

芦ヶ池におけるアオコ発生 要因分析と対策法の検討

—2022年度から水資源機構との共同研究—

データ提供: 豊川用水総合事業部



道半ば！！

岐阜大学・応用生物科学部
ユニオン・インフラメンテナンス
共同研究講座

特任教授 千家正照
(岐阜大学名誉教授)

岐阜大学・応用生物科学部

ユニオン・インフラメンテナンス共同研究講座

<https://www.abios.gifu-u.ac.jp/education-member/ltdunion/>

高校生・受験生の方

在学生の方

一般の方

岐阜大学 応用生物科学部
Gifu University Faculty of Applied Biological Sciences

サイトマップ お問い合わせ 交通アクセス

サイト内検索

ホーム | 学部案内 | 課程・コース | 大学院 | 教員一覧 | 留学・国際交流

ユニオン・インフラメンテナンス共同研究講座

トップページ > ユニオン・インフラメンテナンス共同研究講座



岐阜大学およびハラス田穂
くさね田穂の「水」のテーマに関する研究

中津川中央水門の治水施設
くさね田穂の治水に関する研究

山形県野田川（北見道）
くさね田穂と農業関係者のための研究

岐阜大学と(株)ユニオンとの共同研究室 (2020年4月スタート)

農業土木学を中心に現在の農業農村整備で発生している重要課題の中から、企業内で実施する業務内容に応じて年間に数テーマ以上を設定し、大学と共同で研究を進展・充実させ、教育研究にまで及ぶような活動を展開していくことを目指しています。

News&Topics

共同研究講座トップ

News&Topics

研究内容

研究業績

メンバー

担当授業

インターンシップ

公開講座

連絡先

設置趣旨

- 地域農業の持続的発展
- 教育研究支援による農業土木技術者の育成
- 若手社員の技術力向上

研究内容

豊川用水芦ヶ池の水質改善対策



渥美半島中央部に位置する芦ヶ池は、農地に直接用水を配るとともに、豊川用水の幹線水路と連結し用水需要変動を吸収するために築造された調整池である。しかしながら、周辺の土地利用形態を主要因とする水質障害(アオコ)が発生し、造成当初から農業用水や周辺環境に対して悪影響を与えている。本研究では、芦ヶ池を巡る水利諸量の観測データを用いて、水収支解析を行うことによって水質悪化のメカニズムを解明し、水質改善のための対策を検討する。【担当:西村眞一・乃田啓吾・片桐正己・石神直哉・千家正照】

研究内容

農業用ため池のレベル2地震動の耐震性評価



東日本の震災以降多発している大規模地震や今後予想される確率として、農業用水利施設の大規模地震に対する耐震照査と必要なる。農業用フィルダムのレベル2地震動ではニューマーク法が用いられるようになってきているが、従来のこの手法では、すべり変位により土塊重心が低下し起動モーメントの値が小さくなることが考慮されていない。本研究では、滑動後のすべり土塊のスライスを再分割し、起動モーメントと抵抗モーメントを再計算することで最終的なすべり変位を算定する新手法を考案した。【担当：西村眞一・吉村伸一】

土質工学

短時間降雨強度式の推定



気候変動の影響を受け、各地でゲリラ降雨による湛水被害が多排水量の計算に使われてきた短時間降雨強度式は過去の降雨記なのであるため、雨の降り方が大きく変化してきた近年では、従来の推定式では短時間降雨強度を過小に評価することが懸念されている。本研究では、正確な短時間降雨強度の推定が、排水計画に急務であることを認識し、全国の気象台で公表している膨大な降雨データを活用して新降雨強度式を作成することを目的としている。【担当：千原英司・木野村遼】

農地排水

現場で課題になっていることがあればご連絡ください！！！！

森林流域からのSi、Feイオンの流出供給量



森林から供給される栄養塩は河川や海域の生産性や健全な海域に与える項目として注目されている鉄と珪素の微量元素について分析し、平水時と出水時における流出供給量の経時変化を明らかにすることを目的とする。【担当：平松研・大西健夫・市川聖佳】

水質水文

自流域からの流出水を利用した小規模灌漑システム



一般に中山間地に位置する農耕地は灌漑のための水源確保が困難な三重県御浜地区も同様に、中山間地を開拓した国営の造り畑地灌漑に不足している。本研究は、自流域からの流出水を下流端に配置した沈砂池に貯留し、団地上流のファームポンドに流出水をポンプアップして灌漑水を確保する自流域完結型の小規模灌漑システムについて検討する。具体的には、過去10年間の気象データを用いて、造成団地の面積、マルドリ作付面積、TRAM値などの数値から沈砂池（貯水池）の

畑地灌漑

【担当：千家正照・木野村遼】

岐阜大学・応用生物科学部 ユニオン・インフラメンテナンス共同研究講座

[ホーム](#)[学部案内](#)[課程・コース](#)[大学院](#)[教員一覧](#)[留学・国際交流](#)

ユニオン・インフラメンテナンス共同研究講座

[トップページ](#) > [ユニオン・インフラメンテナンス共同研究講座](#) > [メンバー](#)

メンバー

研究室長

千家正照	名誉教授	水利環境学	(researchmap) (researchgate)
------	------	-------	--

研究員

岐阜大学

西村 真一	教授	施設環境工学	(researchmap) (researchgate)
平松 研	教授	流域管理学	(researchmap) (researchgate)

[共同研究講座トッ
プ](#)[< News&Topics](#)[< 研究内容](#)[< 研究業績](#)[< メンバー](#)[< 担当授業](#)[< インターンシップ](#)[< 公開講座](#)[< 連絡先](#)

+教授:大西健夫、准教授:乃田啓吾…………

芦ヶ池におけるアオコ発生の変因分析と対策法の検討

章	内容	開始頁
1	豊川用水における調整池の水質	1
2	アオコとは	8
3	芦ヶ池におけるアオコの発生状況	13
4	水収支解析	19
5	アオコ発生の変影響変因	30
6	アオコと水管理の関係	43
7	リン収支解析	48
8	アオコ対策	53
9	参考資料	P1—P12

1. 豊川用水における調整池の水質



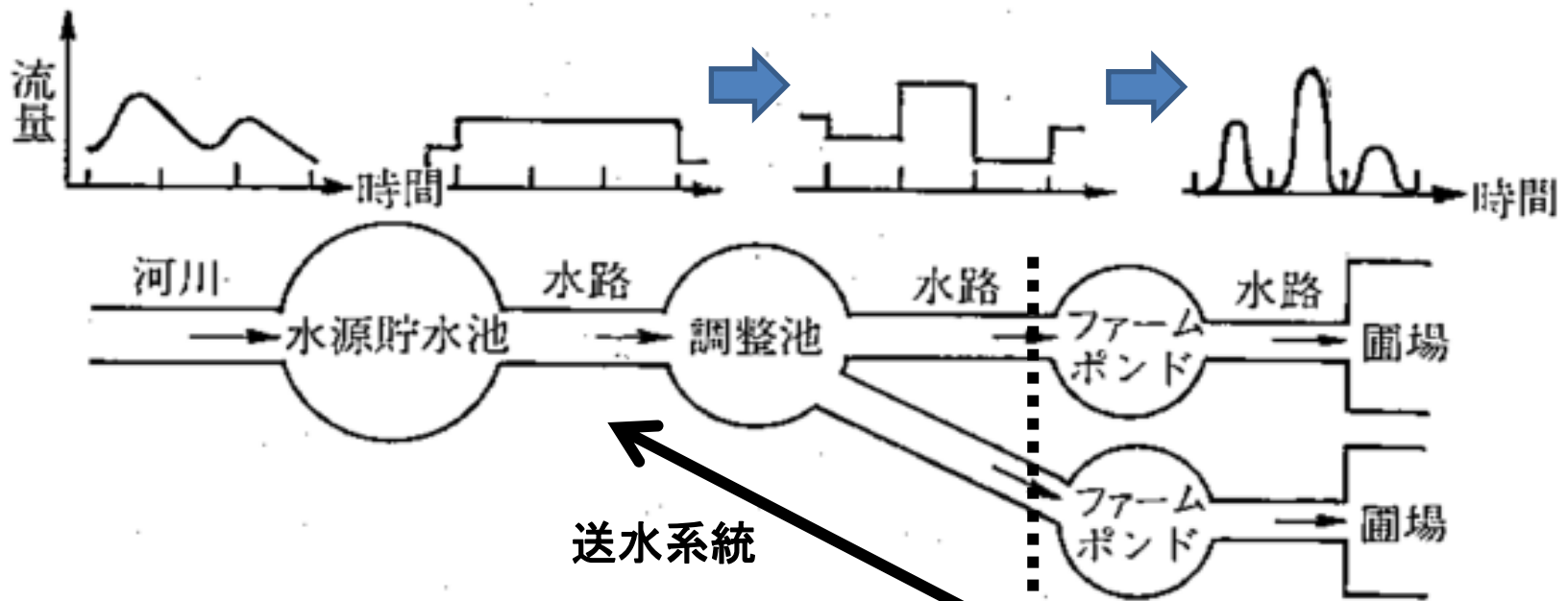
調整池とは？

・急な用水量変化に対応する送水流量制御

中間貯留施設！「貯水池」ではない！
(緒方博之：水資源利用と中間貯留)

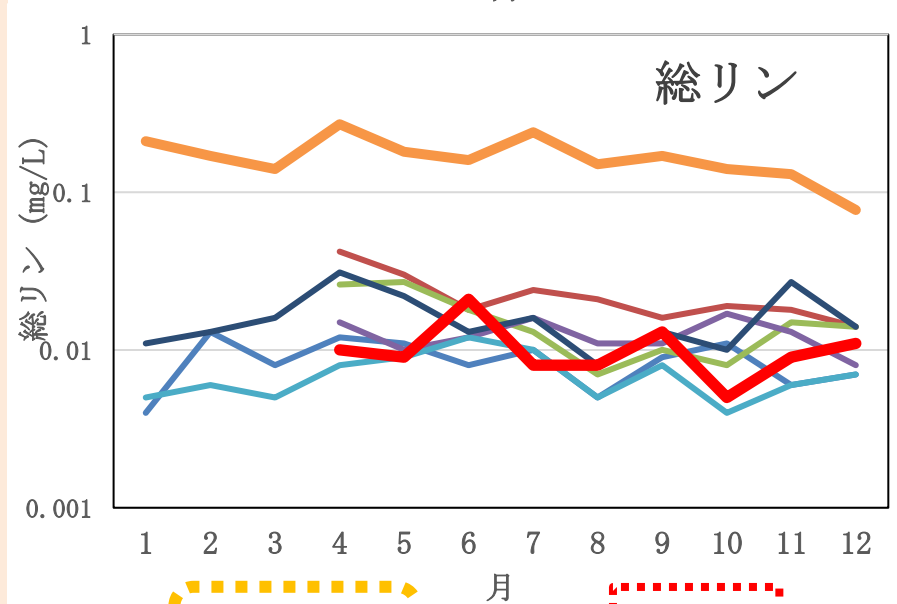
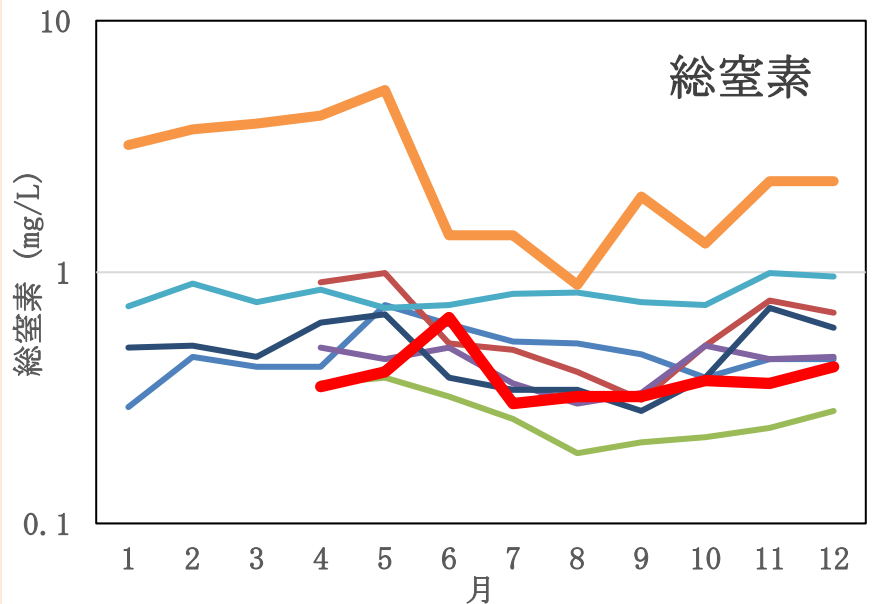
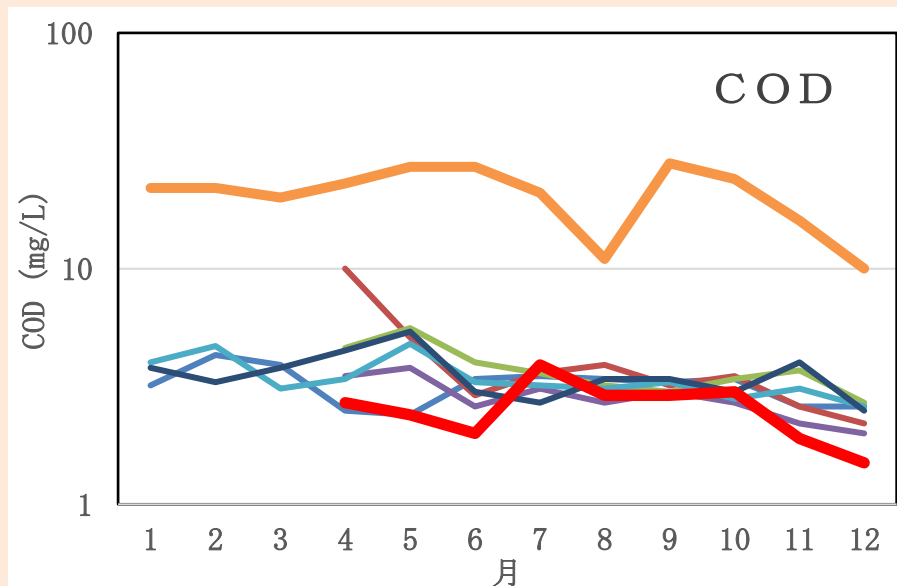
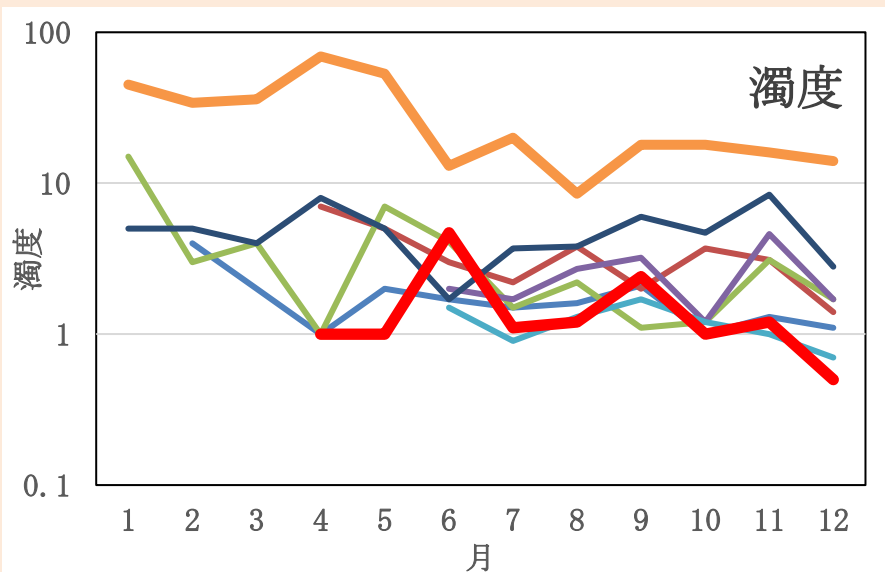
調整池は用水の供給変動等に対応し数日程度の流量調整

ファームポンドは原則として1日以内の用水の需給関係を調整



【出典】
土地改良事業計画設計基準及び運用・解説
計画「農業用水(畑)」平成27年5月 p.99

調整池の水質(2019年)



—大原 —三ツ口池 —万場 —駒場 —蒲郡 —芦ヶ池 —初立池 —大野

調整池の水質(2019年)

	大野	大原	三ツ口池	万場	駒場	蒲郡	芦ヶ池	初立池	農業用水基準	環境基準
濁度(度)	1.57	1.61	3.62	3.74	1.84	0.78	28.71	4.84	—	—
BOD (mg/L)	0.78	0.74	1.62	1.36	0.93	0.74	4.31	1.22	—	—
COD (mg/L)	2.58	3.21	4.11	3.76	2.84	3.45	20.92	3.57	<6	<5
総窒素 (mg/L)	0.39	0.48	0.62	0.27	0.43	0.82	2.66	0.49	<1	<1
総リン (mg/L)	0.010	0.009	0.022	0.015	0.013	0.007	0.170	0.016	—	(<0.1)

農業用水基準: 農業用水基準(水稲) [現行の基準: 昭和45年3月 農林省]
 環境基準: 湖沼Ⅴ類型 (利用目的: 水産3種、工業用水、農業用水、環境保全)
 [現行の基準: 昭和46年12月 環境庁]

1. 調整池の水質



Google map より

調整池の概観

1. 調整池の水質



芦ヶ池の周辺は
農地と畜産団地
2段構造:水深
(3.75, 6.5 m)

万場調整池の**法
面と底面をライ
ニング**した完全
な人工貯水池。
深い水深
(14.7m)



調整池の概観

Google map より

他の調整池は森
林などの自然流
域に囲まれている

芦ヶ池の水質問題



2021年8月5日頃撮影 豊川用水総合事業部 提供

アオコの発生により灌漑水として利用すると、**スプリンクラーの目詰まり**や**野菜への付着**などが発生し、**畑地灌漑用水**としては**利用が困難**である。

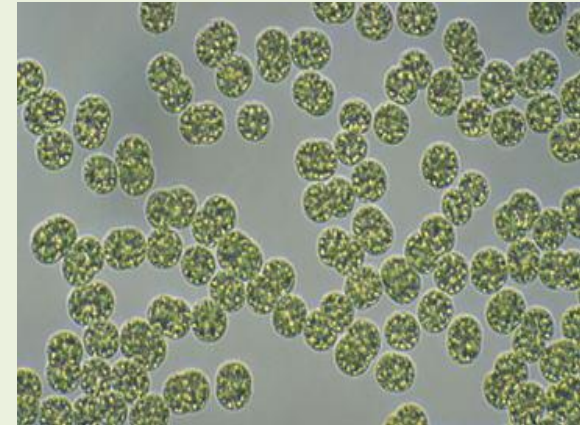
2. アオコとは??



琵琶湖(彦根)R2/3/06 (出典)滋賀県HP



(出典)琵琶湖知新HP

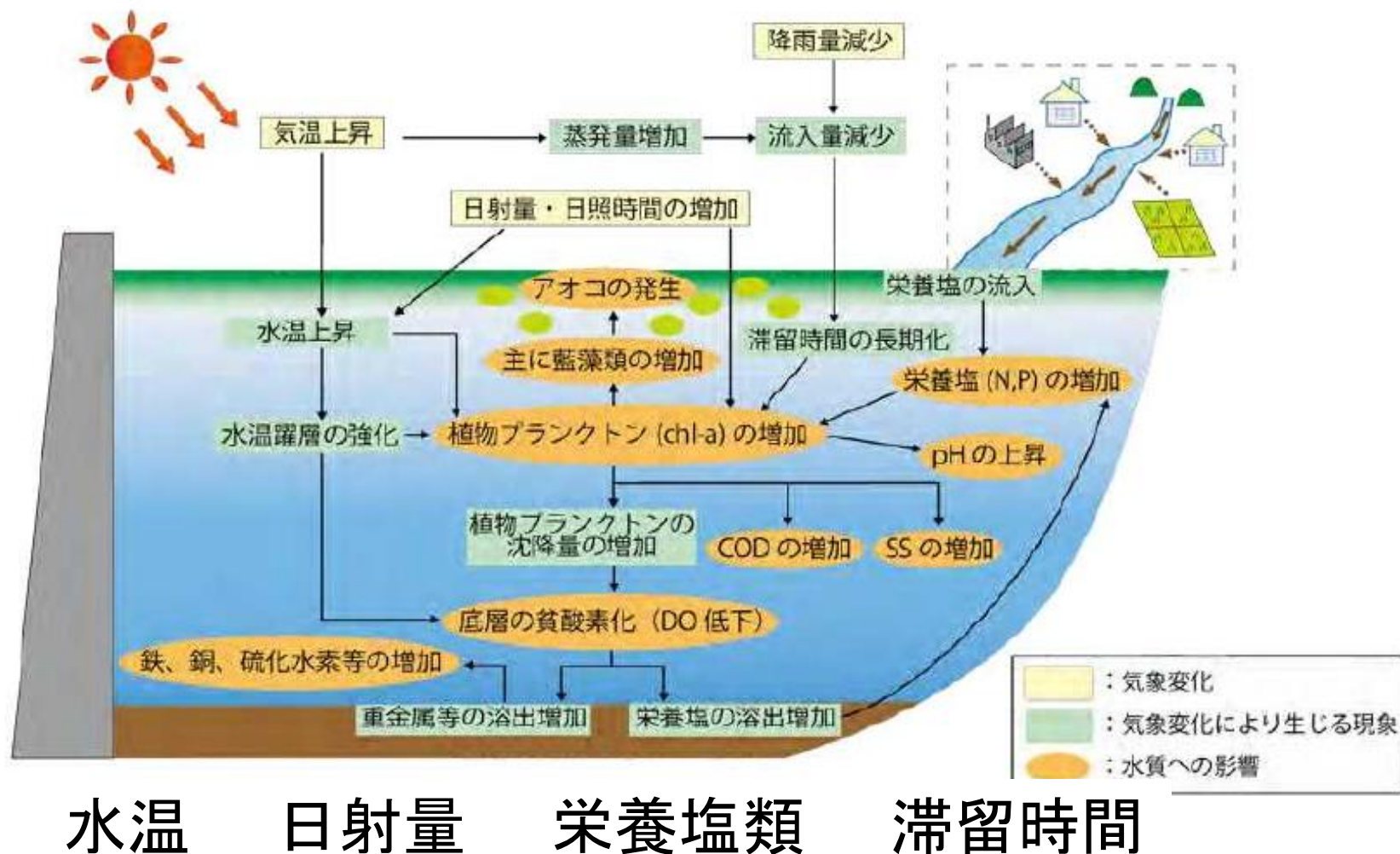


ミクロキスティス (出典)福岡県HP

- **アオコ**については**ミクロキスティス**やアナベナなど、**藍藻類**に属する10種類の**植物プランクトン**が原因となって発生します。
- 細胞内に浮き袋のような**ガス胞**を持つことから、**水の表面に浮遊**しているため、水の表面が粉をふったように青く見え、**アオコ**と呼ばれる。
- アオコは、**富栄養化**が進んだ湖沼等において**浮遊性藍藻**が適度な光と温度環境の下で**光合成**によって増殖する。
- ミクロキスティス(Microcystis属)には**ミクロキスティン**とよぶ**有毒な物質**をもつものがある。

