

# カワシンジュガイの生態学的及び地球化学的手法を用いた過去100年間の河川自然環境復元と人の生活様式への影響

Reconstruction of 100-year river environmental changes using ecological and geochemical characteristics in fresh water pearl mussel, *Margaritifera sp.*

渡邊 剛<sup>1</sup>・鈴木 まゆみ<sup>2</sup>

Tsuyoshi WATANABE, Mayumi SUZUKI

<sup>1</sup>北海道大学大学院 理学研究院 講師

<sup>2</sup>北海道大学大学院 理学院 修士2年

## 要 旨

河川に生息する二枚貝であるカワシンジュガイには100年以上の長寿の個体が発見されている。そのアラゴナイトで形成された殻には年輪や日輪が刻まれる。

本研究では北海道の尻別川、天塩川、安平川、大別川で採取したカワシンジュガイ殻の成長がどのような要因によって支配されるかを成長線解析と地球科学的分析によって明らかにし、過去数十年から数百年間の河川環境及び気候の経年変化、季節変化を復元した。さらにその手法を用いた化石試料への応用を試みた。

本研究の結果から、カワシンジュガイは日から数十年単位の時間解像度で、地域から全球的な規模の気候までを記録していることが示唆された。また、同様の環境復元手法を化石試料へ応用することで、長期間にわたる古環境復元や過去の河川環境や気候変動などの記録が不足している歴史時代の環境変遷を復元できる可能性が示唆された。

《キーワード：カワシンジュガイ；日輪；年輪；成長線解析；地球化学分析；気候変動》

## 1. 序論

### (1) カワシジュガイについて

カワシジュガイは北半球の広い範囲の河川に生息している。日本にはコガタカワシジュガイ (*Margaritifera togakushiensis*) とカワシジュガイ (*Margaritifera laevis*) が生息しており、北海道にはこの両方の種類が確認されている (図.1-1)。同一の河川に両者が共存している場合もあるが、二つの種は決して遺伝的に交じり合うことはない。



図.1-1 北海道におけるカワシジュガイ類の分布 (粟倉2014)

また、淡水の二枚貝のなかでは最も長寿であるとされ、長生きのものでスカンジナビア半島に生息していた280歳のホンカワシジュガイが確認されている。

カワシジュガイは体を川底にさして上流側に口を開けており、流れてくる水をろ過し、餌を得ている。

### (2) 二枚貝を用いた研究

炭酸塩骨格を作る生物は、骨格形成時に当時の環境を記録しており、その骨格の微量元素組成や同位体組成を調べることによって、水温などの当時の環境を復元する指標として、広く使われている。サンゴの研究は近代広く行われてきているが、二枚貝を使った環境復元はいまだ解明されていない部分も多い。しかし、サンゴと違い二枚貝は日輪が観察できるものが多く、日レベルの高時間分解能を持つ点で優れている。また、今回試料として用いたカワシジュガイは淡水の二枚貝であり、環境記録の少ない河川域における貴重な試料である。

### (3) 研究目的

北海道の4地点の河川から採取したカワシジュガイを用いて、殻の微量元素分析と成長線解析とを組み合わせ、過去数十年から数百年間の河川環境及び気候の経年変化、季節変化を復元することを目指す。さらにカワシジュガイにどのように環境が記録されているのかを明らかにし、化石試料を用いた古環境復元を可能にすることで、河川域の環境記録指標としての可能性の拡大をはかる。

## 2. 試料

### (1) 調査地域について

北海道の天塩川、尻別川、安平川、大別川の4河川を調査地域とした(図.2-1)。図にはサンプル採取地(色付き円)と安平川以外はその採取地におけるそれぞれの分水界と流域面積を示してある。安平川は採取地が上流にあったため、水質観測点での分水界と流域面積を示してある。流域とは、降水を地下水や河川として排出する凹地状の地形のことで、この境界を「分水界」という。分水界は地形的な凸部の頂点に沿って描かれた境界線であり、地上への降水はこの分水界によって分けられ、排出される。

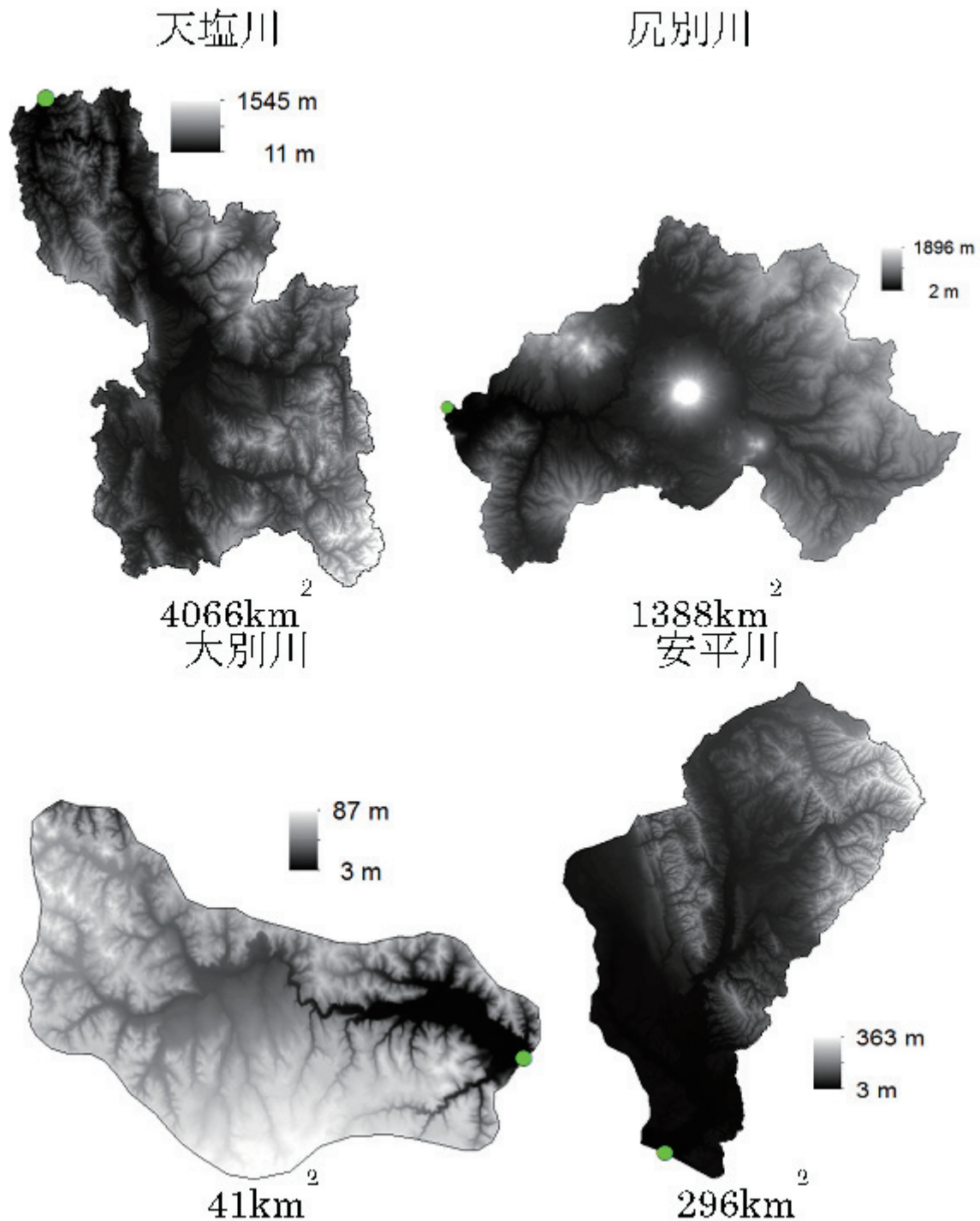


図.2-1 ArcGISを用いた各河川の円(緑色)における流域面積

降水量や気温などの一般的な気候の平年値を図に示す（図.2-2、図.2-3）。

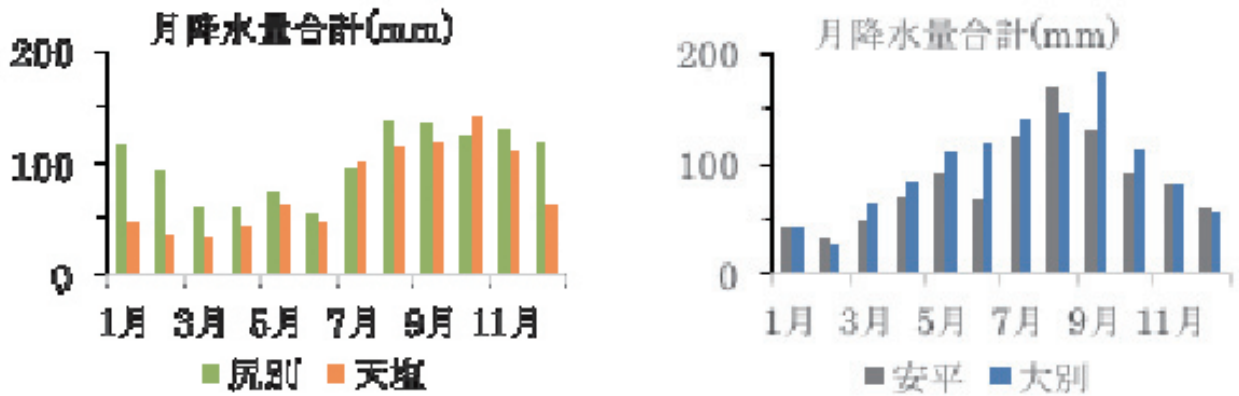


図.2-2 月降水量合計の日本海側（左）と太平洋（右）

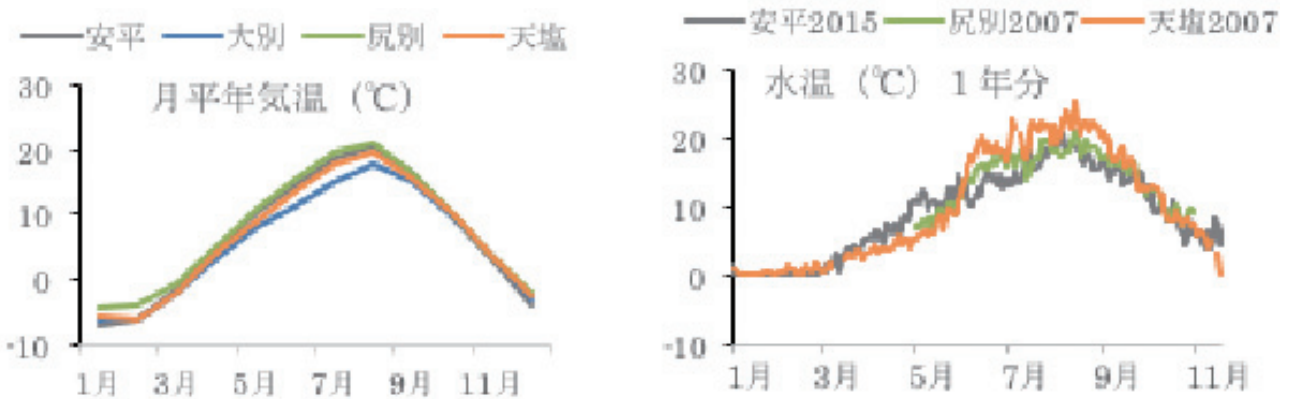


図.2-3 各地の月平均気温（左）と日平均水温（右）

水温は尻別川と天塩川は国土交通が測定しているデータであり、安平川は設置した水温計のデータである。以下にそれぞれの河川の特徴を示す。

- 天塩川** : 流域面積が広い。安平志内川を支流に持つ。第一級河川で水質自動観測所が行われている。川幅も広く、日本海に流れ込む。
- 安平志内川** : 天塩川の支流である。川幅は30メートルほどある。
- 尻別川** : ニセコ連峰に流域を囲まれる。第一級河川であり、水質自動観測が行われている。尻別川はカワシンジュガイが密集して、大量に生息している。
- 大別川** : 本研究のカワシンジュガイは道東に位置する厚岸町太田地区の別寒辺牛川水系、大別川の下流において、採取された。厚岸町は1800年頃からの記録には、洪水が多く起こっていたことが残されている。また、土地利用の変化などの記録が明確に残っている場所でもある。カワシンジュガイ採取地であるSt.7周辺は、水質が赤褐色に濁っており、流速も緩やかである。カワシンジュガイが生息している場所の底質は細粒～中粒砂であり、透明度は50cmほどであった。
- 安平川** : 安平川は北海道勇払郡安平町から苫小牧市を通り、勇払川と合流して太平洋へと流れ込む。安平川は浅く、小規模な河川であり、第二級河川であるため、水質自動観測は行われていない。本研究のカワシンジュガイサンプルは安平川上流から採取した。

**弁天貝塚** : 弁天貝塚は安平川河口付近の弁天浜に位置する。弁天貝塚は考古学的調査が行われ、その報告書（佐藤、1989）によると、文書記録や通貨から形成時期は幕末期から明治初期にかけて作られたと推測されている。



図.2-4 弁天貝塚位置図

## (2) 研究試料

本研究のカワシンジュガイ殻は別寒辺牛川で採取してあった、2008年の2個体、2010年の14個体を使用した。また、安平川では、2014年8月22日に採取した5個体、2015年4月30日に採取した11個体を、天塩川では2015年11月19日に本流で採取した18個体と支流の安平志内川で採取した8個体を同様に用いた。尻別川では2007年9月30日に採取された3個体、また同年11月16日に採取された14個体のうち、年輪幅計測には合わせて12個体が用いられた。

これらの現生カワシンジュガイは生体部を切除し、洗浄、自然乾燥して、サンプル袋に入れて保存してあった。2008年に採取したサンプルは、既に先行研究で切断されて、完全な状態では残っていなかったため、切断部のすぐ近くの部分を新たに切断し、使用した。その他に、苫小牧市に位置する弁天貝塚から出土した化石試料も9個体を用いた。また、河川水試料は、本研究で用いたカワシンジュガイが生息していたすべての河川から調査の度に採取した。気象データは本研究調査地点付近の気象庁が管理している観測所のデータを得た。それぞれ観測点は、天塩川は天塩、尻別川は蘭越、安平川は厚真、大別川は太田である。

天塩川と尻別川の水温や降水・流量などのデータは交通局から得た。安平川と大別川は第二級以下の河川であるため、水質自動観測は行われていない。そのため、安平川には水温計を設置し、2014年12月25日から2015年11月20日までの水温データを得た。

### 3. 手法

#### (1) 成長線解析

##### a) 顕微鏡観察用の切片作成

試料は乾燥して割れやすいため、切断面を接着剤で包埋し、その後最大成長軸に沿って岩石カッターで3回切断し、厚さ4mm前後の2切片を作成する。2切片は向かい合った面を上にして用い、それぞれ微量元素分析などの地球科学的手法と成長線解析のための観察用に使用する。このようなやり方をミラーリングという。その切片を800番、2000番、6000番の研磨剤で研磨し、解析に用いた。



図.3-1 最短成長軸（赤線）を基準にした切断位置（上写真）  
切り出された対になっている切片（ミラーリング）（下写真）

##### b) 染色

OB02、OB15の2個体は年輪線を見やすくするため、染色と表面を溶かし有機物量の違いでわずかに凹凸がつくエッチングを行った。手法は<sup>1)</sup>に習い、1%酢酸500ml、25%グルタルアルデヒド500ml、アルシアンブルー5～10gを混ぜた溶液を作成し、約37℃に保ちながら、その中に11分間試料を浸すことによって行った。

##### c) 成長線計測

切片は光学顕微鏡 (Keyence Digital Micro Scope VHX-2000) を使って年輪や日輪を観察するとともに、写真で記録を残した。その後、その写真の年輪幅や日輪幅を画像解析ソフトであるImageJを使って計測した (図.3-2)。年輪幅は内層と外層の境界と年輪線の交点から次の年輪線に対して垂直になるように点を打ち、その間の長さを計測した<sup>1),2)</sup>。日輪幅も同様に計測した。

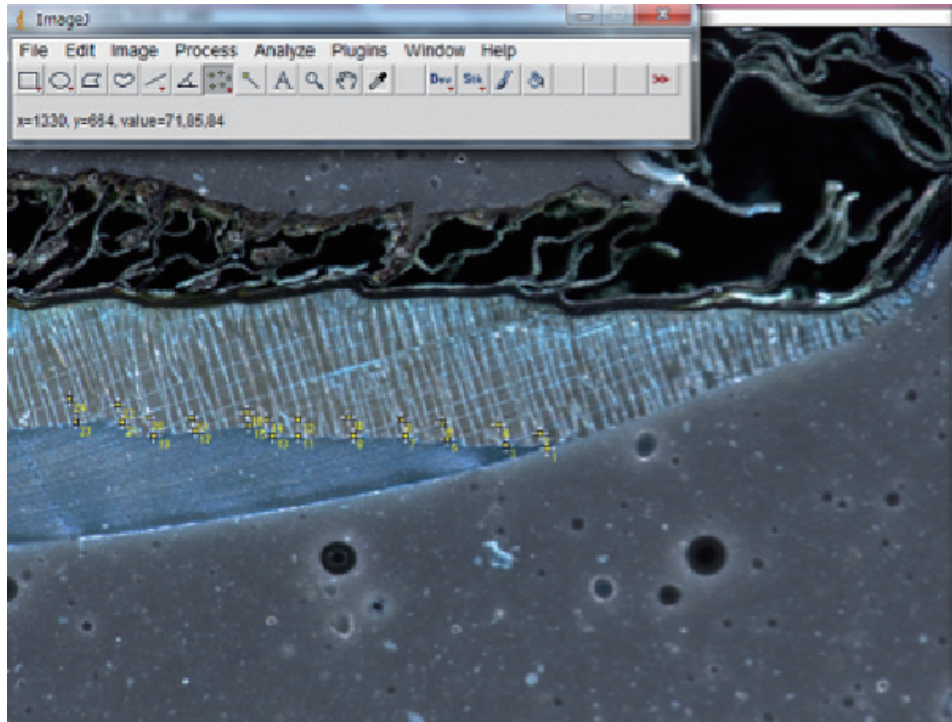


図.3-2 年輪幅の計測手法

d) SGI (Standardized Growth Index)

貝は幼少期に急激に殻の大きさが成長し、年をとるにつれて成長速度は緩やかになっていく (図. 3-3)。そのため、個々の成長トレンドを取り除いて、その年の成長幅の集団全体の傾向をみるために、SGIという指標を使用した。SGIの手順としては、まず、個々の成長幅を計測したものに、近似曲線を引く (図.3-4)。

近似曲線は逆指数関数か一次関数のどちらか相関のより高い方を使用する。年輪幅をこの近似曲線の値で各年毎に割ったものがGrowth Index (GI) である。そして、このGIの平均と標準偏差を求め、GIからその平均を引き、標準偏差で割ったものが、Standardized Growth Index (SGI) である。

化石などの試料の場合、こうして求めた各々のSGIを同じ波形を持つところで重ねあわせることによって年代を決定し、SGIを平均化して1本の時系列データにする (Master Chronology)。本研究の試料では、死亡した日付が明確であるので、そのまま日付をいれ、各々のSGIを平均化した。

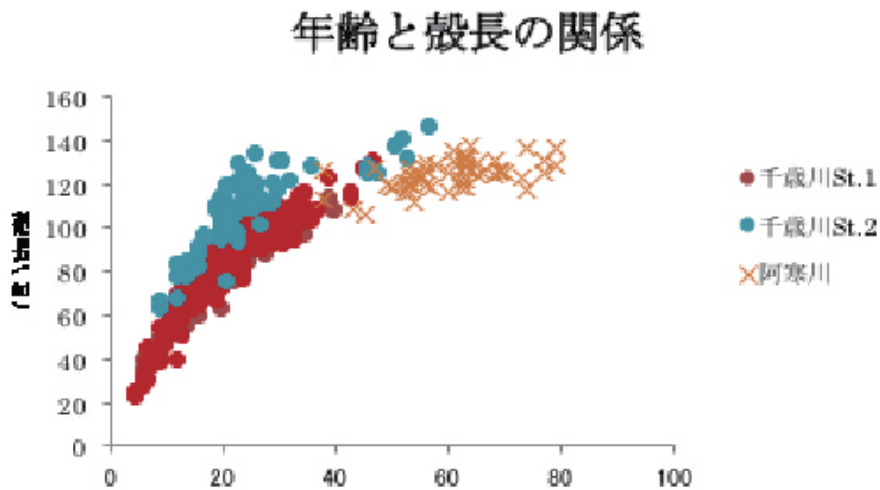


図.3-3 カワシンジュガイの年齢による殻長の違い (粟倉1969)

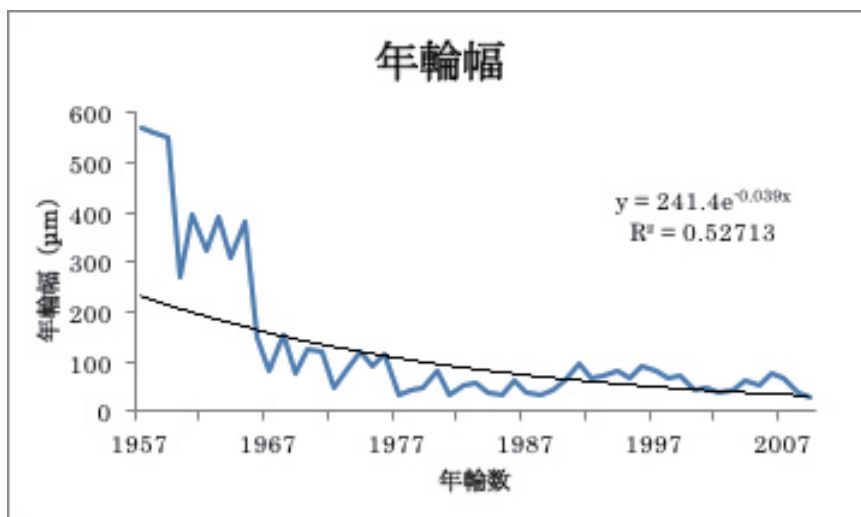


図.3-4 年輪幅とその近似曲線

## (2) 微量元素分析

### a) 殻の微量元素分析

東京大学大気海洋研究所にあるLA-ICP-MSでカワシンジュガイのOB15とBB17の2個体の殻の微量元素分析を行った。測定した元素はLi、B、Na、Mg、K、Ca、Mn、Cu、Zn、Sr、Y、Mo、Cd、Ba、La、Nd、Pb、Uである。殻の外層の殻皮に近い部分に沿うように、レーザーを当てるスポットを配列して、測定を行った。レーザーを当てるスポットの直径はOB15を50 $\mu\text{m}$ 、BB17を100 $\mu\text{m}$ に設定した。

