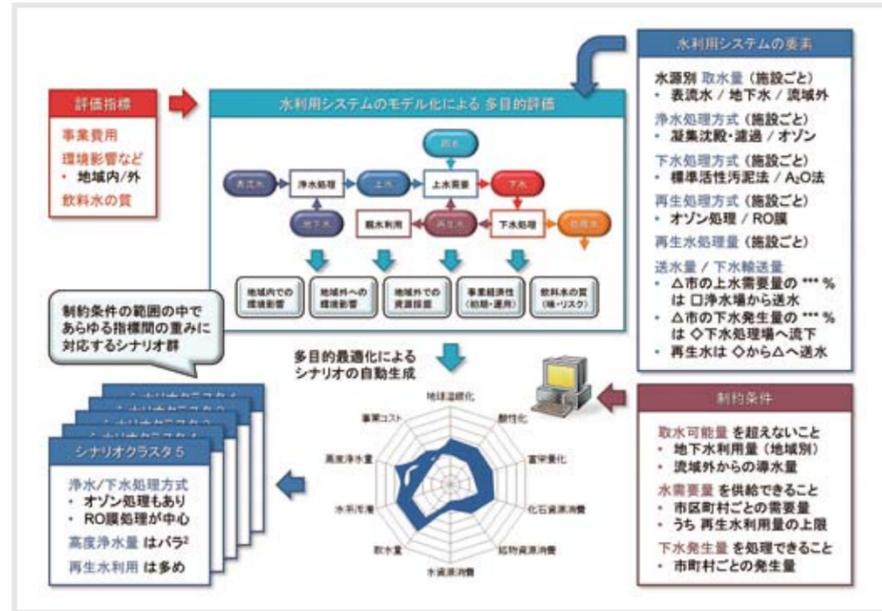
アンケートによって計測された地域住民の選好を含め、関係者が持つ多様な意見に対応した水利用システムのシナリオ(代替案)を生成することによって、関係者間の合意形成に向けた議論が進むことが期待されます。そのためには、シナリオを生成するためのツールが必要です。今回の研究では、多目的最適化のアルゴリズムを応用して、こうした多様なシナリオを生成するための枠組みを構築し、実際にそれをソフトウェア(ツール)として実装することを試みました。

シナリオ生成のためには、まず、水源別の取水量、処理施設ごとの浄水・下水処理方式、再生水利用量、市町村一処理施設間の送水量など、対象とする水利用システムの「要素」(=ポテンシャル)を定義する必要があります。そして、各種の原単位を用いて、水利用システムの事業費用や環境影響、資源消費など様々な「評価指標」と、上記の要素の関係をモデル化

します(多目的評価)。さらに、水源ごとの取水可能量や対象地域の需要量といった、水利用システムが満たすべき条件を「制約条件」として設定し、最後に、評価

指標を重み付けした関数を「目的関数」として、多目的最適化の計算を実行します。このとき、関係者の意見・選好の多様性を反映した様々なパターンの重み付けをそ

れぞれに加えることで、多様なシナリオが自動的に生成されるという仕組みです。(都市水利用デザイングループ)



▲シナリオ生成ツールの設計

様々な評価指標と水利用システムの要素の関係をモデル化し、取水可能量や需要量などの制約条件を設定、そして、評価指標に対して重み付けをして多目的最適化の計算を実行し、シナリオ(代替案)を作成する

Q シナリオ生成ツールを荒川流域の水利用に適用してみると？

このシナリオ生成のアルゴリズムを、実装されたソフトウェアを用いて埼玉県全域と東京都区部(ほぼ荒川流域に一致します)に適用してみました。生成された各シナリオでは、各施設における処理量や処理方式、各市町村において利用される上水の水源別および処理方式別(普通浄水/高度浄水)の割合といった各要素の設計値と、各指標の評価値が出力されます。

一例として、事業費用の低減を最優先した「コスト最小化」シナリオについて見てみましょう(上記図版参照)。浄水処理施設ごとの能力と処理水利用割合を現状システムと比較すると、どの施設で処理能力を増強するべきかがわかります。また、事業費用の低減のみを優先した場合には、どの施設にも高度浄水は導入されないこともわかります。

コスト最小化シナリオの他に、



▲「コスト最小化シナリオ」の水利用割合/現状システムとの比較

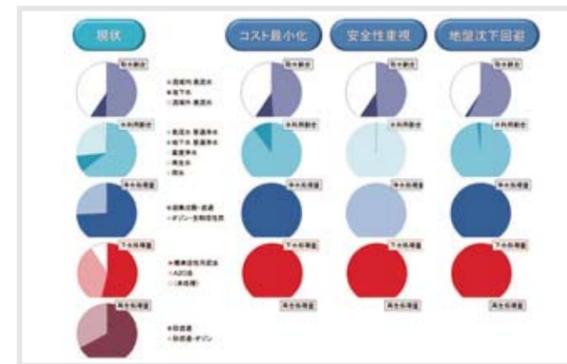
浄水処理施設ごとの処理能力(=円の大きさ)と水利用割合(=円グラフの内訳)を地図上に示した。現状システムとの比較で、どの施設で処理能力を増強するべきか把握できる

