

AIによる谷津干潟における グリーンタイド予測の試み

矢内 栄二¹・若林 駿²・鳥居 明弘³・小田 僚子⁴

¹フェロー会員 (一財)海域環境研究機構 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-18-21)

E-mail: yauchi@ocero.or.jp

²学生会員 千葉工業大学大学院 創造工学研究科都市環境工学専攻 (〒275-8588 習志野市津田沼2-17-1)

E-mail: s16b2125qt@s.chibakoudai.jp (Corresponding Author)

³学生会員 千葉工業大学大学院 創造工学研究科都市環境工学専攻 (〒275-8588 習志野市津田沼2-17-1)

E-mail: s17b2094gu@s.chibakoudai.jp

⁴正会員 千葉工業大学教授 創造工学部都市環境工学科 (〒275-8588 習志野市津田沼2-17-1)

E-mail: ryoko.oda@it-chiba.ac.jp

東京湾奥部に位置する谷津干潟は、渡り鳥の保護条約であるラムサール条約に1993年に登録されたが、1995年からアオサの異常繁殖であるグリーンタイドの発生が問題となっていた。しかし、2017年から2020年にかけてグリーンタイドが消滅した。これまで、グリーンタイド発生予測に対してさまざまなモデルが提案されてきていたが、十分な予測には至っていなかった。本研究では、谷津干潟における2017~2018年のグリーンタイド消滅原因を検討した前報に引き続き、2019~2020年のグリーンタイドの消滅原因について現地観測データをもとに検討するとともに、ニューラルネットワークを使用したAIによるグリーンタイド予測モデルを構築した。その結果、2019~2020年のグリーンタイド消滅は過去と異なり、長梅雨による照度不足と高水温により引き起こされたことがわかった。構築したモデルの予測値は実測値の変動を的確に再現しており、水温と窒素・リンがグリーンタイドの変化要因に大きく関わることがわかった。

Key Words : green tide, *Ulva.sp*, Tokyo Bay, Yatsu tidal flat, artificial intelligence, neural network

1. はじめに

グリーンタイドは、緑色の海藻であるアオサが浅瀬の沿岸域で異常に繁殖する現象であり、水質・景観の悪化や悪臭を引き起こすことから、近年、世界各地で問題となっている¹⁾³⁾。そのため、発生原因の究明について研究が行われているほか⁴⁾⁵⁾、予測モデルの開発も盛んであり、栄養塩バランスに着目したもの⁶⁾、藻類生態に着目したもの⁷⁾、外部からの浮遊流入に着目したもの⁸⁾などが報告されている。最近では、海岸工学分野でのニューラルネットワークやビッグデータの利用の流れを受けて、Park et al.⁹⁾がニューラルネットワークを使用したモデルを構築している。しかし、Parkらのモデルでは、「グリーンタイド発生の有無を予測する」ことにとどまっておらず、定量的な予測には至っていない。

東京湾奥部に位置する谷津干潟(図-1)は、ラムサール条約登録湿地となっている面積約40ha、平均水深0.8mの潟湖干潟であるが、1995年から毎年グリーンタイドの発生が問題となっている。これまで、グリーンタイドの消長については、生態系モデルや物質循環モデルなどの

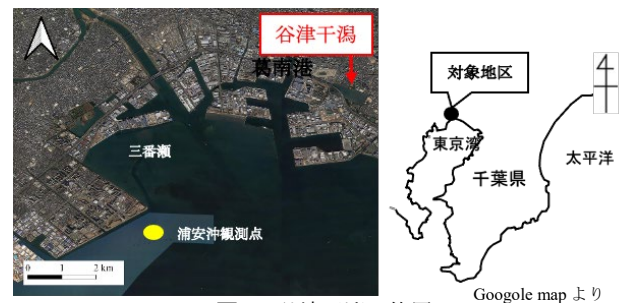


図-1 谷津干潟の位置

物理系モデル、あるいは統計モデルなどより予測が試みられてきたが、十分に解明されていない。また、最近の気候の変化により発生・消滅が突然起きるようになってきており¹⁰⁾、物理系モデルなどでは、その応答としてのグリーンタイドを再現することが難しい事象となってきた。

