

愛媛県西条市

「千の水をとって～千点の地下水調査からわかったこと～」

徳 増 実

（愛媛県西条市経営戦略部政策企画課地域創生室）

1. はじめに

本市は、縦横に複数の断層が複雑に走った独特の地下構造を有し、東の西条平野と西の周桑平野（合わせて道前平野といいます）に、それぞれ地下水を貯める帯水層¹が存在し、全国でもめずらしい広大な自噴域が、西条平野には8.1 km²、周桑平野には8.2 km²広がっています（図1）。鋼管を20 m～30 mほど地下に打ち込むだけで湧き上がる地下水（自噴水）は「うちぬき」と呼ばれ、その数は3,000本を数えます。昭和60年に環境省（当時環境庁）から「名水百選」に選定され、さらに岐阜県揖斐川で開かれた、「いびがわ」ミズみずフェスタ「全国きき水大会」で2年連続全国1位に選ばれた“おいしい水”です。また11万人の市民のうち半数は自家水²を利用しており、水道普及率は50%ほどしかありません。つまり、多くの市民が日本一おいしいミネラル

ウォーターに直接アクセスして暮らしていると言っても過言ではありません。また、まちのいたるところに湧水（泉）が存在し、中小河川の源になり、清く透きとおった水が市内の水路を縦横無尽に流れています。このようなことから、本市は「水の都」と呼ばれています。

山間部と平野の割合は日本の平均と同じ7：3で、集水域³には、石鎚山系や高縄山系の山々が分布しています。この集水域もほぼ本市域内にあるため、一体的な水管理が可能となっています。平野部の年間降水量は1,400 mm程度ですが、山間部には2倍以上の降水量があり、瀬戸内海地域でありながら水資源の豊富な地域になっています。

しかし、昭和の後半から平成にかけて、沿岸部では地下水の塩水化⁴が進行し、その原因と対策を研究する必要が生じてきました。

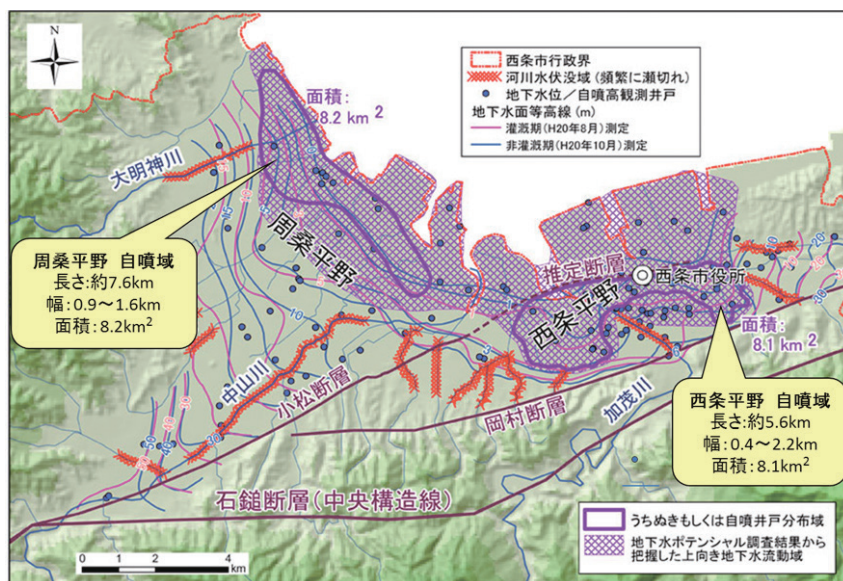


図1. 道前平野の自噴帯の分布（出典 西条市(2017)）

2. 道前平野地下水資源調査研究委員会

このように地下水に恵まれているが故に、地下水に強く依存している本市では、地下水を将来にわたって保全しなければなりません。前述の塩水化や主要河川の加茂川の流況が悪くなるなど、地下水資源への不安が強まったことから、本市では市全域で地下水資源の調査をすることになりました。通常、行政の調査はコンサルタント会社に丸投げして、調査結果を受け取って完了、というパターンが多いのですが、この地下水調査では、平成19年4月に道前平野地下水資源調査研究委員会を立ち上げて、この委員会の中で、調査内容や手法を委託したコンサルタント会社と協議しながら調査を進めました。その委員には水文学、地質、水質、流動解析など各分野から地下水の有識者の方々に集まっていただきました。地球研からは谷口真人副所長と中野孝教名誉教授に委員になっていただきました。この委員会発足が地球研と本市の関わりの起点となりました。

