

カワシンジュガイ殻を用いた北海道の河川系における 自然環境評価手法の高精度化

Quantitative reconstruction of the environmental changes in river system of
Hokkaido using the Margaritifera shells

渡邊 剛¹・鈴木まゆみ²

Tsuyoshi WATANABE, Mayumi SUZUKI

¹北海道大学 理学研究院 講師

²北海道大学 理学院 大学院生

要 旨

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河川自然環境評価手法の開発及び改良を目的とする。本研究では、希少種であり長寿種であるカワシンジュガイの硬組織の成長線に沿った高解像度化学分析を行い、その時系列データを水質及び環境データと比較検討することによりその有効性を評価した。別寒辺牛川水系のカワシンジュガイの標準成長指標（SGI）は特徴的な数十年にわたる長周期の変動を示した。気温の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見られた。また、長周期を持つ気候変動指数と比較した結果、大西洋10数年変動（AMO）と調和する変動が検出された。殻の微量元素濃度においては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。SGIとの相関係数の値はNaとMgで正の、BaとSrでは負の値であった。

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。また、観察された微量元素濃度の1960年のピークは、海水中に多い元素ばかりであった。そのため、障害輪の一部は津波によって、形成されたことを示唆した。

《キーワード：カワシンジュガイ；微量元素；標準成長指標》

1. はじめに

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河川自然環境評価手法の開発及び改良を目的とする。本研究では、希少種であり長寿種であるカワシンジュガイの硬組織の成長線に沿った高解像度化学分析を行い、その時系列データを水質及び環境データと比較検討することによりその有効性を評価する。さらに、その環境評価手法を、過去の形成部位及び化石試料に応用し、歴史時代から現在までの河川環境変遷史の定量的な解読を試みるカワシンジュガイを用いた環境評価法を北海道内の各河川系に展開し、異なる背景を持つ河川環境の過去数十年から百年間の変遷史を解明する。また、それぞれの河川における特有の特性と共通の変動とに区別して抽出して、土地利用変化などのローカルな環境要因と温暖化などのグローバル要因を時系列で見積もり人を含めた生物が共生可能な河川整備に資するものである。

カワシンジュガイは軟体動物門／二枚貝綱／イシガイ目カワシンジュガイ科／カワシンジュガイ属に分類され、カワシンジュガイ (*Margaritifera laevis*)、ホンカワシンジュガイ (*Margaritifera margaritifera*)、コガタカワシンジュガイ (*Margaritifera togakushiensis*)、ウチムラサキカワシンジュガイ (*Margaritifera falcate*) などの13種ほど存在する。

カワシンジュガイは北半球の広い範囲で河川に生息しており、日本にはコガタカワシンジュガイとカワシンジュガイが生息している。北海道にはこの両方の種類が確認されている。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。

カワシンジュガイは幼生期をグロキディウム幼生として、サケ科の魚の鰓に寄生して生活している。うまく鰓への寄生ができるのがグロキディウム幼生全体の0.0004%であり、無事寄生できたら遡上する宿主魚に運んでもらう過程で生き残るのがその内の5%、そして、稚貝になって鰓から脱落し、無事着床できるのがさらにその内の5%となる。そのため、放出されたグロキディウム幼生が数年間生き残る確率は10億分の1ほどである。

カワシンジュガイは淡水の二枚貝のなかでは最も長寿であるとされ、北海道においても長生きのカワシンジュガイが確認されている。カワシン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。

炭酸塩骨格を作る生物（サンゴ、貝類等）は、骨格形成時に当時の環境をその骨格中に記録しており、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なる。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。

二枚貝の外層や蝶番部分を観察すると、微細な成長縞（幅数10~200 μm ）と成長線（幅数 μm ）が交互に観察される。潮間帯に生息する種では潮汐周期と対応して成長縞や成長線が作られることが多く、1朔望日（24時間50分）に2回の満潮と干潮があるので、2本の微細成長縞と成長線で朔望日輪が形成される。

これらの日輪は成長が減衰したり停止したりすることにより、通常の日輪とは異なる障害輪を形成する。この障害輪は冬季の水温の低下など規則的な周期で作られるものもあれば、突発的な大きなストレスにより作られるものもある。カワシンジュガイも冬の低水温に伴って成長量が低下することで冬輪を形成し、それ以外の部分を夏輪としてセットで年輪を形成する。