本研究では、現地観測データおよびアオサの遺伝子解析により谷津干潟における最近のグリーンタイド発生・消滅について検討を行うとともに、ニューラルネットワークによるグリーンタイド予測モデルを開発し、グリー

ンタイド発生に影響を与える要素について解析した。

2. 調査と解析

(1) 現地観測方法⁴⁾¹⁰⁾

谷津干潟は、図-2に示すような潟湖干潟であり、東側の谷津川と西側の高瀬川だけで東京湾と海水交換を行っている。現地観測は、過去の調査⁴⁾¹⁰⁾から継続して図-2に示す3地点において2003～2020年に実施した。高瀬川 (ST.1)、谷津川 (ST.2) の2か所においては、アオサの流入・流出量などの物理的要素、CODおよび栄養塩などの化学的・生物学的要素について春・夏・秋に定期的に調査し、ST.3では2014年から干潟表面に多項目水質計を設置することにより水温、塩分、Chl-a、DO、水位をそれぞれ30分ごとに連続観測した。グリーンタイド面積は、月に1回大潮干潮時に干潟周囲からレーザー距離計を用いて測定した。干潟外のデータとして、東京湾環境情報センターの浦安沖のデータ (図-1)¹¹⁾、および気象庁 AMeDASの船橋データ¹²⁾を使用した。表-1に調査項目と機器を示す。

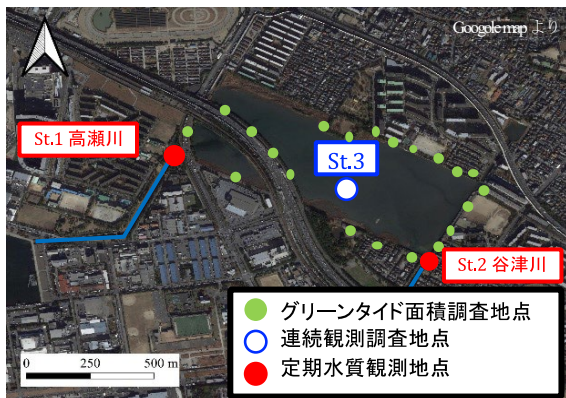


図-2 計測地点

(2) 遺伝子解析

アオサの外観が変化した2004年³⁾と同様に、2018年10月にアオサ種を同定するための遺伝子解析を行った。方法は、干潟で採取した外観の異なる2種類のサンプルについてDNAを精製し、2step tailed PCR法を用いてライブラリーを作製した。出現回数が多い結合配列について、BLASTNにより相同性検索を行った。

3. 干潟環境の変化過程

(1) グリーンタイド面積変化とアオサ種の同定

谷津干潟におけるアオサの生活史は、冬から春にかけて繁殖し、夏に枯死する状態が多いものの、近年では年間を通して繁殖する状況が続いていた¹⁰⁾。2003年～2020年における春(5月)、夏(8月)、冬(12月)のグリーンタイド面積の変化とアオサ種の結果を図-3に示す。図中の

表-1 調査項目と機器⁴⁾¹⁰⁾

計測頻度	測定・分析項目	測定法・機器
連続水質観測 (2014～2020) (30分間隔)	泥中塩分・水温	電気伝導率ロガーU24
	水温・塩分・ DO・Chl-a	多項目水質計 6920V2
グリーンタイド観測 (月1回) (2003～2020)	アオサ現存量	25cm×25cm コドラート
	グリーンタイド面積	Laser-1200s COOLSHOT20
定期水質観測 (春, 夏, 冬) (2003～2017)	Chl-a	COMPACT-CLW
	アオサ流入流出量	固定式ネット
	水温・pH	D-21
	塩分	COMPACT-CTW
	水中DO	COMPACT-DOW
	流速	AEMI-D
	COD・SS	JIS K 0102
T-N・NH4-N・ NO3-N・NO2-N・ T-P・PO4-P	多項目水質計 DR2400	