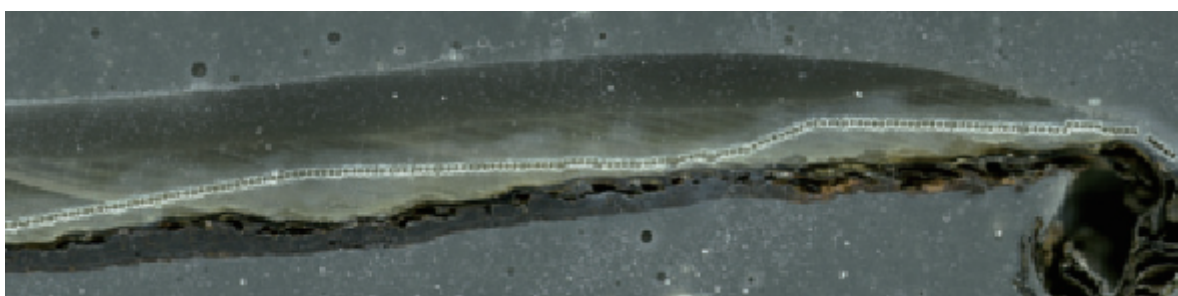


図.3-5 LA-ICP-MSによる分析スポット

測定の最初と最後に標準物質として、National Institute of Standards and Technology (NIST) によって作られているNIST SRM 610、NIST SRM 612、日本における炭酸塩の標準物質である、Coral JcP-1、Giant JcT-1を測った。また、試料の測定は10~15スポット毎にNIST SRM 612を3点とレーザーを照射しないブランクを1点ずつ挟んで行い、NIST SRM 612の値で測定のコンドィションが変化していないかどうかをみるとともに、濃度への換算に使用している。データは全て信号強度として出てくるので、濃度への変換作業が必要である。まず、バックグラウンドを取り除くために、ブランクの値を引く必要がある。全てのブランクのデータファイルを平均した値を標準物質やサンプルのデータ一つ一つから引く。また、各スポットのデータはレーザー照射前後の、試料を測定しているのではない時間のデータが含まれるので、各スポットのデータファイルの最初と最後の十から数十データはカットしてある。その後、サンプルを挟んだNIST SRM 612の強度の平均から、比を使ってサンプルデータの強度をモル濃度へと変換する。また、データはCa比に直してある。



#### b) 河川水とカワシンジュガイ外套膜外液の微量元素分析

ICP-AESにより河川水やカワシンジュガイの外套膜外液の微量元素分析を行った。河川水試料は採取後メンブレンフィルターを用いてろ過し、PHがおおよそ2になるように硝酸を添加して、冷蔵庫にて保存した。外套膜外液はカワシンジュガイの殻を開く前に、水平にした状態で外套膜外液と殻の間に金属注射針を差し込み、吸い出した。このとき、カワシンジュガイの身の部分に当たってしまうとうまく吸い込めず、また組織などを傷つけてしまうと外套膜外液が外に流れ出てしまうため、注意が必要であった。また、外套膜外液は低い位置に流れるので、適宜傾きを調整しながら両方の殻と外套膜の間から採取した。写真はカワシンジュガイの殻を開いてしまった後であるため、**図.3-6**では外套膜が殻からはがれてめくれているが、外套膜外液を採取する際は、殻の白い部分はほぼ完全に外套膜外液に覆われた状態で (**図.3-6** 下側の殻)、その間に針を差し込むようにして行う。採取した外套膜外液はメンブレンフィルターでろ過し、測定までに時間があくときは冷凍保存した。耳たぶのようなひらひらした部分が外套膜であり、下の写真の下側の殻のように開く前は殻と密着している。その間に針を差し込んで外套膜外液を採取する。両試料とも測定元素はMg、Ca、Mn、Sr、Baである。それぞれの元素で既定の濃度を持つ標準液を作成し、それを測定することにより、検量線を作成する。また同じ試料を何度か測定して、測定時間の経過で測定条件に変化がないかどうかを検討する材料とした。



図.3-6 カワシンジュガイを開いた様子

#### c) 酸素・炭素同位体比分析

カワシンジュガイ殻の酸素・炭素同位体比分析は北海道大学地球環境科学研究所所有のカーボネイトデバイス (Kiel DeviceIV) を連結させた質量分析計 (Finnigan MAT253) を用いておこなった。試料は20-40 $\mu$ gに分取して分析を行った。標準試料としてIAEAのNBS18、NBS19とC1を用いた。キャリブレーションはNBS19を用いた。

#### d) 貝塚出土試料の年代測定

年代測定を行う前にSEM (走査型電子顕微鏡) での観察及び、XRD (X線回折法) で測定を行い、続成作用の程度の評価を行った。

弁天貝塚出土の化石試料の年代測定は山形大学高感度加速器質量分析センターにおいて測定された。まずカワシンジュガイ殻3個体を測定し、その前処理としては以下を行った。貝殻表面の汚れや殻皮をカッターで削り取り、縁辺部に沿って数ミリ程度の幅で割って、500mg程度回収した。その後、1M HCl（室温）に浸け、表面の汚れが取れ、きれいになるまで適宜浸けた。汚れが取れた後は酸を捨て、純水で洗浄し乾燥させた。この前処理済み試料は山形大学にて、元素分析計、質量分析計、ガラス真空ラインより構成されるグラファイト調整システムにてグラファイト化を行われ、その後、加速器質量分析計（YU-AMS：NEC製1.5SDH）を用いて放射性炭素年代が測定された。

さらにその測定した3試料の中に含まれていた1個体を、異なる二酸化炭素の抽出方法での測定と殻皮試料の測定を行った。まず、前者は全く同一の前処理済みカワシンジュガイ殻試料から分取され、燃焼ではなくリン酸処理により二酸化炭素の抽出が行われた。殻皮試料は前処理として、廃液の色が透明になるまで純水、アセトンの順で超音波洗浄にかけ、汚れを取り除いた後、AAA（酸—アルカリ—酸）処理を行った。AAA処理はまず、スターラーを用いて80度に温めたHCl（1mol/l）に1時間つけ、同様に80度に温めたNaOH（1mol/l）に廃液が透明になるまでつけることを1時間単位で複数回繰り返し、さらにもう一度80度の塩酸に1時間つけた。その後、超音波洗浄を6回行った。AAA処理の際、サンプルが溶けて消失してしまうことがあるので、適宜、酸やアルカリを希釈したり処理時間を短縮したりした。比較対象として測定した安平川の現生カワシンジュガイ殻試料は最初に測定した3個体と同じ前処理と測定法で行った。全ての試料は測定後、校正曲線データにIntcal13を使用し、年代測定結果を出している。

## 4. 結果

### (1) 成長線解析

#### a) 年輪 (SGI)

大別川：各々のSGIを求めると以下のような変動を示した（図.4-1）。全個体を平均化したSGIを、95%の信頼区間とともに、以下に示す（図.4-2）。信頼区間はサンプル数にも左右されるため、年代が古くなるほど個体数が少なくなり、信頼区間は広がってしまう。また、最後は1個体のみの変動になり、信頼区間は定義することができない。平均化されたSGIには数十年単位の大きな周期の変動と数年単位の変動が見られる。値の平均が0.0965、最大が3.96、最小が-0.999であった。以下同様に各河川のSGIを求めた。

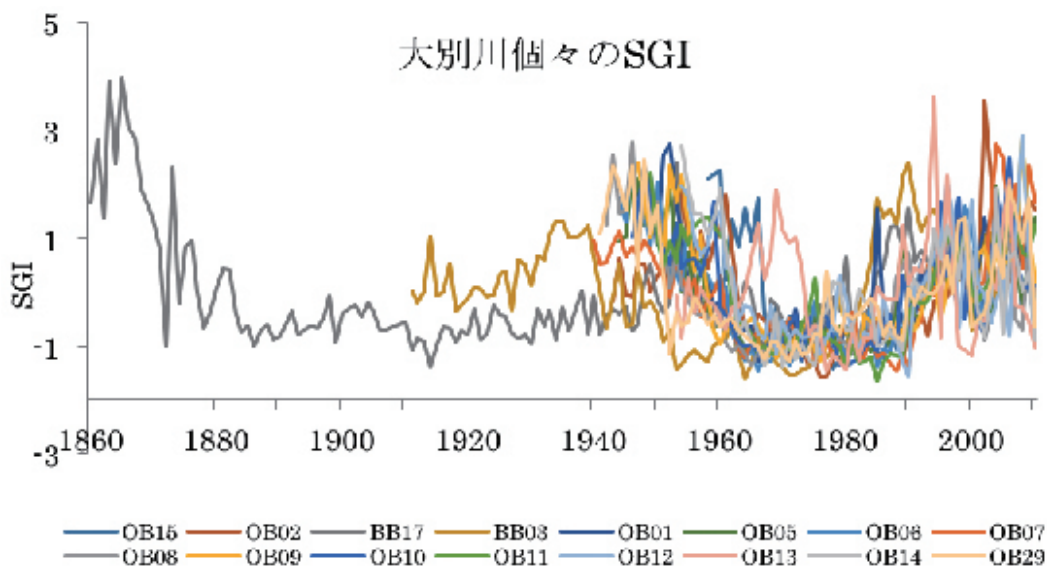


図.4-1 大別川個々のSGI (n=16)

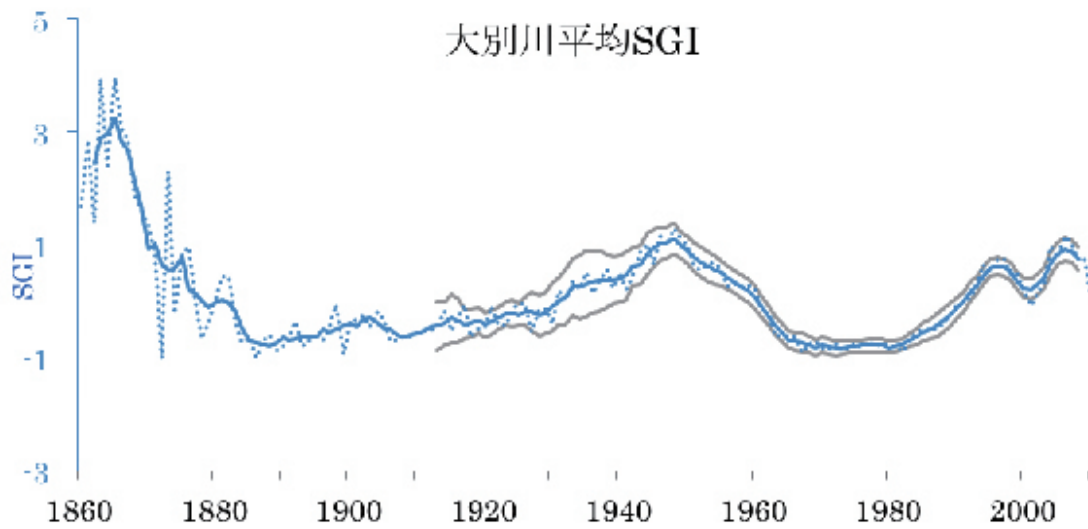


図4-2 平均化したSGI（青点線）とその5年平均（青実線）と95%信頼区間（灰色線）

安平川：平均化したSGIの値はその平均が0.00440、最大が1.63、最小が-1.72であった。

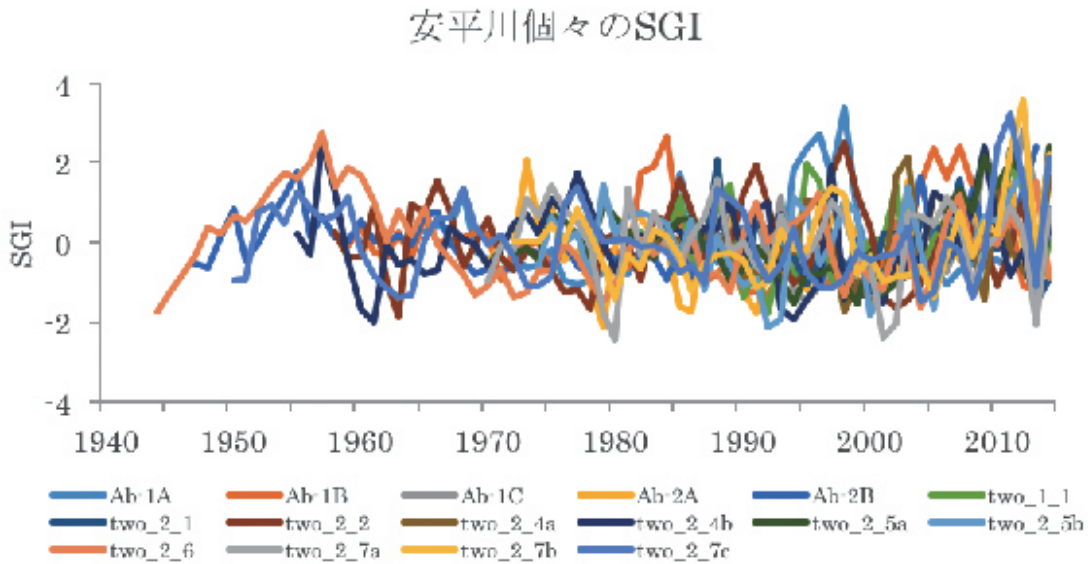


図.4-3 安平川個々のSGI (n=16)

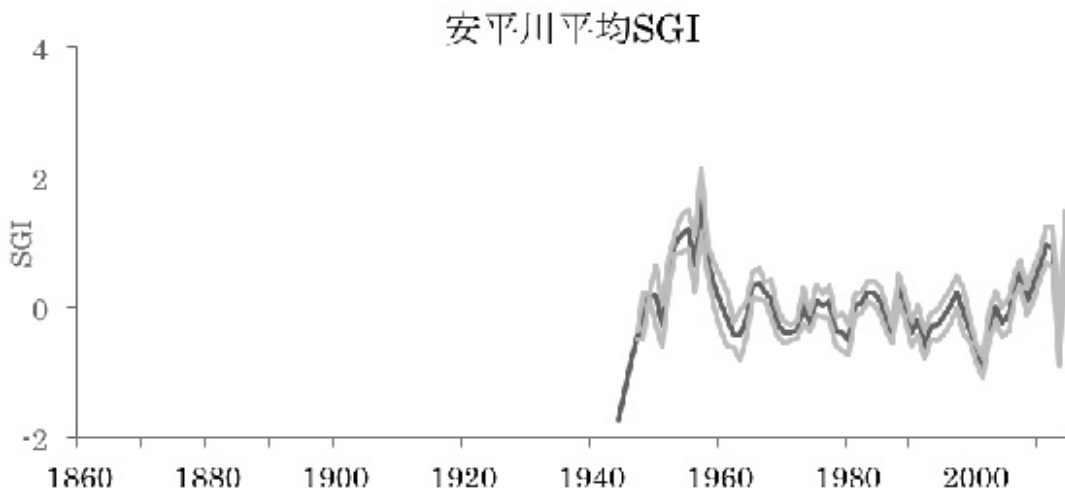


図.4-4 安平川の平均化したSGI（濃い灰色線）と95%信頼区間（薄い灰色線）

天塩川：平均化したSGIの値はその平均が-0.00828、最大が1.87、最小が-1.08であった。

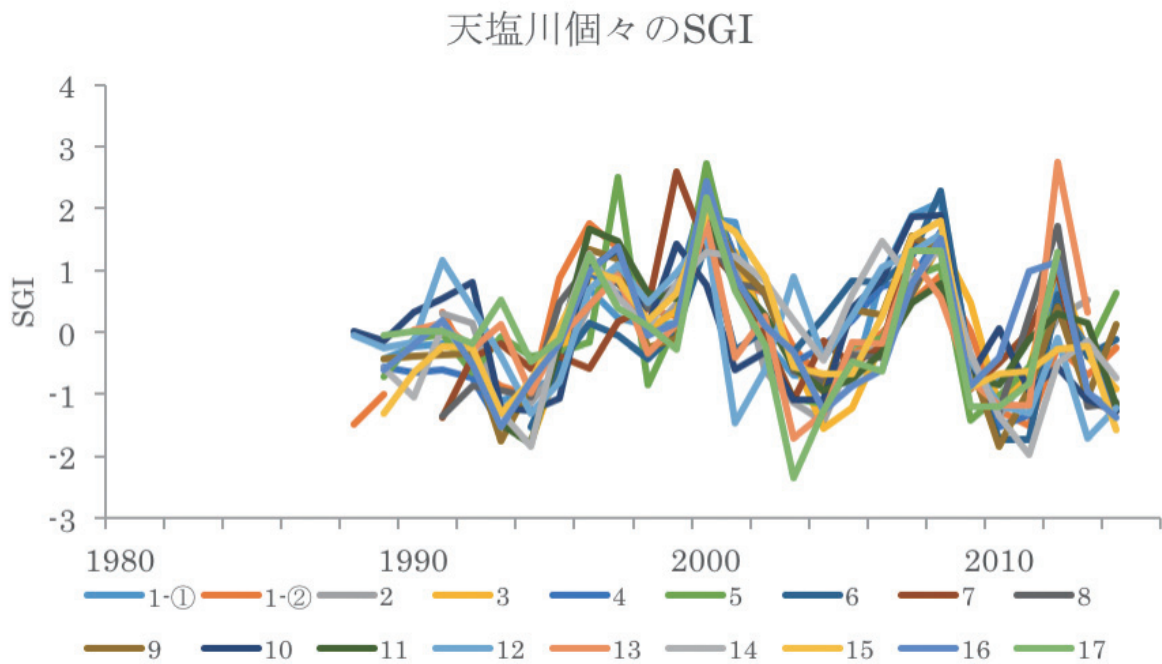


図.4-5 天塩川個々のSGI (n=18)

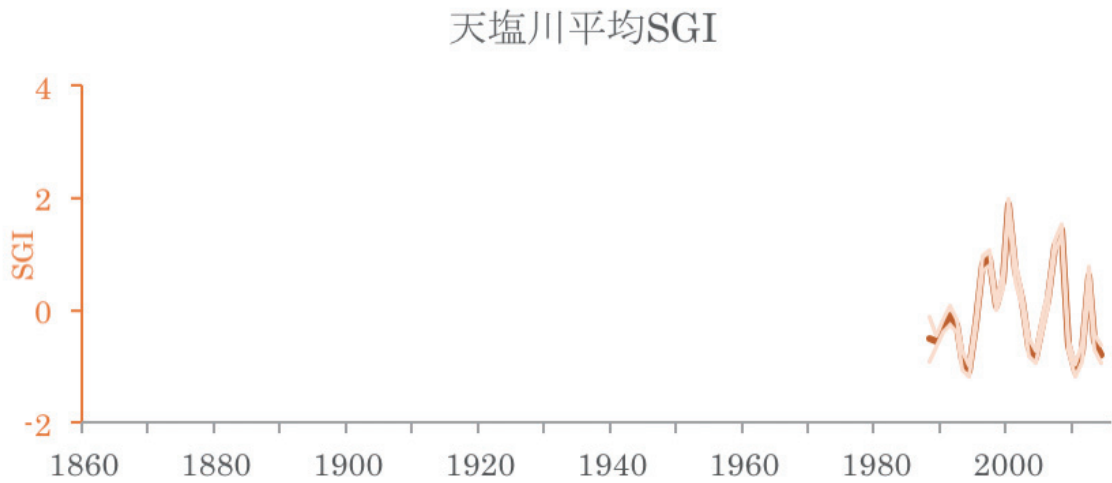


図.4-6 天塩川の平均化したSGI (濃いオレンジ線) と95%信頼区間 (薄いオレンジ線)

安平志内川：天塩川の支流である安平志内川のSGIの値はその平均が-0.0278、最大が1.41、最小が-1.10であった。

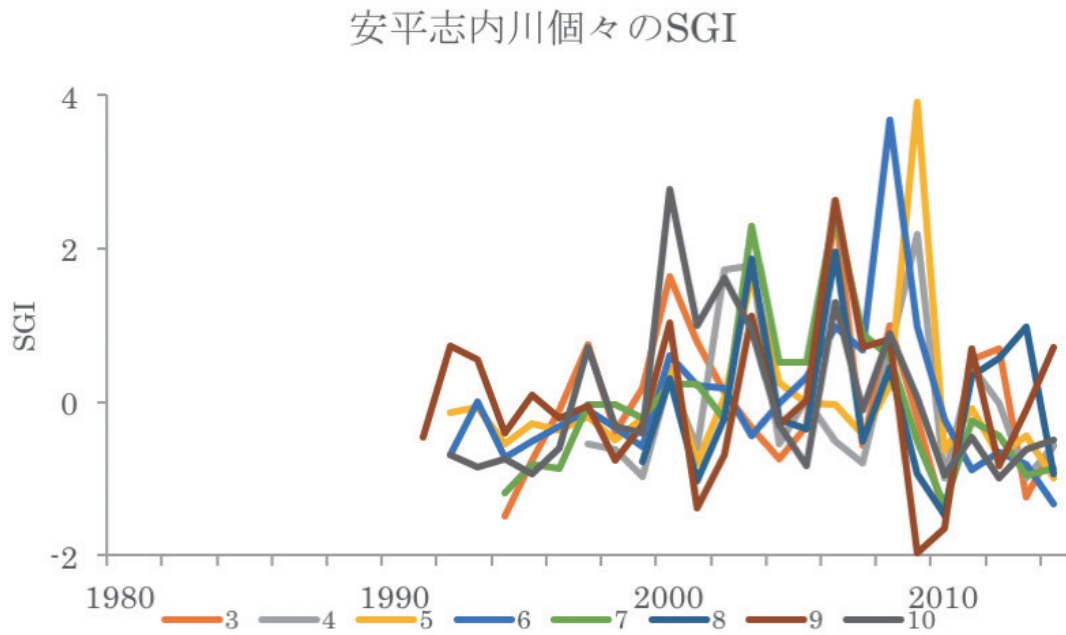


図.4-7 安平志内川個々のSGI (n=8)

