

掘削地の植物相調査と土壤撒きだし試験による福島潟の埋土種子集団の解明

志賀 隆 客員研究員／新潟大学教育学部准教授 渡辺雄大／新潟大学教育学部

1. はじめに

水生植物はその生活史の一時期において、完全に水中か抽水状態で生育する植物である（生嶋，1972）。水生植物は、湿地に生育するその他の植物と共に、湿地の生態系における一次生産者としての役割を果たすだけでなく、多種多様な水生植物が存在することによって、魚や水生昆虫、水鳥などの生育空間の構造を複雑にする重要な役割を持っている（角野，2014）。しかし、日本国内における水生植物は湖沼やため池の干拓、埋め立て、護岸改修工事、水質の悪化等、様々な要因により減少傾向にある（角野，1994，2014）。角野（2014）が在来の水生植物として取り上げた269種（亜種・変種・雑種を含む）の内、108種（40.1%）が環境省のレッドリスト（2012）に掲載されている。維管束植物約7000種（亜種・変種を含む）の内、環境省のレッドリスト（2012）において絶滅危惧種（絶滅種～準絶滅危惧種とする）に指定されているものは2118種（30%）であることを考えると、水生植物は絶滅危惧種の割合が高いと言える。

新潟県でも水生植物が減少傾向にあることは全国的な傾向と同様であり、低地の湖沼において1980年代から希少な水生植物が減少していることが明らかにされている（福原，2011）。新潟県において、絶滅あるいは野生絶滅したとされる植物はムジナモ *Aldrovanda vesiculosa* L., デンジソウ *Marsilea quadrifolia* L., ツルスゲ *Carex pseudocuraica* F.Schmidt の3種であり、いずれも水生・湿生植物である（新潟県，2001）。また、保護上重要な種の割合が高い科として、水生植物であるミズニラ科、トチカガミ科、イバラモ科、ヒルムシロ科、ミクリ科、アリノトウグサ科、タヌキモ科が挙げられている（新潟県，2001）。

絶滅が危惧される植物を守る取り組みとしては、現地での生育地保護や保全、植物園など生育地域外での系統保存、ミチゲーション（今橋・鷺谷，1996；池田ら，1999）、土壤の中に含まれている埋土種子を用いた取り組み（Nishihira et al., 2006）などがある。これらの中でも、埋土種子を用いた植生復元は、その地域の風土性や固有性を維持し、遺伝的多様性を回復できる可能性のある有用な手法であることが指摘されている（鷺谷，1997）。水生植物の保護・保全に関する埋土種子を用いた取り組みとしては、茨城県の霞ヶ浦において埋土種子からの水生植物の植生が回復したという事例（Nishihira et al., 2006）や、印旛沼でガシャモク（絶滅危惧 IA 類：環境省，2012）やコウガイモ、シャジクモなど失われた水生植物が復元したことが知られている（久城ら，

2009）。

新潟県の北部に位置する福島潟（北緯 37° 54'，東経 139° 15'）は 262ha におよぶ水湿地である。これまで同地では、880 種以上の維管束植物が記録されており、オニバスやミズアオイ、オオミクリなど絶滅危惧種を含む数多くの水生植物の生育が知られている（狩野・石澤，2002；日本工営株式会社，2011；張替，未発表）。また、現存する自然湖沼における水生植物の多様性に関する調査では、福島潟は全国的にも非常に高い種多様性を持っていたことが明らかにされている（Nishihira et al., 2014）。福島潟は、1963 年から 1975 年にかけて行われた国営福島潟干拓建設事業に伴い、南西部の開放水面が陸化されて農業用地として利用されるようになり、その水面積が減少した。この干拓事業に伴い、生育する水生植物の種数は減少した。1980 年代にかけて水生植物の種数は回復したが、それ以降は抽水植物を除く水生植物は減少傾向にある。2014 年現在は、治水対策として増水時の貯水量を確保するために、新発田市側のヨシ原や休耕田を掘削し、開放水面を広げる計画が進んでいる。しかし、大規模な掘削や浚渫により、福島潟内の植物相も大きな影響を受けることが予想され、工事計画地の現状保存を求める意見も出されている（「福島潟・県の工事計画地 絶滅危惧植物が密集」新潟日報，2010 年 5 月 14 日記事）。そのため、新潟県では福島潟の現在の植物相、植生を把握するために中長期的な環境調査を行っている（例えば、日本工営株式会社，2011）。

上述の通り、開放水面を広げるために行われる掘削や開放水面の浚渫は、植生に対して破壊的な影響を与えることが予想されるが、その一方で土壤に含まれる埋土種子が露出することによって、かつての植生が復元する可能性も考えられる。しかし、埋土種子の分布が明らかになっていない状況下での土壤の撒きだしは、効果的な在来植生の復元ができないだけでなく、形成された裸地へ外来植物の種子が供給されることにより、外来種が優占する植生が成立する恐れもある（西廣ら，2007）。このため、これまで取り組まれてきた定期的な植生調査以外にも、当該地における埋土種子の構成を把握することは、掘削が行われる中でも効果的に植生復元を行うために必要であり、保全計画立案のためには喫緊の課題だと言える。

このような状況の中、福島潟では周囲に堤防を築く準備が進められ、新発田市側の休耕田（開放水面予定地）では、既に 2007 年度から 2012 年度頃にかけて築堤に用いる土砂を得るために、掘削が行われた。その結果、2014 年春の時点で大小さまざまな履歴の異なる 30 個

近くのくぼ地が造成され、水が涵養することにより、池となっている。これらの新しくできた湿地やその周辺では、かつて生育していた植物の埋土種子から植生が復元している可能性がある。土地造成などの土壌の攪乱によって、かつての植生が復元した報告例は限られるとともに（例えば、増田・西村，2009）、複数ヶ所の調査によって詳細に埋土種子からの植生復元の効果を論じたものは少ない。また、埋土種子の効果を正しく評価するためには過去の植物相、植生の記録が残されている必要があるが、福島潟は1911年以降、植物相調査、植生調査が継続して行われており（例えば、尾崎，1975；笹川・石澤，1989；狩野・石澤，2002）、特定の種がいつ頃まで確認されていたのか明らかである。更に、埋土種子からの復元後の植生遷移を記述して、明らかにすることは、埋土種子を用いた保全において重要な課題であるが（久城ら，2009）、福島潟では異なる時期に掘削が行われているため、植生遷移の実態について評価できる可能性がある。水生・湿生植生の遷移は土壌環境、水質条件によって大きな影響を受けると考えられ（焦ら，2007）、掘削池の環境が埋土種子由来の植生の遷移に対してどのような影響を与えたのかについても明らかにできるかもしれない。

そこで本研究では、水生・湿生植物の植生帯の埋土種子を用いた植生復元の可能性を探るために、福島潟に造成された掘削池の水生・湿生植物相を調査すると共に、実際に福島潟において土壌を収集し、撒きだし試験を行った。本研究で明らかにすることは次の3点、1) 湿地に対する人為的攪乱によって生じた植物相の記録とその特徴の把握、2) 埋土種子から復元された植生の遷移と生育環境の関係、3) 福島潟の土壌に含まれている埋土種子集団の種組成とその量、である。

2. 材料と方法

2. 1. 掘削池における調査

2. 1. 1. 水生・湿生植物相調査

福島潟の北東部（新発田市側）の休耕田に造成されたおよそ27個の掘削池の内、図1に示した24個を調査対象とした（図1，表1）。調査は、2014年6月5・6・8日、9月19・26・29・30、10月1・20・21・23日の計11回行った。掘削池の周囲を1周歩き池内全域に加え、水際から3m程度外側までを調査範囲とし、出現した種を記録し、9、10月の調査では、上記の調査に加え、各掘削池に生育する水生植物の被度を池全体に占める割合を0-20%、20-40%、40-60%、60-80%、80-100%の5つの区分に分け、それぞれ1、2、3、4、5と5段階で評価した。なお、水生植物の類別は角野（2014）に従い、生育形を抽水植物、沈水植物、浮葉植物、浮遊植物の4つに分けた。なお、作成した証拠標本は新潟大学教育学部に収蔵した。



図1. 福島潟と調査を行った24個の掘削池。1~24の数字は各池の番号を示す。航空写真は2011年4月に撮影したもの（新潟市提供）。

2. 1. 2. pH、電気伝導度（EC）、遊離炭酸濃度

水質と湿地造成後に成立した植物相の関係を明らかにするために、各掘削池の中心において、pH、EC、遊離炭酸濃度の測定を行った。pH、ECは現地でpHメーター（Personal pH/ORP Meter, PH72、横河電機株式会社）、ECメーター（Personal SC Meter, SC72、横河電機株式会社）を用いて測定した。遊離炭酸濃度を測定するための試料水は、表層から2割水深の水をボトルに採水し、実験室内にて測定した（上水試験方法Ⅱ-3.14.4.1）。pH、ECの測定と採水は2014年10月20、23、26日の合計3日間、午前8時~11時の間に行った。なお、水深は各池の湖央で計測を行った。

2. 1. 3. 掘削池面積、湖岸延長線、掘削年代

植物相調査では踏査経路をGPS（Oregon 650TCJ、ガーミンコーポレーション）に記録し、そのデータを元にAdobe Illustrator CS6 version 16.0.3とBPT-Pro4.5.1.1を用いて掘削池の面積、湖岸延長線を算出した（表1）。

各池の掘削年代は航空写真を用いて特定し、2008-2010年（08-10）、2010-2012年（10-12）、2012-2014年（12-14）の3グループに分類した（表1）。

2. 1. 4. データの解析について

掘削池において出現した植物の種数と各池の面積、湖岸延長線との関係を調べるために回帰分析を行った。また同様に、水草の種数、水草から抽水植物を除いたものの種数とpH、EC（電気伝導度）、遊離炭酸濃度の関係を調べるために回帰分析を行った。

また、掘削池の水生植物の被度と環境要因との関係を明らかにするために、累積被度が10%以下のものを除いた14種（コウホネ、ヒルムシロ、コカナダモ、コナギ、ナガエミクリ、オオミクリ、ウキヤガラ、サンカクイ、

表 1. 調査を行った各掘削池の湖岸延長線、面積、掘削年代、及び水環境。掘削池 3 と 13 は水が干上がっていたため、水質調査を行っていない。

掘削池 番号	湖岸延長線 (m)	面積 (m ²)	掘削年	EC (μ S/cm)	pH	水深 (cm)	遊離炭酸 (mg/l)	調査採水日時
1	590	17477	2007-2009	189.5	6.35	74.0	6.13	Oct.23,2014, 10:50
2	363	2614	2007-2009	98.7	5.94	74.0	15.0	Oct.26,2014, 8:45
3	150	1234	2007-2009	-	-	-	-	-
4	313	2838	2007-2009	117.0	6.20	79.0	14.8	Oct.26,2014, 9:00
5	545	5604	2007-2009	128.3	6.13	34.0	7.83	Oct.20,2014, 10:55
6	231	3160	2009-2011	55.3	5.85	80.0	6.07	Oct.20,2014, 8:53
7	214	2588	2009-2011	91.3	6.09	38.5	5.72	Oct.20,2014, 9:14
8	117	712	2007-2009	142.1	5.48	52.0	11.3	Oct.26,2014, 9:19
9	287	3674	2009-2011	76.8	6.02	90.0	8.62	Oct.20,2014, 8:30
10	252	3118	2009-2011	121.9	5.82	17.0	11.0	Oct.20,2014, 9:25
11	254	3259	2009-2011	67.5	6.14	90.0	7.21	Oct.20,2014, 10:10
12	247	2423	2007-2009	131.5	5.90	31.0	11.2	Oct.20,2014, 9:43
13	89	506	2007-2009	-	-	-	-	-
14	393	7219	2009-2011	91.5	6.35	71.0	5.36	Oct.20,2014, 10:24
15	342	2533	2009-2011	114.8	6.18	20.0	5.90	-
16	328	3661	2007-2009	103.1	6.25	69.0	9.70	Oct.23,2014, 10:10
17	192	1582	2007-2009	120.2	6.09	53.0	16.8	Oct.23,2014, 10:29
18	381	6430	2011-2014	118.1	6.16	94.0	15.9	-
19	194	2063	2007-2009	160.3	6.15	89.0	11.4	Oct.23,2014, 9:50
20	194	2246	2007-2009	133.2	6.03	116.0	17.6	Oct.23,2014, 9:38
21	130	684	2007-2009	137.8	5.72	81.0	19.3	Oct.23,2014, 9:10
22	231	3057	2009-2011	157.1	6.27	24.0	12.6	Oct.23,2014, 8:50
23	121	709	2009-2011	117.0	6.03	46.0	11.2	Oct.23,2014, 8:40
24	109	790	2009-2011	67.0	5.70	47.5	7.70	Oct.23,2014, 8:24

マコモ、ヨシ、マツモ、ハス、ヒシ類、キクモ)を用いて正準対応分析(CCA)を行った。この統計処理にはR ver3.1.2を用いた。なお、ヒシとオニビシはまとめてヒシ類とし、掘削年代はダミー変数化して解析に用いた。

2. 2. 埋土種子集団の調査

2. 2. 1. 土壌サンプリング

土壌のサンプリング位置は150m程度の間隔で設定した。北東部のヨシ原内は先行研究(張替, 2010)によって詳しい植生調査が行われた地点を選定し、開放水面、ヨシ原、休耕田を合わせて、計58地点において土壌を

採集した(図2)。なお、現在の福島潟内のヨシ原が形成された年代を航空写真から推定し、1948年以前に形成されたもの「ヨシ原(-48)」、1949-1965年は「ヨシ原(49-65)」、1966-1973年は「ヨシ原(66-73)」と3つに区別した。

開放水面における底泥はエクマン・バージ式採泥器(15cm×15cm×15cm)を、それ以外の地点では手製の採集器(ϕ 7.5cm×24cm)を用いて土壌を採集した。採集は7月12・18・25・29・31日、8月1・5・7日の合計8回に分けて行った。