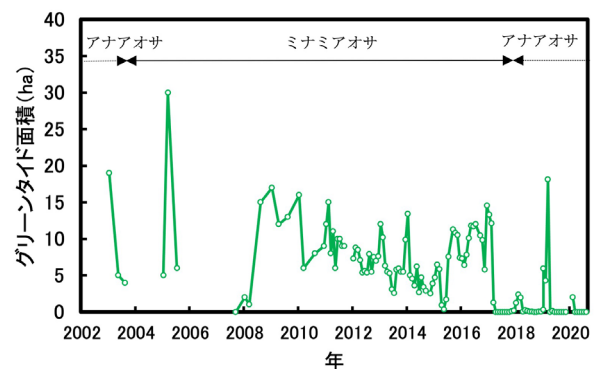


図-3 グリーンタイド面積 (2003～2020)

不連続点は欠測である。谷津干潟内では東側の谷津川から潮汐の流入により反時計回りの流れが発生する³⁾ため、グリーンタイドは干潟の東半分を覆う状態となり、概ね5～15ha程度で推移していた。しかし、2017年から2018年にかけてはほとんど増加することなく消滅した状態となり、矢内らはその原因としてアオサの生育域(5～34°C)を超える高水温であることを指摘している¹⁰⁾。グリーンタイドは2019年春に一度は発生しかけたものの、2019年夏～2020年にかけて消滅が継続した。

アオサ種の変化を見ると、谷津干潟のアオサの主要種は2003年までは東京湾内で広く繁殖しているアナアオサであったが、グリーンタイドが急増した2004年頃から外来種のミナミアオサに変化していた³⁾。しかし、今回の調査では急減した2017年頃から再びアナアオサに戻っていることがわかった。2004年の調査では、東京湾内の三番瀬と海の公園ではアナアオサが繁殖していたにもかかわらず、谷津干潟だけがミナミアオサの繁殖が認められたことから、原因として谷津干潟の海水の流入元⁴⁾である葛南港からのミナミアオサの流入と推定していた。しかし、2017年9月に「バラスト水管理条約」(船舶のバ

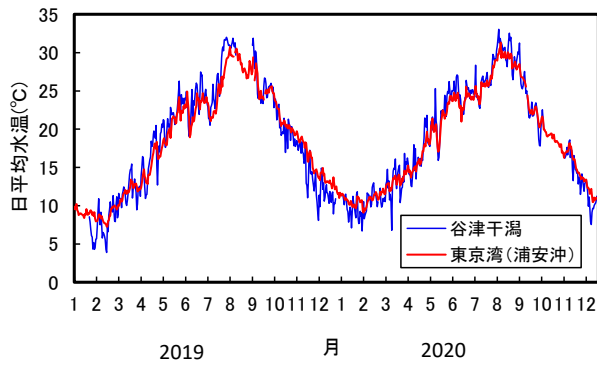


図4 日平均水温(東京湾・谷津干潟)

ラスト水及び沈殿物の制御及び管理のための国際条約)が発効¹³⁾し、葛南港でのバラスト水の排水水からミナミアオサが含まれなくなり、それに伴って谷津干潟内のアオサが在来種であるアナアオサに変化していったと考えられる。

(2) 水温変化

谷津干潟および東京湾浦安沖における2019～2020年の日平均水温変化の比較を図-4に示す。谷津干潟の測定点は干潟表面に固定しているため潮位の変化により水温変動が大きくなるが、谷津干潟での日平均水温は3.9℃～33.0℃の間で変化し、東京湾では7.3℃～31.3℃の間で推移していた。この水温域はほぼアオサの生息閾値内であるが、低温域についてはアナアオサの生息水温域¹⁴⁾以下である。

4. 2020年のグリーンタイド消滅原因の検討

矢内ら¹⁰⁾は、2017年、2018年のグリーンタイド消滅原因として、赤潮・青潮の発生(2017)および高水温(2018)を指摘した。そこで、同様の方法により2019～2020年のグリーンタイド消滅原因について検討する。2019～2020年には赤潮・青潮の干潟への流入がなかったことから、水温の影響について検討する。2014～2020年の夏季計測期間内の欠測回数が最小となる7/24～8/31における谷津干潟の水温30℃以上、34℃以上の累積時間(30分ごと観測)を示したものが図-5である。アオサの繁殖水温域は、アナアオサで8℃～30℃¹⁴⁾、ミナミアオサで3～34℃⁴⁾¹⁵⁾とされているが、30℃以上を測定した累積時間に着目すると、「高水温の影響によりグリーンタイドが消滅した」とされた2018年以降も、引き続き高水温が生じていることが認められる。一方、2019年5月から春先に成長するアオサの生態に伴いグリーンタイドが発生しかけたものの、2019年8月に急に消滅し、そのまま2020年12月に至っている。この期間の気象特性として、表-2に示すように「平年よりも梅雨期間が長く、期間内降水量が多かったこと」¹⁶⁾が挙げられる。そこで、平田ら¹⁷⁾を参考に「グリーンタイド発生の最小日照時間は3時間」と仮定

