

# 水循環を守り、水を育てる条例策定に向けた西条市と地球研の水質協働研究

総合地球環境学研究所 中野孝教、齋藤有、申基澈  
西条市役所 佐々木和乙、徳増実

## 1. はじめに

水循環基本法の制定に伴い、地下水を地表水のように公水と捉え、両水を統合管理する仕組みが重要になってきた。基本法では、各流域の自然環境や水への歴史文化を踏まえること、同時に国際的視点を持ち、健全な水循環を担う研究者や技術者の養成と社会全体の教育の推進が求められている。水循環は地域性が強いため、水循環の具体的な計画は地域が主体となって作成し、流域連携を図りながら実施することも重視されている。

降水量が少ない瀬戸内地域にあって、愛媛県西条市は良質な地下水に恵まれ、市民 11 万人の生活や産業は地下水に強く依存している。市内各地に水があふれ、地下から自噴する「うちぬき」は名水 100 選（現環境省）や水の郷（現国土交通省）に選定され、多くの市民により利用と保全がなされてきた（図1）。その一方で、市中心域での地下水使用量の増加、沿岸地下水の塩水化、各種の水質汚染が報告されている。水源の山地域は、林業衰退に伴う森林荒廃が進行しており、それに伴う水害へのぜい弱性や河川流量の低下も指摘されている。降水量の年々変動は大きく、年平均気温も 30 年で 1.5℃と大都市並みに上昇している。しかし、温暖化などの流域外の環境変化が西条市の水循環に与える影響の予測は難しい。健全な水循環の実現には、予期せぬ問題が発生した時でも的確に対処できる研究や社会の体制が重要と言えよう。



図1 西条の湧水、自噴水

水循環は、海や陸から蒸発した水蒸気が雨や雪になり、地下水や地表水となって最終的に海に戻るプロセスである（図2）。海水や降水、地表水は目に見えるが、水蒸気や地下水は見えない。見えたり見えなかったりするものが水循環であり、そのつながりの姿を見え

るようにすることは、水循環研究の大きな目的である。水循環の中で水質は大きく変化する。水質を通して水循環の姿を可視化できれば、水問題への具体的な対応も期待できる。

西条市では、地下水のリスクを回避しその恩恵を持続的に享受できる制度設計（以下、水条例と仮称）を目指して、大学や研究機関、民間と連携した水資源研究を実施してきた。総合地球環境学研究所（地球研）は、水質面からの要請を受けたことから、水質マップ作りを出発点とする協働研究を 10 年近く実施しており、以下にこれまでの経緯について紹介したい。



図2. 水循環と水質に関する要因の模式図

## 2. 水循環研究と水質履歴情報

地下水を持続的に利用するには、水循環の考えに立ち、地下水の涵養域と地下での流動を明らかにした上で、流速や流量、人為影響を評価し、将来の量と質を予測する科学情報が必要である。水は生命活動に欠かせない様々な成分を含んでおり、おいしい水はボトル水となって世界各地で飲用されている。しかし水質分析というと、一般に飲用にかかわる水質項目が対象となる。それらは富栄養化問題の原因である窒素やリン、重金属汚染の原因である鉛やヒ素、カドミウム、さらに各種の有機化合物など多様である。水道水については厚生労働省が水質基準 51 項目、水質管理目標設定 26 項目を定めているが、それらのすべてを分析するには費用も労力もかかる。

水循環では、飲用の可否よりも水質のリスクや恩恵

をもたらす因果関係、すなわち予防原則的な水の履歴情報が重要である。水を構成する水素と酸素の安定同位体比は水の指紋と言われ、水に含まれる成分と共に、水のつながりを明示する履歴指標として利用されてきた。例えば、降水の水素・酸素同位体比は標高と共に変化するが、地下の岩石は水を含まないため、湧水や地下水の両安定同位体比は涵養域の推定や特定に有効である(図3A)。例えば、4つの涵養域(①, ②, ③, ④)の降水の平均的な水素・酸素の安定同位体比が異なれば、その雨に由来する地下水や湧水も降水に類似した値(図では同じ色)となる。いっぽうストロンチウムや硫黄の安定同位体比は地質や化学肥料によって特徴的な値を示すので、地下の堆積物や人為影響に関する情報が得られる(図3B)。