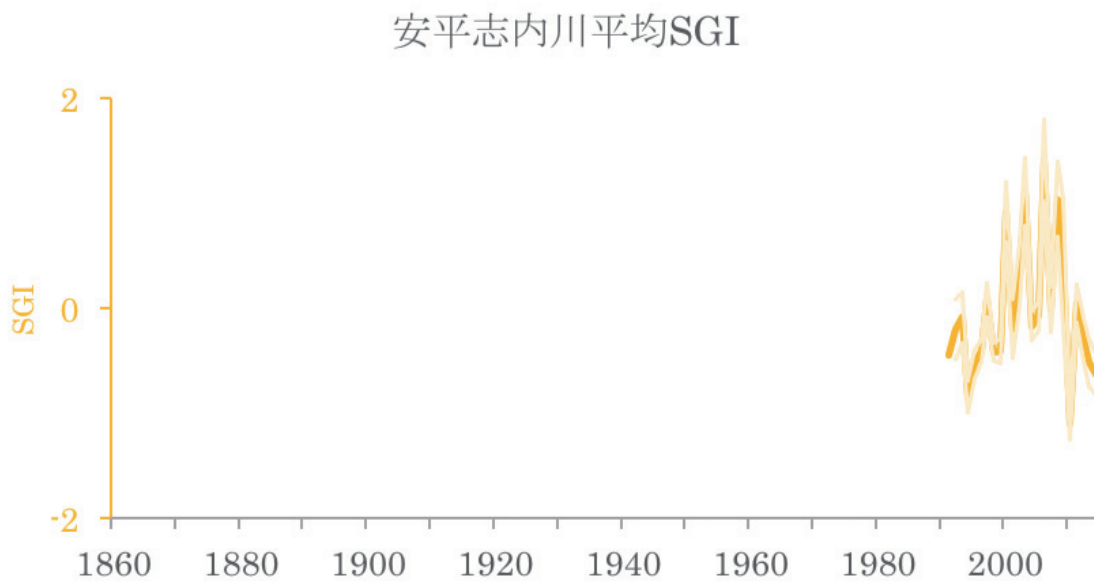


図.4-8 安平志内川の平均化したSGI（濃い黄色線）と95%信頼区間（薄い黄色線）

尻別川：平均化したSGIの値はその平均が-0.0154、最大が1.40、最小が-1.06であった。

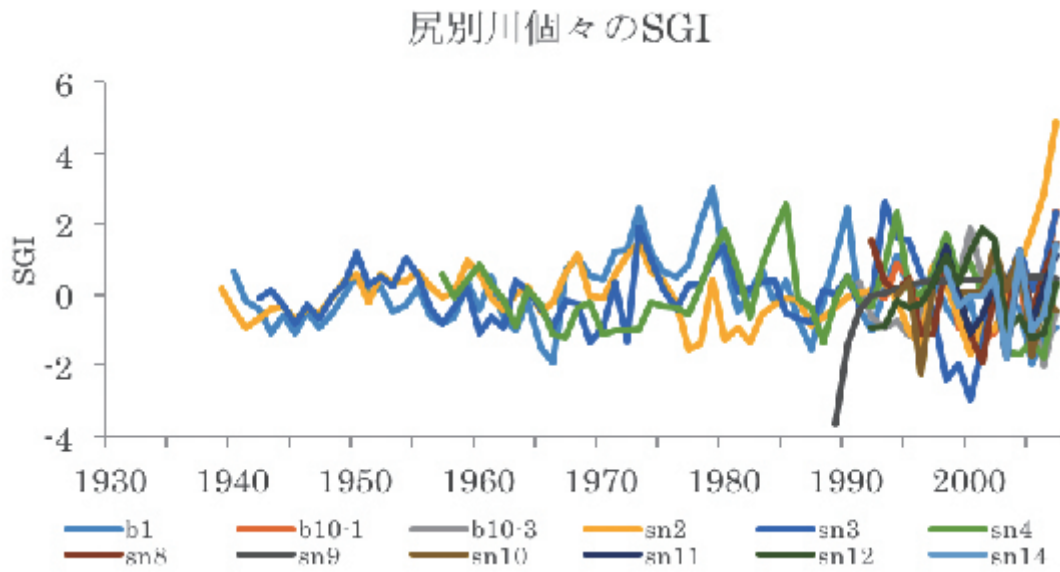


図.4-9 尻別川個々のSGI (n=12)

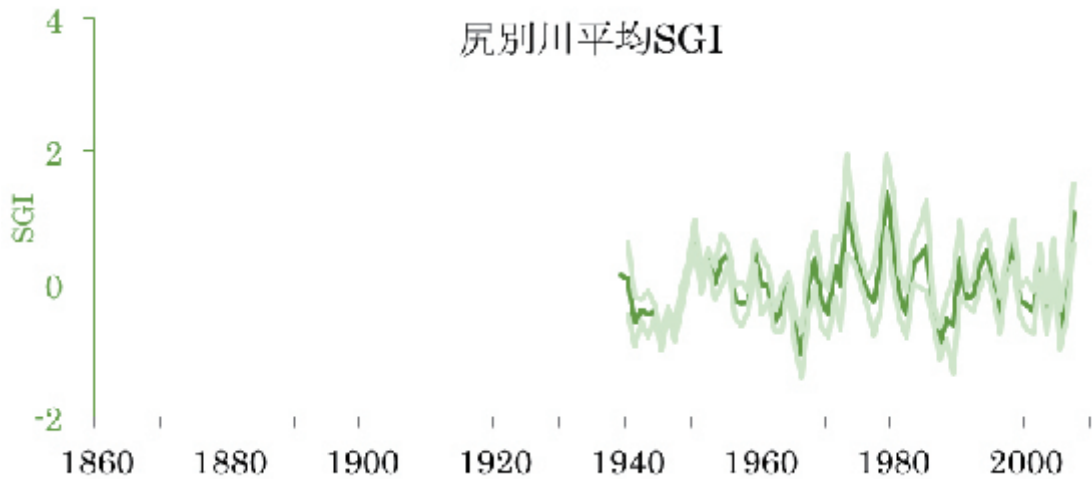


図.4-10 尻別川の平均化したSGI（濃い緑線）と95%信頼区間（薄い緑線）

弁天貝塚：弁天貝塚出土の試料は採取日がわからないため、SGIは各個体それぞれ独立した結果として扱う。そのため、各個体でSGIの平均・最大・最小を求めると、平均値は $-7.2 \times 10^{-16}$ ～ $7.64 \times 10^{-16}$ 、最大値は1.52～3.69、最小値は-2.06～-1.21の範囲であった。

全調査河川の現生カワシンジュガイのSGIをまとめて図に示した（図.4-11）。

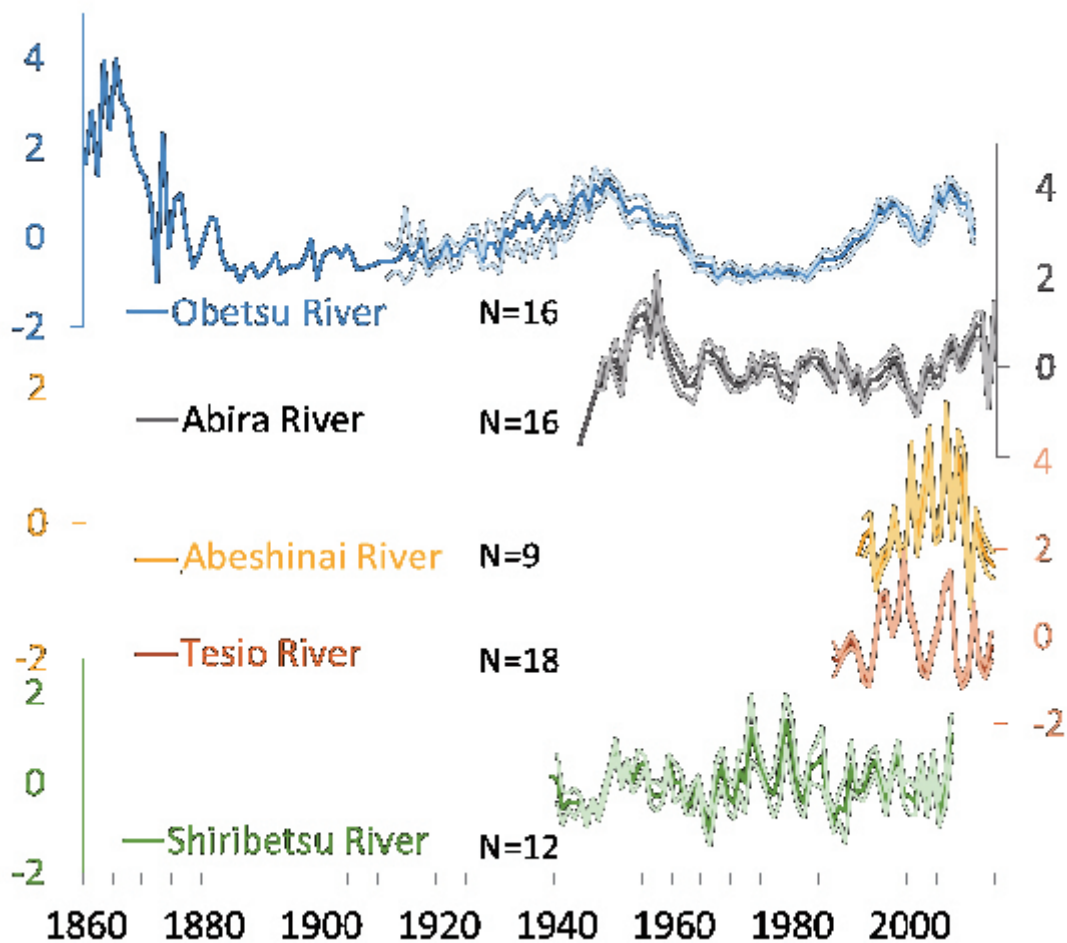


図.4-11 各地点のSGI

b) 日輪

日輪を天塩川、安平川採取試料で計測した。また、弁天貝塚試料においても日輪計測を行った。

**天塩川**：天塩川のサンプルはサンプル名がTR8である試料を主に観察対象とし、1995年から1999年までの年輪を、そして、1995年と96年では、TR11でも計測した。1年に数えられた日輪数は133本から167本であった（表4-1）。

**安平川**：安平川のサンプルも同様にAb1-1、Ab2-4aの2個体の日輪を計測した。数えられた日輪数は133～148本であった（表4-2）。

**弁天貝塚**：弁天貝塚のサンプルは採取日がわからないので、正確な年代をいれることができない。そのため、日輪測定をした箇所は幼少期から数えて何年目という記載で表にした（表4-3）。違う個体であれば、同じ年輪数であっても、同じ年とは限らない。

表4-1 天塩川日輪本数

	日輪本数				
	1995	1996	1997	1998	1999
TR8	167	152	154	133	136
TR11	151	150			

表4-2 安平川日輪本数

	日輪本数	
	1982	1983
1-1	133	148
2-4a	135	

表4-3 弁天貝塚日輪本数

	日輪本数
BK-b (年輪4-5本目)	134
BK-c (年輪4-5本目)	148

## (2) 微量元素分析

### a) カワシンジュガイ殻の微量元素分析

微量元素分析は2個体行い、比較的短命なOB15のサンプルでは、LA-ICP-MSのレーザーを当てるスポットの直径を50 $\mu$ m、長寿なBB17のサンプルでは、直径100 $\mu$ mのスポットに設定し、測定した。成長曲線からわかるように（図.3-5）、長寿なものほど縁辺部の年輪幅は狭くなる。そのため、比較的年輪幅の広い短命のサンプルはレーザーを当てるスポットを50 $\mu$ mに設定し、高時間分解能化を目指した。強度のデータを濃度に変換した。

La, Nd, Pb, Yなどの元素は存在量が少なく、特にレーザーのスポットの直径の短いOB15の方は値がマイナスになるなど、正しい濃度を測定することができなかった。Kは両個体ともマイナスの値が頻出し、同じく定量できていない。OB15では、距離9.3mm前後でB, Mg, Cuなど多数の元素に周囲より高いピークが見られた。Baなどの元素では幼少期の時間解像度が良い部分では、年周期を示した。以下に代表的な元素濃度のCa比に直したものの2個体（図.4-12、図.4-13）を示す。