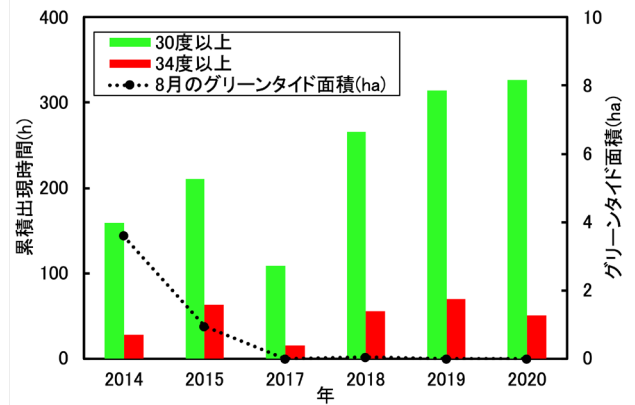


図-5 水温30℃以上、34℃以上の累積時間(7/24～8/31)

表-2 梅雨入り期間と降水量比(2013～2020)¹⁶⁾

年	梅雨入り	梅雨明け	期間内降水量平年比(%)
2013	6/10	7/6	77
2014	6/5	7/21	116
2015	6/3	7/10	128
2016	6/5	7/29	74
2017	6/7	7/6	71
2018	6/6	6/29	92
2019	6/7	7/24	134
2020	6/11	8/1	178

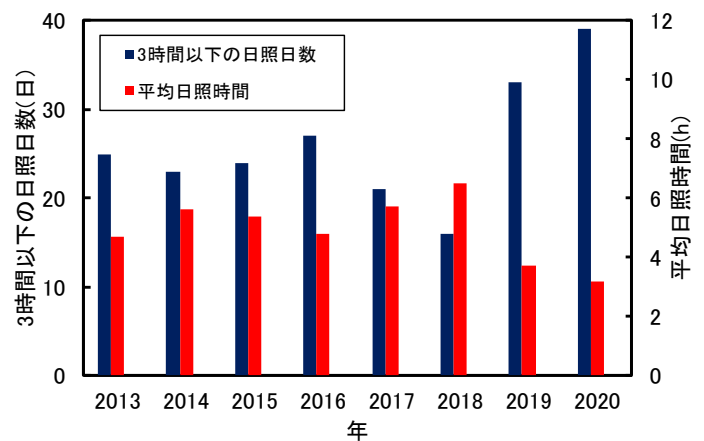


図-6 3時間以下の日照日数と平均日照時間(6/1～7/31)

し、2013～2020年で共通する梅雨期間(6/1～7/31)における3時間以下の日照日数および平均日照時間を比較した結果が図-6である。2019年、2020年は他年と比較して平均日照時間が少なく、3時間以下の日照日数が極めて多い傾向が認められる。このことから、「極めて高い高水温によりグリーンタイドが消滅した2018年」とは異なり、2019年と2020年のグリーンタイド消滅原因は高水温と日照不足との複合であることが考えられる。

5. AIによるグリーンタイド予測

(1) 解析方法

ニューラルネットワークモデルを構築するために、オ

オープンソースフリーソフトウェア統計解析ソフトR(Ver4.0.1)のニューラルネットワーク(neuralnet package)を用いた¹⁸⁾。本研究では海象データを主対象として解析することとし、目的変数をグリーンタイド面積、説明変数を(1)連続水質観測データ、(2)定期水質観測データの2通りとした解析を実施した。解析フローを図-7に示す。

グリーンタイド面積データは月ごとの取得のため、連続および定期水質観測データの各月ごとの月平均値を算出し、データの正規化をした後、訓練データとテストデータに分類した。テストデータとして、一年間のグリーンタイド面積の積算値が最も多い年を最大繁茂時、最も少ない年を最小繁茂時として予測対象年を決定し、予測対象データを除くその他の年のデータを訓練データとして、モデルを作成した。