高比良 光治他：アオコ原因生物の生態と対策技術の現状
https://keea.or.jp/pdf/knakyokanri/44/vol_44_11.pdf

アオコの増殖メカニズム



アオコの評価法 『見た目アオコ指標レベル』

国立環境研究所で開発された指標

レベル1



アオコの発生が肉眼で確認出来ない

レベル2



うっすらとすじ状にアオコの発生が認められる

レベル3



アオコが水の表面全体に広がりパッチ状になっている

レベル4



膜状にアオコが湖面に覆う

レベル5



厚くマット状にアオコが湖面を覆う

レベル6



アオコがスカム状に湖面を覆い、腐敗臭がする

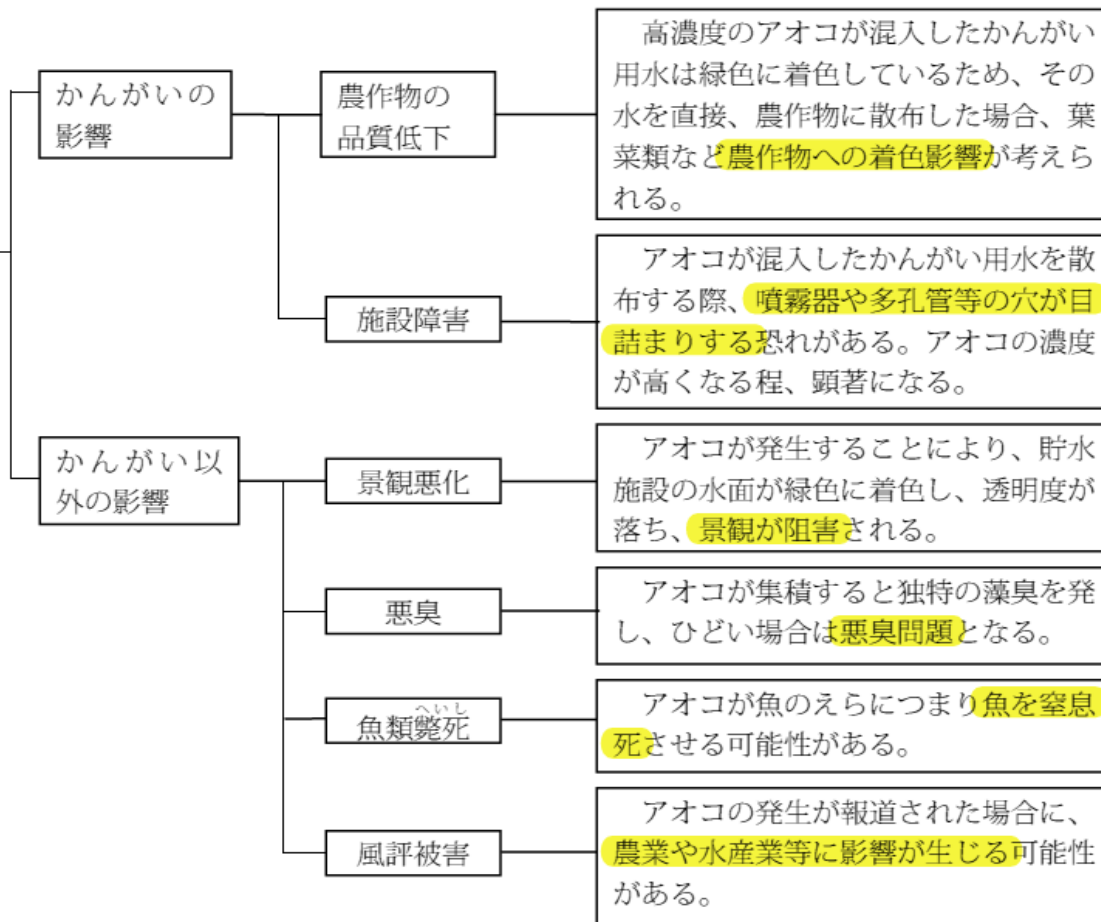
アオコ評価のための水質項目

分類	水質項目	測定意義
発生要因	窒素(T-N 等) リン(T-P 等)	水の富栄養化の指標。これらは植物プランクトンの 栄養源 となるのでアオコの増殖程度を把握する上で役に立つ。 農業用水質基準(T-N) 。
	電気伝導度(EC)	水中の 溶解物質の総合的評価 ができる。 富栄養化の程度 を把握する上で役に立つ。 農業用水質基準 。
	溶存酸素(DO)	溶存酸素の低下は、 底泥からの栄養塩類の溶脱環境 を把握する上で役に立つ。 農業用水質基準 。
	水温	水温は アオコの増殖 を把握する上で役に立つ。
影響評価	クロロフィルa(Chl.a)	アオコを形成する 植物プランクトンの指標 。アオコの発生程度を把握する上で役に立つ。
	SS または濁度 透明度または透視度	水の濁り・透明感 の指標。アオコの発生程度を把握する上で役に立つ。 農業用水質基準(SS) 。
	化学的酸素要求量 (COD)	水の 有機汚濁 の指標。アオコの発生程度を把握する上で役に立つ。 農業用水質基準 。
	pH	酸性・アルカリ性の度合の指標。植物プランクトンが多いと 光合成 を行う日中にpHが上昇する。 農業用水質基準 。

アオコ発生による影響・被害

芦ヶ池

アオコ発生による影響・被害



畑地灌漑



サンテパルク田原

出典：畑作物の水質環境 食の安全とおいしさを求めて 鈴木光剛

出版：畑地農業振興会(1984)

3. 芦ヶ池におけるアオコの発生状況



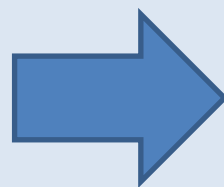
2021年8月5日頃撮影 豊川総合事業部 提供

芦ヶ池調整池の誕生

改修前

- 奈良時代中期に築造された**ため池**
- 流域面積: 2.38km²
- 有効貯水量: 98万 t
- 水深: 2m
- 貯水面積: 48ha
- 皿池
- 下流水田地帯の**用水源**

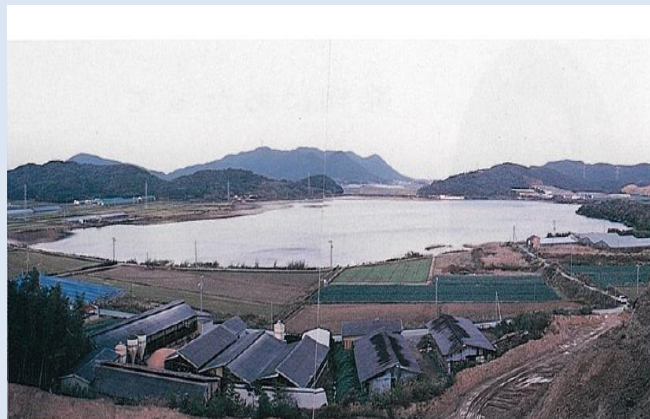
(平成7年)



- 堤体の**嵩上げ**、池敷の**掘削**→利用水深の増大
- 池周りの護岸工、管理用道路
- 排水路の設置による**排水分離**
- 池敷の**掘削土**の農地還元

改修後

- **調整池**として生まれ変わる
- 有効貯水量: 200万 t
- 水深: 3.75~6.2m
- 貯水面積: 45.7ha
- 豊水時: 大野頭首工から取水した水を東部幹線を通じて貯水
- 渇水時: ポンプアップにより再び幹線に戻して下流の水需要(畑地灌漑)に応える
- 下流水田地帯の**用水源**



アオコ発生の原因???

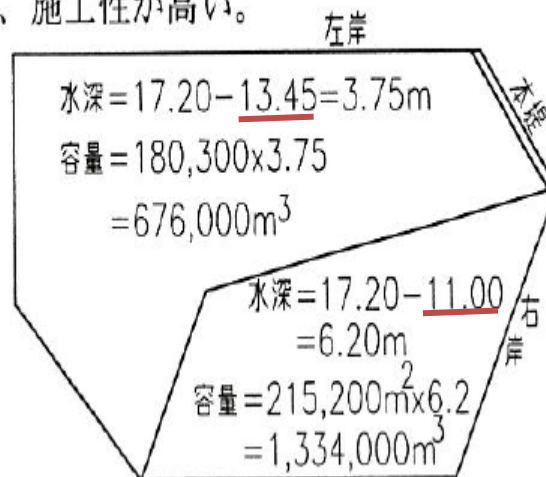
池床の掘削

池床の掘削方法については全面掘削案と部分掘削案について検討した結果、下記の理由により右岸側池敷をEL. 11. 00mまで掘削する部分掘削案を採用した。



左岸池敷掘削（水陸両用掘削機）

- ① ヘドロの層厚がうすく、全面改良する必要がない。
- ② EL. 11. 00では、掘削面積の60%がAs層及びDg層であり、施工性が高い。
- ③ ドライワークが十分可能。
- ④ 水替期間が短縮できる。
- ⑤ 仮締切工が1回ですむ。
- ⑥ 作業条件が良いため、工期の短縮ができる。
- ⑦ ヘドロ層の掘削除去が少なくてすむ。
- ⑧ 池敷をEL. 11. 00まで下げてもポンプ原動機の出力にほとんど影響を与えない。
- ⑨ 工事費が安い。



左岸護岸工周囲地盤高の変更のため、当初の貯水量が確保できないことが判明し、左岸側から**220千m³**を掘削



右岸池敷掘削

総掘削量575千m³の内、**底質ヘドロ40千m³**は捨土、残りはシルト質砂礫のため背後地の盛土に利用。

(出典) 芦ヶ池技術誌

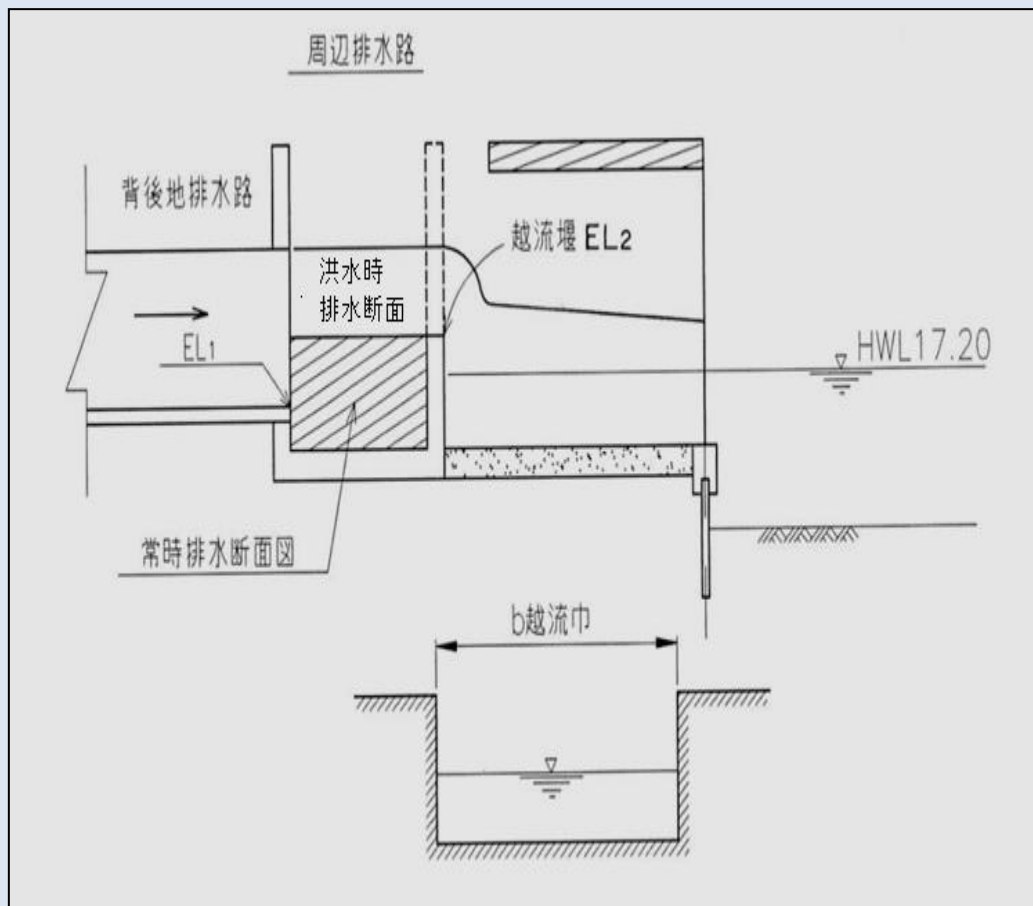
芦ヶ池の地盤高は、北部ないし北西部で高く(EL14-15m)、南東部で低く(EL 13m台)になっている

軟弱地盤の掘削は工事単価が高い

ヘドロ層は、本堤上流200m付近で約50-80cm、次いで左岸上流側にかけて厚く、右岸側及び土取場付近では0-0.2mと浅くなってる。

アオコ発生の原因？

周辺排水路の設置



芦ヶ池に流入する背後地の排水は、雨水排水の他に集落排水および畜産排水が混入して流下し、**常時排水の水質は農業用水として好ましくない**状況である。

洪水時排水と常時排水の分離

常時排水は、芦ヶ池周辺に排水路を設置し、芦ヶ池に流入させず、直接下流の幹線排水路（圃場整備で用排分離完了）に導水する。

単位流出量： $< 1\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$

夏期降雨日当たりの平均雨量17.5mm、洪水到達時間1時間とし、シャーマン降雨強度式から1時間降雨強度を求め、流出率55%とする

洪水時排水は、周辺排水路を越流して芦ヶ池内に流入させ、**用水として利用**する。

単位流出量： $> 1\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$

（出典）芦ヶ池技術誌

3. アオコの発生状況

芦ヶ池の改修前後の水質

(出典) 芦ヶ池技術誌

		改修前				改修後			
		昭和60年10月9日		昭和61年3月13日		2020年10月6日		2020年3月5日	
		堤体南端	池西端部	堤体南端	豊川用水	表層	底層	表層	底層
気温	°C	26.6	26.5	12.6	12.2	22.2	22.2	10.5	10.5
水温	°C	20.3	20.7	11.9	9.4	23.3	22.6	10.4	9.9
透明度	m	0.6	—	0.6	—	0.4	—	0.5	—
pH		9.6	9.6	9.6	7.4	9.6	9.5	8.2	8.2
COD	mg/l	21	18	35	2.2	25	22	15	17
BOD	mg/l	11	9	21	0.7	2.1	2.7	5.1	5.7
SS	mg/l	22	24	40	<1	35	44	43	43
DO	mg/l	12	12	12	9.8	9.7	9.1	12	12
大腸菌数	MPN/100ml	330	—	70	2	70	49	240	330
全窒素	mg/l	2.29	2.34	2.48	0.22	3.4	2.4	3.4	3.6
全リン	mg/l	0.23	0.29	0.36	0.02	0.087	0.097	0.12	0.13
EC	mS/m	—	—	—	—	10	17	11	17

黄色: 改修後、悪化した水質項目

赤字: 農業用水基準を満たしていない水質項目

農業用水水質基準

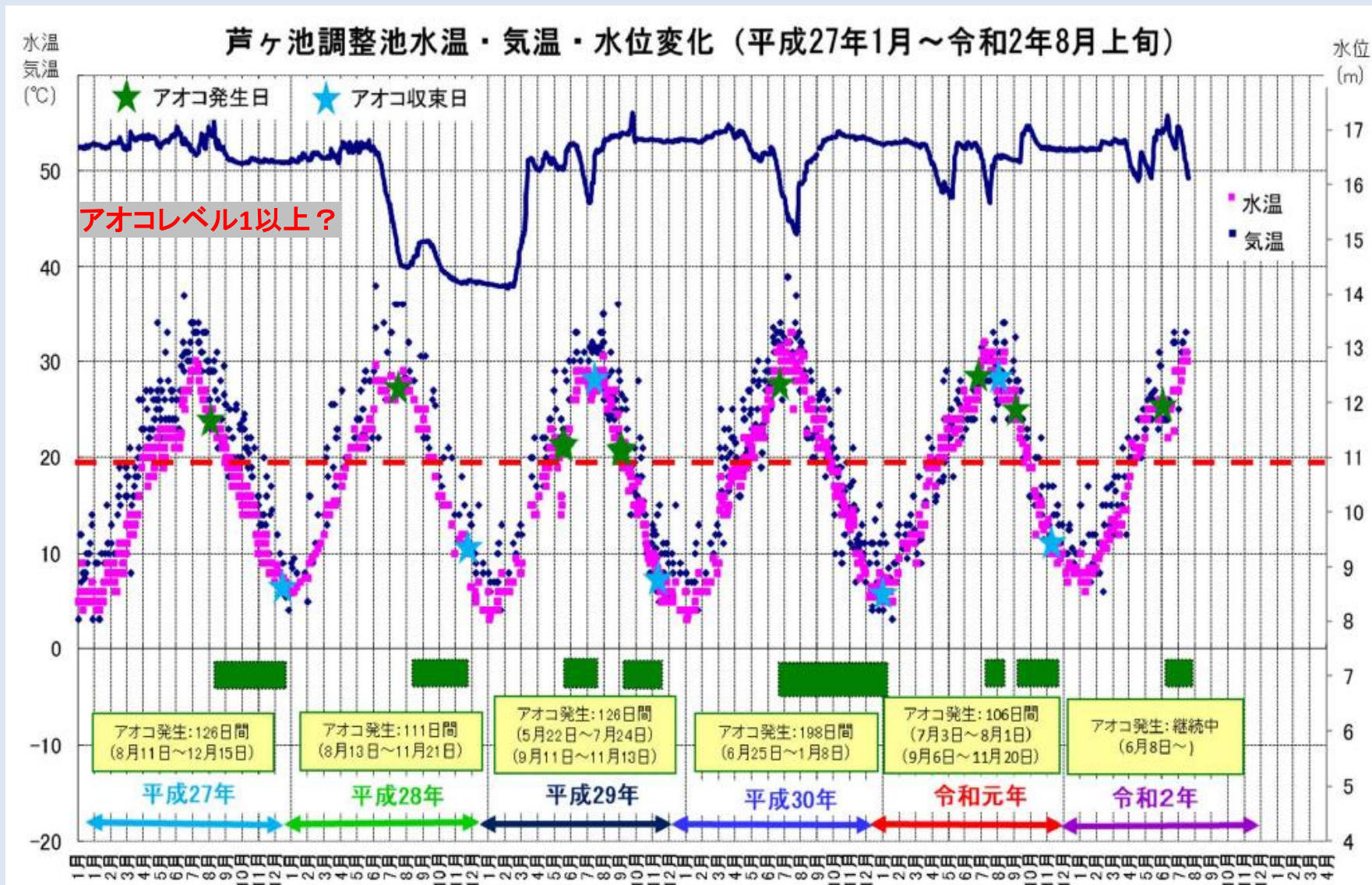
項目	基準値
pH (水素イオン濃度)	6.0~7.5
COD (化学的酸素要求量)	6mg・l ⁻¹ 以下
SS (無機浮遊物質)	100mg・l ⁻¹ 以下
DO (溶存酸素)	5mg・l ⁻¹ 以下
T-N (全窒素)	1mg・l ⁻¹ 以下
EC (電気伝導度)	0.3mS・cm ⁻¹ 以下
As (砒素)	0.05mg・l ⁻¹ 以下
Zn (亜鉛)	0.5mg・l ⁻¹ 以下
Cu (銅)	0.02mg・l ⁻¹ 以下

(農林省公害研究会, 昭和 45 年)

改修前の水質は、湖沼B類型、農業用水水質基準と比較すると、pH、COD、全窒素、~~全リン~~の基準を大きく上回り、汚濁がかなり進行している。汚濁発生源は生活排水、肥料、畜舎よりの糞尿等の流入であるが、閉鎖性の水域で水が滞留するため、流入した汚濁物質が蓄積しやすく、汚濁が著しくなった。

周辺の汚濁発生源である家庭排水、肥料及び畜舎からの汚濁水の流入は池の周囲に排水路を設けることにより、大幅に減少される。さらに、豊川用水からの良質の水が多量に導水されるため現在の水質は良好な湖水となることが予想される。

アオコの発生状況



4.水収支解析



水収支の観測項目

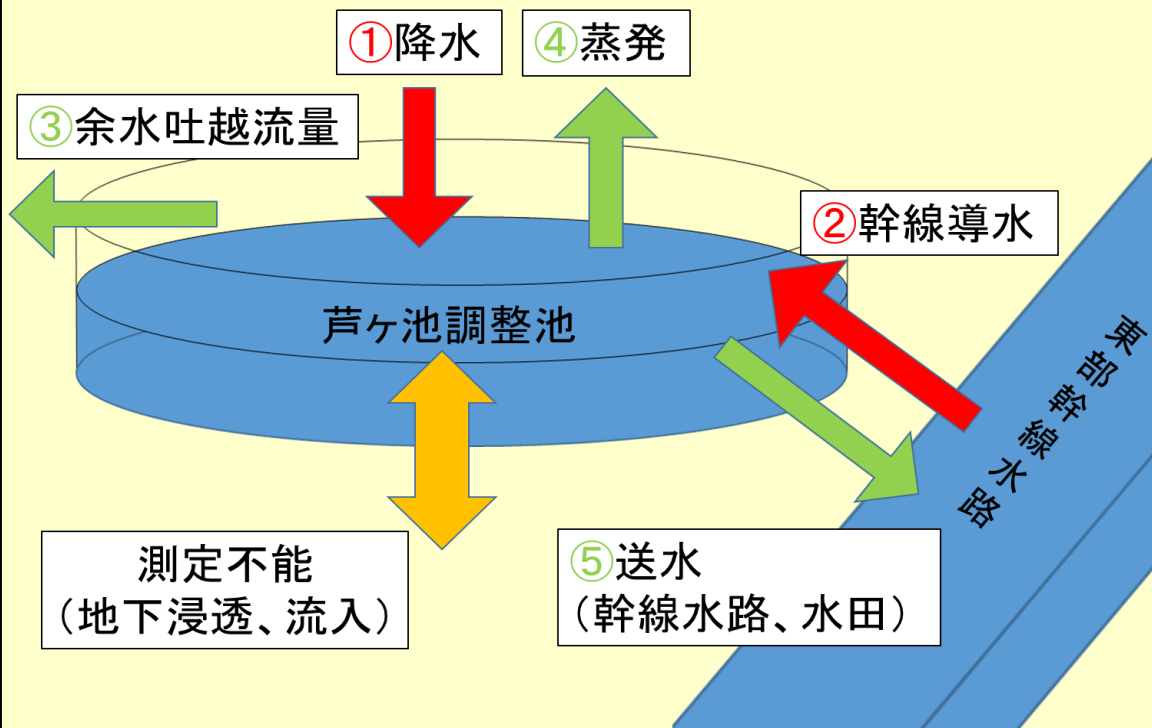


S: 貯水量
 R: 降水量
 E: 水面蒸発量

D: 洪水吐からの越流量
 P: 受益地への送水量
 I: 幹線からの導水量
 B: 幹線へ還元水量

水収支式

$$\Delta S = (R+I) - (E+D+P+B)$$



水収支モデル (水収支計算)

ΔS : 提供データより求めた貯水変化量 (実測値)

$\Delta S'$: 計算上の貯水変化量 = (① + ②) - (③ + ④ + ⑤)

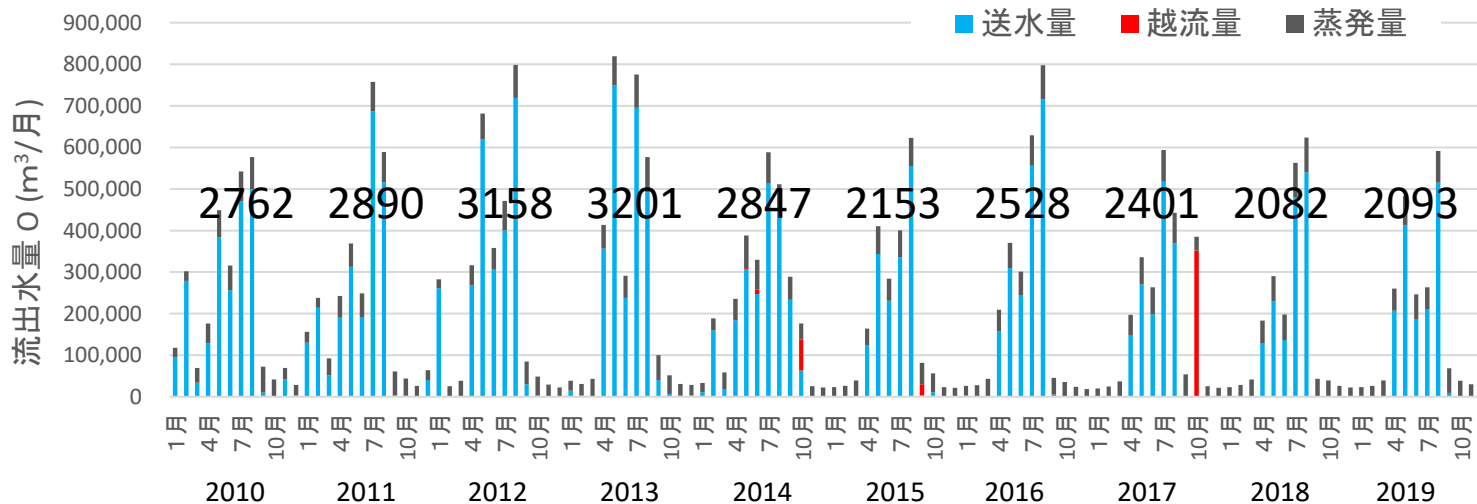
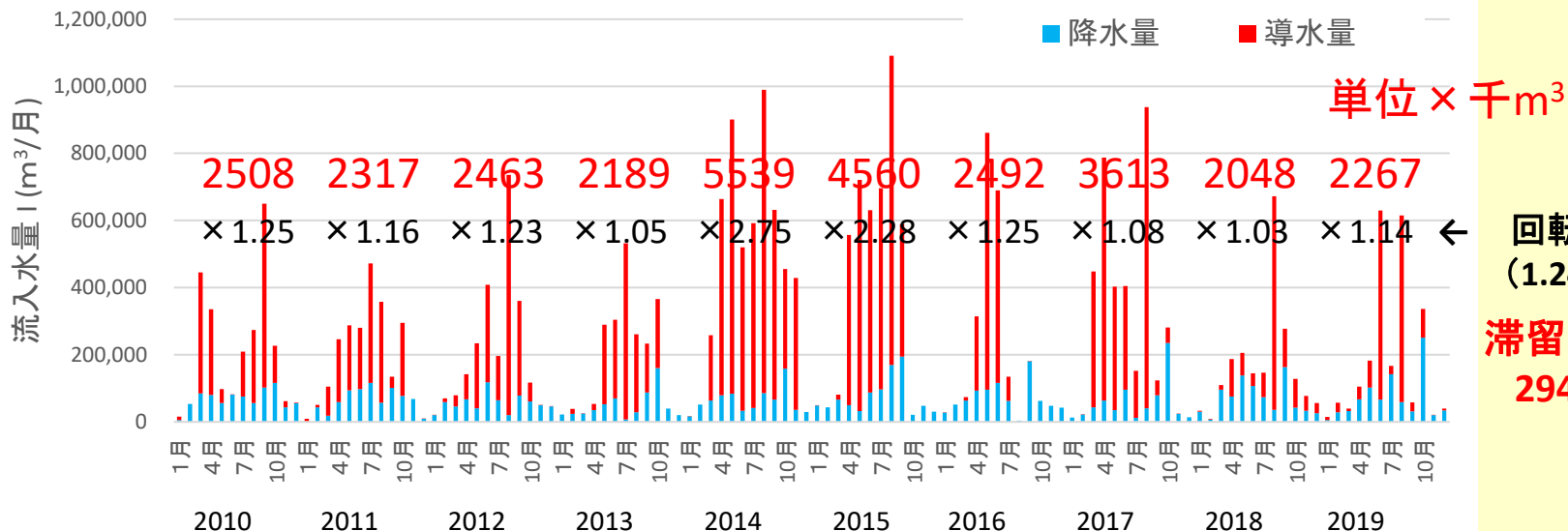
$$dS \text{ (測定不能量)} = \Delta S \text{ (実測値)} - \Delta S' \text{ (計算値)}$$

$dS = 0$... 上記以外の流出流入無し

$dS > 0$... 上記以外の流入有り (降雨時の排水流入?)

