

# Ecological Balance and Environmental Preservation in Marshes : with Relation to the Researches on a Habitat of Natural Monument "Mujinamo"

|       |                                                                                                            |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| メタデータ | 言語: jpn<br>出版者:<br>公開日: 2018-04-03<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: 塩澤, 豊志, 金村, 秀一<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="https://mu.repo.nii.ac.jp/records/750">https://mu.repo.nii.ac.jp/records/750</a>                  |

# 湖沼生態系の平衡と環境保全

## —天然記念物ムジナモ自生地の調査に関連して—

Ecological Balance and Environmental Preservation in Marshes  
—with Relation to the Researches on a Habitat of Natural Monument “Mujinamo”—

塩 澤 豊 志<sup>\*</sup>  
Toyoshi Shiozawa

金 村 秀 一<sup>†</sup>  
Shuichi Kanamura

### 1 はじめに

湖沼の表面には厚さの違いこそあれ被膜が存在する。鉄分に富んだ土壤に囲まれた湿地の表面に赤褐色の被膜を見かけたことがあるであろう。大気中微粒子の沈降も考えられるが、被膜の形成には、湖沼をめぐる地形・地質および水質、さらに湖水の運動といった非生物的環境とともに、湖沼の生物群集の生活活動による生産物や人間活動がもたらす攪乱といった生物的環境の両者が関係すると思われる。この意味で表面被膜は、湖沼という小宇宙の生態系の特徴を表す一つの指標とみなせる。湖沼内における物質循環の変化や湖沼の遷移段階などを知る手掛かりにもなるが、この種の研究はほとんど行われていない。

世の中には珍しいものがたくさんある。その中には、ありふれたようでも大変貴重なものがある。モウセンゴケ科の水草に属する食虫植物ムジナモはその一つかもしれない。1890年に植物学者牧野富太郎が東京都江戸川区の江戸川河川敷で発見して以来、利根川水系で広範囲に分布することが知られるようになった。大正・昭和の歴史を経て、ムジナモ自生地は徐々に消滅していった。埼玉県羽生市宝蔵寺沼は、世界中で最後に残されたムジナモ自生地となった。1966年には国指定天然記念物となったが、この年の台風14号による水害ですべて流失してしまった。不幸中の幸いというべきか、同年にムジナモ保存会が中心となって人工培養法が確立された。それから10年間にわたって沼への放流が試みられた。しかし、水質の富栄養化・農薬汚染そして被膜物質による水生植物の生育阻害が指摘される事態となり、“ムジナモ保護増殖に係る調査団”が1976年に結成された。調査団は、化学班、地質班および生物班で構成され、埼玉大学が一翼を担った。筆者塩澤は、埼玉大学理学部研究生としてこの調査・研究に携わった。

2011年埼玉県レッドデータブック(RDB)では、ムジナモは野生絶滅の段階にあるとされていたが、復活を願う関係者の熱意が奇跡を起こした。1967年には自生していた株が消えてから半世紀後、地元保存会の保護活動でムジナモは命をつなぎ、越冬した株の大增殖が2015年6月に確認された。2017年9月の埼玉大学教育学部生物学教室(金子康子教授)による調査で

<sup>\*</sup> 工学部客員教授(環境システム学科) <sup>†</sup> 環境研究所職員

は、23 万株の生育が確認されている。研究活動が保護増殖の大きなバックアップになっていることは勿論であるが、地元ムジナモ保存会の日常的・継続的な保護活動が奇跡を生んだのである。水質改善と表面被膜対策として、水郷公園からの水の流入、井戸水の注水とポンプによる排水、定期的ヨシ刈りとサデカキ（浚渫）、アメリカザリガニ等採食動物の捕獲、密集株の移植などの人為的介入が不可欠であった。数十年にわたる保護活動により、水質はもとより沼の生態系そのものが改善され、埼玉大学の調査からうかがえる生物種の多様度には目を見張るものがある。

埼玉県羽生市宝蔵寺沼は、関東平野の中央部に位置し、利根川流域の低湿地を開発して縦横に掘られた掘割（クリーク）の集合地域（通称“堀上げ田”）であり、人工的で開水域の広くない沼である。ただの自然ではなく人間活動を内在した人為的自然は今日「里山」と呼ばれている。里山は必ずしも「山」である必要はなく、平野部であっても里山の定義にふさわしい場所は日本中に山ほどある。里山生態系のほうが原自然の生態系よりも生物多様性に優れることが明らかとなっており、羽生市宝蔵寺沼は現代的「里山」の象徴的な場所と言える。

湖沼（里山）生態系の平衡条件を解明する一助として、本研究では、ムジナモ自生地の非生物的環境として地形・地質・水質および表面被膜物質の分析を行い、金属元素の動態（循環）に注目して考察を行う。一方、生物的環境調査の一環としてムジナモの餌となる動物性プランクトンのミジンコの生態を調べ、食物連鎖の観点からも湖沼生態系の平衡について概観してみたい。

## 2 宝蔵寺沼の地形・地質

ムジナモ自生地である埼玉県羽生市宝蔵寺沼一帯は、埼玉県の北稜を流れる利根川に近い低地で、加須（かぞ）低地と呼ばれている。かつて低湿地には堀上げ田が随所につくられていた。加須低地のルーツとして次のような記録が残されている。関東造盆地運動によって台地が沈降し、やがてその上を利根川が流下するようになり、利根川の堆積物によって台地表面の地形が形成され、平地に近い沖積低地として作り上げられた所である。低湿地は利根川の氾濫原として、洪水による粘土層が堆積した地域なので、排水の悪い場所の多くは湿地として泥炭層を形成し、水田として利用されてきた。宝蔵寺沼のある低湿地には泥炭質粘土層および泥炭層が厚く堆積している。これらは埋没台地の間にある谷を埋積しながら沖積層を形成しており、非常に軟弱な地層となっている。

1976～81 年に行われた「ムジナモ保護増殖に係る調査団」地質班のボーリング調査により、宝蔵寺沼の地下には深い埋積谷が存在することが明らかとなった（図 1）。図 1 には、ボーリング調査で判明した沖積層および洪積層の詳細が示されている。図中の表土は、主としてヨシ・マコモなどの水生植物の枯死体が生分解により泥炭化する以前の腐植物質（主体はフミン酸）と粘土鉱物からなると考えられる。粘土鉱物の同定も地質班によってなされ、粘土層は Al—バーミキュライトを主体とし、イライトおよびカオリナイトを含むことが判明した。粘土層の火山灰土は鹿沼土と同様の浅間山由来である。一方、洪積層上部のシルト層は富士山由来の関東ローム層で、玄武岩質火山灰が風化したもので、Ca に富む斜長石を多く含む。図 2 にムジナモ自生地の全体図を示したが、宝蔵寺沼が網の目のように張り巡らされた掘割（クリーク）の集合であることがわかる。

