

アオサノリの生育と 河川水の成分との関係について

徳島県立城南高等学校 応用数理科 3 年

池原菜桜 児玉祐愛 田木遙

目次

1. 研究概要.....	3
2. 動機・目的.....	3
3. アオサノリについて.....	3
4. 実験1 河川水による成長の違いの観察	4
5. 実験2 培養河川水に含まれる元素の違いによる仮根形成についての検証.....	8
6. 実験3 濃度差を大きくした培養実験.....	12
7. 今後の展望.....	14
8. 参考文献.....	14
9. 謝辞.....	14

1. 研究概要

本研究は、アオサノリの陸上養殖を徳島県で展開する場合、どの河川水が適しているかを調べるとともに、河川水の成分元素とアオサノリの生育との関係を明らかにすることを目的とした。実験 1 では、吉野川、勝浦川、今切川、神田瀬川の 4 つの河川水でアオサノリを培養した。その結果、吉野川の河川水で培養した個体が最も大きく成長し(27 日後で約 1.9 倍)、成分分析から吉野川は栄養塩と必須微量元素(Mn、Fe、Co)の濃度が高かったことが判明した。また、勝浦川では、アンモニウム態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)が高濃度であったことから、アンモニウム阻害により成長が抑えられた可能性が示唆された。

神田瀬川で多く仮根が見られたことから、実験 2 および 3 では、吉野川と神田瀬川で濃度に差があった V、Mn、Rb、Sr、Ni の 5 元素がアオサノリの仮根形成に与える影響を検証した。その結果、Ni を加えた培養で仮根形成割合が最も高くなり(90.9%)、Ni が仮根形成を促進する作用を持つ可能性が強く示唆された。また、この現象は、Ni が通常成長を抑制し、結果として仮根形成を促進する Ni 阻害という現象による可能性が示唆された。今後の展望として、Ni による仮根形成促進作用の時期などを検証し、河川養殖で網への付着を容易にするための活用や、仮根形成を抑制する元素を特定して陸上養殖への応用を目指していきたい。

2. 動機・目的

近年、アオサノリの養殖が衰退している。アオサノリの養殖は河川で網にアオサノリの遊走子を付け、培養する方法で行う。過去、徳島県でも吉野川の汽水域で盛んに養殖されていた。しかし、環境変化に敏感である藻類であることから、1988 年前後を境に、養殖は衰退し、現在は全く養殖されていない。全国的にも加速度的に生産量は減少しており、1970 年代は 1400t 以上生産されていたが、2000 年には 1117t、さらに 2020 年には 411t まで減少しており、この 20 年で約 3 分の 1 にまで減少している(図 1)。

その要因としては温暖化やそれに伴う環境変化が関係していると考えられおり、2050 年には生産でき

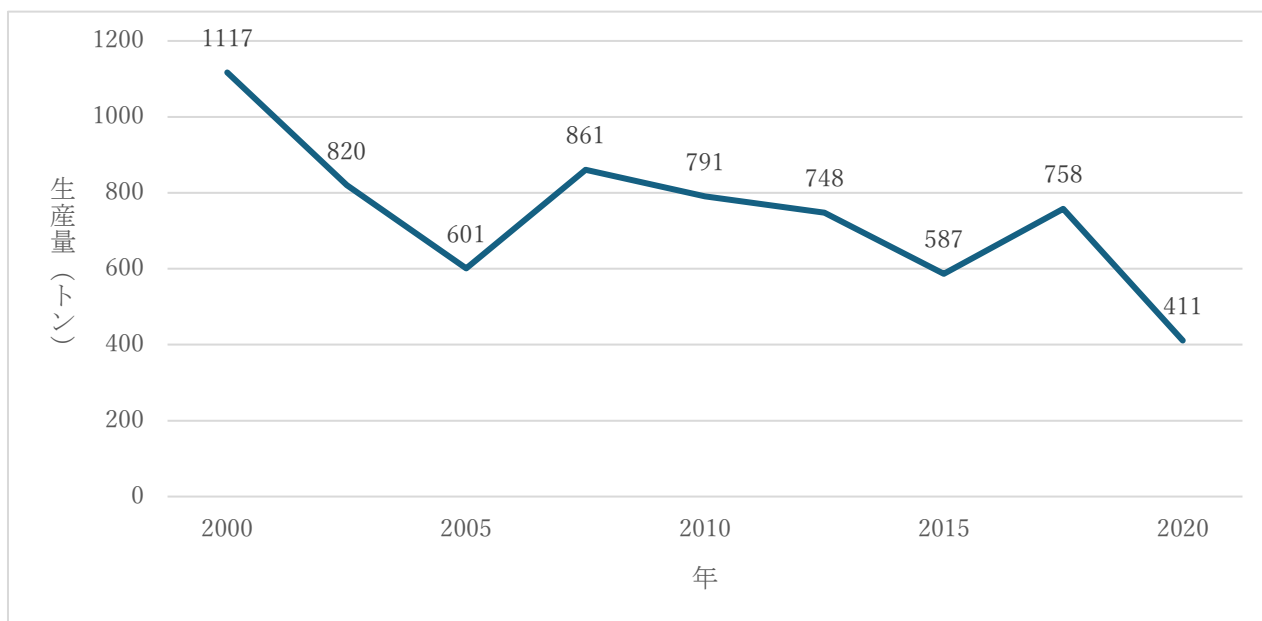


図 1 全国アオサノリ生産量の推移(食品会社調査資料より)

なくなるとの試算もでていた。そのため、温度管理が可能な陸上養殖の取り組みを進めていたが、陸上養殖は出来なかった。要因としてはアオサノリが大きく生育するためには、海洋土壤中に生育するバクテリアが必要であるためであった。2014 年に徳島文理大学 山本博文教授が海洋バクテリアの出す物質でアオサノリの成長因子であるサルーシンの人工合成に成功し、2018 年にサルーシンを利用した陸上養殖に成功した。現在、愛媛県や三重県で陸上養殖のプラントが作られている。私たちはこの現状を知り、徳島県でアオサノリの陸上養殖を行うなら、どの河川水を使うのが良いのか調べると共に、そこに含まれる成分元素とアオサノリの生育との関係を調べることで、アオサノリの養殖の発展に活かしたいと考え研究を行った。