$dS < 0$... 上記以外の流出有り (角落しからの流出?)

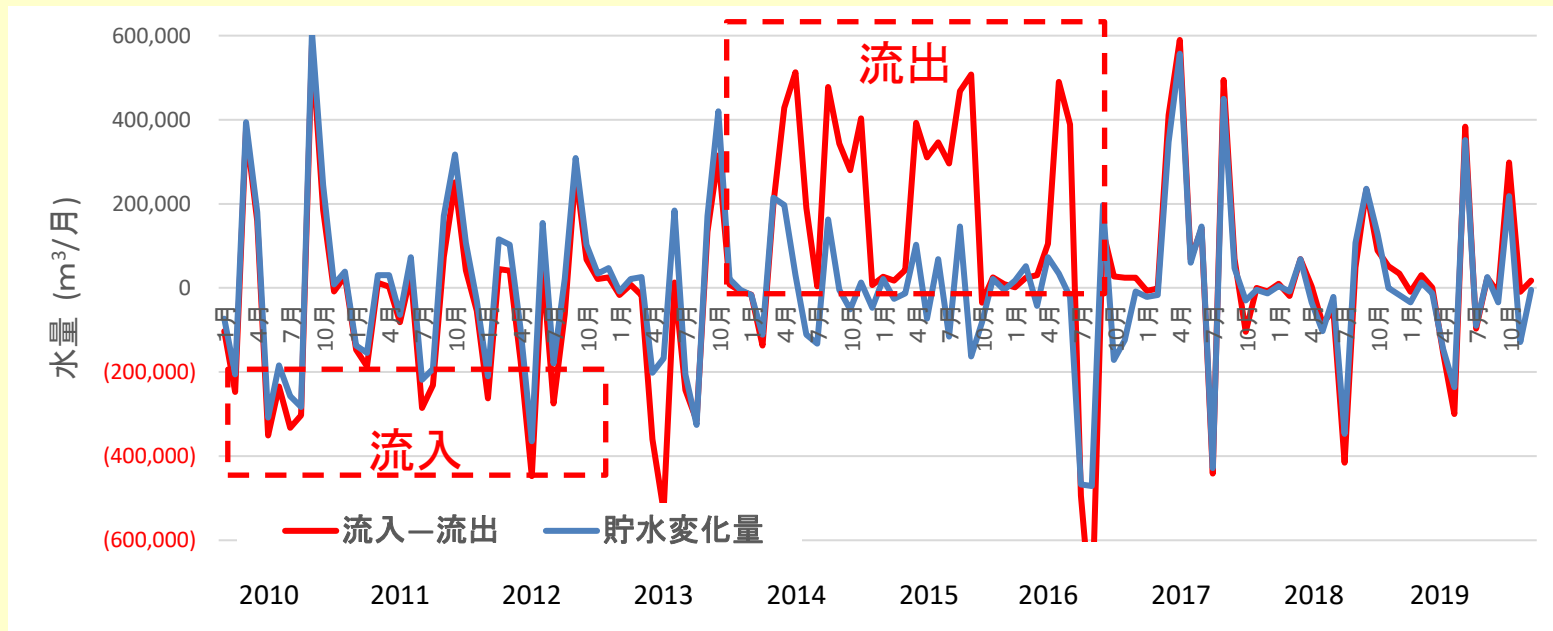
芦ヶ池の流入・流出量



ダム貯水施設で **滞留時間が5日間程度以上** でアオコが発生する
 (出典)ダム貯水池における淡水赤潮とアオコの発生機構および
 対策について、井芹 寧:九州技法第23号(1998.7)

有効貯水量 2,000 × 千m³

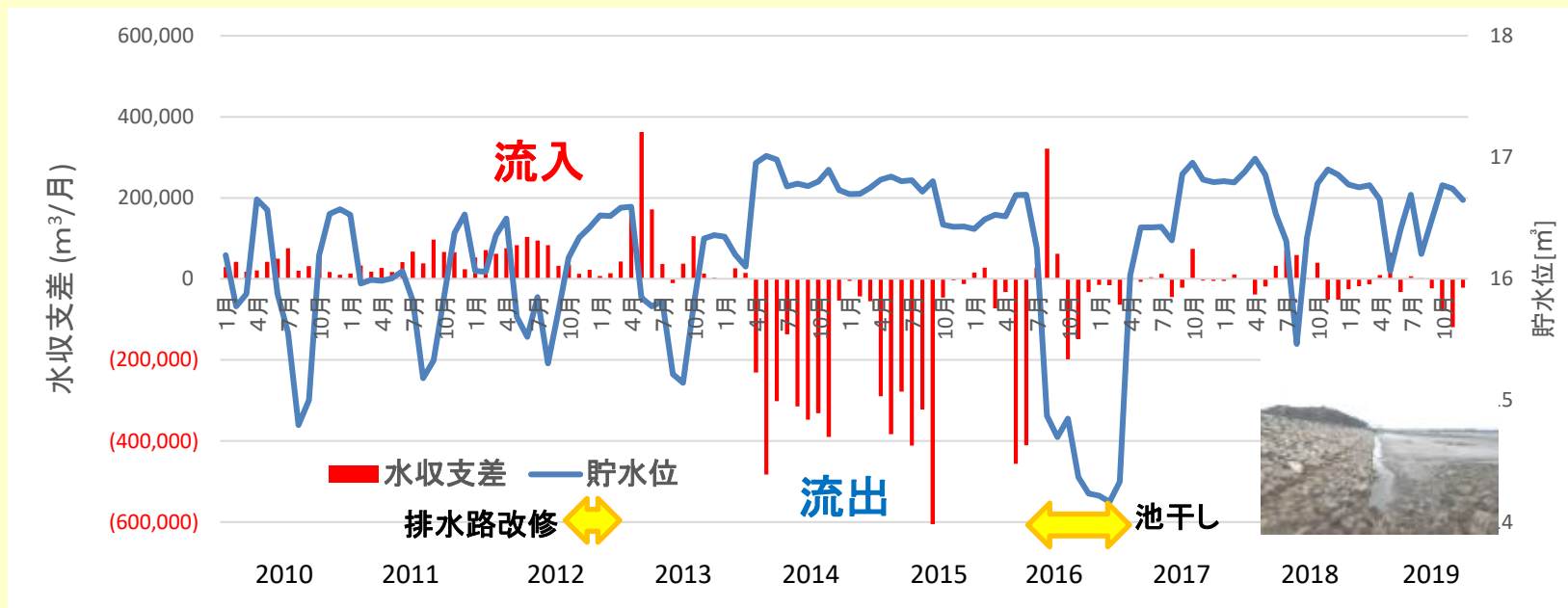
芦ヶ池の流入－流出と貯水変化量の月別変化



赤線と青線の差が観測項目以外の水の流出入(“水収支差”)を表す

赤線 > 青線 貯水池外へ流出
 青線 > 赤線 貯水池内へ流入

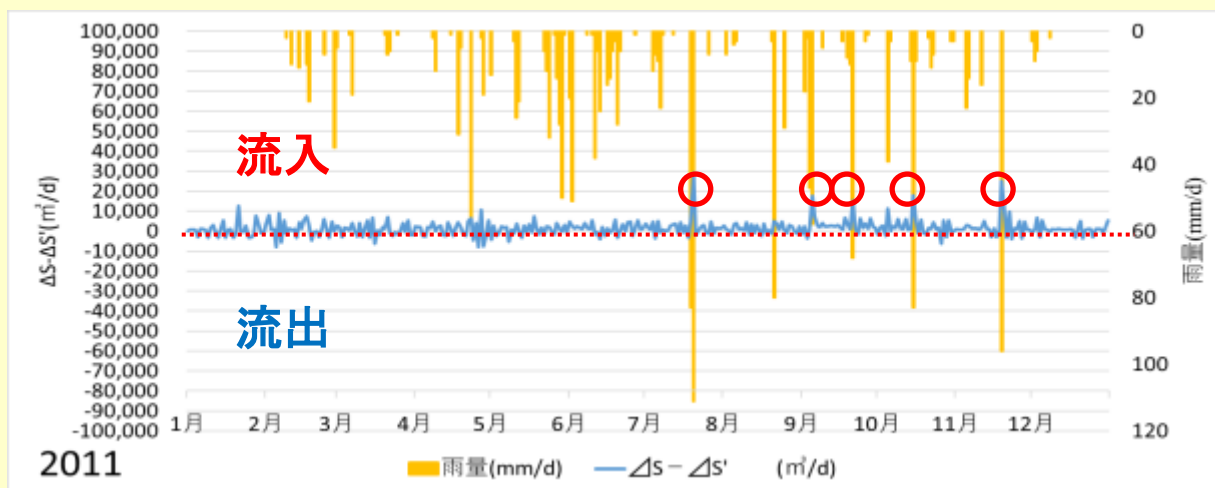
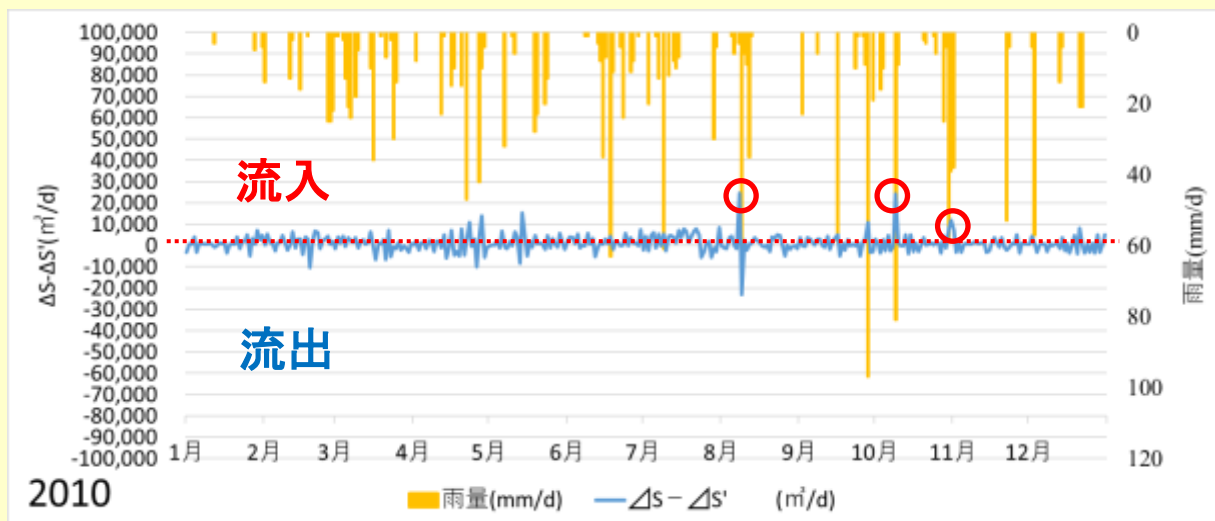
芦ヶ池の“水収支差”と貯水位の月別変化



“水収支差”とはP29の赤線と青線の差を表す

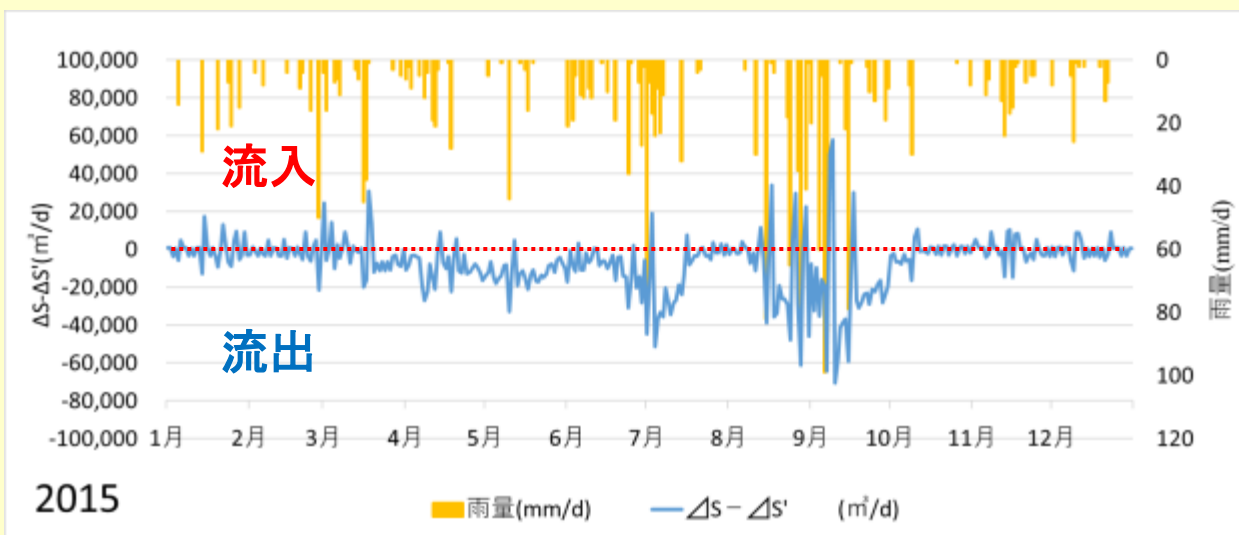
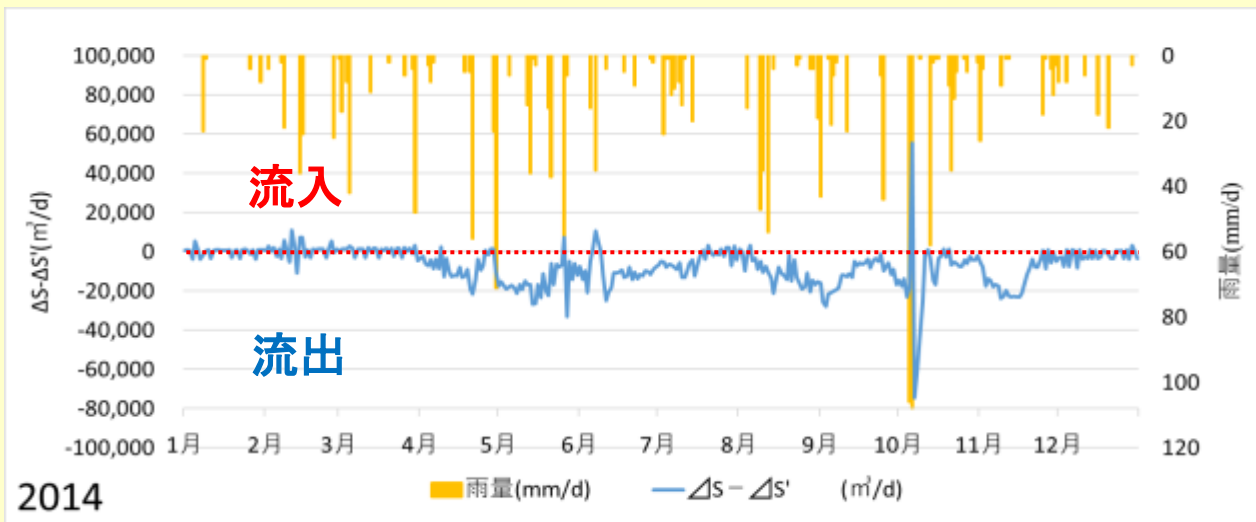
- 2013年以前 + 流入（貯水位が低いと流入が大きくなる？）
- 2014～2015年 - 流出（貯水位が高いと流出が大きくなる？）
- 2017年以降 流出入が少ない（貯水位の影響が少ない）

水収支差と降水量の関係（排水路改修前）



日雨量50mm以上の降雨日に排水路からの流入??が確認された

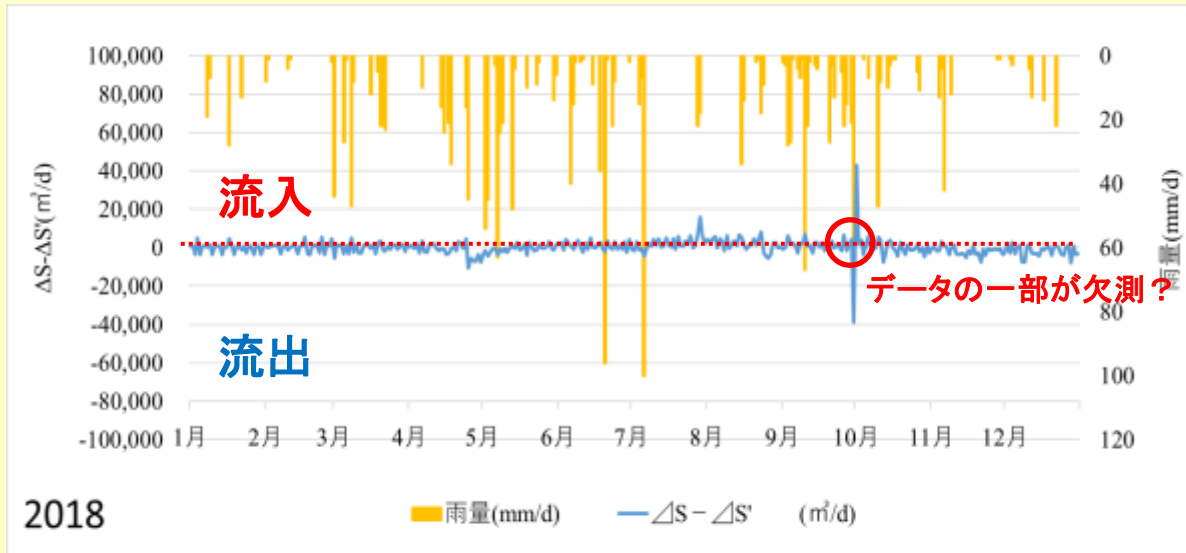
水収支差と降水量の関係（積極的な利水運用時期？）



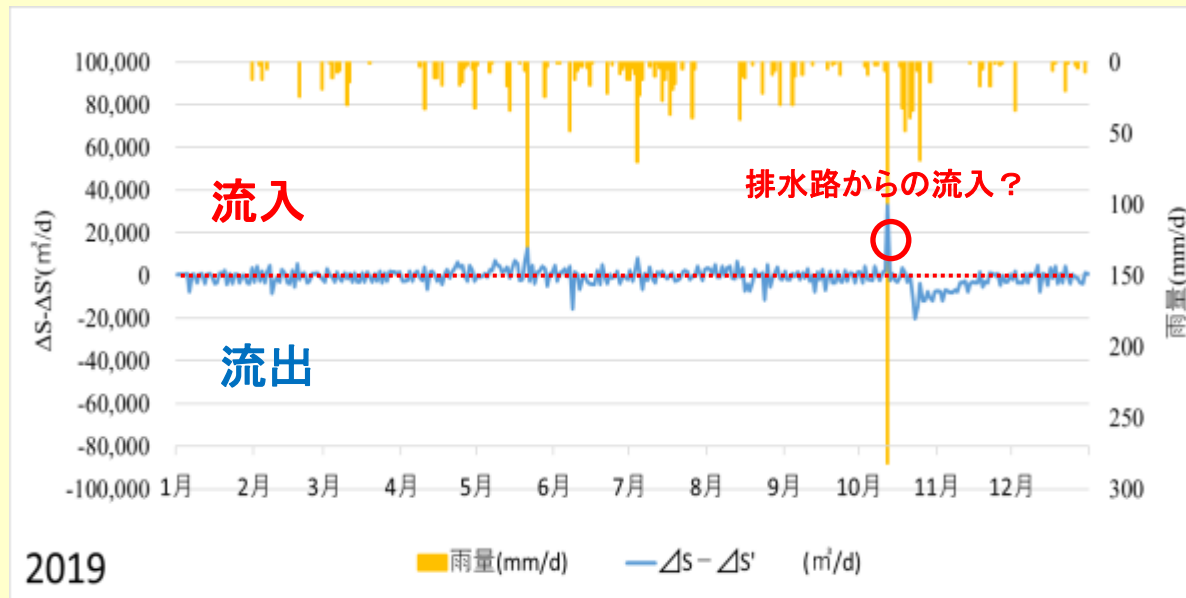
角落し開放状態の影響？

貯水位が高く維持されたこの期間は芦ヶ池からの流出が多い

水収支差と降水量の関係 (池干し以降)

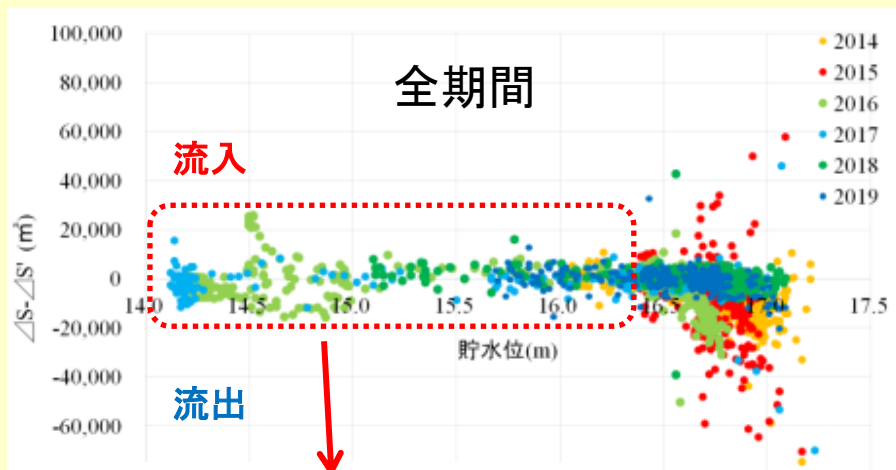


角落し締め切りの影響?