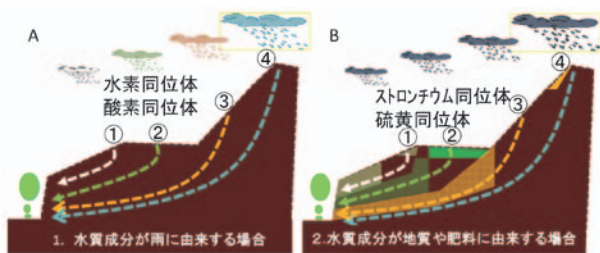


図3 水履歴の指標としての安定同位体

水循環は、地下水と交流する地表水やその起源である降水など、存在形態が異なる水を互いに比較することによって明らかになる。現在では上記元素の安定同位体や50種程度の元素の濃度も比較的簡便かつ高精度で分析できるようになっている。したがって多数の水質項目を測定できれば、水循環の保全や管理に必要な水の履歴に関する情報を一挙に獲得できる。そのためには、安定同位体も含め多くの水質項目をまとめて分析できる共用施設と共に、得られる水質情報を共有し、水資源管理に活かす仕組みも併せて重要となる。地球研は大学共同利用機関として、こうした研究に応えうる実験施設を整備してきたが、地球環境研究にとってモデル地域の設定は重要である。施設を利用した水循環研究手法を構築する上で、自治体との協働研究はとりわけ重要であることから、西条市と研究協約を締結し、水質履歴法の開発とその社会実装を開始することになった。

### 3. 西条市の水質協働研究

#### 3-1. 西条市の取り組み

西条市は西日本最高峰の石鎚山(標高1982m)を代表とする急峻な山々を背後に控え、森林面積は市全体の70%、残りの30%は平野である(図4)。この割合は日本の平均とほぼ等しい。主要河川の流域が市内にあり、一体的な水管理を実施する上でも、西条市は一つの典型例となる地域である。年平均降水量は、平野では1400mmほどで日本の平均値(～

1700mm)より少ないが、高度と共に増加する。石鎚山塊に降る雨と雪により、山地域の河川は水量も豊富であるが、平野の河川の多くは流量が少なく、枯川となっている状態が多い。山地から平野にかかるところに扇状地が発達し、河川水の多くが伏没し地下を流れていると考えられている。しかしその詳細は不明であった。

西条市内の自噴井戸は約3000本に達する。市では、生活用水を91地点で年1回採水し、水質分析を実施してきた。しかし飲用の可否判断を目的としていたこともあり、地下水の涵養域や流動に関する有用な知見は得られていなかった。

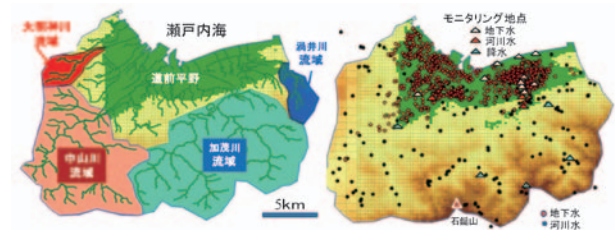


図4 西条市の河川流域(左)、地下水と河川水、降水の採水地点およびモニタリング地点(右)

#### 3-2. 地表水の多項目水質マップ作成

地下水は一般に水質が安定している。河川水も地下水と交流しているので、地下水と地表水を高密度に採水し、多項目にわたって水質を比較することで、地下水の涵養域や流動に関する基盤情報が得られるはずである。いっぽう地下水は地表水と異なり、井戸の保有者が水管理の主体であるため、許可なくして自由に採水できない。地下と地表の水を継続的に研究するには、研究の意義を自治体や市民が理解することが出発点となる。