3-1. 水循環研究と水質調査

平成19年にこの委員会が立ちあがると、各委員から実際に調査に加わりたいとの要望があり、中野孝教名誉教授を中心に谷口真人副所長ほか4年間に22のテーマで、地球研ほか7大学8名の先生方に調査に加わっていただきました。ここでは、中野孝教名誉教授とのコラボレーションを中心に紹介させていただきます。

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⁵⁾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す。

量を予測する情報は実際の流速や流量の観測値です。河川の管理者が測定したり、管理者の許可を取って、研究者が測ったりします。今回、中野孝教名誉教授とコラボレーションしたのは水質の分野です。

分析の主な項目は安定同位体⁶⁾と微量金属です。水を構成する水素と酸素の安定同位体比は水

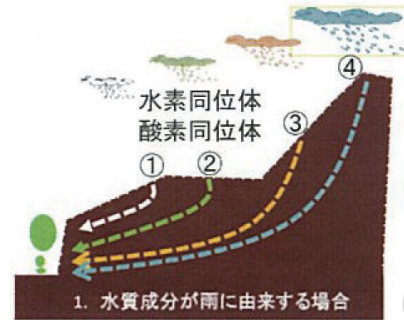


図2. 水素・酸素同位体の地下でのフロー
(出典 中野ら (2015))

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を表す指標として利用されてきました。例えば、降水の水素・酸素同位体比は標高と共に変化しますが、地下の岩石は水を含まないで、その値が保存され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す。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となります(図2)。一方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ます。

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ります。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ます。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ことになります。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ります。地球研は大学共同利用機関として、こうした研究に 대응する実験施設が整備されており、地球研との協働研究はとりわけ重要でありがたいものでした。このようなことが契機となり、平成21年8月に地球研と本市は交流協

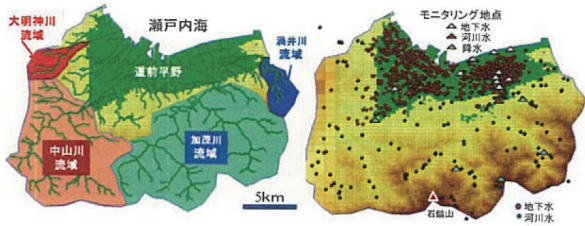


図3. 西条市の河川流域（左）、地下水と河川水、降水の採水地点およびモニタリング地点（右）
（出典 中野ら（2015））

定を締結し、水質履歴法の開発とその社会実装がより活発に進められました。

3-2. 地表水の多項目水質マップ

河川水は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。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）の地表水を採水しました（図3）。試料は全て地球研にて 53 成分の水質組成と 4 種類の安定同位体比が分析され、結果、多くの水質項目について、1. 季節変化より地理的変化はるかに大きいこと、2. 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、が明らかとなりました。市が採水している 91 カ所の地下水についても同様な分析が実施され、相互に比較した結果、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が強く支持されました。

3-3. 千の地下水の多項目水質マップ

市民に水への理解を深めてもらうことを意図して、平成 20 年 9 月に市民シンポジウムを開催しました。研究成果の紹介は一部に留め本市の水の豊さを伝えることを主眼とし、地球研スタッフと本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ました。台風が接近し雨中であるにもかかわらず 300 名弱の市民が参加し本市が水に恵

まれた市であることを再認識する良い機会となりました。このシンポジウム後、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、水質分析結果を市民と市に還元していただくプロジェクトが中野名誉教授から提案され、ありがたく受諾実施することになりました。「千の風になって」の歌手、秋川雅史氏が本市出身であることから、「千の水を採って」というプロジェクトの名称で市の広報に掲載し採水と水温測定を募りました。採水した地下水は 1,032 地点に及び地表水と同じ多項目水質分析が行われました（図3）。

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ました。

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りました。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しました。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