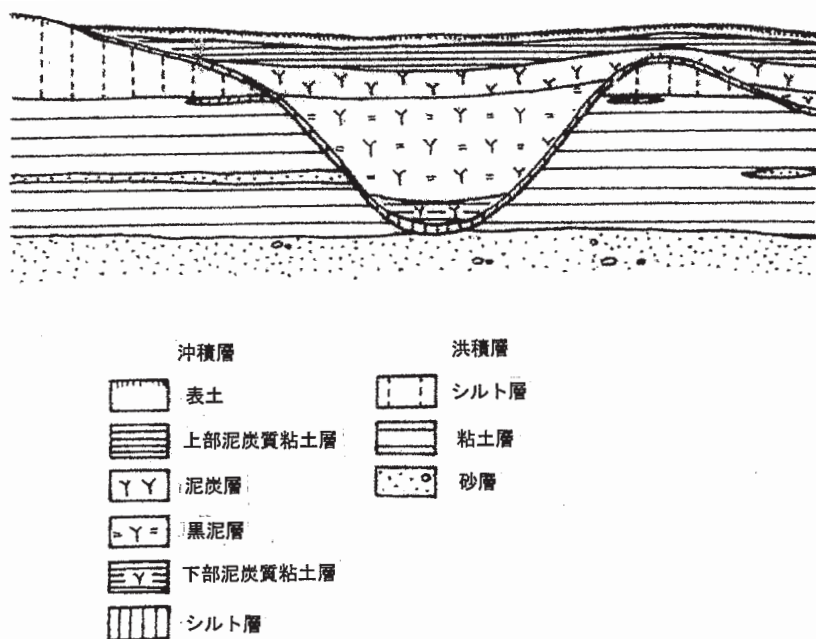


図1 宝蔵寺沼模式断面図

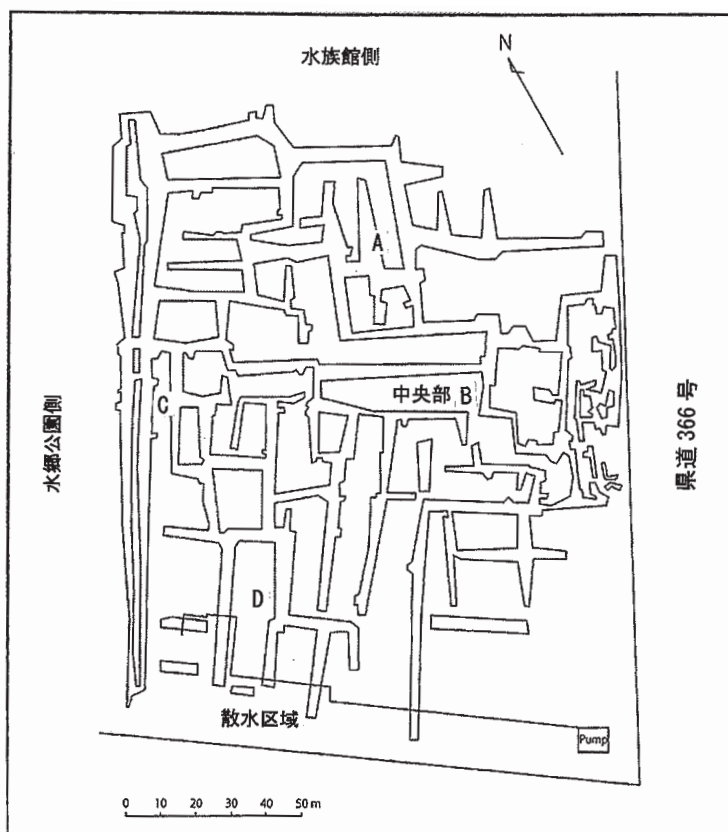


図2 ムジナモ自生地の全体図と調査地点

### 3 宝蔵寺沼の底質と水面上被膜物質の調査

2017 年 3～9 月の期間、現地調査・試料の採取を行った。調査地点は図 2 上に A, B, C, D の記号で示した。さいたま水族館側の地点 A はムジナモ株数が最も多く（合計 10 万株以上）、水族館に近いクリークは酸化鉄（III）により赤褐色を呈していた。中央部 B ではムジナモ株数は 2～3 万株で、被膜発生量は多かった。水郷公園側 C 地点における被膜発生量は最も多く、ここでのムジナモ株数は少なかった。地点 D は井戸水の散水地域で、被膜の発生は認められなかった。

とくに夏季に多く発生する表面被膜の起源は、沼の底質とクリーク土手の土壌と考えられるが、この 2 つの化学組成はほぼ同一であろう。地下谷の表土を構成する物質は粘土鉱物と腐植物質である。

底質および被膜物質の乾燥試料、バーミキュライト粘土そしてフミン酸の赤外線吸収スペクトルを測定した。埼玉大学科学分析支援センターにおいて、BRUKER 社製フーリエ変換赤外分光光度計（TENSOR II, FT-IR ATR）を用いて測定した。測定結果を図 3 に示す。バーミキュライトと底質のスペクトルには共通に  $1100\sim1000\text{ cm}^{-1}$  にブロードの吸収帯が見られる。これは粘土鉱物