また、今回試料として用いたカワシン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（図1）。

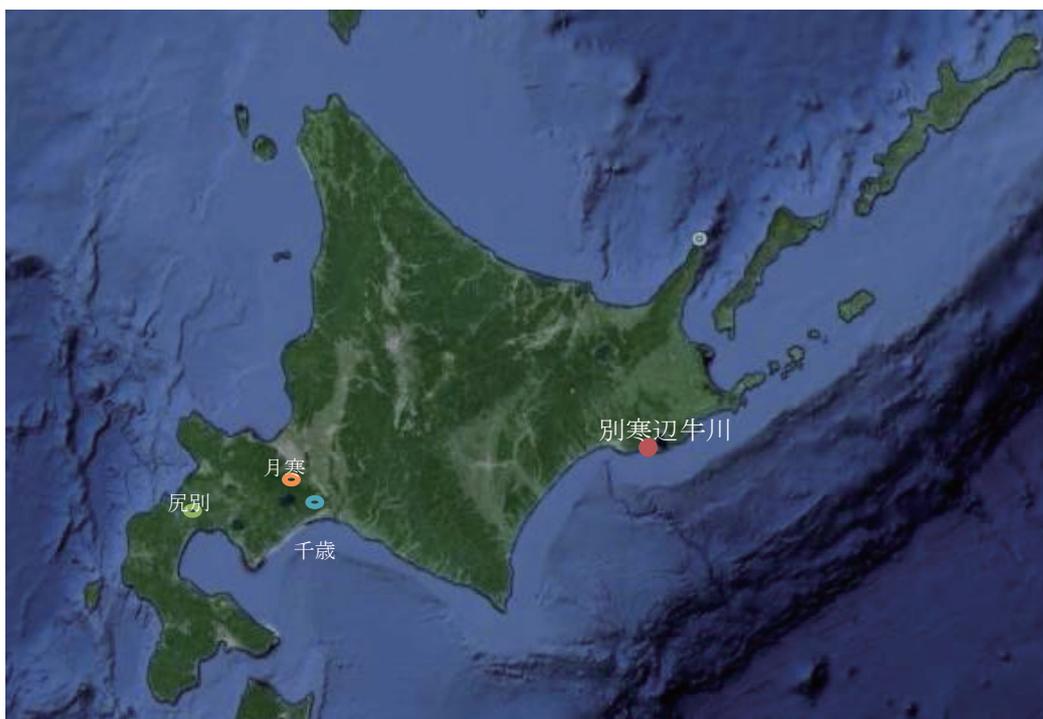


図1 調査対象域

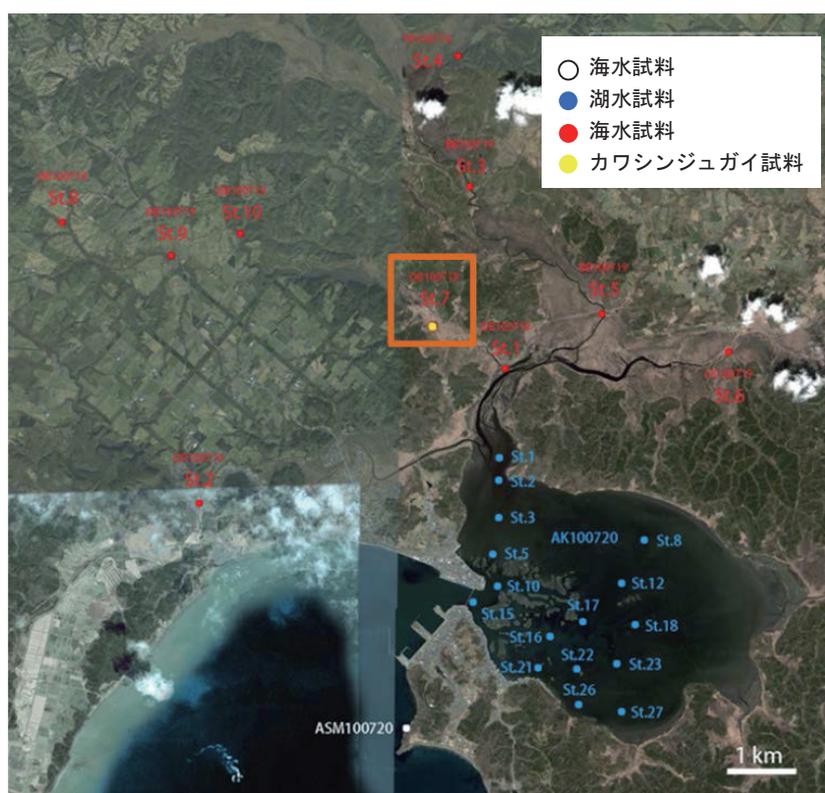


図2 別寒辺牛川水系と厚岸湖の採水地点

厚岸町は1800年頃からの記録で、その当時洪水が頻繁に起こっていたということがわかっている。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（図2）。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（図3）。



図3 カワシンジュガイ生息地の環境

2. 手法

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。別寒辺牛川のカワシンジュガイは他の河川と比べて成長量が悪く、長生きする個体がときに見られる（図11）。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別寒辺牛川のみならず、北海道のカワシンジュガイが生息する月寒川、尻別川水系、千歳川、別寒辺牛川水系の河川水試料を採取した。

(1) 年輪計測とSGI

カワシンジュガイは幼少期に急激に殻の大きさを成長させ、年をとるにつれて成長速度は遅くなる（図4）。その集団の年による成長量の良さを知るためには、個体毎の年齢による成長量の差など、生物学的要因による成長量の違いを取り除かなくてはならない。この手法は年輪学において、様々な手法が研究されている。そのため、個々の成長トレンドを取り除いて集団全体のその年々による成長幅の変動の傾向をみるために、SGI（Standardized Growth Index）という指標を使用した。

SGIの手順としては、まず、個体毎の成長幅を計測したものに、近似曲線をとる（図5）。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GI（Growth Index）である（図6）。こうすることで、各個体の年齢差による成長量の差は取り除かれる。そして、このGIを標準化することによって、各個体毎に求めた成長量の年変動を比較することができるようにする。そのためには、GIの平均と標準偏差を求め、GIからその平均を引き、標準偏差で割るという作業が必要になる。これが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）（Helama and Nielsen, 2008）。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。

