

動的時間伸縮法によるサンゴ年輪データの時系列変換

Dynamic Time-Warping for time-series conversion of data from coral annual band

阿部 理¹, 浅海竜司², 奥平早香², 森本真紀³

Osamu ABE¹, Ryuji ASAMI², Sayaka OKUHIRA², Maki MORIMOTO³

[キーワード Keyword] サンゴ年輪, Sr/Ca, 動的時間伸縮法

[所属 Institution] ¹名古屋大学大学院環境学研究科 (Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University), ²東北大学大学院理学研究科 (Graduate School of Science, Tohoku University), ³岐阜大学教育学部 (Faculty of Education, Gifu University)

[要 旨 Abstract]

古環境プロキシの一つであるサンゴ年輪の、水温指標であるSr/Caを生息水温と合わせて時系列変換するために、動的時間伸縮法を応用した。高水温の夏季にサンゴ骨格の成長が停止していることを初めて客観的に確認することができた。また、得られた水温とSr/Caの関係式は先行研究例と一致していた。

1. はじめに

過去の環境復元を行う研究において、樹木年輪、氷床コア、海洋堆積物、鍾乳石、サンゴ年輪などの古環境プロキシの開発および応用は基盤データを整備する上で最重要項目である。通常古環境プロキシは堆積物の深度や成長量などの長さ方向の記録であるため、それを適切に時系列に変換する必要がある。樹木年輪や年縞堆積物のような時間軸を正確に決めることができる試料を除き、一般にはプロキシデータの極値と対応する時系列データの極値を合わせることで変換を行うのが一般的である。このピーク合わせの主流は現在でも手動、すなわち研究者の主観に依存する方法が採用されており、現実的ではあるものの、誰がやっても同じ結果になるとは限らないため、作業バイアスが生まれやすい。またピークが多数になる場合は時間浪費でもある。そこでピーク合わせを客観的に行うための方法として、動的時間伸縮法 (DTW) が検討されてきている。DTWは動的計画法の一種で、当初、機械による自動音声認識のために開発された (Sakoe and Chiba, 1971)。音声認識においては、多様な波長・振幅・ゆらぎを持つ人間の音声から共通した言葉を抽出するために、ピークの大きさやピーク間距離に依存せずにピーク合わせを行う必要があった。現在では音声・映像・心拍などの時系列データの解析に広く用いられている。

地球科学分野におけるDTWは、長さ方向のデータ群同士をマッチングするために用いられてきた。Hladil et al. (2010) はハンガリーの下部デボン紀層群におけるガンマ線スペクトルと帯磁率についてDTWを適用した。また、Ajayi et al. (2020) は暁新世-始新世温暖化極大 (PETM) における海洋堆積物中の安定炭素同位体比異常期のマッチングにDTWを適用した。Burstyn et al. (2021) は新たに階層的DTW (HDTW) を開発し、鍾乳石試料へのマッチングに適用した。しかしながら、長さ方向のプロキシデータを比較対象となる時系列データとマッチングさせることで時系列変換を行う研究はいまだ行われていない。

熱帯・亜熱帯に生息する塊状造礁サンゴの炭酸塩骨格は密度の季節変化による年輪を形成する。骨格の成長速度は最大で約20 mm/yに達する試料もあり、高い時間分解能で過去の海洋環境を復元することができる古環境プロキシとして広く用いられている。骨格炭酸塩のSr/CaやMg/Caなどの少量金属元素濃度比は形成時の水温を反映して変化するため、これらの分析により過去の水温変化を復元することが可能である。亜熱帯に位置する琉球列島のサンゴ年輪中のSr/CaとMg/Caも古水温計として利用できることが示されたが (Mitsuguchi et al., 1996)、冬季の水温が造礁サンゴの生育できる下限に近い摂氏20度を下回る年もあることから、成長速度の季節変化の可能性が指摘されてきた (Morimoto et al., 1998)。サンゴ年輪データの時系列変換は通常、手動でピーク位置を合わせた上で、その間のデータを等間隔に配置する。成長速度が季節変化