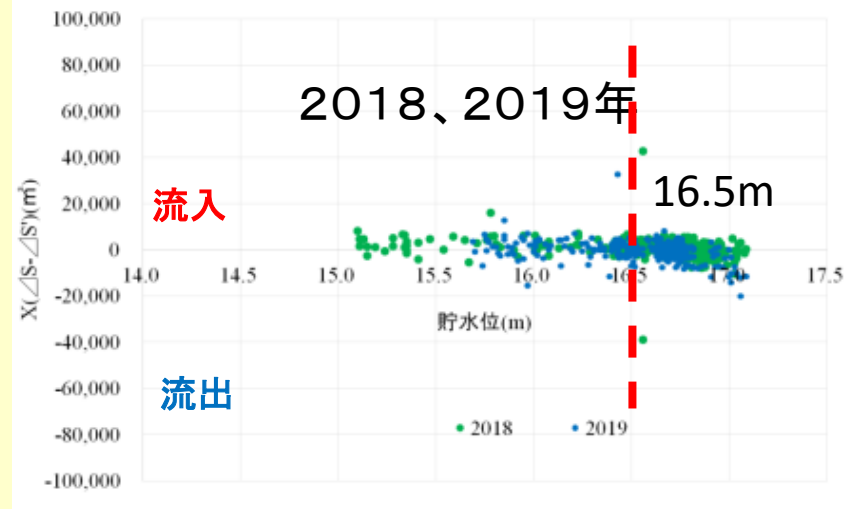
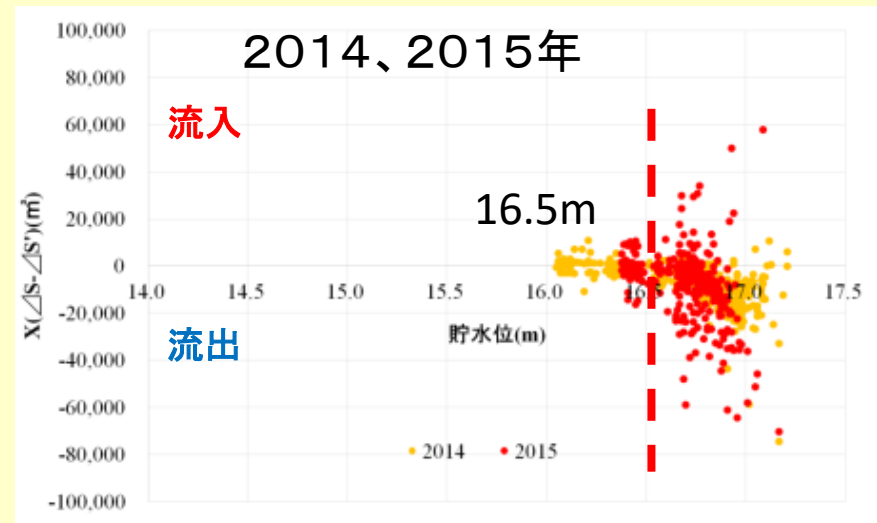
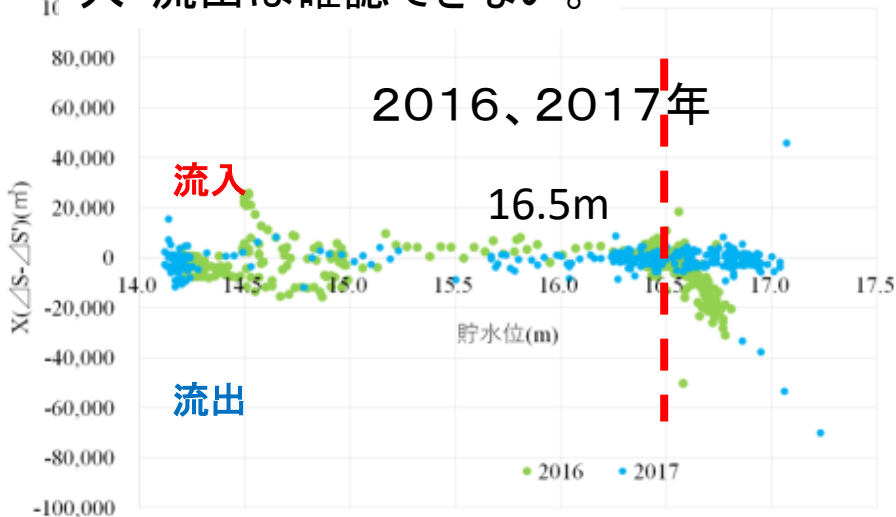


日雨量250mm以上の降雨日のみ排水路から3万m³の流入が確認された

水収支差と貯水位の関係



池底での浸透による流入・流出は確認できない。



2016年以降貯水位に関係なく流入量が減少している。
2014～2016年は貯水位が16.5m以上になると流出量が不連続に増加する傾向がある。
2018年以降は貯水位に関係なく流出入が減少している。

水収支結果の総括

1. **周辺排水路の改修前** (2012年以前) は、**日雨量50mm以上の降雨日**に背後流域からの流出水が**周辺排水路**を介して池内に流入していた可能性がある。
2. **周辺排水路の改修後** (2012年以降) は、**日雨量250mm以上の降雨日**に背後流域からの流出水が池内に流入した可能性がある。
3. **全期間を通して**、貯水位が16.5m以下の時は貯水位に関係なく流出入がほぼないことから、**池底を介した地下水の侵入、貯水の浸透が少ない**ことが予想される。
4. **2014年～2016年**は、貯水位が16.5mを超えると、池周辺に設けられた**角落**を介して排水路へ流出した可能性がある。

角落を管理？することによって



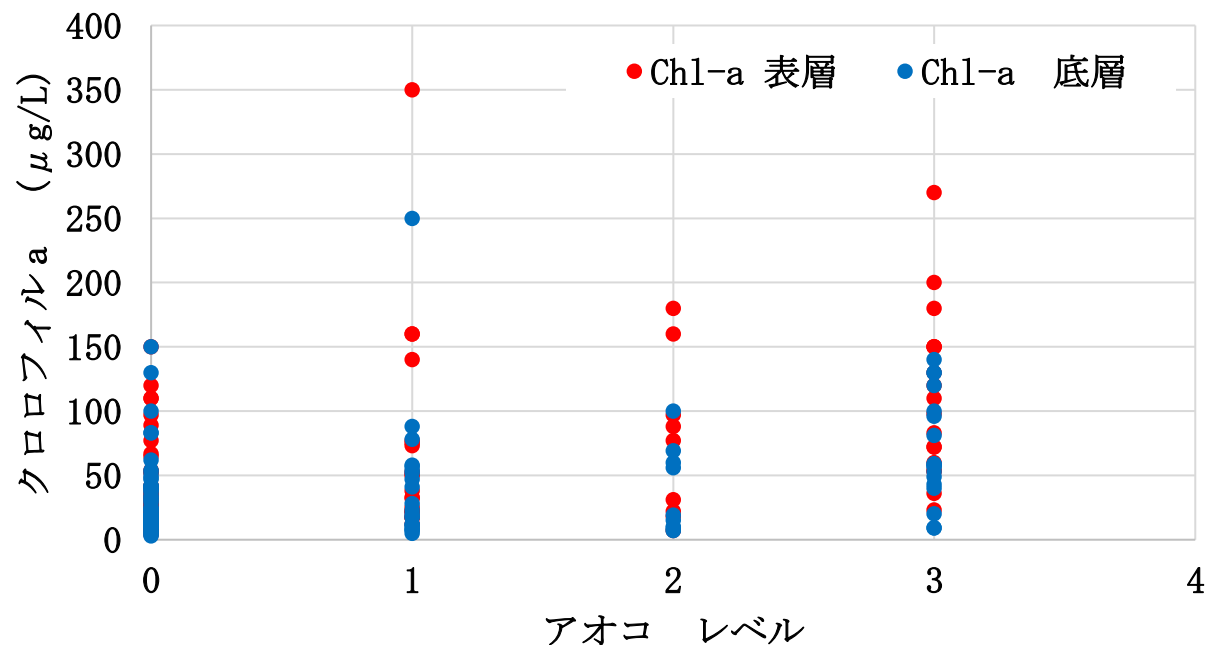
現在は、池外からの侵入水の影響が少ない??

5. アオコ発生の制限要因

- アオコの発生に影響する栄養塩類は何か？
- アオコ発生を制限するための水質基準は？

アオコレベルとクロロフィルa濃度との関係

明瞭な相関は見られない



レベル1：アオコの発生が肉眼で確認できない。(ネットで引いたり、白いバットに汲んで良く見ると確認できる)

レベル2：うっすらとすじ状にアオコの発生が認められる。(アオコがわずかに水面に散らばり、よく見ると肉眼でも確認できる)

レベル3：アオコが水面全体に広がり、所々まだら状になっている。

レベル4：膜状にアオコが水面を覆う。

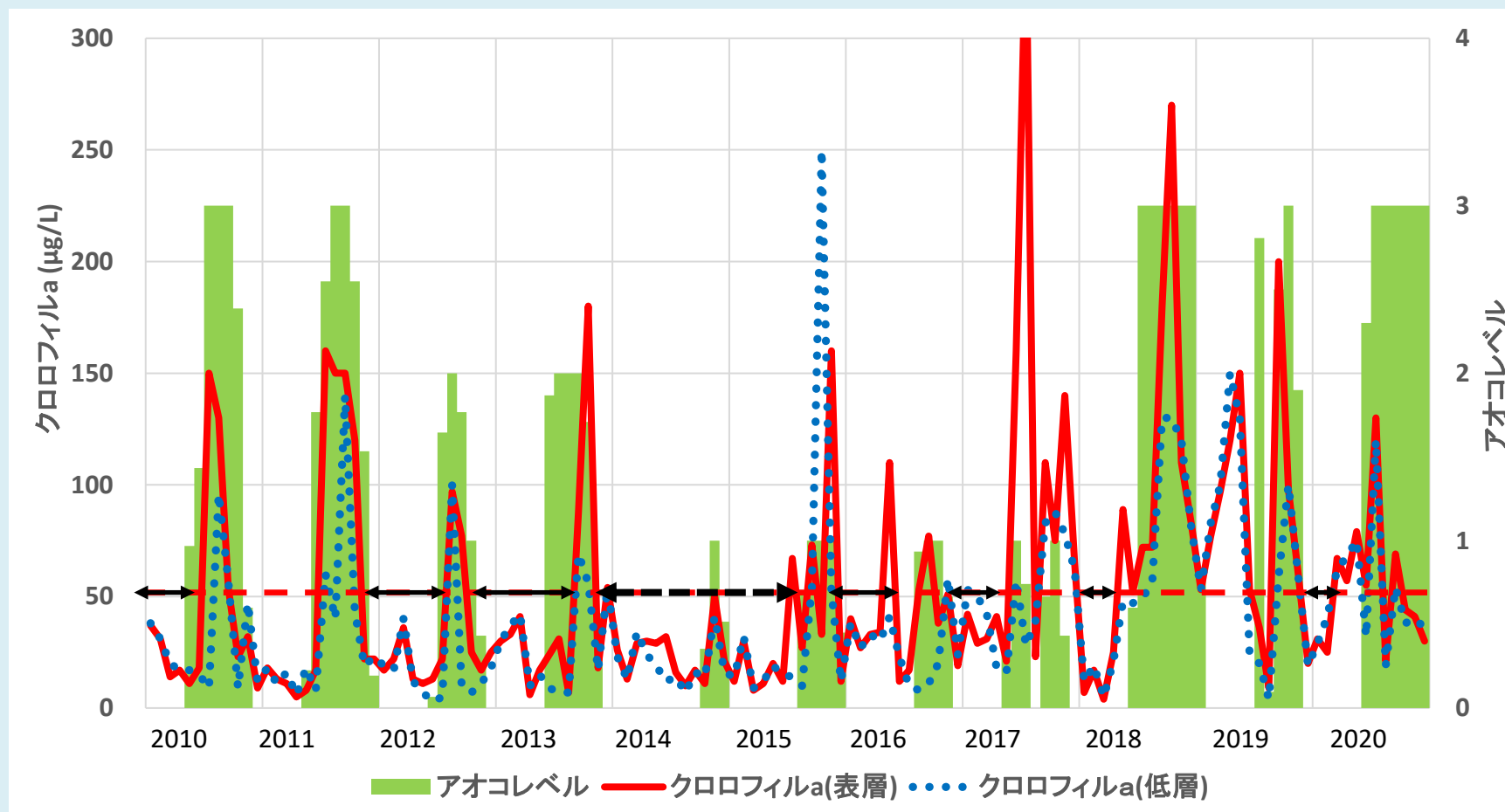
レベル5：厚くマット状にアオコが水面を覆う。

レベル6：アオコが浮カス状に厚く堆積して水面を覆い、腐敗臭がする。

アオコレベルを“0”にするためのクロロフィル濃度は??
課題:アオコが発生しない水質の目標値を定めるには??

クロロフィル (Chlorophyll) は、光合成の明反応で光エネルギーを吸収する役割をもつ化学物質。葉緑素ともいう。
クロロフィルaは、酸素光合成で使用されるクロロフィルの1種類である。スペクトルで紫から青とオレンジから赤の波長からほとんどのエネルギーを吸収し、緑や緑に近い部分はあまり吸収しない。**クロロフィルa**はほとんどの酸素発生型光合成生物にあり、bは緑藻、陸上植物、一部のシアノバクテリアなどに、cは褐藻や珪藻などにある。

アオコレベルとクロロフィルaの関係



クロロフィルaが50µg/L以下になればアオコレベルが0になる

この数値が今後の検討方針の基礎となる (ただし、科学的根拠無し！！) **32**

(参考) クロロフィルaの濃度と影響の関係

影響項目		chl. a の濃度レベル												
		単位 (μg/L)												
		0	20	40	60	80	100	200	400	600	800	1000		
かんがい 施設管理面	施設障害 (目詰まり)	スプリンクラー	問題ないレベル							影響が懸念される/要監視レベル				
		噴霧器	問題ないレベル		影響が懸念される/要監視レベル						影響が生じる可能性が高い			
		多孔管	問題ないレベル		影響が懸念される/要監視レベル						影響が生じる可能性が高い			
		点滴かんがい	問題ないレベル		影響が懸念される/要監視レベル						影響が生じる可能性が高い			
		かん水チューブ	問題ないレベル		影響が懸念される/要監視レベル						影響が生じる可能性が高い			
かんがい 用水利用面	品質低下	畑作物	問題ないレベル		影響が懸念される/要監視レベル									
		施設園芸	問題ないレベル		影響が懸念される/要監視レベル									
	悪臭 (藻臭)		問題ないレベル	影響が懸念される/要監視レベル										
	着色		問題ないレベル		影響が懸念される/要監視レベル			影響が生じる可能性が高い						

	影響が生じる可能性が高い
	影響が懸念される/要監視レベルである
	問題ないレベルである

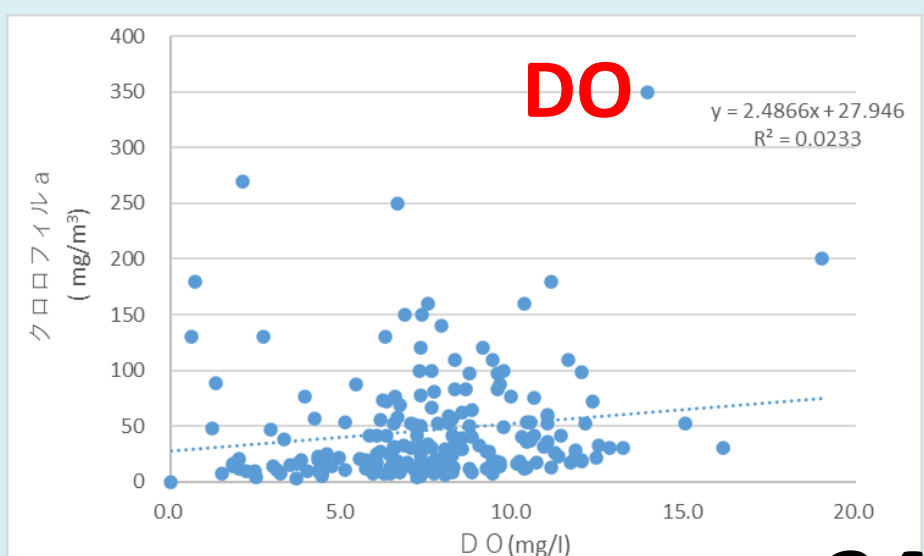
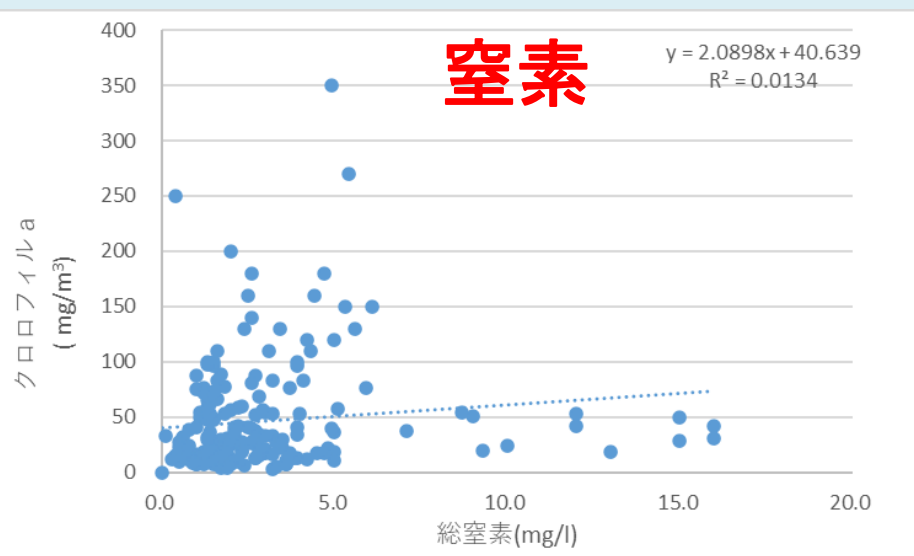
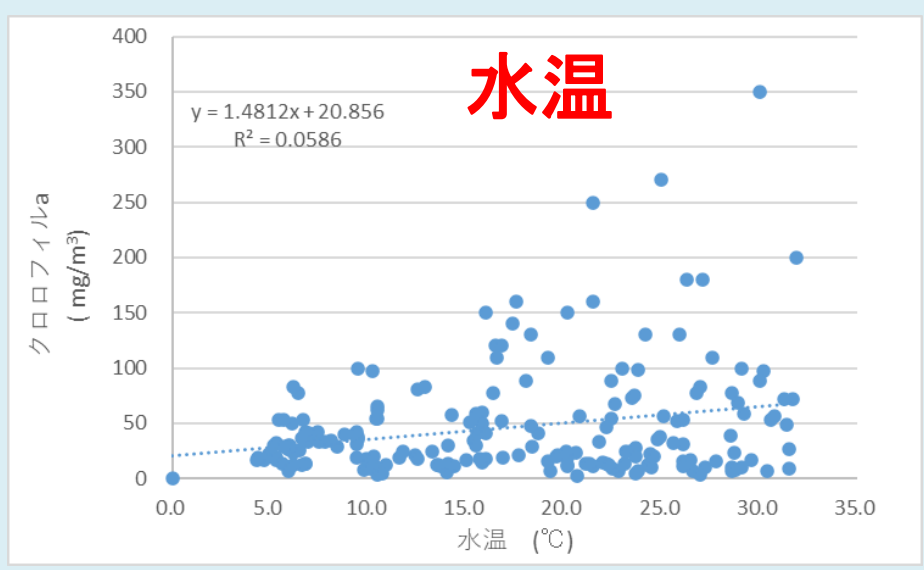
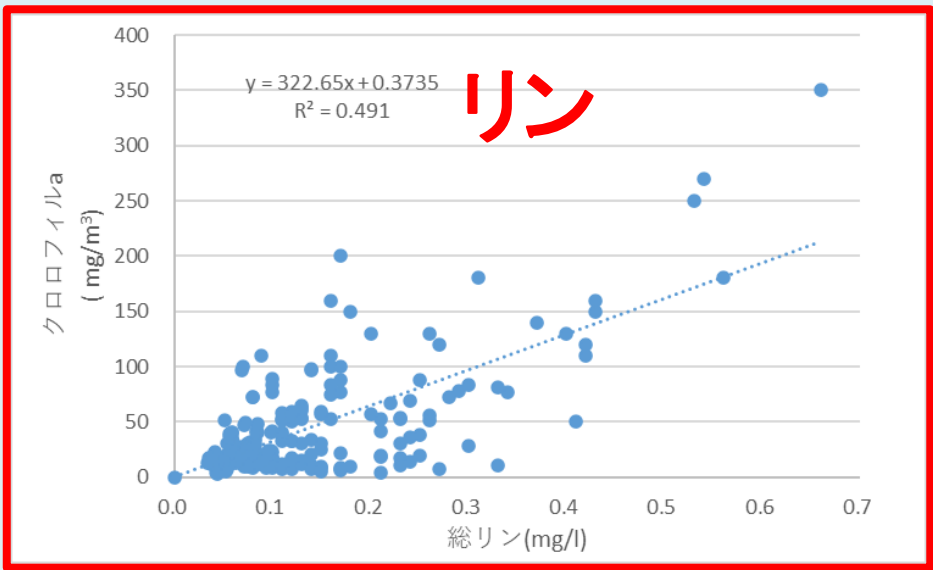
出典: 農業用貯水施設におけるアオコ対応参考図書: 平成24年3月農村振興局農村環境課

クロロフィルaが40μg/L以下になれば問題のないレベル

クロロフィルaの影響要因

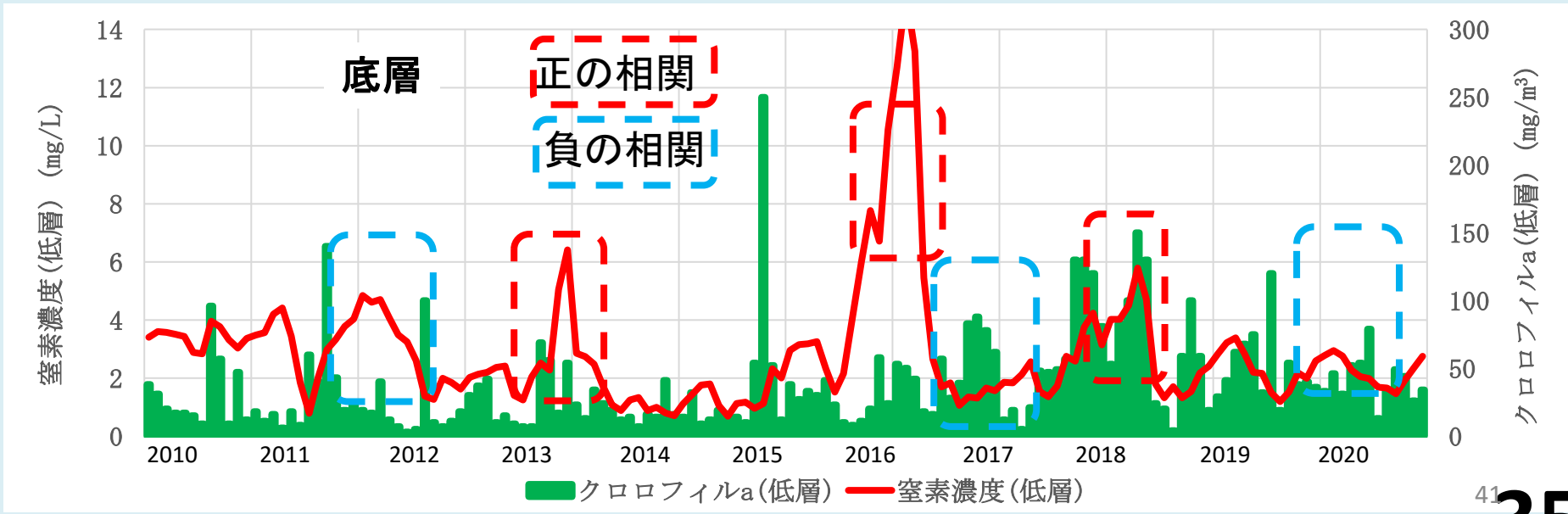
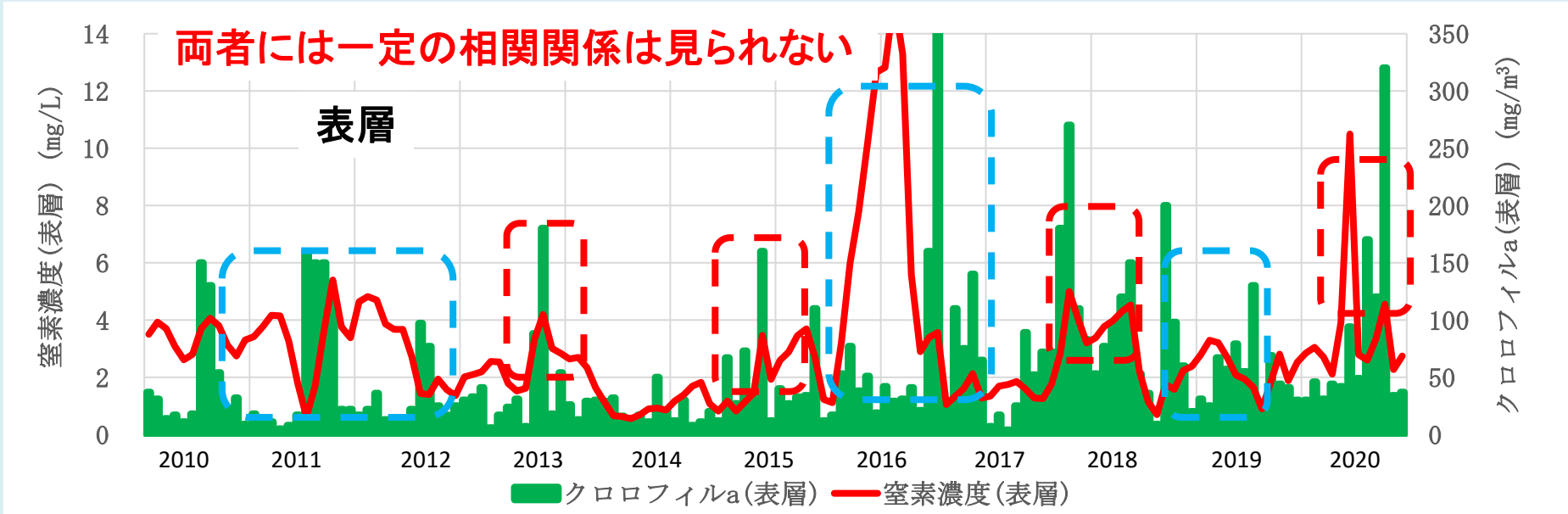
クロロフィルaはT-Pとの相関が高い