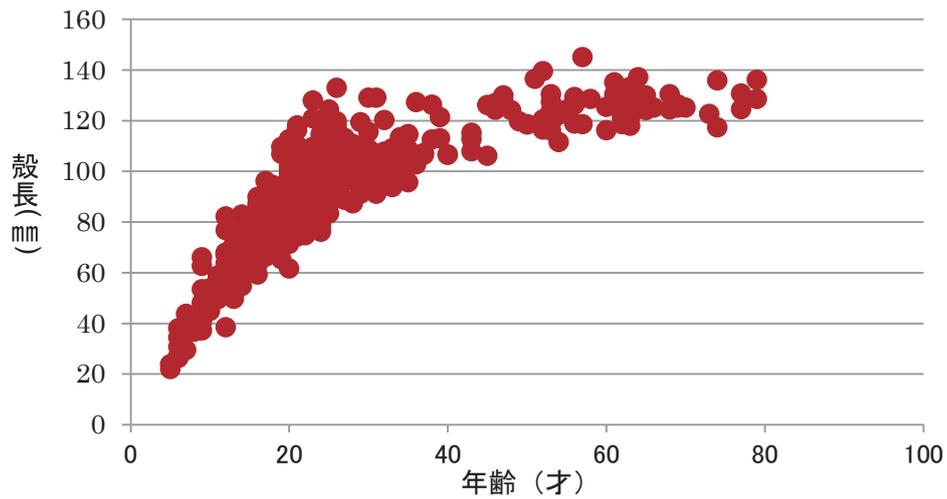


図4 カワシジュガイの年齢による殻長の違い

幼少期に成長量が大きく性的に成熟すると急激に成長量が低下していくので、成長曲線は指数関数のような曲線を描く。

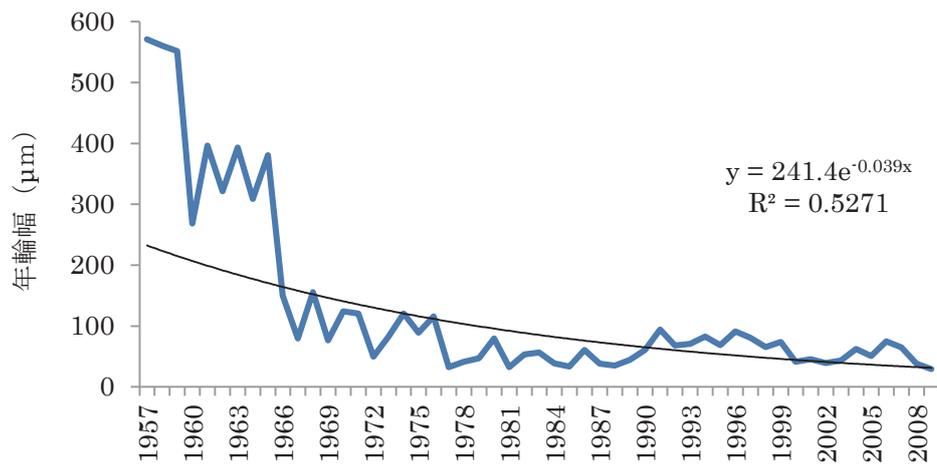


図5 年輪幅とその近似曲線

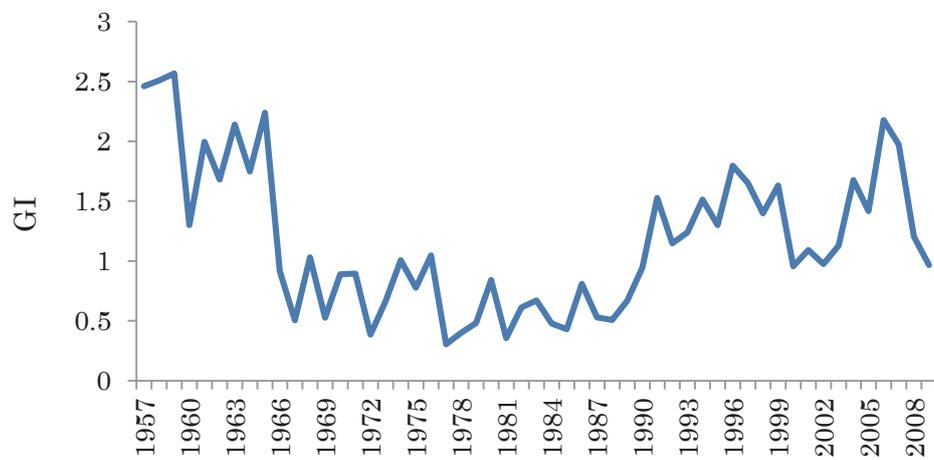


図6 成長指標 (GI)

(2) 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に、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（図7）、厚さ4mm前後の切片を作成する。2切片は向かい合った切断面を上にしてスライドガラスに接着して用い、それぞれ違う分析をするのに使用する。このようなやり方をミラーリングという（図8）。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。

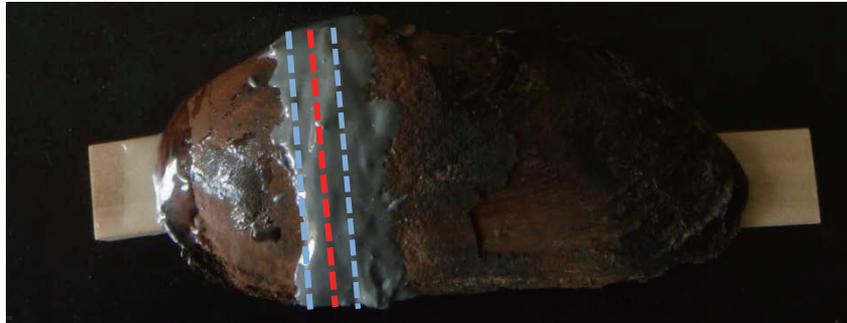


図7 最短成長軸（赤線）を基準にした切断位置



図8 切り出された対になっている切片（ミラーリング）

(3) 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Schone et al., 2005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Mutvei's solution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。

(4) 年輪計測

切片は光学顕微鏡（Keyence Digital Micro Scope VHX-2000）を使って年輪を観察するとともに、写真で記録を残した。その後、その写真の年輪幅を画像解析ソフトImageJを使って計測した（図9）。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線を引き、その長さを計測した（Dunca et al. (2005)、Schone et al., (2005)）。