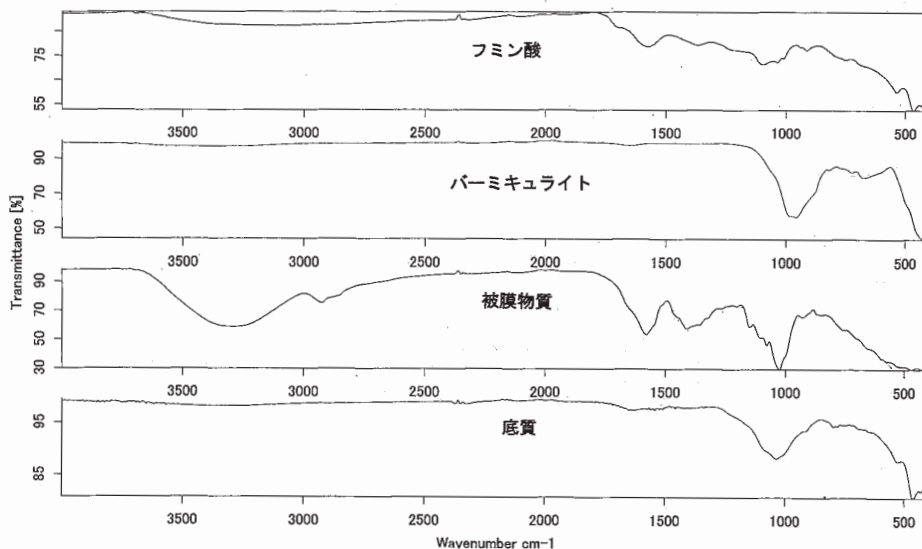


図 3 被膜物質、底質および主要成分の赤外線吸収スペクトル

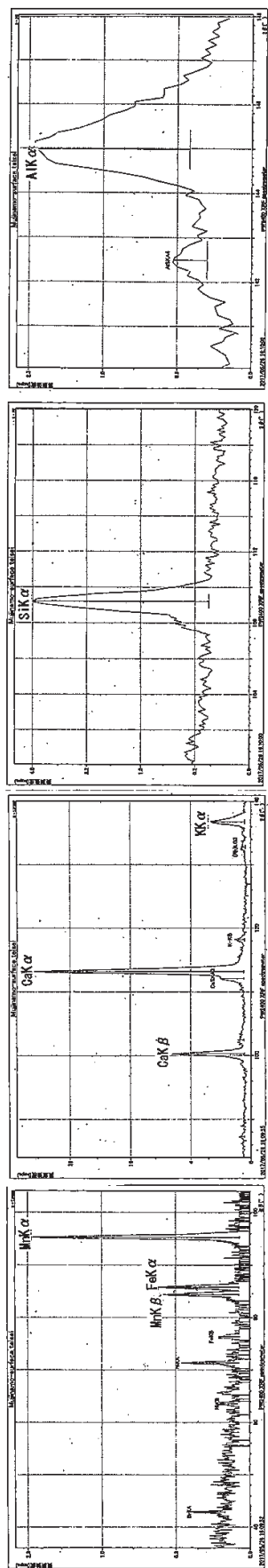
に特徴的な Si—O 伸縮振動によるもので、底質の主成分がバーミキュライト系の粘土鉱物であることを裏付けている。土壌有機物（腐植質）の約 50% はリグニンから、約 30% はタンパク質を起源とすると考えられている。これから推定される化学構造に対応する吸収帯がスペクトル上に現れている。1600～1500  $\text{cm}^{-1}$  に芳香族の C=O 伸縮振動、1100  $\text{cm}^{-1}$  付近にアルコール性 OH の C—O 伸縮、880  $\text{cm}^{-1}$  付近にフェノール性 OH の C—O 伸縮振動による吸収帯が確認できる。被膜物質の赤外スペクトルは、フミン酸とバーミキュライトのスペクトルを重ねたものによく似ている。しかし、被膜物質のスペクトルには、高波数側に—OH および—CH 伸縮振動にもとづく吸収帯、1700～800  $\text{cm}^{-1}$  には有機化合物中の官能基の相互作用にもとづく微細構造吸収がみられ

る。これは、被膜物質がフミン酸と粘土鉱物だけではなく、膜形成に関与した多種類の有機化合物を含有していることを示している。後述するように、金属イオンの介在によってフミン酸と粘土粒子は結合するが、こうしてできた会合体粒子が沼表面に浮上するためには、これらを気泡に付着させる仲立ちとなる脂質などの界面活性物質の存在が不可欠である。参考のため、1976年に宝蔵寺沼で採取した被膜物質について、ジエチルエーテル、クロロホルム—メタノール混合溶媒によってソックスレー抽出を行った実験結果を述べる。抽出液の薄層クロマトグラフィと赤外スペクトルによる同定から、被膜物質中には中性脂肪・脂肪酸などの単純脂質、リン脂質・糖脂質などの複合脂質が含まれることが判明している。脂質類の起源は主に動植物界由来と考えられるが、泥炭層由来あるいは過去に使用された農薬由来という可能性もある。

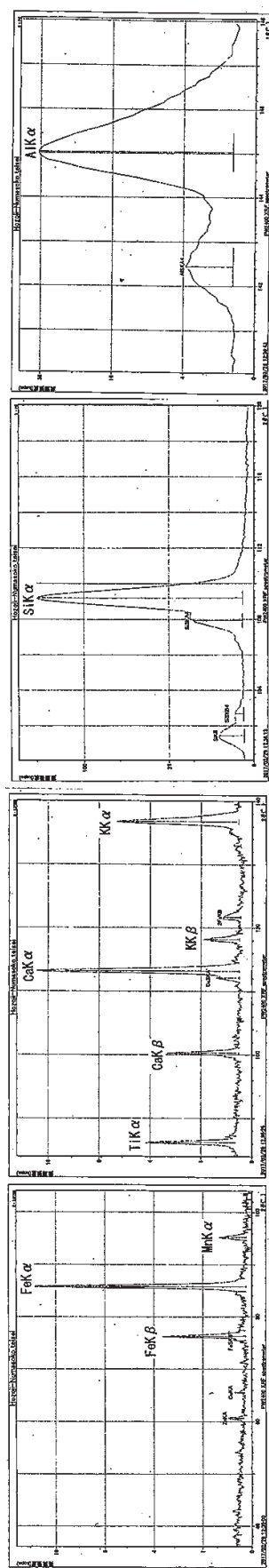
次に被膜物質の無機成分の調査結果について述べる。被膜および底質乾燥試料の蛍光 X 線分析を埼玉大学科学分析支援センターで行った。波長分散型全自動蛍光 X 線分析装置 (XRF) (Philips PW2400) を用いて、① 定性スペクトル測定、② スタンダードレス法簡易定量測定を行った。定性スペクトルを図 4 に示す。(a), (b) の右半分の図には、粘土鉱物由来のケイ素 Si とアルミニウム Al の  $K\alpha$  線ピークが見られる。これから、底質の粘土鉱物が浮上して被膜中に移行することが裏付けられる。左端のスペクトル図(a), (b)を比較してみると、宝蔵寺沼表面被膜の特徴がよくわかる。(b)底質で強かった鉄 Fe のピーク強度(濃度)が(a)被膜物質では弱まり、代わって(a)ではマンガン Mn の強度が増加している。つまり、底質中では含有率の低いマンガンが被膜中に濃縮されるという重要な事実が示されているのである。