BB 7

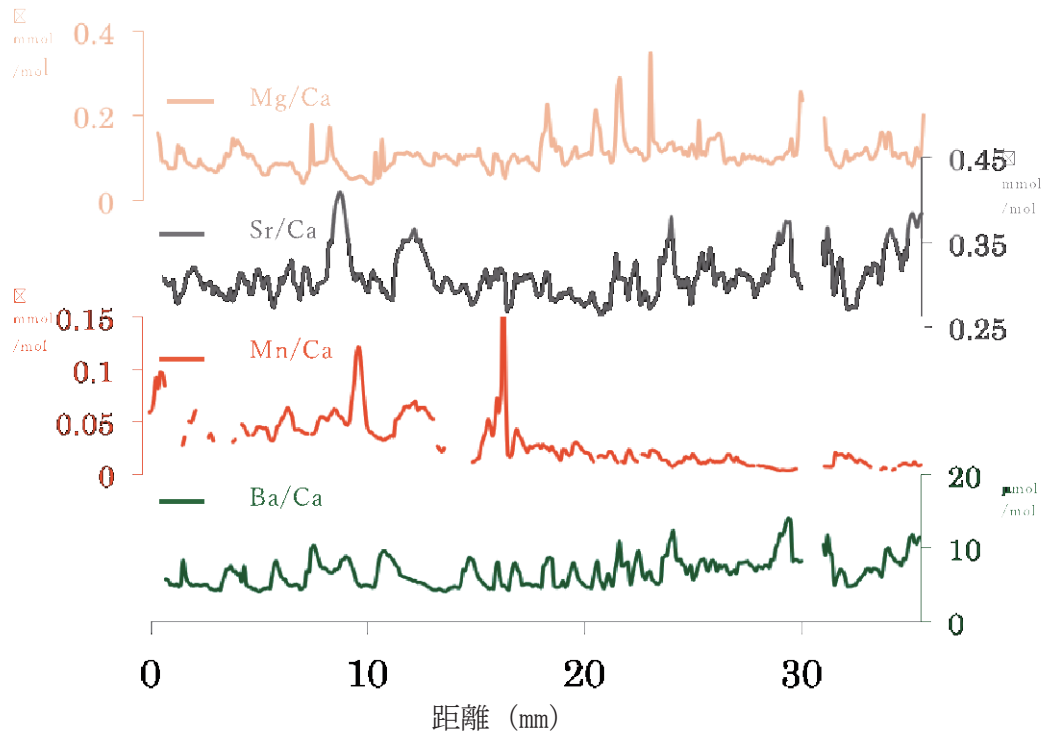


図.4-12 個体BB17の代表的な微量元素濃度のCa比

OB 5

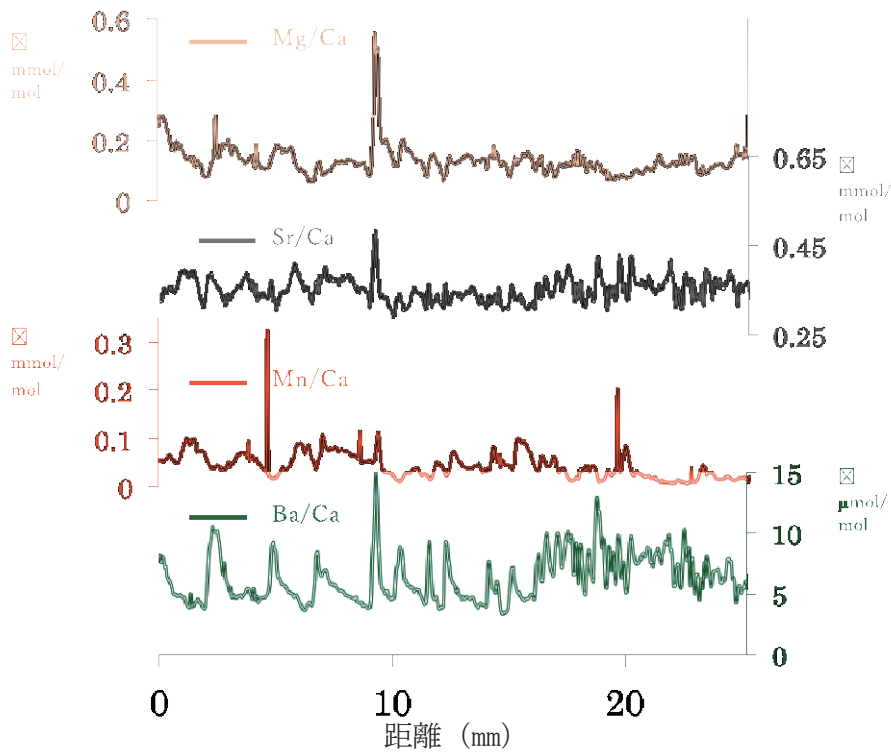


図.4-13 個体OB15の代表的な微量元素濃度のCa比

b) 河川水と外套膜外液の微量元素

以下に河川水の微量元素濃度を示す（図.4-14）。河川水は同じ地点で異なる季節や年に採取したもの全て示してあり、同じ河川において複数地点採取している河川もある。

大別川の採水地点であるSt.1は大別川が海とつながっている厚岸湖に流れ込む地点であり、満潮時には塩分が高くなる。

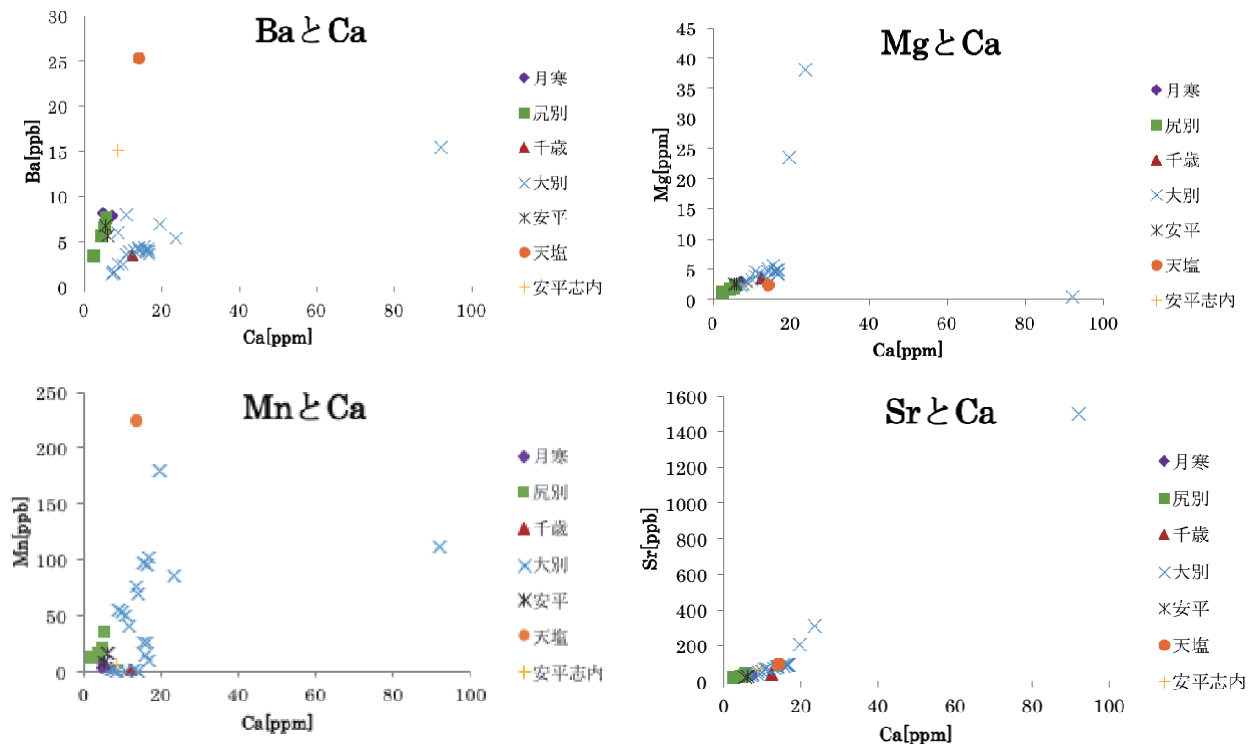


図.4-14 河川水の微量元素濃度

そのため、各水系の微量元素濃度を示した図（図.4-15）では、全採取地を使用した平均濃度を左に、大別川を除いた採取地を使用した平均を右側に配置した。

全採取地の平均元素濃度

大別川の St. 1 を除いた平均元素濃度

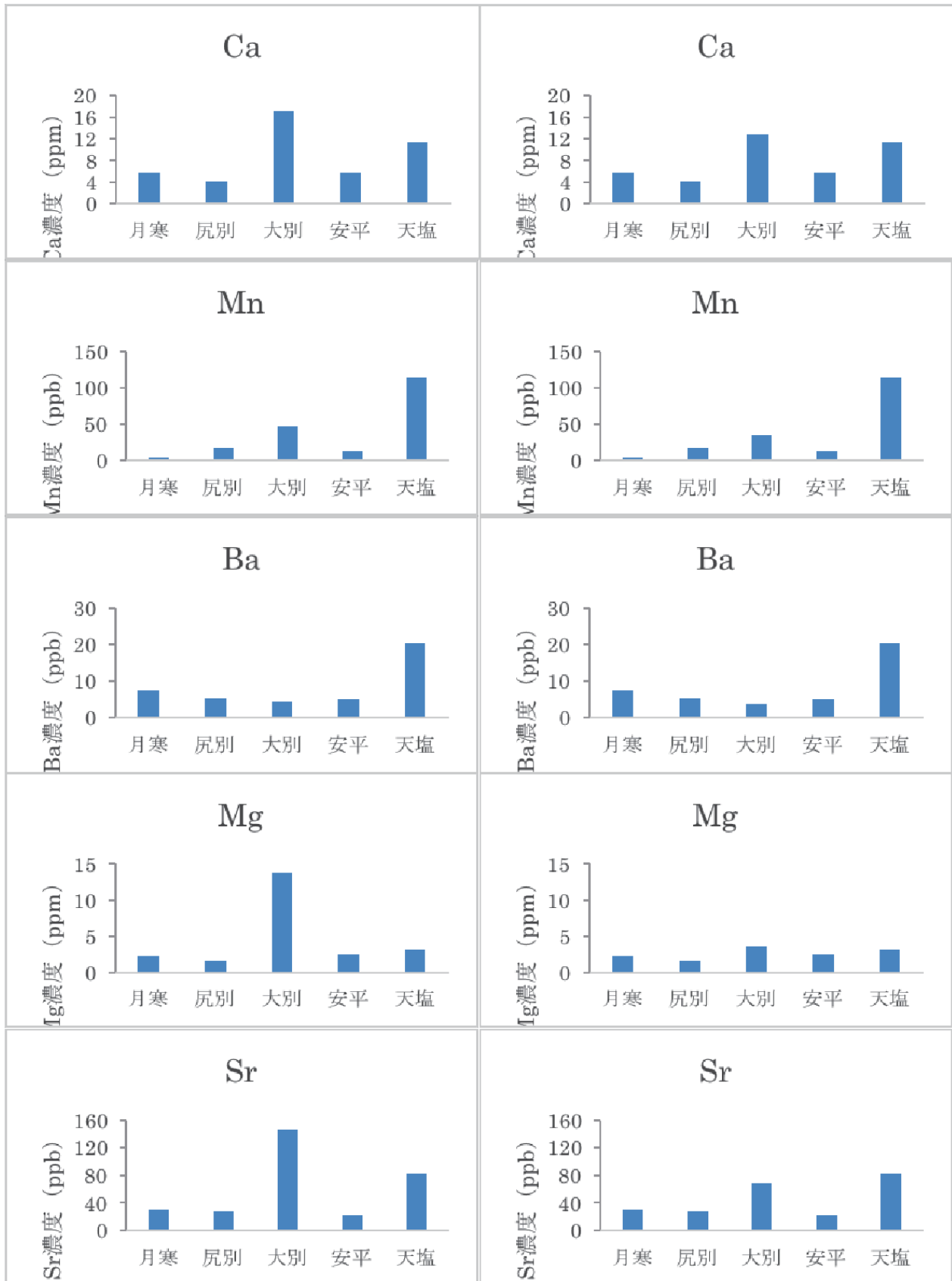


図.4-15 各水系の平均微量元素濃度  
 左：全採取地 右：大別川のSt.1を除いた採取地

カワシンジュガイの外套膜外液の微量元素濃度を以下に示す（図.4-16）。

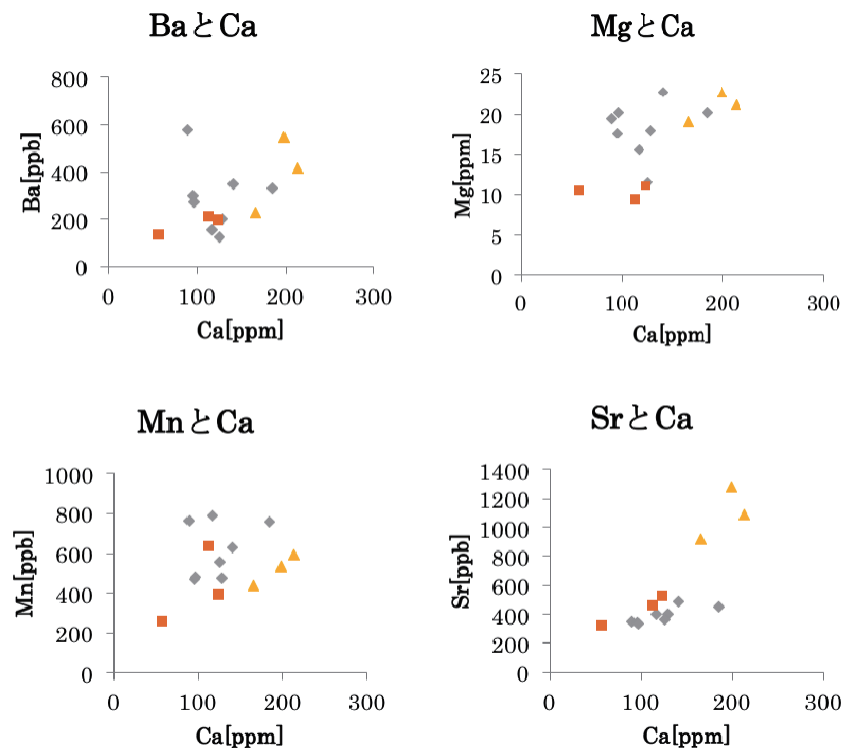


図.4-16 カワシンジュガイの外套膜外液の微量元素濃度  
 灰色が安平川、オレンジは天塩川、黄色は安平志内川のデータを示す。

### (3) 酸素・炭素同位体比分析

酸素・炭素同位体比の平均、最大、最小値を河川ごとに以下にまとめた（表4-5）。

表4-5 各河川の酸素・炭素同位体比の平均、最大、最小値（‰）

大別川			安平川		
	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$
Ave.	-8.037	-11.39	Ave.	-9.199	-11.39
Max.	-6.934	-10.08	Max.	-8.171	-10.32
Min.	-9.041	-13.26	Min.	-12.563	-13.80

天塩川			尻別川		
	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$
Ave.	-10.76	-9.046	Ave.	-10.31	-7.884
Max.	-9.133	-6.467	Max.	-9.337	-6.644
Min.	-11.78	-11.28	Min.	-11.06	-8.724

河川ごとの酸素・炭素同位体比結果を年輪の位置がわかるように示した（図.4-17）。年輪は酸素・炭素同位体比の1周期と一致するため、あらためて年輪であることが確認された。

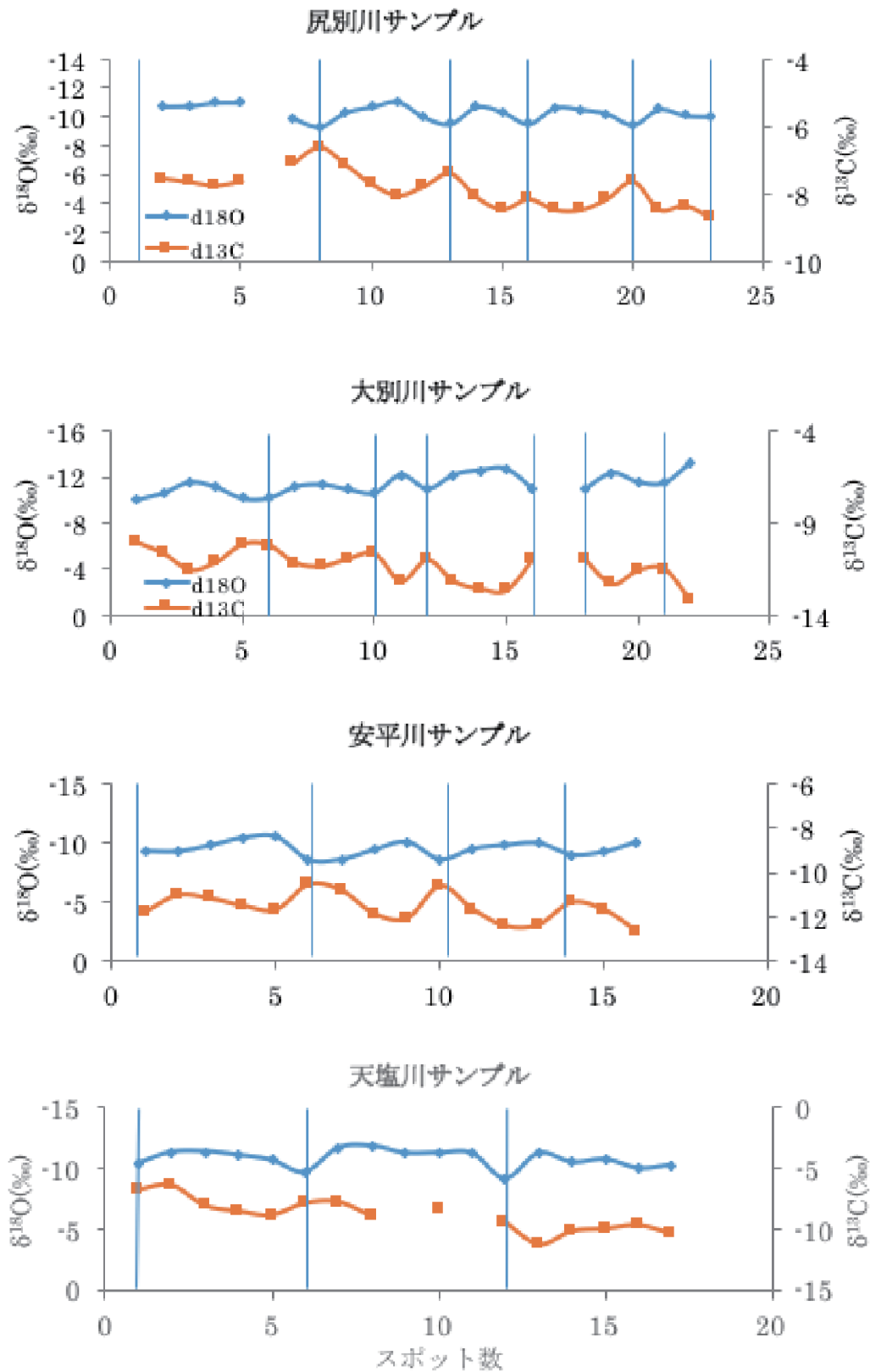


図.4-17 各河川の酸素・炭素同位体比結果と年輪位置（青縦線）

弁天貝塚出土試料に関しても同様に結果を示す（表4-6、図4-18）。

表4-6 弁天貝塚試料の酸素・炭素同位体比の平均、最大、最小値（‰）

弁天貝塚		
	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$
Ave.	-8.234	-11.47
Max.	-7.411	-8.918
Min.	-8.945	-13.44

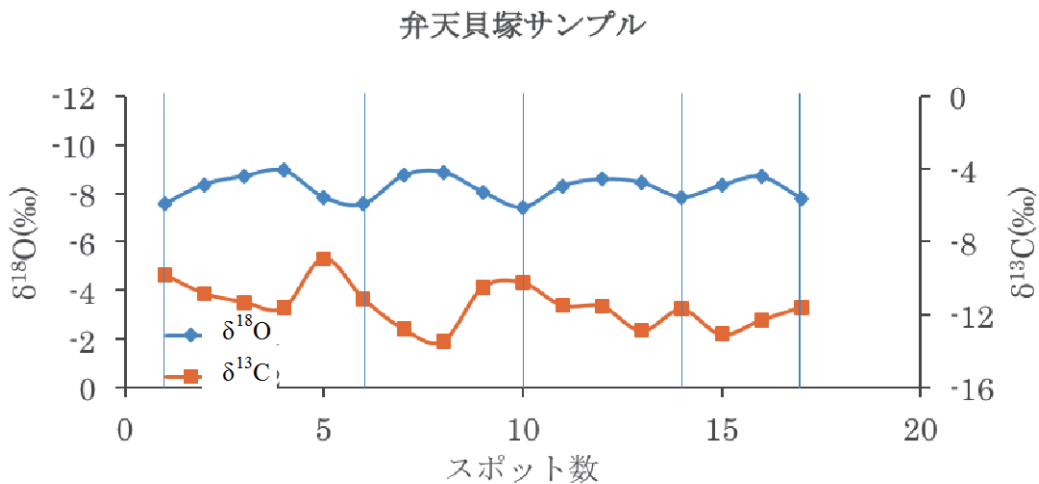


図.4-18 弁天貝塚出土試料の酸素・炭素同位体比結果と年輪位置（青縦線）

#### (4) 貝塚出土試料の年代測定

カワシンジュガイ殻3個体の較正曲線を以下に示す（図.4-19～図.4-21）。赤いピークが炭素同位体比から算出される暦年較正用年代であり、その値を青い曲線の較正曲線を用い、横軸である暦年代におろす。したがって、上の図のように較正曲線が右上がりの部分があると、二つの暦年代が出てくる場合がある。

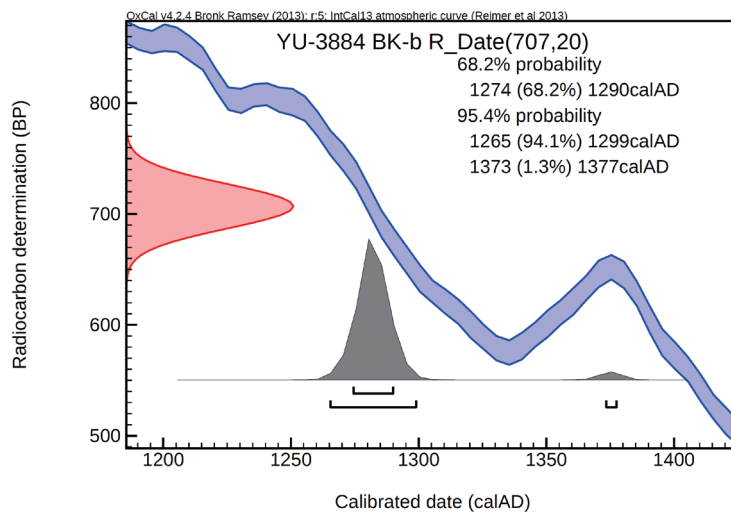


図.4-19 BK-bの測定値と較正曲線

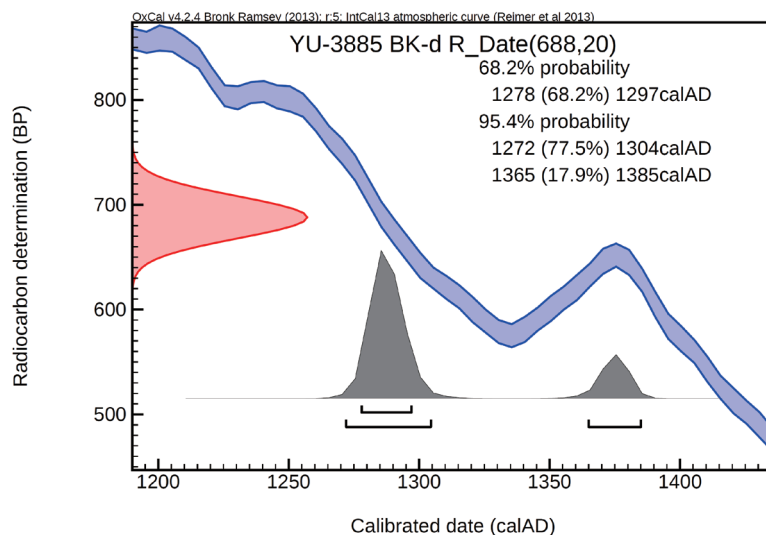


図.4-20 BK-dの測定値と較正曲線

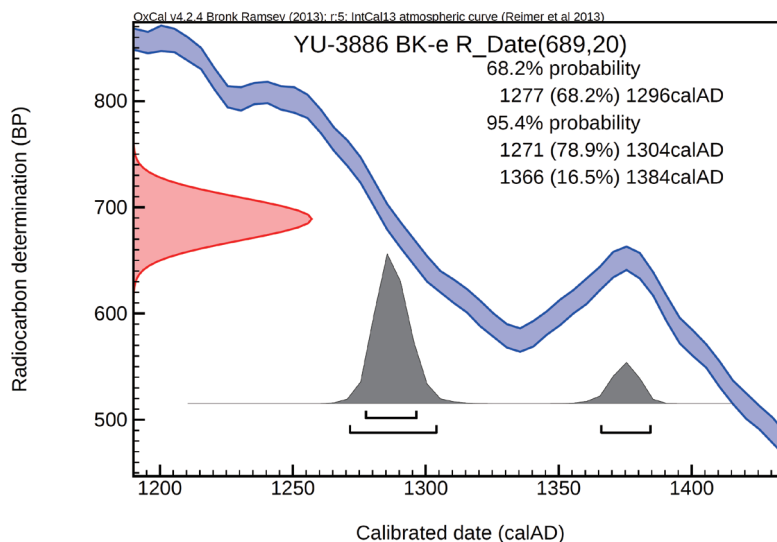


図.4-21 BK-eの測定値と較正曲線

上記の暦年代の結果をまとめた表を下に示す（表4-7）。

表4-7 カワシンジュガイ殻3個体の年代測定結果

試料名	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	暦年較正用年代 (yrBP $\pm 1\sigma$ )	$^{14}\text{C}$ 年代 (yrBP $\pm 1\sigma$ )	$^{14}\text{C}$ 年代を暦年代に較正した年代範囲	
				1 $\sigma$ 暦年代範囲	2 $\sigma$ 暦年代範囲
BK-b	-14.73 $\pm$ 0.34	707 $\pm$ 20	705 $\pm$ 20	1274AD (68.2%) 1290AD	1265AD (94.1%) 1299AD 1373AD (1.3%) 1377AD
BK-d	-16.62 $\pm$ 0.32	688 $\pm$ 20	690 $\pm$ 20	1278AD (68.2%) 1297AD	1272AD (77.5%) 1304AD 1365AD (17.9%) 1385AD
BK-e	-16.81 $\pm$ 0.61	689 $\pm$ 20	690 $\pm$ 20	1277AD (68.2%) 1296AD	1271AD (78.9%) 1304AD 1366AD (16.5%) 1384AD

次にカワシンジュガイ殻を二酸化炭素の抽出方法を燃焼からリン酸処理に変えて測定した結果を示す(図.4-22、表4-8)。

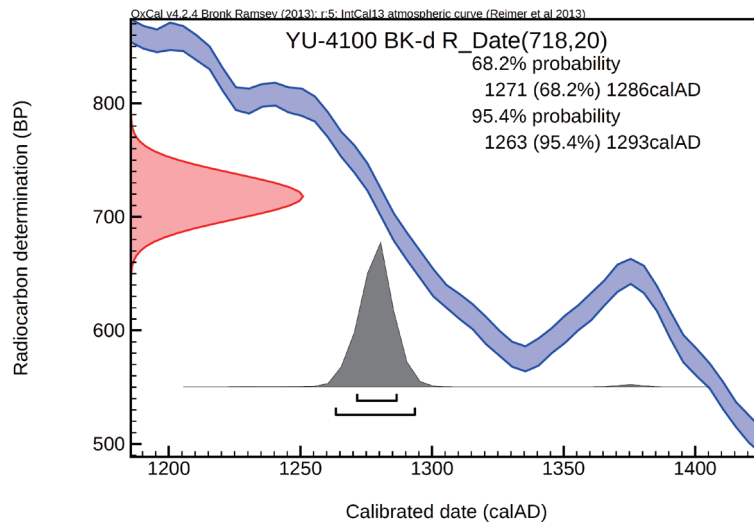


図.4-22 リン酸処理による二酸化炭素抽出法で測定したBK-d の測定値と較正曲線

表4-8 リン酸処理による二酸化炭素抽出法で測定したBK-d の年代測定結果

試料名	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	暦年較正用年代 (yrBP $\pm 1\sigma$ )	$^{14}\text{C}$ 年代 (yrBP $\pm 1\sigma$ )	$^{14}\text{C}$ 年代を暦年代に較正した年代範囲	
				1 $\sigma$ 暦年代範囲	2 $\sigma$ 暦年代範囲
BK-d	-8.31 $\pm$ 0.41	718 $\pm$ 20	720 $\pm$ 20	1271AD (68.2%) 1286AD	1263AD (95.4%) 1293AD