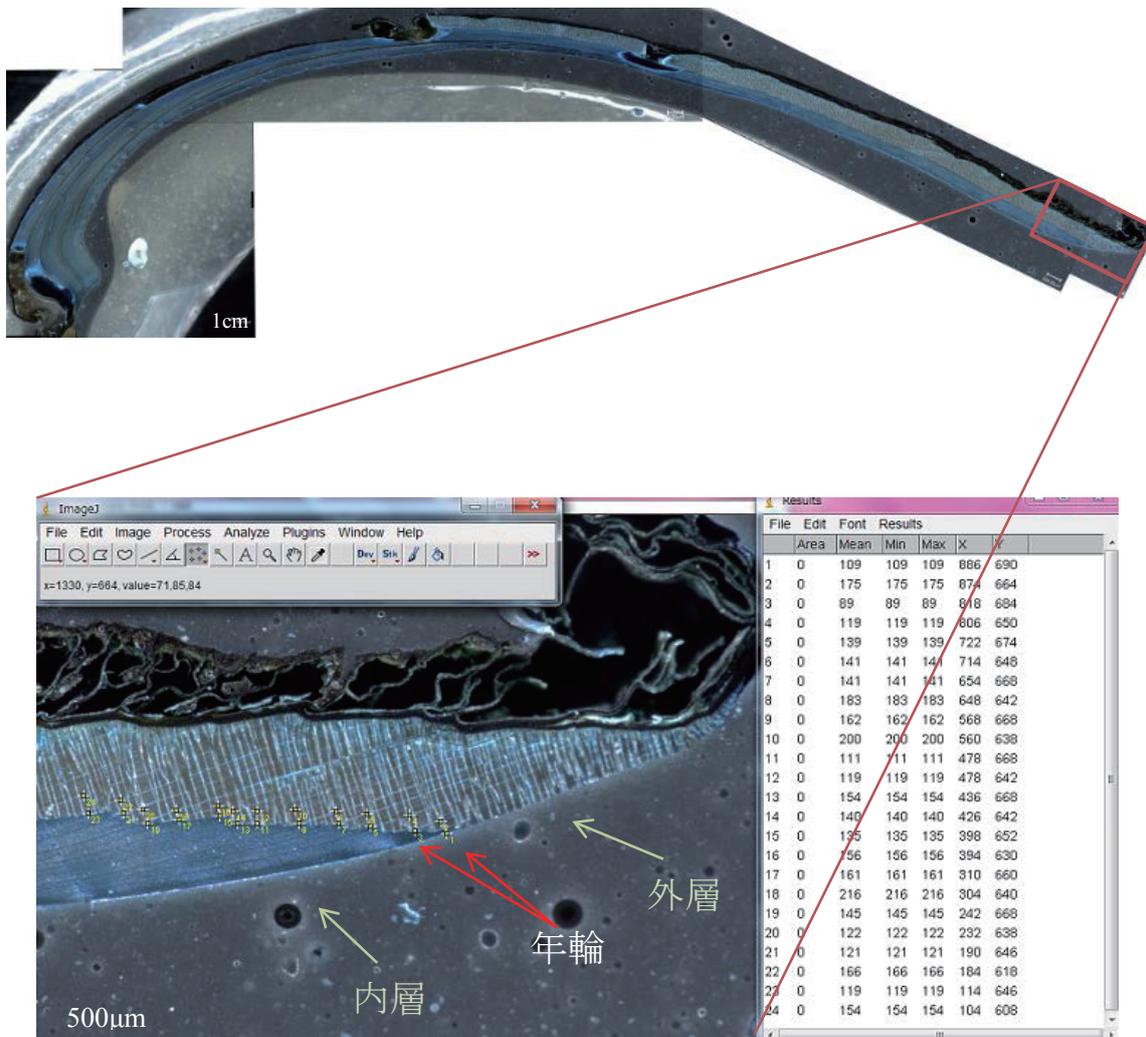


図9 年輪幅の計測手法

(5) 殻の微量元素分析

東京大学大気海洋研究所にあるレーザーアブレーションICP質量分析法（LA-ICP-MS）でカワシンジユガイの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（図10。測定条件は10Hzで放射照度0.77GW/cm²、3.83J/cm²）。



図10 LA-ICP-MS分析後のレーザーを照射したスポット痕

測定した2個体の内、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 μ m、長寿なBB17のサンプルでは、直径100 μ mのスポットに設定した。成長曲線からわかるように（図11）、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 μ mに設定し、高時間分解能化を目指した。

(6) 強度から濃度への換算

測定の最初と最後に標準物質として、アメリカ国立標準技術研究所（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 Clam 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の値で測定のコンデ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ので、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。

(7) 河川水の微量元素分析

ICP発光分光分析法（ICP-AES）により河川水やその他の淡水の微量元素分析を行った。測定元素はMg、Ca、Mn、Sr、Baである。それぞれの元素が既定の濃度を持つ標準液A~Fまでを作成し、それを測定することにより、検量線を作成する。標準液は何地点かの河川水や湖水から濃度を予測し、作成した。また同じ試料を何度か測定して、測定条件に変化がないかどうかを検討する材料とした。

3. 結果

天塩川、尻別川、別寒辺牛川のカワシンジュガイの成長曲線は、河川により成長様式が異なることがわかった（図11）。

また、別寒辺牛川のカワシンジュガイの11試料（OB15,OB02,BB17,BB03,OB01,OB05,OB06,OB07,OB08,OB09,OB10）についてのSGIを求めると以下のような変動を示した（図12）。

さらに平均化したSGIを、95%の信頼区間とともに以下に示す（図13）。

信頼区間はサンプル数にも左右されるため、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。

SGI Master Chronology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0.09651、最大が3.959、最小が-0.9986であった。