3. アオサノリについて

アオサノリは「一重草（ヒトエグサ）」と呼ばれ、その名の通り一枚の薄い葉状の体を持つ。ヒトエグサはヒトエグサ科ヒトエグサ属に分類される海藻である。主に太平洋沿岸や九州、沖縄などの温暖な海域に生育し、特に三重県が国内生産の中心地として知られている。また、生活史としては、雄性配偶子と雌性配偶子が受精し、接合子となり、接合子からできる遊走子が岩等（河川養殖では網）に付着し、光合成を行う葉状体が成長することで個体が成長する（図2）。

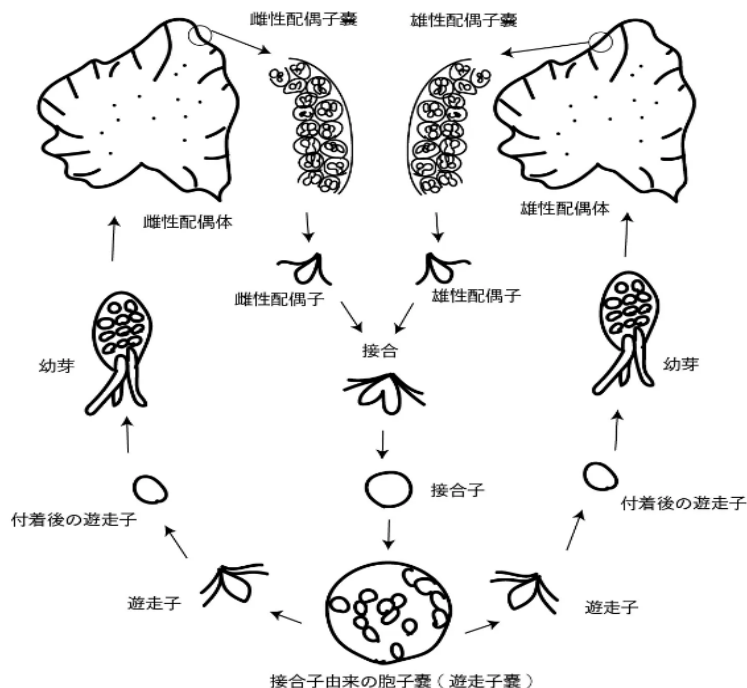


図2 アオサノリ（ヒトエグサ）の生活史

4. 実験1 河川水による成長の違いの観察

徳島県内のどの河川水がアオサノリの生育に適しているのかを調べた。生育調査は徳島市から近い河川で全長や支流の異なる吉野川、勝浦川、今切川、神田瀬川の4つの河川水で行った。

【調査河川水設定の理由】

培養の河川水を選定には、河川の全長と支流の数を用了。一級河川である吉野川は全長が194Kmと長く、支流の数も124本と多い。また勝浦川はそれに続き、全長49.6km 支流の数45本とやや多い。それに対し、今切川は全長11.6km 支流の数4本、神田瀬川は全長3.2km 支流の数5本と少ない。全長が長く、支流が多い河川として吉野川と勝浦川を全長が短く、支流が少ない河川として、今切川と神田瀬川を選んだ。

	吉野川	勝浦川	今切川	神田瀬川
全長(km)	194	49.6	11.6	3.2
支流の数(本)	124	45	4	5

表1 各河川の全長と支流の数

仮説 1

全長が長く、支流が多い河川である吉野川や勝浦川の河川水で大きく成長し、全長が短く、支流が少ない河川である今切川と神田瀬川の河川水ではあまり成長しない。

実験操作 1

1 4つの河川の河口から河川水を18Lポリタンク採集する。採集は同日に2時間程度で行った。採取はバケツにロープを付け、河川水を採取し、ロートでポリタンクに集めた(図3)。



図3 河川水採取の様子

2 採集した4つの河川水を125℃25分間オートクレーブで滅菌した。滅菌した河川水を50mLビーカーに50mLずつ入れ、そこに徳島文理大学からいただいた約5mmの大きさであるアオサノリの幼体をピンセットで1個体入れた。1つの河川水に対し4つのビーカー、計16個のビーカーを用意し培養した(図4)。



図4 培養の様子



図5 ビーカーで培養中のアオサノリ

3 アオサノリの幼体を入れたビーカーは気温 20℃前後の窓辺(10000lux 明暗周期は一日のサイクルに従う)に置き、水替えを1週間に1回行いながら、5月23日から6月19日まで28日間培養した。光りの当たり具合が均一になるよう、毎日ビーカーの位置を入れ替えた。

4 2日もしくは3日おきにアオサノリの大きさを測定した。測定方法は、アオサノリをピンセットで取り出し、1mmごとに目印がついたプラスチック板の上に乗せ、写真を撮影し、面積を測定した(図6)。写真を撮影した後は、傷つけないようにビーカーに戻し、培養を続けた。

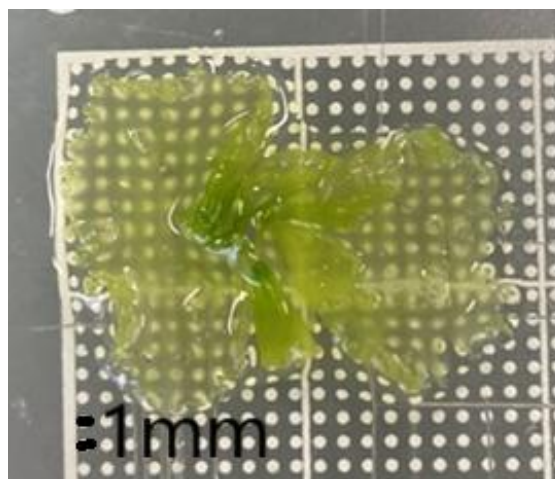


図6 計測の様子

5 各河川水をICP-MS(誘導結合プラズマ質量分析法)を用い、成分元素とその濃度を計測した。

結果

【各河川水での培養】

吉野川の河川水で培養したアオサノリは、培養6日後から他の河川より大きく成長し、6日後は他の河川に比べ1.78倍、15日後は2.3倍、27日後は1.9倍ほど大きく成長した（図7）。