さらにBK-dの殻皮試料の年代測定結果も示す(図.4-23、表4-9)。

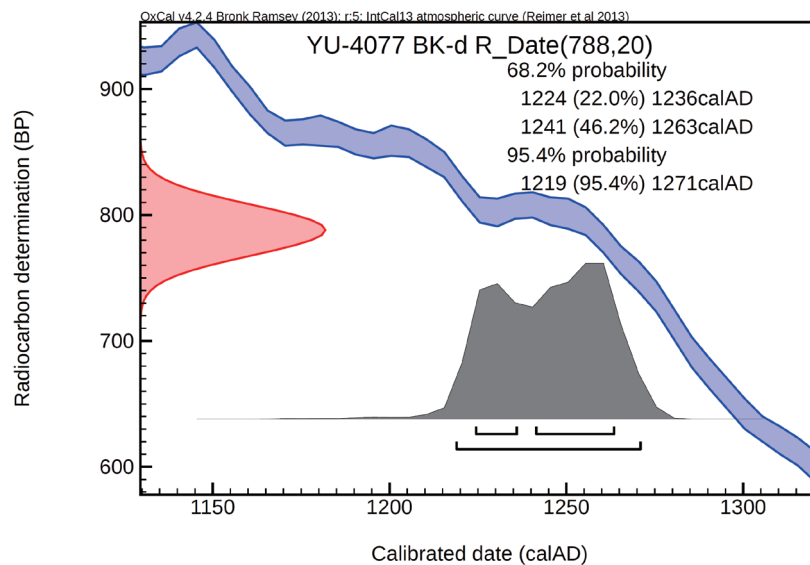


図.4-23 BK-d 殻皮試料の測定値と較正曲線



表4-9 BK-d 殻皮試料の年代測定結果

試料名	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	暦年較正用年代 (yrBP $\pm 1\sigma$ )	$^{14}\text{C}$ 年代 (yrBP $\pm 1\sigma$ )	$^{14}\text{C}$ 年代を暦年代に較正した年代範囲	
				1 $\sigma$ 暦年代範囲	2 $\sigma$ 暦年代範囲
BK-d	-28.08 $\pm$ 0.27	788 $\pm$ 20	790 $\pm$ 20	1224AD (22.0%) 1236AD 1241AD (46.2%) 1263AD	1219AD (95.4%) 1271AD

以上の年代測定結果を、3試料測定しているものは2 $\sigma$  暦年代範囲が最も広くなる値を選択して表にまとめた (表4-10)。

表4-10 貝塚試料年代測定結果まとめ

試料状態	CO2抽出法	測定個数	2 $\sigma$ 暦年代範囲
殻 (炭酸塩岩)	燃焼	3	1265AD~1385AD
殻皮 (有機物)	燃焼	1	1219AD~1371AD
殻 (炭酸塩岩)	リン酸添加	1	1263AD~1293AD

また、さらに現生カワシンジュガイの年代測定結果も下に示す (図.4-24、表4-11)。

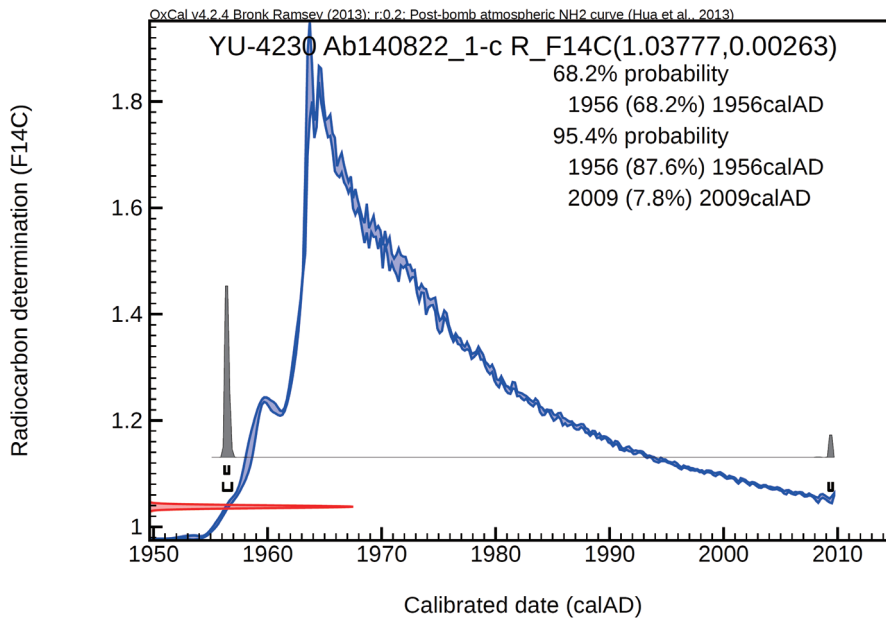


図.4-24 現生カワシンジュガイ殻の測定値と較正曲線

表4-11 現生カワシンジュガイ殻の年代測定結果

試料名	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	現代炭素比 (pMC $\pm 1\sigma$ )	現代炭素比から暦年代に較正した年代範囲	
			1 $\sigma$ 暦年代範囲	2 $\sigma$ 暦年代範囲
Ab140822_1-c	-12.54 $\pm$ 0.39	103.78 $\pm$ 0.26	1956.22AD (68.2%) 1956.62AD	1956.1AD (87.6%) 1956.88AD 2009.22AD (7.8%) 2009.58AD

## 5. 考察

### (1) 成長線解析

#### a) 年輪 (SGI)

成長の抑制や促進にどのような機構が影響しているのかを調べるために、環境データとの比較を行った。

〈大別川〉

まずは、気温との比較を行った。年平均気温の経年変化、ついで月毎の気温の経年変化と比べた。

短周期での変動にところどころSGIと気温に関係性があるように見えるが、SGIの大きな周期の変動を完全に表している月は見受けられない。

どの月がカワシンジュガイの成長により影響を与えているのか、それぞれ相関係数を求めた。また、気温がカワシンジュガイの成長に影響する間に時間差が生じることを考慮し、SGIと気温との年代を前後させた相関係数も求めた。図.5-1はSGIと気温の年代が同じであるときを0として、+1はSGIが気温より1年先行する、つまりSGIのその年の値と次の年の気温との関係を見ていることになる。

相関係数の絶対値の平均は、0.088と非常に低い値であり、最大値は0.28、最小値も $8.1 \times 10^{-5}$ と、全体的にあまり相関があるとは言いにくい。

さらに積雪、降水量とSGIとを比較した。釧路気象台と太田地区のアメダスによる観測データで、積雪量は最深積雪を用いた。釧路気象台では、太田地区のデータよりも古いデータが存在するため、別寒辺牛川により近い太田地区だけではなく、釧路気象台のデータも共に比較した。

試料採取地の近くである、太田地区の方が相関係数の値は高く、積雪で平均値0.14、最大値0.39、最小値-0.070であり、降水量で平均値0.23、最大値0.33、最小値0.13であった。

表5-1 1～12月の気温とSGIとの相関係数 (SGIと気温との年を動かして前後に5年ずつ動かした。)

	SGIより観測データが先行する年数										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1月	0.0183	-0.0510	0.0361	-0.0085	0.0657	0.0732	0.0684	0.0405	0.111	0.0548	-8.1E-05
2月	0.00442	-0.0117	0.0835	0.0848	0.118	0.156	0.162	0.101	0.0562	0.0441	0.0303
3月	0.0957	0.0533	0.133	0.103	0.0993	0.110	0.108	0.154	0.107	0.124	0.0902
4月	-0.0752	-0.0355	-0.00984	-0.0230	0.0175	-0.0111	0.00784	0.0746	0.0730	0.107	0.0855
5月	-0.0761	-0.105	-0.0838	-0.0871	-0.0714	-0.00058	0.0366	0.0849	0.109	0.141	0.110
6月	0.0107	-0.00562	-0.00371	-0.00952	0.0243	0.0606	0.0926	0.0836	0.104	0.0708	0.0458
7月	0.0340	0.0113	-0.0337	0.00159	0.0507	0.116	0.0865	0.140	0.0999	0.142	0.0763
8月	0.139	0.113	0.0696	0.102	0.163	0.209	0.185	0.188	0.131	0.118	0.0971
9月	0.147	0.0868	0.103	0.138	0.210	0.264	0.282	0.283	0.254	0.249	0.202
10月	0.105	0.130	0.142	0.127	0.106	0.11	0.127	0.116	0.0879	0.0752	0.0381
11月	0.0384	0.0595	0.117	0.0645	0.0667	0.0466	0.0131	-0.00104	-0.0624	-0.0987	-0.126
12月	-0.187	-0.126	-0.150	-0.111	-0.0605	-0.0226	-0.0172	0.0274	0.0186	0.00460	-0.0103

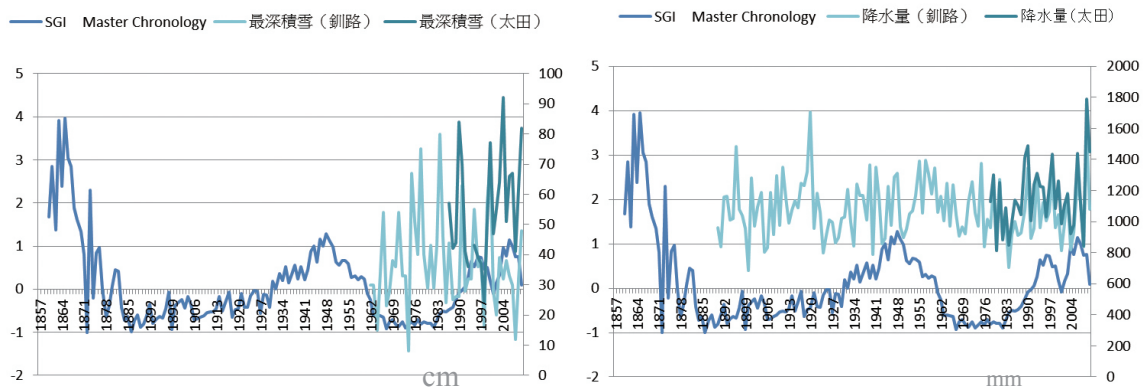


図.5-1 SGIと釧路、太田地区での積雪量(cm) (左) と降水量(mm) (右) の比較

表5-2 積雪・降水量とSGIとの相関係数

	SGIより観測データが先行する年数										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
釧路積雪	-0.0332	-0.0496	-0.0663	-0.130	-0.164	-0.122	-0.101	-0.195	-0.153	-0.183	-0.183
太田積雪	0.362	0.392	0.317	0.219	-0.0695	0.0574	-0.0122	-0.0652	0.0397	0.103	0.220
釧路降水	-0.0317	-0.0461	-0.0174	0.0542	0.0746	0.0758	0.125	0.0960	0.141	0.158	0.135
太田降水	0.216	0.199	0.140	0.171	0.132	0.242	0.256	0.310	0.331	0.283	0.242

上記のような1年ごとの実測値データは、変動が激しく、SGIとの相関を見るのに適していない可能性が考えられる。

そのため、気温のデータで5年移動平均をとり、SGIとの相関を求めた。1年ごとの生データと比較すると、相関係数の絶対値は大きくなった（表5-3）。しかし、降水量や積雪量のデータは期間が短いため、統計的な処理は難しい。

表5-3 5年移動平均をとった気温とSGIとの相関係数

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
生データ	0.073	0.16	0.11	-0.011	-0.00058	0.061	0.12	0.21	0.26	0.12	0.047	-0.023
5年移動平均	0.056	0.20	0.18	0.017	-0.030	0.074	0.21	0.40	0.44	0.19	0.079	-0.033

以上のように、SGIとの相関係数は9月前後の夏の気温が比較的大きい値を示すことがわかった。夏はカワシンジュガイの成長時期であって、このときの気温が成長量に関わっている可能性が示唆された（図.5-2）。

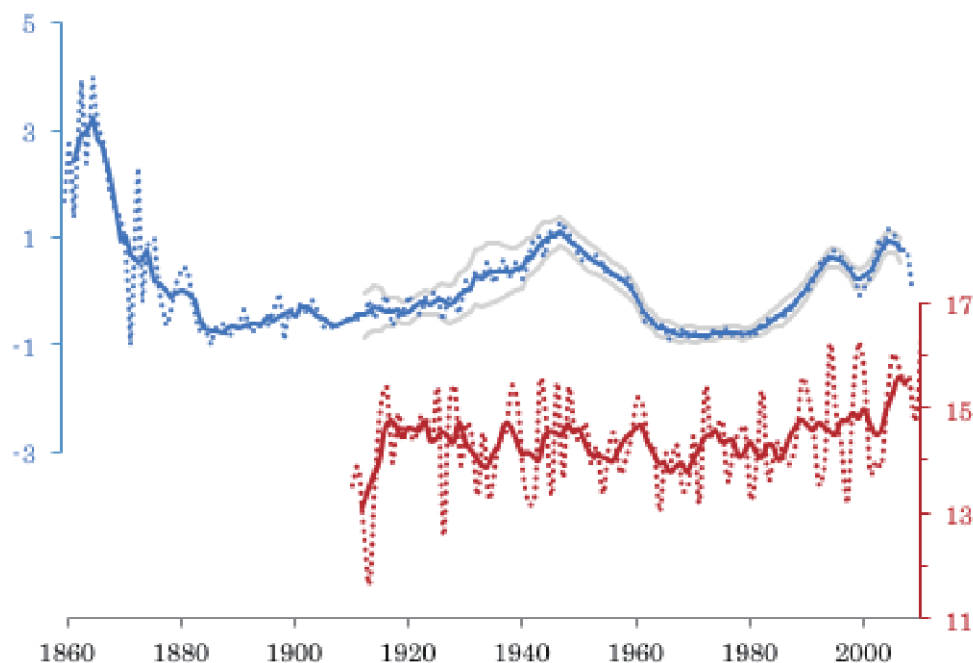


図.5-2 SGIと夏の気温（実線：5年移動平均、点線：生データ、薄線：95%信頼区間）

また、大別川のSGIには特徴的な長周期の変動が見られたので、SOI（南方振動）、PDO（太平洋十年規模振動）、NAO（北大西洋振動）、AMO（大西洋数十年規模振動）などの長周期変動の指標を比較してみた（図.5-3）。

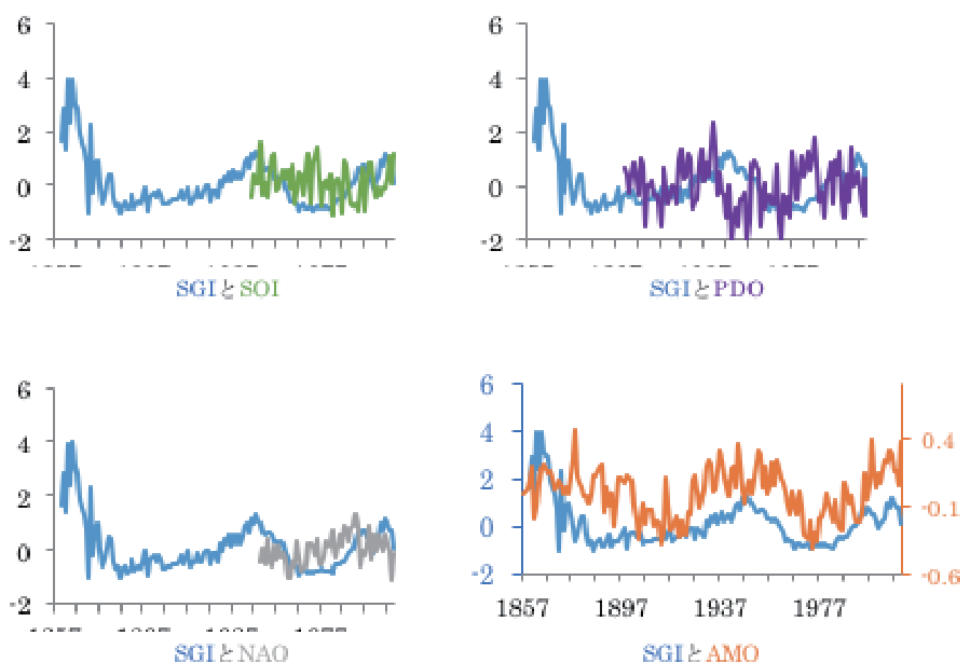


図.5-3 SGI（青線）と気候変動指数

グラフ上からSGIの大きな周期変動と一番よく類似しているのは、AMOであった。SGIとの相関係数を気温と同様に求めたところ、タイムラグを考慮しない場合、AMOが最も高い0.39という値になった。また、NAOでも5年程度SGIから遅れて良い相関が得られた。

表5-4 気候変動指数とSGIとの相関係数

SGIより気候変動指標が先行する年数											
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
SOI	-0.12	-0.14	-0.19	-0.18	-0.08	-0.02	0.095	0.16	0.13	0.20	0.18
PDO	0.12	0.056	0.052	0.072	-0.0058	-0.068	-0.094	-0.13	-0.19	-0.18	-0.21
NAO	0.49	0.41	0.38	0.29	0.20	0.068	-0.022	-0.053	-0.12	-0.15	-0.18
AMO	0.30	0.31	0.31	0.37	0.37	0.39	0.43	0.43	0.12	0.069	0.070

SGIと夏の気温、AMOとを並べて比較した（図.5-4）。

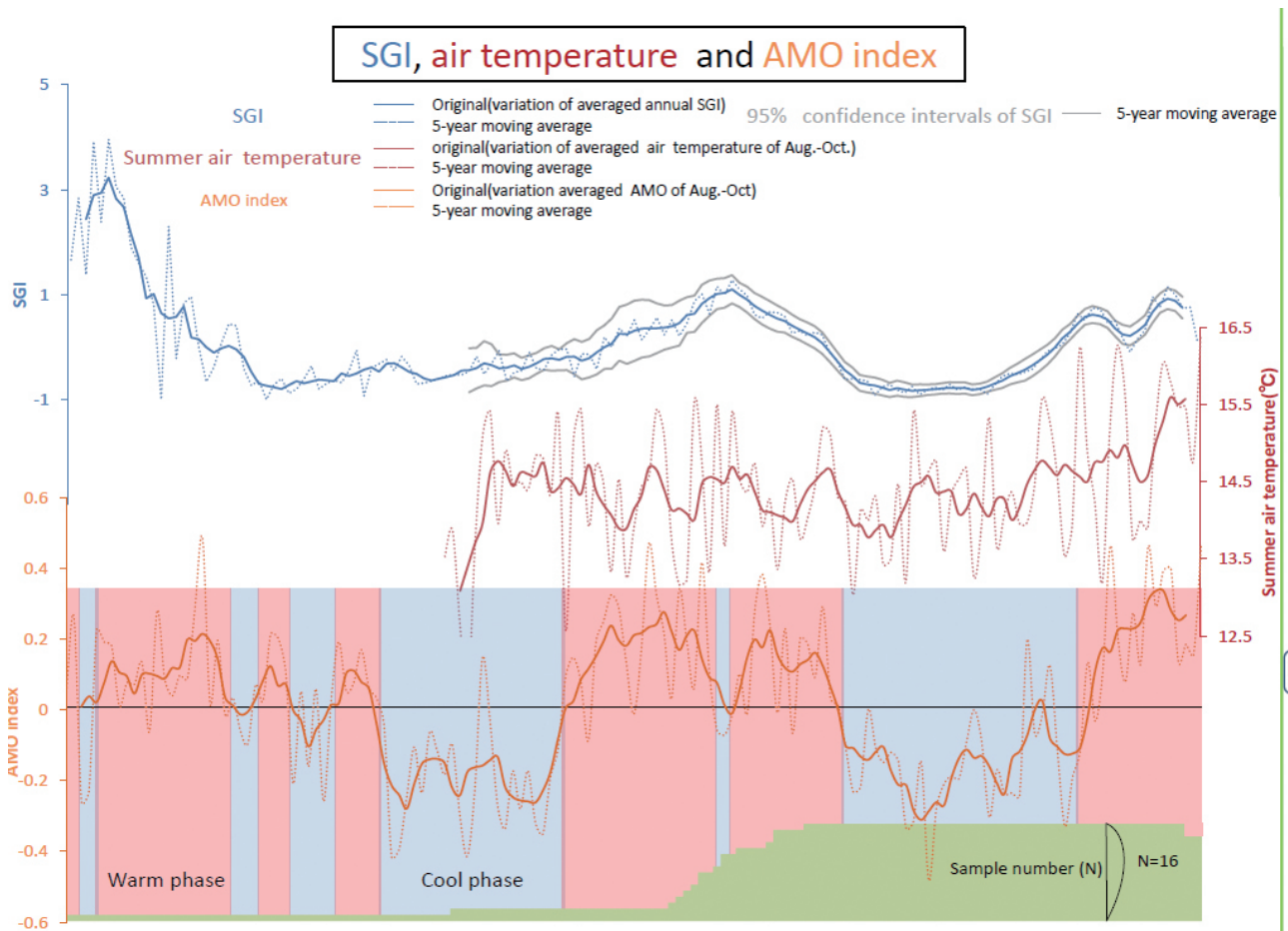


図.5-4 SGIと夏の気温とAMO。点線は年毎の値、実線を5年移動平均値示す。

AMOは北大西洋の平均海面水温が数十年程度の周期で上昇、下降している変動を指標化したもので、平年値と比べて高い場合は正を、低い場合は負と示す<sup>3)</sup>。AMOのメカニズムは明らかとなっていないが、大西洋で起こる南北循環に伴う海洋での熱輸送が影響している可能性が高いと考えられている<sup>4),5)</sup>。

AMOは北大西洋の表面海水温の指標であるので、全球の表面海水温と大別川のSGIとの相関を求めた（図.5-5）。気温とSGIの相関も高く、カワシンジュガイ殻の成長が最も良いとみられる9月前後の夏から秋にかけて、北大西洋の海水温とも高い相関係数が得られた。また、同様に試料採取地近海の海水温とSGIとの相関係数も夏から秋にかけて、千島海流のあたりに沿って高い値を示しているようにみえる（図.5-6）。