(2)解析条件

解析条件を表-3に示す。(1)連続水質観測データ、(2)定期水質観測データを用いたいずれの解析でも、中間層ユニット数は1~7として100個ずつモデルを作成した中から、二乗平均平方根誤差(RMSE)が最小のモデルが予測精度が高いとし、予測精度評価を行なった。

(3)モデルの予測精度評価

RMSE最小モデルにテストデータの説明変数を代入することにより、実測値と予測値のRMSE、平均絶対誤差(MAE)、相関係数を算出し、モデルの精度評価を実施した。各モデルごとの精度評価値を表-4に示す。

(4)連続水質観測データによる予測

連続水質観測データは、表層水質の4項目すべて測定している2012~2015、2019年のデータを用いた。最大

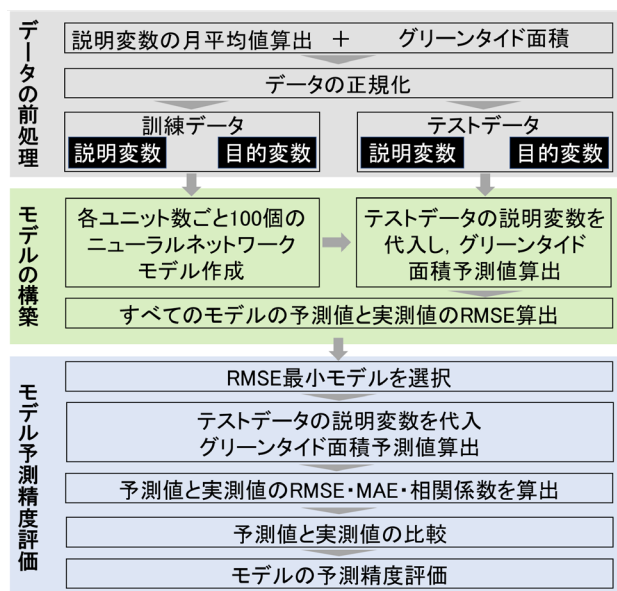


図-7 解析フロー

繁茂時である2013年と最小繁茂時である2019年を予測対象とした予測結果を図-8に示す。なお、予測値の欠測は実測値の欠測に起因している。最大繁茂時の結果では全体的に実測値の変化を再現し表-4の相関係数は0.812と高いが、実測値が急増・急減した2014年5月および2015年9月の再現ができていない。最小繁茂時の2019年を予測対象とした結果でも、急増・急減した月の再現精度が良くない。例えば、2019年8月の実測値18.10haに対して、予測値は4.73haとなっており、相関係数は0.573、RMSEは3.040haとなった。矢内らは谷津干潟のグリーンタイド面積は冬季のN/P比との相関が高いことを指摘している⁴⁾が、

表-3 解析条件

parameter	パラメーター	数値
Hidden	中間層ユニット数	1~7
Threshold	閾値	0.01
Learningrate	学習率	0.001
Stepmax	最大学習回数	10,000,000
Rep	モデル作成回数	100
Algorithm	アルゴリズム	誤差逆伝播法
Act.function	活性化関数	シグモイド関数
Err.function	損失関数	残差平方和

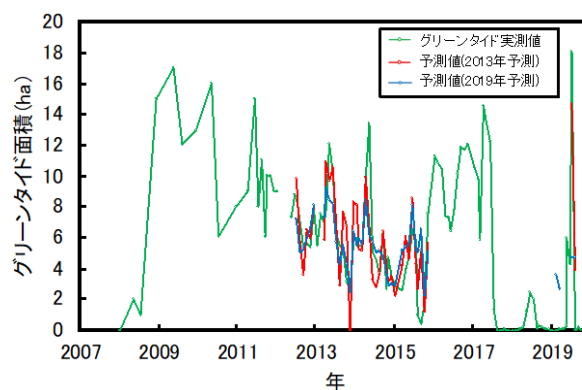


図-8 連続水質観測での予測（最大・最小繁茂）

表-4 モデルごとの精度評価値

使用データ	テストデータ	繁茂状況	RMSE最小の中間層ユニット数	学習回数	全年			予測対象年		
					RMSE(ha)	MAE(ha)	相関係数	RMSE(ha)	MAE(ha)	相関係数
連続水質観測データ	2013年	最大	5	278,570	2.165	1.648	0.812	2.405	2.159	0.703
	2019年	最小	4	118,034	3.040	1.923	0.573	6.304	5.042	0.612
定期水質観測データ	2009年	最大	5	54,324	3.010	2.049	0.773	0.916	0.992	0.874
	2015年	最小	7	27,147	0.958	0.729	0.977	1.527	1.389	0.940