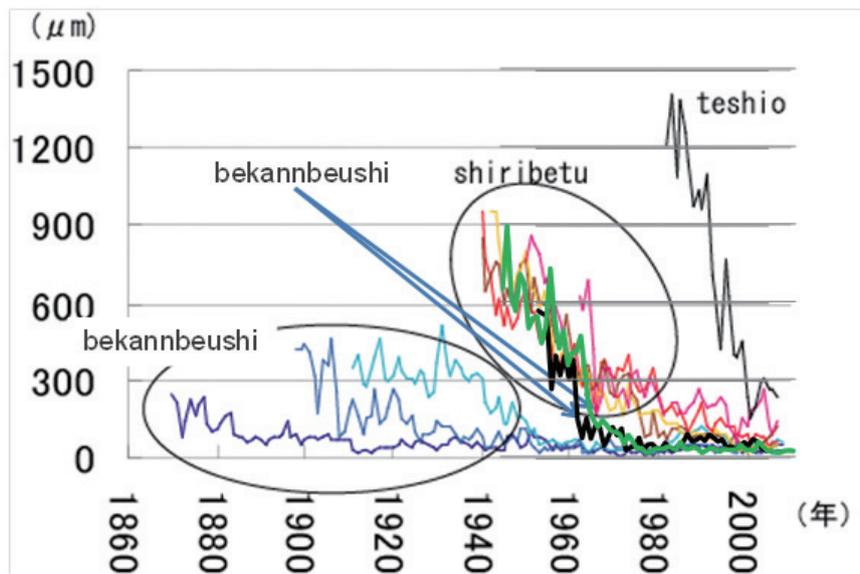


図11 各河川系のカワシジユガイの成長曲線

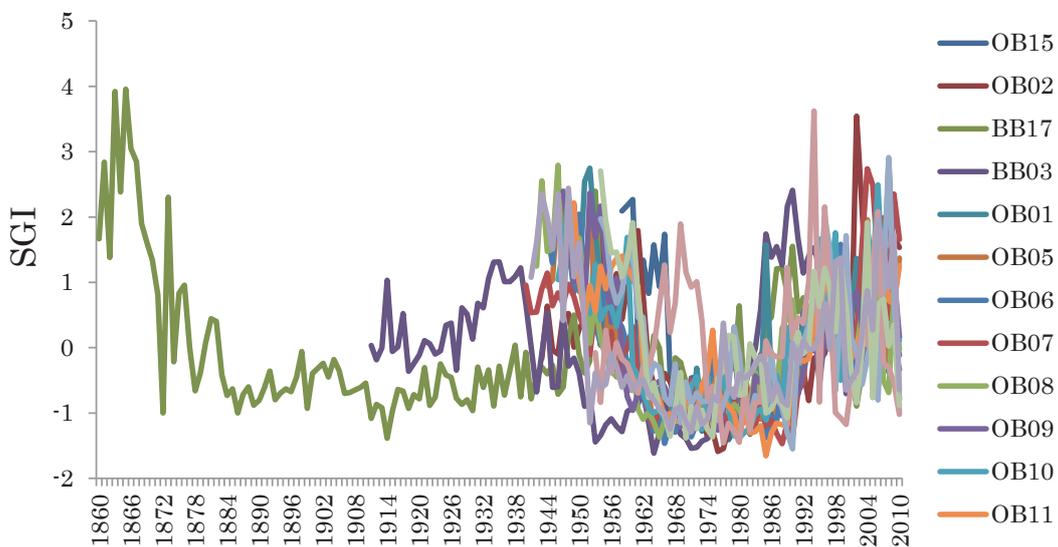


図12 各々のSGIの変動

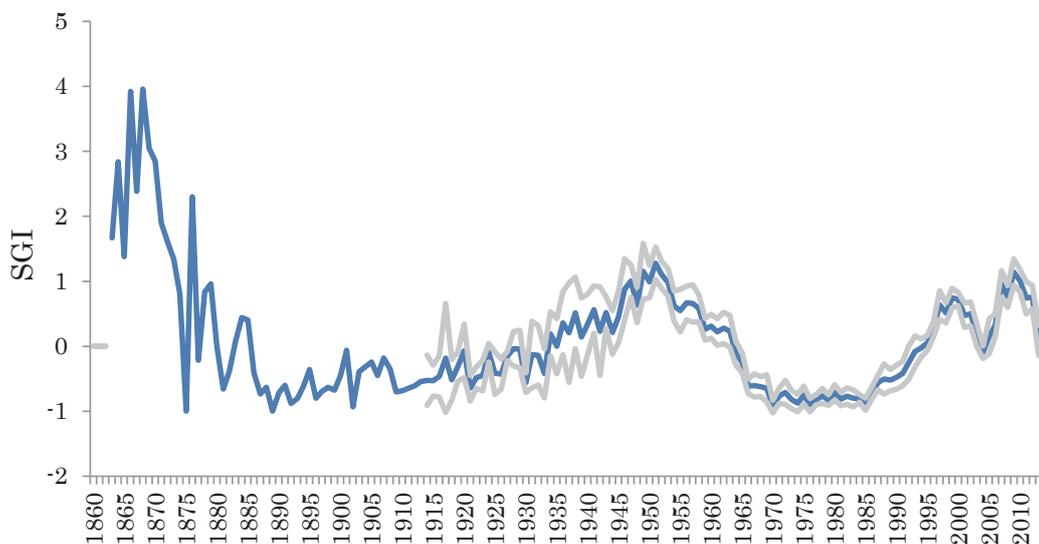


図13 SGI Master Chronology (青線) と95%信頼区間 (灰色線)

(1) 殻の微量元素分析

強度のデータを濃度に変換し、異常値を取り除いた結果は以下の通りとなる。

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, Sr, Cuなど多数の元素に周囲より高いピークが見られた。

(2) 河川水の微量元素分析

1年1年のピークの位置を見ると、SGIと気温に関係性があるように見えるが、SGIの数十年程度の長周期の変動を完全に表している月は見受けられない(図14)。

どの季節がカワシジユガイの成長に影響を与えているのかという傾向をみるために、それぞれの月の相関係数を求めた。また、気温がカワシジユ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。SGIと気温の年代が同じであるときを0として、+1というのは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との関係を見ていることになる。