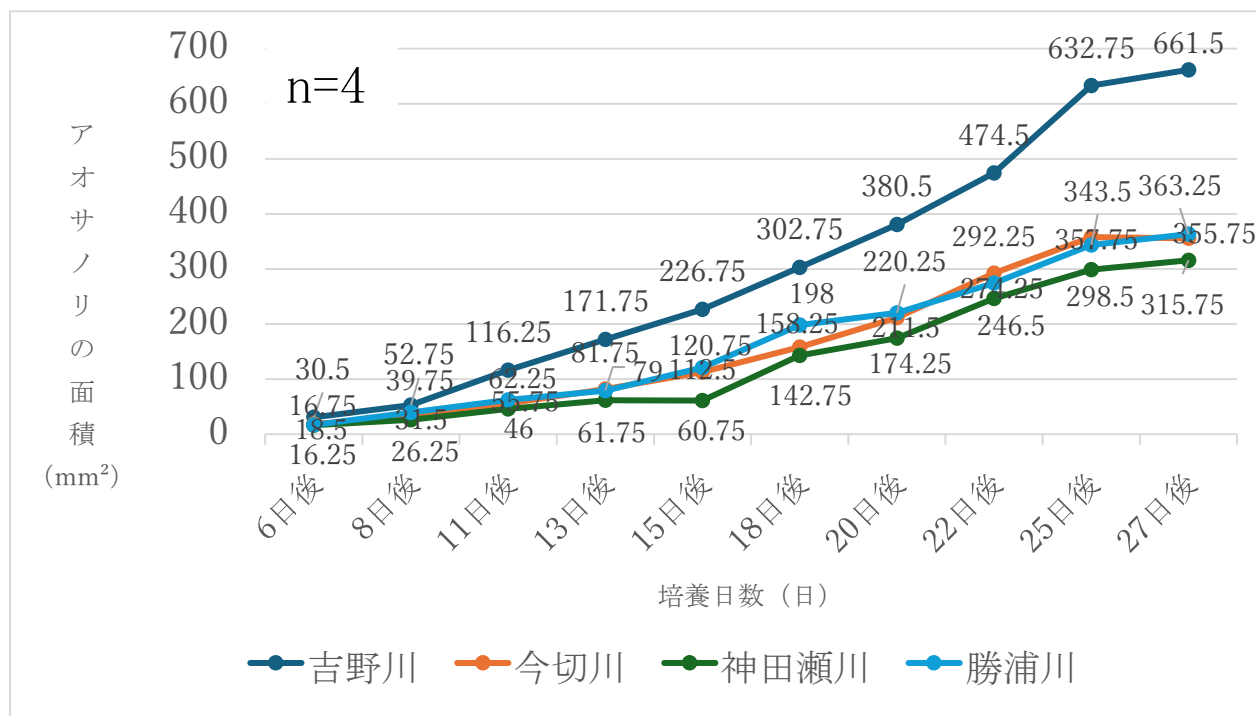


図7 アオサノリ成長の推移（4個体の平均）（5月23日～6月19日）

観察している中で同じ河川水で培養している4個体間での差が見られたため、29日間培養した各個体の面積を散布図として示した（図8）。特に吉野川では個体差が大きい、小さい個体でも、神田瀬川や勝浦川で培養した最も大きい個体と同じ程度の大きさとなっており、差が見られる。独立2群における片側t検定では、吉野川と今切川、吉野川と神田瀬川で有意な差が見られた。吉野川と今切川では、有意な差が見られなかったが、p値が0.05に近い値であった。