連続調査では栄養塩類を計測していないため、予測精度の不足につながったと考えられる。

(5) 定期水質観測データによる予測

栄養塩データを含む定期水質観測データについて、2008～2017年のデータを用いて最大繁茂時である2009年と最小繁茂時である2015年を予測対象とした結果を図-9に示す。2009年予測では、予測対象年を含む2008～2014年は概ね再現できているが、2015年以降の予測値は実測値よりも大きい。2015年予測結果では、2009年予測の不具合が改善されてすべての期間において予測値は実測値の変動を的確に再現している。このときの相関係数は4つの予測の中で最も高い0.977であり、RMSEも0.958haと最小となった。

(6) パラメータの重要度分析

グリーンタイド発生に影響を与える要素を分析するため、相関係数0.940と比較的高精度である定期水質観測データ・最小繁茂時予測の2015年予測モデルを対象にGarsonのアルゴリズム¹⁹⁾とOldenのアルゴリズム(Connection Weight)²⁰⁾を用いて、測定項目に対する重要度を算出した。Garsonのアルゴリズムは重みの絶対値に基づいて、各入力ニューロンの相対的な重要度を算出するものであり、Oldenのアルゴリズムは入力層から隠れ層の接続重みと隠れ層から出力層の接続重みの積に基づいて相対的な重要度を算出するものである。

$$G_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^h \frac{|w_{ij}| |v_{jk}|}{\sum_{i=1}^m |w_{ij}|}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^h \frac{|w_{ij}| |v_{jk}|}{\sum_{i=1}^m |w_{ij}|}} \quad (1)$$

$$O_{ik} = \sum_{j=1}^h w_{ij} v_{jk} \quad (2)$$

ここで、 G_{ik} と O_{ik} はi番目の入力変数のk番目の出力ニューロンに対する相対的な重要性、 w_{ij} はi番目の入力変数とj番目の隠れニューロンとの間の接続重み、 v_{jk} はj番目の隠れニューロンとk番目の出力ニューロンとの間の接続重みを表す。

a) Garsonのアルゴリズムによる重要度分析

Garsonのアルゴリズムによる重要度分析結果を図-10に示す。ここで、横軸項目の頭文字Yは谷津川、Tは高瀬川を示している。Garsonのアルゴリズムからは、谷津川と高瀬川の水温とリン、および高瀬川の窒素の重要度が他の要素に対して高く、グリーンタイドの変化要因に大きく関わることを示唆された。

b) Oldenのアルゴリズムによる重要度分析

Oldenのアルゴリズムによる重要度分析の結果を図-11に示す。正は順相関、負は逆相関を表す。本アルゴリズムでは谷津川のT-P、DIPが突出して重要度が高い結果となった。また、Garsonアルゴリズムの分析結果とは異なる