する場合は、等間隔配置では、時間分解能もまた季節変化する。これはすなわち、夏季よりも冬季が高い時間分解能を持つことを意味する。高緯度で生息した造礁サンゴでは、成長速度が水温同様にほぼ正弦曲線に近い変化を行うと仮定してそれに併せて配置調整した例 (Morimoto et al., 1998) もあるが、その場合、水温の年々変動の影響を除去することはできない。また、冬季の成長がほとんどない場合や、夏季に高水温による白化現象による成長停止が生じる場合は対応できない。サンゴ骨格のSr/Caは多くの研究で水温のみに支配されていることが示されている (Murty et al., 2018)。海域により、海水中のSr/Caが変化する例や、成長速度に影響される可能性、などが指摘されてはいるものの (de Villiers et al., 1994)、後者は水温観測や分析試料の採取方法などの不確かさから、第一義的には堅固な水温指標であるとみなしてよい。

そこで、本研究では、亜熱帯域である琉球列島の石西礁湖で生息した造礁サンゴ骨格年輪のSr/Caを高時間分解能で分析し、生息期間に相当する観測水温とのマッチングにDTWを適用する。それにより、これまで不確かであったピーク間 (春季および秋季) データについて客観的に時系列変換を行うことができる。

2. 試料・解析方法

サンゴ年輪試料は2018年11月11日に琉球列島八重山諸島の石西礁湖において、エアドリルを用いた水中ボーリングによって採取した。北緯24.323度、東経124.021度の水深7.7 m地点で体高4.5 mのハマサンゴ属の上部30 cmについて、最上部から0.25mm間隔で炭酸塩試料の削り出しを行い、総合地球環境学研究所実験施設の誘導結合プラズマ発光分析装置 (iCAP6200, Thermo Fisher Scientific) を用いて行った。本研究ではこのうち15 cm~30 cmの結果についてDTWによる時系列変換を行う。この部分は年輪計数により1995~2007年に相当していることがわかった。

得られたSr/Caの比較対象の海水温データは、採取地点から1.8km東北東に位置する環境省の石西礁湖常時モニタリングシステムの観測ブイによる1時間毎の定点観測値 (北緯24.3297度、東経124.0371度、<http://www.e-monitoring.jp/notice.html>) と1日毎のOISST客観解析水温値を用いた

(<https://www.ncei.noaa.gov/products/optimum-interpolation-sst>)。ブイ観測は2008年8月に開始されており、2007年までのサンゴ年輪のSr/Caと比較するため、2008年から現在までのブイ観測水温とOISST水温の回帰式を作成し、1995~2007年までのOISST水温を補正して用いた。

DTWの計算はRのdtwパッケージを用いて実行した (Giorgino, 2009)。DTWは、2つの時系列が与えられたとき、局所的に伸縮させることで、一方が他方に最も類似するように移動するためのアルゴリズムである (図1)。最も高い類似度を得る方法として、原則として一方向に進む、または止まる、すなわち逆行しない時系列Aと時系列Bの各データ同士の距離の二乗の総和が最小となるように求めている。サンゴ年輪の測定値と観測水温を比較する場合で例えると、年輪測定値と観測水温値をまず同一空間に配置したのち、両者の各点の距離が最小となるように年輪測定値に時間を与えていく方法と言える。計算前に水温・Sr/Ca値ともに平均値と分散がそれぞれ0および1となるように標準化した。Sr/Caについては、水温と負相関であるため、符号を反転した上で標準化を行った。