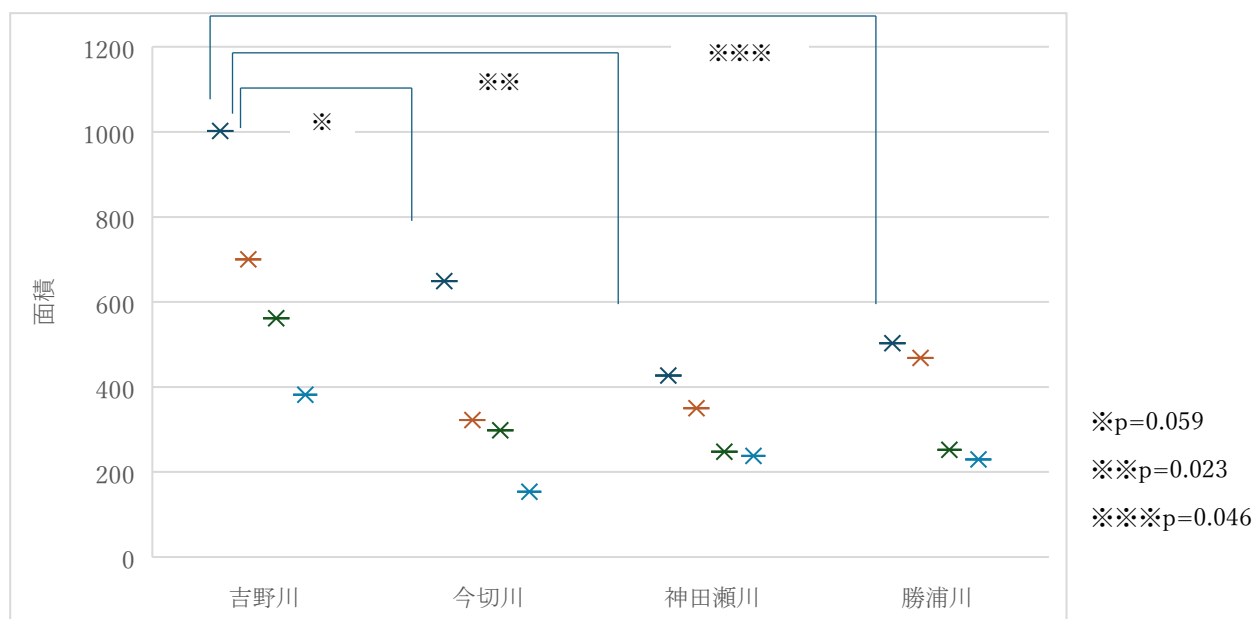


図8 各河川水で29日間培養した時の4個体それぞれの面積

【成分分析の結果】

ICP-MS を用いて各河川水に含まれる塩類濃度並びに栄養塩、成分元素の濃度を測定した。栄養塩及びアオサノリにおける特に重要な必須微量元素の濃度を表2に示す。塩類濃度は吉野川と勝浦川で1.2%と高く、今切川0.7%、神田瀬川0.3%で低かった。NO₃-N（硝酸態窒素）の濃度は吉野川と勝浦川で、やや高く、神田瀬川、今切川で、値が低かった。NH₄-N（アンモニウム態窒素）は勝浦川で高く（7.062ppm）、次いで吉野川（3.721ppm）で高く、神田瀬川（1.702ppm）、今切川（1.79ppm）は値が低かった。NO₃-N と NH₄-N を合わせた栄養塩の濃度は、吉野川と勝浦川で高く、神田瀬川と今切川では低かった。また、アオサノリの生育に特に重要とされる必須微量元素である Mn、Fe、Co の値が吉野川では、他の川より高かった（表2）。

	塩類濃度	栄養塩			Mn(ppb)	Fe(ppb)	Co(ppb)
		NO3-N (ppm)	NH4-N (ppm)	PO4-P			
1 吉野川	1.2%	0.256	3.722	検出限界未満	1.094	0.808	0.071
2 今切川	0.7%	0.066	1.790	検出限界未満	0.467	0.480	0.028
3 神田瀬川	0.3%	検出限界未満	1.702	検出限界未満	0.410	0.789	0.014
4 勝浦川	1.2%	0.198	7.062	検出限界未満	0.590	0.474	0.021

表2 ICP-MS を用いて分析した各河川水の栄養塩並びにアオサノリに特に重要とされる必須微量元素の濃度

考察1

29日間、各河川水で培養した結果、吉野川の河川水での成長が他の河川水と比べ2倍ほど高かった。

神田瀬川や今切川の河川水は、栄養塩である NH₄-N や NO₃-N の濃度が低く、必須微量元素の値も低かったため、吉野川に比べ成長しなかったと考えられる。

また仮説に反し、勝浦川でも吉野川に比べ十分成長しなかった。この理由は2つあると考える。1つ目は、吉野川に比べ、アオサノリに特に重要な必須微量元素が少なかったことである。アオサノリに特に重

要な必須微量元素である Mn、Fe、Co すべてにおいて吉野川より勝浦川の濃度が低かった。2 つ目は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度が勝浦川で高かったためである。通常、海藻の生育においては、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が $\text{NO}_3\text{-N}$ よりも優先的に吸収され成長が促進されるが、アオサノリではそうではなく $\text{NO}_3\text{-N}$ が優先的に吸収され利用される。そのことから、勝浦川の河川水に含まれる $\text{NH}_4\text{-N}$ はアオサノリに対して成長促進効果が起こらず、さらに $\text{NH}_4\text{-N}$ によるアンモニウム阻害が起きたことが示唆される。アンモニウム阻害とは、植物や海藻において過剰な $\text{NH}_4\text{-N}$ により、成長が阻害されたり、光合成活性が阻害されたりする現象である。勝浦川の河川水の培養においては、アンモニウム阻害が起き、成長が十分に起きなかったと考えられる。

5. 実験 2 培養河川水に含まれる元素の違いによる仮根形成についての検証

私たちはアオサノリを観察するうちに個体ごとに形態差があることに気づいた。吉野川以外の 3 つの河川、特に神田瀬川の河川水で培養した個体には細胞が密集した部分が多くあると感じた（図 9）。それは「仮根」という岩などに付着するための部分ができていると知り、仮根の形成は河川水に含まれる元素の差によって起こるのではないかと考えた。

アオサノリは遊走子状態から細胞分裂を続けていく際に、仮根になる細胞と葉状体になる細胞に分かれる。仮根は、陸上養殖の場合は、水槽で水をかき混ぜながら養殖するため、仮根は少ないほうが良いとされている。逆に、陸上で熱に強いアオサノリの遊走子を網に付

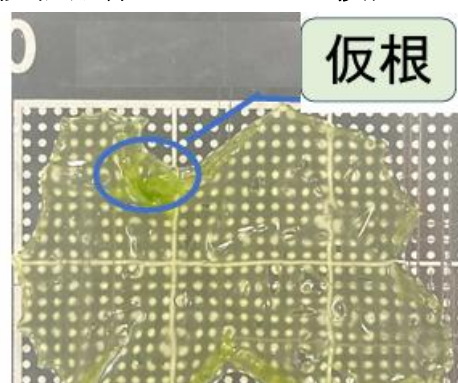


図 9 神田瀬川の河川水で培養した時に見られた仮根

行うためには、仮根の形成を促すことで、網に付けやすくすることができる。仮根の形成を元素により調整することができれば、今後のアオサノリの養殖の一助になると考え、河川水に含まれる元素と仮根の形成について調べることにした。