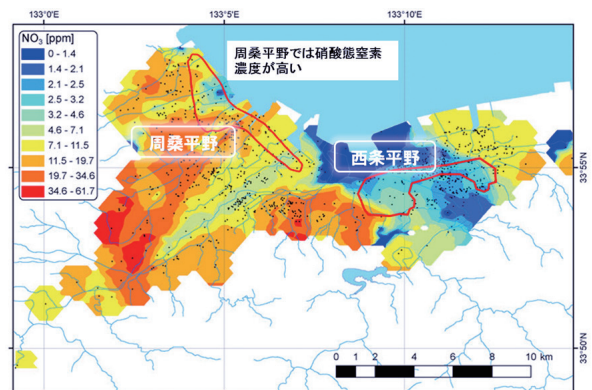


図4. 地下水の硝酸態窒素濃度の分布
（出典 西条市（2017））

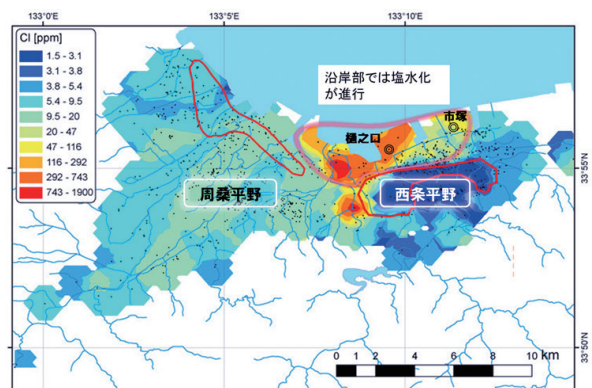


図5. 地下水の塩化物イオン濃度の分布
（出典 西条市（2017））

に地下を流れる姿を可視化できました。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ました。

他の水質成分からは、さらに異なる情報が得られました。窒素汚染の実態は硝酸イオンの分布に現れており（図4）、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ました。塩化物イオンやマンガンなどの分布からは、塩水化は還元的环境下で進んでいることが示されました（図5）。また輝安鉱の廃鉱山によるアンチモン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ました。

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りました。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ます。本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ます。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流⁷⁾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ました。

水質分析の結果は、採水に参加した市民一人一人に簡単な説明文を加えて報告されました。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が中野名誉教授により報告されました。参加した市民は600人におよびました。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りました。

3-4. 水質の経時的モニタリング

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ました。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す。水質マップから鍵となる地点を選定できた（図3）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、水温と共に水質についても同様なモニタリングが実施されました。

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のに対して、自噴水の水温変化はほぼありません。前者は水質マップから、加茂川が平野に入った後の伏流水であると考えられます。伏流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ます。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ます。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しています。水質情報をさらに解析され、流速も含めその流動が明確になることが期待されています。

降水の水素・酸素同位体からは、本市に降った雨の再蒸発による寄与が指摘されています。一方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ました。このことは、降水由来の重金属元素は土壌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壌が優れた浄化機能を果たしていることを示しています。重金属元素濃度が高い降水は冬季に多く、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ています。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ています。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ます。

4. 今後の展望について

平成19年から実施されてきた道前平野地下水資源調査の結果は、平成29年8月に西条市地下水保全管理計画としてまとめられました。現在は、この計画を基にした、地下水の保全に関する条例の見直しを目指しています。

水質マップやモニタリングにより、本市一流域においても、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ました。

本市では、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ました。岩手県大槌町でも沿岸域の湧水利用に向けて、本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ます。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、私が参加しネットワークの強化を図りました。秋田県遊佐町では、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ます。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ました。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されていますが、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ます。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ました。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ると考えています。

また、地球研と本市との交流協定に基づき、平成29年度から政策情報交換会を開催し、お互いのニーズやシーズを出し合い、さらにwin-winの関係を築いて行こうとしています。

用語説明

- 1) 地下水で満たされた砂層等の透水性が比較的

良い地層であり、一般には地下水取水の対象となり得る地層のこと

- 2) 各家が自らの土地にパイプを帯水層まで打ち込みポンプ等でくみ上げた水
- 3) 降った雨や溶けた雪は地表を流れて川に流れこみますが、雨や雪が流れ込む範囲
- 4) 地下水帯水層に海水が混入し、地下水の塩素イオン濃度（塩分濃度）が高くなること
- 5) 地表の水（降水を主としてほかにも、湖沼水・河川水、貯水池・雨水浸透ますなどの水、その他）が地下浸透して帯水層に水が供給されるエリア
- 6) 放射性同位体のように放射性崩壊をせず、一定の比率で自然界に安定に存在する同位体
- 7) 河川水が河川敷や旧河道の下層にある砂礫層に流れ込むことを意味します。加茂川の場合、岡村断層の山側から裂罅^{れっか}水として、帯水層に流れ込んでいると考えられています。

引用文献

- 中野孝教、斎藤 有、申 基澈、佐々木和乙、徳増 実（2015）「RIVER FRONT」Vol.81、公益財団法人リバーフロント研究所、pp.26-29
- 徳増 実、山田佳裕、高瀬恵次、中野孝教（2019）「長期観測結果からみた愛媛県西条平野の断層が地下水位に及ぼす影響について」、地下水学会誌、第61巻第3号、pp.183-196
- 西条市（2017）、西条市地下水保全管理計画

著者情報



徳増 実（西条市経営戦略部政策企画課地域創生室）1982年愛媛大学大学院農学研究科修士課程修了、1982年道前福祉衛生事務組合（構成団体：西条市ほか1市2町）化学分析センター、2004年西条市市民環境部環境課、2016年愛媛大学大学院連合農学研究科博士課程社会人コース入学、2017年より現職。

（2020年3月31日掲載）