健康面での安全性を考慮して高度浄水量を増やすようにした「安全性重視」シナリオ、地盤沈下への懸念から地下水取水量を最小限にした「地盤沈下回避」シナリオといった、アンケートで得られた地域住民の選好に対応したシナリオも生成しました。これらのシナリオの設計値を、対象地域全体について集計してみると、それぞれの特徴がわかります。例えば、安全性重視シナリオでは、

ほぼ全量の上水が高度浄水になっていきます。また、地盤沈下回避シナリオの取水割合では、地下水の割合は非常に小さくなっていきますが、ゼロではありません。これは、制約条件として設定された水源別の取水可能量が反映された結果です、このように、「理想」だけではなく「現実」が考慮されることも、このシナリオ生成のアルゴリズムの特長です。

また、各シナリオの評価値も、

現状システムと比較できるレーダーチャートによって出力されます。下に示したシナリオでは、どれも下水処理に高度処理が導入されないので、事業費用は現状システムよりも安く、汚濁負荷は現状システムより多くなるという結果が出ています。また、他の指標と比較することで、これらのシナリオ間の利点と欠点をすぐに把握することができます。(都市水利用デザイングループ)



▲各シナリオ設計値の集計

対象地域全体のシナリオ設計値の集計。それぞれの水利用シナリオの特徴について、現状システムと比較することができる



▲各シナリオの評価値

現状システムと比較した各シナリオの評価値。各指標について「良い」と外側に、「悪い」と内側になるように示されている



中谷 隼
東京大学大学院
工学系研究科
助教

シナリオ生成ツールを活用して、皆が議論に参加できる基盤を作る

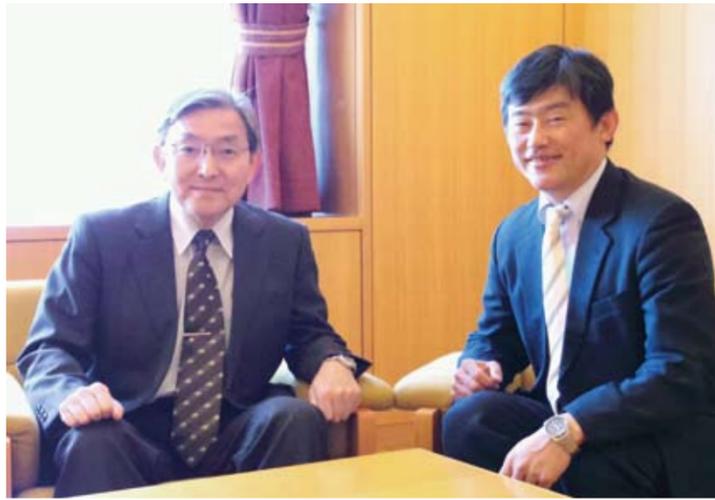
「水利用システム シナリオ生成ツール」の開発にあたって、私には想定している合意形成の「かたち」がありました。それは、自治体(行政)、技術者、研究者、事業者、そして様々な意見を持った一般消費者(地域住民)など、あらゆる主体が議論に参加することを通して、技術的・社会的な実現可能性を考慮しながら、目指すべき理想像を作り上げていくという「かたち」です。どのような水利用システムを求めているかは、立場ごと、個人ごとに様々でしょう。まずは議論の場(私たちは「合意形成のテーブル」と呼んでいます)を作ることが不可欠です。

ただし、皆が手ぶらで議論に参加しても有意義なものにはなりません。それぞれが漠然と思い描いている「こんな風になったらいいな」を、具体的な「こんな水利用システムができます」に結び付けることで、相容れない意見を持っていると思われた主体同士が、実は目指す先に同じような理想を描いていたとか、逆に、近い意見を持っていると思っていたのに同床異夢だったとか、そうした事実を明らかにすることが、合意形成に向けた一歩前進になると考えます。

このシナリオ生成ツールは、「パレート最適」という考え方を

応用し、「混合整数線形計画」という方法を用いたソフトウェアです。このシナリオ生成ツールを活用すれば、あらゆる意見に対応して、それぞれを実現するための最良のシナリオを自動的に生成できます。生成されたシナリオは、それぞれの意見を持つ主体にとって「これ以上ない」だけでなく、技術的・社会的な実現可能性が担保されているため、絵に描いた餅になることもありません。今後は、実際に合意形成のテーブルを設けてこのツールを活用し、事例を蓄積しながら、実社会に貢献できるような枠組みに発展させたいと考えています。