3. 結果と考察

図2にハマサンゴ骨格年輪のSr/Caおよび対応する生息期間の水温を示す。水温と同様にSr/Caは明瞭な季節変化、すなわち夏季に最低値、冬季に最高値を示している。150.0 mm、182.5 mm、194.75 mmのデータについては、誤差範囲を超えて極端に低下していたため、解析から除外した。毎日の水温観測値と0.25 mmごとのSr/Caのデータ数をそろえるため、1995/1996年および2007/2008年の冬季の水温最低値を記録した日付と、それぞれに対応する313.5 mmと156 mmのSr/Caから、全期間の成長速度を求めたところ約14 mm/年となった。これは0.25 mm間隔の試料が6.5日 (約1週間) の時間分解能を持つことを意味する。そこで、水温観測値を1週間平均に換算して、DTWによるマッチングを行った。

図3にDTWによるマッチング結果を示す。各グラフ内の上部の赤破線は海水温、下部の黒実線はSr/Caを示し、灰色の破線は対応関係を意味する。上部の約2年分についての拡大図を下に示しており、データの細かいピークごとに対応していることがわかる。この結果に基づき、サンゴ年輪のSr/Caを時系列変換した結果

を図4に示す。1995～2008年の観測期間中の夏季において最も高水温を示した上位3年、1996、1998、2007年
年に関して、Sr/Caが対応する水温帯で横ばいになっており、サンゴ骨格の成長が停止していたことを意味
する。1998年は石西礁湖の広範囲で白化現象による造礁サンゴの死滅が観測されており（環境省石西礁湖自
然再生協議会）本研究で採取したハマサンゴについても死滅はしていないものの白化した結果と一致する。
一方、冬季に最も低水温を観測した2001年についても成長の停止が見られるが、同程度の水温を観測した
1996年や2003年については認められない。観測期間中に20度を下回ることがなかったこともあり、石西礁湖
においては必ずしも冬季に成長が停止するとは言えないことがわかる。

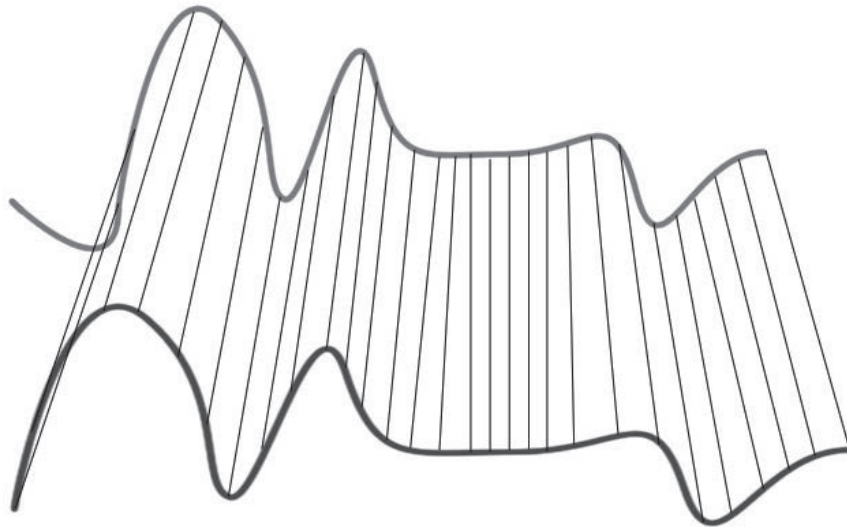
Sr/Caと海水温の相関を図5に示す。Sr/Ca-海水温の線形回帰式の傾き-0.051は、Murty et al. (2018)がまとめ
た28の先行研究結果の平均値-0.059と誤差範囲内で一致していた。

4. まとめ

古環境プロキシの一つであるサンゴ年輪の、水温指標のSr/Caを生息水温と合わせて時系列変換するた
めに、動的時間伸縮法を応用した。高水温の夏季にサンゴ骨格の成長が停止していることを初めて客観的に確
認することができた。また、得られた水温とSr/Caの関係式は先行研究例と一致していた。