ピーク強度は無機成分全体に対する重量比を表しているのであるが、縦軸が各図ごとの任意目盛なので、正確な含有率を求めるために、専用ソフトウェア UniQuant 4 (Omega Data System BW 社製) による② スタンダードレス法簡易定量を行った。左から 2 つ目のカルシウム Ca の強度は(a)と(b)で類似しているように見えるが、縦軸目盛を標準化して定量し直した。主要成分の定量結果をまとめて表 1 に示す。表 1 より、被膜中にはカルシウム Ca とマンガン Mn が著しく濃縮されていることがわかる。マンガンが被膜中に濃縮されている点は表 2 に示した約 40 年前の結果と変わらないが、カルシウムの濃縮は今回はじめて発見された事実である。40 年の間に起きた沼生態系の変化を物語る現象の一つといえよう。





(a) 水面上被膜物質



(b) 宝蔵寺沼の底質

図 4 蛍光 X 線 (XRF) 定性スペクトル

表 1 宝蔵寺沼底質・表面被膜物質の無機成分

数字は重量パーセント(%)

| 構成成分                           | 底質    | 被膜    |
|--------------------------------|-------|-------|
| Na <sub>2</sub> O              | 0.89  | 9.55  |
| MgO                            | 1.91  | 2.46  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.69 | 2.04  |
| SiO <sub>2</sub>               | 62.02 | 3.90  |
| K <sub>2</sub> O               | 1.72  | 1.33  |
| CaO                            | 4.51  | 44.19 |
| MnO <sub>2</sub>               | 0.337 | 11.36 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.87 | 1.67  |

表 2 約 40 年前測定は無機成分

数字は重量パーセント(%)

| 構成成分                           | 底質    | 被膜    |
|--------------------------------|-------|-------|
| MnO <sub>2</sub>               | 3~4   | 20~24 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14~16 | 10~12 |
| SiO <sub>2</sub>               | 45~50 | 28~30 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20~22 | 12~14 |
| CaO                            | 3~6   | 2~4   |

重金属のマンガンがムジナモにとって生体毒性を持つことは知られており、1980年に「ムジナモ保護増殖事業に係る調査団」化学班で行った Mn 毒性に関する実験でも実証された。この実験では、被膜が多く発生している宝蔵寺沼 C 地点にムジナモを放流し、ムジナモ体内の金属成分の経日変化を蛍光 X 線分析により追跡した。その結果、水面被膜中に含まれるマンガンがムジナモの体内に取り込まれ、代わりにカルシウムが脱離することが明らかとなり、このことがムジナモの生育阻害と密接に関係することが分かった。同様の実験をタヌキモについても行った結果、ムジナモが特別にマンガン・鉄を吸収・蓄積しやすいことが確かめられた。輪葉ごとの金属成分の分布を調べたところ、長時間にわたりマンガンが時間に比例してムジナモ体内に取り込まれることも確認された。

ムジナモ保存会の方々の積極的な保護活動により、適度な散水・水循環によって被膜発生量が減り、水質の改善が図られ、ムジナモの生育にとっては不適切であった 40 年前の沼環境は一変した。生体毒のマンガンに代わってカルシウムの含有率が高くなったことは、ムジナモの生育に有利に働いていると考えられる。

#### 4 宝蔵寺沼の水質

2016 年の夏季と冬季に測定された宝蔵寺沼中央部 B 地点の水質データを表 3 に示す。表 3 は、2017 年 1 月に開催された「ムジナモ保護増殖調査研究報告会」の報告書から抜粋・引用して作成した。なお、参考資料として、1978 年冬季と 1981 年夏季に同地点で測定した水質データを表 4 に示す。

沼水の pH は年間を通して約 7 に保たれており、これは天然水の緩衝作用が働いているためであるが、夏季には pH が高く、アルカリ性側への遷移がみられる。約 40 年前には冬季でもややアルカリ側に偏ることがあったようである。色度は沼水中に懸濁する粘土鉱物やフミン酸量の目安となるが、夏季は冬季の約 5 倍を示している。約 40 年前には冬季でも色度が大きかった。



表3 最近の宝蔵寺沼の水質測定結果

| 調査項目     | 単位   | 採水日      |           |
|----------|------|----------|-----------|
|          |      | 2016/8/5 | 2016/12/1 |
| 水温       | ℃    | 31.64    | 7.42      |
| 透視度      | cm   | >30      | >30       |
| pH       |      | 7.08     | 6.73      |
| 電気伝導率    | mS/m | 43.5     | 55.1      |
| 溶存酸素     | mg/L | 7.33     | 12.19     |
| 色度       |      | 20       | 4.2       |
| 化学的酸素要求量 | mg/L | 24.5     | 34        |
| アンモニア態窒素 | mg/L | 0.153    | 0.090     |
| 硝酸態窒素    | mg/L | 0.19     | 0.090     |
| リン酸態リン   | mg/L | 0.011    | 0.0040    |
| カリウム     | mg/L | 4.2      | 10.0      |
| マグネシウム   | mg/L | 10.1     | 11.8      |
| カルシウム    | mg/L | 34       | 55.5      |
| ナトリウム    | mg/L | 21       | 34.9      |
| 硫酸イオン    | mg/L | 5.30     | 4.7       |
| 塩素イオン    | mg/L | 22.7     | 28.5      |
| 腐植物質     | ピーク  | 325/440  | 325/430   |
| 腐植物質     | ピーク  | 150      |           |
| 溶存有機炭素   | mg/L | 11.64    | 9.69      |
| 鉄        | mg/L | 0.92     | 0.69      |
| マンガン     | mg/L | 0.20     | 0.10      |
| アルミニウム   | mg/L | 0.00     | 0.040     |
| ケイ素      | mg/L | 3.57     | 6.2       |

表4 約40年前の宝蔵寺沼の水質

| 調査項目          | 単位      | 採水日       |            |
|---------------|---------|-----------|------------|
|               |         | 1978/1/10 | 1981/7/21  |
| 濁度            | 度       | 6         | 12         |
| 色度            | 度       | 20        | 26         |
| 硬度            | ppm     | 125.2     | 76         |
| 導電率           | μ モー/cm | 329       | 243        |
| pH            |         | 7.2       | 6.7        |
| アルカリ度         | ppm     | 73        | 50         |
| アンモニア性窒素      | ppm     | 0.58      | 0.36       |
| 亜硝酸性窒素        | ppm     | 0.004     | 0.013      |
| 硝酸性窒素         | ppm     | 0.06      | 0.31       |
| 過マンガン酸カリウム消費量 | ppm     | 16.6      | 19.2       |
| 鉄             | ppm     | 0.53      | 0.66(0.29) |
| マンガン          | ppm     | 0.53      | 0.30(0.20) |
| 亜鉛            | ppm     | 0.01      | 0.03       |
| 銅             | ppm     |           | 0.01       |
| 塩素イオン         | ppm     | 22.6      | 24         |
| リン酸イオン        | ppm     | 0.03      | 0          |
| 硫酸イオン         | ppm     | 50        | 42.1       |