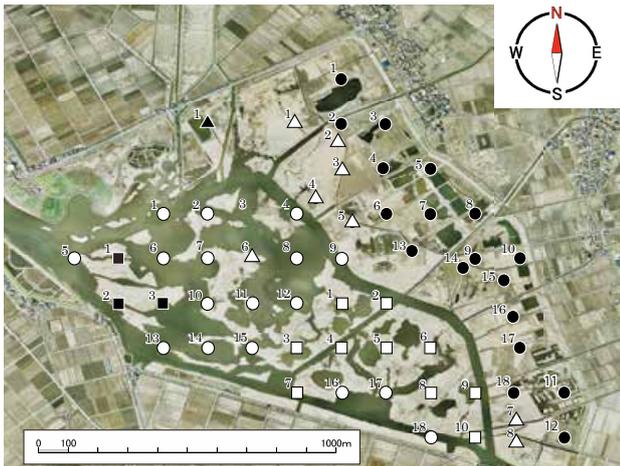


図 2. 土壌採集地点。シンボルは採集地点の属性を示す(▲, 排泥池; ●, 休耕田; ■, ヨシ原 (-48); △, ヨシ原 (49-65); □, ヨシ原 (66-73); ○, 開放水面)。航空写真は 2011 年 4 月に撮影したもの (新潟市提供)。

2. 2. 2. 撒きだし試験

埋土種子の調査は、土壌を直接撒きだして種子の発芽状況を確認し、評価を行った (撒きだし法)。土壌採集地点直上の植物の当年種子が混入することを防ぐために、手製の採集器でサンプリングした土壌の表層 1cm を除去し、深さ 1~19cm のものを試験に用いた。なお、エクマン・バージ式採泥器で採集した土壌は、表層を区別して除去することができなかった。

採集した土壌は共に均一になるように混ぜたのち、2 つのサブサンプルに分け、冷温処理 (4℃) と高温処理 (35℃) を約 40 日間施した。次に、目の細かさが 1cm のふるいを用いて根などの植物体を除去した。そして、水深条件を 0cm と 2~3cm の 2 つに分け、17cm×12cm のプラスチック製の容器に厚さが 1cm 程度になるように薄く広げた。コントロールには滅菌したバーミキュライトを使用し、各水深条件に 3 個、計 6 個準備した。

試験を行った室内は 20℃一定に保ち、12 時間日長の条件下で発芽を 60 日間以上観察した。同定できた種についてはその場で抜き取って除去し、それ以外のものに関しては同定が可能になるまで生育させた。

2. 2. 3. 採泥地点直上の植物相調査

採集地点直上の植物相と撒きだし試験における発芽種に違いが見られるかを確かめるため、土壌採集地点を中心に 25 m² の範囲に出現した植物を記録した。福島潟北東部のヨシ原 (49-65) 13 地点と排泥地 1 地点を除く、計 44 地点において 7 月 18 日、8 月 5・7 日、9 月 17・26・30 日、10 月 1 日の合計 7 回に分けて調査を行った。なお、調査を行わなかった、ヨシ原 (48-65) 13 地点の植物相のデータは張替 (2010) のデータを用いた。作成した証拠標本は、掘削池での採集した植物と同様に、

新潟大学教育学部に収蔵した。

2. 2. 4. 土壌分析

埋土種子の構成と土壌特性の関係を明らかにするために、58 地点で採集した土壌の内 100ml 程度を使用し、以下の計測を行った。なお、各質量の計測は電子天秤 (シイベル株式会社) を用いて 0.0001g まで計測した。

A) 含水率

上澄みがある程度捨て、その後メッシュバックをサンプルが入ったボトル口に当て 30 秒濾した。その後、ビーカーにサンプルを移し替え、ビーカーごとに湿重量を計測した。湿重量の計測が終わった土壌はビーカーに入れたまま 80℃で 24 時間、105℃で 12 時間乾燥させ、電子天秤を用いて計測した。これらの過程から、含水率を下記の計算式によって求めた。

$$\text{含水率} = \frac{\text{最初の湿重量} - \text{乾燥重量}}{\text{最初の湿重量} - \text{ビーカーの湿重量}} \times 100 (\%)$$

B) 強熱減量

強熱減量を測定する前に、以下の手順に従い実験器具を準備した。るつぼを 10% に薄めた希塩酸に一晩浸けた後、15 回水道水、5 回蒸留水で洗い、105℃の恒温機で乾燥させた。その後、デシケーターに一晩入れて放冷し、各るつぼの重量を計測した。

調査する土壌は、含水率の測定の過程で乾燥させた土壌を用いた。ビーカー内から乾燥土を 10g 程度取り出し、乳鉢と乳棒で乾燥土をパウダー状になるまで粉碎した。次に約 3g の粉碎した土をるつぼに入れ、乾燥重量を計測した。そして重量を計測した乾燥土に対し、550℃の炉 (Hayashi Denko co., ltd.) で 2 時間強熱処理を施し、処理後の重量を計測した。この作業を各土壌サンプルで 3 反復行った。強熱減量は下記の計算式によって求めた。

$$\text{強熱減量} = \frac{\text{乾燥重量} - \text{強熱処理後の重量}}{\text{乾燥重量} - \text{るつぼの重量}} \times 100 (\%)$$

C) 粒径組成

粒度分析には、含水率の測定の過程で乾燥させた土壌のうち、強熱減量の計測に用いた土壌以外の全てを用いた。サンプルをタイラーの篩を用いて、7 区分 (0.063mm>, 0.063~0.125mm, 0.125~0.25mm, 0.25~0.5mm, 0.5~1mm, 1~2mm, >2mm) に分画し (ふるい法)、各区分の試料の重量を計測した。なお、データ解析に際し、0.063mm 未満をシルト、0.063~0.25mm を細砂、0.25~1mm を粗砂、1mm 以上を礫として、粒径組成を表した。

2. 2. 5. データの解析について

発芽試験の際の温度処理条件、水深条件と土壤採集地の属性が埋土種子の発芽数、発芽種数、多様度に与える影響を明らかにするために、3元配置の分散分析と、回帰分析を行った。これらの統計解析にはJMP ver.11.2.0 (SAS Institute Inc.) を用いた。なお、排泥池で採集した土壤はサンプル数が少ない (n=1) ため、解析の対象外とし、またヨシ原 (-48) もサンプル数が少ない (n=3) ため、ヨシ原 (49-65) と統一しヨシ原 (-65) として解析を行った。

土壤採集地点における埋土種子の多様度は、Shannon-Weaver の多様度指数 H' を用いて評価し、以下の式から算出した。

$$H' = - \sum_{i=1}^S (n_i/N) \log (n_i/N)$$

ここで、 S は種数、 N は総個体数、 n_i は i 番目の種の個体数を示す。 H' が高い値を示すほど、多様度が高いことになる。

また、各土壤採集地点の直上植生と撒きだし試験で発芽を確認した種との類似度を比較するため、Jaccard 指数 (CC) を以下の式によって算出した。

$$CC = \frac{c}{a + b - c}$$

a と b は、それぞれ直上植生の種数と土壤から発芽した種数、 c は直上植生と発芽した種のうち共通する種数である。CC の値が大きいほど類似度が高く、値が 1 のときには、直上植生と発芽種が完全に一致することになる。

3. 結果

3. 1. 掘削池における調査

3. 1. 1. 水生・湿生植物相調査

掘削池における植物相調査の結果、48 科 148 種の維管束植物の生育が確認された (付表 1)。この中で外来種は 12 種で、外来種率は 8.1% であった。また、絶滅危惧種 (準絶滅危惧まで含む) は、環境省 RDB (環境省, 2015)、新潟県 RDB (新潟県, 2014)、新潟市 RDB (新潟市, 2012) に掲載されたものをまとめると 10 種 (オニバス、ミズアオイ、オオミクリ、ナガエミクリ、オニナルコスゲ、ツルアブラガヤ、マツモ、ミズタガラシ、キクモ、ガガブタ) が確認された (図 3)。

2009 年、2010 年に行われた調査 (日本工営株式会社, 2011) と比較したところ、148 種の内 115 種は確認されていた。また、確認されなかった種についても、全て過去に福島潟において生育が記録されており (例えば、笹川・石澤, 1989; 狩野・石澤, 2002)、この中には、1978 年以来確認されていなかったフサモや、2001 年

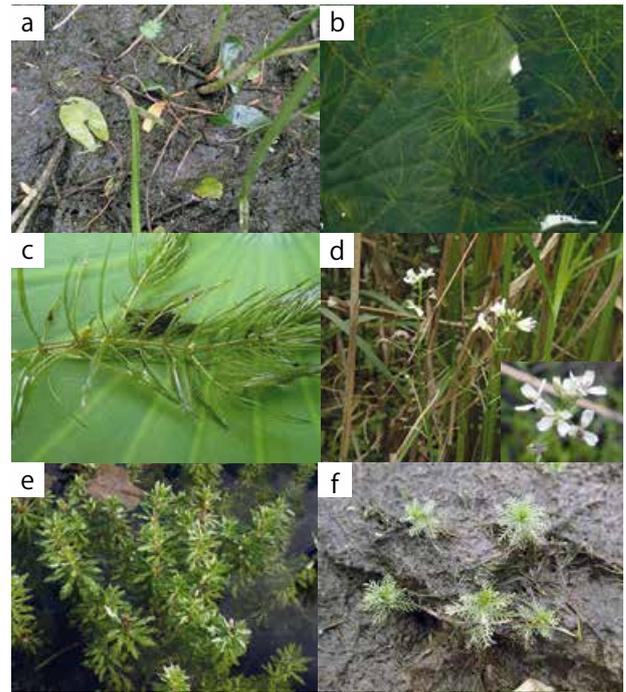


図 3. 掘削池において確認された水生・湿生植物。a) オニバス、b) オオトリゲモ、c) マツモ、d) ミズタガラシ、e) キクモ、f) フサモ。キクモは 2012 年 9 月に、それ以外は 2014 年 6 月に撮影した。

以降確認されていなかったオオトリゲモ、ミズタガラシ (狩野・石澤, 2002) が含まれていた (ただし、狩野・石澤 (2002) ではトリゲモ類としている) (図 3)。

水生植物のみに注目すると、44 種の生育が確認された (表 2)、最も多い掘削池では 26 種、最も少ない池では 7 種であった。生育形ごとに集計すると、抽水植物 30 種、浮葉植物 6 種、浮遊植物 3 種、沈水植物 5 種であった。

今回確認された 44 種の水生植物と 2009 年と 2010 年に福島潟内 (休耕田を含み、自然学習園を抜く) で確認された種 (日本工営株式会社, 2011) と比較すると、オオトリゲモ、ヤナギモ、フサモ、ホソバミズヒキモ、オニビシ、コウキクサ、ミズタガラシの 7 種が今回の調査でのみ確認された。一方、イヌスギナ、ミズワラビ (正しい同定はヒメミズワラビ)、スイレン、ミズユキノシタ、ドクゼリ、キショウブ、アシカキ、ツルヨシ、ショウブ、ミクリは確認されなかった。

出現頻度が高かった種は、ヨシ (100%)、キクモ、ヒシ (ともに 95.8%)、イグサ、ウキヤガラ、サンカクイ (いずれも 91.7%) であった。掘削池での植物の出現回数と種数の関係を図 4 に示す。出現した全ての種に関しては、各回数の種数は対数関数的に減少した (図 4A, $p < 0.0001$)。また、水生植物のみに注目すると、同様に各回数の種数は対数関数的に減少した (図 4B, $p = 0.0003$)。

表 2. 掘削池で確認された水生植物のリスト (シャジクモ科は除く)。日本工営株式会社 (2012) において確認されていない種を太字で示した。

No	生育形	種名	掘削池番号																								計
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1		コカナダモ		●															●	●			●			4	
2		オオトリゲモ	●																							1	
3	沈水	ヤナギモ									●															1	
4		フサモ																							●	1	
5		キクモ	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	23	
6		オニバス		●																						1	
7		ヒルムシロ					●											●				●	●	●	5		
8	浮葉	ホノバミズヒキモ	●	●		●	●	●	●		●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	19	
9		ヒシ	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	23	
10		オニビシ	●			●		●	●		●			●	●			●		●				●	10		
11		ガガブタ															●	●							2		
12		コウキクサ																						●	1		
13	浮遊	ウキクサ		●		●	●											●	●	●	●	●	●	●	9		
14		マツモ	●																						1		
15		コウホネ																				●	●		2		
16		ヘラオモダカ				●		●		●			●				●						●	●	7		
17		オモダカ									●	●	●				●	●				●	●	●	●	9	
18		イボクサ	●	●		●	●	●	●		●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	21	
19		ミズアオイ							●	●	●	●	●		●		●				●	●			9		
20		コナギ				●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	19	
21		オオミクリ																					●	●	2		
22		ナガエミクリ															●						●		2		
23		ヒメガマ				●	●		●		●												●		5		
24		ガマ	●	●	●	●	●			●	●	●		●		●	●	●				●	●		●	15	
25		イグサ	●	●	●	●	●	●		●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	22	
26		コウガイゼキショウ		●			●		●		●	●		●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	14		
27		ウキヤガラ	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	22	
28		カサスゲ													●			●					●		3		
29	抽水	マツバイ	●	●			●	●	●		●		●		●	●	●	●				●	●	●	●	15	
30		クログワイ						●	●	●		●	●		●		●	●				●	●	●	11		
31		ハリイ属 sp																					●	●	2		
32		ホタルイ						●									●								2		
33		イスホタルイ																	●						1		
34		カンガレイ					●		●		●	●	●			●							●	●	8		
35		サンカクイ	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●	●	●	●	22	
36		ツルアブラガヤ	●				●				●						●	●	●	●		●	●	●	10		
37		ホタルイ属 sp					●																		1		
38		チゴザサ				●							●			●							●		4		
39		クサヨシ													●												
40		ヨシ	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	24	
41		マコモ									●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●		12		
42		ハス	●				●		●		●	●			●	●								●	●	10	
43		ミゾハコベ	●	●			●	●	●		●				●	●	●	●					●		12		
44		ミズタガラシ			●																				1		
計			16	15	7	14	21	12	18	10	17	15	21	12	13	15	17	21	21	18	12	13	23	26	17	15	