5. 引用文献

- Ajayi, S., Kump, L. R., Ridgwell, A., Kirtland Turner, S., Hay, C. C., Bralower, T. J. (2020) Evaluation of
Paleocene-Eocene thermal maximum carbon isotope record completeness— An illustration of the
potential of dynamic time warping in aligning paleo-proxy records. *Geochem., Geophys., Geosys.*, 21,
e2019GC008620. <https://doi.org/10.1029/2019GC008620>.
- Burstyn, Y., Gazit, A., Dvir, O. (2021) Hierarchical Dynamic Time Warping methodology for aggregating
multiple geological time series. *Comp. Geosci.*, 150, 104704.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104704>.
- de Villiers, S., Shen, G. T., Nelson, B. K. (1994) The Sr/Ca-temperature relationship in coralline aragonite:
Influence of variability in (Sr/Ca) seawater and skeletal growth parameters. *Geochim. Cosmochim. Acta*,
58, 197–208.
- Giorgino, T. (2009) Computing and Visualizing Dynamic Time Warping Alignments in R: The dtw
Package. *J. Stat. Soft.*, 31, 1–24. <https://doi.org/10.18637/jss.v031.i07>.
- Hladil, J., Vondra, M., Cejchan, P., Vich, R., Koptikova, L., Slavik, L. (2010) The dynamic Time-warping
approach to comparison of magnetic-susceptibility logs and application to lower Devonian
calciturbidites (Prague synform, Bohemian massif). *Geologica Belgica*, 13, 385-406.
- Mitsuguchi, T., Matsumoto, E., Abe, O., Uchida, T., Isdale, P. J. (1996) Mg/Ca Thermometry in Coral
Skeletons. *Science*, 274, 961-963.
- Morimoto, M., Kayanne, H., Yonekura, N., Abe, O., Matsumoto E. (1998) Effect of Seasonal Difference in
Growth Rate of Coral Skeletons on Oxygen Isotope Records. *Proceedings of Third International Marine
Science Symposium*, 30-35.
- Murty, S. A., Bernstein, W. N., Ossolinski, J. E., Davis, R. S., Goodkin, N. F., & Huguen, K. A. (2018)
Spatial and temporal robustness of Sr/Ca-SST calibrations in Red Sea corals: Evidence for influence of
mean annual temperature on calibration slopes. *Paleoceanogr. and Paleoclimat.*, 33, 443–456. <https://doi.org/10.1029/2017PA003276>.
- Sakoe, H., Chiba, S. (1971) A Dynamic Programming Approach to Continuous Speech Recognition. In:
Proceedings of the Seventh International Congress on Acoustics, 3, 65–69. Akadémiai Kiadó, Budapest.