単位: $\mu\text{g/L} = \text{mg/m}^3$

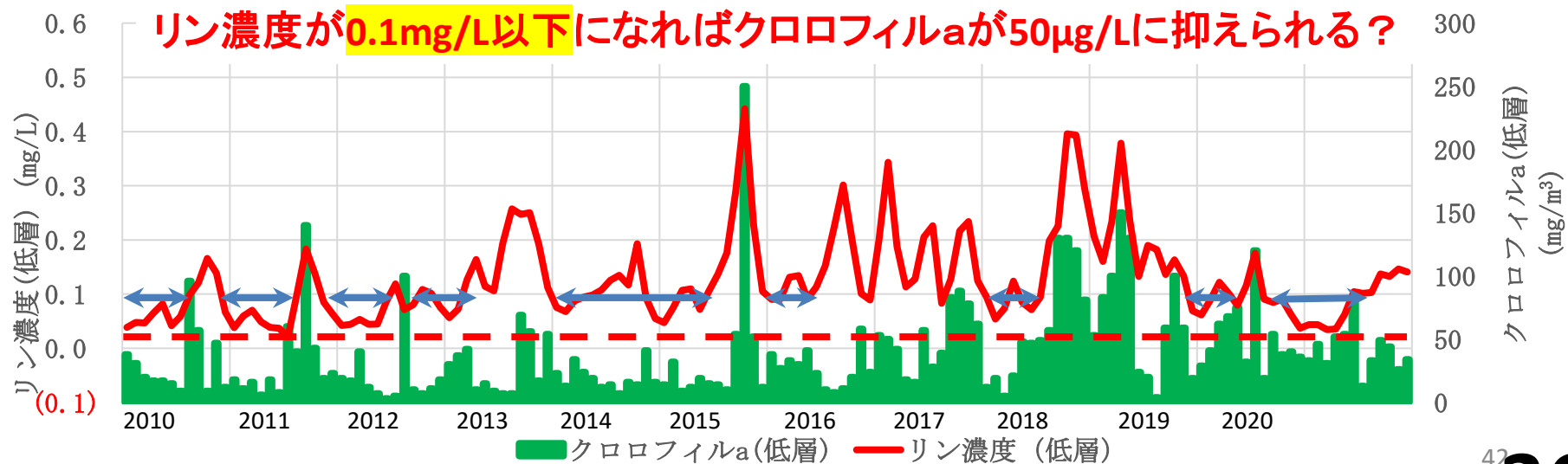
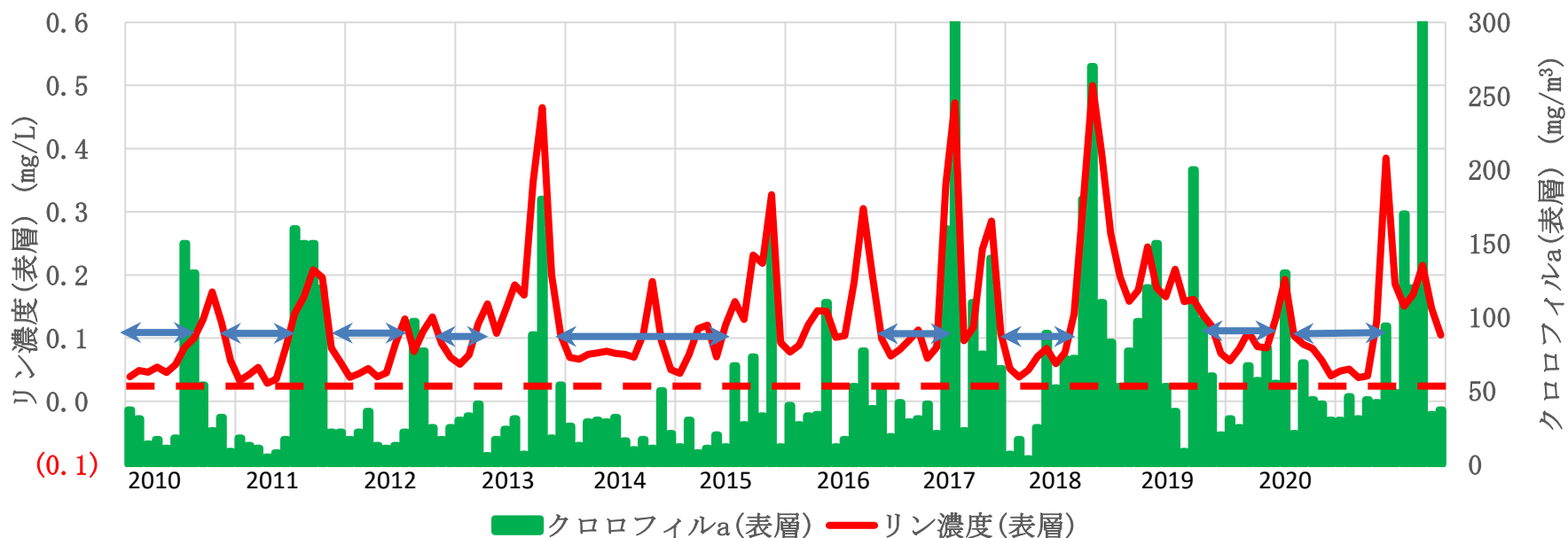


豊川総合用水事業部が芦ヶ池で実測しているデータを使用

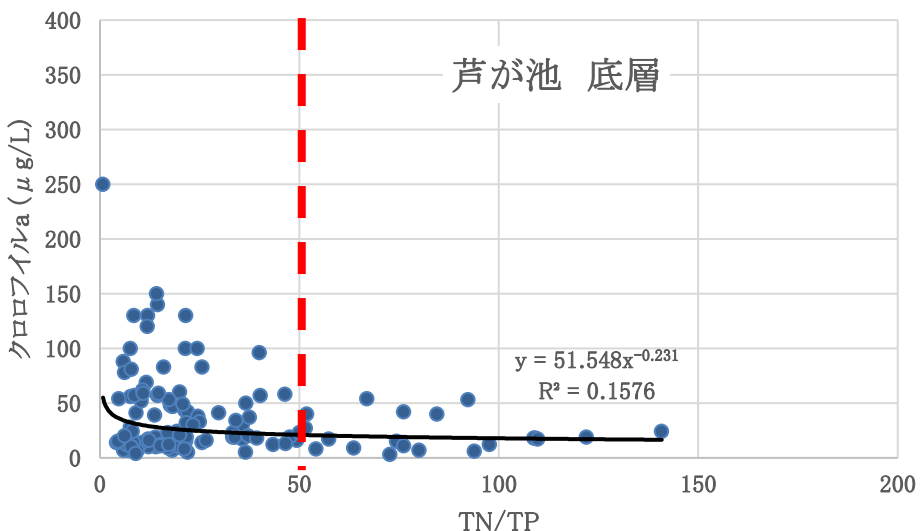
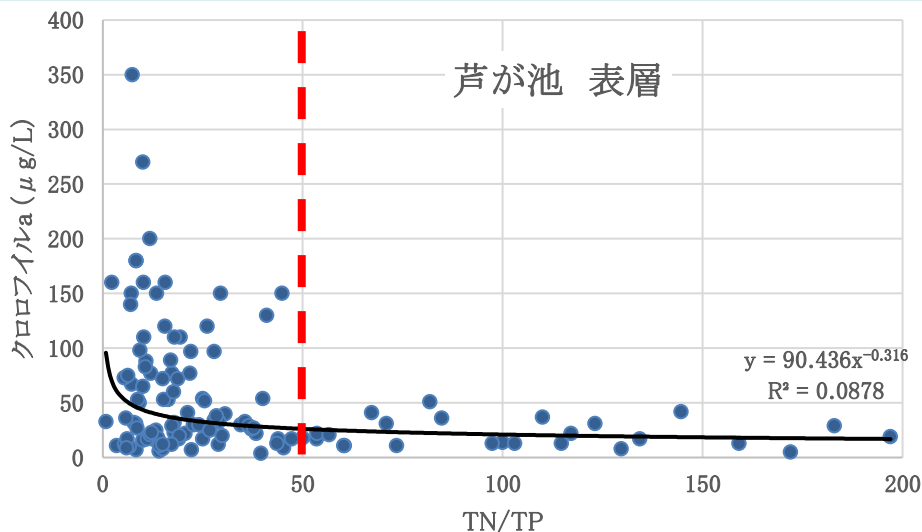
クロロフィルaと窒素濃度との関係



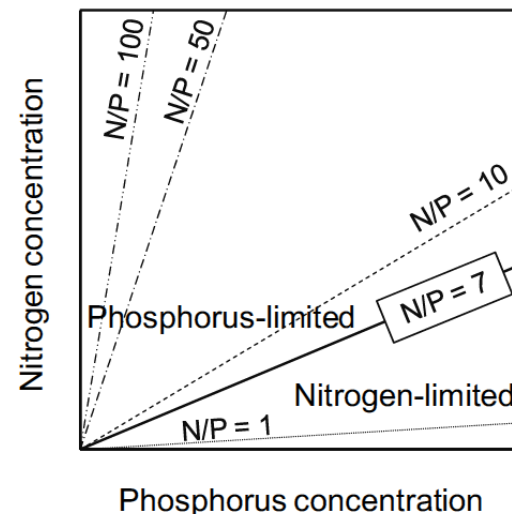
クロロフィルaとリン濃度との関係



TN/TPとクロロフィルaとの関係



植物プランクトン構成比
 $C_{41}H_8O_{57}N_7P_1$ (質量比)



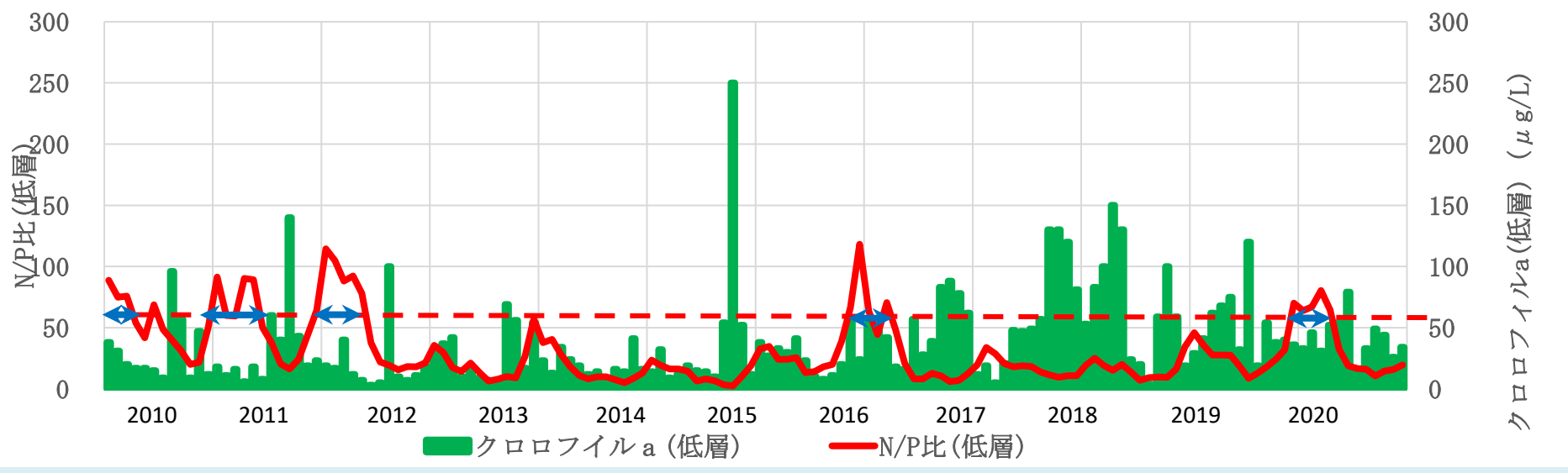
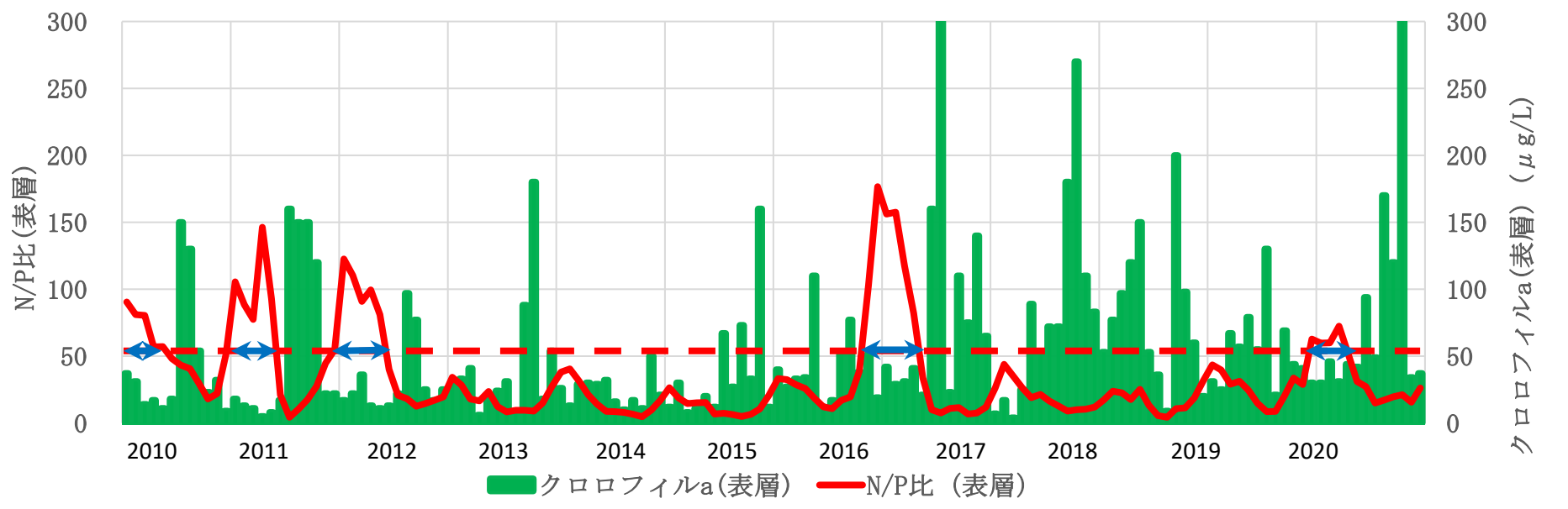
TN/TP < 7 窒素が制限要因
 TN/TP > 7 リンが制限要因

柴田他: 窒素、リンの絶対量およびN/P比によって変化する藍藻類と珪藻類の優先化特性、日本水処理生物学会誌49(2): 47-54 (2013)

TN/TP > 50の時に、クロロフィルa < 50μg/Lになる

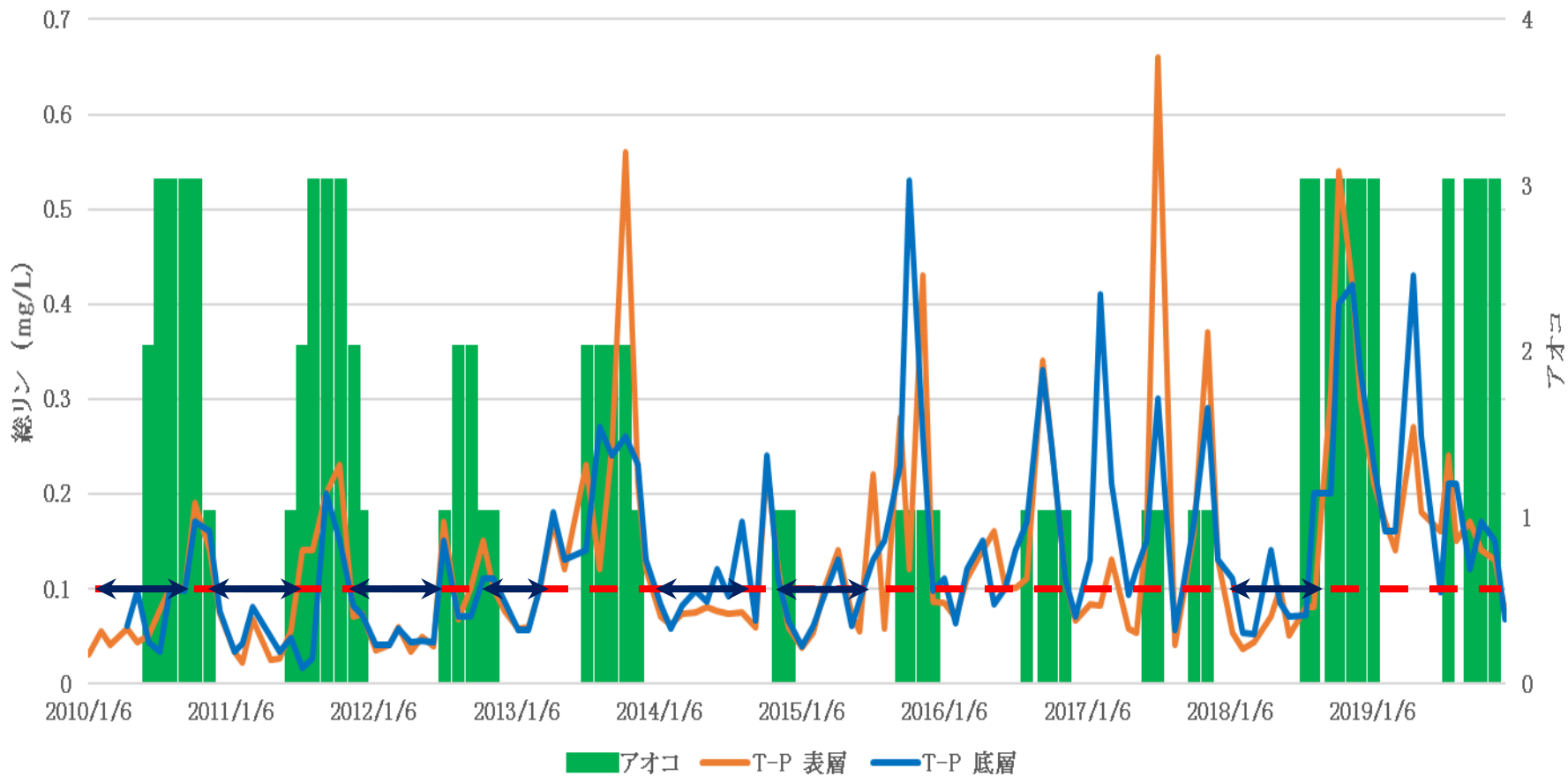
リンが制限要因

クロロフィルaとTN/TPとの関係



TN/TPが50以上になればクロロフィルaが50μg/Lに抑えられる

アオコレベルを0にするためには？



表層・底層ともに総リン濃度を0.1mg/L以下にすればアオコの発生が抑制される??

湖沼V類型の基準

アオコ対策のための水質目標

1. **アオコレベルを1未満**にするためには、クロロフィルaを50 μ g/L以下にする必要がある。(スライドNo.32)
2. 芦ヶ池のクロロフィルa濃度は、**総リン濃度**に最も影響されている。(スライドNo.34)
3. クロロフィルaを50 μ g/L以下にするためには、総リン濃度を0.1mg/L以下にする必要がある (スライドNo.36)。これは、生活環境保全に関する環境基準の**湖沼V類型**に相当する。(スライドNo.4)
4. 総リン濃度を0.1mg/L以下に抑制すれば、アオコレベルは概ね1に達しない。(スライドNo.39)

総リン濃度: 0.1mg/L

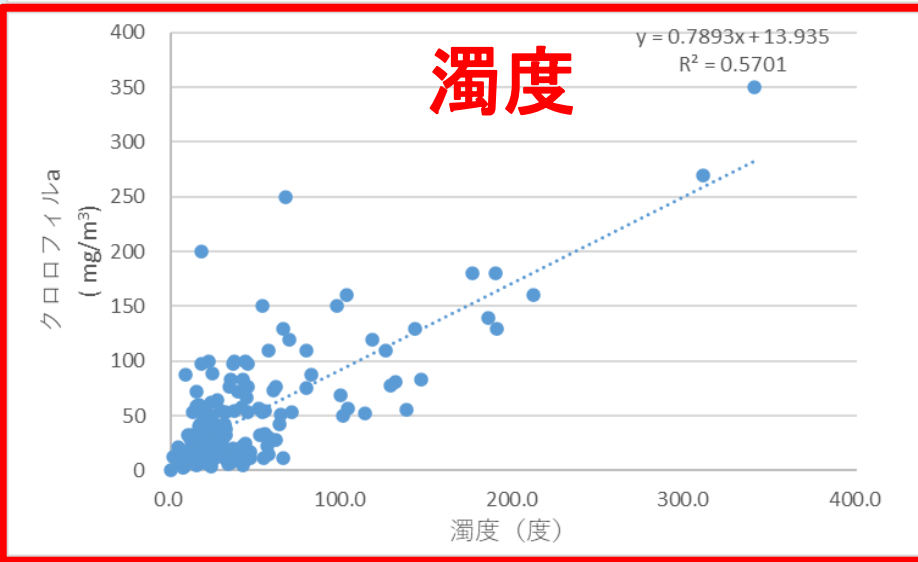
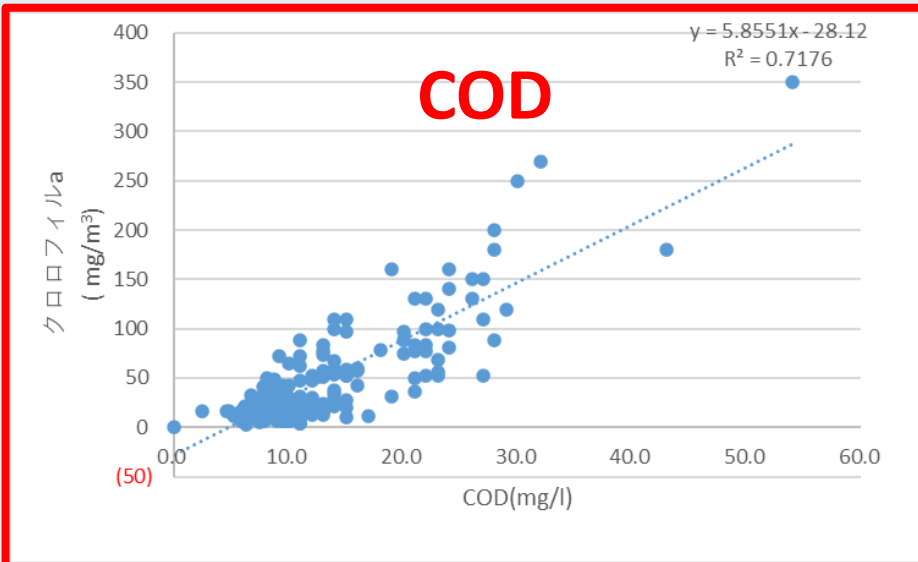
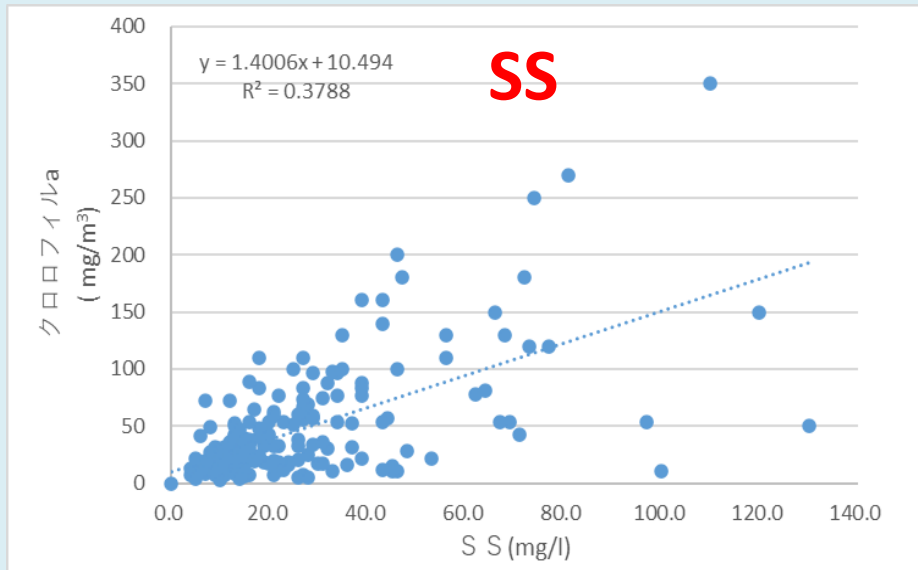
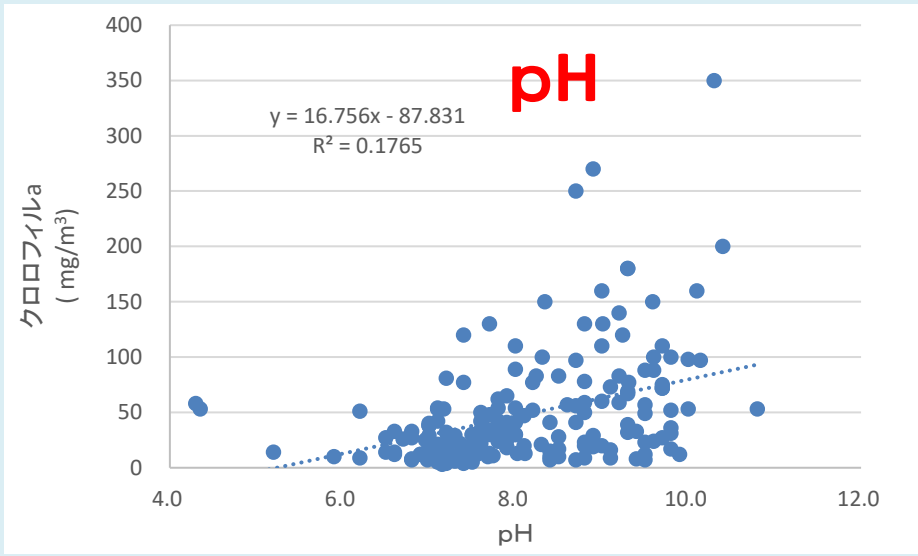
T-P < 0.03mg/L