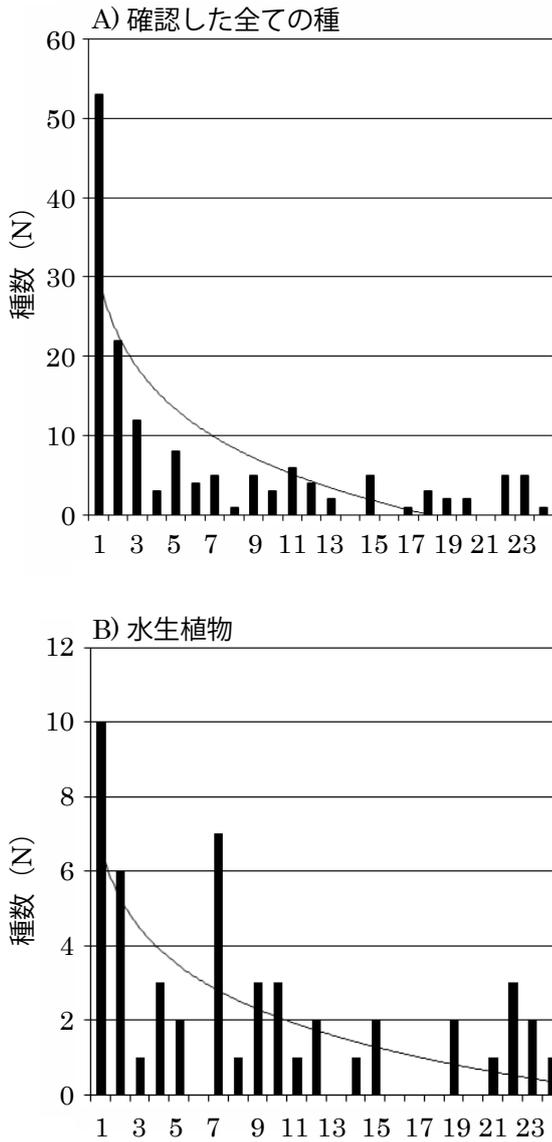


図4. 出現回数と出現した種の関係。確認した全ての種(A)と水生植物(B)についてそれぞれ示した。

3. 1. 2. 掘削池の環境

掘削池の水質は、ECが67～189 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (平均115.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$)、pHは5.70～6.35 (平均6.04)、遊離炭酸は5.36～19.3 mg/l (平均10.83mg/l)であった(表1)。なお、掘削池3と13は水が干上がっていたため、調査を行うことができなかった。

掘削池の面積は505.8～17477.4 m^2 (平均3340.9 m^2)、湖岸延長線は88.9～590.1m (平均261.2m)であった(表1)。

3. 2. 生育を確認した水生植物と環境の関係

各水質と水生植物の出現種数の間には関係は見られなかった(回帰分析, $p > 0.05$) (図5, 6)。また、掘削池の面積や湖岸延長線と水生植物の出現種数の間にも関係

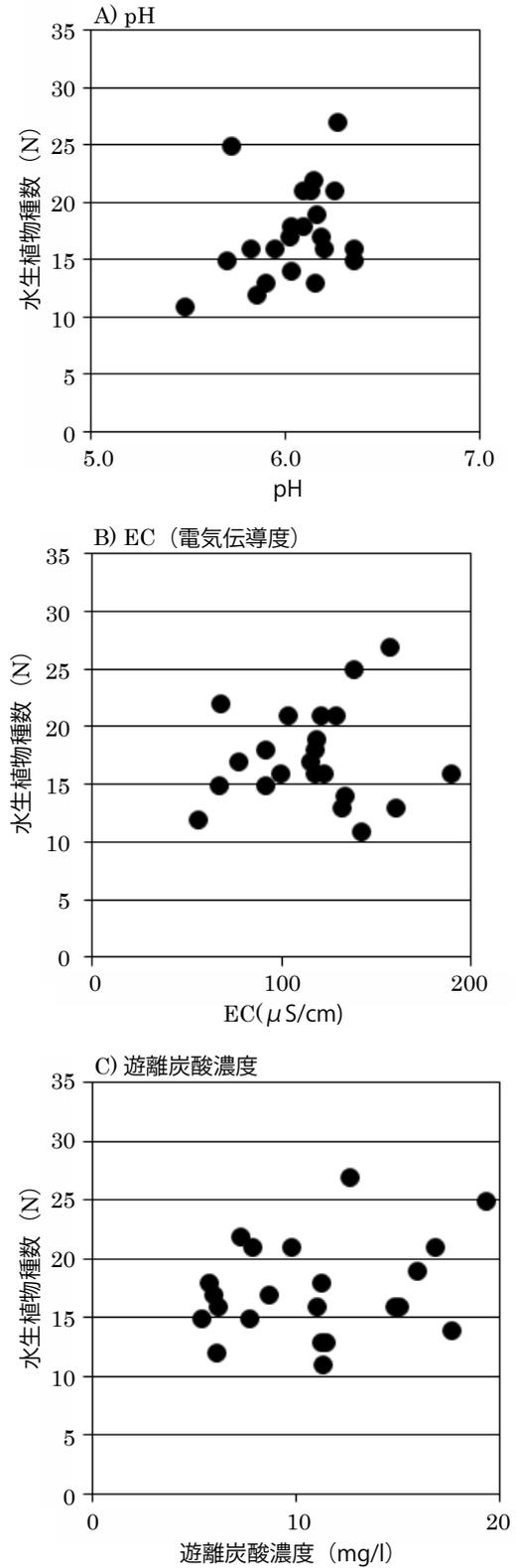


図5. pH (A)、EC (電気伝導度) (B)、遊離炭酸濃度 (C) と水生植物種数の関係。

がなく、種数面積関係も認められなかった(回帰分析, $p > 0.05$)。

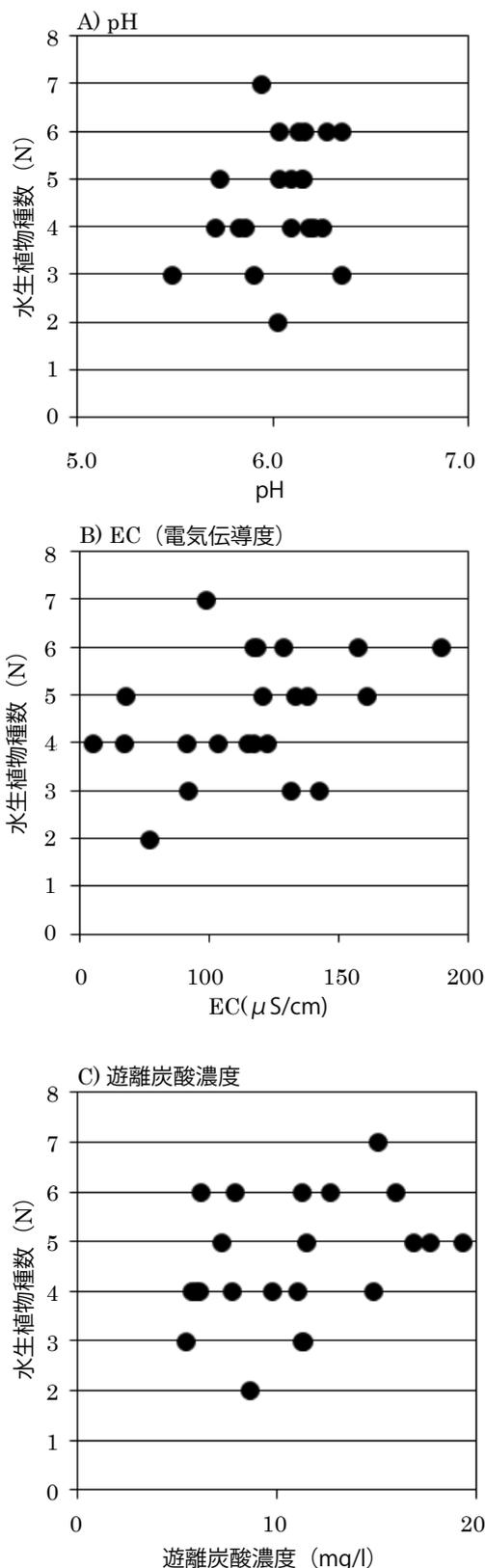


図6. pH (A)、EC (電気伝導度) (B)、遊離炭酸濃度 (C) と抽水植物を除く水生植物種数の関係。

水生植物の分布と環境要因 (pH, EC, 遊離炭酸濃度, 面積, 湖岸延長線) との関係を明らかにするため、正準

対応分析 (CCA) を行った (図7)。各軸の寄与率は CCA1 が 53.16%、CCA2 が 24.02% であり、全体の 77.18% を表した。その結果、池は大きく 3つのグループ (掘削池 1; 掘削池 19, 22, 23; それ以外の掘削池) に分かれ、水生植物も特異的にみられた池に対応して大きく 3つのグループ (マツモ; コカナダモ, ヒルムシロ, オオミクリ, マコモ; それ以外の水草) に分かれた。これら掘削池、水生植物と 5つの環境要因の間には有意な関係が見られた (Monte-Carlo test, $p=0.014$)。なお、上述の 5つの環境要因に掘削年代を加えて正準対応分析を行った場合、有意な関係はみられなかった (Monte-Carlo test, $p>0.05$)。

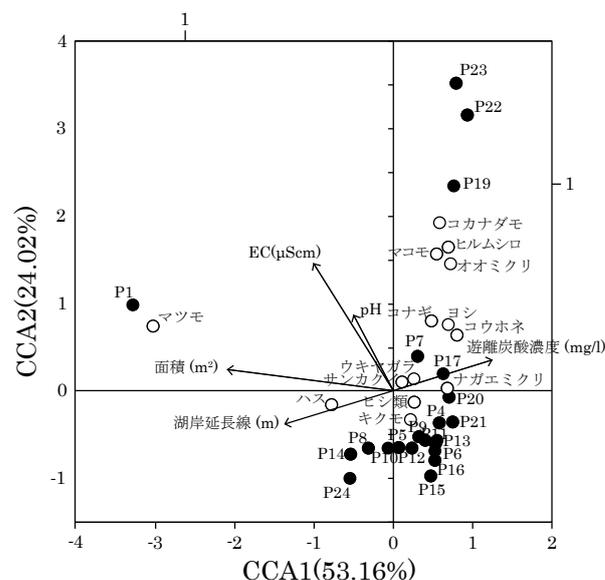


図7. CCAによる水生植物 (○)、掘削池 (●) と環境要因の関係。P は掘削池、矢印は環境要因を示し、矢印の長さは各軸に対する固有値 (値は上と右軸) を意味している。

3. 3. 埋土種子集団の調査

3. 3. 1. 撒きだし試験

撒きだし試験の結果、1388 個体の発芽を確認した。しかし、その内 140 個体 (14.7%) が枯死した。同定できたものは 1248 個体 16 科 29 種であった (表3)。コントロール条件のものから発芽は確認されなかった。発芽数の多い種と発芽数 (同定できた 1248 個体) に占める割合は、コウガイゼキショウが 446 個体 (35.8%)、アメリカアゼナ 336 個体 (24.2%)、アゼナ 257 個体 (18.5%) であった。

29 種の維管束植物は過去、福島湾で確認されている種であり、外来種はアメリカアゼナ、コヌカグサ、アメリカセンダングサの 3 種 (10.3%) であった。水生植物はコウガイゼキショウ、チゴザサ、イボクサ、ミズアオイ属、ミゾハコベ、ヤナギタデ、キクモの 7 種 (24.1%) であった。両生植物であるキクモを除く 6 種は抽水植

表 3. 撒きだし試験で発芽が確認できた種子植物のリスト。表内のそれぞれの値は各試験条件での発芽数を示す(前処理温度 4°C/35°C)。ここでは湿潤条件と湛水条件を分けて示した。

種名	学名	湿潤条件(0cm)				湛水条件(2-3cm)				計
		開放水面 n=18	休耕田 n=12	ヨシ原 (-65) n=17	ヨシ原 (65-73) n=10	開放水面 n=18	休耕田 n=12	ヨシ原 (-65) n=17	ヨシ原 (65-73) n=10	
イボクサ	<i>Murdannia keisak</i>	-/-	1/-	-/-	1/-	-/-	-/-	1/-	-/-	3/-
ミズアオイ属 sp.	<i>Monochoria</i> sp.	-/-	-/-	-/-	-/-	1/-	-/-	6/3	-/-	7/3
ヒロハイスノヒゲ	<i>Eriocaulon robustius</i> var. <i>robustius</i>	-/-	-/-	7/3	-/-	-/-	-/-	-/1	1/-	8/4
コウガイゼキショウ	<i>Juncus hizenensis</i>	29/-	7/7	221/18	8/2	15/-	-/-	97/38	4/-	381/65
コゴメガヤツリ	<i>Cyperus iria</i>	-/-	-/2	-/2	-/-	-/-	4/7	-/-	2/-	6/11
ウシクグ	<i>Cyperus orthostachyus</i>	-/-	-/1	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/1
カヤツリグサ科 sp	Cyperaceae sp.	-/-	-/-	1/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	1/-
コスカグサ	<i>Agrostis gigantea</i>	2/3	30/12	2/21	-/4	-/-	-/-	4/-	-/-	11/40
ケイスビエ	<i>Echinochloa caudata</i>	-/-	-/-	1/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	1/-
チゴザサ	<i>Isachne globosa</i>	-/-	-/-	2/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	2/-
ヌカキビ	<i>Panicum bisulcatum</i>	1/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	1/-
イネ科 sp	Poaceae sp.	-/-	-/2	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	0/2
ミゾハコベ	<i>Elatine triandra</i> var. <i>pedicellata</i>	-/-	-/-	1/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	1/-
コケオトギリ	<i>Hypericum laxum</i>	-/-	-/-	12/3	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	12/3
キカシグサ	<i>Rotala indica</i>	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	1/-	-/-	-/-	1/-
チョウジタデ	<i>Ludwigia epilobioides</i> subsp. <i>epilobioides</i>	-/-	-/-	8/1	4/-	-/-	-/-	-/-	-/1	12/2
タネツケバナ	<i>Cardamine scutata</i> var. <i>scutata</i>	2/-	-/-	5/1	3/1	-/-	-/-	-/-	-/1	10/3
ヤナギタデ	<i>Persicaria hydropiper</i>	-/-	1/-	2/2	-/-	-/-	-/-	1/-	-/-	4/2
オオイスタデ	<i>Persicaria lapathifolia</i> var. <i>lapathifolia</i>	-/-	-/-	-/1	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/1
アキノウナギツカミ	Polygonaceae <i>sieboldii</i> var. <i>sibirica</i>	-/-	-/-	1/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	1/-
コハコベ	<i>Stellaria media</i>	1/-	-/-	-/1	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	1/1
ノミノフスマ	<i>Stellaria uliginosa</i> var. <i>undulate</i>	-/-	-/-	1/-	2/-	-/-	-/-	-/-	-/-	3/-
フタバムグラ	<i>Oldenlandia brachypoda</i>	-/-	-/2	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/2
キクモ	<i>Limnophila sessiliflora</i>	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	5/-	-/-	5/-
アメリカアゼナ	<i>Lindernia dubia</i>	8/1	75/3	143/55	28/15	2/-	-/-	1/-	-/5	257/79
アゼトウガラシ	<i>Lindernia micrantha</i>	-/-	-/-	13/-	-/-	-/-	-/-	1/-	-/-	14/-
アゼナ	<i>Lindernia pyxidaria</i>	-/-	-/-	-/-	-/-	10/-	97/41	24/85	-/-	122/126
アメリカセンダングサ	<i>Bidens frondosa</i>	-/-	-/-	-/-	1/-	-/-	-/-	-/-	-/-	1/-
トキンソウ	<i>Centipeda minima</i>	1/-	-/-	1/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	2/-
計		44/4	114/29	421/108	47/22	28/0	102/48	140/127	7/7	903/345