Dynamic Time Warping Matching

図1. 動的時間伸縮法 (DTW) の概念図。

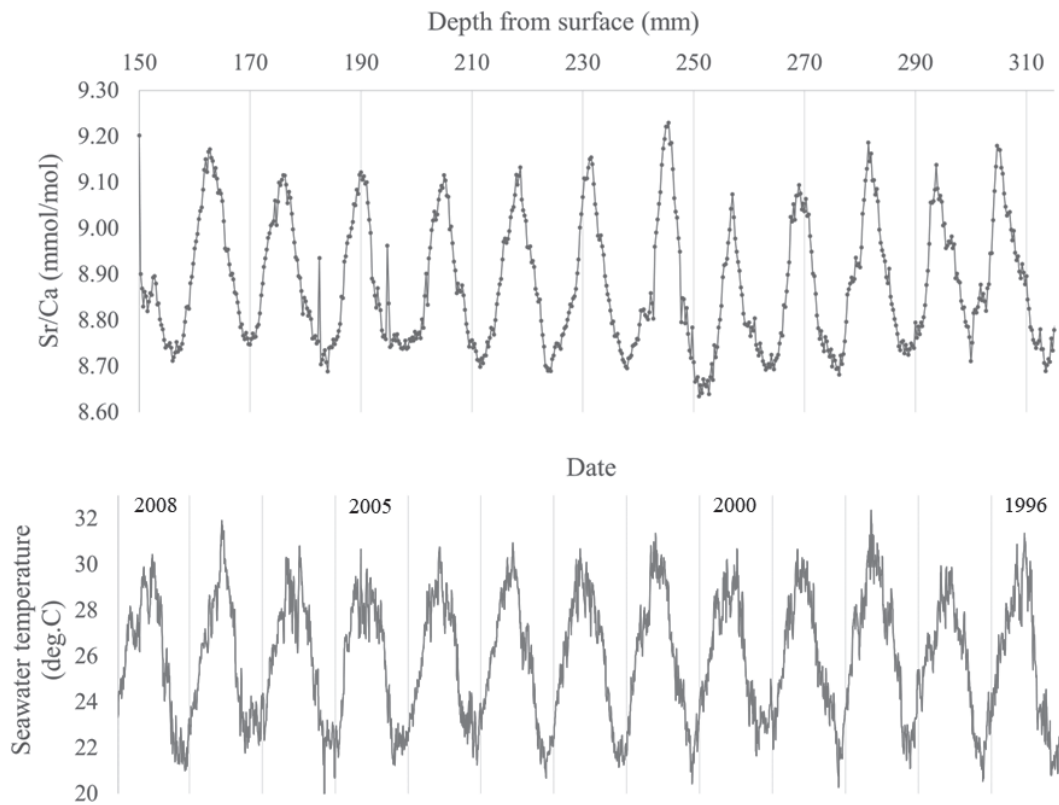


図2. (上) 石西礁湖現生ハマサングのSr/Ca測定結果。最上部から150~315 mm部分について0.25 mmごとに測定を行った。(下) 石西礁湖の毎時水温。OISSTから現場水温に換算する方法は本文を参照のこと。

