

オーストラリア，ビクトリア州南西部の 半乾燥地河川水の酸素・水素同位体比および 溶存成分について

井伊博行¹・John Sherwood²・Frank Stagnitti³・
Nick Turcozy⁴・平田健正⁵・西川雅高⁶

¹正会員 博(理) 和歌山大学教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)
hiro@sys.wakayama-u.ac.jp

^{2,3}Ph.D., Deakin University, Associate Professor, School of Ecology and Environment
(Warrnambool Victoria Australia 3280)

⁴Ph.D., Deakin University, Lecturer, School of Ecology and Environment

⁵正会員 工博 和歌山大学教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

⁶理博 国立環境研究所 (〒305-0053 つくば市小野川16-2)

オーストラリア，ビクトリア州南西部の半乾燥地において，河川水の酸素・水素同位体比と溶存成分濃度から，河川水の蒸発過程と塩水化の原因を解明した．内陸部の降水量が少なく，水の供給量が少ない場所では，塩湖が存在する．塩湖では，乾季に周辺から供給された水が完全に蒸発することで塩が集積し，雨季に新たに降水が加わることで，塩濃度が高く，同位体比はほとんど降水の値に一致する水が形成された．湿地において，蒸発と水の供給が繰り返し起こることによって，水が完全に干上がった部分の塩と一部で干上がらずに残った水が混ざることによって，塩濃度も同位体比も高い水が形成された．河川や湿地において，水位低下が小さく，干上がることがない場合は，同位体比，塩濃度は蒸発の割合で変化する．

Key Words : evaporation, isotope, river water, precipitation, δD , $\delta^{18}O$, salt lake, meteoric line

1. はじめに

オーストラリア，ビクトリア州の降水量は800mm/yearで，特に，ビクトリア州西部は500mm/year以下¹⁾と少なく，塩害が重要な環境問題となっている²⁾．河川水の塩水化は，揚水された塩濃度が高い地下水の河川への排水，流域での河川水の使用量の増加や蒸発に伴う河川水の流量減少，放牧のための伐採による地下水面上昇に伴う塩の析出などが原因と考えられており^{3),4)}，特に，ビクトリア州西部の塩害の問題は，オーストラリア東部で一番深刻な問題となっている⁵⁾．グレネッグ(Glenelg)川は，ビクトリア州西部の大川の一つであるが，水量の多い塩水河川でもあり，河川の塩水化を防ぐことは，今後の水資源開発にとって急務な課題である⁶⁾．一方，グレネッグ川は1000m級の山岳地帯から出発しているため，上流部では，塩濃度が低く，多量の水が得られる可能性を秘めているので，塩水化のメカニズムを解明することで，良質な水が得られるものと考えられ，著者らはこの地域を調査地点に選んだ．

酸素・水素の同位体比は，降水とその後の地上での蒸発が発生した水では，異なる同位体比の特徴を持っている．降水はほぼ天水線上($\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$)⁷⁾にあるが，その後，地上で蒸発を受けた水は，天水線と異なった傾き($\delta^{18}O$ の係数が8でなく，5から6になる)の直線上にある．そこで，湖などの水の蒸発量の推定に酸素・水素の同位体比が有効に利用された例が報告されており⁷⁾，河川の蒸発による塩類集積の影響を調べるために，この調査地域でも，酸素・水素の同位体比を用いた研究を試みた．

2. 調査地域

図-1に示すように調査地域は，ビクトリア州西部のグレネッグ川流域で，流域面積12660km²である．グレネッグ川の平均流量は20m³/sec⁸⁾で，最大標高1167mのグランピアン山系(Grampians)を水源として，グレネッグ川と下流で合流するワノン(Wannon)川と共に西に流下した後，南下して南極海に流れている．図-1に示された採水地点分布から判るように，河川水や地下水の採水ポイントは，

表-1 降水の化学組成と同位体比

	Horsham	Warmambool	Mt.Gambier
Cl ⁻ (mg/l)	6.3	13.0	16.9
Na ⁺ (mg/l)	3.5	8.6	10.2
Ca ²⁺ (mg/l)	1.1	1.0	1.4
Mg ²⁺ (mg/l)	0.5	1.1	1.2
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	1.2	2.5	3.2
δ D(‰)	-34.5±0.8	-33.2±0.8	-25.0±0.8
δ ¹⁸ O(‰)	-6.1±0.05	-5.8±0.05	-4.0±0.05

3. 調査方法

グレネッグ川とワノン川の河川調査は、1999年9月28日から9月29日、2000年1月31日から2月1日、7月26日から27日、11月14日から15日の計4回にわたって行った。その地点を図-1に示す。地下水は1999年9月30日と10月1日、支流の河川水は2000年の3回の調査で行った。原位置において、試水に溶解している全溶存イオン濃度の指標となる電気伝導度を携帯用測定機器(HORIBA ES-14)を用いて測定し、0.45 μmのメンブランフィルターで濾過した後、試水を200mlのポリ容器に入れ、分析するまでは冷暗所に保管した。試水の溶存成分の内Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻はイオンクロマトグラフィで分析を行った。HCO₃⁻は現場で滴定により測定を行った。河川水の酸素及び水素の同位体比測定は、酸素の同位体比は炭酸ガスと、水素の同位体比は水素ガスと平衡にさせた後、ガスを質量分析計に導入して測定を行った。降水はロウトで採水後、ポリ容器に入れ、河川水と同様の操作を行い分析した。降水の採水は、この地域の雨季を中心に2000年4月から2001年1月まで行った。

4. 水質の特徴

(1) 降水の同位体比

一般に物質は、同じ元素であっても質量の異なる同位体で構成されている。酸素と水素には、重さの異なる¹⁸Oと¹⁶O、D (²H) と¹Hの同位体が存在し、その割合(δ¹⁸O、δ D)は、次式のように示される⁷⁾。

$$\delta^{18}\text{O}, \delta \text{D} = \left[\left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} \right) - 1 \right] \times 1000 \quad (1)$$