表 4. 土壌採集環境における試験条件ごとの発芽数。

採集環境	地点数	4°C処理		35°C処理		計
		湿潤条件 (0cm)	湛水条件 (2-3cm)	湿潤条 件(0cm)	湛水条件 (2-3cm)	
排泥池	1	1	0	1	0	2
休耕田	18	410	150	146	173	879
ヨシ原(-48)	3	6	4	0	2	12
ヨシ原(49-65)	8	136	32	55	26	249
ヨシ原(66-73)	10	64	23	34	47	168
開放水面	18	46	28	4	0	78
計	58	663	237	240	248	1388

表 5. 土壌採集環境における試験条件ごとの発芽種数。

採集環境	地点数	4°C処理		35°C処理		計
		湿潤条件 (0cm)	湛水条件 (2-3cm)	湿潤条件 (0cm)	湛水条件 (2-3cm)	
休耕田	12	5	7	3	2	11
ヨシ原(-48)	3	1	0	2	1	4
ヨシ原(49-65)	14	16	11	8	4	22
ヨシ原(66-73)	10	7	4	3	3	10
開放水面	18	7	2	4	0	9
計	57	20	14	12	8	

物であり、浮葉植物、浮遊植物の発芽は確認できなかった（なお、実験終了後にアオウキクサ 2 個体の発芽を確認している）。

土壌採集環境ごとの発芽数は開放水面が 1.1 ± 3.3 (0 ~ 17) 個体、休耕田が 12.2 ± 26.5 (0 ~ 169) 個体、ヨシ原 (-48) が 1 ± 1.8 (0 ~ 5) 個体、ヨシ原 (49-65) が 7.5 ± 14.3 (0 ~ 68) 個体、ヨシ原 (66-73) が 4.2 ± 6.3 (0 ~ 31) 個体であった（表 4）。温度処理ごとにみると、4℃ 処理が 7.8 ± 21.1 (0 ~ 169) 個体、35℃ 処理が 4.3 ± 10.4 (0 ~ 71) 個体、水深条件ごとにみると、0cm が 7.9 ± 20.7 (0 ~ 169) 個体、2-3cm が 4.3 ± 11.2 (0 ~ 71) 個体であった（表 4）。単位体積当たりの発芽数は開放水面で採集した土壌で 0.0053 個体/cm³、ヨシ原 (-65) が 0.058 個体/cm³、ヨシ原 (66-73) が 0.021 個体/cm³、休耕田が 0.035 個体/cm³ であった。

土壌採集環境ごとの発芽種数は開放水面が 0.3 ± 0.7 (0 ~ 5) 種、休耕田が 0.9 ± 1.4 (0 ~ 6) 種、ヨシ原 (-48) が 0.7 ± 1.2 (0 ~ 4) 種、ヨシ原 (48-65) が 1.2 ± 1.7 (0 ~ 7) 種、ヨシ原 (65-73) が 1.1 ± 1.3 (0 ~ 4) 種であった。温度処理ごとにみると、4℃ 処理が 0.9 ± 1.4 (0 ~ 7) 種、35℃ 処理が 0.5 ± 1.0 (0 ~ 5) 種、水深条件ごとにみると、0cm が 0.9 ± 1.5 (0 ~ 7) 種、2-3cm が 0.4 ± 0.9 (0 ~ 5) 種であった（表 5）。

水深 0cm の湿潤条件でのみ確認できた種は 14 種（カヤツリグ科 sp., ヌカキビ, チゴザサ, ケイヌビエ, イネ科 sp., コケオトギリ, ミゾハコベ, ノミノフスマ, コハコベ, オオイヌタデ, アキノウナギツカミ, フタバムグラ, トキンソウ, アメリカセンダングサ）、水深 2-3cm の湛水条件でのみ確認できた種は 4 種（ミズアオイ属, キカシグサ, アゼナ, キクモ）であった（表 3）。

また、発芽前の温度処理が 4℃ の場合でのみ確認できた種は 13 種（カヤツリグ科 sp., ヌカキビ, チゴザサ, ケイヌビエ, イボクサ, ミゾハコベ, キカシグサ, ノミノフスマ, アキノウナギツカミ, キクモ, アゼトウガラシ, トキンソウ, アメリカセンダングサ）、35℃ 条件でのみ確認できた種は 4 種（ウシクグ, イネ科 sp., オオイヌタデ, フタバムグラ）であった（表 3）。

種子植物以外にも、イチョウウキゴケ (*Riccia natans* (L.) Corda) やコハタケゴケ (*Riccia huebeneriana* Lindenb.), アゼゴケ (*Physcomitrium sphaericum* (Ludw.) Furnr.), ヘチマゴケ属 sp. (*Pohlia* sp.), シダ植物の前葉体を確認した（表 6）。蘚苔類の埋土孢子からの発芽は全て水深 0cm 条件下において確認された。採集環境の間ではイチョウウキゴケが開放水面の土壌から多く確認され、ヘチマゴケ属 sp. はこれとは逆で、開放水面の土壌からはあまり観察されなかった。なお、淡水藻類であるシャジクモ科植物は、今回の土壌撒きだし試験では確認することができなかった。

表 6. 埋土種子発芽試験において孢子からの出現が確認された蘚苔類。4℃ 処理、水深 0cm 条件 (A)、35℃ 処理、水深 0cm 条件 (B) をそれぞれ分けて示す。

A) 4℃ 処理、水深 0cm 条件

採集地点	地点数	コハタケゴケ	イチョウウキゴケ	アゼゴケ	ヘチマゴケ属 sp.
ヨシ原 (-65)	11	4	1	5	3
ヨシ原 (66-73)	10	2	1	3	3
休耕田	18	2	0	4	4
開放水面	18	4	5	6	1

B) 35℃ 処理、水深 0cm 条件

採集地点	地点数	コハタケゴケ	イチョウウキゴケ	アゼゴケ	ヘチマゴケ属 sp.
ヨシ原 (-65)	11	5	0	3	3
ヨシ原 (66-73)	10	3	0	2	1
休耕田	18	5	0	1	6
開放水面	18	2	3	2	0

3. 2. 2. 土壌特性

A) 含水率

ヨシ原 (-48) の含水率は $59.9 \pm 20.4\%$ 、ヨシ原 (49-65) は $44.6 \pm 19.3\%$ 、ヨシ原 (66-73) は $58.5 \pm 15.7\%$ 、開放水面は $64.7 \pm 6.4\%$ 、休耕田は $22.4 \pm 5.5\%$ であり、休耕田の土壌の含水率が低く、開放水面では高い傾向がみられた (Kruskal-wallis の検定, $p < 0.00016$; Steel-Dwass の検定, $p < 0.05$) (図 8)。

B) 強熱減量

休耕田の強熱減量の割合は $4.1 \pm 4.2\%$ であり、開放

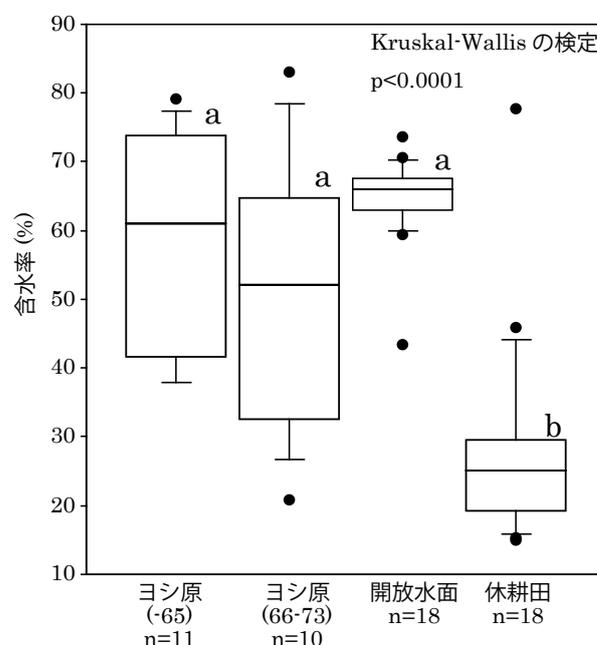


図 8. 各土壌採集環境における含水率 (%)。箱ひげ図の箱は 25%、50% (中央値)、75% を、ひげは 10%、90% 目のパーセンタイルを、ポイントは外れ値をそれぞれ示す。図内に示した異なるアルファベットは統計的に有意な差 (Steel-Dwass の検定, $p < 0.05$) がみられたことを示す。

水面 (13.4 ± 2.2%)、ヨシ原 (-48) (14.9 ± 8.3%)、ヨシ原 (49-65) (10.9 ± 6.4%)、ヨシ原 (66-73) (12.4 ± 4.7%) に比べると低かった (Kruskal-wallis の検定, $p < 0.0001$; Steel-Dwass の検定, $p < 0.05$) (図 9)。

C) 粒径組成

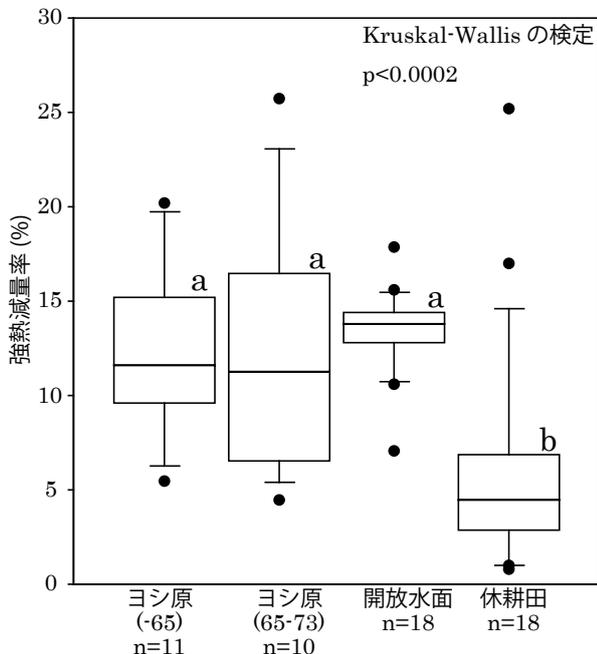


図 9. 各土壌採集環境における強熱減量 (%)。箱ひげ図の箱は 25%、50% (中央値)、75% を、ひげは 10%、90% 目のパーセンタイルを、ポイントは外れ値をそれぞれ示す。図内に示した異なるアルファベットは統計的に有意な差 (Steel-Dwass の検定, $p < 0.05$) がみられたことを示す。

土壌採集環境の粒度組成を比較すると、開放水面では、細砂 (0.063~0.25mm) が平均 56.3%、シルト (0.063mm>) が平均 31.7% 近くを占め、粒径が細かい傾向がみられた。一方、ヨシ原や休耕田は粗砂の割合が平均 50% を占めており、粒径が粗い傾向が見られた。また、休耕田や 1949 年~1965 年にかけて形成されたヨシ原の一部では礫がみられ、約 10~30% の割合を占めていた。(図 10)。

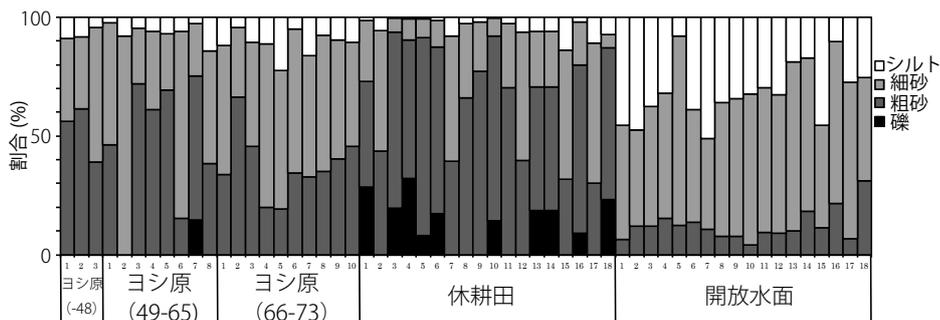


図 10. 採集土壌の粒度組成。ここでは、0.063mm 未満をシルト、0.063~0.25 mm を細砂、0.25~1mm を粗砂、1mm 以上を礫とした。

3. 2. 3. 多様性指数、発芽数、出現種数と土壌環境、撒きだし条件との関係

各実験処理の発芽した埋土種子から算出した Shannon-Weaver の多様性指数 H' を表 7 に示す。土壌採集環境でみると、最も大きい値 (0.276) を示したものはヨシ原 (-65)、最も小さかった (0.085) のものは開放水面であった。温度処理では 4°C 処理を行ったものが 0.206、35°C 処理では 0.118、0cm の水深条件は 0.201、2cm では 0.123 であった。土壌採集環境、温度処理、水深の 3 要因で 3 元配置の分散分析を行ったところ、交互作用も含めて有意な差はみられなかった。

表 7. 土壌採集環境、温度処理、水深条件ごとの発芽した埋土種子の Shannon-Weaver の多様性指数 H' 。

		H'
土壌採集環境	開放水面	0.085 ± 0.343
	休耕田	0.169 ± 0.410
ヨシ原 (-65)		0.276 ± 0.515
	ヨシ原 (65-73)	0.163 ± 0.403
温度処理	4°C	0.206 ± 0.449
	35°C	0.118 ± 0.374
水深条件	0cm	0.201 ± 0.489
	2cm	0.123 ± 0.321

発芽数に対する、土壌採集環境、温度処理、水深の 3 要因の影響を明らかにするために、3 元配置の分散分析を行ったところ、土壌採集環境の間で発芽数に有意な差がみられ (表 8, 三元配置の分散分析, $p = 0.0006$)、開放水面で採集した土壌は他の採集環境に比べて発芽数が少なかった (Steel-Dwass の検定, $p < 0.05$) (図 11, 12)。しかし、温度処理や水深の条件間には発芽数の差はみられず、交互作用も認められなかった (表 8)。