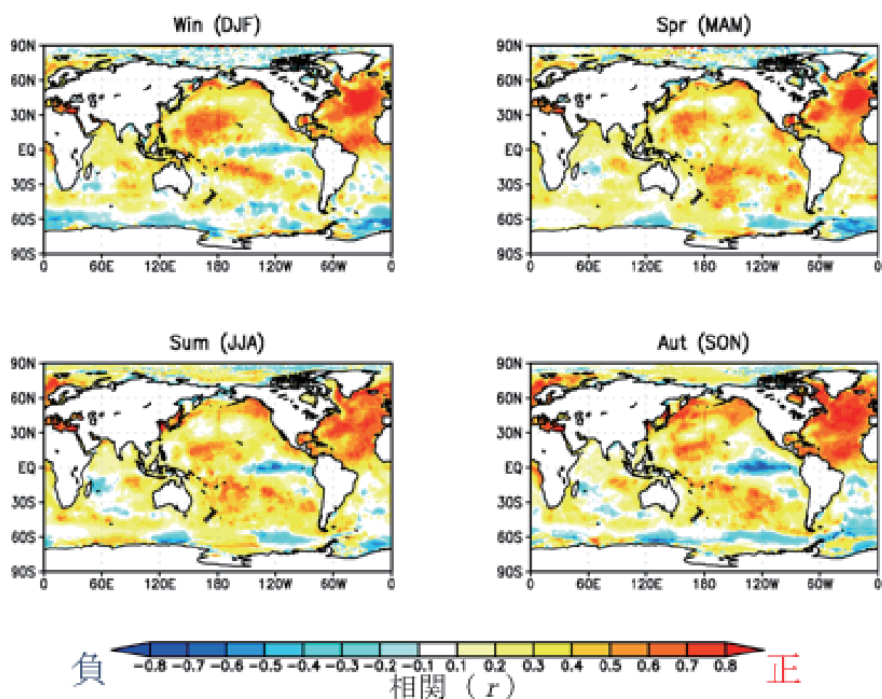


図.5-5 大別川SGIと表面海水温との相関係数

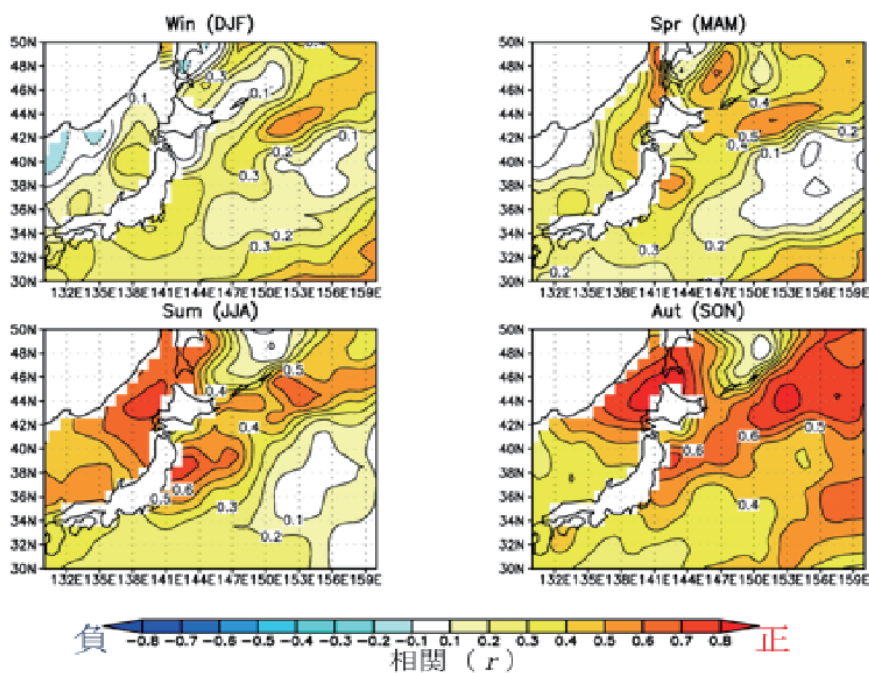


図.5-6 大別川SGIと試料採取地近海の海水温との相関係数

#### 〈安平川〉

大別川と同じ太平洋側の河川である、安平川も大別川同様に気温、降水、積雪などの対比を行った。大別川では、タイムラグを考慮して比較を行ったが、タイムラグによる特定の傾向などが見られず、また以下は移動平均をとって比べるため、カワシンジュガイの成長年とその年の気象とで比較を行う。その結果、比較を行った気象要素では、5年移動平均を取った夏の気温（8月月平均気温）がSGIと高い相関係数を示した（ $r = 0.74, p < 0.05$ ）。

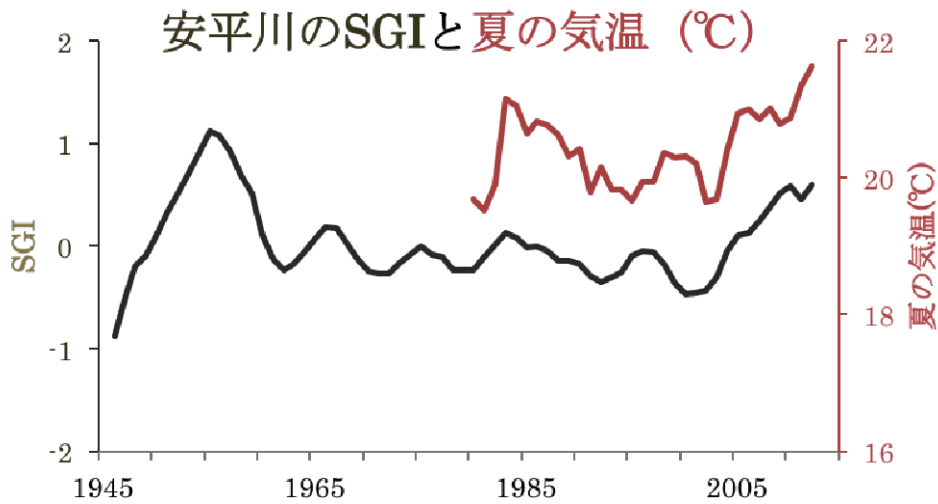


図.5-7 5年移動平均をとった安平川のSGI（灰色線）と夏の気温（赤線）

〈尻別川〉

日本海側に位置する尻別川も同様の手法で比べたところ、積雪深とSGIとの間に逆相関（ $r = -0.50$ ,  $p < 0.05$ ）がみられた（図.5-8）。

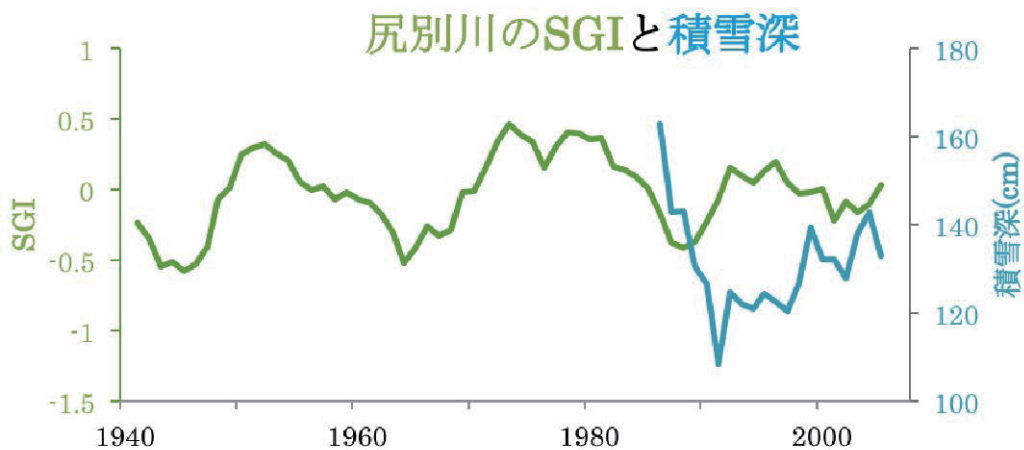


図.5-8 5年移動平均をとった尻別川SGI（緑線）と積雪深（青線）

これは、春期に残った雪が融水となって河川に流入し、河川流量を増加させるとともに水温を低下させるためである。したがって、積雪深が深いと春期の雪解け水が多くなるため、水温の上昇が抑制され、カワシンジュガイの成長期間が短くなり、成長量が低下することが推察される。このことから、貝の成長量より前年の積雪深の情報を得られることがわかる。

さらに、11年移動平均をとったとき、尻別川のSGIはPDOと2年のラグを持って、逆相関を示す（図.5-9）。その理由としては、PDOが正極のときアリューシャン低気圧が発達し、それにより冬の代表的な気圧配置になるため、積雪が多くなることが考えられる。

### 尻別川のSGIとPDO

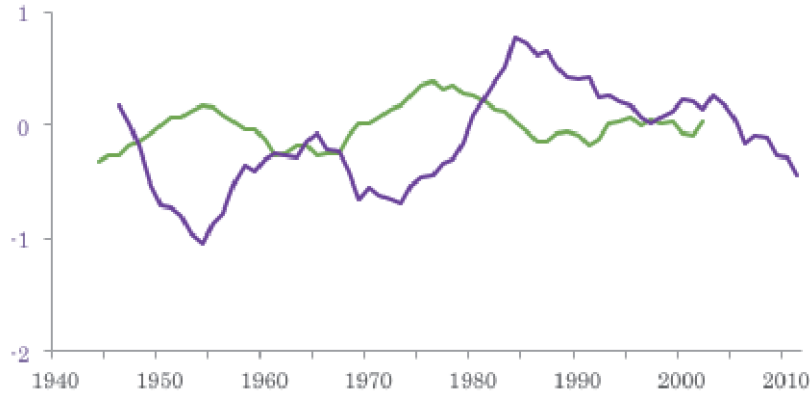


図.5-9 11年移動平均をとった尻別川のSGI（緑線）と2年後ろにラグを持って逆相関するPDO（紫線）

#### 〈天塩川〉

天塩川の本流と支流でも日本海側の尻別川同様に5年移動平均をとったSGIと冬の降水量とに逆相関（本流： $r = -0.64$ 、支流： $r = -0.54$ ）がみられる（図.5-10）。その他にも成長時期の水温や降水・流量などとも相関がみられた。

### 天塩川のSGIと降水量

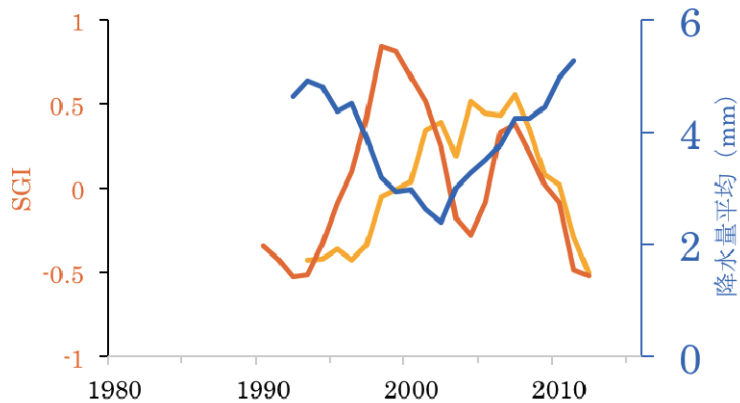


図.5-10 天塩川のSGI（本流：オレンジ線、支流：黄色線）と12月・1月平均降水量

#### b) 日輪

Dunca and Mutvei, (2001)<sup>6)</sup>では、SEMで観察された年輪の間の微細成長縞を日輪とし、2つの異なる河川から採取したホンカワシンジュガイは、同じ年においても異なる日輪数であるが、同一河川の集団では同様の成長縞パターンを示したという結果が報告されている。さらに日輪数は、水温が5度以上の日数と調和的であることが明らかになっている。また、Schone et al., (2002)<sup>7)</sup>の巻貝を使った研究では、日輪幅のデータから潮汐や年齢による成長速度の差など生物学的要因を取り除いたものから水温を復元している。尻別川のカワシンジュガイでは、香本佳彦氏の卒業論文<sup>8)</sup>において、日輪数が9度以上の水温が3日以上続いた日数と一致すると記載されている。本研究においても先行研究と同様の微細成長縞が確認され、同一の集団から採取された個体群では、同じ年に観察される成長縞パターンが非常に類似していた。その天塩川と安平川で採取したカワシンジュガイの日輪幅を計測した結果を以下に示す。



〈天塩川〉

日輪幅の季節変動は水温の変動と非常に類似した変動を示し、1年に形成された日輪数も水温が9度以上の日数にほぼ一致する。カワシンジュガイが日輪を作り始める日付は不明だが、水温の変動と調和的であるように配置し、日輪幅を1995年から1999年まで、並べた（図.5-11）。1995年と1996年は2個体の日輪幅を計測したが、ほぼ一致した変動を示した。

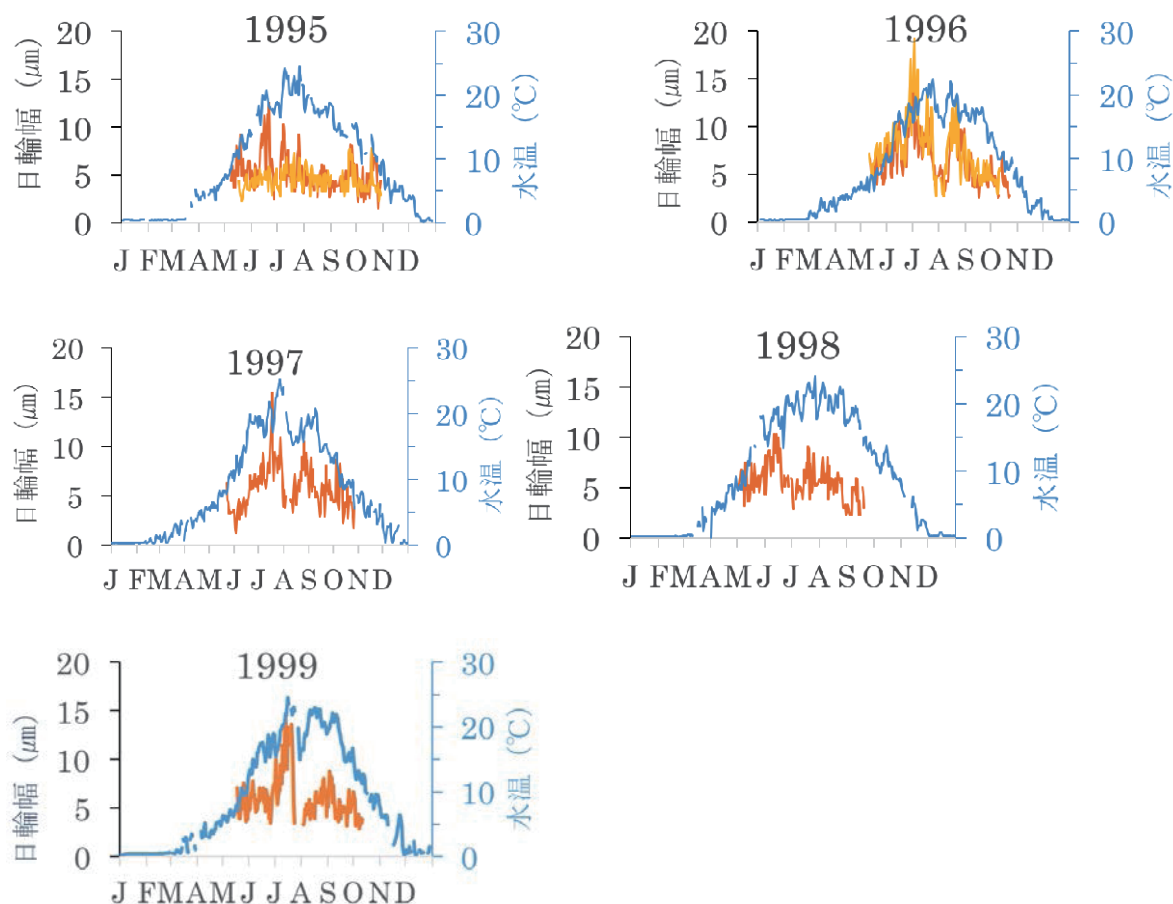


図.5-11 1995年から1999年の天塩川採取個体TR8（オレンジ線）とTR11（黄色線）の日輪幅と水温（青線）

水温については7月から8月にかけて、大きく低下している年が多くみられる。この大きく水温が落ち込むところには多量の降水があり、流量も増加する（図.5-12）。また、このような多量の降水はカワシンジュガイの成長も阻害し、日輪形成を停止する場合がある。

こういった降水により日輪が作られなかった可能性も考慮することで、より正確な日輪と水温・降水の対応が可能になる（図.5-13）。

## 水温と流量

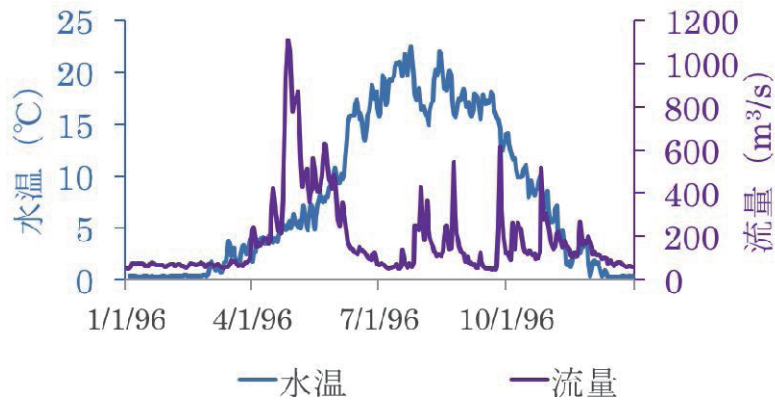


図.5-12 1996年の水温（青線）と流量（紫線）。  
夏から冬にかけては流量の増加に伴い水温の低下が観察される。

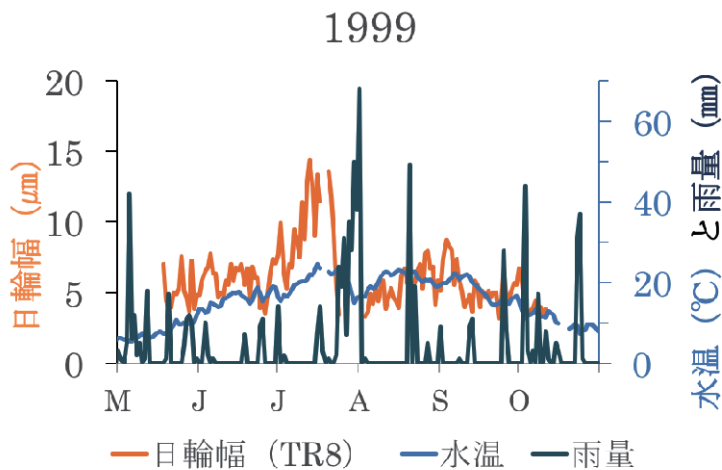


図.5-13 1999年の日輪幅と水温と雨量  
降水の激しかった期間を成長停止期間と仮定して日輪幅データを配置した。

〈安平川〉

安平川は水温が計測されていなかったため、水温計を設置して得た、2014年12月25日から2016年11月20日までの水温データのうち、気温が0℃より高い4月10日からの水温と気温の相関を取った（図.5-14）。その近似式から気温データをもとに水温を復元した。

## 水温と気温の相関関係

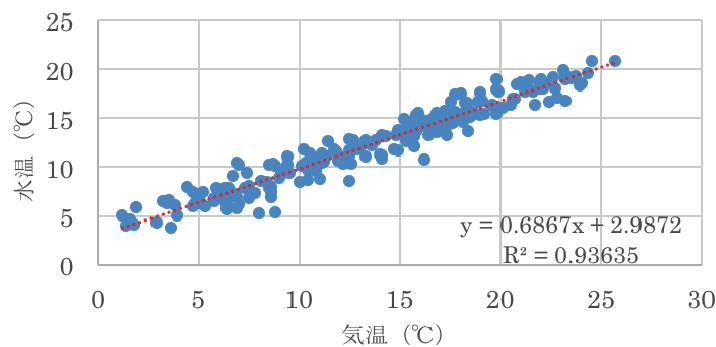


図.5-14 安平川の気温と水温の関係

天塩川と同様に安平川の日輪を補正水温とともに示した。

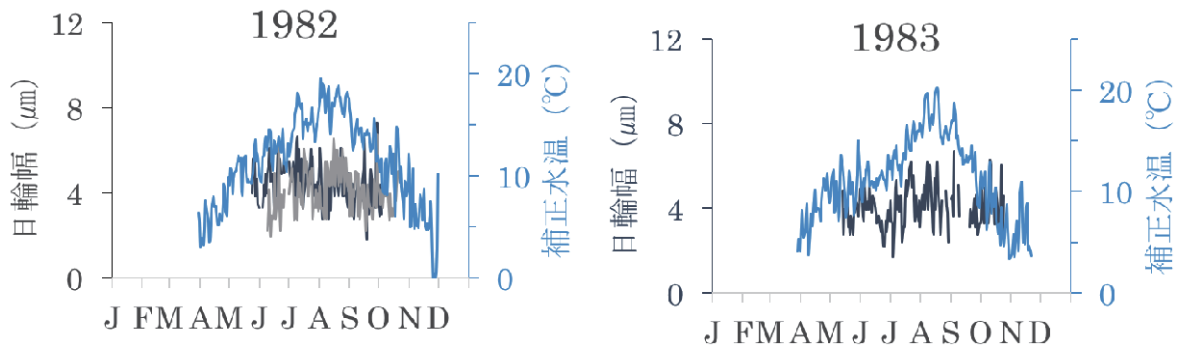


図.5-15 1982年から1983年の安平川採取個体Ab1-1（濃い灰色線）、Ab2-4a（薄い灰色線）の日輪幅と補正水温（青線）

安平川の日輪幅も水温をよく反映しており、1982年は2個体の日輪幅を計測しているが、同様の変動を示している。また、気温から導出した補正水温は春や秋の9度前後の期間が長く、水温が9度以上の日数と日輪数にややずれが生じるが、日輪の形成開始や終了時期は補正水温が約9度を示す。