ここで、Rは¹⁸Oと¹⁶O、D (²H) と¹Hの比である。図-2に示すように、ウォーナムブル、マウント・ガンビア、ホーシャムの3地点の降水の酸素・水素同位体比は、典型的な天水線上(δ D = 8 × δ¹⁸O + 10)にある。また、表-1に示すように降水の酸素・水素同位体比の加重平均値は、それぞれ、ウォーナムブルで-33.2‰と-5.8‰、マウント・ガンビアで-25.0‰と-4.0‰、ホーシャムで34.5‰と-6.1‰であった。3地点の中で一番西にあるマウント・ガンビアで最大値を示し、内陸のホーシャ

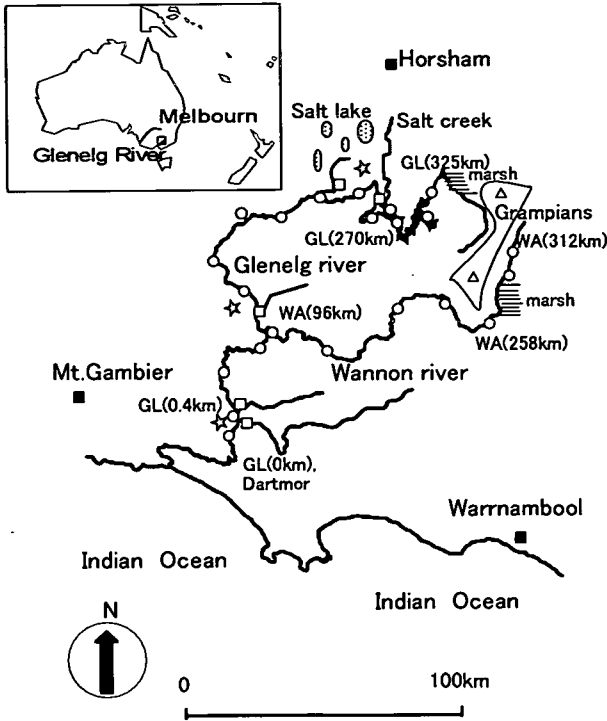


図-1 調査地点図

海水の侵入のないダートモア(Dartmoor)から上流のグレネッグ川と最大支流のワノン川流域である。図内の記号は、■が降水、○がグレネッグ川とワノン川、□が支流の河川、☆が地下水の採水地点を表している。また、括弧内の数字は、ダートモアからの距離を表している。降水の採水は、流域を囲むように、ウォーナムブル(Warrnambool、標高20m)、マウント・ガンビア(Mt.Gambier、標高40m)、ホーシャム(Horsham、標高120m)の3地点で行った。流域の降水量は、山岳地帯の最上流部のグランピアン山系で最大1000mm/yearに達するが、多くは600から700mm/yearであるが、マウント・ガンビア、ウォーナムブルの700mm/yearからホーシャムの450mm/yearと、内陸に向かうほど小さくなる傾向がある⁶⁾。また、4月から10月が雨季、11月から3月が乾季に相当し、夏に雨が少なく、冬に雨が多く、年間の可能蒸発量は、マウント・ガンビアで約1500mm/yearである⁹⁾。年平均気温は13.6度である⁶⁾。土地利用は最上流部のグランピアン山系は、険しい山岳地帯であると共に、自然林が広い範囲で残されているが、グランピアン山系から下流域の多くの地域は放牧地、針葉樹による植林地が、グレネッグ川の北部から西部に点在している。グランピアン山系を除くと、第3紀から第4紀の堆積物と第4紀の溶岩(溶岩台地)が分布する。グランピアン山系は古生代の火成岩と堆積岩からなっている。

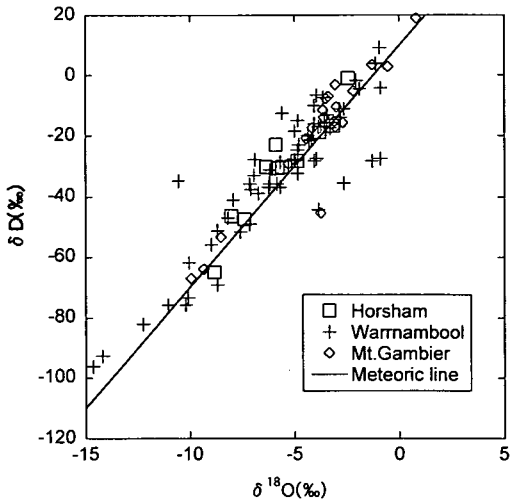


図-2 降水の酸素・水素同位体比

ム、東部のウォーナムブルではほぼ同じ値を示している。河川水の流域は、この3地点内にあり、河川水の元となる降水の同位体比もこれらの値から出発するものと考えられ、この後これらの値は、河川水の同位体比と比較される。

(2) 降水の化学組成

表-1 に降水の化学組成の加重平均値を示す。海岸に近いウォーナムブル、マウント・ガンビアは、内陸のホーシャムに比べて、 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 濃度が高く、 Ca^{2+} はほぼ同じ濃度である。これらの降水の化学組成は、一般的な日本の降水の化学組成¹⁰⁾に比べると、海岸に近いウォーナムブル、マウント・ガンビアの Cl^- 、 Na^+ は、最大8倍から10倍も日本の平均値よりも高く、ウォーナムブルの SO_4^{2-} は平均値に相当し、降水の溶存イオン濃度は全体に高い。河川水の溶存成分の変化を考察する場合、降水直後の化学組成として、これらの値を参考にして考察した。

(3) 河川水の同位体比

図-3に、グレネッグ川、ワノン川、支流河川と地下水の酸素・水素同位体比を示す。地下水と支流の河川水は、グレネッグ川沿いに分布するので、グレネッグ川の図面に併記した。また、グレネッグ川、ワノン川は4回の異なる時期に調査しているので、その違いをみるために、調査日時ごとに、分類してプロットした。その結果、流域の河川と地下水の酸素・水素同位体比は、天水線と交差し、降水の同位体比の平均値からスタートする直線上にあることが判る。天水線の傾きは8であるが、この直線の傾きは、5から6である。蒸発が湖などの地上で起こると、その水の同位体比は、傾きが5から6の直線上に沿って大きくなることが知られている⁷⁾。グレ