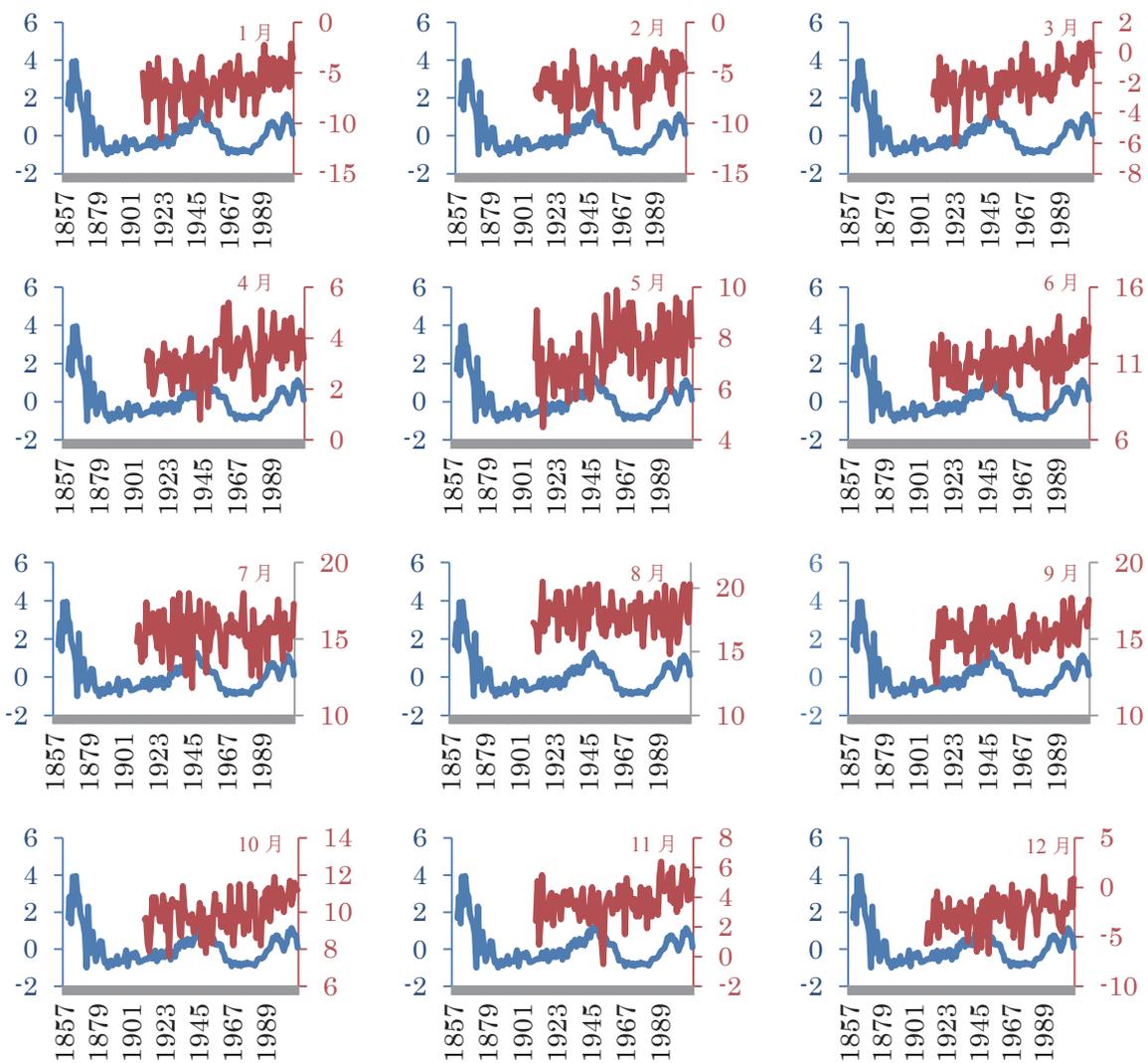


図14 SGI (青線) と釧路、太田地区での各月の気温 (赤線) の比較

その結果出された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 8.1×10^{-5} と、全体的に相関があるとは言にくい。

上述の実測値データは、年ごとの変動が激しく、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。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。その中でも9月前後にあたる夏の気温が比較的大きい相関係数の値を示すことがわかった。夏は貝の成長時期であって、このときの気温が貝の成長量に関わっている可能性が示唆された。

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、積雪量は最深積雪である。釧路気象台では、太田地区のデータより古いデータも存在するため、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。しかし、太田地区と釧路気象台のデータは調和的な変動をしているので、最近数十年間の降水量や積雪量がたまたまSGIの変動と似た動きをした可能性が高い。このように、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。

SGIの長周期の変動と調和する要素を探すため、SOI、PDO、NAO、AMOなどの長周期変動の指標を比較した。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という値を示した。また、NAOでも5年程度SGIから遅れて良い相関が得られた。

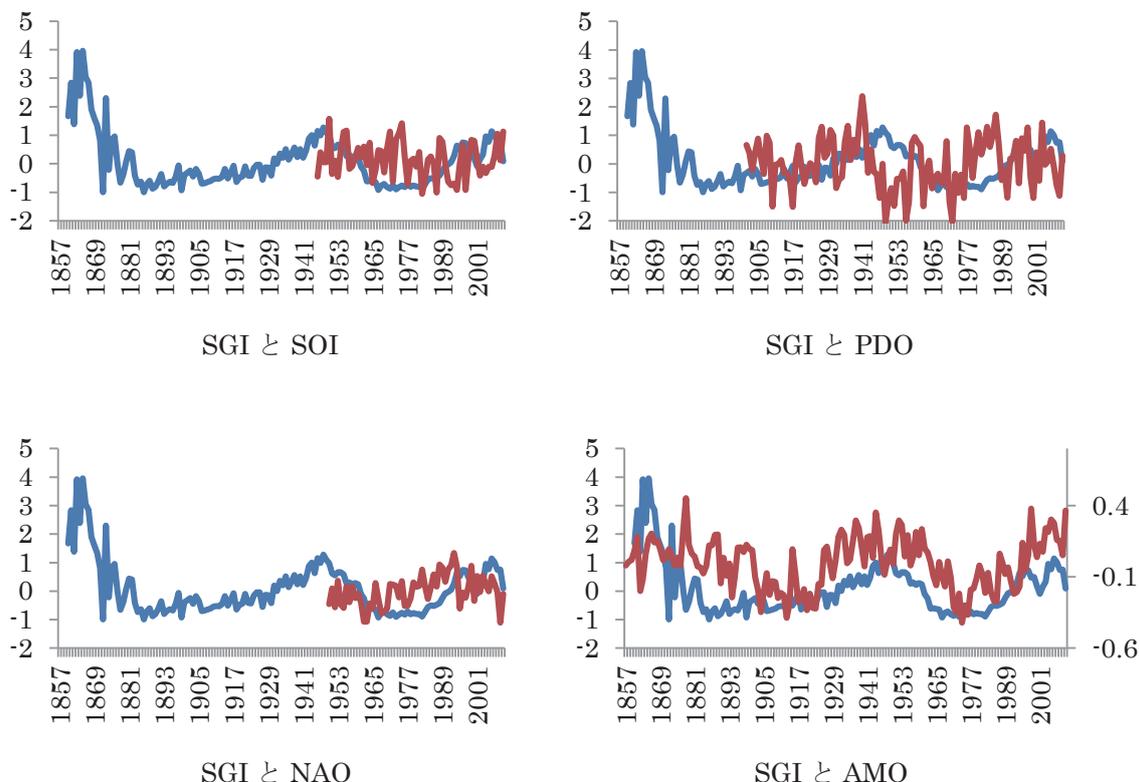


図15 SGIと気候モードの比較

(3) 微量元素とSGI

SGIと平均して年1点に直した微量元素を以下に示す(図16)。NaとMgは正の相関を示しているようであり、SrとBaは逆相関を示しているように見える。

Mg/Ca、Sr/Caはサンゴにおいて、海水温を記録していると言われている。今回測定した結果でも、これらの元素は幼少期において1年に1つのピークを示した。大別川周辺の水温の記録はほとんど存在しないので、過去の釧路の気温と対応させた。その結果、年毎の推移をみると、最高気温や最低気温の記録とピークの振れ幅は一致しない。そのため、カワシンジュガイはこれらの元素に水温を記録していない可能性がある。