発芽数と同様に出現種数について、3 元配置の分散分析を行ったところ、土壌採集環境、温度処理、水深の 3 要因において各条件間で出現種数に有意な差が見られた (表 9)。土壌採集環境間の違いをみると、開放水面が他の採集環境に比べて出現種数は少なかった (Steel-Dwass の検定, $p < 0.05$) (図 13, 14A)。また、温度処理条件間では、35°C 処理 (平均種数 0.46) をしたもののよりも 4°C 処理 (平均種数 0.88) を行ったサンプルの方が有意に出現種数は多かった (3 元配置の分散分析,

表 8. 発芽数に対する各要因の 3 元配置の分散分析表。

要因	自由度	平方和	F 値	p 値
採集環境	3	4713.6	6.069	>0.001
温度処理	1	593.6	2.293	0.132
水深	1	691.0	2.669	0.104
採集地点×温度処理	3	359.7	0.463	0.708
温度処理×水深	1	702.8	2.715	0.101
採集地点×水深	3	406.5	0.523	0.667
地点×温度×水深	3	495.0	0.637	0.592

表 9. 出現種数に対する各要因の 3 元配置の分散分析表。

要因	自由度	平方和	F 値	p 値
採集環境	3	26.73	6.241	<0.001
温度処理	1	9.04	6.333	0.013
水深	1	23.49	16.454	<0.0001
採集地点×温度処理	3	6.04	1.411	0.241
温度処理×水深	3	0.12	0.085	0.770
採集地点×水深	1	5.49	1.283	0.281
地点×温度×水深	3	0.15	0.035	0.991

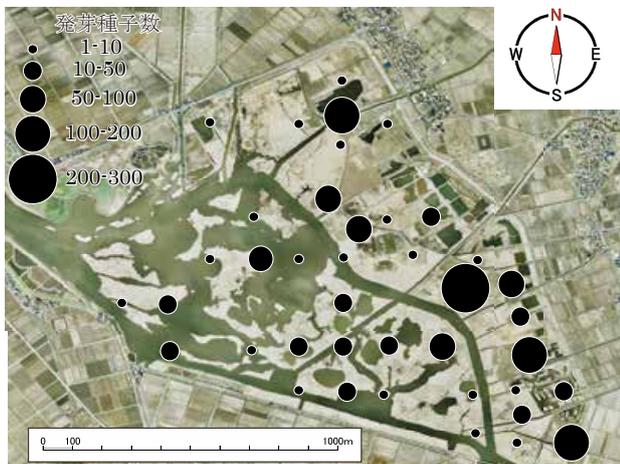


図 11. 各土壌採集地点における発芽数。円のサイズは発芽種子数を表す。

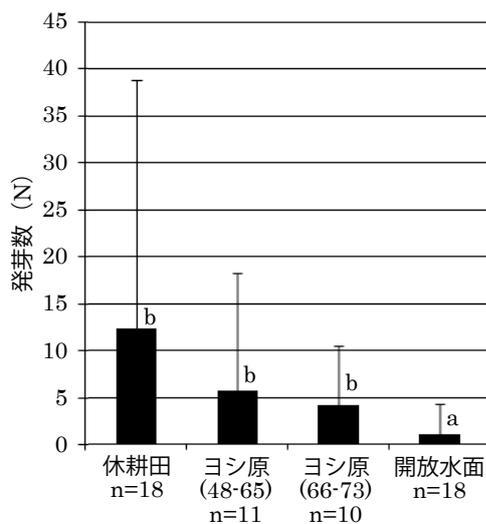


図 12. 各土壌採集環境における発芽数。エラーバーは標準偏差を示す。グラフに示した異なるアルファベットは統計的に有意な差がみられたことを示す (Steel-Dwass の検定、 $p < 0.05$)。

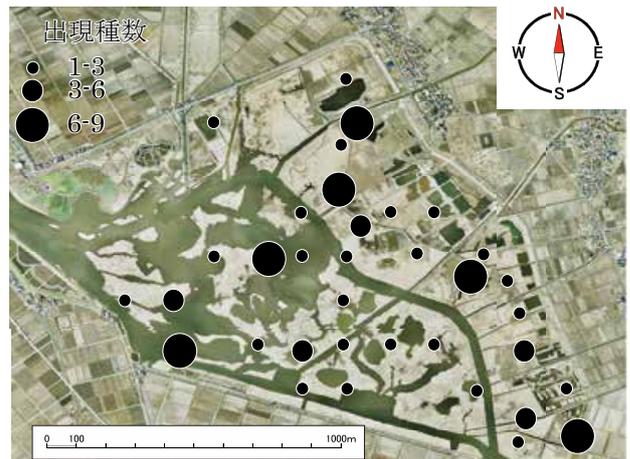


図 13. 各土壌採集地点における出現種数。円のサイズは発芽種子数を表す。

$p=0.0126$) (図 14B)。水深条件間では、水深 2-3cm (平均種数 0.32) に比べると水深 0cm (平均種数 0.92) の処理を行った方が有意に出現種数は多かった (3 元配置の分散分析、 $p < 0.0001$) (図 14C)。

強熱減量、含水率、粗砂、細砂、シルトの 5 つの土壌に関する環境要因と、発芽数と出現種数の関係を調べるため、それぞれについて単回帰分析を行った。シルトの量と発芽数の間には、シルトの量が多くなるほど発芽数が少なくなる負の関係が ($p=0.0125$)、種数と強熱減量の間には、正の関係がみられた ($p=0.0141$) (図 15)。発芽数の多かったコウガイゼキショウ、アゼナ、アメリカアゼナについて、それぞれの発芽数と上記の 5 つの環境要因との関係を個別に調べたが、有意な関係はみられなかった (単回帰分析、 $p > 0.05$)。

3. 2. 4. 採泥地点直上の植物相調査

本研究で土壌採集を行った 44 地点の直上における植物相調査を行った結果、26 科 56 種の生育を確認した。外来種はメリケンカルカヤ、アメリカセンダングサ、セイタカアワダチソウ、コカナダモの 4 種 (7.1%) で、水生植物は 12 種であり、沈水植物 1 種 (コカナダモ)、浮葉植物 3 種 (オニビシ、ヒシ、オニバス)、抽水植物 8 種 (ハス、コウホネ、ヘラオモダカ、ウキヤガラ、カササゲ、イグサ、クサヨシ、ヨシ) であった。また、福島潟で 2009 年に行われた調査結果 (張替, 2010) も含めると、計 38 科 114 種となり、外来種は 6 種 (5.3%) であった。本研究で調査を行った 44 地点の中で種数が最も多かったのは、ヨシ原 (-48) 2 (13 種)、ヨシ原 (66-73) 2、ヨシ原 (66-73) 7 (ともに 12 種) であった。これに対し、最も少なかったのは開放水面 2、3、4、7、8、12、14、15、16、17、18 であった (全て 1 種)。

張替 (2010) によって 2009 年に植生調査が行われた 13 地点と排泥池を除く、44 地点の直上植生を比較すると、ヨシ原 (-65) (6 ~ 13 種)、ヨシ原 (66-73) (4

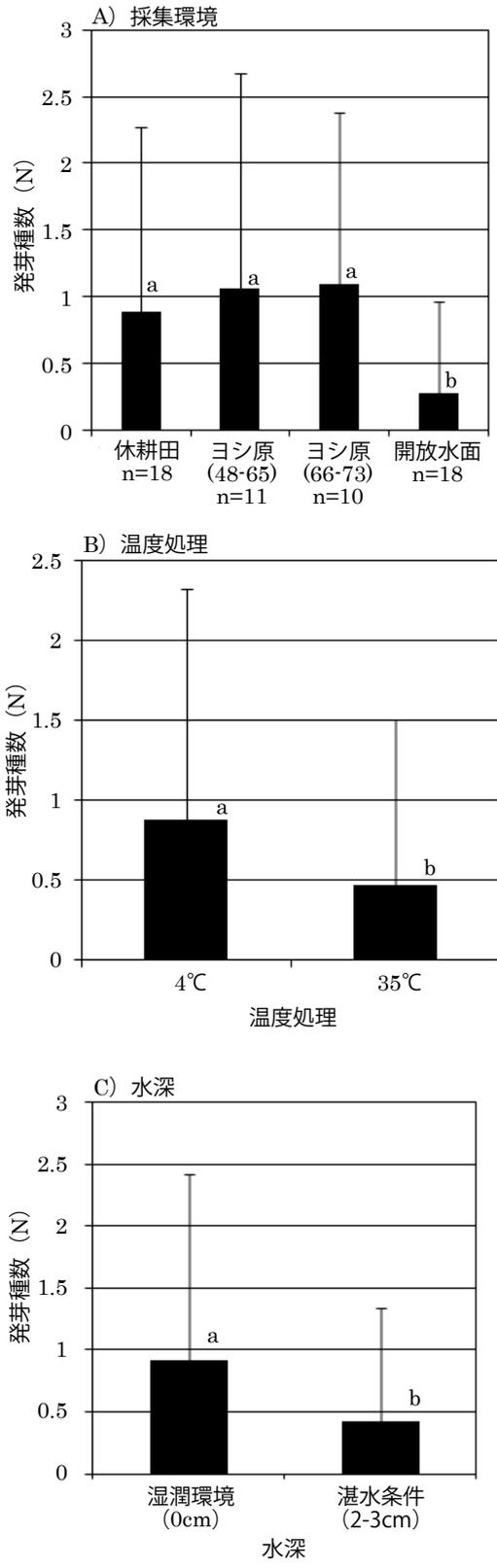


図 14. 土壌採集環境 (A)、温度処理 (B)、水深条件 (C) と発芽種数。エラーバーは標準偏差を示す。土壌採集環境 (A) のグラフに示した異なるアルファベットは統計的に有意な差がみられたことを示す (Steel-Dwass の検定, $p < 0.05$)。

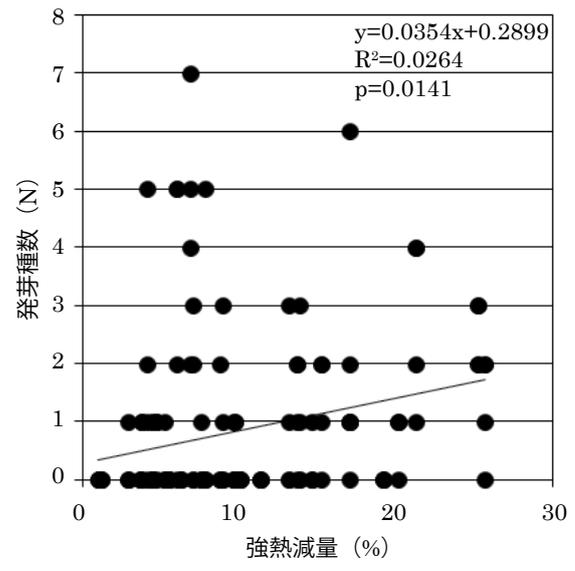


図 15. 強熱減量 (%) と発芽種数の関係。グラフ内の直線は回帰直線を示す。

~ 12 種)、休耕田 (1 ~ 11 種) の 3 つの環境に比べて、開放水面 (1 ~ 4 種) における生育種数は明らかに少なかった (Kruskal-wallis の検定, $p < 0.0001$; Steel-Dwass の検定, $p < 0.05$)。

今回植物相調査を行った 44 地点と張替 (2010) によって 2009 年に植生調査が行われた 13 地点を合わせた計 57 地点において、Jaccard 指数による直上植生と発芽種の類似度を比較すると CC 値は平均 0.0104 であった。また、今回植物相調査を行った 44 地点にのみで CC 値を算出すると平均 0.0019、2009 年に植生調査が行われた地点では 0.039 であった。

4. 考察

4. 1. 湿地に対する人為的攪乱によって生じる植物相とその特徴

福島潟では、1911 年からおよそ 10 年おきに植物相の調査が行われている (山口・佐々理, 1911; 中村, 1925; 眞保, 1934; 吉原・西山, 1966; 尾崎, 1975; 笹川・石澤, 1989; 狩野・石澤, 2002; 日本工営株式会社, 2011)。それぞれ調査の範囲、調査努力が異なるため、単純な比較はできないが、狩野・石澤 (2002) は福島潟全体で 453 種の生育を確認し、その内外来種が 90 種 (19.9%) であった。これに対して、今回確認できたものは 148 種でその内外来種は 12 種 (8.1%) と外来種率は低かった。この外来種率は、河川敷の造成によって成立した植物相が 30 ~ 40% であることと比べると極めて低く (例えば、梅原・山崎, 2007)、掘削池周辺は良好な環境であると思われる。これは、掘削池周辺に対して客土が行われていないことと、外来種がそれほど多くなかった時期に堆積した埋土種子

から再生した植生であることが関係しているのかもしれない。

本調査において、日本工営株式会社（2011）の調査では確認されなかった24種（種まで同定できなかったものを除く）の生育を確認した（付表1）。また、狩野・石澤（2002）と比較すると、14種（コウキクサ、オオミクリ、イヌホタルイ、カンガレイ、ケイヌピエ、フサモ、オニビシ、シロバナサクラタデ、ヒメヨツバムグラ、コバノカモメヅル、ムラサキサギゴケ、ガガブタ、ハナニガナ、オオチドメ）が当時確認されていない植物であった。この中の種で幾つかは誤同定により過去のリストから抜けているものと考えられた。例えば、イヌホタルイは、ホタルイと、ヒメヨツバノムグラはホソバノヨツバムグラ、コウキクサはアオウキクサ、オオミクリはミクリと形態がよく似ており、それぞれ誤同定された可能性が考えられる。コウキクサ、イヌホタルイ、ケイヌピエ、オオチドメ、ヒメヨツバムグラ、ムラサキサギゴケ、ハナニガナは湿地に生える比較的一般的な草本種であるため、今回新たに埋土種子から出現したと考えるよりも、過去の調査から漏れていたと考える方が妥当と思われる。しかし、オニビシはヒシと比較して果実期であれば見間違える可能性は非常に低い。ヒシ属は埋土種子を形成しない短命な種子であることから（Baskin and Baskin, 2014）、その由来は福島潟およびその周辺で2000年前後より以降に分布が拡大したものが、掘削池に散布されたものであると考えられる。なお、2014年現在、オニビシは潟内の広い面積に生育している（志賀・渡辺、未発表）。カンガレイについても同定を間違えるような種ではないため、狩野・石澤（2002）の調査時は潟内では稀であったのかもしれない。カンガレイは2014年現在、潟内にも生育している。