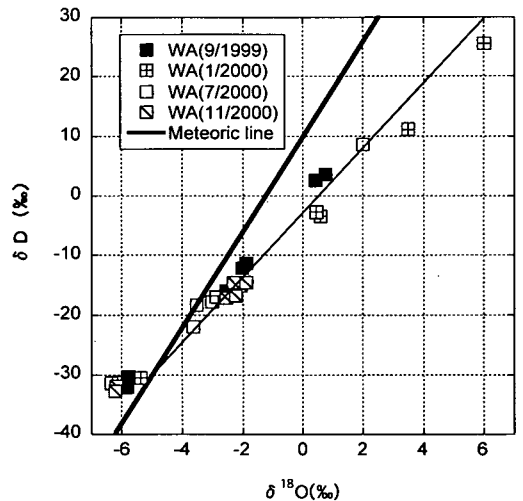
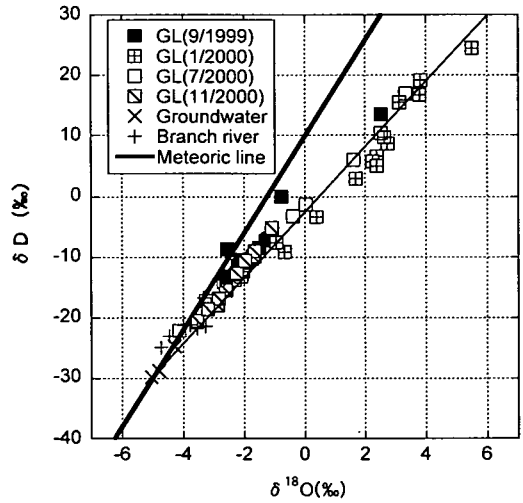


図-3 グレネッグ川、地下水、支流の河川（上図）およびワノン川（下図）の酸素・水素同位体比

ネッグ川、ワノン川の河川水は、降水の平均的な水が蒸発によって、同位体比が大きくなり、天水線から離れた水であることが判る。それ故、グレネッグ川、ワノン川の河川水は、同位体比に変化がみえるほど蒸発が起こっていることが判る。そこで、どの時期、どの地点で蒸発が活発に起こっているのかを調べるために、最下流の採水地点（図-1のGL(0km)、ダートモア）から上流への距離と水素同位体比の関係を図-4に示した。支流の河川及び地下水は、グレネッグ川沿いに分布するので、グレネッグ川の図面に併記した。また、酸素同位体比は、水素同位体比と同様の傾向を示したので、ここでは、水素同位体比のみを載せた。

グレネッグ川の水素同位体比は、全体的に降水の平均値の-30‰よりも高い。また、上流部ほど高く、流下するにつれて小さくなっており、流下するにつれて蒸発した水の割合が小さくなっている。グレ

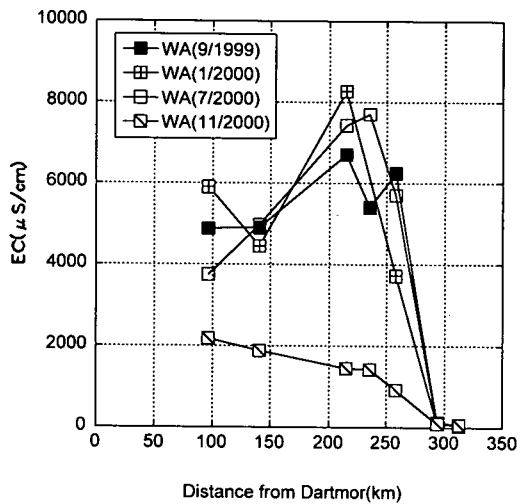
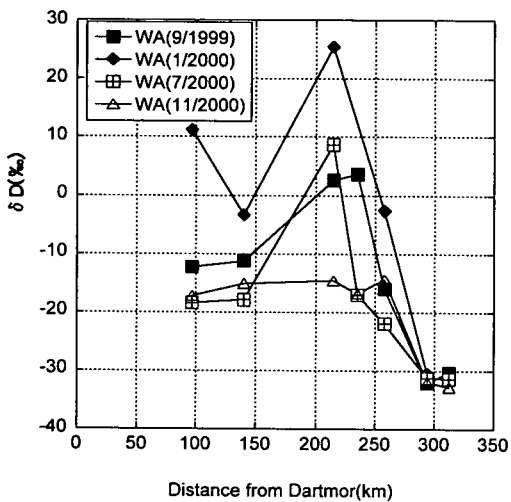
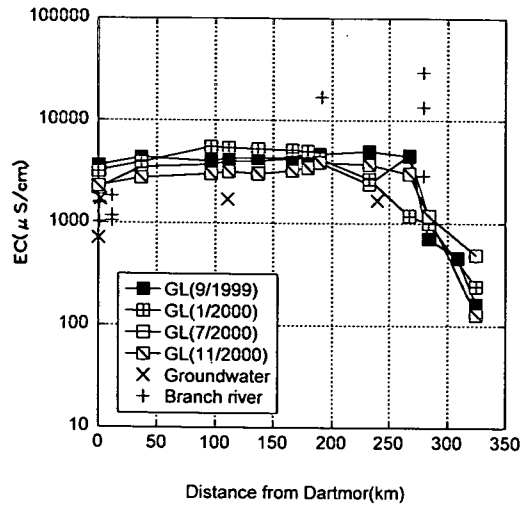
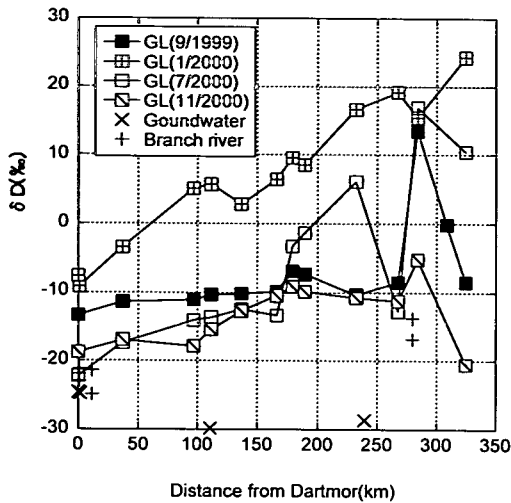