そこで、さらに細かく検討するために、Sr/CaとMg/Caとを対比してみた(図16)。両元素のCa比の変動が調和的であれば、共に水温を記録している可能性を支持することになる。比較してみた結果、分解能が比較的高い短命のサンプルの方で、やや調和的な変動が見られるが(図16)、長命のサンプルには相関があるとは言い難い。そのため、仮に高分解能でこれらの元素を測ることができれば、水温を復元できる可能性もある。

この検討は広い年輪間隔を持つカワシンジュガイの試料と水温の記録が存在すれば、行うことができるだろう。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ので、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。

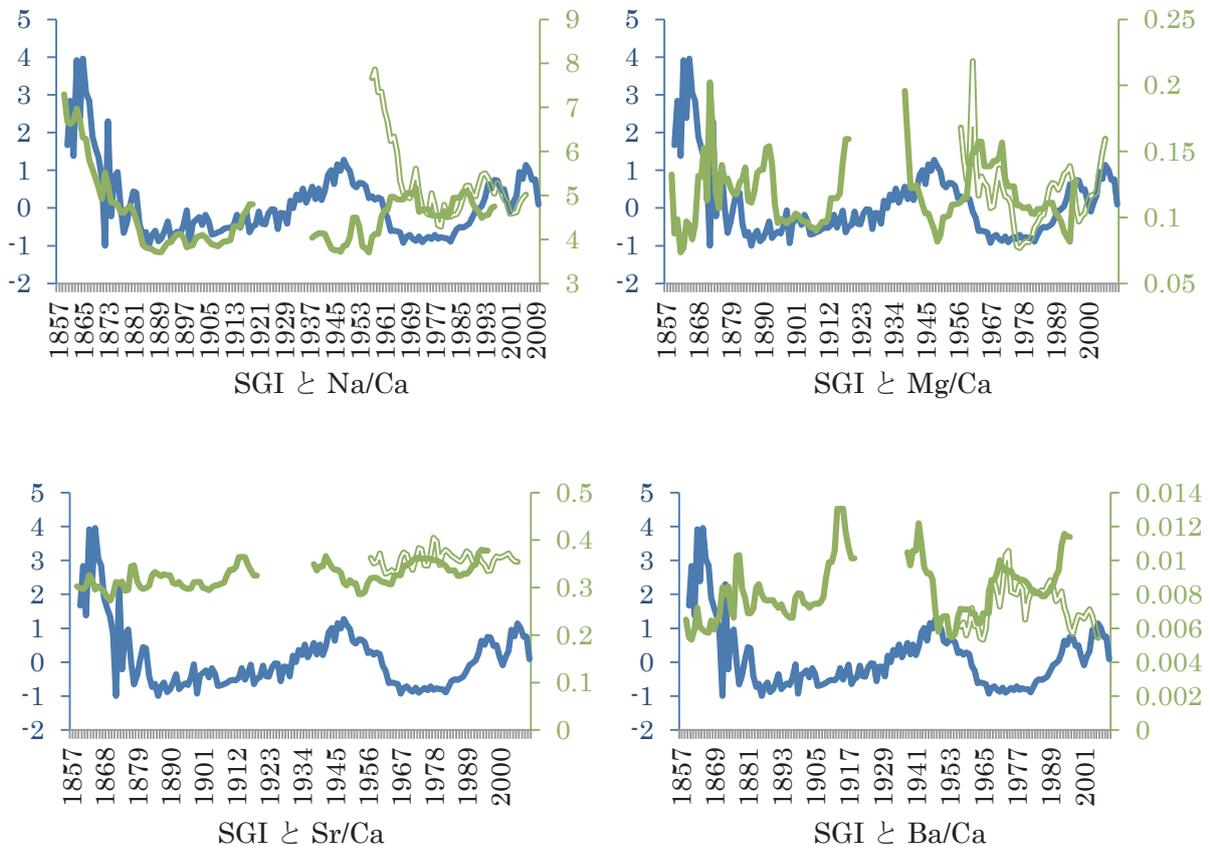


図16 SGI(青線)と2切片(OB02、OB15)の殻の微量元素(緑線)

(4) 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17)。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18)。