このため、まず地表水の特徴を明らかにすることを目指し、山地域を中心に河川の約150地点において、渇水期(梅雨入り前)と豊水期(秋)の地表水を市職員と一緒に採水した(図4)。地球研において53成分の水質組成と4種類の安定同位体比を分析した結果、多くの水質項目について、季節変化より地理的变化がはるかに大きいこと、山地の河川水は流域の地質や降水量の違いを強く反映することが明らかとなった。市が採水している地下水についても同様な分析を実施し、相互に比較した。その結果は、より多くの地点で地下水の水質項目を地図化し、河川水の結果と重ね合わせて比較することで、地下水の涵養域や流動を解明できることを強く支持するものであった。

水条例の制定には、市民の水環境意識の向上が必須であり、市民の理解と協力なくして適正な水資源の利用はできない。地表水調査の実施、研究成果の情報交換を通して、地球研と市職員との信頼関係を築けたこともあり、市民に水への理解を深めてもらうことを意図して、2008年9月に市民シンポジウムを開催

した。研究成果の紹介は一部に留め、西条市の水の豊さを伝えることを主眼とし、地球研スタッフと西条市職員が自然科学および歴史文化の両面から講演し議論した。台風が接近し雨中であるにもかかわらず200名以上の市民が参加し、西条市が水に恵まれた町であることを再認識する良い機会となった。

### 3-3. 千の地下水の多項目水質マップ作成

シンポジウム後、水条例に向けた協働研究の促進に向けて、市民が中心になり多くの地点で井戸水の採水と水温を測定し、水質分析の結果を市民と市に還元することを提案し、実施することになった。「千の風になって」の歌手、秋川雅史氏が西条市出身であることから、「千の水を採って」というキャッチフレーズで市の広報に掲載し採水と水温測定を募った。採水した地下水は1032地点に及び、地表水と同じ多項目水質分析を行った(図4)。

結果を水質マップとして表現することにより、地下水水質の全容が解明された。採水者が測定した地下水の水温には20℃の違いがあった(図5)。採水が冬であったため、加茂川や中山川のような主要河川の水温は低く、その影響を受けている地下水の水温は低い。20℃前後の地下水は、夏季の河川あるいは地温の影響を受けている。これに対して自噴水の水温は13℃～15℃であり、水質成分にも特徴があることから、その起源や地下での流動系が他の地下水と異なることが明らかになった。

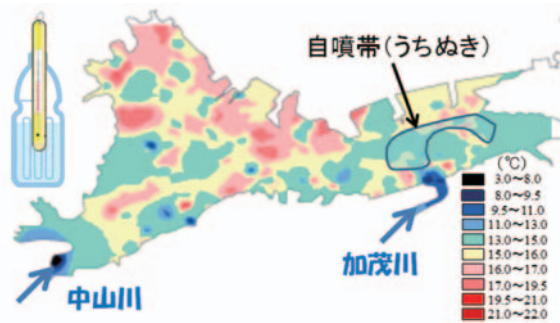


図5 西条市地下水の水温分布

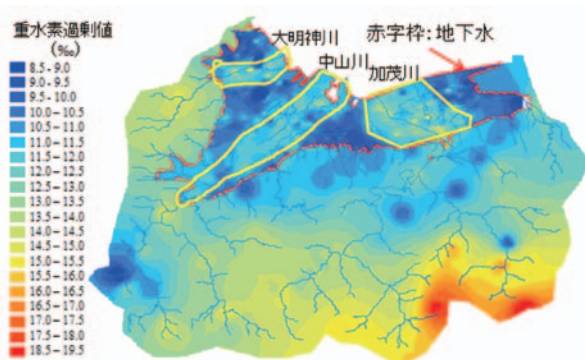


図6 地表水と地下水の重水素過剰値マップ

河川の流域規模や平均標高の違いにより、水素・酸素の安定同位体比は異なる(図6)。例えば、加茂川や中山川など平均標高が高い河川は、平野域でも特徴的な同位体比を示す。この特徴は予想通り地下水に現れており、河川水が川のように地下を流れる姿を可視化できた。地下水と涵養する河川の関係が明確となり、河川水が流れている範囲など、水資源利用に重要な情報が得られた。