図-4 グレネッグ川、地下水、支流の河川（上図）およびワノン川（下図）の水素同位体比の流下過程での変化

図-5 グレネッグ川、地下水、支流の河川（上図）およびワノン川（下図）の電気伝導度の流下過程での変化

ネッグ川最上流部の採水地点（図-1のGL(325km))は、2000年1月に水素同位体比が24.4‰を示し、降水の平均値に比べてかなり高いことが判る。これは、グレネッグ川では、流下するにつれて蒸発が進み、降水の平均的な同位体比から徐々に外れたのではなく、最上流部ですでに蒸発がかなり進み、その水が流下するにつれて、同位体比が下がったと考えられる。最上流部での蒸発の可能性としては、最上流部の採水地点よりも上流には湿地が広がり、そのさらに上流に水源となる山地がある。そのため、最上流の採水地点までに河川水が十分に蒸発し、同位体比が高くなった可能性はある。また、4回の観測結果を比較すると、2000年1月の夏季の乾季に、同位体比はどの地点でも高く、1999年10月の雨季の終わりに比べると、最上流部で水素同位体比が35‰も上昇している。その後、

雨季の中頃の2000年7月、雨季の終わった2000年11月と同位体比は小さくなり、蒸発の割合が少なくなっていることが判る。また、グレネッグ川に流入する支流の河川水や周辺の地下水の同位体比は、グレネッグ川よりも低く、降水の平均値に近いので、これらの水が合流することで、流下に伴いグレネッグ川の同位体比が小さくなったと考えられる。最上流部から280km(最下流からの距離)付近までは、2000年1月を除き、流下するにつれて同位体比は増加しており、図-3上では、天水線から離れる現象となる。280kmから下流では、同位体比は、一部を除き減少しており、図-3上では、天水線に近づく方向に変化することになる。したがって、グレネッグ川の同位体比の5から6の傾きは、単純に平均的な降水からの一方的な蒸発だけで進化した水でなく、蒸発と平均的な降水の流入によって形成さ

れたと考えられる。最下流から上流へ280km付近にある支流（図-1のSalt creek）は、ソルトクリークと呼ばれる塩濃度が高い沢水であるが、これらの同位体比も降水の平均値よりも10%ほど高いが、グレネッグ川よりも低く、この水が流入することで、天水線方向に同位体比は変化する。

一方、ワノン川の水素同位体比は、上流部で降水の平均値とほぼ同じくらい低く、流下するにつれて高くなり、蒸発によって、同位体比が高くなったと考えられる。ここでも、2000年1月の乾季に同位体比は最大値を示している。この時の水素同位体比は+25.5%で、グレネッグ川の最大値とほぼ同じ値を示している。ワノン川中流から下流でも、同位体比は低くなっており、グレネッグ川と同様に中流以降は、蒸発による同位体比の上昇は考えられず、支流の流入の影響と考えられる。

(4) 河川水の化学組成

蒸発にともなって、溶存成分が濃縮されるので、溶存成分の濃度の目安となる電気伝導度と最下流の採水地点からの距離との関係を図-5に示した。

グレネッグ川では、電気伝導度は、上流部で流下と共に増加し、その後は増加せず、ほぼ一定で、下流付近で微減傾向にある。また、上流から下流まで同位体比が一番高かった2000年1月の電気伝導度は、どの地点でも他の時期に比べて高くない。したがって、電気伝導度は、必ずしも同位体比と共に増加しておらず、同位体比は最上流部ですでに高く、次第に減少するが、電気伝導度は、最上流部から中流部にかけて急激に増加している。蒸発により電気伝導度も同位体比も高くなるが、グレネッグ川では、同位体比変化と電気伝導度の変化は一致せず、電気伝導度の変化は蒸発だけでは説明できない。電気伝導度が高くなる直前に合流している支流のソルトクリークの電気伝導度が、合流前のグレネッグ川よりも最大10倍以上も高く、同様のソルトクリークと呼ばれている電気伝導度の高い沢水が上流部に他にも存在するので、グレネッグ川の電気伝導度の増加は、電気伝導度が極めて高い沢水の流入が原因と考えられる。また、ソルトクリークなどの支流の同位体比は、-15から-25%と低く、これらの水がグレネッグ川に入ることによって、グレネッグ川の同位体比が流下するにつれて、減少したことが考えられる。

一方、ワノン川の電気伝導度は、同位体比の変化と一致して、流下するにつれて高くなっており、また、乾季に高く、雨季に低くなっているため、蒸発によって、電気伝導度が高くなったことが推測される。特に、同位体比と電気伝導度が急に高くなっている最下流の採水地点から上流へ280km付近には、湿地帯があり、その場所で蒸発により高くなっていることが考えられた。

グレネッグ川、ワノン川共に、同位体比が高いのは、蒸発による同位体効果(一部の水が蒸発すると、気体の方に軽い同位体が、液体の方に重い同位体が集まる傾向にある)と考えられた。しかし、2000年