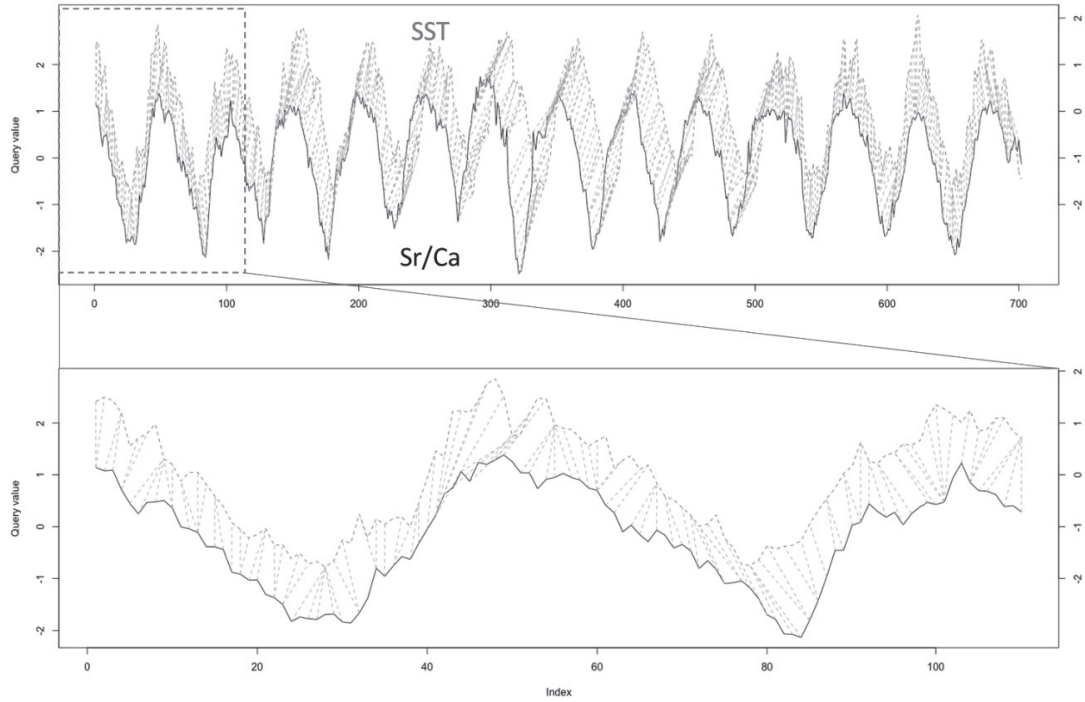


図3. (上) 観測水温（赤破線）およびSr/Ca（黒実線）の全期間のDTWマッチング結果。(下) 最上部約2年間のマッチング結果。各水温データと灰色破線により結ばれたSr/Caの点から、サンゴ年輪に日付を入れることができる。

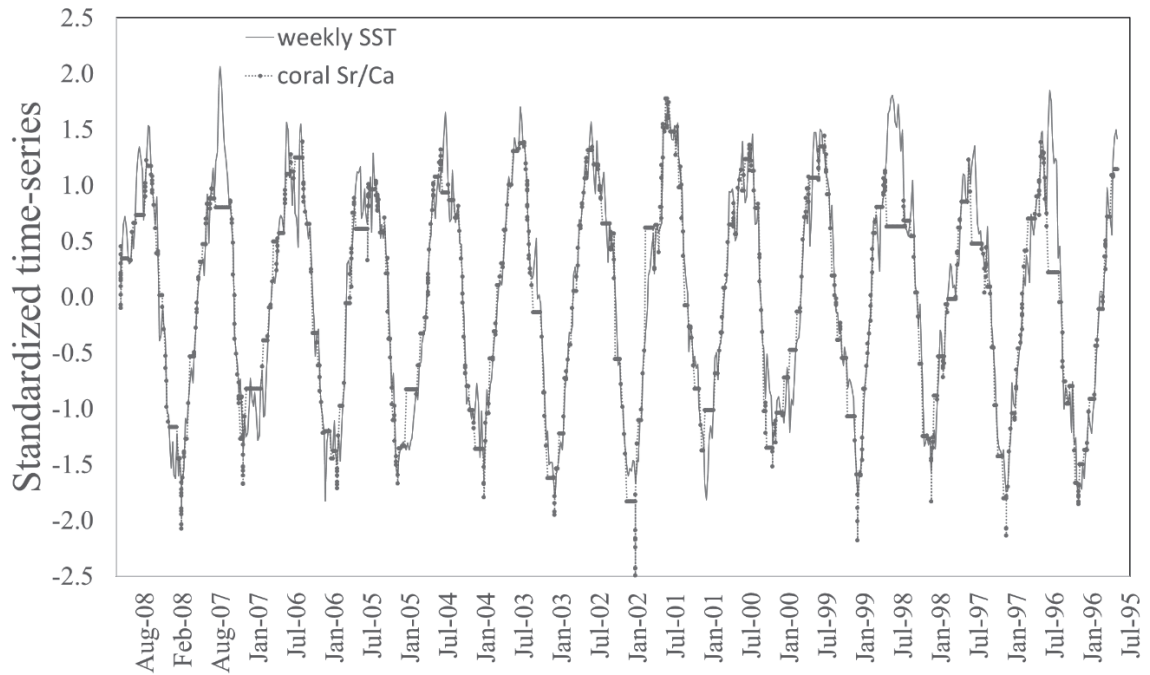


図4. DTWマッチングにより時系列変換されたSr/Ca（青）。赤は週平均の現場水温を示す。いずれのデータも平均0、分散1となるように標準化しており、Sr/Caについては符号反転している。