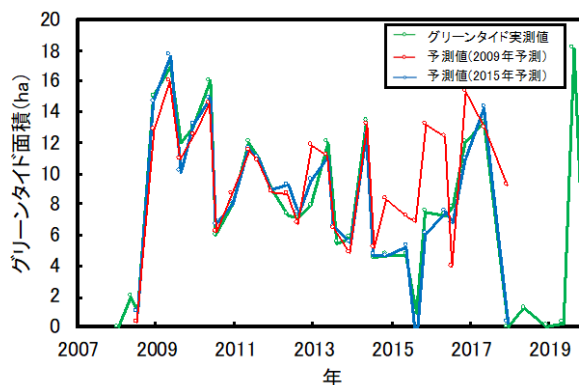


図-9 定期水質観測での予測（最大・最小繁茂）

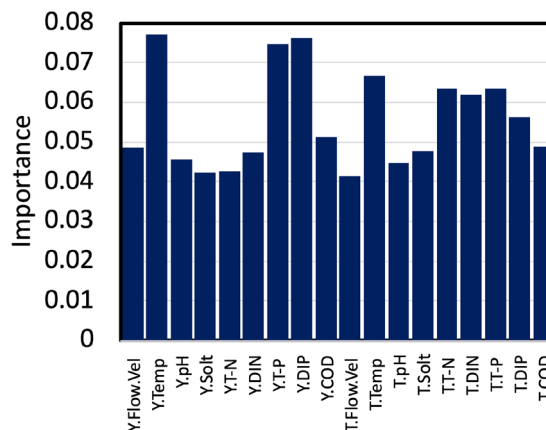


図-10 Garsonのアルゴリズムによる重要度（2015年予測）

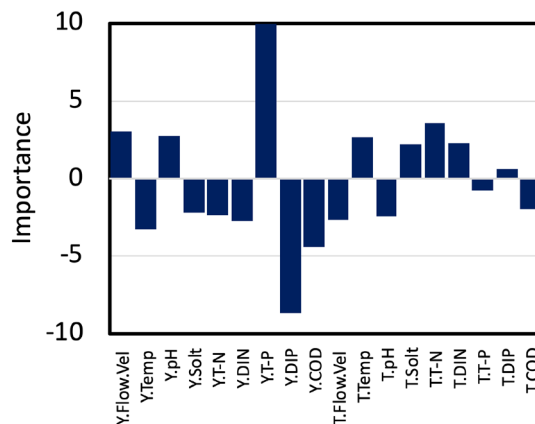


図-11 Oldenのアルゴリズムによる重要度（2015年予測）

り、両河川水温と高瀬川の窒素は重要度が高くなることはなく、他の項目と同程度の重要度であった。

藤原ら⁹⁾の物質循環解析では、両河川から流入する窒素、リンがグリーンタイド繁茂に影響を与えることを示しており、本研究の重要度分析結果と比較すると、OldenよりもGarsonの解析結果に近いものとなった。

6. 結論

東京湾奥部の谷津干潟において、2019～2020年のグリーンタイドが消滅原因を検討した結果、2019年と2020年のグリーンタイド消滅原因は高温と日照不足との複合

であることが考えられた。ニューラルネットワークを用いたAIモデルによりグリーンタイド発生を予測した結果、定期水質観測データにより構築したモデルの予測値は実測値の変動を的確に再現した。重要度解析結果から、両河川の水温・リン、および高瀬川の窒素の重要度が高いことがわかった。