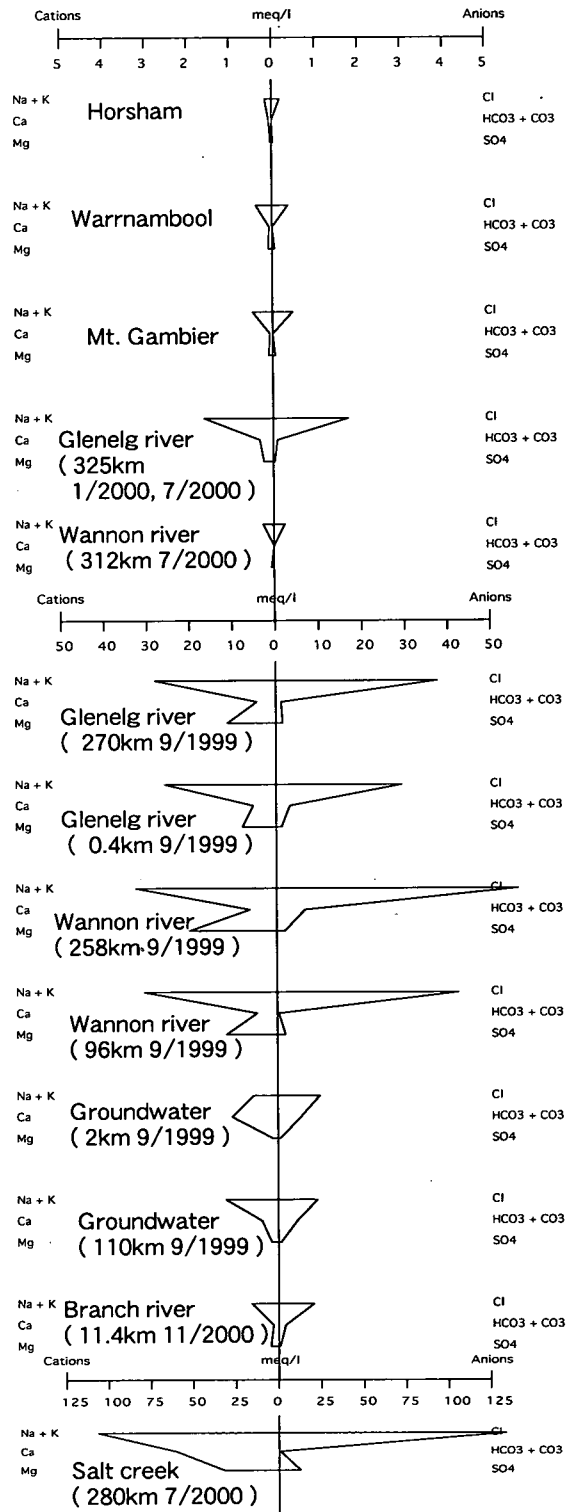


図-6 ヘキサダイアグラム (kmは最下流の採水地点からの距離を示す)

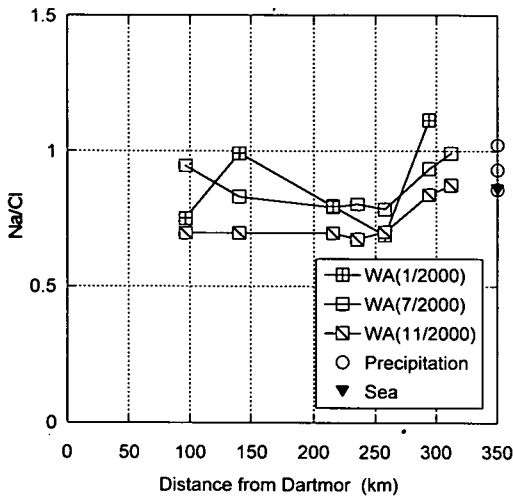
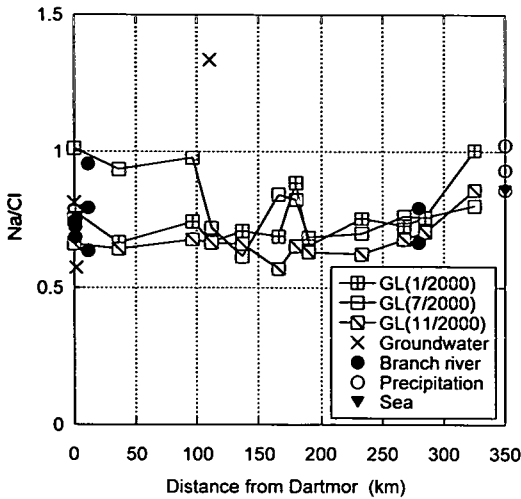


図-7 グレネッグ川, 地下水, 支流の河川 (上図) およびワノン川 (下図) の Na^+/Cl^- の流下過程での変化

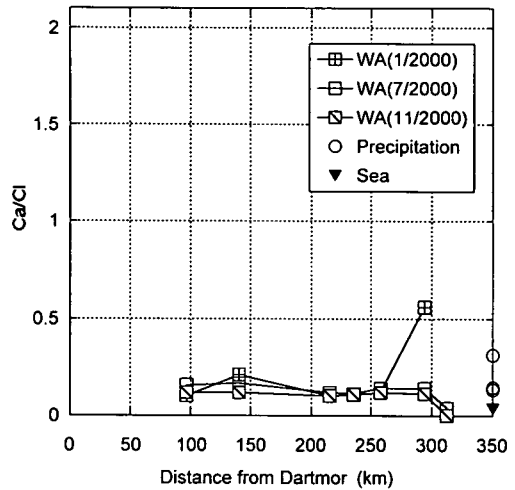
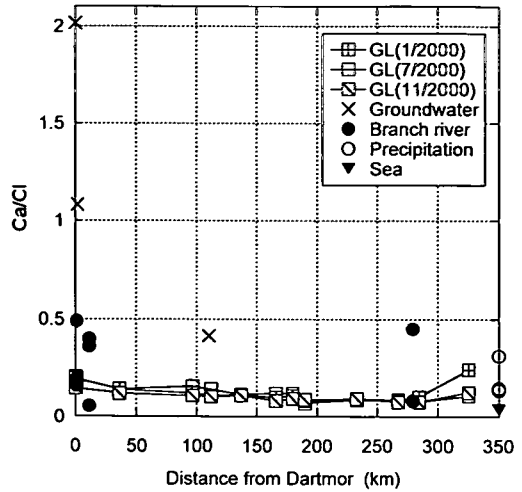