研究成果を荒川の水利用にどう活かすか 「調和型都市圏水利用システム」の実現のために



東京大学大学院工学系研究科 教授
本プロジェクト 研究代表

古米弘明

国土交通省 関東地方整備局
荒川上流河川事務所 所長

河村賢二

今回のプロジェクトで得られた成果を、よりよい荒川の水利用システムの構築に向けて、今後どのように役立てていくべきか。実際に荒川の管理に携わる荒川上流河川事務所所長の河村氏をお迎えし、将来への展望を語り合いました。

豪雨の頻発、渇水の深刻化など この先の気候変動に対する 具体的な危機感をイメージする

古米●本日はお忙しい中お越しくさざり、ありがとうございます。今回のプロジェクトでの成果を、今後はぜひとも現場に反映させていきたいという思いがあり、河村さんとの対談の場を設けさせていただきました。

河村●どうぞよろしくお願いいたします。まず、荒川が抱える水利用におけ

る課題についてお話しできればと思います。荒川は、流域内に住む方々の人口に対して流域に降る雨の量が、全国的に見ても圧倒的に少ないです。これは江戸時代から変わらず抱えている問題で、現在では、上流にダムが5つと調節池が1つあり、利根川から導水もしていますが、依然として利水の安全度は低く、平成25年の夏にも渇水が発生しています。生活用水にまで影響が及ぶことはありませんでしたが、

取水制限も出されました。数年に一度、こうした渇水があるのが荒川の現状です。

古米●大都市の水需要を支える河川流域として、利水安全度に対する不安があるというのは大きな危機感につながりますよね。今後の気候変動による水量・水質の変化に対応していくためには、表流水や地下水だけでなく、都市の自己水源である雨水や再生水の活用をいかに位置づけるかという点も、非常に重要です。

河村●確かに将来の気候変動もたらす状況は深刻だと認識しています。これまでもそうした危機感は、我々河川管理に携わる者は、皆それぞれに持っていました。それが具体的にどういう危機なのか、どういった状況もたらすのかというイメージまでは持てなかったんです。それが今回のプロジェクトによって、かなり具体的になったのではないかと思います。

古米●気候変動に関しては、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第5次報告書でも示されているように、全球気候モデル(GCM)と領域気象モデルを組み合わせたダウンスケーリング手法で導き出される気象データの将来予測結果は、非常に充実してきています。日本は一歩リードしている状況です。そうした知見を活用しながら、将来の雨の降り方、気温、水温などを考慮して、水資源のポテンシャルを把握することで、大きな課題解決に向けて進んでいくことができるのではないかと考えています。

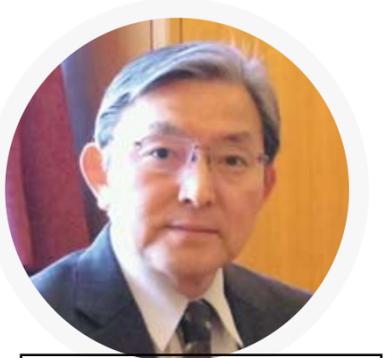
河村●現状と将来の違いを認識して、水道水源としての荒川を正しく評価することと、そのデータを、行政に携わる様々な部局の者が共有することも、非常に重要です。

多様な立場の人たちが 共通のプラットフォームを認識し 水利用を議論するためのツール

古米●私たちのプロジェクトでは、2013年5月と2014年11月に、荒川ワークショップを開催しました。その際、国土交通省水資源部さん、関東地方整備局荒川上流河川事務所さんには大変お世話になりました。皆さんのご協力なくしては、水に関わる多くの実務関係者の方の参加は見込めませんでしたから。

河村●こちらこそ、ありがとうございます。私たち行政に関わる者同士は、常に連携を意識しているものの、総合的にまとめて確認、研究する機会を持つことはなかったもので、古米先生のお声かけで一同に集まって議論できたことは非常に有意義でした。そして、水利用システムのシナリオ作成ツールが開発されたことは画期的であり、とても将来性のある試みだと感じました。

古米●今回のシナリオ作成ツールは、様々な水需用、そして多様な水資源があって、同時に水利用する人の嗜好も色々とした時に、例えば環境負荷の問題や、コスト、安全性、利便性といった様々な評価すべき項目があ