水生植物に注目すると、掘削池において確認された44種のうち、積極的な風散布や動物散布によって種子を散布する、ガマ、ヒメガマ、オニビシを除く種についてはどれも埋土種子から復元した可能性が考えられる。周囲から散布されて定着した可能性も否定できないが、掘削池はそれぞれ閉鎖的な環境であり、福島潟本体を含めた外部との水の出入りは限られている。そのため、水散布による種子流入の可能性も低いと考えられる。今回確認された水生植物の中でも、2009年、2010年に行われた福島潟での調査（日本工営株式会社、2011）には確認されていなかった7種（オオトリゲモ、ヤナギモ、フサモ、ホソバミズヒキモ、オニビシ、コウキクサ、ミズタガラシ）のうち、オニビシを除く6種は埋土種子由来である可能性が極めて高い。特に、掘削池でのみ確認されたミズタガラシは県内での生育地が限られており、外部から種子供給があった可能性は非常に低い。また、笹川・石澤（1989）と狩野・石澤（2002）は同じ場所でミズタガラシの生育を確認しているが、今回の調

査では、掘削池3（図1）で確認しており、その場所が異なる。したがって、ミズタガラシは埋土種子由来であることが強く示唆される。

正準対応分析では、掘削池1がCCA1で大きく分かれた。CCA1は掘削池の面積や湖岸延長線と強い負の相関関係がみられ（図7）、掘削池1を除いた他の23の掘削池はほとんど同じような大きさであった（表1）。これは、各年度に計画された掘削土砂量がある程度決まっているおり、同じような掘削工事が行われたためだと思われる。

24個の掘削池は大きく3つのグループに分かれ、水生植物も特異的に分布していた池に対応して大きく3つのグループに分かれた（図7）。マツモは面積や湖岸延長線と関係がみられたが、これはマツモが突出して面積が大きく、湖岸延長線が長い掘削池1のみで確認されたことが影響している。マツモは浮遊植物であることから（角野、1994；角野、2014）、安定的な止水環境に生育することが予想され、これと矛盾しない結果であった。また、同池では種子繁殖も行っており（図3c）、同種の生育に適した環境であると考えられる。

掘削池の遊離炭酸濃度は高い値（平均10.83mg/L）、pHも中性以下の値（平均6.04）を示した。日本における河川の原水の遊離炭酸濃度は一般的に5.0mg/L以下の値であるが、地下水は10～30mg/Lと河川より高い値を取ることが報告されている（厚生労働省、「遊離炭酸」<http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/dl/moku19.pdf>, 2015年2月13日確認）。掘削池周辺の土壌は砂質で、掘削池の標高は海拔0m以下である。これらのことから、掘削池には周囲から伏流水が流れ込んでいる可能性が高い。孤立しており、多くは繋がっていないにも関わらず、掘削池間の水質に大きな差がみられなかったことは、休耕地地帯一帯において伏流水が豊富であることが一因かもしれない。

水温やpHなど水環境は沈水植物の分布を決定する重要な要因である。沈水植物は光合成を行う際に、溶存無機炭素に依存する。また、水中の溶存CO₂は遊離炭酸（CO₂ + 炭酸H₂CO₃）、炭酸水素イオン（HCO₃⁻）、炭酸イオン（CO₃²⁻）の形態を取るが、これらは主にpHによって存在比が決まる（半谷・小倉、1985）。沈水葉を持つ水生植物には、光合成炭素源として遊離炭酸のみを利用する種、これに加えてHCO₃⁻を利用できる種が知られており、この違いが沈水植物の分布を規定する重要な要因として考えられてきた（例えば、Kadono, 1980；Kadono, 1982）。そのため、遊離炭酸濃度の高い掘削池は、水生植物にとって良好な水質環境が維持されていると思われる。

今回の調査地は2007年から2012年にかけて掘削され、水生・湿生植物の植生の遷移が観察されることが期待されたが、掘削後の経過年数の違いと水生植物の分布

量の間には関係は認められなかった。これは、掘削池間の水質に大きな差がなく、似たような形状の池に造成されたことに加えて、埋土種子の構成も大きな差がみられなかったためかもしれない。これに対して、掘削池周辺の陸地では土壌の比高と乾燥の程度に対応して、水田植生からヨシ群落やセイトカアワダチソウ群落へと遷移が進んでいる。今回調査した掘削池では、セイトカアワダチソウの出現頻度が非常に高かった (91.7%)。セイトカアワダチソウは水面に対する比高が高いと優占群落を形成するが、比高が低く、湿潤な環境では繁茂が制限されることが指摘されている (西廣ら, 2007)。埋土種子を用いた植生復元を試みる上で、外来種対策は重要な課題であるが、セイトカアワダチソウに関しては、湿潤状態を維持できるような比高の高さにすることで、その繁茂を防げると思われる。水生・湿生植物群落を維持するためには、水位変動や土壌の攪乱がある程度生じる環境を整える必要があるだろう。

4. 2. 福島潟における埋土種子集団の構成と土壌環境の関係

これまで、福島潟では同定が不確かなものも合わせて 880 種の維管束植物が記録されているが (日本工営株式会社, 2011)、本調査において、埋土種子からの発芽が確認されたものはおよそ 30 種であった。これは、撒きだした土壌の量が少なかったためであると考えられる。霞ヶ浦で行われた大規模な撒きだし試験では、65200 m²もの面積に土壌を撒きだし、180 種の出現を確認している (Nishihiro et al., 2006) のに対し、本調査ではそのわずか 0.00726% の 4.73 m² の面積に 1cm の厚さで土壌を撒き出したにすぎない。撒きだす土壌の量をさらに増やせば、より多くの種の発芽を得ることができると思われるが、限られた土壌の量で埋土種子に関する研究が行われているのが実際である (例えば、Boedeltje et al., 2002; 津田・西廣, 2009; Rodrigo et al., 2010)。狩野 (2000) は、新潟県の佐潟 (新潟市西区) の底泥 (φ 7cm × 30cm) を 103 か所から得て、撒きだし試験を行い、20 分類群の発芽を確認している。また、これとは別に佐潟のヨシ原の埋土種子の調査において 22 分類群の発芽を確認している (狩野, 2000)。発芽試験方法が異なるものの、本研究はこの結果と比べても出現種数が多く、福島潟の植物相の多様性がある程度表していると言えるだろう。

また、開放水面において採集した土壌からは、コウガイゼキショウやキクモなどの水生植物が合計 7 種 (24.1%) 出現した。しかし、沈水植物や浮葉植物、また淡水藻類であるシャジクモ科の植物の発芽を確認できなかった。各地の湖沼で行われた撒きだし試験による埋土種子の調査では、これら沈水植物、浮葉植物、淡水植物の発芽が確認されている (例えば、久城ら, 2009;

松本ら, 2009; 今西ら, 2012)。掘削池の植物相調査では埋土種子由来だと思われる水生植物に加え、シャジクモ科植物の生育を確認できたことから (附表 1)、撒きだし試験で水生植物の発芽が確認できなかった理由として、土壌における水生植物の埋土種子の密度が低かったためか、発芽条件が適当ではなかったことが考えられる。より正確な埋土種子の構成を明らかにするためには、撒きだす土壌の量を増やしたり、発芽条件を変更するなどしたりして、再度検討する必要があるだろう。また、今回の研究で行った撒きだし法よりも土壌から直接種子を取り出す、すすぎ法の方が 6 ~ 18 倍の生存種子を取り出せるとする報告もあり (Bernhardt et al., 2008)、撒きだし試験で用いた土壌サンプルの中に、本研究では発芽条件が合わずに確認できなかった埋土種子が含まれている可能性が高いと思われる。

本調査では蘚苔類は湛水条件では確認できず、水深 0cm の湿潤条件でのみ発芽がみられた。孢子まで含めた散布体バンクの構成を明らかにする際には、水深 0cm の湿潤条件以外にも様々な土壌水分条件を検討する必要があるだろう。琵琶湖の浚渫土壌に関する埋土種子の調査では、散布体は粒径の小さいシルトや粘土を多く含んだ土壌に多く含まれていることが指摘されており (今西ら, 2012)、福島潟の開放水面の底泥の埋土種子量は多くないが、孢子も含めて貴重な散布体バンクであると考えられる。

今回の撒きだし試験で確認された外来種は 29 種中 3 種 (10.3%) であり、種数は少なかった。しかし、個体数では、外来種 3 種で全発芽数の 31.1% (388 個体) を占めており、土壌中に多くの外来種の埋土種子が存在している可能性が示唆された。松本ら (2009) は巨椋池における散布体バンクの調査において、深さ 20 ~ 30cm の土壌から外来種の発芽が確認できなかったと報告している。これは当該の深さの土壌が、外来種の繁茂する前のものであったことを意味している。本研究において使用した土壌は深さ 1 ~ 19cm の範囲であり、比較的最近の土壌であったと考えられる。そのため、外来種の埋土種子量が多かったのかもしれない。埋土種子を用いた植生復元を行うに際して、外来種の種子を含まない土壌の利用を行うためにも、土壌の深さと埋土種子の構成の関係を明らかにする必要があるだろう。

今回の調査では、福島潟内でも環境、場所によって埋土種子密度に差がみられることが明らかになった。特に開放水面から採集した土壌では、他の土壌採集地点と比べて、発芽数や種数が少なかった (図 12, 14)。本研究での撒きだし量は計 0.047328 m²、その内、開放水面で採集した土壌に限ると撒きだし量は、0.014688 m² である。埋土種子の密度を単純に計算すると、開放水面では 0.0053 種子 / cm² であるのに対し、ヨシ原 (-65) やヨシ原 (66-73)、休耕田で採集した土壌ではそれぞれ 0.

0291 種子/cm³、0.0206 種子/cm³、0.0598 種子/cm³となる。狩野(2000)が佐潟で行った埋土種子の調査では、開放水面の土壤の埋土種子の密度は 0.0078 種子/cm³、ヨシ原では 0.1302 種子/cm³であった。福島潟、佐潟ともにヨシ原などの陸地よりも開放水面の土壤の方が種子密度が低かったが、これは湖底の土壤での種子死亡率が高いこと、底泥への種子供給量がそもそも少ないことが関係していると思われる。ただし今回の調査では、開放水面ではエクマン・バージ式採泥器、それ以外では手製のサンプラーを用いて採泥を行ったため、採集環境による埋土種子量の違いは、土壤のサンプリング方法の違いによる可能性も考えられる。なお、福島潟の陸地の土壤の埋土種子の密度が佐潟に比べて低い理由の 1 つとして、土壤を撒きだす際に 1cm の表土を除去したためであると考えられる。一般的に温帯から冷温帯域に分布する植物は、種子の休眠打破に冷温処理が必要なものが多く (Baskin and Baskin, 2014)、これまでの埋土種子の発芽試験においても実験に際して冷温処理が施されてきた (例えば、狩野, 2000; Boedeltje et al., 2002; 津田・西廣, 2009; Rodrigo et al., 2010)。今回の調査においても、春の発芽条件を想定した 4℃ 処理をした土壤の方が秋発芽の条件を考えた 35℃ 処理をした土壤よりも出現種数が多かった。これは、春発芽する種の種子が土壤中に多く含まれていたことを示しているが、35℃ 処理でしか発芽を確認できなかった種も 4 種確認された。実験圃場における撒きだし試験を実施する場合、多くの種の休眠打破を行うために、2 年の経過観察を行うことが勧められているが (Baskin and Baskin, 2014)、室内での撒きだし試験において正確に埋土種子集団の構成を明らかにしようとするならば、4℃ 処理、35℃ 処理共に必要であると考えられる。

水深と発芽する埋土種子の関係は、水深によって発芽する種が異なり、水位が高くなると出現する種数が減少することが知られている (中本ら, 2000)。また、巨椋池干拓地 (京都府) における散布体バンクに関する研究 (松本ら, 2009) においても、水深 0cm の方が 5cm の条件に比べ、発芽数、出現種数共に多いという結果が得られている。本研究においても、0cm の湿潤条件よりも 2 ~ 3cm の湛水条件の出現種数が少なく、上記の先行研究の結果と一致した。水深 0cm の湿潤条件でしか確認できなかった種が 14 種、水深 2 ~ 3cm の湛水条件でしか確認できなかった種が 4 種あり、この 4 種 (ミズアオイ属、キクモ、キカシグサ、アゼナ) は全て水生・湿生植物であった。水生植物の中には、嫌気条件下でしか発芽しないものも多く (例えば、Smits et al., 1990)、複数の水深条件を設定することにより、より多くの水生植物の発芽を確認することができたかもしれない。

埋土種子の多くは直上の植生から供給されるものであ

るが、実際の土壤中の種構成と地上部の植生には、ほとんど関係が見られないことが知られている (例えば、Thompson and Grime, 1979)。また、直上植生と同じ種の植物体が埋土種子から得られたとしても、遺伝的には異質なものである場合も知られている (Uesugi et al., 2009)。本研究においても、確認された埋土種子由来の個体は過去福島潟において確認されている種であったが、土壤を採集した地点の植生との類似性は極めて低かった。この結果は、過去に成立していた植生が現在の地上部の植生と大きく異なっている可能性を示している。しかし、福島潟は複数の河川から土砂が流れ込む環境にあるため、常に土壤に対して成立している植生とは異なる種組成の埋土種子が供給されているのかもしれない。今回の発芽試験では表層 1cm の土壤を取り除いており、今後この土壤に地上部の植生由来の種子が含まれているのかを確認することにより、福島潟の土壤への種子供給のパターンがより明らかになるとと思われる。

土壤中のシルトの割合と発芽数の間に負の関係がみられたが、これは開放水面で採集した土壤の発芽数が少なく、またシルトの割合が高かったことが影響していると思われる。これとは別に、強熱減量と発芽種数の関係には正の関係がみられた (図 15)。強熱減量は堆積環境を評価する指標でもあり、有機物が堆積するような環境において埋土種子もより多く残されていると考えられる。

4. 3. 開放水面拡大のための掘削工事への提言

本研究より、土壤を掘削することによって部分的にも失われた植物の群落が回復する可能性が示された。また、福島潟の土壤には埋土種子が一定量存在し、適した環境条件下において撒きだすことによって発芽させて植生を復元できる可能性も明らかになった。意図せずに掘削してもある程度の植生復元の効果がみられたことから、事前に保全再生計画を立てた上で作業を行うことによって、大きな効果を得られると思われる。