【検証元素設定の理由】

ICP-MS で解析した 28 種類の元素の濃度について、吉野川と神田瀬川で濃度に大きく差がある元素を必須微量元素中心について調べた結果、V、Mn、Rb、Sr、Ni に大きく差があることが分かった。V、Mn、Rb、Sr では、神田瀬川の濃度より吉野川の濃度が高く、Ni では低かった（表 3）。そのため V、Mn、Rb、Sr、Ni の 5 つの元素と仮根形成についての検証を行った。

(ppb)	V	Mn	Rb	Sr	Ni
吉野川	1.13	1.09	70.07	4984	0.32
勝浦川	1.05	0.59	47.00	3875	4.92
神田瀬川	0.35	0.41	11.79	798	5.06
今切川	0.84	0.47	29.09	2206	3.39

表 3 吉野川と神田瀬川で値が異なる元素 5 つの各河川における濃度
(V、Mn、Rb、Sr は必須微量元素である)

仮説 2

V、Mn、Rb、Sr、Ni の濃度によりアオサノリの仮根形成割合が変化する。

準備物 2

遊走子状態のアオサノリ、神田瀬川の河川水、バナジウムオキシアセチルアセトナート ($(\text{CH}_3\text{COCHCOCH}_3)_2\text{VO}$)、硫酸マンガン水溶液 MnSO_4 、炭酸ルビジウム水溶液 Rb_2CO_3 、炭酸ストロンチウム SrCO_3 、硫酸ニッケル(II) NiSO_4 、顕微鏡

実験操作 2

V、Mn、Rb、Sr、Ni それぞれの元素を加えた河川水を作成し、実験 1 と同様にアオサノリを培養した。元素の影響が出やすいように、アオサノリは遊走子状態のものを用いた。V、Mn、Rb、Sr は、各元素濃度が低かった神田瀬川の河川水に加えることで、①吉野川の半分、②吉野川と同じ、③吉野川の 1.5 倍、④吉野川 2 倍程度の濃度となるよう設定した。また、Ni に関しては、吉野川の河川水が最も低かったため、吉野川の河川水に Ni を加え①神田瀬川の半分、②神田瀬川と同じ、③神田瀬川の 1.5 倍、④神田瀬川の 2 倍程度の濃度となるよう設定した。

1 V 濃度が 0.7ppm、Mn 濃度が 0.6ppm、Rb 濃度が 30ppm、Sr 濃度が 2000ppm、Ni 濃度が 2.5ppm となるように、バナジウムオキシアセチルアセトナート、硫酸マンガン、炭酸ルビジウム、炭酸ストロンチウム、硫酸ニッケル(II) の水溶液を作成した。

(ppb)	V	Mn	Rb	Sr	Ni
元の濃度	0.35	0.4	11.8	798	0.3
①	1.05	1.0	41.8	2798	2.8
②	1.75	1.6	71.8	4798	5.3
③	2.45	2.2	101.8	6798	7.8
④	3.15	2.8	131.8	8798	10.3

2 V、Mn、Rb、Sr の溶液を 0.1mL、0.2mL、0.3mL、0.4mL をそれぞれ神田瀬川の河川水 100mL に

表 4 作成した溶液の元素の濃度

加えることで、溶液が 1000 倍希釈されることで、各元素の濃度が表 4 になるようにした。また、Ni に関しては、吉野川の河川水 100mL に加えることで、表 4 の濃度になるよう設定した。

3 元素を加えた河川水 100mL にアオサノリの遊走子が含まれる溶液 0.1mL 入れ、54 日間培養した。なお、対照実験として元素を入れない神田瀬川でも培養した。

4 培養後、顕微鏡を用いて形態変化が起きているか観察した。

結果 2

それぞれの濃度や元素で観察できた個体数に差があったが、濃度における差が見られなかった (図 10)。それぞれの元素における濃度差での分散分析 (ANOVA) を行った結果、V ($n=42$, $F=1.1$, $P=0.35$)、Mn ($n=36$, $F=0.7$, $P=0.58$)、Rb ($n=36$, $F=0.9$, $P=0.46$)、Sr ($n=15$, $F=0.5$, $P=0.6$)、Ni ($n=18$, $F=0.6$, $P=0.61$) であり、有意な差は見られなかった。