図-8 グレネッグ川, 地下水, 支流の河川 (上図) およびワノン川 (下図) の $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ の流下過程での変化

1月に、両河川でほぼ同じ水素同位体比 (約25%) が観測されたが、観測された場所と電気伝導度が異なっていた。グレネッグ川では、最上流部で、電気伝導度は、 $240 \mu\text{S}/\text{cm}$ で、ワノン川では、中流部で、電気伝導度は $8300 \mu\text{S}/\text{cm}$ であった。このように、電気伝導度が大きく異なる原因は、両河川の水が降水の同位体比からスタートし、蒸発により同位体比が変化した場合、1) 蒸発前の塩濃度が異なるか、2) 蒸発途中で、塩が混入して、蒸発による濃縮以上の塩濃度になることが考えられる。塩濃度が異なる場合や塩の混入がある場合は、塩の組成に変化があることが考えられるので、その変化をみるために、図-6に代表的な地点のヘキサダイアグラムを示した。ワノン川の最上流地点である最下流地点から上流へ312kmの河川水 (図-1のWA(312km)、2000年7月に採水) は、電気伝導度が一番小さく、ホーシャム、ウォーナムブル、マウント・ガンビアの降水の組成、濃度に近いことが判る。また、こ

の水の同位体比は、図-3、4から水素同位体比が、 -30% 以下の天水線上にあり、蒸発が起っていないことが考えられる。したがって、この河川水は、最も初期の降水起源の水であることが判る。一方、グレネッグ川の最上流地点 (GL(325km)、水素同位体比が10%以上の2000年1月と7月の採水の平均値)の水は、ワノン川最上流地点より溶存成分が多く、また、下流の組成の特徴である Cl^- 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ に富んでいる。2000年1月と7月の水は、グレネッグ川で同位体比が高く、同位体比から最も蒸発が進んでいると考えられている。また、イオン組成の割合は、ワノン川の最上流地点の水に極めて似ており、ワノン川の最上流部の水を蒸発により濃縮させると、グレネッグ川の最上流部の同位体比の高い水の組成に近くなることが判る。グレネッグ川の最上流部の採水地点よりも上流には湿地が広がり、そのさらに上流が山地になっている。そのため、最上流の採水地点までに河川水が十分に蒸発し、溶存

成分が濃縮される可能性はある。

電気伝導度が1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上になる最下流の地点から上流へ270kmと0.4kmのグレネッグ川(図-1のGL(270km), GL(0.4km)), 258kmと96kmのワノン川(図-1のWA(258km), WA(96km))のヘキサダイアグラム(1999年9月採水)の形は、いづれも非常によく似ており、両河川共に流下しても、全体の濃度は何割か変化するが、そのイオン組成の割合は、ほとんど変わらないことが判る。さらに、このイオン組成の割合は、グレネッグ川最上流部ともよく一致し、 Cl^- , $\text{Na}^+\text{+K}^+$, Mg^{2+} によく富んでいる。したがって、最上流部から下流へとイオン濃度は、大きく変化するが、イオン組成の割合には、変化がみられないことが代表地点から判った。

そこで、主成分である Cl^- と他のイオンとの比の変化を上流から下流へと連続的にみた。図-7, 8に河川水, 地下水, 降水の Na^+/Cl^- と $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ の当量比を示した。降水と海塩の影響をみるために、3地点で採水した降水の平均値と海水の平均組成¹¹⁾を、ダートモアーからの距離に無関係に、横軸の350kmの地点にプロットした。上流から下流への河川水の比の変動は小さく、しかも、この地域の降水や海水の比とよく一致していることが判る。とりわけ、最上流部の河川水は降水と比が一致している。また、グレネッグ川に流れ込む支流のソルトクリーク(最下流から280km)の比も河川水と一致している。一方、最下流の地下水の $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ 比は、河川水の比と大きく離れている。以上のことから、降水から始まって、上流部の河川水, 下流部の河川水まで、イオンの濃度は変化するものの、イオン比は変化せず、また、支流から流れ込む河川水も同じようなイオン比を持っていることが判る。このイオン比は、 Cl^- , Na^+ に富む海水に近い組成であり、海岸に近い降水の特徴でもある。したがって、河川水の塩の起源は、降水からもたされた海水起源の塩や、元来、この地に残された海塩が起源と考えられる。そこで、降水や塩濃度の低い河川水が蒸発によって濃縮されることで、塩濃度の高い河川水の組成になるかを、次に考察する。

(5) 地下水の同位体比と化学組成

図-3に示すように、地下水の同位体比は、天水線上にあり、水素同位体比が-25から-30‰で、河川水よりも低く、降水の平均値に近いことが判る。また、図-5の電気伝導度も中流以降の河川水よりも低く、地下水は、上流部における河川水の塩濃度を上げる効果はなく、同位体比からほとんど蒸発が起っていない水であることも判る。一方、河川水の中流以降の電気伝導度、同位体比は低くなっているので、地下水が湧水として、河川水に流入することにより、河川水の塩濃度が低くなることも期待される。しかしながら、図-8の $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ の当量比は、地下水と河川水で大きくずれており、また、グレネッグ川の中流以降の同位体比、電気伝導度が小さ

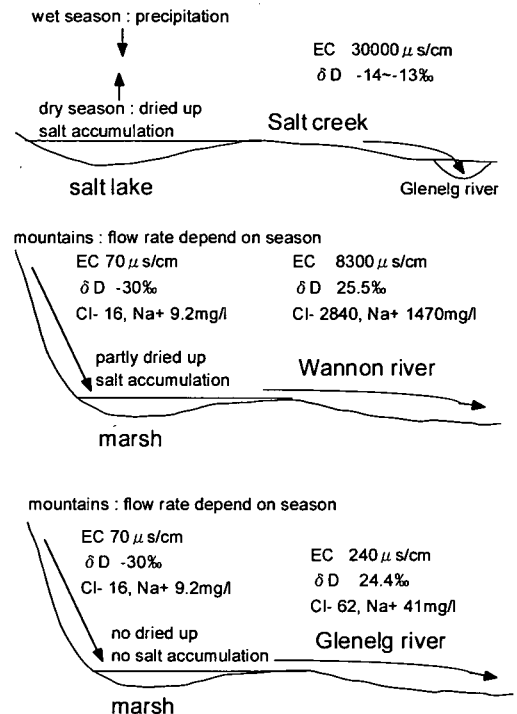


図-9 ワノン川・グレネッグ川の上流部とソルトクリークの蒸発過程と同位体比および塩濃度の変化

くなるにつれて、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ は変化していないこと、実際に河川沿いに湧水が確認されていないことから、地下水の混入による影響は小さいと考えられる。一方、支流の河川水の混入は、定量的には測定されていないものの、合流部で混入している現象を確認しており、中流以降のグレネッグ川の水質変化は、支流の河川水の混入で十分に説明される。