狩野・石澤 (2002) は、浚渫により広げられた水域では、福島潟から姿を消した植物が復活していないことを確認しており、浚渫泥と共に、そこに含まれている埋土種子も除去されてしまった可能性を指摘している。本研究において、30 種近くの植物の種子が埋土種子として残されており、特に掘削予定地に含まれているヨシ原には質、量ともに豊富な埋土種子が存在していることが示された。掘削池において確認された埋土種子由来の植生の種多様性の高さ、失われた植物の再生からも明らかのように、福島潟の土壤に含まれている埋土種子は植生復元に非常に重要な役割を果たすと考えられる。掘削工事や浚渫によって発生する土壤の全てを、水生植物の植生復元のために利用することは現実的ではないが、生存している埋土種子が多いと考えられる表層の土壤を剥ぎ

取って残しておき、植生復元に利用すべきだろう。築堤に用いたり、廃棄するものは、埋土種子密度が極めて少ない層の土壌にした方がよいであろう。そのため、これまでの議論にもあったように、どの深度までの土壌に、どのような種組成の埋土種子が分布しているのか明らかにすることは、今後の大きな課題と言えるだろう。なお、掘削するにあたり、事前の植物相調査で絶滅危惧種の集中的な分布が確認された「ホットスポット」は、そのまま保存すべきだと考えられる。現在の絶滅危惧種・希少種の種子供給源として重要であることはもちろん、移植を失敗する可能性もあり、個体群が絶滅してしまう恐れがある。

また、埋土種子から成立する植生が水位によって異なることも既に報告されており (Nishihiro et al., 2006)、発芽や生育に適した水深条件が異なる植物を効果的に植生復元するために、水際においてなだらかな移行帯 (エコトーン) を創出することが必要となるであろう。様々な比高の環境を作りだすこと、その後の植生遷移を考えると適度な土壌のかく乱や、水位変動がみられる環境を維持することが種多様性の高い水辺環境を復元することに繋がると考えられる。

福島潟は一級河川であり、その水位の維持は厳格になされているが、水辺のかく乱環境を維持するためにも、弾力的に水位変動させる仕組みを考える必要がある。淀川 (大阪府・京都府) のように全く氾濫によるかく乱が生じなくなったために、ヨシ原の乾燥化と遷移が進み水生・湿生植物が失われ、河川内のわんど環境では外来種が爆発的に繁茂するようになった例も知られている (志賀・大阪市立自然史博物館淀川水系調査グループ植物班, 2013)。また、霞ヶ浦では水門の整備によって、人工的な水位変動に変化したことにより、水生・湿生植物の種子からの更新が正常に行われなくなっていることが示されている (Nishihiro et al., 2004a, 2004b)。埋土種子による植生回復を一時的なものにしないためにも、かく乱や水位変動を含めた水辺環境の復元が、植生復元の次の大きな課題となるだろう。

5. 謝辞

本研究は新潟県新潟市からの受託研究「福島潟における植生の現状と埋土種子集団の構成」として行った。本研究を進める上で、ビュー福島潟の関係諸氏 (福島潟みらい連合) には現地調査に際して便宜を図っていただいた。長谷川哲夫氏 (新潟市) には現地調査に際して船を出していただき、石田真也氏 (新潟市) には福島潟の植生調査データを提供していただいた。新潟薬科大学の白崎仁博士には、土壌発芽試験において確認された蘚苔類の同定をしていただいた。調査・実験では、丸山紗知氏 (新潟市潟環境研究所)、平澤優輝氏 (新潟大学教育学部)、山崎大雅氏、柳岡優里氏、喜多俊介氏、矢口隼

大氏、小林美雨氏 (新潟大学教育学部) に手伝っていただいた。また、高清水康博博士 (新潟大学教育学部) には、調査・実験道具を貸していただいた。これらの方々に深く感謝する。

6. 引用文献

- Baskin C. C. and J. M. Baskin (2014) *Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination*. Second Edition. Academic Press, Oxford.
- Bernhardt K.-G., M.Koch, M. Kropf, E. Ulbel, and J. Webhofer (2008) Comparison of two methods characterizing the seed bank of amphibious plants in submerged sediments. *Aquatic botany* 88: 171-177.
- Boedeltje G., G. N. J. ter Heerdt, and J.P. Bakker, (2002) Applying the seedling-emergence method under waterlogged conditions to detect the seed bank of aquatic plants in submerged sediments. *Aquatic Botany* 72: 121-128.
- 福原晴夫 (2011) 新潟県の砂丘湖における希少な水生植物の分布 (予報). 新潟大学教育学部研究紀要, 自然科学編 4: 35-44.
- 張替 徹 (2010) 越後平野に残存する 3 湖沼の湖岸における植物分布を規定する要因. 新潟大学農学部卒業論文.
- 池田佳子・荒木佐知子・村中孝司・鷲谷いづみ (1999) 浚渫土を利用した水辺の植生復元の可能性の検討. *保全生態学研究* 4: 21-31.
- 生嶋 功 (1972) *水界植物群落の物質生産 I. 水生植物*. 共立出版, 東京.
- 今橋美千代・鷲谷いづみ (1996) 土壌シードバンクを用いた河畔冠水草原復元の可能性の検討. *保全生態学研究* 1: 131-147.
- 今西亜友美・小田龍聖・今西純一・夏原由博・森本幸裕 (2012) 琵琶湖の浚渫土中の散布体バンクの種組成と空間的分布. *日本緑化工学会誌*, 38: 85-90.
- 熊 春萌・濱端悦治・余 輝・杜 宝漢 (2007) 琵琶湖と洱海における水位変化による水質・生物群落の変化の比較研究. *滋賀県琵琶湖環境科学研究センター試験研究報告書* 3: 110-118.
- Kadono Y. (1980) Photosynthetic carbon sources in some *Potamogeton* species. *Botanical Magazine, Tokyo* 93: 185-194.
- Kadono Y. (1982) Occurrence of aquatic macrophytes in relation to pH, alkalinity, Ca⁺⁺, Cl⁻ and conductivity. *Japanese Journal of Ecology* 32: 39-44.

- 角野康郎 (1994) 日本水草図鑑, 文一総合出版, 東京.
- 角野康郎 (2014) 日本の水草, 文一総合出版, 東京.
- 環境省 (2015) レッドデータブック 2014 - 日本の絶滅のおそれのある野生生物 - 8 植物 1 (維管束植物). ぎょうせい, 東京.
- 狩野裕章 (2000) 佐潟におけるシードバンクの分布とその構成~特に土壤環境. 植生変化とシードバンクの関係について~. In 新潟市:平成 11 年度新潟市「佐潟学術研究奨励補助金」研究成果報告書. pp. 1-20, 新潟市市民局・環境部環境対策課, 新潟市.
- 狩野裕章・石澤 進 (2002) 福島潟の植物相と植生. 福島潟環境保全対策推進協議会, 豊栄.
- 久城 圭・林 紀男・西廣 淳 (2009) 印旛沼における「高水敷の掘削」による散布体バンクからの沈水植物群落の再生. 応用生態工学 12: 141-147.
- 眞保一輔 (1934) 北蒲原郡. 福島潟鬼蓮群落及び浮島. In 新潟県:新潟県史蹟名勝天然記念物調査報告書 第四輯. pp. 77-81, 新潟県.
- 増田理子・西村文武 (2009) 第 9 章 埋土種子集団に保存された遺伝的多様性一攪乱依存種の失われた変異を回復する. In 種生物学会 (編): 発芽生物学 種子発芽の生理・生態・分子機構, pp.211-220, 文一総合出版, 東京.
- 松本 仁・今西亜友美・今西純一・森本幸裕・夏原由博 (2009) 巨椋池・横大路干拓地の表層土壌中における水生植物散布体の残存状況とその鉛直分布. ランドスケープ研究 72: 543-546.
- 中本 学・名取昭三・水澤 智・森本幸裕 (2000) 耕作放棄水田の埋土種子集団一敦賀市中池見の場合一日本緑化工学会誌 26: 142-153.
- 中村正雄 (1925) 新潟県天産誌. 中野財団, 新潟.
- 日本工営株式会社 (2011) 一級河川福島潟広域河川改修 (大規模) 環境モニタリング調査業務報告書. 日本工営株式会社, 東京.
- 新潟県 (2001) レッドデータブックにいがた一新潟県の保護上重要な野生生物一. 新潟県.
- 新潟県 (2014) 「新潟県第 2 次レッドリスト (植物編) の公表」 <http://www.pref.niigata.lg.jp/kan-kyokikaku/1356792269043.html>, 2015 年 1 月 10 日確認.
- 新潟市 (2012) 大切にしたい野生生物一新潟市レッドデータブッカー. 新潟市環境部環境対策課, 新潟.
- Nishihiro J., S. Araki, N. Fujiwara, and I. Washitani (2004a) Germination characteristics of lakeshore plants under an artificially stabilized water regime. *Aquatic Botany* 79: 333-343.
- Nishihiro J., S. Miyawaki, N. Fujiwara, and I. Washitani (2004b) Regeneration failure of lakeshore plants under an artificially altered water regime. *Ecological Research* 19: 613-623.
- Nishihiro J., M.A. Nishihiro, and I. Washitani (2006) Assessing the potential for recovery of lakeshore vegetation: species richness of sediment propagule banks. *Ecological Research* 21: 436-445.
- 西廣 淳・西口有紀・西廣 (安島) 美穂・鷺谷いづみ (2007) 湿地再生における外来植物対策: 霞ヶ浦の湖岸植生帯再生地における市民参加型の試み. *地球環境* 12: 65-80.
- Nishihiro, J., M. Akasaka, M. Ogawa, and N. Takamura (2014) Aquatic vascular plants in Japanese lakes. *Ecological Research (Data paper)* 369. http://db.cger.nies.go.jp/JaLTER/ER_DataPapers/archives/2014/ERDP-2014-01.
- 尾崎富衛 (1975) 福島潟の植物. In 豊栄市・水原町: 福島潟・瓢湖自然環境総合調査報告書, pp.16-62. 新潟県豊栄市・水原町.
- Rodrigo A. M., J. L. Alonso-Guillén, and I. Soulié-Märsche (2010) Reconstruction of the former charophyte community out of the fructifications identified in Albufera de València lagoon sediments. *Aquatic Botany* 92: 14-22.
- 笹川通博・石澤 進 (1989) 新潟県福島潟の植物. 新潟県豊栄市・福島潟環境保全対策推進協議会, 豊栄.
- 志賀 隆・大阪市立自然史博物館淀川水系調査グループ植物班 (2013) プロジェクト Y みんなで淀川の自然を調べよう. 分類 13: 21-29.
- Smits A. J. M., P. H. van Avesaath, and G. van der Velde (1990) Germination requirements and seed banks of some nymphaeid macrophytes: *Nymphaea alba* L., *Nuphar lutea* (L.) Sm. and (Gmel.) O. Kuntze. *Freshwater Biology* 24: 315-326.
- Thompson K., and J. P. Grime (1979) Seasonal variation in the seed bank of herbaceous species in ten contrasting habitats. *Journal of Ecology* 20: 141-156.
- 津田 智・西廣美穂 (2009) 第 14 章 生態学的発芽実験 I. 埋土種子の調査. In 種生物学会 (編): 発芽生物学 種子発芽の生理・生態・分子機構, pp.319-325, 文一総合出版, 東京.
- Uesugi R., J. Nishihiro, Y. Tsumura, and I. Washitani (2007) Restoration of genetic diversity from soil seed banks in a threatened aquatic plant, *Nymphoides peltata*. *Conservation Genetics* 8: 111-121.

- 梅原 徹・山崎俊哉（2007）大和川水系の帰化植物.
In 大阪市立自然史博物館（編著）：大阪市立自然史
博物館叢書① 大和川の自然, pp.109-110. 東海大
学出版会, 秦野.
- 鷺谷いづみ（1997）「植生発掘！」のすすめ. 保全生態
学研究 2：2-7.
- 山口紋之助・佐々理宣造（1911）福島潟調査報告. 新
潟県博物調査会誌 5：49-56.
- 吉原正秀・西山邦夫（1966）新潟県福島潟の植物. 長
岡市立博物館研究報告 4：23-43.

付表 1. 掘削池で確認された植物のリスト (シャジクモ科を含む)。春のみに確認された種を○、秋のみを●、春・秋両方確認した種を◎として示した。出現頻度は 24 個の掘削池のうち確認された池の数を、H12 は狩野・石澤 (2002) による調査、H22 は日本工営株式会社 (2011) の調査の結果 (○、在; ×、不在) を示している。