他の水質成分からは、さらに異なる情報が得られた。窒素汚染の実態は硝酸イオンの分布に現れており、土地利用や窒素同位体情報から、その要因が施肥に起因すると示唆された。塩化物イオンやマンガンなどの分布からは、塩水化は還元環境下で進んでいることが示された。また廃鉱山による重金属汚染が浅層地下水にのみ現れており、「うちぬき」の保全にとって貴重な情報も得られた。

ストロンチウムと硫黄の安定同位体比は流域地質と良い一致を示し、それらと相関の高いミネラル成分も含めて、岩石の化学風化と水質の関係も明らかになった。これらの同位体情報は、水から養分を吸収する植物や農水産物に反映される。西条市は水を生かした農業を目指しており、地質に由来する同位体情報は、農水産物や食の地域認証指標として利用できる。また「うちぬき」の地下水を涵養する加茂川は、平野域に入る前から伏没しており、断層によって陥没した砂礫層が地下水プールを形成し、断層や上位の地層を構成する細砂や粘土が不透水層となっている可能性など、自噴水形成に関与する地下環境についても新たな知見が得られた。

水質分析の結果は、採水に参加した市民に簡単な説明文を加えて報告した。それと共に、第一回市民シンポジウムの成果を本としてまとめ、熊本などの地下水研究の先進事例の紹介も併せて、第二回目の市民シンポジウムを開催し、地下水分析全体の結果を報告した。参加した市民は600人に及んだ。同様な湧水・地下水問題を抱える自治体は多く、岩手県大槌町や山形県遊佐町、福井県大野市などからも首長や職員が参加し、後述のように新たな展開につながっている。

### 3-4. 水質の協働モニタリング

地表水と地下水の水質マップの作成と合成により、両水の因果関係が明確になり、水に及ぼす降水や地質などの自然環境、流域の人間活動の影響とその原因も明らかになってきた。しかし地下水資源の将来予測には、地下水流速などの情報も必要である。水質マップから鍵となる地点を選定できた(図4)ので、水循環を構成する地下水や河川水、降水を毎月回収し、水温と共に水質成分についても同様なモニタリングを実施している。

モニタリングは現在も継続中であるが、同じ加茂川に由来する地下水であっても、浅層の地下水は水温変

化が大きいものに対して、自噴水の水温変化は小さい(図7)。前者は水質マップから、加茂川が平野に入った後の伏没水である。伏没する涵養地点と地下水地点(例えば大町小学校)における水温および水質の時間的な違いから、1日10mほどの流速がある非常に速い地下水であると考えられる。いっぽう自噴水の涵養域は、水質マップから浅層地下水よりさらに山地側にあることが判明している。モニタリング結果も、水温や水質の季節変化が小さく、浅層地下水より涵養域が離れ、深部をゆっくり流動しているという考えを支持する。水質情報をさらに解析することで、流速も含めその流動が明確になると考えている。