5. 蒸発過程の考察と蒸発量の試算

図-9に各地点の同位体比と電気伝導度の関係を示す。河川水の上流から下流まで、基本的には、イオン組成の割合には、大きな変化はなかった。ただし、グレネッグ川は、ソルトクリークと呼ばれる異常に塩濃度が高い沢水が存在し、その水が合流することによって、グレネッグ川の塩濃度が高くなったことが判った。このソルトクリークの水素同位体比は-13から-14‰で、降水の平均値の約-30‰に比べると高いが、天水線からそれほど離れていないので、蒸発があまり起こっていないことを示している。また、ソルトクリークのイオン組成の割合も基本的に、河川水と一致している。まず、ソルトクリークの塩濃度が高く、同位体比が低い水の起源について考察する。

ソルトクリークは、グレネッグ川の北側から発しており、その場所は流域より内陸側になり、乾燥している。その付近には、塩湖が散在し、乾季には、

完全に水は無くなる。したがって、雨季になり、降水が付近に浸透すると、塩を溶かし込んだ水が沢に流れ込むことになり、これがソルトクリークと考えられる。したがって、蒸発によって同位体比が高くなる水は、完全に蒸発するため、存在しないので、新たに降った降水の同位体比がソルトクリークの同位体比となり、結局、塩濃度は高いが同位体比は低い水となる。4回の観測では、ソルトクリークの水量は、乾季には、かなり減少しているため、水量は、降水量に影響を受けていることが判る。ここで重要なことは、蒸発が起こっても完全に、水が蒸発し、その後降水が供給されれば、同位体比は低くても塩濃度が高い水が生成することである。グレネッグ川では、流下にするにつれて、塩濃度は高くなるが、同位体比が低くなる原因は、ソルトクリークからの水の流入であり、その後、また、同位体比が低くなり、電気伝導度が低くなるのは、今度は、支流の同位体比が低く、塩濃度が低い水の混入と考えられる。

グレネッグ川の最上流部の地点とワノン川の中流部の地点の両河川水は、共に同じ最大同位体比を示しているが、電気伝導度は大きく異なっている。両河川水共にイオン組成の割合は、降水やワノン川最上流部の河川水の組成の割合と等しいので、どちらの河川水も降水やワノン川の上流部の水を、蒸発による濃縮を行うことで生成することができる。

ワノン川上流部の河川水からワノン川中流部の河川水の濃縮率は、電気伝導度、 Cl^- 、 Na^+ から120倍から180倍である。同様に、ワノン川上流部の河川水からスタートした場合のグレネッグ川最上流部の河川水の濃縮率は、3.4から4.5倍になる。濃縮率が120倍から180倍になるためには、蒸発が99.2から99.4%以上まで進む必要がある。これほど蒸発が進めば、残っている水は、0.8%以下となる。残っている水の割合が、0.8%以下の場合、場所によっては、完全に水が蒸発して、塩が集積する。また、ここまで、水が蒸発すれば、新たな上流からの水の供給がなければ、自然に水が流下することは考えられない。したがって、蒸発過程で濃縮される濃度以上になるためには、蒸発以外に塩の供給が必要となる。その可能性としては、塩水河川などの塩濃度の高い水の供給が繰り返し起こる蒸発によって生成した塩の蓄積が考えられる。ワノン川の同位体比、電気伝導度が増加する地点の手前は、グランピアン山系の麓に当たり、 $15 \times 20 \text{ km}$ の規模の湿地が存在する。しかし、内陸部と違い塩湖やソルトクリークのような塩水河川は知られていないし、目立った支流河川の合流はない。そのため、他の河川からの塩の供給は考えられず、湿地内での塩濃度の上昇が必要となる。塩湖のように完全に干上がれば、塩が残るが、同位体比の高い水も最後に蒸発して、消滅してしまう。湿地を通った水は、乾季でも極端に水量が減るが、流れが止まっていないことから、湿地は内陸部の塩湖と違い、完全には干上がっていないことが判る。その原因としては、ワノン川上流の湿地は、内陸部よりも降水量が多い場所にあり、しかも、そ

の水源が、さらに降水量の多い山地から供給されているためと考えられる。また、湿地では、流路面積が増えるため、乾季に水が完全に蒸発する部分と、同位体比が高くなった水が残留する部分ができ、湿地の水面が上流からの水量の増加で上昇することで、湿地内の蒸発で析出した塩と蒸発せずに残った水が出会い、同位体比が高く、蒸発で濃縮される濃度以上の水が生成したと考えられる。

一方、グレネッグ川の濃縮率は、蒸発が71から78%起こったことを示しており、残った水は、22から28%である。この量の水は、新たな降水の供給がなくても自然に流下できる可能性はある。したがって、グレネッグ川の同位体比と降水の平均同位体比との差に相当する水素同位体比で約54%、酸素同位体比で約10%の上昇が蒸発によるものだとすると、蒸発が約70から80%起きたことになる。日本の池田湖の例では、水素同位体比が20%、酸素同位体比が4%上昇した時に、蒸発が20%起きたことが報告されている¹²⁾。両地域では、蒸発量と同位体比に影響を与える湿度、温度等のパラメーターが異なるので、単純な比較はできないが、池田湖の例から、同位体比の変化と蒸発率に比例関係が成立すれば、蒸発率は50から54%となり、それほど塩濃度から求めた結果と大きな違いはないことが判り、蒸発による濃縮で説明される。