参考文献

- 1) Zongling Wang, Jie Xiao, Shiliang Fan, Yan Li, Xiangqing Liu, Dongyan Liu : Who made the world's largest green tide in China?—an integrated study on the initiation and early development of the green tide in Yellow Sea, *LIMNOLOGY and OCEANOGRAPHY*, 60, pp.1105–1117, 2015.
- 2) Antoine Fort, Conor Mannion, Jose M. Fariñas-Franco I, Ronan Sulpice : Green tides select for fast expanding *Ulva* strains, *Science of the Total Environment*, 698 (2020) 134337.
- 3) 矢内栄二, 早見友基, 井本辰哉, 五明美智男: 谷津干潟におけるアオサの異常繁茂と干潟環境への影響評価, *海岸工学論文集*第53巻, pp.1191-1196, 2006.
- 4) 矢内栄二, 本永麻衣子, 藤原誠司, 室山結実: 東京湾奥部の谷津干潟におけるアオサとノリの繁殖特性, *土木学会論文集B2(海岸工学)*Vol.66, No.1, pp.1081-1085, 2010.
- 5) 島並諒, 遠藤徹, 矢持進: 大阪南港野鳥園湿地のグリーンタイド制御に関する一考察, *土木学会論文集B2(海岸工学)*, Vol.69, No.2, pp.1161-1165, 2013.
- 6) 藤原誠司, 矢内栄二: 東京湾奥部の潟湖干潟におけるグリーンタイド環境, *土木学会論文集B2(海岸工学)*, Vol.73, No.2, pp.1291-1296, 2017.
- 7) 児玉貴正, 相馬明郎: グリーンタイド発生要因の推定と大型藻類生態モデルの開発, *土木学会論文集B2(海岸工学)*, Vol.73, No.2, pp.1321-1326, 2017.
- 8) Fucang Zhou, Jianzhong Ge, Dongyan Liu, Pingxing Ding, Changsheng Chen : A Lagrangian-based Floating Macroalgal Growth and Drift Model (FMGDM v1.0): application in the green tides of the Yellow Sea, *Geoscientific Model Development*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2021-20>
- 9) Soohyun Park, Soyi Jung, Haemin Lee, Joongheon Kim, and Jae-Hyun Kim : Large-Scale Water Quality Prediction Using Federated Sensing and Learning: A Case Study with Real-World Sensing Big-Data, *Sensors* 2021, 21, 1462. <https://doi.org/10.3390/s21041462>
- 10) 矢内栄二, 橋本香保子, 藤原誠司, 田賀利輝, 池田伸幸, 望月健志郎: 東京湾奥部における2017~2018のグリーンタイド消滅原因の検討, *土木学会論文集B2(海岸工学)*, Vol.75, No.2, pp.1069-1074, 2019.
- 11) 東京湾水質連続水質観測データ (浦安沖) : <https://www.tbeic.go.jp/MonitoringPost/ViewGraph?buoyId=03> (2021.1.13 参照)
- 12) 気象庁: 過去のデータダウンロード <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>(2021.1.13参照)
- 13) 環境省: 海洋汚染防止法の改正について—バラスト水管理条約の現状と課題について, <https://www.env.go.jp/council/09water/y090-36/mat02.pdf> (2021/3/1閲覧)
- 14) 能登谷正浩 (編著) : アオサの利用と環境修復, 成山堂書店, 171p., 1999.
- 15) 川井浩史, 上井進也, 羽生田岳昭: 外来種になった日本の海藻類: 遺伝子からみたその起源と動態, *地球環境* Vol.16, No.1, pp.45-52, 2011.
- 16) 気象庁: 過去の梅雨入りと梅雨明け(関東甲信) https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/baiu/kako_baiu09.html (2021.1.13 参照)
- 17) 平田八郎, 水田奈津江, 新納正也: 緑藻類オオバアオサ *Ulva lactuca* の飼育下における成長の概日周期, *近畿大学農学部紀要*, 第33号, pp.19-23, 2000.
- 18) The R Project for Statistical Computing : <https://www.r-project.org/> (2020.4.14閲覧)
- 19) Garson, G.D. : Interpreting Neural Network Connection Weights., *AI Expert*, 6, 47-51, 1991.
- 20) Olden, J.D., Joy, M.K. and Death, R.G. : An accurate comparison of methods for quantifying variable importance in artificial neural networks using simulated data, *Ecological Modelling* 178 389-397, 2004.

(Received March 17, 2021)

(Accepted July 22, 2021)

A NEW APPROACH FOR PREDICTING GREEN TIDES IN THE YATSU TIDAL FLATS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Eiji YAUCHI, Shun WAKABAYASHI, Akihiro TORII, and Ryoko ODA

The Yatsu tidal flats, located in the inner part of Tokyo Bay, are among the most significant tidal flats remaining in Japan. The tidal flats were registered as a Ramsar site in 1993 because of the numerous migratory birds that visit the wetland annually to breed and feed. In recent years, the occurrence of green tides due to the extraordinary growth of *Ulva* spp. has become problematic. Since 1995, the green tides have severely impacted the ecology of the area. However, the green tides disappeared suddenly in 2017, and did not occur again until 2020. Although numerous models have been developed to predict the occurrence of green tides, none of these models have been sufficiently robust. In this study, as a follow-up to a previous study examining the causes of extinction in 2017-2018, the reasons underlying the disappearance of green tides from 2019 to 2020 in the Yatsu tidal flats were examined based on field observations. We also constructed a green-tide prediction model using artificial intelligence and a neural network. The results showed that the disappearance of green tides from 2019 to 2020 was due to insufficient illuminance due to a long rainy season as well as high water temperatures. The predicted values for the green tide area generated by the model closely corroborated actual observations in the field. In addition, water temperature, nitrogen, and phosphorus greatly affected the incidence of green tides at the Yatsu tidal flats.