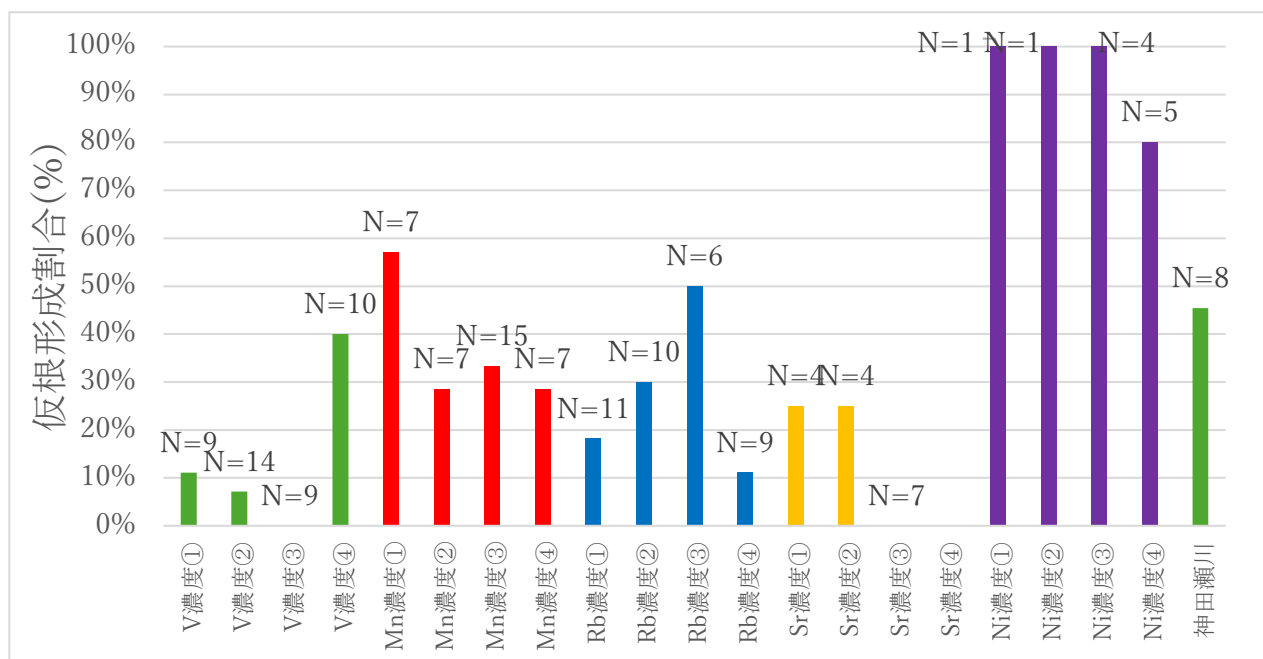


図 10 元素濃度における仮根形成割合（仮根が見られた個体/全個体×100）

しかし、元素間での変化が見られたので、濃度差を考慮せず、元素間での違いを見た。それぞれの元素についてすべての個体をまとめると、Ni における仮根形成割合は 90.9%と神田瀬川の 50.0%より高く、V や Sr では低い値となった（図 11）。

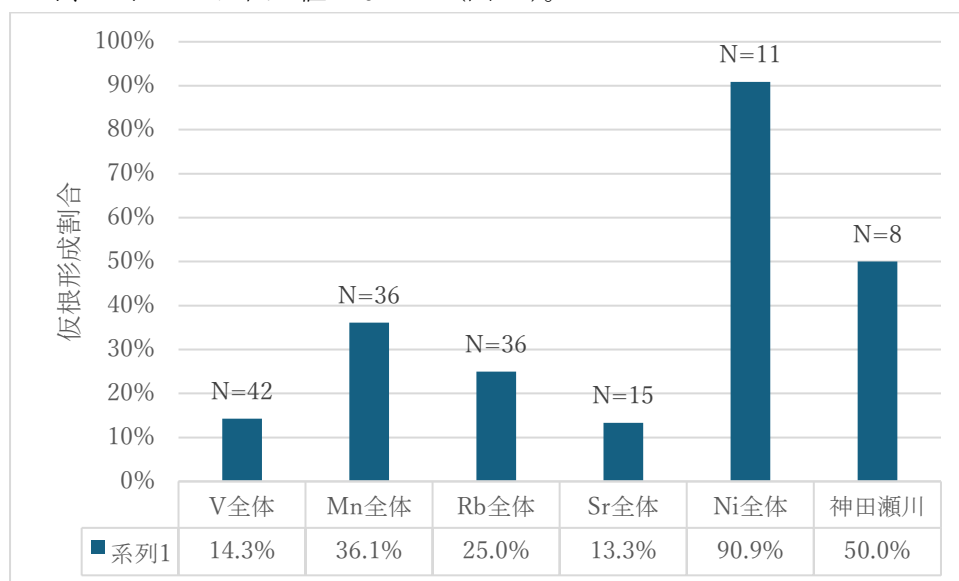


図 11 元素における仮根形成割合（仮根が見られた個体/全個体×100）

また、仮根が見られた個体の中での平均仮根本数を見た。仮根形成率と同様に、Ni で多く、V や Sr で低い値となった（図 12）。

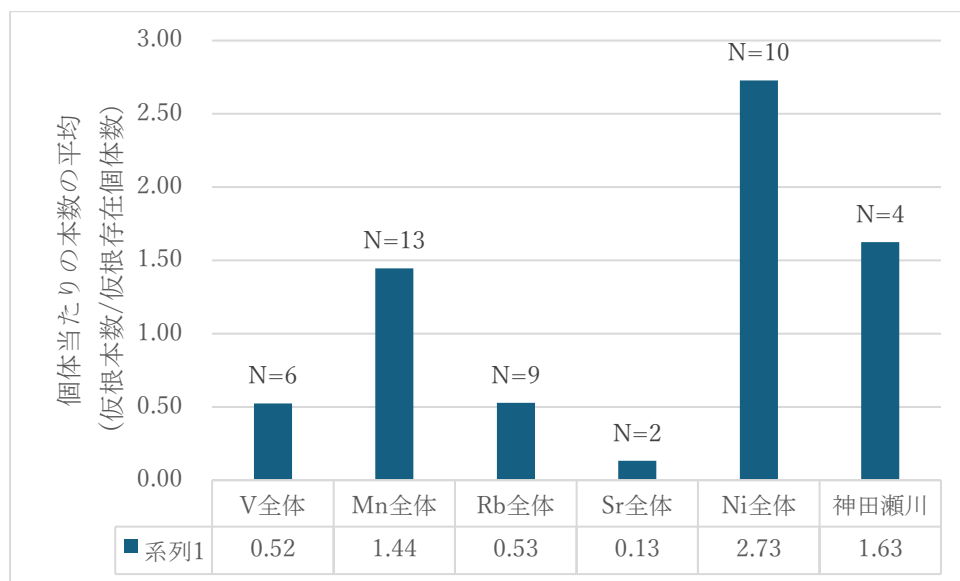


図 12 仮根形成平均本数

顕微鏡観察では、Ni での培養で仮根が多くみられ、長いものが見られた（図 13）。また、無数に仮根を持つ個体もあり、その仮根の数は、約 800 本を超えていた。この仮根の数をデータに入れると、観察個体数が少ないため、大きな影響がでると考え、外れ値として扱い、除外した。Rb での培養は、仮根が見られる個体もあったが、葉状体が美しく均等に成長していた（図 14）。