No.	種名	学名	出現	出現頻度	RDB (全国/新潟市/新潟県)	在来・ 外来の別	H12	H22
シャジクモ科								
1	シャジクモ属 sp	<i>Chara</i> sp.	○	1			×	×
トクサ科								
2	スギナ	<i>Equisetum arvense</i>	○	11		在来種	○	○
コウヤワラビ科								
3	コウヤワラビ	<i>Onoclea sensibilis</i> var. <i>interrupta</i>	○	1		在来種	○	○
スイレン科								
4	オニバス	<i>Euryale ferox</i>	○	1	VU/VU/VU	在来種	○	○
5	コウホネ	<i>Nuphar japonica</i>	○	2		在来種	○	○
オモダカ科								
6	ヘラオモダカ	<i>Alisma canaliculatum</i> var. <i>canaliculatum</i>	◎	7		在来種	○	○
7	オモダカ	<i>Sagittaria trifolia</i> var. <i>trifolia</i>	◎	8		在来種	○	○
トチカガミ科								
8	コカナダモ	<i>Elodea nuttallii</i>	◎	4		外来種	○	○
9	オオトリゲモ	<i>Najas oguraensis</i>	◎	1		在来種	×	×
ヒルムシロ科								
10	ヒルムシロ	<i>Potamogeton distinctus</i>	◎	6		在来種	○	○
11	ホソバミズヒキモ	<i>Potamogeton octandrus</i> var. <i>octandrus</i>	◎	19		在来種	○	×
12	ヤナギモ	<i>Potamogeton oxyphyllus</i>	○	1		在来種	○	×
サトイモ科								
13	コウキクサ	<i>Lemna minor</i>	◎	3		在来種	×	×
14	ウキクサ	<i>Spirodela polyrhiza</i>	◎	1		在来種	○	○
ススキノキ科								
15	ヤブカンゾウ	<i>Hemerocallis fulva</i> var. <i>kwanso</i>	○	1		在来種	○	○
ツユクサ科								
16	ツユクサ	<i>Commelina communis</i> var. <i>communis</i>	◎	20		在来種	○	○
17	イボクサ	<i>Murdannia keisak</i>	◎	22		在来種	○	○
ミズアオイ科								
18	ミズアオイ	<i>Monochoria korsakowii</i>	◎	9	NT/VU/VU	在来種	○	○
19	コナギ	<i>Monochoria vaginalis</i> var. <i>vaginata</i>	◎	18		在来種	○	○
ガマ科								
20	オオミクリ	<i>Sparganium erectum</i> var. <i>macrocarpum</i>	◎	2	VU/-/-	在来種	×	○
21	ナガエミクリ	<i>Sparganium japonicum</i>	◎	3	NT/NT/NT	在来種	○	○
22	ヒメガマ	<i>Typha angustifolia</i>	◎	5		在来種	○	○
23	ガマ	<i>Typha latifolia</i>	◎	15		在来種	○	○
ホシクサ科								
24	ホシクサ属 sp	<i>Eriocaulon</i> sp.	○	1				
イグサ科								
25	イグサ	<i>Juncus decipiens</i>	○	22		在来種	○	○
26	コウガイゼキショウ	<i>Juncus prismatocarpus</i>	○	1		在来種	○	○
27	クサイ	<i>Juncus tenuis</i>	○	17		在来種	○	○
カヤツリグサ科								
28	ウキヤガラ	<i>Bolboschoenus fluviatilis</i> yagara	◎	23		在来種	○	○
29	アゼナルコスゲ	<i>Carex dimorpholepis</i>	○	5		在来種	○	×
30	カサスゲ	<i>Carex dispalata</i>	○	3		在来種	○	○
31	アゼスゲ	<i>Carex thunbergii</i> var. <i>thunbergii</i>	○	6		在来種	○	×
32	オニナルコスゲ	<i>Carex vesicaria</i> var. <i>vesicaria</i>	○	1	-/VU/VU	在来種	○	×
33	スゲ属 sp	<i>Carex</i> sp.	○	1				
34	タマガヤツリ	<i>Cyperus difformis</i>	●	1		在来種	○	○
35	マツバイ	<i>Eleocharis acicularis</i> var. <i>longiseta</i>	◎	15		在来種	○	○
36	クログワイ	<i>Eleocharis kuroguwai</i>	◎	11		在来種	○	○
37	ハリイ属 sp	<i>Eleocharis</i> sp.	○	2				
38	ホタルイ	<i>Schoenoplectus hotarui</i>	○	2		在来種	○	○
39	イヌホタルイ	<i>Schoenoplectus juncooides</i>	○	1		在来種	×	○
40	カンガレイ	<i>Schoenoplectus triangulatus</i>	◎	9		在来種	×	○
41	サンカクイ	<i>Schoenoplectus triquetus</i>	◎	22		在来種	○	○
42	ツルアブラガヤ	<i>Scirpus radicans</i>	○	10	-/-/NT	在来種	○	○
43	アブラガヤ	<i>Scirpus wichurae</i>	◎	5		在来種	○	○
44	ホタルイ属 sp	<i>Scirpus</i> sp.	○	1				
イネ科								
45	ヌカボ	<i>Agrostis clavata</i> var. <i>nukabo</i>	○	18		在来種	○	○
46	ヌカススキ	<i>Aira caryophyllea</i>	○	9		在来種	○	×
47	スズメノテッポウ	<i>Alopecurus aequalis</i> var. <i>amurensis</i>	○	3		在来種	○	○
48	メリケンカルカヤ	<i>Alopecurus virginicus</i>	○	20		外来種	○	○
49	コブナグサ	<i>Arthraxon hispidus</i>	○	7		在来種	○	○
50	ギョウギシバ	<i>Cynodon dactylon</i> var. <i>dactylon</i>	○	3		在来種	○	○

No.	種名	学名	出現	出現頻度	RDB (全国/新潟市/新潟県)	在来・ 外来の別	H12	H22
51	ケイヌビエ	<i>Echinochloa crus-galli</i> var. <i>aristata</i>	●	18		在来種	×	○
52	イヌビエ	<i>Echinochloa crus-galli</i> var. <i>crus-galli</i>	●	1		在来種	○	○
53	チゴザサ	<i>Isachne globosa</i> var. <i>globosa</i>	○	4		在来種	○	○
54	オギ	<i>Miscanthus sacchariflorus</i>	◎	11		在来種	○	○
55	ススキ	<i>Miscanthus sinensis</i>	◎	9		在来種	○	○
56	ヌカキビ	<i>Panicum bisulcatum</i>	○	2		在来種	○	○
57	クサヨシ	<i>Phalaris arundinacea</i> var. <i>arundinacea</i>	○	1		在来種	○	○
58	ヨシ	<i>Phragmites australis</i>	◎	24		在来種	○	○
59	ミゾイチゴツナギ	<i>Poa acroleuca</i> var. <i>acroleuca</i>	○	2		在来種	○	×
60	スズメノカタビラ	<i>Poa annua</i> var. <i>annua</i>	○	1		在来種	○	○
61	エノコログサ	<i>Setaria viridis</i> var. <i>minor</i>	●	1		在来種	○	×
62	カニツリグサ	<i>Trisetum bifidum</i>	○	5		在来種	○	×
63	ナギナタガヤ	<i>Vulpia myuros</i> var. <i>myuros</i>	○	6		在来種	○	○
64	マコモ	<i>Zizania latifolia</i>	◎	12		在来種	○	○
マツモ科								
65	マツモ	<i>Ceratophyllum demersum</i>	◎	1	—/VU/VU	在来種	○	○
キンボウゲ科								
66	ケキツネノボタン	<i>Ranunculus cantoniensis</i>	○	1		在来種	○	○
ハス科								
67	ハス	<i>Nelumbo nucifera</i>	◎	11		在来種	○	○
ベンケイソウ科								
68	コモチマンネングサ	<i>Sedum bulbiferum</i>	○	7		在来種	○	○
アリノトウグサ科								
69	フサモ	<i>Myriophyllum verticillatum</i>	○	1		在来種	×	×
ブドウ科								
70	ノブドウ	<i>Ampelopsis glandulosa</i> var. <i>heterophylla</i>	◎	3		在来種	○	○
マメ科								
71	クサネム	<i>Aeschynomene indica</i>	◎	23		在来種	○	○
72	ツルマメ	<i>Glycine max</i> var. <i>soja</i>	○	13		在来種	○	○
73	ヤハズソウ	<i>Kummerowia striata</i>	○	12		在来種	○	○
74	コメツブツメクサ	<i>Trifolium dubium</i>	○	2		在来種	○	○
75	シロツメクサ	<i>Trifolium repens</i>	○	2		外来種	○	○
76	カラスノエンドウ	<i>Vicia sepium</i>	○	2		在来種	○	○
バラ科								
77	ノイバラ	<i>Rosa multiflora</i> var. <i>multiflora</i>	○	2		在来種	○	○
アサ科								
78	カナムグラ	<i>Humulus scandens</i>	○	1		在来種	○	○
ウリ科								
79	スズメウリ	<i>Zehneria japonica</i>	○	1		在来種	○	○
ミゾハコベ科								
80	ミゾハコベ	<i>Elatine triandra</i> var. <i>pedicellata</i>	○	12		在来種	○	○
ヤナギ科								
81	イヌコリヤナギ	<i>Salix integra</i>	○	1		在来種	○	○
82	カワヤナギ	<i>Salix miyabeana</i> subsp. <i>gymnolepis</i>	○	1		在来種	○	○
83	タチヤナギ	<i>Salix triandra</i>	○			在来種	○	○
84	ヤナギ属 sp	<i>Salix</i> sp.	○	15				
スマレ科								
85	ツボスマレ	<i>Viola verecunda</i> var. <i>verecunda</i>	○	3		在来種	○	○
86	スマレ属 sp	<i>Viola</i> sp.	○	1				
オトギリソウ科								
87	コケオトギリ	<i>Hypericum laxum</i>	○	9		在来種	○	○
88	ミズオトギリ	<i>Triadenum japonicum</i>	○	1		在来種	○	○
ミソハギ科								
89	ヒシ	<i>Trapa japonica</i>	◎	23		在来種	○	○
90	オニビシ	<i>Trapa natans</i> var. <i>natans</i>	◎	10		在来種	×	×
アカバナ科								
91	ミズタマソウ	<i>Circaea mollis</i>	○	1		在来種	○	○
92	アカバナ属 sp	<i>Epilobium</i> sp.	○	1				
93	チョウジタデ	<i>Ludwigia epilobioides</i> subsp. <i>Epilobioides</i>	○	5		在来種	○	○
94	マツヨイグサ属 sp	<i>Oenothera</i> sp.	○	1				
アブラナ科								
95	ミズタガラシ	<i>Cardamine lyrata</i>	○	1	—/EN/EN	在来種	○	×
96	タネツケバナ	<i>Cardamine flexuosa</i>	○	7		在来種	○	○
97	スカシタゴボウ	<i>Rorippa palustris</i>	○	2		在来種	○	○
タデ科								
98	ケイタドリ	<i>Fallopia japonica</i> var. <i>uzenensis</i>	○	1		在来種	○	×
99	ヤナギタデ	<i>Persicaria hydropiper</i>	○	11		在来種	○	○
100	シロバナサクラタデ	<i>Persicaria japonica</i>	○	3		在来種	×	×

No.	種名	学名	出現	出現頻度	RDB (全国/新潟市/新潟県)	在来・ 外来の別	H12	H22
101	オオイスタデ	<i>Persicaria lapathifolia</i> var. <i>lapathifolia</i>	◎	9		在来種	○	○
102	イスタデ	<i>Persicaria longiseta</i>	●	13		在来種	○	○
103	ヤノネグサ	<i>Persicaria muricata</i>	○	10		在来種	○	○
104	イシミカワ	<i>Persicaria perfoliata</i>	◎	7		在来種	○	○
105	アキノウナギツカミ	<i>Persicaria sagittata</i> var. <i>sibirica</i>	○	12		在来種	○	○
106	ミゾソバ	<i>Persicaria thunbergii</i>	○	15		在来種	○	○
107	イスタデ属 sp	<i>Persicaria</i>	○	1				
108	スイバ	<i>Rumex acetosa</i>	○	3		在来種	○	○
109	ヒメスイバ	<i>Rumex acetosella</i> subsp. <i>pyrenaicus</i>	○	2		在来種	○	○
110	ナガバギンギシ	<i>Rumex crispus</i>	○	1		在来種	○	○
ナデシコ科								
111	ノミノツヅリ	<i>Arenaria serpyllifolia</i> var. <i>serpyllifolia</i>	○	1		在来種	○	×
112	ミミナグサ	<i>Cerastium fontanum</i> var. <i>angustifolium</i>	○	1		在来種	○	×
113	オランダミミナグサ	<i>Cerastium glomeratum</i>	○	5		外来種	○	○
114	ノミノフスマ	<i>Stellaria uliginosa</i> var. <i>undulata</i>	○	15		在来種	○	○
サクランソウ科								
115	スマトラノオ	<i>Lysimachia fortunei</i>	○	3		在来種	○	○
アカネ科								
116	ヒメヨツバムグラ	<i>Galium gracilens</i> var. <i>gracilens</i>	○	1		在来種	×	×
117	フタバムグラ属 sp	<i>Hedyotis</i> sp.	○	1				
キョウチクトウ科								
118	コバノカモメヅル	<i>Vincetoxicum sublancoelatum</i> var. <i>sublancoelatum</i>	○	2		在来種	×	×
ムラサキ科								
119	キュウリグサ	<i>Trigonotis peduncularis</i>	○	1		在来種	○	○
ナス科								
120	オオマルバノホロシ	<i>Solanum megacarpum</i>	○	1		在来種	○	○
オオバコ科								
121	キクモ	<i>Limnophila sessiliflora</i>	◎	23	-/NT/-	在来種	○	○
122	マツバウンラン	<i>Nuttallanthus canadensis</i>	○	4		外来種	○	×
123	タチイヌノフグリ	<i>Veronica arvensis</i>	○	2		在来種	○	○
124	オオイヌノフグリ	<i>Veronica persica</i>	○	1		在来種	○	○
アゼナ科								
125	アメリカアゼナ	<i>Lindernia dubia</i>	○	7		外来種	○	○
シソ科								
126	トウバナ	<i>Clinopodium gracile</i>	○	3		在来種	○	○
127	シロネ	<i>Lycopus lucidus</i>	○	2		在来種	○	○
128	ヒメジソ	<i>Mosla dianthera</i>	○	1		在来種	○	○
129	ヒメサルダヒコ	<i>Lycopus cavaleriei</i>	○	1		在来種	○	×
130	ヒメナミキ	<i>Scutellaria dependens</i>	○	2		在来種	○	○
131	イヌゴマ	<i>Stachys aspera</i> var. <i>hispidula</i>	○	1		在来種	○	○
サギゴケ科								
132	ムラサキサギゴケ	<i>Mazus miquelii</i>	○	2		在来種	×	×
キキョウ科								
133	ミゾカクシ	<i>Lobelia chinensis</i>	○	2		在来種	○	○
ミツガシワ科								
134	ガガブタ	<i>Nymphoides indica</i>	●	2	NT/VU/VU	在来種	×	○
キク科								
135	ブタクサ	<i>Ambrosia artemisiifolia</i>	○	1		外来種	○	○
136	ヨモギ	<i>Artemisia indica</i> var. <i>Maximowiczii</i>	◎	19		在来種	○	○
137	アメリカセンダングサ	<i>Bidens frondosa</i>	◎	22		外来種	○	○
138	タウコギ	<i>Bidens tripartita</i> var. <i>tripartita</i>	○	5		在来種	○	○
139	トキンソウ	<i>Centipeda minima</i>	○	1		在来種	○	○
140	オオアレチノギク	<i>Conyza sumatrensis</i>	○	1		外来種	○	○
141	ヒメジョオン	<i>Erigeron annuus</i>	○	1		外来種	○	○
142	ハナニガナ	<i>Ixeridium dentatum</i> subsp. <i>nipponicum</i>	○	5		在来種	×	○
143	ハハコグサ	<i>Pseudognaphalium affine</i>	○	11		在来種	○	○
144	アキノノグシ	<i>Pterocypsela indica</i>	○	2		在来種	○	○
145	セイタカアワダチソウ	<i>Solidago altissima</i>	◎	22		外来種	○	○
146	セイヨウタンポポ	<i>Taraxacum officinale</i>	○	1		外来種	○	○
ウコギ科								
147	ノチドメ	<i>Hydrocotyle maritima</i>	○	3		在来種	○	○
148	オオチドメ	<i>Hydrocotyle ramiflora</i>	○	1		在来種	×	○
セリ科								
149	セリ	<i>Oenanthe javanica</i> subsp. <i>javanica</i>	○	1		在来種	○	○