沼の生態系にとって栄養塩類の溶存は重要な意味を持つ。電気伝導率（導電率）は年間を通して30～50mS/m（ミリジーメンズ毎メートル）で、大きな変動は見られない。2016年度は夏季・冬季ともにやや高めの値となっているが、井戸水散布などの影響であろう。モー（ $\Omega^{-1}$ ）= Sなので、表4中  $\mu$  モー/cm（ $\mu \Omega^{-1}/\text{cm}$ ）の値はmS/mの値の10倍に相当するが、約40年前の電気伝導率（導電率）を見ると夏季にやや低くなっている。有機物汚染の尺度であるCOD（化学的酸素要求量＝過マンガン酸カリウム消費量）の値からは、宝蔵寺沼が富栄養状態にあると言えるが、それがムジナモの生育にとってすべてマイナスに働くわけではない。ムジナモは光合成によって糖を自ら生産するが、栄養源として沼水中に懸濁するフミン酸を利用する。また、粘土粒子は消化酵素の活性発現に必須のアルミニウム供給源となっている。

鉄とマンガンの存在量と溶存形態は、表面被膜の形成に重要な意味を持つ。鉄はマンガンの5～7倍が沼水中に存在している。被膜中ではMn/Feの比率が逆転するのであるが、これを解明する手掛かりが約40年前の測定データ中にある。約40年前の沼水中の鉄分は現在とあまり変わらないが、マンガンは3～5倍量あった。表4中、1981/7/21の鉄・マンガン濃度の（ ）内の数値は、遠心分離（100回転/分）後の値である。つまり、マンガンはほとんどが単イオン $\text{Mn}^{2+}$ として溶解しているが、鉄は水酸化鉄（Ⅲ）コロイド粒子として分散しているということになる。金属単イオン（ $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ）は、図5に示すように、フミン酸との間でキレー

トを形成し、これが粘土鉱物粒子と結合して大きな有機—ミネラル粒子となって沼水中に懸濁するものと考えられる。

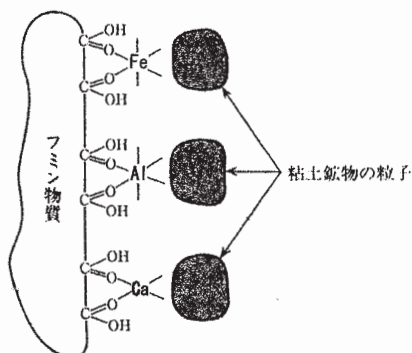
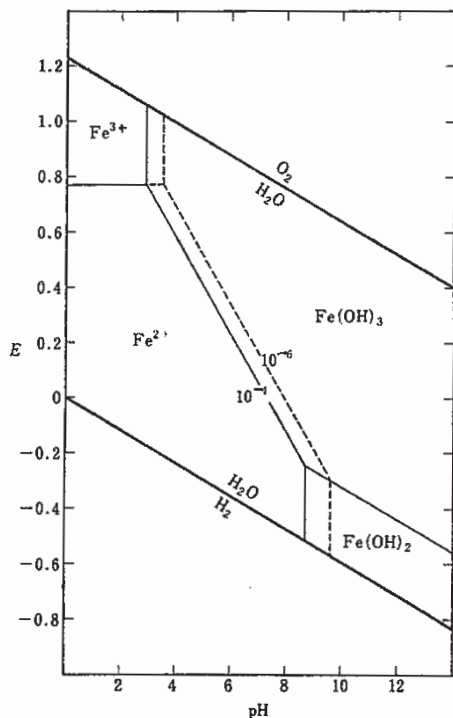


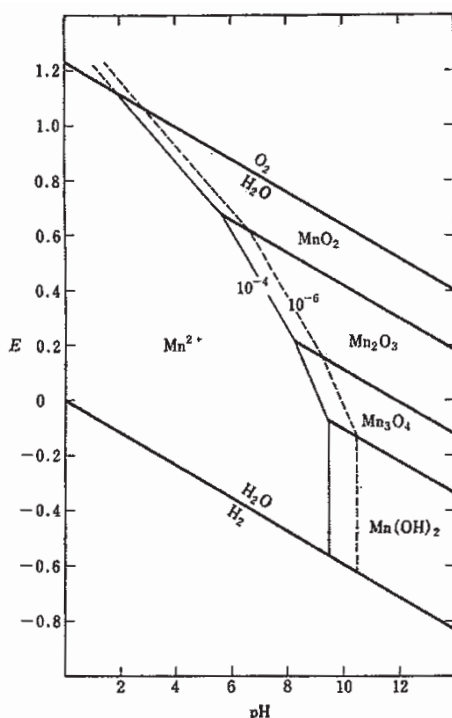
図5 フミン(腐植)物質・金属・粘土鉱物の結合

このことは、図6に示した鉄・マンガン化学種の安定存在領域を表す状態図からも裏付けられる。pH 7付近で大気圧下にある水系では、鉄は水酸化鉄(III)コロイド粒子の形で分散し、マンガンは単イオン  $Mn^{2+}$  の形で溶存しているのである。なお、図中縦軸Eの単位はボルト[V]である。



図中の数字は鉄イオンのモル濃度を示す

(a) Fe 化学種の安定領域



図中の数字はマンガンイオンのモル濃度を示す

(b) Mn 化学種の安定領域

図6 鉄・マンガンの安定化学種を示す電位—pH 図

カルシウムもマンガンに類似した挙動をとるものと推定されるが、40年前と現在では状況が大きく異なっている。1978年1月の沼水中の硫酸イオン濃度は、2016年12月時の値の10倍であった。1978年当時、水郷公園側からの地下湧水が宝蔵寺沼に流れ込んでおり、この湧水中の硫酸イオン濃度は著しく高かった(1981年4月の測定では、硬度206ppm、硫酸イオン濃度96ppm)が、現在では水郷公園の表層水に入れ替わっているため、この問題は解消されている。硫酸イオン濃度が大きいと水中のカルシウムイオンは硫酸カルシウム  $\text{CaSO}_4$  の沈殿粒子として除去されるので、被膜中へのカルシウムの濃縮が抑えられたものと推測される。 $\text{CaSO}_4$  の溶解度積  $K_{sp}$  (18~25℃) =  $1.2 \times 10^{-6} (\text{mol/L})^2$  である。