図 13 Ni での培養で見られた仮根
（顕微鏡 400 倍観察）

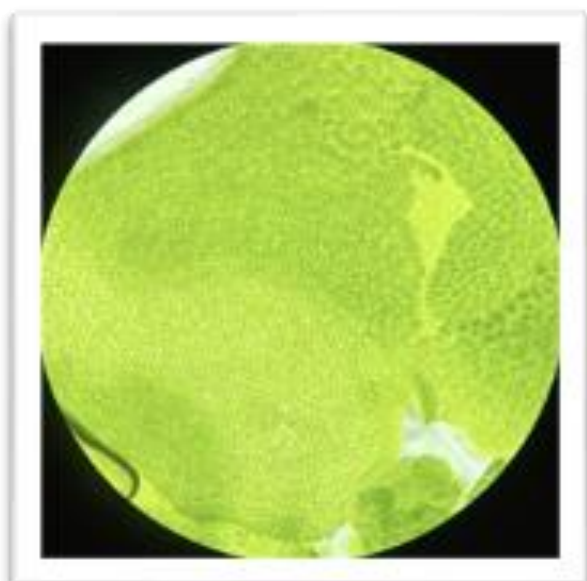


図 14 Rb での培養で見られたきれいな
葉状体（顕微鏡 400 倍観察）

考察 2

V、Rb、Sr で育成した個体には仮根が少ないことから、これらの元素には仮根形成を抑制する効果がある可能性がある。また、Rb での培養では、葉状体が非常に美しく形成されていた。調べてみると、Rb は K の代わりに利用されるとの報告があった。このことから、神田瀬川の河川水では、塩類濃度が 0.3%と低

かったため、K が少なく、そのため、Rb が K の代わりとなり、成長を促進した可能性がある。また、Ni は他の個体と比べて仮根が多くあった。今回実験に用いた遊走子は、徳島文理大学よりいただいた陸上養殖に使われる仮根が形成されにくい個体の遊走子である。Ni を加えた河川水で仮根が多く形成されたのは、Ni による影響であることが示唆される。神田瀬川の河川水で仮根が見られた要因も、Ni の影響と考えられる。

6. 実験 3 濃度差を大きくした培養実験

実験 2 では、元素による仮根形成割合の違いが見られたが、濃度による違いは見られなかった。そのため、濃度差を大きくすれば、濃度による違いが見られると考え、検証を行った。また、実験 2 では、遊走子が少し育っていたが、実験 3 では単細胞の状態から培養することで形態変化が出やすいようにした(図 15)。

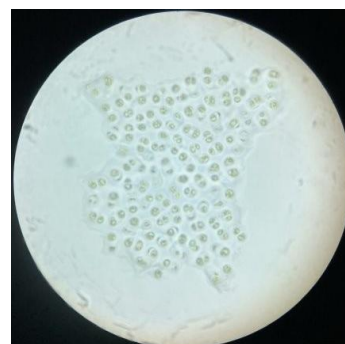


図 15 単細胞状態の遊走子

仮説 3

Ni では仮根形成促進作用が見られ、V、Rb、Sr では仮根形成抑制作用が見られる。また、この作用は濃度依存性がある。

実験操作 3

1 V、Mn、Rb、Sr が実験 2 の 10 倍、100 倍、1000 倍、10000 倍の濃度となる水溶液を作成した(表 5)。

(ppm)	V	Mn	Rb	Sr (mg/L)	Ni
①(実験 2 の 10 倍)	7	6	300	20	25
②(実験 2 の 100 倍)	70	60	3,000	200	250
③(実験 2 の 1000 倍)	700	600	56,000	2,000	2,500
④(実験 2 の 10000 倍)	7,000	6,000	溶解せず	20,000	25,000

表 5 作成した水溶液における濃度

- 2 神田瀬川の河川水 100mL にそれぞれの水溶液を 0.1mL 加え、それぞれの元素が実験 2 の①10 倍②100 倍③1000 倍④10000 倍となるようにした。
- 3 元素を加えた河川水 100mL にアオサノリの遊走子 0.1mL を入れ、培養した。
- 4 観察を続けながら、仮根形成が確認された培養 42 日後の個体について、仮根形成について顕微鏡で観察した。

結果 3

全体的に仮根は少なく、仮根を持たない個体が大半だった。各元素で濃度差での分散分析(ANOVA)を行ったが差は見られなかった。Rb③は濃度が高すぎたためか、アオサノリが全く生育せず、他の元素でも生育が十分でない個体が見られた(図 16)。

実験 2 と同様に、元素間での違いを見た。Ni の培養での仮根形成割合は 15%と他の元素を加えたものより少し大きくなったが、神田瀬川の 33%より小さかった(図 17)。しかし、どの元素においても、まれに仮根が多い個体が見られた。Ni は実験 2 ほどの本数の仮根は見られなかったが、長く太い仮根が複数あった。