高村: 農業土木技術者のための水質入門(その4) 講座—湖沼の水質と富栄養化, 農土誌52(12)

T-P < 0.08mg/L

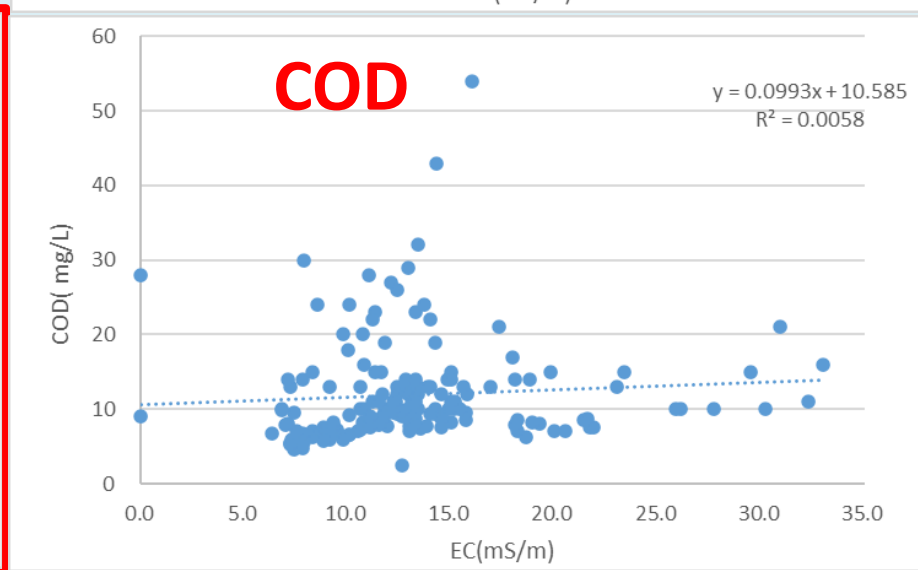
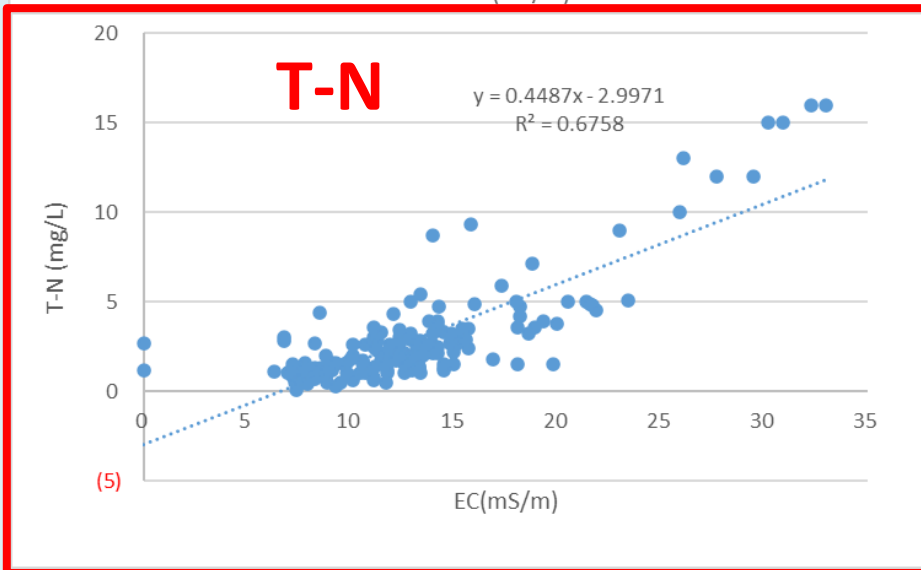
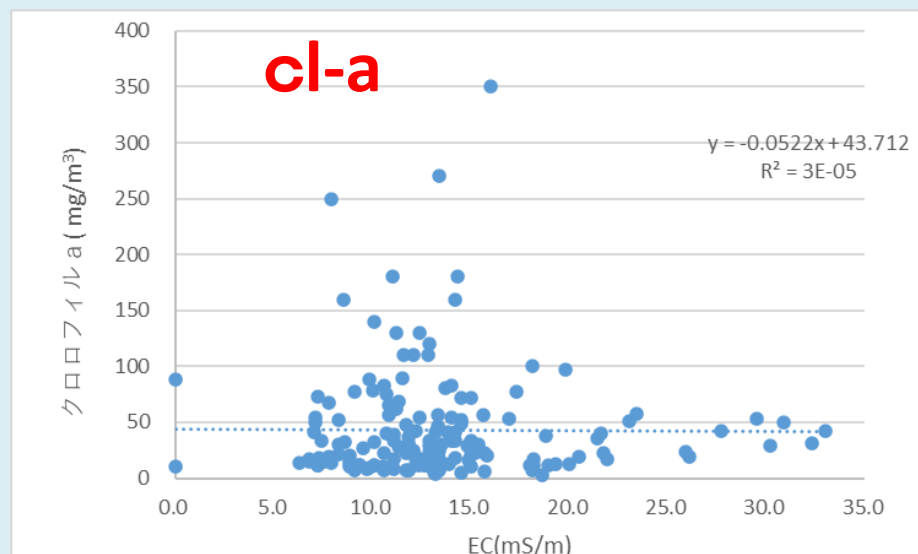
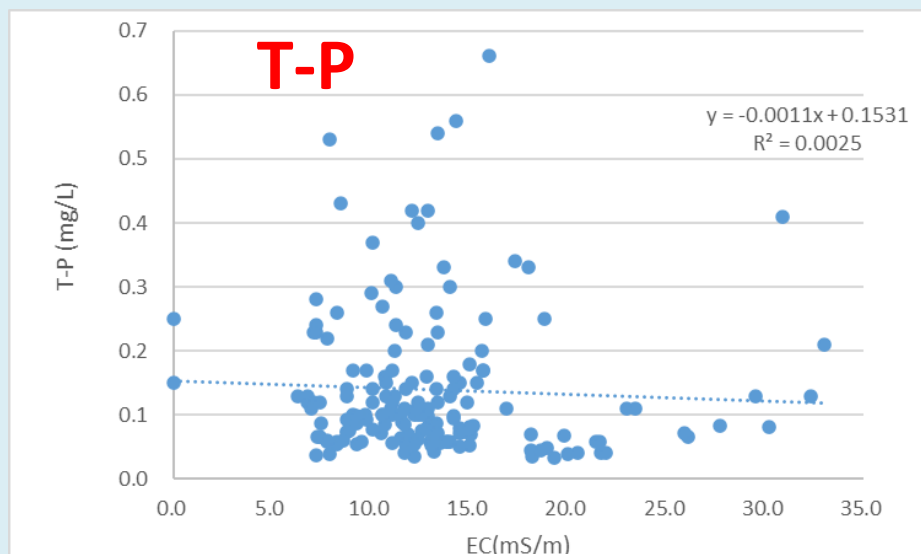
吉田: 高DIN;DIP比または低DIN:DIP比水域におけるMicrocystis属の高密度出現. 日本水産学会誌66(6)

(参考) クロロフィルaの影響要因



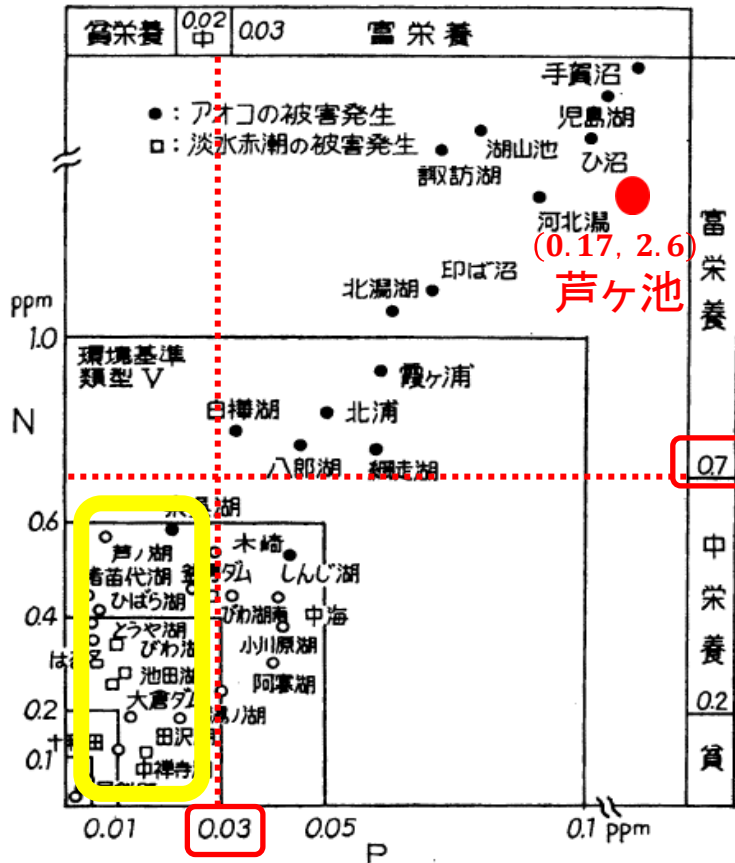
芦が池の汚濁はアオコによる有機汚濁と考えられる

(参考) ECの影響要因



ECの測定値からかなりの精度でT-Nの推定が可能

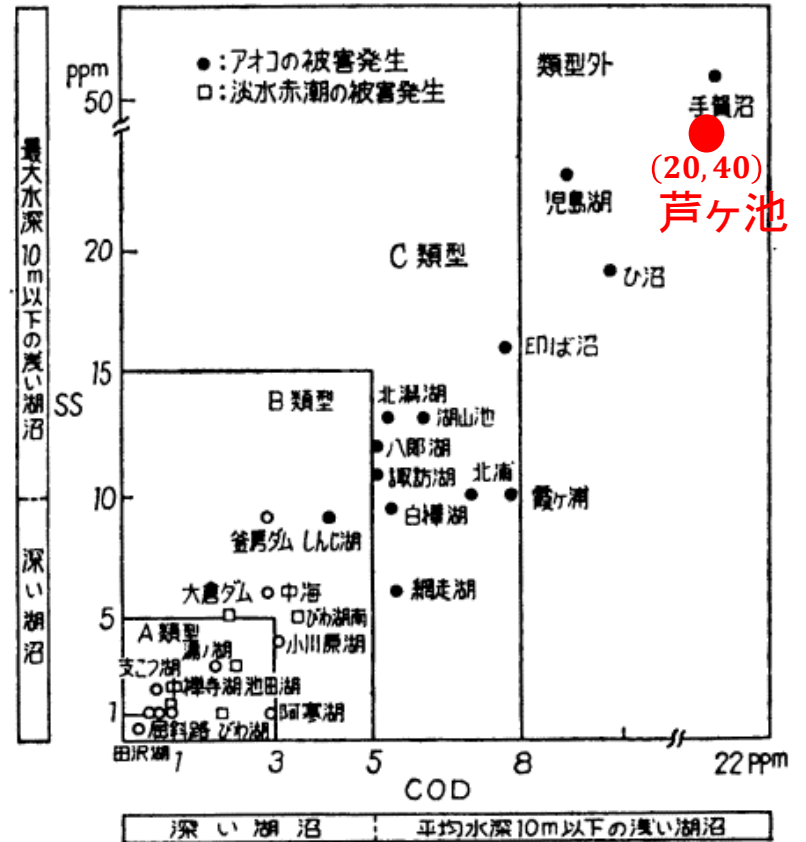
(参考)高村:農業土木技術者のための水質入門(その4)講座
 —湖沼の水質と富栄養化, 農土誌52(12)— 1984.4



栄養度による湖沼型の分類は坂本⁷⁾の上限值を用いた。
 水質は「全国公共用水域水質年鑑」⁵⁾(1983年版, S56年度調査)による。

図-1 主要湖沼の全窒素と全リンの関係

アオコが発生しない領域



水質は「全国公共用水域水質年鑑」⁵⁾(1983年版, 昭和56年度調査)による。

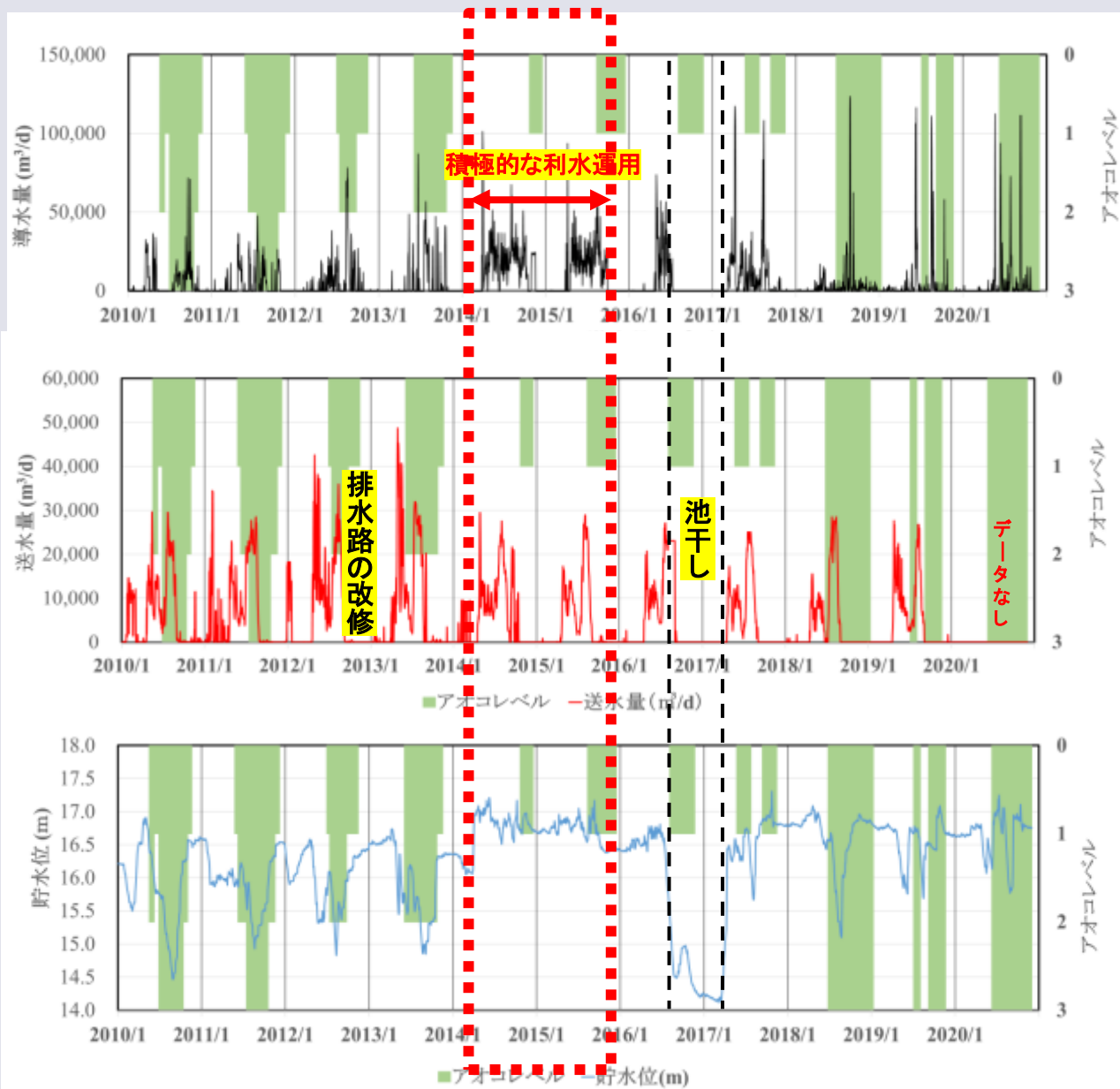
図-2 主要湖沼のSSとCODの関係

芦ヶ池の富栄養化はかなり進んでいる！！！！

6. アオコと水管理の関係

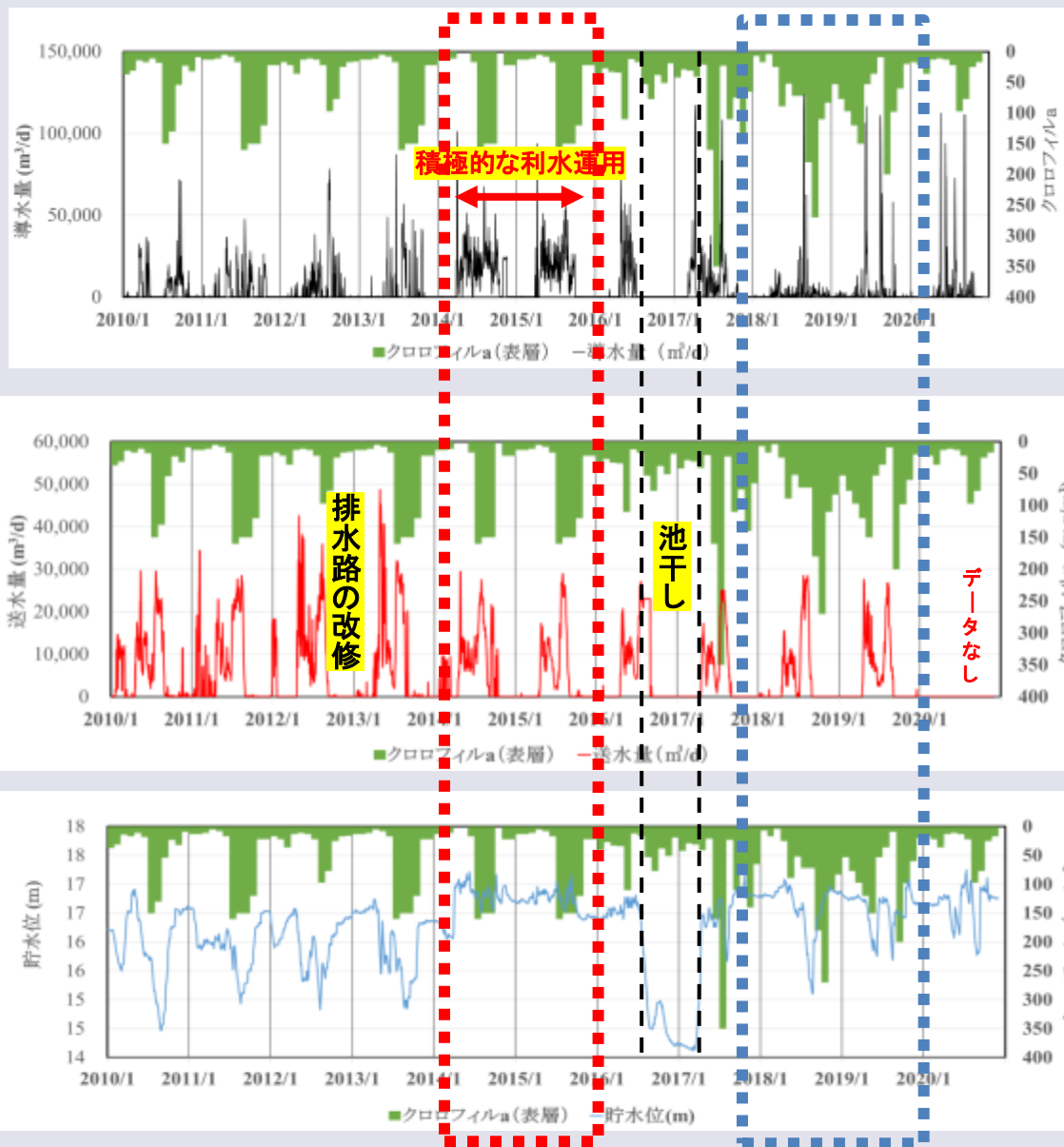
調整池の水管理(物理的要因)が水質やアオコの消長に与える影響を探る

アオコレベルと水管理の関係



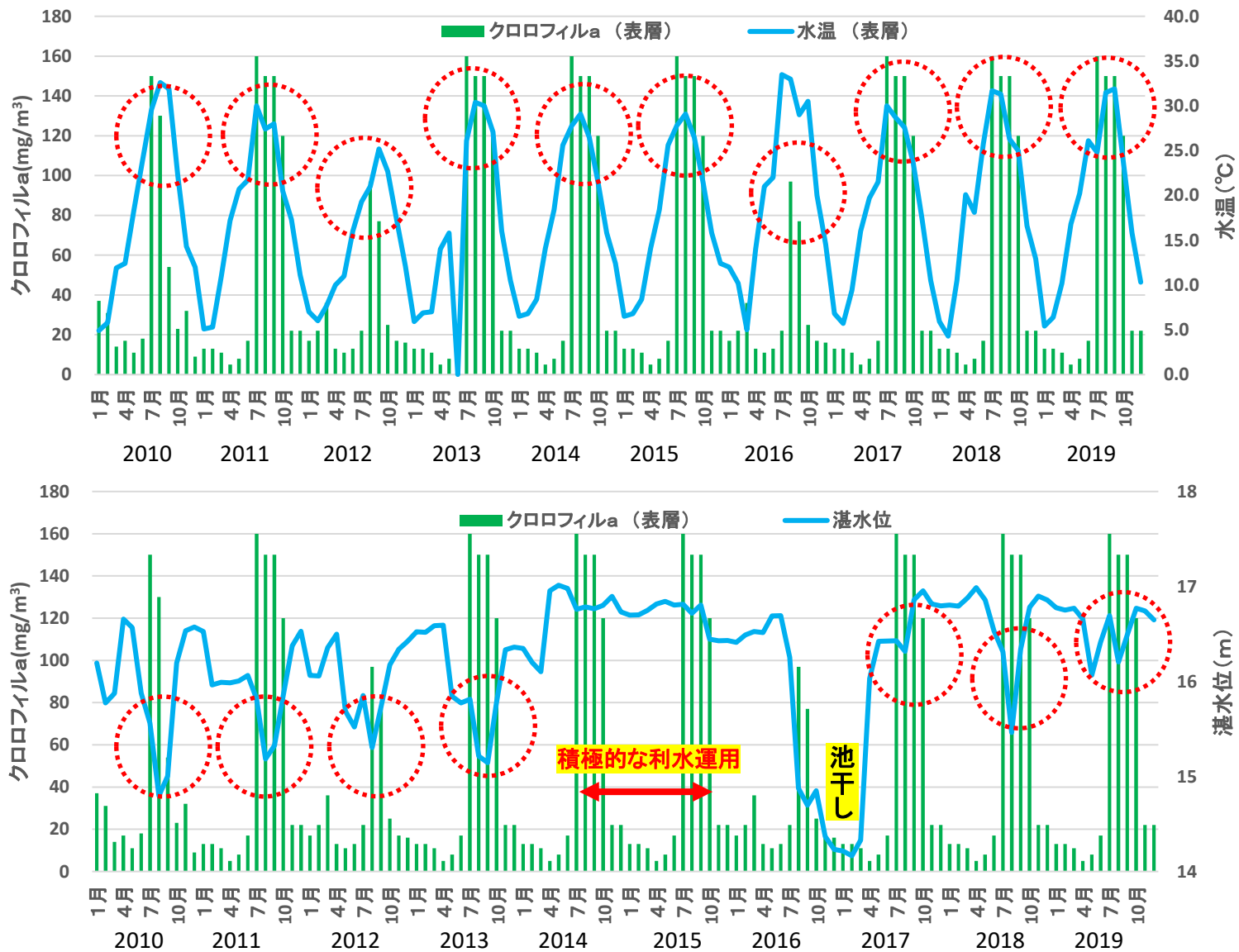
積極的な利水運用(導水量、送水量、貯水位が大きい)とアオコレベルが小さくなる

クロロフィルaと水管理の関係



導水量、送水量が少ないとクロロフィルaが増加する傾向がある

クロロフィルaと水温・貯水位との関係

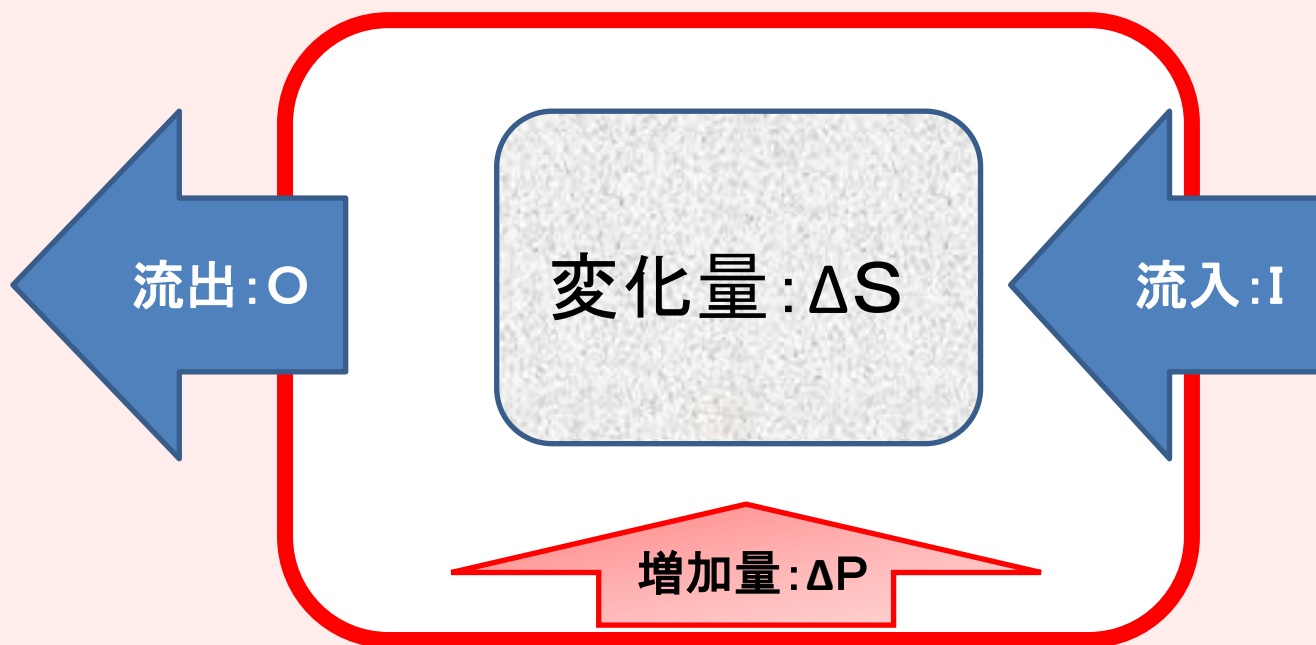


水温が上がり貯水位が下がるとクロロフィルaが増加する？

水管理操作がアオコの発生に与える影響

1. 積極的な水管理 (2014～2015年) によって、導水量と送水量を大きくし、貯水位を高めることによってアオコレベルは低下するが、クロロフィルaの顕著な減少は確認できなかった。
2. 導水量と送水量が少ない期間 (2018～2019年) に、クロロフィルa濃度が増加する傾向が見られた。
3. 水温が上昇し、貯水位が低下すると、クロロフィルaが増加する傾向が見られた。