一方、沼の水深に伴う酸化状態の変化も金属元素の存在形態に影響するが、浅い沼の場合、沼水の垂直運動による拡散のため、溶存酸素量の水深依存性は大きくない。そこで、表層部と沼底部の両方に電極を設置した時の ORP (酸化還元電位) の変化を測定してみた。結果を表 5 に示す。有機物 (腐植物質) の豊富な沼底は還元的環境にあるため、ORP が負の値をとることが確かめられた。

表 5 酸化還元電位 (ORP) 測定結果

| 測定日：2017.6.18      単位：mV |        |     |
|--------------------------|--------|-----|
| 測定地点                     | 電極設置場所 |     |
|                          | 表層部    | 沼底部 |
| A-1                      | 59     | -25 |
| A-2                      | 52     | -41 |
| A-3                      | 32     | -10 |
| B                        | 75     | -13 |
| C                        | 29     | -34 |

## 5 被膜の形成から見た宝蔵寺沼の非生物的環境

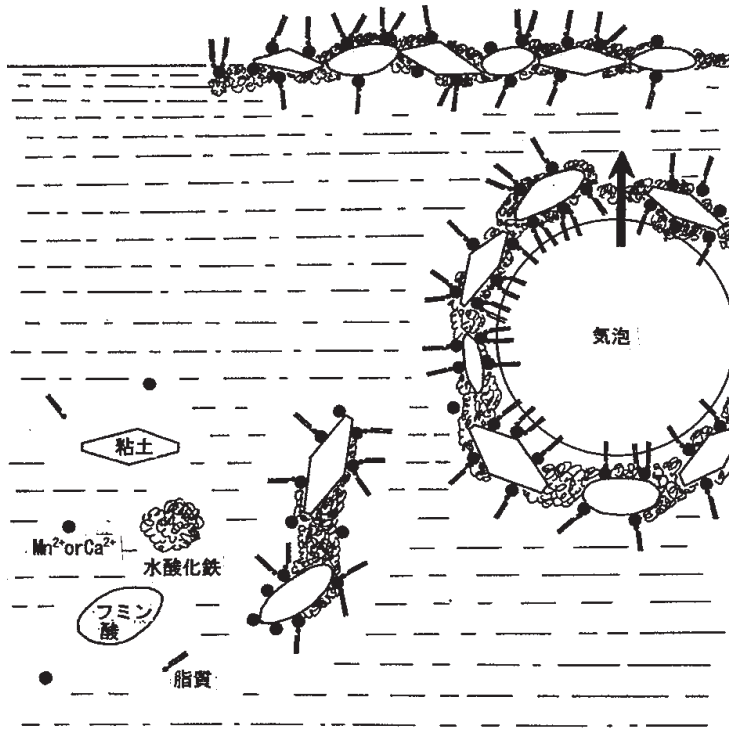


図7 被膜形成機構の模式図

上述した宝蔵寺沼の底質・水質・被膜物質の化学的調査結果を踏まえて、被膜の形成機構を推論してみた(図7 参照)。宝蔵寺沼の水には沼底表土を構成する粘土鉱物やフミン酸がコロイド状に懸濁・分散している。粘土およびフミン酸は金属と結合する性質が強い。水中に溶解しているマンガンイオン  $Mn^{2+}$  とカルシウムイオン  $Ca^{2+}$  は、図5に示したようにフミン酸とキレート形成し、さらに粘土鉱物粒子がこれに結合して有機—ミネラル大粒子を生成する。バーミキュライトのイオン交換容量が大きいことも一因であろう。沼底の上部泥炭質粘土層は菱鉄鉱(主成分は炭酸鉄(II))を多く含むことがわかっており、さいたま水族館側の掘割土手土壌は酸化鉄(III)によって赤褐色を呈している。マンガンは鉄と共存することが多く、菱鉄鉱中には菱マンガン鉱  $MnCO_3$  が含まれるので、沼水中へのマンガン供給源になっているものと考えられる。一方、カルシウムは地下水やシルト層から供給されることが考えられる。バーミキュライト粘土のカルシウム含有率は比較的大きいのでカルシウム供給源にもなり得る。鉄は pH 7 では水酸化鉄(III)コロイド粒子として分散しているが、図5に示した大粒子に絡みついて凝集体形成に寄与するとともに、マンガンの一部を吸着すると考えられる。こうして形成された有機—ミネラル大凝集塊は、比較的極性の強いリン脂質等の界面活性物質を仲立ちとして、沼底から発生するメタン、硫化水素を含む気泡に付着する。無数の大粒子を付着した気泡が浮上して

沼表面に達し、気泡が壊れると、上記諸物質が取り残されて被膜状となる。ほかにタンパク質なども大きな界面活性を有し、気水界面に丈夫な被膜を形成する性質をもつから、被膜の形成と安定・硬化に重要な寄与をなすと考えられる。このようにして形成された被膜は、さらにタンパク質の表面変性や夏季の直射日光（紫外線）による化学変化例えば酸化反応や重縮合反応を受け、これら二次的な不可逆変化によりさらに固く丈夫な被膜となっていくであろう。この時点では、図6の状態図から、マンガンは二酸化マンガン  $MnO_2$  に変化していると考えられる。

40年前の調査では、被膜中には重金属のマンガンのみが濃縮され、 $Mn/Fe$  比が約2という大きな値となってムジナモに対する生物毒になったと推論した。鉄の存在はマンガンの生物毒性を和らげる作用があるように思われるが、今年度の調査において採取された被膜にもマンガンの濃縮はみられており、 $Mn/Fe$  比の値がかなり大きいにもかかわらず毒性の発現が無いのはなぜであろうか。被膜の発生量が格段に小さく抑えられるようになったことが大きい、もう一つの鍵はカルシウムの存在であると考えられる。40年前には沼水中の硫酸イオン濃度が非常に大きく、カルシウムイオンはこれと結合してしまい、有機—ミネラル大粒子中に入り込めなかったのに対し、水質の改善が硫酸イオン濃度の激減につながり、カルシウムの被膜中での濃縮をもたらしたものと推定される。これによって被膜中のマンガン含有率が低下し、被膜物質のムジナモへの悪影響が軽減したと考えられる。