また、日輪は激しい降水や春期の雪解け水による流量の増加によって形成が阻害され、日輪数と水温が9度以上の日数との差に影響することがある。

## (2) 微量元素とSGI

海生の貝では、広く微量元素から環境変動の復元や生物学的要因についての検討が広く行われてきている。しかし、淡水の二枚貝では微量元素から環境復元を目指した研究は多くない<sup>9),10)</sup>。

サンゴなどの炭酸塩岩におけるMg、Srの分配係数は温度による変化することが、実験においても明らかになっている<sup>11),12)</sup>。サンゴなどではMg/Ca比の水温指標としての有用性が述べられているが<sup>13),14)</sup>、海生の貝でもMg/Ca比の水温依存性について示唆されている<sup>15)-20)</sup>。

これらの元素は幼少期において、今回測定した尻別川、大別川の両地点から採取した貝殻の分析結果でも、1年に1つの周期を示した。大別川には水温の記録がほとんど存在しないので、気温と対応させて年ごとの推移をみてみたが、最高気温や最低気温と元素濃度比の最高点と最低点の変動幅は一致しない。また、尻別川においても観測された水温変動とMg、SrのCa比の変動と一致した変動とは言い難いため、水温以外の要因も微量元素濃度の変動に影響を与えている可能性が高く、この微量元素濃度ファイルから水温の復元を行うのは難しい。

Baについては多数の海生の貝の研究<sup>21)-27)</sup>において、1年に一つのピークが観察されている。また、淡水貝を使った研究<sup>28)</sup>では、貝殻のBa濃度に川の流れによる土壌侵食の変遷が記録されている。

貝殻のMnの濃度を測定している研究はMgやBaと比べて多くなく<sup>29),30)</sup>、淡水の貝はさらに研究数が少ない<sup>31)</sup>。淡水の貝殻のMn/Ca比はその貝の生息する河川水中に含まれるMn濃度と関わりがある<sup>32)</sup>。また、Risk et al. (2010)<sup>28)</sup>でMn/Ca比の変動は流量に相関があると述べている。Mnは溶存状態のMn<sup>2+</sup>と、酸化されて沈殿する酸化マンガン<sup>33)</sup>の状態があり、Mn<sup>2+</sup>が炭酸塩岩に最も取り込まれやすい形態である<sup>33)</sup>。河川中のMn<sup>2+</sup>は降水によって供給され、溶存酸素によって酸化・沈殿することによって取り除かれる。

尻別川のBa/Ca比とMn/Ca比について以下の図に示す（図.5-16）。尻別川では水質自動観測所などがあり、流量や溶存酸素量（DO）との比較が可能である。本研究では尻別川、大別川ともに毎年春にBa/Ca比がピークを示している（図5-16、17）。尻別川の微量元素濃度比のグラフ（図.5-16）で、Ba/Ca

比は積雪深（青線）が多いときは翌春の流量（緑線）が雪解け水により多くなり、同様にBa/Ca比の春期のピークの値も高くなる。そのため、Ba/Ca比は流量を反映している可能性が高い。また、Mn/Ca比はDOが増えると殻中に入り込みやすい形態のMn<sup>2+</sup>が酸化・沈殿されるため、逆相関を示し、DOと降水も逆相関を示し、Mn<sup>2+</sup>は降水によって供給されるため、Mn/Ca比は降水量を反映していると考えられる。大別川においても、Mn/Ca比やBa/Ca比が尻別川と同様な変動を示すため、Ba/Ca比は流量を、Mn/Ca比は降水量を反映していると考えられる。

### 尻別川

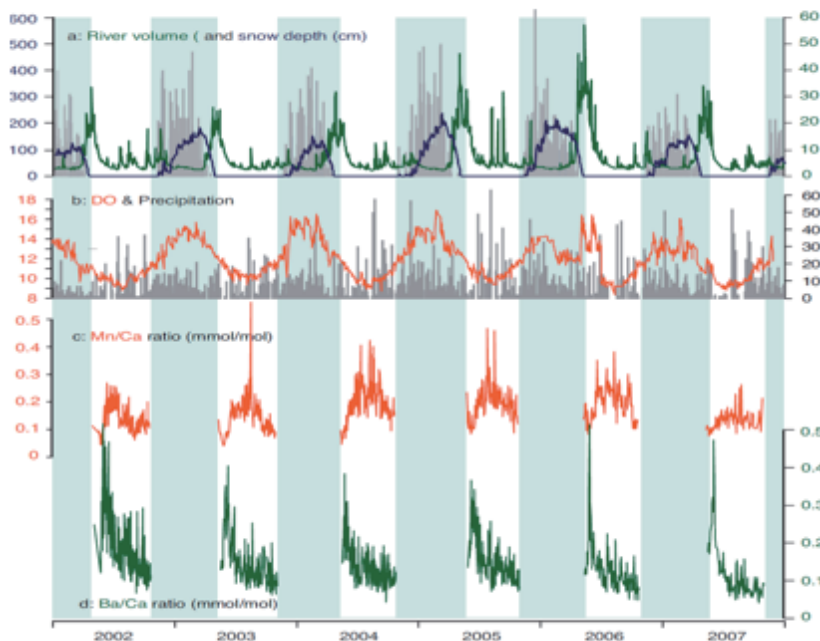


図.5-16 尻別川採取カワシングガイ殻の微量元素の濃度Ca比と流量、DOなど

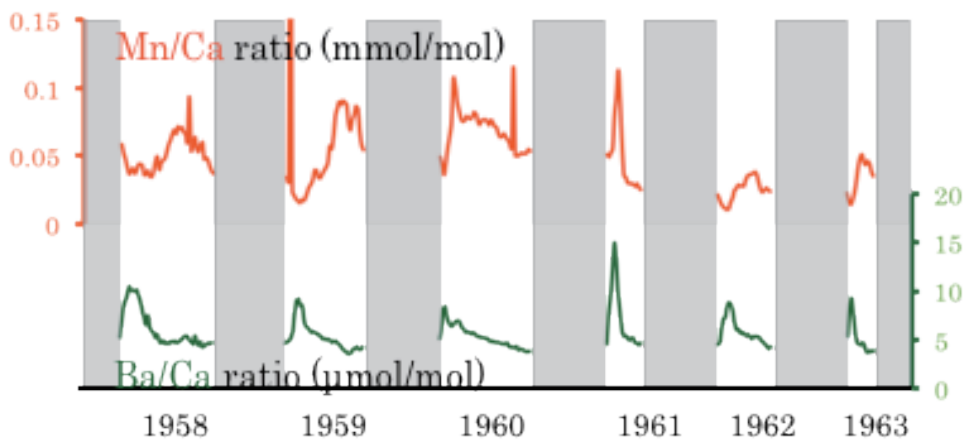


図.5-17 大別川採取カワシングガイ殻の微量元素の濃度Ca比

大別川試料のSGIと平均して年1点に直した微量元素を以下に示す（図.5-18）。NaとMgは正相関を、SrとBaは逆相関を示しているように見える。

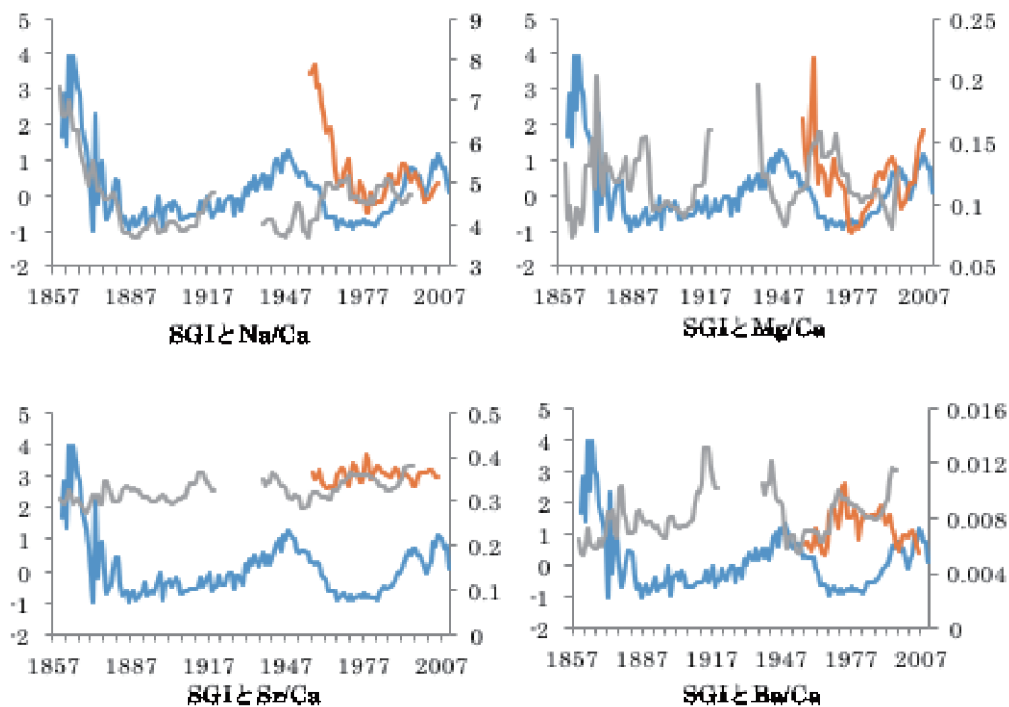


図.5-18 SGIと2個体の殻の微量元素

経年変化でみるとBaの濃度が高いときにカワシンジュガイの成長量が低下しているため、大雨などによる土砂の流入などが起こって、Baの濃度が高くなり、カワシンジュガイにとってはそれがストレスになって、成長が抑制されるということが考えられる。NaはSGIと相関しているように見えるが、両個体とも幼少期に濃度が上昇している。このように、個体の成長過程の段階の違いにより、微量元素の濃度が変化する可能性も考えられる。

### (3) 障害輪

障害輪とは貝が環境の変化でストレスを感じ、殻の成長を停止してしまうことによって、起きる、殻にある欠損部分のことをいう。1960年に複数の個体で、こういった障害輪が観察された(図.5-19)。また、同時期に微量元素濃度でも、他の年に比べ明らかに高いピークが複数の元素で見られた(図.5-20)。

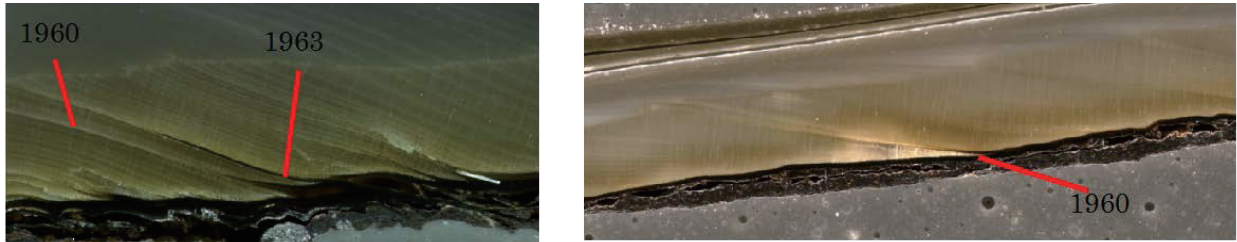


図.5-19 1960年の障害輪

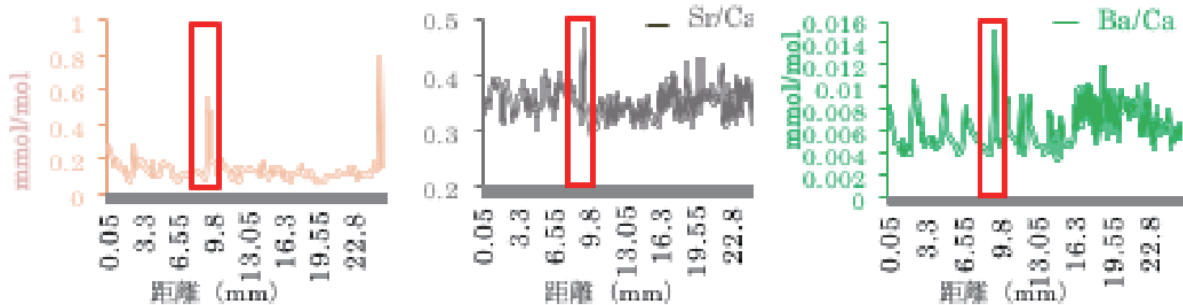


図.5-20 微量元素濃度のCa比  
(1960年(赤い四角)に明らかに高いピークが観察される。)

1960年にはチリ地震が発生し、それに伴う津波が厚岸でも観測されている。また、1952年2004年にも十勝沖地震の津波が観測されており、同じように複数の個体で、障害輪が形成されている。したがって、一部の障害輪は津波によって、作られる可能性がある。今後、微量元素分析と障害輪の比較対応をより詳細に行っていくことで、過去の津波の有無を検討できるようになる可能性がある。

### (4) 化石試料への応用

まず、生息年代について、本研究で測定した弃天貝塚出土試料は、考古学的調査の報告書で推定されていた幕末期より数百年早い結果が出た(表4-9)。そのため、まずはコンタミネーションの可能性を考え、殻から二酸化炭素の抽出する方法を燃焼からリン酸処理にかえた手法や殻皮試料の測定を行った。

しかし、同様の結果が得られたため次に、川に生息する貝では上流に堆積した石灰岩などを起源とする非常に古い炭素が年代値へ影響を与えるHard water効果が考えられるので、貝塚付近を流れる安平川の現生カワシンジュガイ試料を年代測定した。その結果、ほぼ現代の値(87.6%の確立で1956年、7.8%の確立で2009年)を示した。さらに、較正曲線のデータは2009年までであったため、このまま較正曲線が右下がりの変動を示し、採取年である2014年までの較正曲線が存在すれば、より採取年に近い測定結果となるだろう。したがって、Hard water効果も考えにくく、全ての貝塚出土試料で類似の年代結果を示したので、測定結果が実際の年代を反映して、およそ13世紀半ばから14世紀までの鎌倉時代中期から後期に生息していたカワシンジュガイであると判断した。この13世紀半ばから14世紀までの期間は、アジアの地域において、平均並みか現代と同程度の比較的温暖な時期にあたる<sup>34)35)</sup>。

次に弁天貝塚出土試料を現生カワシンジュガイ試料と対比していく。まずは、現生カワシンジュガイ試料、貝塚出土試料ともに成長曲線を求めた。各採取地点に生息する集団全個体の年輪幅積算値を、性成熟で成長が緩やかに転じる点で合わせて並べていく。そして、同じ年齢における1年の成長幅の平均をとり、その積算値を示した(図.5-21)。この図からは、成長速度の違いや最長年齢などが読み取れる他、何年ほどで性成熟に至るかの推測できる。

日本海側と太平洋側で主に成長の違いがみられた。日本海側の方が高い成長率を持つ。本研究の調査河川における日本海側と太平洋側でカワシンジュガイの成長に影響を与え得る環境の違いとしては、気候、そして河川規模、栄養塩などが考えられる。河川規模は日本海側に位置する天塩川、そして尻別川はともに第一級河川と大きく、天塩川の支流の安平志内川も比較的大きな河川である。これに対し、太平洋側に位置する河川は川幅が数メートルしかないことが多い。この河川規模の違いは集水域の違いでもあるので、規模が大きいくほど広範囲の水を集めるということであり、栄養塩の変動などにも影響を与える可能性がある。また、河川規模の違いで、降水、気温の変化などの外部環境の変化への応答にも違いがでるであろう。

このように、気候、河川規模、栄養塩など互いに密接に関係がある要素が複数あるため、日本海側と太平洋側でカワシンジュガイの成長率の違いがある理由を明らかにするには、今後さらに検討が必要であろう。そのうえで、弁天貝塚試料は太平洋側の河川、特に貝塚付近を流れる安平川と類似の成長曲線を示したため、現在の安平川の環境とさほど河川環境に違いがなかったことが推察される。

### 各地点の平均積算年輪幅

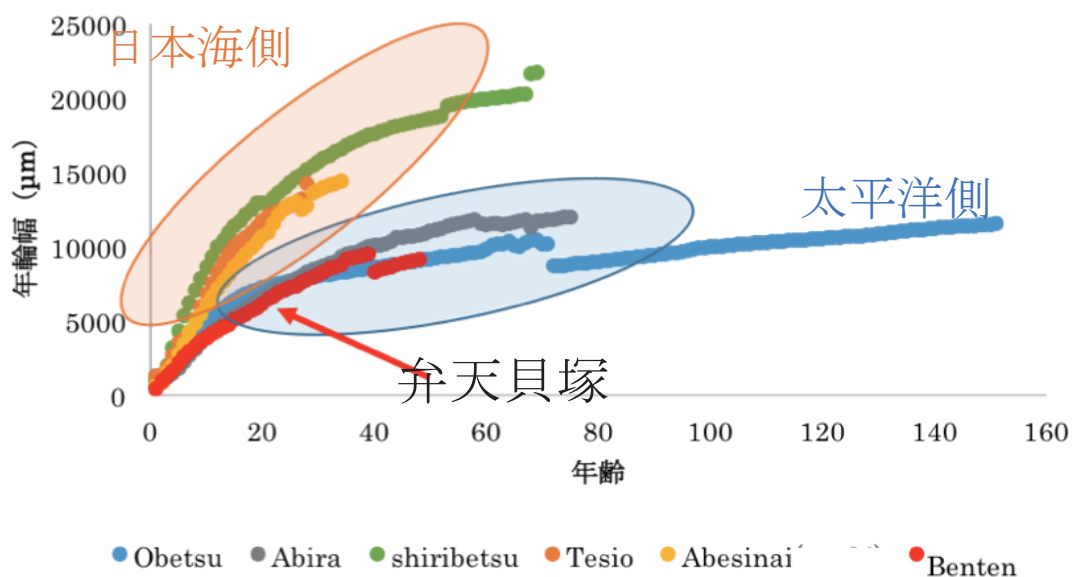


図.5-21 各採取地点のカワシンジュガイの年輪幅積算

酸素・炭素同位体比プロットにおいても、日本海側と太平洋側の河川で数‰ではあるが、違いがみられた（図.5-22）。弁天貝塚出土試料も太平洋側の河川と同様であり、安平川よりやや酸素同位体比が重かった。

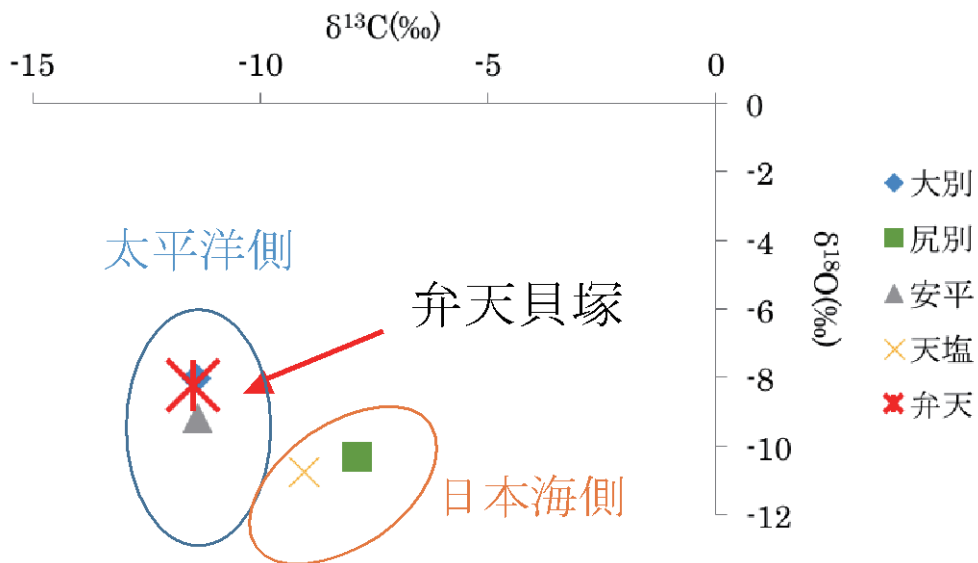


図.5-22 各河川の平均炭素・酸素同位体比プロット

次に貝塚出土試料3個体の年代測定結果が、類似していたため、同時代に生息していたと仮定し、各個体の年輪幅の波形が全個体で整合性が一番保たれるように並べた（図.5-23）。

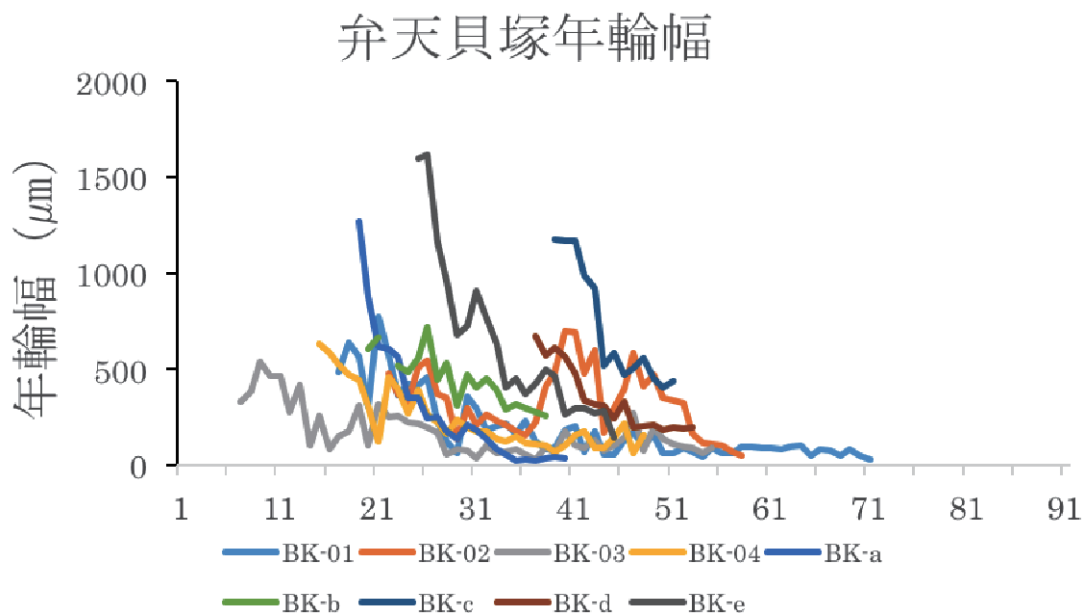


図.5-23 弁天貝塚出土試料の年輪幅 (n = 9)