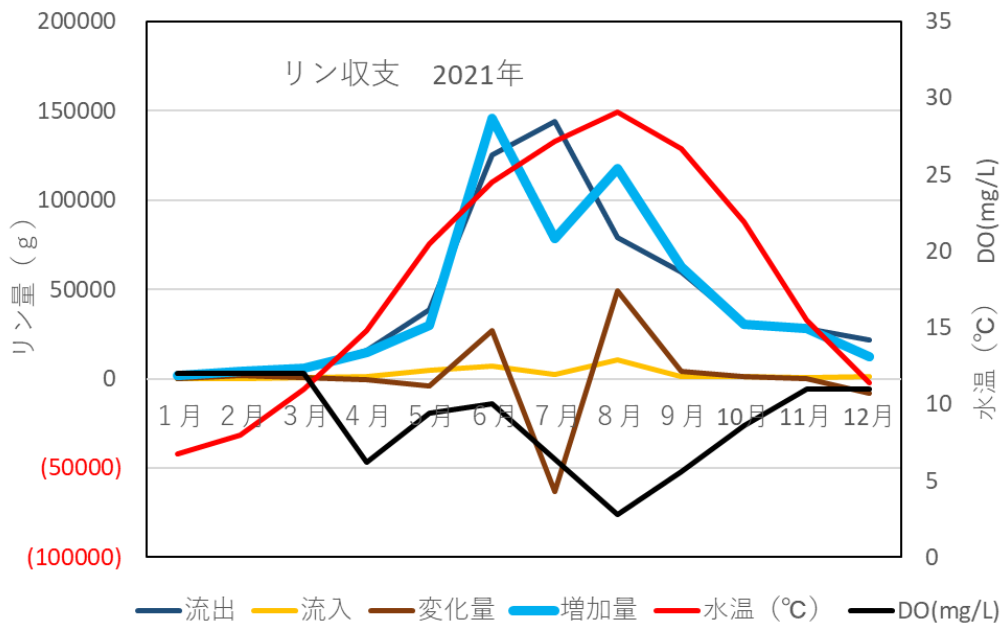
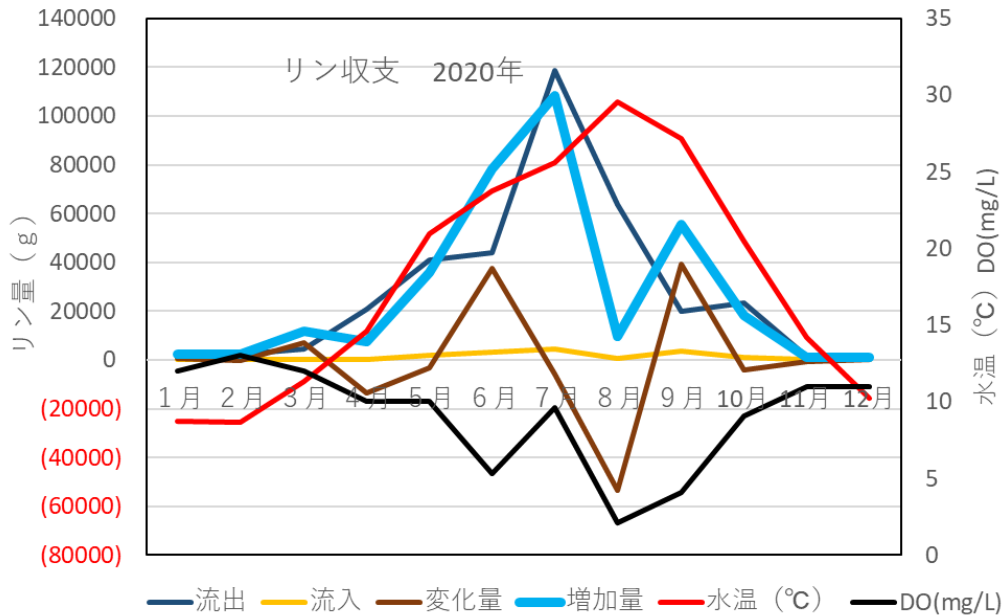
7. リン収支解析



$$\text{基礎式: } \Delta P = \Delta S - (I - O) \times \Delta T$$

- 実測 {
- I = 幹線からの導水量 × リン濃度
 - O = (送水量 + 幹線への還元量 + 洪水吐越流量 + 漏水量) × リン濃度
 - ΔS = 終期貯水量 × リン濃度 - 初期貯水量 × リン濃度
 - ΔT = 水収支期間
- 推定 ➡ ΔP = 主に底泥からの溶出量と考えられる (+周辺排水路からの流入?)

7. リン収支解析



2020年、2021年の解析結果

増加量 ≒ 溶出量？
(+排水路からの流入量??)

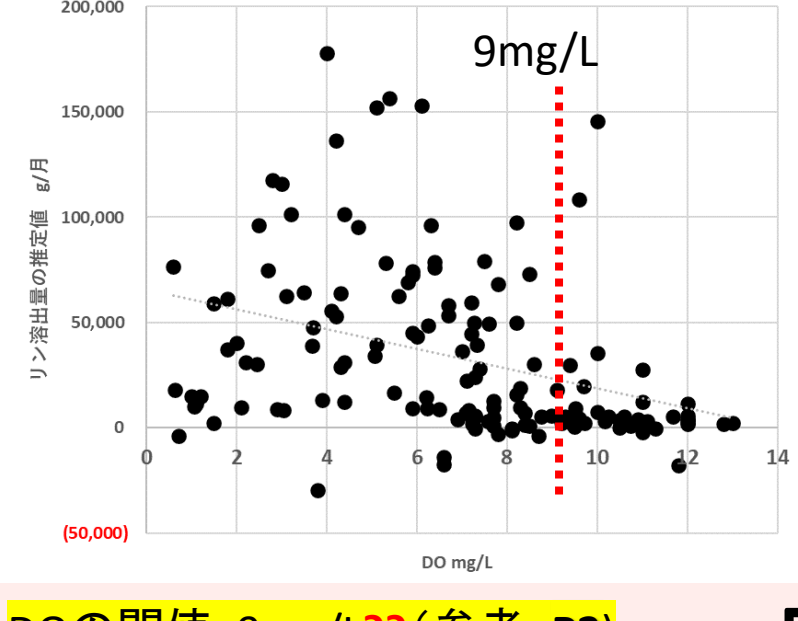
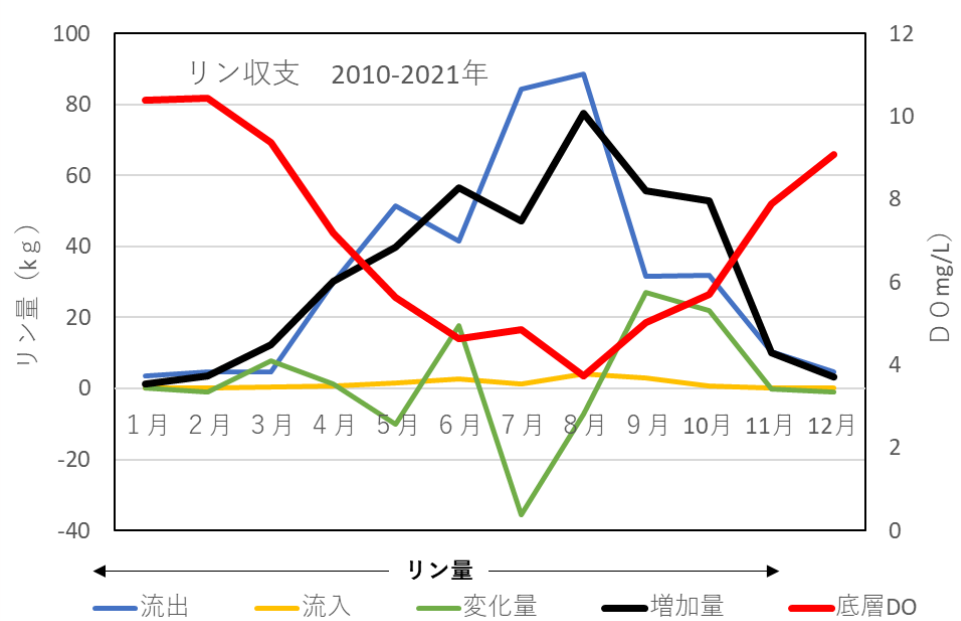
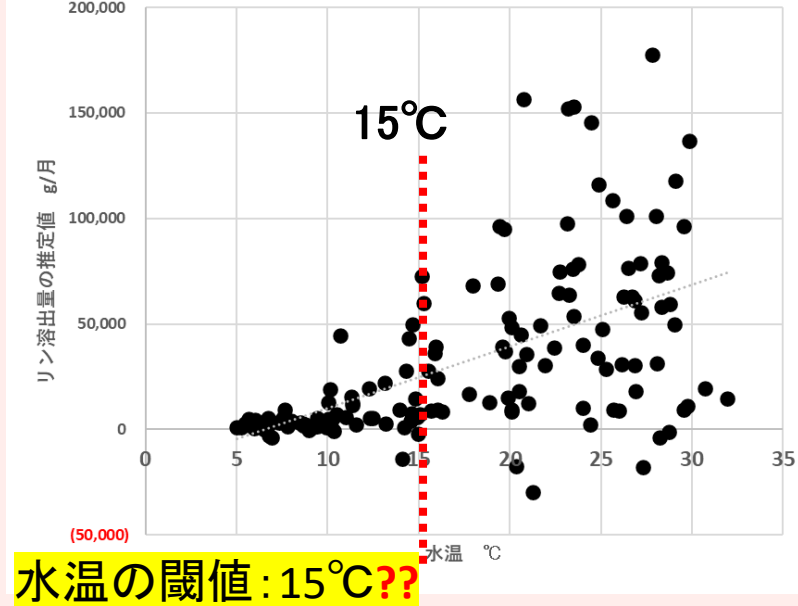
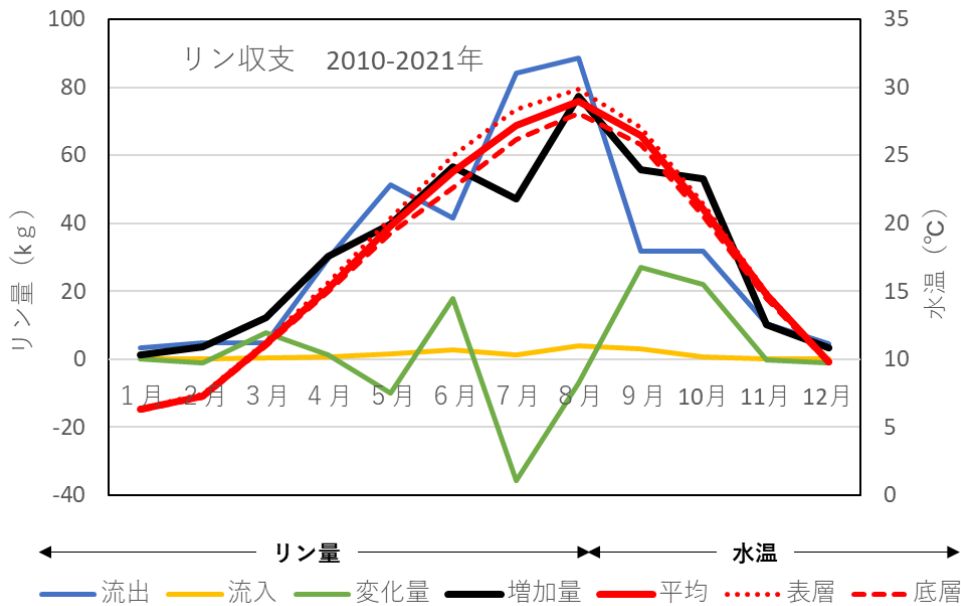
底泥からの溶出量は、2020年が**331.7kg**、2021年が**531.5kg**と推定された。

底泥からの溶出量は、水温が上昇し、DOが低下する**6月～9月**に増加する。

◎ 研究上の新規性としては…

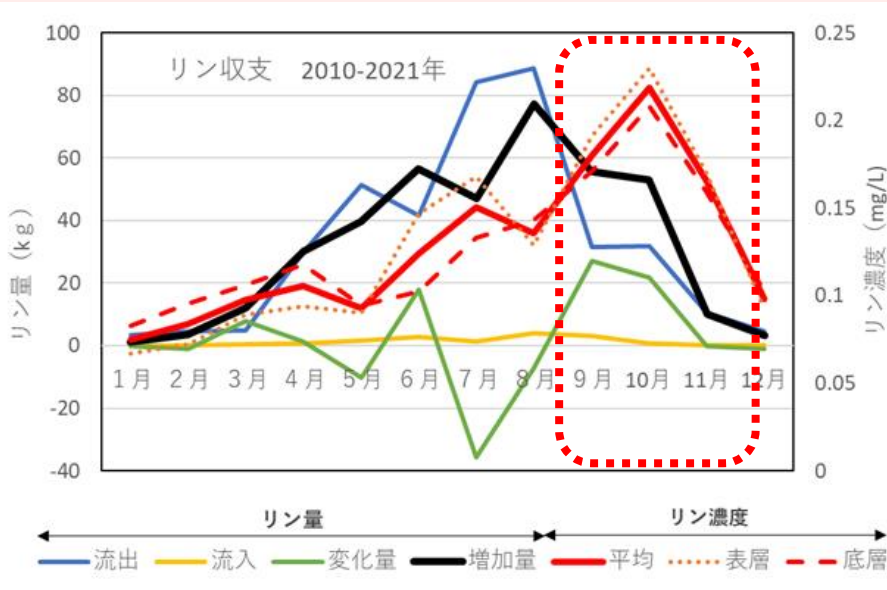
底泥からのリン溶出量を収支解析で推定した事例は初めて？

2010~2021年の解析結果



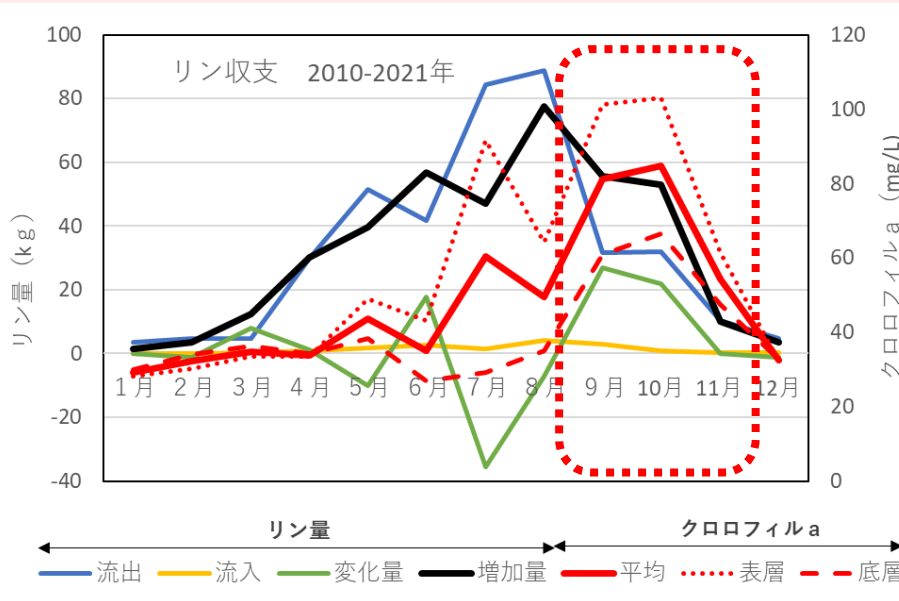
7. リン収支解析

2010～2021年の解析結果



池内のリン濃度は**10月に最大**となり、底泥からのリン溶出量より2か月遅れて増加している。

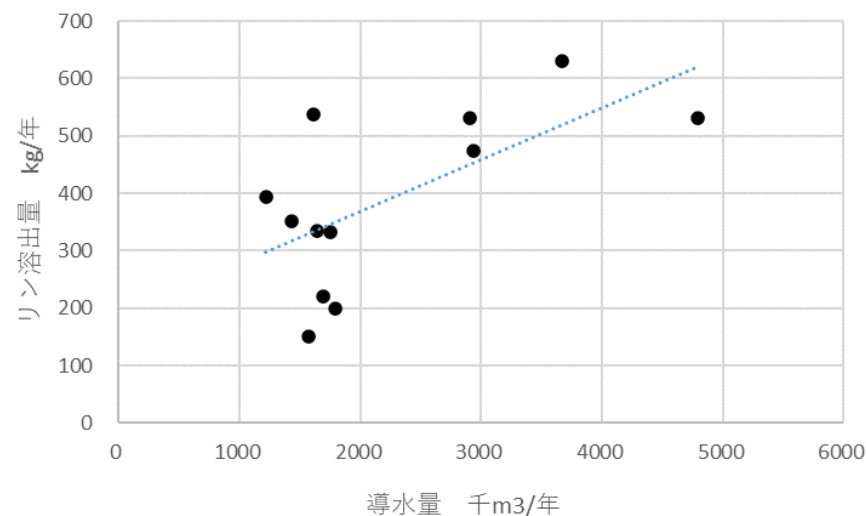
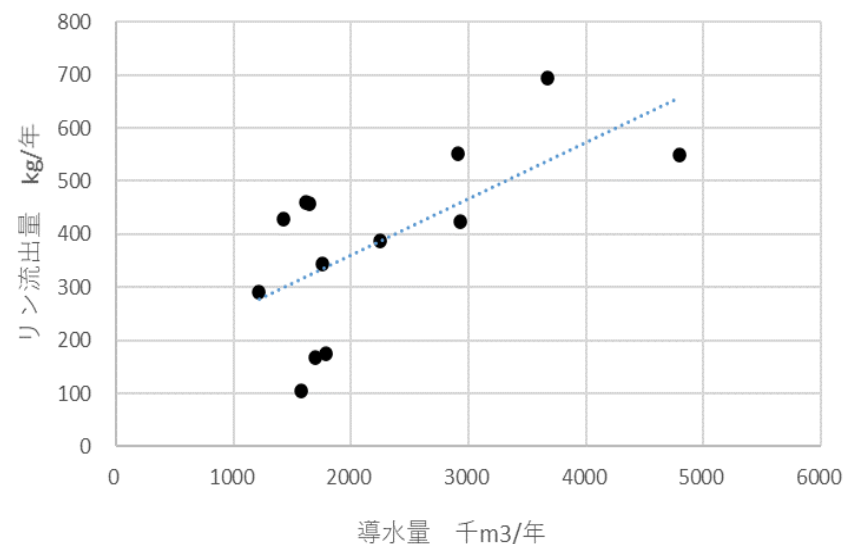
クロロフィル濃度は**10月に最大**となり、底泥からのリン溶出量とほぼ連動して変化している。



導水量と送水量が少なくなる10月にリンやクロロフィル濃度が最大になるので、この時期に**用水による希釈**が効果的であることが考えられる。

2010～2021年の解析結果

年	リン量 (kg/年)			導水量 千m ³ /年)	送水量 (千m ³ /年)
	流入	流出	溶出等		
2010	15.8	168.8	220.5	1697.2	2203.8
2011	7.5	105.2	151.6	1573.1	2338.8
2012	6.6	173.9	198.7	1790.7	2608.8
2013	9.2	459.3	536.7	1614.2	2603.1
2014	37.5	549.4	530.7	4793.8	2192.1
2015	21.8	694.5	630.5	3668.7	1605.9
2016	5.5	457.2	335.0	1641.5	1992.1
2017	9.9	423.1	473.8	2933.7	1505.1
2018	3.7	291.2	393.6	1217.6	1518.9
2019	18.5	428.0	351.7	1427.0	1545.7
2020	15.6	343.4	331.7	1755.1	1842.1
2021	31.0	552.8	531.5	2910.0	1981.1
平均	15.2	387.2	390.5	2251.9	1994.8

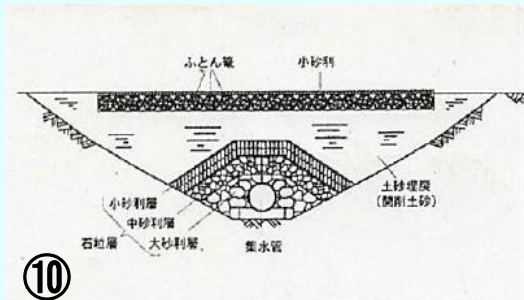


- 年間リン溶出量は、151.6～630.5kgと大きく変動しているが、平均で**390.5kg**と推定された。
- **導水量が大きくなると、池内でのリン溶出量、池外へのリン流出量が増加する傾向がある。**

8. アオコ対策

過去の芦ヶ池におけるアオコ対策（参考：後掲資料：P3-P12）

栄養塩類等	対策法	実施年
流入の削減	① ベチバーによる土砂流出防止 (P5)	2008～2012
	② 周辺排水路整備による栄養塩流入の低減 (P4,P8)	2012
流出の促進	③ アオコ発生前の積極的な利水運用による水循環促進 (P8)	2011～2014
	④ エンサイ栽培による水質浄化 (P12)	2018
	⑤ ハス植栽実験 (P7)	2009～2013
池内対応	⑥ 有用微生物 (EM菌) 投入による水質改善	2005～2007
	⑦ バイオコードによるアオコろ過 (P6)	2008～2012
	⑧ 分画フェンスの設置によるアオコの流下抑制 (P6)	2013
	⑨ 左岸側の池干し (P10)	2016
	⑩ 集水渠試験 (P11)	2018



8. アオコ対策

以上の解析結果から、下記のアオコ対策を提案する。

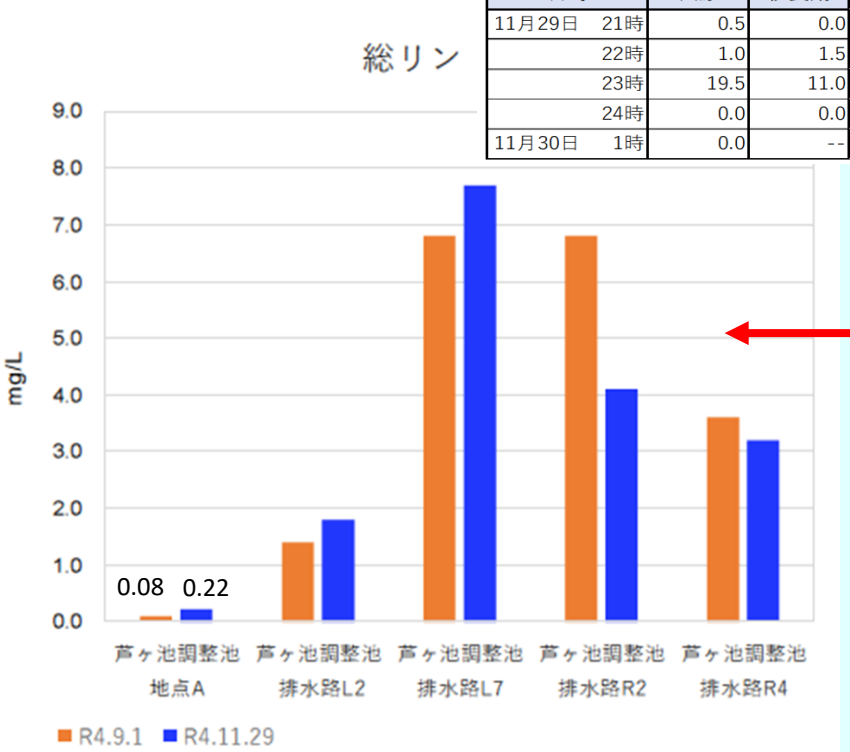
- ① 降雨時における池外からの**流入防止**（最初の対策）
- ② 水管理操作による池内に溶存しているリンを効果的に**池外へ放出**
- ③ 水管理操作による底層からのリンの**溶出抑制**
- ④ 底泥の**浚渫除去**（最終手段）