“ムジナモ保護増殖に係る調査団”化学班の報告文書（1982年）の最後は、次の提言で締めくくられている。「他から水を導入することにより沼を現在の閉鎖系から開放系に変えて被膜の発生を抑制するとともに、とくに夏季においては緩やかな流れを生ぜしめて発生する被膜を流し去ることが必要と考える。一方、被膜の発生源となる沼底沈積物を定期的に除去して適当な深度を保持することは有効であろう。」1983年10月、羽生市ムジナモ保存会が発足し、以来、自宅で栽培したムジナモの沼への放流、定期的なサデカキ（浚渫）とヨシ狩りが行われてきた。2009年には排水用ポンプの稼働、水郷公園側から宝蔵寺沼への水の流入が図られ、停滞した沼に流れがつけられた。これらの努力によって水質が改善し、タヌキモ、ヒシ等の水生植物が回復・生育するようになり、2015年、半世紀を経てムジナモの大復活という奇跡を見るに至った。約40年前の提言が実行され、実を結んだのである。

## 6 ミジンコの調査結果からみた宝蔵寺沼の生物的環境

- (1) 採取場所の決定 宝蔵寺沼 2017, 5, 14 の自生地ムジナモ現地調査から、3ヶ月間連続で株数の増加・減少が見られ、尚且つ、水路の比較的異なる地点と対照地として池の構造が似ている水元公園2ヶ所を選定した。
- (2) 採取法、水情報国土データ管理センターによる『河川水辺の国勢調査基本調査マニュアル（ダム湖版）H28年度版（H28.12一部改定）動植物プランクトン調査編』を参考にした。

また、ネット法を使用し（プランクトンネット 離合社 5513-B、網地NXX17 目合0.072 mm）採取後、現地にて、採水とホルマリンとの最終濃度5%（中性）になるよう採取瓶に用意した。地点では、全層鉛直方向に曳いて採取した。

- (3) 採取日時 宝蔵寺沼 2017.7.29 AM6:30~8:00 気温 25℃ 水温 27℃  
水元公園 2017.8.9 AM4:00~6:00 気温 27℃ 水温 29℃
- (4) 室内分析 上記文献を参考に、サンプルを遠心分離し、100ml を 20ml まで濃縮、更に底泥を拾ってしまった為、メッシュネットで濾過した。そのサンプルを計数法（離合社界線入り計数板 5608-C 5608-D を使用）1ml 毎のサンプルを 1 ロットとして、すべて計測した。同定については、確認できた検体だけを明示し、その他ミジンコ類は、ミジンコ(ダフニア)とした。
- (5) 調査結果 (図 8・表 6 参照)
- ① すべての地点においてケンミジンコ総数の割合が大であった。ケンミジンコ総数とは、ノープリウスとケンミジンコ成体（コペポディドを含む）の 2 種に分類した総数。ケンミジンコの多い要因としてケンミジンコが捕食する際、能動的に捕食をする故に多数を占められると考えられる。
  - ② ムジナモの株数の少ない B-1・B-3 地点でケンミジンコの割合が減少し、ミジンコの割合が大であった。また、割合は少ないが *Daphnia pulex* が見られた。水路の位置が離れているが同様の結果だった。ケンミジンコは、ノープリウス、コペポディド初期は草食であるが、コペポディド後期から雑食になる。このことから、ケンミジンコは小さいが数が多い。生息域が餌となる動物プランクトンと同じ事から動物プランクトンの増殖を抑えたり、*Daphnia* は幼体のうち大型のコペポディド又はケンミジンコに捕食され、成体になると小型コペポディドに卵を捕食される為と考えられる。これより中栄養湖のミジンコ分布の要素が見られた。
  - ③ ムジナモの株数の多い地点と水元公園のケンミジンコの割合の多さが酷似していた。また、小型のミジンコ、ワムシが見られた。これより富栄養湖のミジンコ分布の要素が見られた。
  - ④ 夏の間、通常一時的に減少する *Daphnia pulex* が見られたことは、宝蔵寺沼での水深の浅さ→日周期鉛直運動が小さい。ミジンコの捕食動物の人為的排除などの特徴からと考えられる。
  - ⑤ すべての地点で、*Daphnia* が頭を尖らせたり、殻刺を伸ばすなどの個体の季節的形態変化は見られなかった。これより藍藻のミクロキスティスの毒素やフサカによるフサカ物質等の他の生物から出す化学物質の影響が少ないことが考えられる。



図 8 宝蔵寺沼で採捕されたミジンコの頭微鏡写真



表 6 ムジナモ自生地におけるミジンコ個体数の測定結果

| 種類 \ 採取地点     | A-1 | A-2 | A-3 | B-1 | B-2 | B-3 | 水元1 | 水元2 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ミジンコ          | 1   | 73  | 352 | 493 | 43  | 6   | 7   | 18  |
| ケンミジンコ        | 64  | 667 | 143 | 186 | 324 | 142 | 21  | 50  |
| ケンミジンコ ノープリウス | 59  | 965 | 245 | 323 | 757 | 631 | 38  | 318 |
| ゾウミジンコ        | 0   | 4   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   | 0   |
| シカクミジンコ       | 26  | 5   | 0   | 0   | 61  | 76  | 2   | 12  |
| カイミジンコ        | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   |
| マルミジンコ        | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   | 2   | 0   | 0   |
| ネコゼミジンコ       | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| ノロ            | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

(6) 総括 ムジナモの生育環境で、高い割合でミジンコの個体数を確認できたことから、捕食葉によって餌を捕らえるムジナモに対しては、水元公園の個体数に比べミジンコだけに限れば充分な環境であるといえよう。

また、*Daphnia* は、環境ストレスに弱く、湖沼生態系の中の最も重要な生物（鍵生物）の一つであり、バイオマニピュレーション：*Biomanipulation* を行っていくうえでも、湖沼の富栄養化は、湖沼になんらかの要因で流入する栄養塩量の増大が直接的な原因であるので、それにより植物プランクトンが増大することを考えると植物プランクトンの天敵：ミジンコを増加させ摂食してもらうやり方も一つの方策であると考ええる。

今回の調査では、ミジンコの同定の確立、ミジンコの日周期鉛直運動による移動（効率よい採集時間の特定）、年間のミジンコの定期的な増減など考えると宝蔵寺沼の水環境に関してミジンコについて継続的な調査が必要であると考ええる。