グレネッグ川、ワノン川の上流では、共に湿地で同位体比が高くなったことが判ったが、両河川で溶存成分濃度が大きく違った原因は、上流からの水の供給量と蒸発量のバランスと考えられる。グレネッグ川では、蒸発の程度が少なかったために、塩の蓄積が起こる干上がった部分が形成されず、蒸発に応じて、塩濃度・同位体比の上昇が起きたことが考えられる。一方、ワノン川では、蒸発に比べて上流からの水の供給が少なく、塩の蓄積となる干上がった部分が形成されることで、同位体比から推定される以上の濃度になったと考えられる。

以上のように、この地域の河川水の塩濃度上昇は、上流からの水の供給量と蒸発量とのバランスが重要で、特に塩湖や湿地での蒸発による塩濃度上昇が河川水の塩水化の大きな原因と考えられた。

6. まとめ

オーストラリア、ビクトリア州南西部の半乾燥地において、河川水の酸素・水素同位体比と溶存成分濃度から、河川水の蒸発過程と塩水化の原因を解明した。河川水の塩濃度と同位体比は、上流からの水の供給と蒸発とのバランスによって変化した。蒸発によって、塩濃度も同位体比も一般に増加するが、河川水の同位体比と塩濃度は必ずしも一致した変化を示さなかった。蒸発過程において、水の消失と塩の蓄積が一樣でない場合に、異常に塩濃度が高くなったり、蒸発量に応じた塩濃度や同位体比に変化しないことが推察された。

内陸で降水量が少なく、周辺からの水の供給量が少ないグランビアン山系から離れた地域では、塩湖が存在する。塩湖では、乾季に周辺から供給された水が完全に蒸発することで塩が集積し、雨季に新たに降水が加わることで、塩濃度の高く、同位体比はほとんど降水の値に近い水が形成された。

グランビアン山系の東南のワノン川上流部や西北のグレネッグ川最上流部の湿地では、降水量も内陸よりも多く、山地からの水の供給があるために、河川水が湿地に入っても、完全に干上がることはない。その結果、グレネッグ川最上流部の湿地では、蒸発によって塩濃度と同位体比が増加し、同位体比から推定される蒸発量は、塩濃度から推定される蒸発量とほぼ一致している。したがって、蒸発と共に、同位体比と塩濃度の上昇が一緒に起こっていることが判った。しかし、ワノン川上流部の塩濃度は、ほぼ同じ同位体比のグレネッグ川最上流部に比べて高く、塩湖のように湿地一面が干上がらず、蒸発と水の供給が繰り返して起こることによって、水が完全に干上がった部分の塩と一部で干上がらずに残った同位体比の高い水が混ざることによって、同位体比に比べて塩濃度が高い水が形成されたと推察された。

参考文献

- 1) DWR : *Water Victoria, A Resource Handbook*, Department of Water Resources, Melbourne, 1989.
- 2) Hart, B., Bailey, P., Edwards, R., Hortle, K., James, K., McMahon, A., Meredith, C. and Swadling, K. : Effects of salinity on river, stream and wetland ecosystems in Victoria, Australia, *Water Research*, Vol.24 pp.1103-1117, 1990.
- 3) Anon : *Wetlands Conservation Program for Victoria, DCFL, Water Victoria*, Ministry for Planning and Environment, 1989.
- 4) Mitchell, B. D. and Richards, K. : Macroinvertebrate communities in salt affected tributaries of the Hopkins River, Victoria, *International Journal of Salt Lake Research*, Vol.1, pp.81-102, 1992.
- 5) Williams, W.D. : Salinization of rivers and streams : An important environmental hazard, *Ambio*, Vol.15, pp.180-185.1987.
- 6) Cottingham, P. : Agriculture Victoria and Department of Conservation & Natural Resources, *Water Ecoscience Report Number 28/95*, 1995.
- 7) International Atomic Energy Agency : *Isotope Techniques in the Hydrogeological Assessment of Potential Sites for the Disposal of High-Level Radioactive Wastes*. Vienna : Technical Reports Series 228., 1983.
- 8) Mitchell, B., Rutherford, I., Constable, A., Stagnitti, F. and Merrick, C. : An Ecological and environmental flow study of the Glenelg river from Casterton to Rocklands Reservoir, Aquatic Resource Utilisation and Management Research Group, Deakin University, Warrnambool, 1996.
- 9) Penney, C.L. : "Climate" in *Natural history of the South East*, M.J. Tyler, C. R. Twidale, J.K. Ling and J. W. Holmes, eds., Royal Society of South Australia.1983.
- 10) 村野健太郎 : 酸性雨と酸性霧, 裳華房, 1993.
- 11) 多賀光彦, 那須淑子 : 地球の化学と環境, 三共出版, 1994.
- 12) 立見辰雄編 : 現代鉱床学の基礎, 東京大学出版会, 1977.

(2001.9.12 受付)

OXYGEN AND HYDROGEN ISOTOPIC RATIOS AND CHEMISTRY IN SEMIARID LAND RIVER WATER, SOUTHWEST VICTORIA, AUSTRALIA

Hiroyuki II, John SHERWOOD, Frank STAGNITTI, Nick TURCOZY, Tatemasa HIRATA and Masataka NISHIKAWA

Salt in a salt lake accumulated as a result of perfect evaporation of inflow water during the dry season. Water in a salt lake had a high salinity and its isotope indicated a little evaporation in the wet season because precipitation replenished the salt lake and there was no residual water during evaporation process in salt lake. In a marsh, both perfect and partial disappearance of water by repeated evaporation and water supply from upstream contributed to high salinity and high isotopic ratios because residual water had high isotopic ratios and dried areas accumulated salt. On the other hand, salinity and isotopic ratios depended on ratio of evaporation and water supply during evaporation excluding perfect disappearance of water.