① 降雨時における池外からの流入防止

水収支解析から、周辺排水路を改修した2012年以降は、2019年に観測した日雨量250mmの降雨時のみ排水路からの流入を確認した。

時刻 日時	降雨量	
	田原	伊良湖
11月29日 21時	0.5	0.0
22時	1.0	1.5
23時	19.5	11.0
24時	0.0	0.0
11月30日 1時	0.0	--

ECの自記測定により降雨時における流入の影響を確認！！



- 排水路からの流入水による水質負荷量の確認
 - 排水路水位の自記記録、降雨時における排水路内の水質調査

排水路内のT-Pは、平水時(9/1)、降雨時(11/29)ともに0.1mg/Lを大きく上回る

- 【今後の課題】
- 上記の影響が大きいと判断された場合は、**周辺排水路の機能診断**
 - 排水路の横断・縦断測量、角落しの位置、構造、管理の実態調査
 - 排水路内の**雑物除去**などの管理
 - カバークロップの設置による**侵食土砂の低減**
 - 要所に**沈砂池の設置**（可能か？）

この課題を解決しない限り、以下のいかなる対策を施しても、アオコ抑制は実現しない。

② 水管理操作により池内に残存しているリンを効果的に池外へ放出する

- 導水によるリンの流入が約15kg/年、底層からの溶出が**390kg/年**であることから、**年間400kg以上**のリンを池外に放流する。
- アオコは水面に浮遊する特性があるので、**アオコ発生時に角落や洪水吐から越流させる**ことによって排除することが効果的である。
- 送水量、幹線バック以外^{以外}の用水を**希釈水として導水し、排水路へ放流**するとともに、調整池の**回転率を高める**。（希釈水の水源は??）
- 調整池内の**貯水総量を小さく管理することによって回転率を高める**。（送水量が年間約200万m³（参照No.22）であることから、貯水総量を100万m³で管理すれば、回転率が2倍以上に向上する。）

上記の操作を経年的に行えば、底層に内在する総リン量は減少し、将来、アオコが発生しなくなると予想できる。ただし、その**時期は不明！！**

<今後の課題>

- 底泥調査より、**底泥に含まれるリン総量**を把握する。
- 希釈水の候補として、**幹線用水の余剰水、事前放流、洪水導入**の水量と水質について検討する。
- 水管理操作（幹線バック、送水、余水吐や角落から排水路への放流）の制約条件下で**効果的な水管理の方法**をシミュレーションにより検討する。

③ 水管理操作による底層からのリンの溶出抑制

(対策)

➤ 底層のDOを高めることにリンの溶出を抑制する(参考:P1)

➤ その方策として…

◎ 幹線からの導水(低水温・高DO・低T-P:No.58参照)を積極的に行う。

幹線の用水の水温が低く、DOが高い場合、幹線からの導水により、貯水池内の底層付近に幹線からの用水が浸入し、DOの向上が期待できる。

水源: 幹線用水の余剰水、事前放流、洪水導入、万場調整池内の底層水
とくに、併設水路を介した導水(水温が低い? 確認!)

実施時期: DOが低下し始める4月から開始

(課題)

➤ 目標値の0.1mg/L以下にならない場合

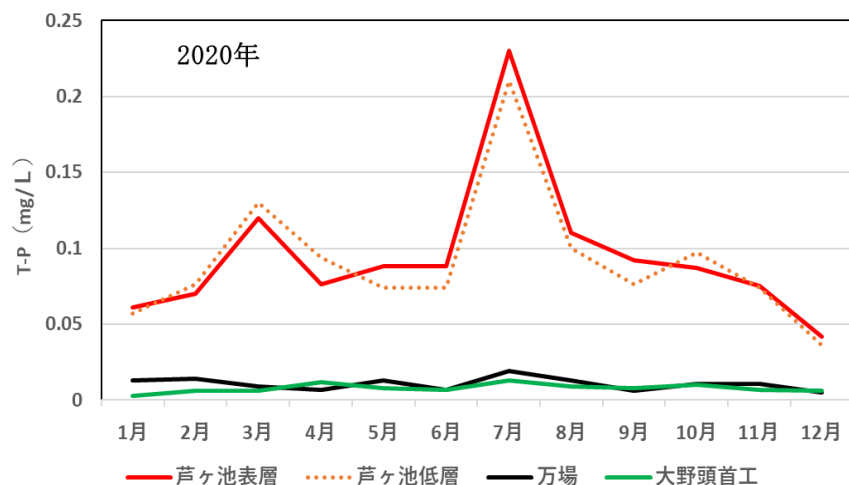
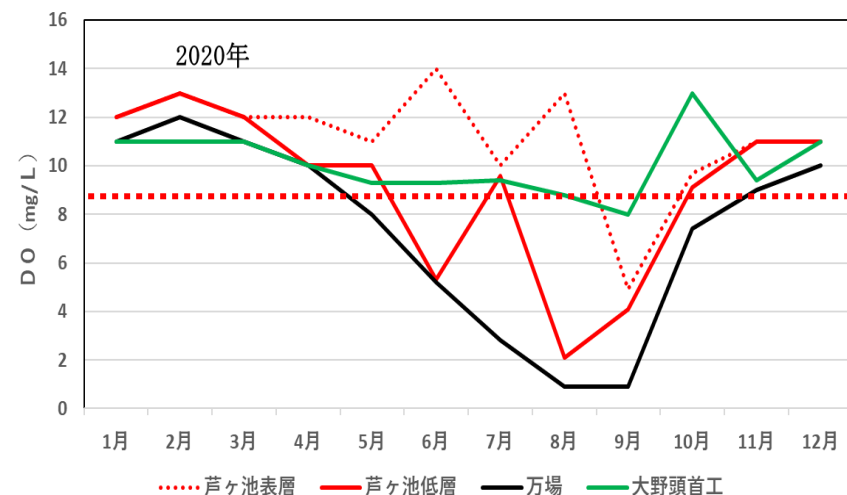
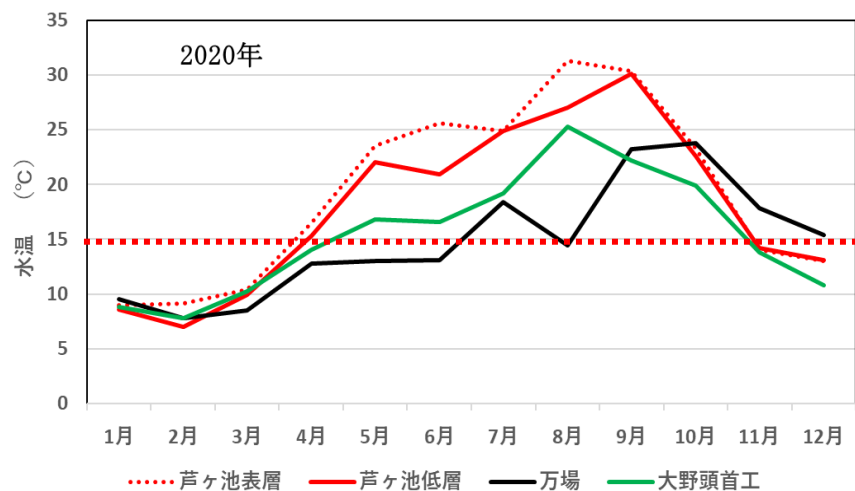
- ・アオコ発生の可能性があり、畑地灌漑として利用するには危険性を伴う
- ・底泥中のリン溶出を妨げるのでアオコ発生の長期化を招く

➤ 左岸側の池底が右岸より浅いので、幹線導水の効果は左岸池底では期待できない??

【左岸底層DOmg/L】 2022年4月:10.5;5月:9.8;6月:9.4;7月:9.1;8月:8.3;9月:8.9>8mg/L

2020年 大野頭首工、万場と芦ヶ池の水質・水温の月別変化

幹線データがないので大野頭首工下流のデータで代用

**(秘策)**

低温でリン濃度の低い万場の低層水を揚水し、幹線を経由(自然曝気)して、芦ヶ池に導水する。



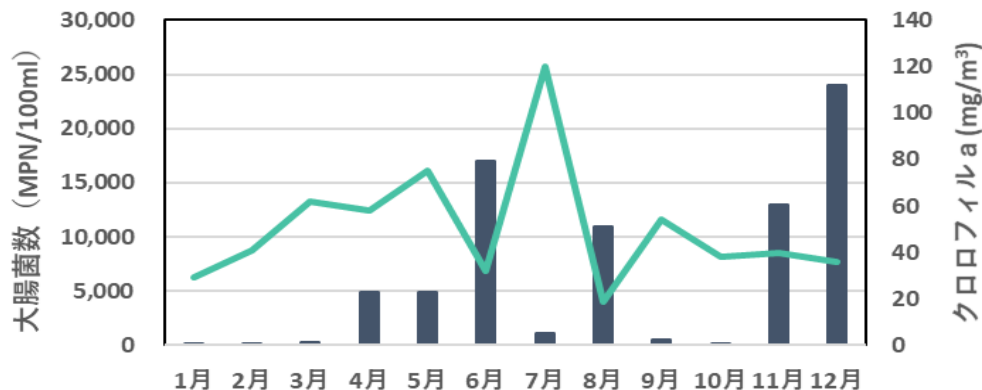
- 芦ヶ池:リン濃度対策
- 万場:低層の低DO対策

(余談ですが) もう一つの課題...

生鮮野菜を衛生的に保つために
-栽培から出荷までの野菜の衛生管理指針-
平成23年6月策定、令和3年7月最終改訂
農林水産省

https://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_yasai/kekka/attach/pdf/river-1.pdf

- EUでは、生で食べられる野菜(皮を剥いてから食べる大根のように、直接可食部に水がかからないものは除く)に使われる水に対して、**大腸菌が100個/100ml以内**であることを目安に水質管理が進められている。
- **栽培に使う水**も、この菌数を参考に水質を評価するとよい。
- 国内でも、環境省の調査から、ふん便性大腸菌群注が、**100 個/100ml**を超える水は、サルモネラの検出率が高いことが示されている。



大腸菌数が多い

完

ご清聴にお礼申し上げます。

「どうする芦ヶ池??」

質問、ご意見については、下記のアドレスにメール
でご連絡ください。。

senge@gifu-u.ac.jp

千家正照

参考資料

P3以降の全ての資料は、豊川用水総合事業部から提供されたものである。

心よりお礼申し上げます！！！！

役に立つサイト

1. 農村振興局農村環境課：農業用貯水施設におけるアオコ対応参考図書
https://www.maff.go.jp/j/nousin/kantai/tekiou/aoko_sankou.html
2. 国土交通省：湖沼における水理・水質管理の技術
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/kankyoku/kosyo/tec/
3. 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：ダム貯水池水質改善の手引き
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/pdf2/damtyosuichisuisitukaizentebikiH30.pdf
4. 福島・相崎編：アオコ指標検討会資料 アオコの発生状況と計量、発生機構
<https://www.nies.go.jp/kanko/gyomu/pdf/f072-1995.pdf>
5. 高比良他：アオコ原因生物の生態と対策技術の現状
https://keea.or.jp/pdf/knakyokanri/44/vol_44_11.pdf

湖底からのリン溶出のメカニズム

1 概要

湖底からのリンの溶出は、底層付近の水の溶存酸素濃度(DO)が下がると起こり易くなる。幾つかの文献を見る限り、これは底泥に含まれる鉄の価数の変化によるところが大きい。 $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$ と還元されると、結合していたリンを水中へ放出する。

2 各物質の性質

2-1 鉄について

価数が変わると性質も大きく変わる。
それを右表に示す。

表 2価と3価の鉄の性質の比較

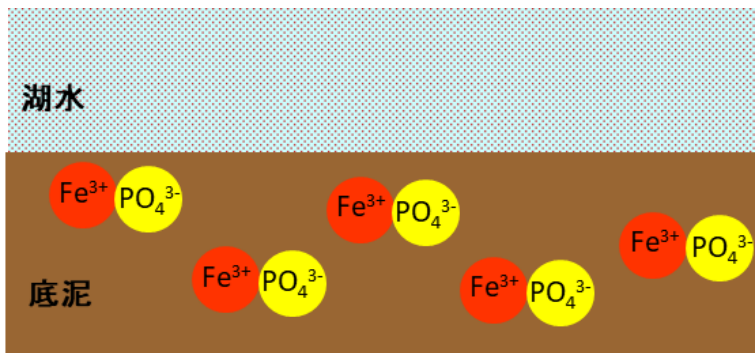
項目	2 価	3 価
化学的表記	Fe^{2+} 、 $Fe(II)$	Fe^{3+} 、 $Fe(III)$
DO との関係	水中の DO が低い場合、多くなる。	水中の DO が高い場合、多くなる。
存在状態	地下水は多くの場合この形で溶解している。湖底付近で DO が低い場合もこの形になりやすい。	地表ではほとんどの場合この形で存在するし Fe^{3+} イオンのまま水中に溶けていること無く、酸化鉄、水酸化鉄などの形で沈殿す。リン酸鉄の沈殿を生じ
溶解度	中性付近では、イオンのまま水中に溶けていることが多い。	中性付近ではほとんど水に溶けず上記のよ殿を生ずるが、pH が下がると溶けることも

2-2 リンについて

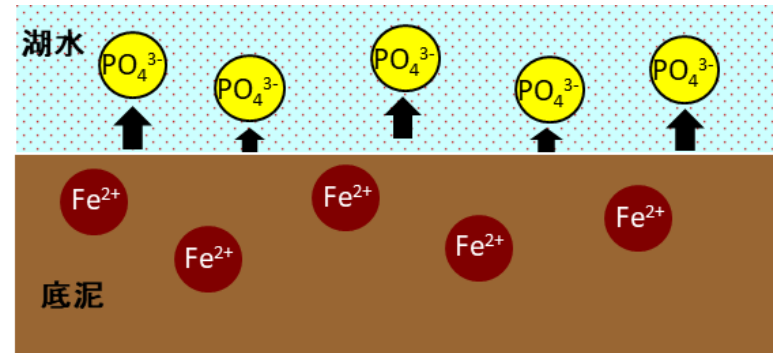
- ・水中では、多くの場合 PO_4^{3-} という形で存在し、リン酸イオンと言えこれを指すことが多い。
- ・3価の鉄 (Fe^{3+}) が存在すれば、pHが中性付近では、ほとんど水中に溶けずリン酸鉄 ($FePO_4$) などの形で沈殿する。
- ・3価の鉄が還元されて2価の鉄 (Fe^{2+}) になれば、解離して水中に溶出する。

3 リン溶出のメカニズム

- ・リンはリン酸イオン (PO_4^{3-}) として存在する。
- ・底層水の DO が高い場合は、リンは鉄と結合した形で底泥中に存在する。このときの鉄の形態は Fe^{3+} である。
- ・底層水の DO が低くなると、鉄が還元され、 $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$ となる。
- ・すると結合していたリンが解離し、水中へ放出される。



水中のDOが高い場合



水中のDOが低い場合

底泥からのリン溶出のDOの閾値

[水質汚濁研究 第9巻 第1号 45-48 1986]

<ノ - ト> https://www.jstage.jst.go.jp/article/jswe1978/9/1/9_1_45/_pdf/-char/ja

底泥からのリンの溶出と溶存酸素

Phosphate release from bottom sediments and dissolved oxygen

本橋 敬之助*

Keinosuke MOTOHASHI

実験データ!!

完全閉鎖系の中で底泥の微生物活性を抑制しない場合

$$Y = 790 - 313 \ln x \quad (r = -0.903)$$

Y: 底泥からのリン溶出濃度 ($\mu\text{g/L}$)

x: 上層水の酸素消費に伴う溶存酸素濃度 (mg/L)

上式に、 $Y = 100 \mu\text{g/L} = 0.1 \text{mg/L}$ を代入してxを求める。

$$x = \exp\left(\frac{790 - 100}{313}\right) = 9.0 \text{mg/L}$$

水温 19°C の時の飽和溶存酸素量

過去の芦ヶ池におけるアオコ対策

- ① 有用微生物(EM菌)投入による水質改善効果実証実験(2005～2007年)
- ② ベチバーによる土砂流出防止(2008～2012年)
- ③ バイオコードによるアオコろ過効果検証(2008～2012年)
- ④ ハス植栽実験(2009～2013年)
- ⑤ **アオコ発生前の積極的な利水運用による水循環促進(2011～2014年度)**
幹線バックに関する取り決め(平成24年度策定)に従い、アオコ発生前に積極的な幹線バックを実施。しかし2014年8月にアオコ混じりの水を下流へ流す事故が発生した影響もあり、幹線バックは平成27年度以降、実施されていない。
- ⑥ **周辺排水路整備による栄養塩流入の低減(2012年)**
周辺排水路整備工事を実施し、降雨時の調整池への栄養塩流入を低減させることを目的とする。しかし周辺からの土砂流入により、排水路内に土砂が堆積し、降雨時に調整池に土砂が直接流入しているとされる。
- ⑦ 分画フェンスの設置によるアオコの流下抑制 (2013年)
- ⑧ **左岸側の池干し(2016年)**
2016年12月から2017年2月にかけて左岸側の池干しを行い、アオコ抑制を図った。しかし片側ずつの池干しでは残留した貯水にアオコが残存することや、湧水等により完全な干し上げが困難であることから、顕著な効果は確認できなかった。
- ⑨ エンサイ栽培による水質浄化(2018年)
- ⑩ 集水渠試験(2018年)

排水路の設置による排水の分離 →水質保全



平成20～24年度

ベチバーによる土砂流出防止

周辺畑地等から降雨時における土砂、肥料等の流入をカバープランツによる植栽によって防止する効果を期待したもの。

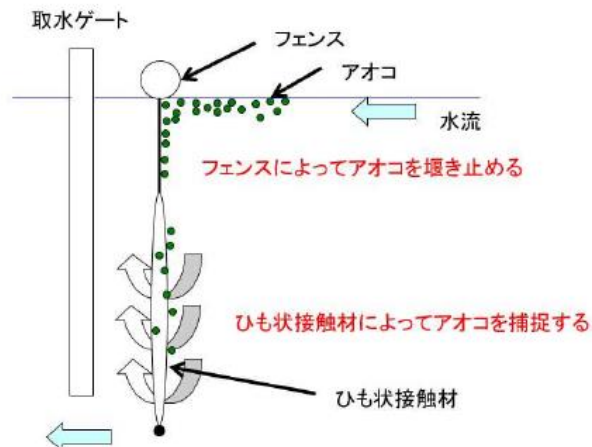
植生が枯死したため、効果の有無は確認できなかった。



平成20～24年度

バイオコードによるアオコロ過効果検証
分画フェンス設置によりアオコの流下（揚水）抑制

シートフェンスと、モール状の浄化材を組み合わせたフェンスを取水口の前に取り付けることにより、アオコを取水口から下流部へ流さないようにする。



効果は期待できるが、交換や洗浄
など維持管理が必要。

平成21～25年度

ハス植栽実験

水生植物(ハス)による浄化効果を期待。



調整池で直接播種をしたが
生育不良。

調整池外で生育させ調整池
への植え付けを行ったが、水
生植物が分画フェンス外へ流
れ流亡。

平成24～26年度

アオコ発生前の積極的な利水運用による水循環促進

アオコの発生が想定される5月下旬までを目途として、幹線バックを積極的に行うことにより調整池貯留水の循環を図る。

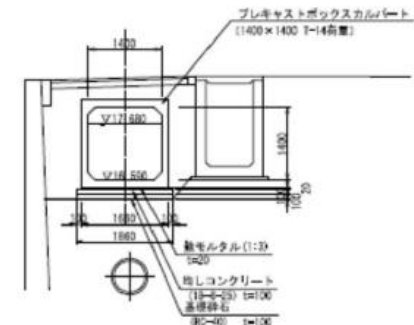
年度	時期	総量(m3)
平成24年度	4～7月	492,480
平成25年度	4～7月	581,500
平成26年度	4、9、10月	332,700

平成24年度～平成26年度夏期にレベル3以上のアオコ発生がないことから水質改善の効果に期待ができる。

平成24年度

周辺排水路整備による栄養塩流入の低減

栄養塩濃度が高く、流域が大きい右岸4号流入工下流について改修を実施。



周辺排水路の整備により、右岸における流入量(負荷)の削減を確認したものの、水質調査結果からは、アオコの発生と関係の深いリン濃度の低減は確認できなかった。

平成28年度

左岸池干し



池干し前後の各水質項目及び植物プランクトンの細胞数などの値の推移について確認しましたが、値、変動幅等について顕著な違いは確認できませんでした。

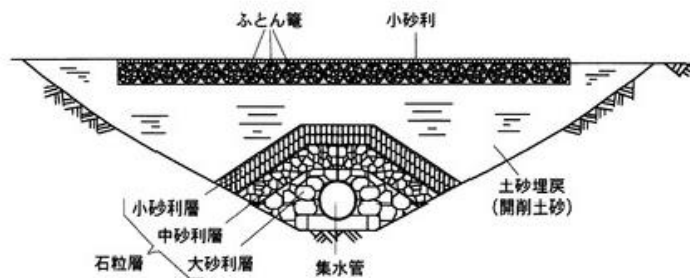
服部瑞穂：土壤の乾燥レベルがアオコに与える影響－池干しの水質改善効果に関する研究－. 平成24年度三重大学大学院生物資源研究科修士論文

池干しによって発現する効果を得るためには、土壤が pF4.2 迄乾燥すること

平成30年度

集水埋渠試験

集水埋渠は、伏流水や地下水の取水のために水道事業で広く採用されている取水方式がアオコ対策としての有効性有無を確認するもの。



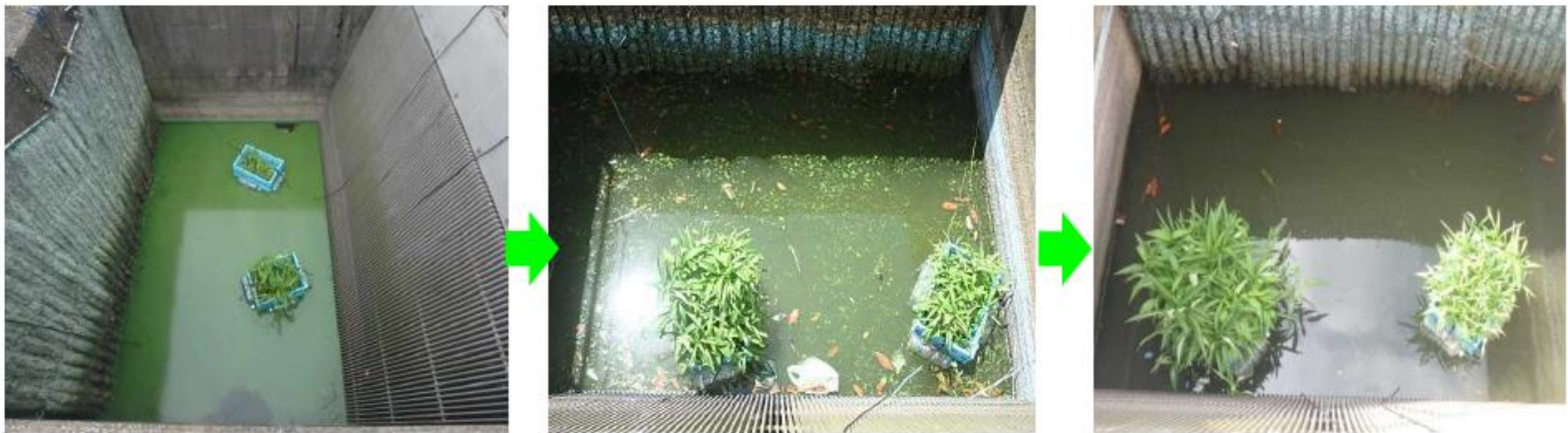
実験装置

実験装置ではクロロフィルaの値が低くなったため、アオコを除去するフィルター効果があることの確認ができたもののフィルターにアオコが付着し目詰まりが発生。

平成30年度

エンサイ植栽

水生植物(エンサイ)による浄化効果を期待。



エンサイの育成とともにアオコが減少している状況

調整池全体を浄化するためには膨大な量の水生植物と維持管理が必要。