## 7 湖沼（里山）生態系について

2009 年度から 5 ヶ年計画で“ムジナモの緊急調査”が埼玉大学を中心に実施された。その報告書が 2015 年 3 月に羽生市教育委員会より刊行されたが、報告書の 3 分の 2 が生物多様性に関する調査結果の解析に充てられている。

水生動物相の変遷の評価には、シンプソンの多様度指数  $D$  が用いられた。

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2 \quad (s: \text{動物種の総数}, p: \text{個体数})$$

種数が多く均一性が高いほど  $D=1$  に近づき、その集団の多様性が高いことを表し、集団が完全に単一種で占められれば  $D=0$  となる。全水生動物を用いてシンプソンの多様度指数を比較した

ところ、過去の調査の平均が 0.48 であったのに対し、今回の調査における指数の平均値は  $D=0.61$  となり、自生地における種多様性が高くなっていることが明らかになった。自生地における魚類の優占種は、過去 20 年間でタナゴ類からモツゴ類へと変遷していることも明らかとなり、現在の自生地の水生動物の種多様性は特定外来生物に支えられていると言える。

ムジナモ自生地周辺は、様々な水辺環境の整備により、関東平野の中でも貴重な自然の残る場所となっている。昆虫類の種類・個体数も豊富で、たとえばチョウトンボやジュンサイハムシは個体数が非常に多い。また、ハガクビナガゴミムシ、ムモンチャイロテントウなど甲虫類の希少種も多く確認され、陸域を含む水辺の昆虫多様性は高い。水生甲虫類は、動物性プランクトンや小さな昆虫、藻類などを食べて生活しており、動物性プランクトンを捕らえて栄養摂取するムジナモと環境の嗜好性がよく似ている。このため、ミジンコなど動物性プランクトンの多い環境にムジナモが密生し、その間に小型のゲンゴロウ類、ガムシ類がかなりの高密度で生育する状況が見られるのである。

一方、植生調査からは、かつてヨシが密生していた地域がアゼスゲの優先する植生へと変化していることが示された。この変化は定期的なヨシ狩りによってもたらされたものと考えられる。アゼスゲ群落は湿潤な環境で成立し、乾燥化にともなってヨシさらにオギの群落へと遷移するので、ヨシ狩りという人為的介入がなければ現在の植生状況はあり得ない。ムジナモの栽培実験からは、4 種類以上の水生植物が共存する水環境の方が、1~2 種類共存の場合よりもムジナモが長期間安定して生育することも明らかとなっている。

原自然とは異なり、人間活動を内在した人為的自然である日本の里山は、未来地球における「自然と人間の良好な関係」のモデルとして世界的に注目されている。必ずしも「山」である必要はなく、むしろ平野部の方が人間のかかわりが大きく、「里山」にふさわしい場所が日本にはたくさん残されている。埼玉県羽生市の宝蔵寺沼ムジナモ自生地は、世界に冠たる里山と言っても過言ではない。生物多様性が生態系の健全度をはかる指標であるとするならば、半世紀をかけてムジナモの復活を遂げた宝蔵寺沼は、原自然の遷移とは趣を異にした人間介入型の遷移を具現している点でも貴重な存在である。羽生市教育委員会が策定した「宝蔵寺沼保存管理計画」では、基本理念として「ムジナモが自生する場としての保存と継承を図る」だけでなく、「生物多様性の保全を図る」ことが謳われており、目指す将来像として「多様な生物がバランスよく生育できる環境」が掲げられている。この理念に沿って、ムジナモの増殖を拒む要因を一つ一つ取り除く活動が続けられることにより、人為的介入が良好な攪乱となって、希少種までもニッチを獲得するような生態系が形成されているのである。本来清澄な水系を好むムジナモにとって富栄養状態の宝蔵寺沼は最適の棲み家とは言えない。しかしながら、宝蔵寺沼は世界中で唯一残された自生地なのである。ムジナモ自生地は、地元保存会や埼玉大学の持続的で臨機応変な保護活動が生み出したビオトープである。

埼玉県レッドデータブック植物編（2011 年度）には、ムジナモは「野生絶滅」と記されている。一方、国のレッドデータブックでは、宝蔵寺沼における取り組みを踏まえて「絶滅危惧ⅠA 類」と記されている。この「人為的取り組み」こそ今後の里山生態系保全全般に共通したキーワードであると考えられる。自然生態系は極相林へと向かう地球史的遷移の過程にある。この長いスパンからみると、人為的自然である里山生態系の遷移の進度は速く、その永続的な保護

は原理的に困難であるとみななければならない。少しでも長く自然と人間の良好な関係を維持するためには、里山生態系を保護する私たちの行動自体を保護する必要がある。ムジナモの保護増殖とは、自生地の生態系保全という人間活動そのもののことなのである。

従来の生態学は、自然生態系が極相に達して生物多様性が最大となる可能性を考えていた。しかしながら、統計生物学上の確率論期待値からは、大差で里山生態系の方が生物多様性に優れると結論される。「人間の関与が大きいほど生物の多様性が損なわれる」という意見は否定されることになったのである。人間と自然の双方向的な依存関係を認め、自然の側も人間の関与を必要としていると認識を改めなければならない。一度は絶滅したとされたムジナモを半世紀ぶりに復活させた人々の営みこそ、世界に誇る日本の里山生態系のモデルケースと言えよう。

## 謝辞

FT-IR の測定にあたり、埼玉大学分析支援センターの藤原隆司准教授には多大な協力をいただいた。蛍光 X 線分析では埼玉大学教育学部の金子康子教授、水質分析では工学部の藤野毅准教授からたびたび協力をいただいた。この場を借りて御礼申し上げる。

## 参考・引用文献

- 羽生市教育委員会 (2015)「宝蔵寺沼ムジナモ自生地緊急調査報告書」  
羽生市教育委員会 (1982)「ムジナモとその生育環境」  
沖野外輝夫 (2002)「湖沼の生態学」共立出版.  
一國雅巳 (1972)「無機地球化学」培風館.  
中村聡 (2012)「「青き清浄の地」としての里山」九州大学出版会.  
花里孝行 (1998)「ミジンコその生態と湖沼環境問題一」名古屋大学出版会.  
水情報国土データ管理センター (2016)「河川水辺の国勢調査基本調査マニュアル」  
「動植物プランクトン調査編」  
葛飾区環境部環境課 (2017)「平成 26 年度環境調査報告書」