表流水や地下水だけでなく、都市の自己水源である雨水や再生水の活用をいかに位置づけるかが重要です。

る中で、その多目的な要素を一同に集めて、その上でいろいろな代替案シナリオが提示できるという強みがあります。ちょうど2014年7月に、水循環基本法、雨水利用推進法が施行されて、その方向付けのための科学的知見、方法論、考え方を提供していかなければという思いもあり、ツールの作成には力を入れてきました。

河村●まさに国土交通省でも、基本法の概念や理念を提示しながら、具現化するための基本計画を策定しているところですから、今回のプロジェクトの成果は、ひとつのプラットフォームになり得る感じました。そのプラットフォームが共有認識されれば、それをどう活用するかという段階にシフトできます。課題は、そのプラットフォームを長い目で見た時に、どう維持していくかという点です。

科学的、専門的な知見を できるだけ正確なまま わかりやすく表示する

古米●河村さんのおっしゃる通りで、ワークショップの時に、JSTのアドバイザーの方たちから、プロジェクトが完結した後は、どう継続的に維持していくのか、という質問を受けました。私自身の考えとしては、日本の大きな河川を管理されている国土交通省の水資源部さんなりが中心となって、様々な関係者の方々が連携して流域協議会を立ち上げていくことが大切だと思いますし、そうした場に大学として、また、本プロジェクトに関わった者として、今後も継続的に参加していくことは心から望んでいることもあります。

河村●それはぜひとも、よろしくお願いいたします。

古米●また、よりよい水利用をデザイ



シナリオ作成ツールの開発は、画期的でとても将来性のある試みだと思います。

ンするためには、トップダウン+ボトムアップで、住民、あるいは水利用者も含めた利害関係者の積極的な参加、関与も必要です。今回開発したツールは、そうした住民と行政、専門家、事業体をつなぐ役割も果たすものだと思います。

河村●様々なステークホルダーに対する説明は、行政としても必要になってきますから、今回の試みはそうした場でも理解を深めるために役立つものであると思います。行政内部においても、例えば事業部局が、予算を持っているところに説明を求められたりした場合、具体的な数値で示すことによって、必要な予算を確保しやすくなるという面もあります。

古米●なるほど。様々な場面で利用されることを想定すれば、科学的な知見や専門的な内容を、できるだけ正確なまま、わかりやすく表示するというまとめ方、見せ方は、まだまだ工夫の余地がありますね。ぜひ、実務の方にもご意見をいただいて、よりよいものにしていけたらと思っています。今後ともご協力をよろしくお願いいたします。

河村●もちろんです。このシナリオ作成ツールの実用化に向けて、今以上に情報を共有しながら連携していければと思います。



CORE RESEARCH FOR EVOLUTIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY
CREST

研究領域「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」

研究課題

「気候変動に適應した調和型都市圏水利用システムの開発」
平成21-26年度 概要報告

<http://www.recwet.t.u-tokyo.ac.jp/crest2009/>

Project member

【研究代表】

▼東京大学大学院工学系研究科
古米 弘明

【水質評価グループ】

▼東京大学大学院工学系研究科
片山 浩之
栗栖 太
春日 郁朗
Parinda Thayanukul*
稲葉 愛美*
浦井 誠*

【流域水資源グループ】

▼山梨大学大学院附属国際流域環境研究センター
石平 博
馬籠 純
市川 温*
柿澤 一弘*

孫 文超*
王 浩*

▼金沢大学理工研究域環境デザイン学系
谷口 健司

▼鳥取大学大学院工学研究科
矢島 啓
増田 貴則
崔 貞圭*

【都市雨水管理・利用グループ】

▼国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部
小川 文章
森田 弘昭*
尾崎 正明*
榊原 隆
吉田 敏章*
重村 浩之*
松浦 達郎
藤原 弘道*
橋本 翼*

▼公益社団法人 雨水貯留浸透技術協会
屋井 裕幸
忌部 正博
本庄 正良*
木嶋 忠勝*
円山 敏男
益田 宗則

【都市地下水利用・管理グループ】

▼東京大学大学院工学系研究科
滝沢 智
小熊 久美子
酒井 宏治
愛知 正温*
Le Ngoc Cau*
黒田 啓介*
▼東京大学大学院新領域創成科学研究科
徳永 朋祥

▼東京大学総括プロジェクト機構
村上 道夫*
▼秋田大学教育文化学部
林 武司

【都市水利用デザイングループ】

▼東洋大学国際地域学部
荒巻 俊也
Pham Ngoc Bao*
▼東京大学総合情報学部
大塚 佳臣
▼東京大学大学院工学系研究科
窪田 亜矢
中谷 隼
▼東京大学先端科学技術研究センター
栗栖 聖
▼お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科
大瀧 雅寛
▼一橋大学大学院社会学研究科
大瀧 友里奈

*過去にプロジェクトに参画された方で、研究実施当時の所属先を表記しています