各個体のSGIも年輪幅で合わせた時系列をそのまま利用し、並べた (図.5-24)。さらに、それを平均化したものを示す (図.5-25)。

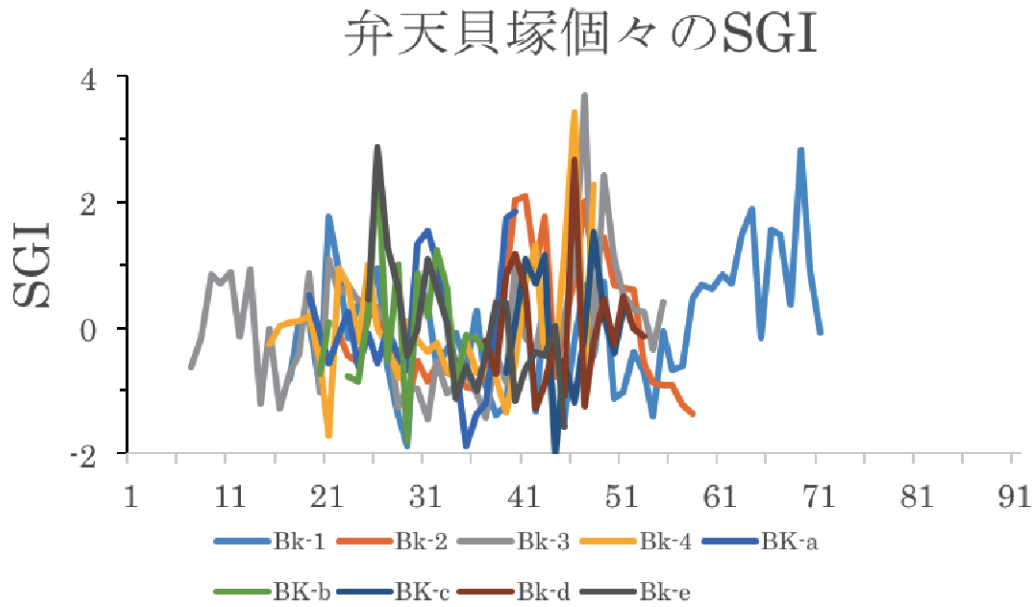


図.5-24 弁天貝塚出土試料のSGI (n = 9)



図.5-25 弁天貝塚SGI

これらを、現生のカワシシユガイのSGIと合わせて示す（図.5-26）。ただし、弁天貝塚は採取日がわからず、また現生カワシシユガイとは生きている年代は異なる。

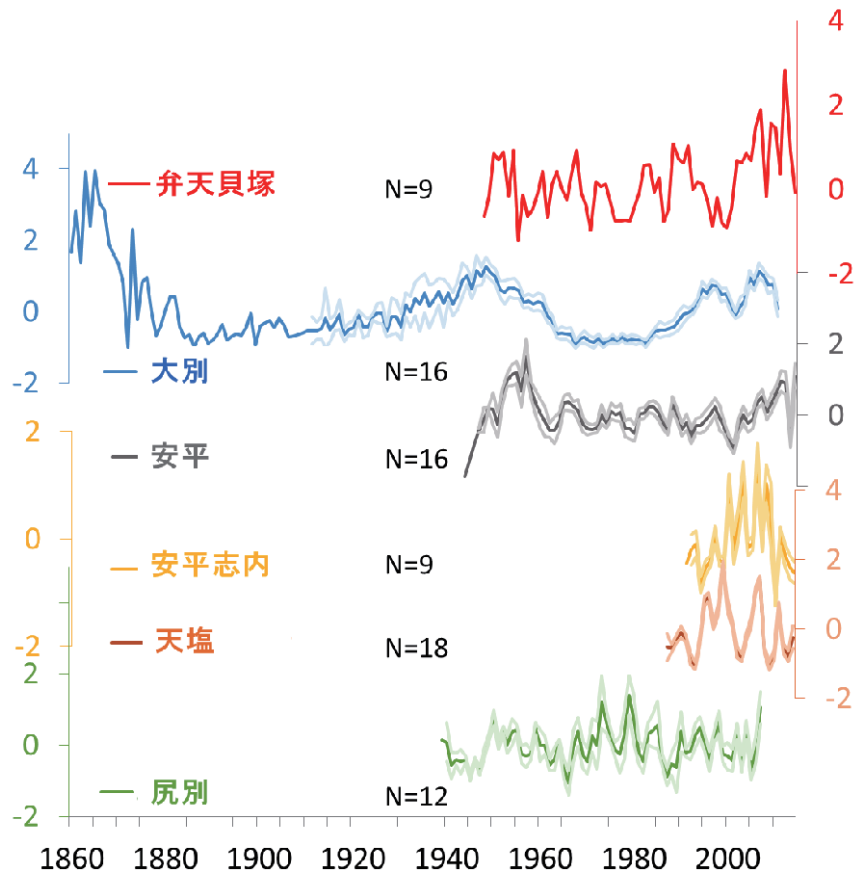


図.5-26 現生カワシシユガイ試料のSGIと弁天貝塚試料のSGI

次に2個体測定した日輪幅を示す（図.5-27）。カワシシユガイの採取年がわからないので、同じ年とは限らないが、類似の変動を示すところで並べて表示した。

### 弁天貝塚の日輪

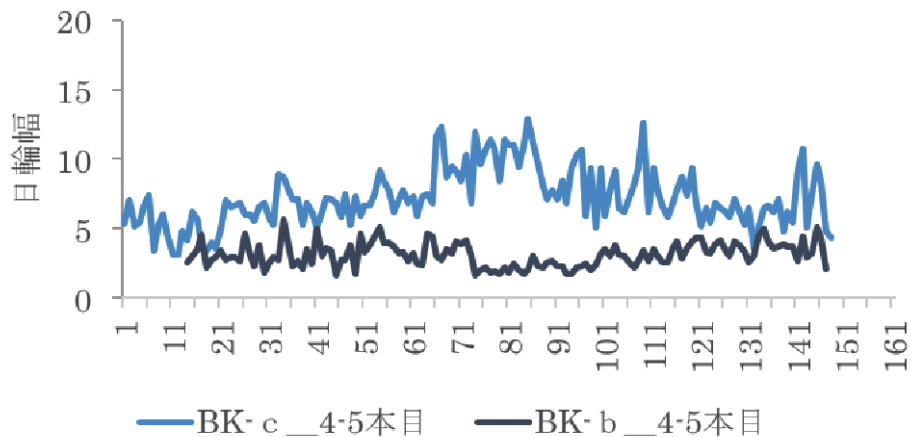


図.5-27 弁天貝塚試料の日輪

日輪を計測した天塩川、安平川との比較を行う（図.5-28）。それに際し、河川ごとに平均をとってしまると、個体の成長率が違うため1年の成長期間に違いがでると、一方が成長を停止し、もう一方が成長を続けているとき、その期間は成長を続けたカワシンジュガイの成長率に引っ張られてしまう。そのため、各個体の1年の成長期間における成長幅の平均をとり、その平均値がさらに集団の平均値になるように調整した。

その下に日輪幅を測った年数（天塩川5年、安平川2年）分の水温を使って、平均水温を算出した（図.5-29）。安平川は6月から7月頃に頻繁な降水による水温の上昇抑制が、また天塩川では7月末に急激に温度低下がみられる。そういった部分は日輪幅でも成長が一致して落ちる。それを考慮して弁天貝塚試料の日輪幅変動をみると、安平川にみられる成長量の低下があまり見受けられない。したがって、弁天貝塚出土のカワシンジュガイが生息していた当時は現在よりも初夏の雨が少なかった可能性が考えられる。

今後各河川の日輪幅計測数を増やし、水温との対比を行っていくことで、より正確な情報が得られるだろう。

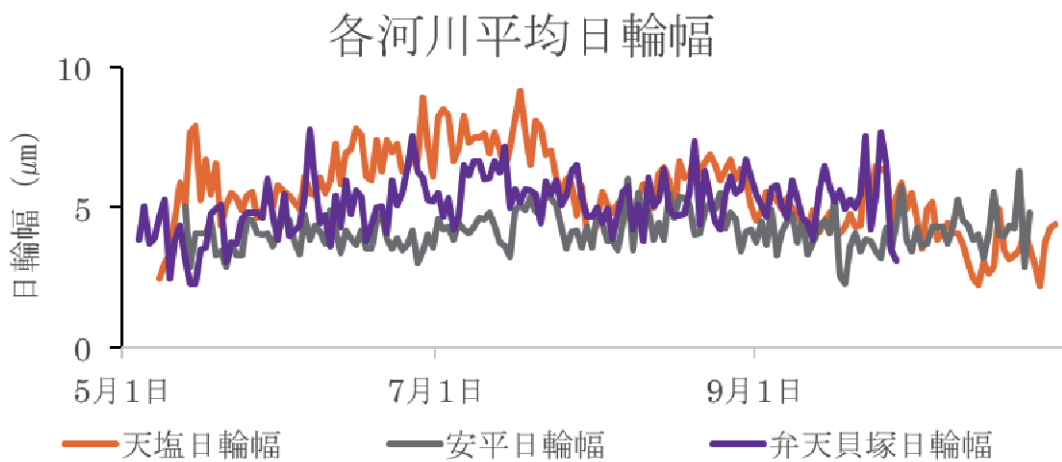


図.5-28 各河川平均日輪幅

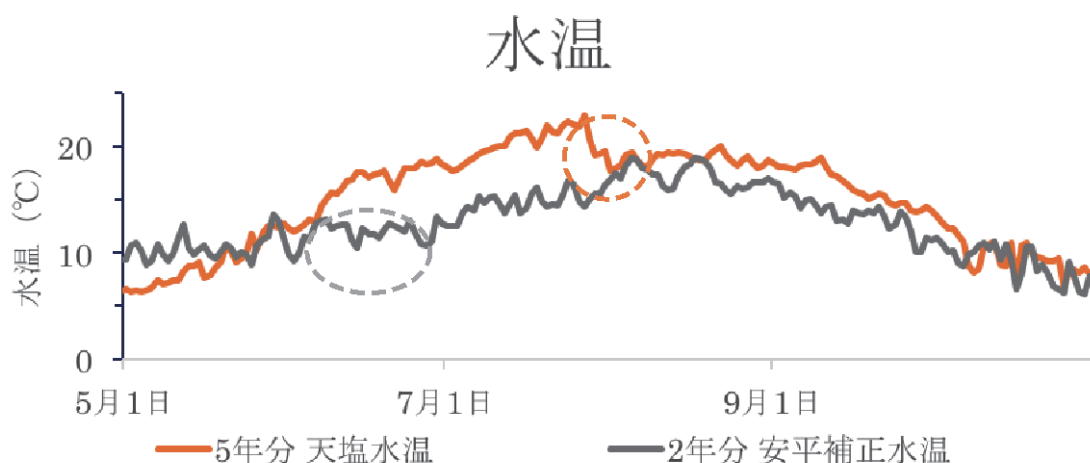


図.5-29 天塩川と安平川の平均水温 (°C)

点線枠の部分は降水が多く水温が低下または水温上昇の抑制をうけている。

## 6. 結論

SGIの5年移動平均をとったところ、夏から秋にかけての気温で比較的高い相関が大別川と安平川で見られた。また、日本海側の尻別川のカワシンジュガイのSGIは積雪深と逆相関が得られた。同じ日本海側である天塩川とその支流の安平志内川でも冬の降水と逆相関する。これは、積雪が多いと翌春の冷たい雪解け水が水温の上昇を阻害するからで、カワシンジュガイの成長には水温が大きく影響していることが、太平洋側、日本海側、両方の河川から述べることができる。大別川のSGIは期間が150年と長く、特徴的な長周期変動がみられるため、長周期を持つ気候変動指数と比較した結果、AMOとの相関が見られた。日本海側の尻別川ではPDOとやや弱い逆相関を示す。

大別川のカワシンジュガイ殻は微量元素濃度において、Na、Mg、Sr、Baなどが幼少期に一年に一つのピークが見られた。相関係数の値はNaとMgで正の、BaとSrでは負の値であった。大別川のカワシンジュガイ殻の微量元素濃度は非常に高いピークを示す場所があり、その部分の殻の観察をしたところ、成長が阻害されたことを示す障害輪が見られた。そこで、厚岸の歴史年表と照らし合わせたところ、その部分は1960年のチリ沖地震の津波が到達した時期にあたることがわかった。他の津波とも対応したところ、同様に1952年と2003年の十勝沖地震による津波の時期に障害輪を形成しているものが多数あった。そのため、障害輪の一部は津波によって、形成されるということが示唆された。

尻別川の殻の微量元素分析では、Ba/Ca比が毎春ピークを示し、雪解け水によって増えた流量の変動と一致している。また、Mn/Ca比はDOと逆相関を示し、DOと降水も逆相関を示すので、Mn/Ca比を反映していると考えられる。

**謝辞：**図の作成には北海道大学大学院理学院修士課程2年上原氏と北海道大学大学院理学研究院教授見延氏にご協力いただいた。本研究は一般財団法人北海道河川財団 平成27年度RIC研究助成によって行った。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Schöne, B. R., Dunca, E., Mutvei, H., & Norlund, U. (2004). A 217-year record of summer air temperature reconstructed from freshwater pearl mussels (*M. margaritifera*, Sweden). *Quaternary Science Reviews*, 23(16), 1803-1816.
- 2) Dunca, E., Schöne, B. R., & Mutvei, H. (2005). Freshwater bivalves tell of past climates: But how clearly do shells from polluted rivers speak?. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 228(1), 43-57.
- 3) Kerr, R. A. (2000). A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, 288, 1984-1985.
- 4) Knight, J. R., Folland, C. K., & Scaife, A. A. (2006). Climate impacts of the Atlantic multidecadal oscillation. *Geophysical Research Letters*, 33(17).
- 5) Lee, S. K., Park, W., van Sebille, E., Baringer, M. O., Wang, C., Enfield, D. B. & Kirtman, B. P. (2011). What caused the significant increase in Atlantic Ocean heat content since the mid - 20th century?. *Geophysical Research Letters*, 38(17).
- 6) Dunca, E., Mutvei, H. (2001). Comparison of microgrowth pattern in *Margaritifera margaritifera* shells from south and north Sweden. *Am. Malacol. Bull.* 16, 239-260.
- 7) Schöne, B. R., Lega, J., Flessa, K. W., Goodwin, D. H., & Dettman, D. L. (2002). Reconstructing daily temperatures from growth rates of the intertidal bivalve mollusk *Chione cortezi* (northern Gulf of California, Mexico). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 184(1), 131-146.
- 8) 香本佳彦 (2008) 北海道尻別川におけるカワシンジュガイを用いた環境復元, 北海道大学理学部卒業論文

- 9) Jeffree RA, Markich SJ, Lefebvre F, Thellier M, Ripoll C (1995). Shell microlaminations of the freshwater bivalve *Hyridella depressa* as an archival monitor of manganese water concentration: experimental investigation by depth profiling using secondary ion mass spectrometry. *Experientia* 51:838-848.
- 10) Schöne, B. R., & Surge, D. M. (2012). Part N, Revised, Volume 1, Chapter 14: Bivalve sclerochronology and geochemistry. *Treatise online*, 46, 1-24.
- 11) Kinsman, D. J. J. and Holland, H. D. (1969). The coprecipitation of cations with CaCO<sub>3</sub> IV. The coprecipitation of Sr<sup>2+</sup> with aragonite between 16 and 96°C. *Geochim. Cosmochim. Acta* 33, 1-17.
- 12) Katz, A. (1973). The interaction of magnesium with calcite during crystal growth at 25-90°C and one atmosphere. *Geochim. Cosmochim. Acta* 37, 1563-1586.
- 13) Mitsuguchi T, Matsumoto E, Abe O, Uchida T, Isdale PJ (1996). Mg/Ca thermometry in coral skeletons. *Science* 274: 961-962.
- 14) Watanabe, T., Winter, A., & Oba, T. (2001). Seasonal changes in sea surface temperature and salinity during the Little Ice Age in the Caribbean Sea deduced from Mg/Ca and 18 O/16 O ratios in corals. *Marine Geology*, 173(1), 21-35.
- 15) Klein RT, Lohman KC, Tayer CW (1996). Bivalve skeletal record sea-surface temperature and d18O via mg/Ca and 18O/16O ratio. *Geology* 24: 415-418.
- 16) Freitas, P. S., Clarke, L. J., Kennedy, H., Richardson, C. A., & Abrantes, F. (2006). Environmental and biological controls on elemental (Mg/Ca, Sr/Ca and Mn/Ca) ratios in shells of the king scallop *Pecten maximus*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(20), 5119-5133.
- 17) Takesue RK, Van Geen (2004). A Mg/Ca, Sr/Ca, and stable isotopes in modern and Holocene *Protothaca staminea* shells from a northern California coastal upwelling region. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 68: 3845-3861
- 18) Carré, M., Bentaleb, I., Bruguier, O., Ordinola, E., Barrett, N. T., & Fontugne, M. (2006). Calcification rate influence on trace element concentrations in aragonitic bivalve shells: evidences and mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(19), 4906-4920.
- 19) Wanamaker Jr, A. D., Kreutz, K. J., Wilson, T., Borns Jr, H. W., Introne, D. S., & Feindel, S. (2008). Experimentally determined Mg/Ca and Sr/Ca ratios in juvenile bivalve calcite for *Mytilus edulis*: implications for paleotemperature reconstructions. *Geo-Marine Letters*, 28(5-6), 359-368.
- 20) Ford, H. L., Schellenberg, S. A., Becker, B. J., Deutschman, D. L., Dyck, K. A., & Koch, P. L. (2010). Evaluating the skeletal chemistry of *Mytilus californianus* as a temperature proxy: effects of microenvironment and ontogeny. *Paleoceanography*, 25(1).
- 21) Elliot, M., Welsh, K., Chilcott, C., McCulloch, M., Chappell, J., & Ayling, B. (2009). Profiles of trace elements and stable isotopes derived from giant long-lived *Tridacna gigas* bivalves: potential applications in paleoclimate studies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 280(1), 132-142.
- 22) Takesue RK, Bacon CR, Thompson JK (2008). Influences of organic matter and calcification rate on trace elements in aragonitic estuarine bivalve shells. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 72: 5431-5445
- 23) Gillikin DP, Dehairs F, Lorrain A, Steenmans D, Baeyens W, et al. (2006). Barium uptake into the shells of the common mussel (*Mytilus edulis*) and the potential for estuarine paleo-chemistry reconstruction. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 70: 395-407.
- 24) Stecher HA, Krantz DE, Lord CJ, Luther GW, Bock KW (1996) Profiles of strontium and barium in *Mercenaria mercenaria* and *Spisula solidissima* shells. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 60: 3445-3456.
- 25) Barats A, Amouroux D, Chauvaud L, e eyran , Lorrain A, et al. (2009). High frequency Barium profiles in

- shells of the Great Scallop *Pecten maximus*: a methodical long-term and multi-site survey in Western Europe. *Biogeosciences* 6: 157-170.
- 26) Thébaud, J., Chauvaud, L., L'Helguen, S., Clavier, J., Barats, A., Jacquet, S., & Amouroux, D. (2009). Barium and molybdenum records in bivalve shells: Geochemical proxies for phytoplankton dynamics in coastal environments?. *Limnology and Oceanography*, 54 (3) , 1002-1014.
  - 27) Batenburg, S. J., Reichart, G. J., Jilbert, T., Janse, M., Wesselingh, F. P., & Renema, W. (2011) . Interannual climate variability in the Miocene: High resolution trace element and stable isotope ratios in giant clams. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 306 (1) , 75-81.
  - 28) Risk, M. J., Burchell, M., De Roo, K., Nairn, R., Tubrett, M., & Forsterra, G. (2010) . Trace elements in bivalve shells from the Río Cruces, Chile. *Aquatic Biology*, 10 (1) , 85-97.
  - 29) Vander Putten E, Dehairs F, Keppens E, Baeyens W. (2000) . High resolution distribution of trace elements in the calcite shell layer of modern *Mytilus edulis*: Environmental and biological controls. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 64: 997-1011.
  - 30) Lazareth, C. E., Vander Putten, E., André, L., & Dehairs, F. (2003) . High-resolution trace element profiles in shells of the mangrove bivalve *Isoognomon ephippium*: a record of environmental spatio-temporal variations?. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57 (5) , 1103-1114.
  - 31) Lea D, Boyle E. (1989) . Barium content of benthic foraminifera controlled by bottom water composition. *Nature* 338: 751-753.
  - 32) Carroll M, Romanek CS (2008) . Shell layer variation in trace element concentration for the freshwater bivalve *Elliptio complanata*. *Geo-Mar. Lett.* 28:369-381.
  - 33) Campbell PGC (1995) . Interactions between trace metals and organisms: critique of the free-ion activity model, In A. Tessier and D. Turner [eds.], *Metal speciation and bioavailability in aquatic systems*. Chichester. 45-102.
  - 34) Bao, Y., Brá, A., & Yafeng, S. (2003) . Late Holocene temperature fluctuations on the Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 22 (21) , 2335-2344.
  - 35) Holmes, J. A., Cook, E. R., & Yang, B. (2009) . Climate change over the past 2000 years in Western China. *Quaternary International*, 194 (1) , 91-107.