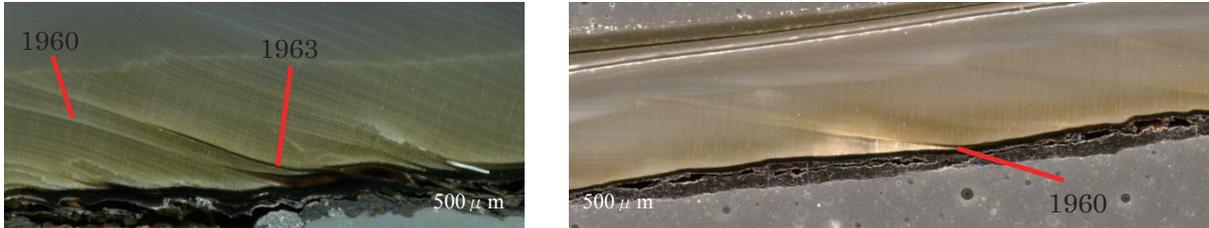


図17 1960年の障害輪

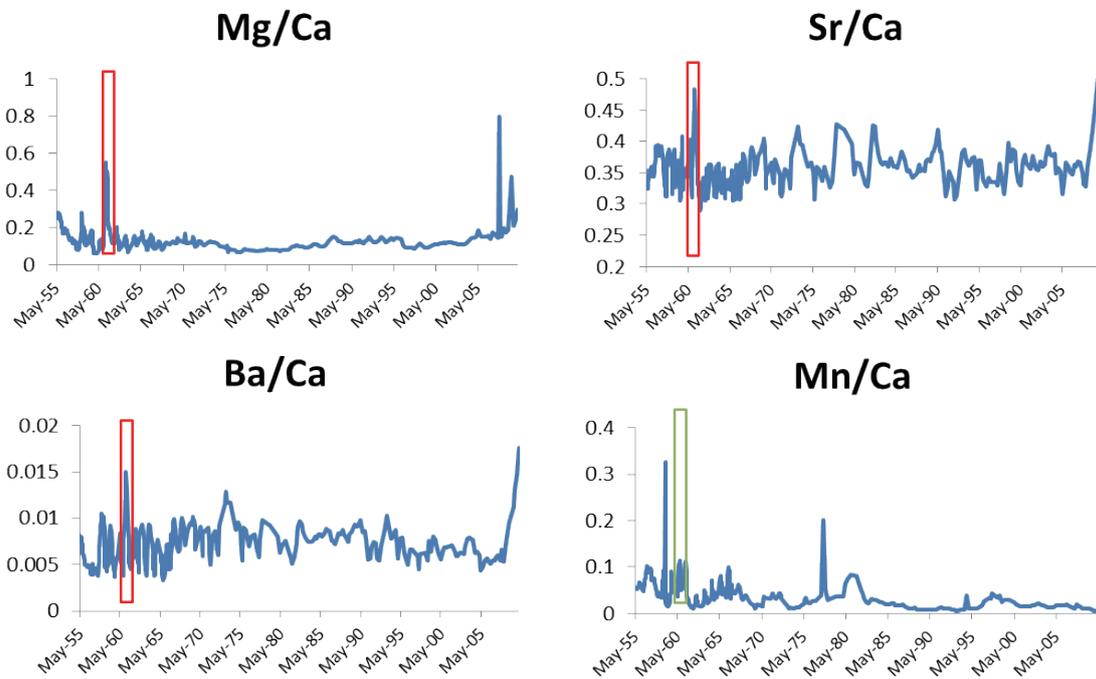


図18 1960年に観測される高いピーク(Mg/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca)とピークが観測されないMn/Ca

1960年にはチリ地震が発生し、それに伴う津波が厚岸で観測されている。また、1952年、2003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。このような事実から障害輪の一部は津波による海水の遡上がカワシンジュガイの大きなストレスとなり、形成されるということを推察した。

そこで、測定した河川水の微量元素濃度と海水の濃度を対比し、カワシンジュガイの殻の組成で1960年のピークが見られた微量元素が海水に多い元素がどうかを調べた。

カルシウム比が高いピークを示したMg, Sr, Baはいずれも河川水より海水中に多い元素であり、反対にピークの観測されなかったMnは河川中に多い元素である。この他にも海水中に多いとされるBやCuなどの元素でも、1960年に異常なピークが見られた。

したがって、一部の障害輪は津波により遡上してきた海水がカワシンジュガイにストレスを与えることによって、作られる可能性が高いということがいえる。

4. まとめ

カワシンジュガイ殻のSGIは特徴的な数十年にわたる長周期の変動を示した。降水量や積雪量の年変動とはあまり良い相関が得られなかった。気温の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見られた。また、長周期を持つ気候変動指数と比較した結果、AMOと比較的調和が見られた。

微量元素濃度においては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。SGIとの相関係数の値はNaとMgで正の、BaとSrでは負の値であった。

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認められた。また、観察された微量元素濃度の1960年のピークの主な元素は、海水中でより濃度の高い元素であり障害輪の一部が津波によって形成された可能性があることが示唆された。

参考文献

- 1) 粟倉輝彦 (1969) カワシンジュガイの年齢組成とサケ科魚類の資源変動との相関性について. 孵化場研究報告 第24号
- 2) 川井唯史,中村太士編 (2013) 北海道水辺の生き物の不思議. 北海道新聞社
- 3) 藤永太郎,[監修宗]林由樹,一色健司編 (2005) 海と湖の化学. 京都大学学術出版会
- 4) 宮地鼓,棚部一成 (2008) 成長縞を用いた二枚貝の成長と環境情報の高時間精度復元. 月刊地球/号外 No.59
- 5) Cook, E.R.& Kairiukstis, L.A. (1990): Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences: 394 pp.,Dordrecht,Netherlands,Kluwer
- 6) David L. Dettman, Aimee K. Reische, Kyger C. Lohmann.(1999): Controls on the stable isotope composition of seasonal growth bands in aragonitic fresh-water bivalves (unionidae)Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 63, No. 7/8, pp. 1049–1057
- 7) Dunca, E., Mutvei, H., 2001. Comparison of microgrowth pattern in Margaritifera margaritifera shells from south and north Sweden. Am. Malacol. Bull.16,239-260.
- 8) Dunca E, Mutvei H, Schone BR (2005) Freshwater bivalves tell of past climates: but how clearly do shells from polluted rivers speak Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol 228:43–57
- 9) Helama, S.,Nielsen, J.K.(2007):Construction of statistically reliable sclerochronology using subfossil shells of river pearl mussel
- 10) Schone, B.R.(2002):A ‘clam-ring’ master-chronology constructed from a short-lived bivalve mollusk from the northern Gulf of California, USA The Holocene 13,1pp.39-49
- 11) Schone, 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). Quatern. Sci. Rev., 23: 1803–1816, 2057, Oxford.
- 12) Schone, B.R., Dunca, E., Fiebig, J., Pfeiffer, M., 2005 Mutvei's solution: An ideal agent for resolving microgrowth structures of biogenic carbonates
- 13) Schone, B.R., Page N.A., Rodland D.L., Fiebig J., Baier S., Helama S.O., Oschmann W. (2006): ENSO-coupled precipitation records (1959-2004) based on shells of freshwater Bivalves mollusks (*Margaritifera falcata*) from British Columbia. Int J earth sci (Geol Rundsch), DOI 10.1007