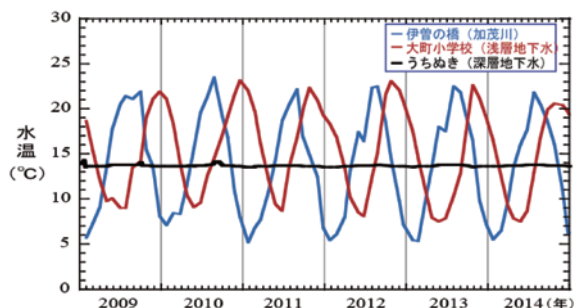


図7. 加茂川、大町小学校、うちぬきの水温変化

降水の水素・酸素同位体からは、西条市に降った雨の再蒸発による寄与が指摘されている。いっぽう重金属元素濃度は地表水や地下水に比べて2桁程度高く、中には水道水の水質基準をこえる鉛濃度を示す降水も見られた。このことは、降水由来の重金属元素は土壤に吸着されていること、すなわち地下水涵養域である山地の森林土壤が優れた浄化機能を果たしていることを示している。重金属元素濃度が高い降水は冬季に多いが、ストロンチウム同位体比を用いた解析からは、アジア大陸からの越境汚染の可能性が指摘される。しかし鉛同位体比は10年前の中国鉛と異なる値を示しており、中国の急激な経済成長に伴う発生源の変化が示唆される。このことは、同位体も含めたモニタリングの実施と継続の重要性を示している。

### 3-5. 協働研究のネットワーク化

水循環は、図2に示すように一つの流域で完結しない。このため水資源評価には、流域外の情報を取り入れる体制が望まれる。水質マップやモニタリングにより、西条市という一流域においても、広域的な大気環境変化の影響を受けていることが明らかになってきた。しかし環境履歴ツールとして有用な安定同位体などを用いたモニタリングは、世界的にもなされていないのが現状である。

西条市では、同じような地下水・湧水問題を抱える地域との連携が重要と考え、情報交換や交流を行ってきた。第二回シンポジウムに参加した大槌町は、そ

の後に東日本大震災で壊滅的な被害を被った。沿岸域は津波により現在も復旧していないが、西条市では震災直後から、同町に支援物資や職員を派遣するなどの復興支援を行ってきた。大槌町でも沿岸域の湧水利用に向けて、西条市と同様な水質マップを作成し、湧水保全域の基礎情報になっている。その成果報告も兼ねて大槌町で開催された復興シンポジウムでは、西条市職員が参加しネットワークの強化を図っている。

遊佐町では、鳥海山山塊の岩石採取に伴う出水により、山麓部の湧水枯れの可能性が大きな問題になっている。同町においても、同様な水質マップを作成して検討した結果、採石場上流部の湿地帯の保全の重要性が指摘された。いっぽう大野市では湧水再生室を設け、湧水保全に向けた様々な取り組みを実施しているが、将来の環境教育の一環として、水質マップ作りを学校教育の中で開始している。こうした研究により、各地域の水循環の特徴が明確になってきた。各地で得られるデータを利活用できるようになれば、地域性の強い水循環の特徴を理解する上でも有益であろう。

## 4. おわりに

地球研では、西条市との協働研究が契機となり、水質マップ作りを学生の研究テーマとして実施しながら、実験施設の利用促進と各地の大学との連携を試みている。地球研は今後、フューチャーアースという国際的な地球環境研究のハブ機関として、各地の大学や自治体、社会との連携の強化と、地球社会の実現に貢献する役割が求められている。

地球環境問題の解決には、自然環境と人間社会の時空間的変動に関する情報が不可欠であり、地球地図やモニタリングなどの実施が欠かせない。しかし、それらの実施には長い時間を要するため、短期間で成果を求める研究には向かず、コストもかかるために、研究者や社会の理解を得られないことが多い。研究機関と地域社会が協働するモニタリングや環境教育(NADPやGLOBEなど)は海外で提案・実践されているが、そのような活動と研究がセットになった仕組みは、水循環基本計画の策定・実施においても有効であろう。地球研では、西条市との水質協働研究を、大学や社会との教育事業や人材育成事業の一環として実施し、ボトムアップ的に得られる情報の共有や利活用を検討している。これにより、大学共同利用機関と各地の大学、自治体、地域社会の連携が促進し、モニタリングの強化や地球環境問題解決に資する新たな研究と研究体制作りにつながればと思う。

## 参考文献

総合地球環境学研究所編(2010) 未来へつなぐ人と水—西条からの発信—、創風社、127 p.