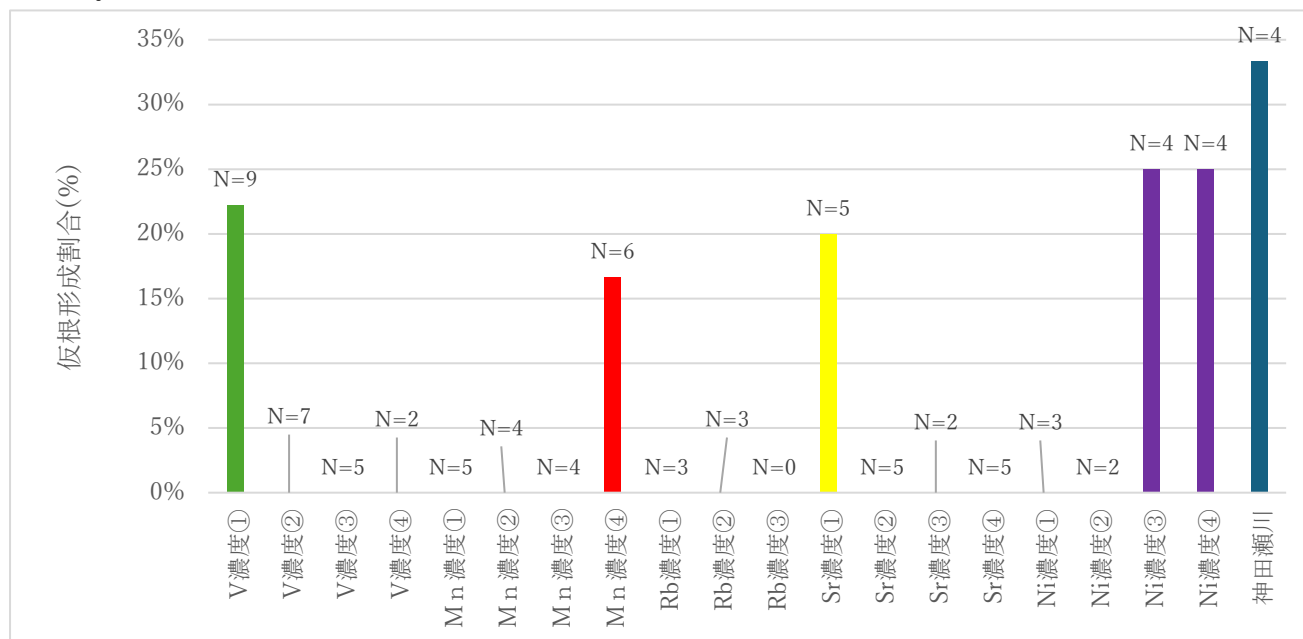


図 16 各元素濃度における仮根形成割合

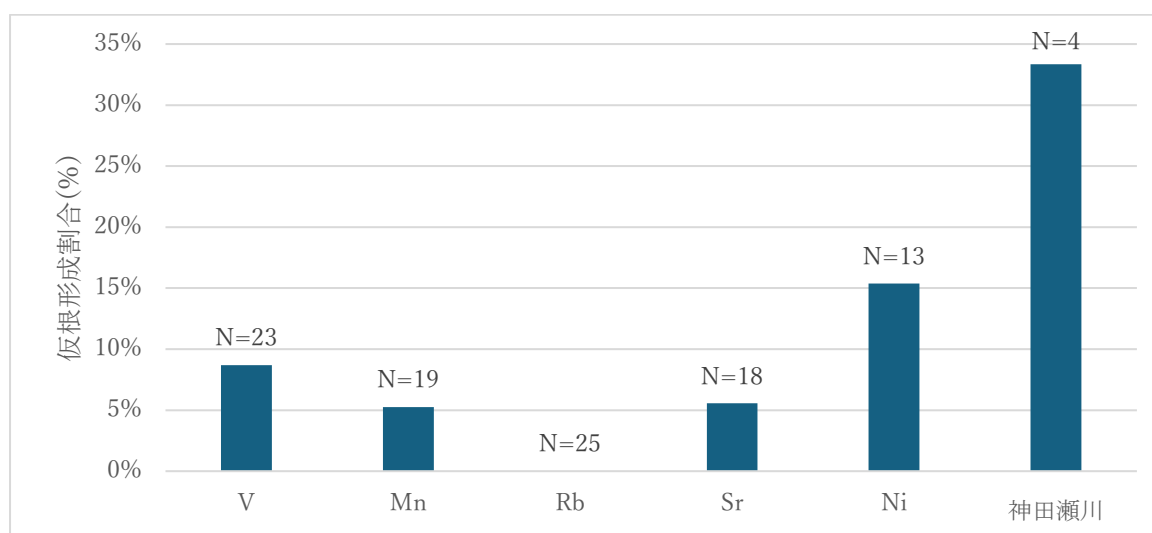


図 17 各元素における仮根形成割合

考察 3

実験 3 では濃度の幅を大きくしたにも関わらず、濃度間の違いを確認することができなかった。濃度

を高くしたため、十分生育出来なかったことが1つの原因であると考え。また、成分元素と海藻の生育について調べたところ、Ni 阻害という現象を見つけた。Ni は藻類に対して毒性を示し、50 μ g/L (50ppb) で増殖阻害を示す（国立環境研究所「水生生物の影響」）と報告されていた。このことから、Ni はアオサノリの通常成長を抑制し、それにより仮根形成を促進する可能性が示唆された。また、Ni 阻害が報告されている濃度については、50ppb と非常に低い。アオサノリに影響を与える濃度はどの程度かは分からないが、影響を与える濃度は、実験2より低い濃度での仮根形成を促進する可能性が考えられる。

7. 今後の展望

観察個体が少なかったため、十分な結果は得られなかったが、Ni による仮根形成促進作用が示唆された。そしてこの現象はNi 阻害の可能性がある。そのため、Ni を中心として、様々な元素を加えた河川水で培養した際の細胞数増加速度や葉状体の状態などの生育状況と仮根形成の関係性を検証したい。Ni が仮根細胞への分化を促進することが分かれば、Ni が影響を与える時期についても検証したい。例えば、ある時期にNi を与えることで、仮根形成を促し、遊走子が網に付きやすくなれば、河川養殖の一助になると考える。同様に、仮根形成を抑える元素とその濃度、仮根形成を抑える時期等を特定することができれば、陸上養殖の際にも活用できると考える。

8. 参考文献

- ・山本博文、ヒトエグサ養殖におけるサルーシンの活用、「西日本の海水科学研究（10）」. 2021
- ・公益財団法人 四万十川財団 清流通信 319 章 ～四万十川アオサ消滅の危機を探る①～
<https://www.shimanto.or.jp/?p=396245>（参照 2025-06-19）
- ・水生生物への影響、国立研究所「ニッケル」報告書 No. 42、1992

9. 謝辞

最後に、本研究にあたって徳島文理大学薬学部 山本博文教授にアオサノリ遊走子の提供並びに多大なるご助言、ご協力をいただきました。深く感謝いたします。ありがとうございました。