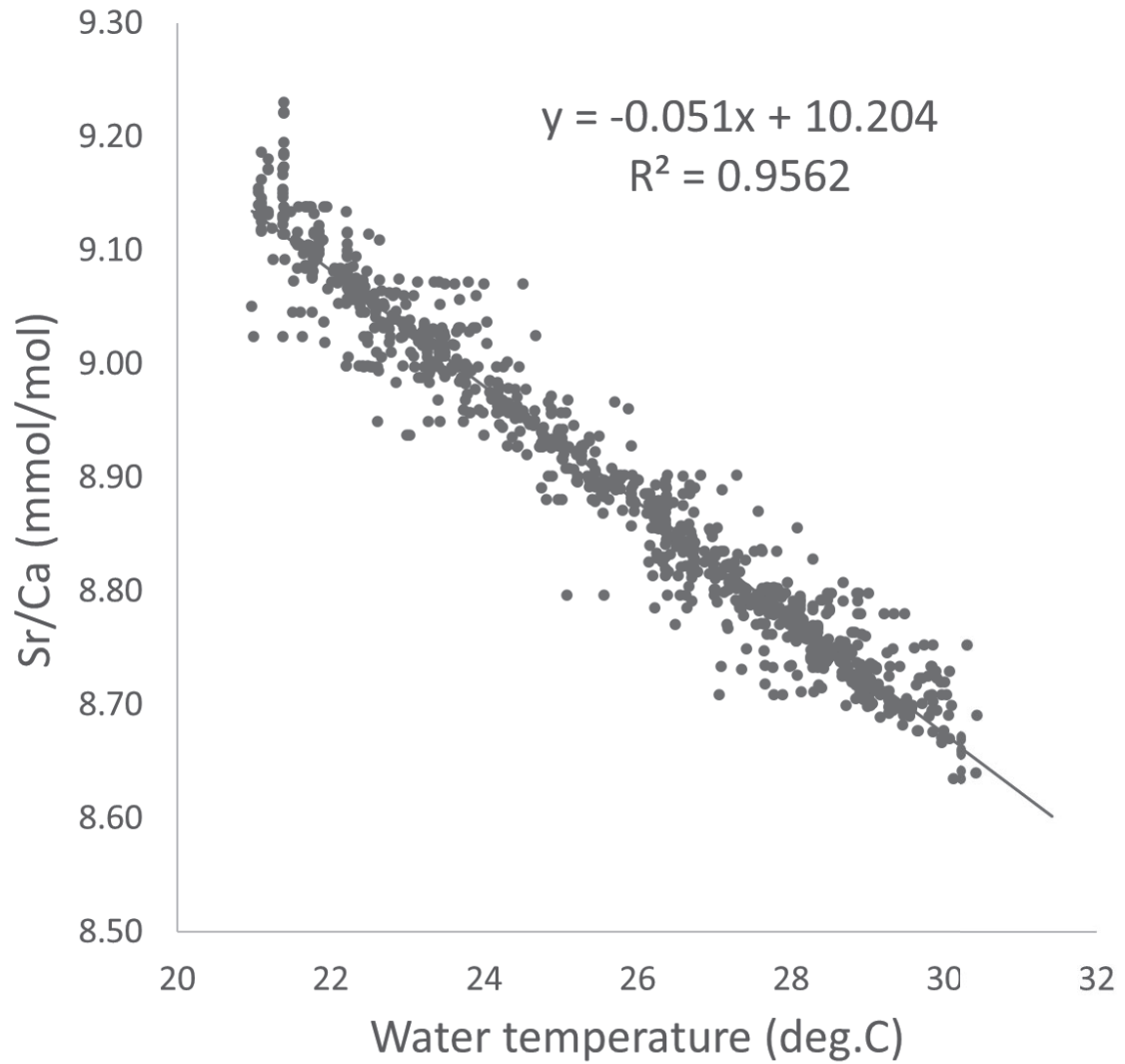


図5. 図4の結果から、成長停止期間（図4で青破線が水平方向の部分）を除いたSr/Caと水温のクロスプロット。