

1. 魚の養殖における水質について

(抜粋)

原書

Water Quality Management in Aquaculture
Auburn University, Auburn, AL, United States, January 1985
Claude E. Boyd

翻訳許可取得者

株式会社ティ・アンド・シー・テクニカル
商品開発課 辻 元
取手事業所

茨城県取手市宮和田 448-1
電話 (代) 0297-83-0721

本社 〒110-0003 東京都台東区根岸 1-2-17
住友不動産上野ビル 7号館 5階
電話 (代) 03-3871-1750

目次

はじめに	3
1. 魚の養殖における水質について	4
1.1 はじめに	4
1.2 温度	4
1.3 塩分	5
1.4 濁度と色	7
1.5 プランクトン	7
1.6 溶存酸素	11
1.7 pH	19
1.8 二酸化炭素	20
1.9 アンモニア	21
1.10 亜硝酸塩	22
1.11 硫化水素	23
1.12 全アルカリ度と全硬度	24
1.13 水生植物	25

はじめに

水質には、水の有益な使用に影響を与えるすべての物理的、化学的、生物学的要因が含まれています。魚の養殖に関する場合、魚の生存、繁殖、成長、生産、また管理に何らかの影響を与える水の特徴は、その水質を表す測定項目ということになります。池の魚の養殖には多くの水質項目がありますが、幸いなことに、これらのほんの一部だけが日々の管理に置いて重要な役割を果たしています。これらが養殖を行う人の考慮する測定項目であり、管理手法によりある程度制御を行うことになります。通常の測定項目以外の条件が同じとすれば、これら水質項目で「良質」と判断される池は、「劣悪な」水質を備えた池よりも健康な魚を生産します。

本書では、魚の養殖に「良い」水質を定義する試みが述べられています。魚の生産、水質の改善、ストレスに関連する魚の病気や寄生虫の問題の回避、研究目的での魚の維持、最終的には単位表面積あたりの魚の生産量を増やすための水域の可能性を判断するのに役立つ情報も記されています。

以下の水質に関する議論は簡単ではあるのですが、最も重要な点をカバーする試みが行われています。

第1章は、魚の生産に影響を与える水質の一般的な側面について述べています。魚の給餌が水質に与える影響については、第2章で説明します。第3章では池の施肥について、第4章では石灰の施肥について説明しています。溶存酸素と曝気は第5章で扱います。

第6章では、池の化学物質の用量を計算するためのその他の処理と手順について説明しています。水質分析の方法は第7章に示されています。

本書の情報は、本質的にはボイド氏 (Boyd) による池の魚の養殖における水質に関する書籍「池の魚の養殖における水質管理」の概要です。この本は、池の水質に関する詳細、参考文献として参考になるでしょう。他の本と本書の基礎のほとんどは、米国南部の温水池の魚の養殖に関する研究です。ただ原則と方法はすべて一般的であり、汽水域や海水池での魚の養殖など、他の地域の養殖にも適用できます。

翻訳者より

本翻訳書では第一章のみを翻訳紹介しています。他の章については原書にあたっていただければ幸いです。

1. 魚の養殖における水質について

1.1 はじめに

本書で掲載されている資料は、水質項目と魚の生産との間の一般的な関係を説明し、可能な場合、測定項目の望ましいレベル、範囲を示しています。さらに、ここで推奨される管理手順は、通常水質の改善に効果があります。ただし、理由は明確ではないのですが、魚に対する水質の影響と管理手順の有効性が、本書内で報告されているものと大きく異なる場合があります。このことから、魚の養殖業者は、本書の情報を水質の問題に対する最終的な回答と見なさないよう注意をお願いします。また本書を様々な養殖における問題を解決する方法の提案の一つと見るようにしてください。

本書では冷水魚は考慮されませんが、冷水魚は一般に、温水魚よりもはるかに品質の高い水を必要とします。

1.2 温度

温水魚は、25°C から 32°C の間の温度で最もよく成長します。水温は、熱帯の低高度で、年間を通じこの範囲ですが、温帯地域では、冬の水温が低すぎて、魚や魚の餌生物を急速に成長させることができません。このため、摂食や施肥などの管理手順は冬期中止または短縮されます。

温度は化学的および生物学的プロセスに顕著な影響を及ぼします。一般に、化学反応と生物学反応の速度は、温度が 10°C 上がるごとに 2 倍になります。つまり、水生生物は 30°C では 20°C の 2 倍の溶存酸素を使用し、化学反応は 30°C では 20°C の 2 倍の速度で進行します。したがって、魚の溶存酸素要件は、冷水よりも温水でより重要です。

池の化学処理も温度の影響を受けます。温水では、肥料はより速く溶解し、除草剤はより速く作用し、ロテノンにより速く分解し、糞尿の腐敗による酸素消費率はより大きくなります。

池では、熱が地表から入り、地表水は下層水よりも早く加熱されます。水の密度（単位体積あたりの重量）は、4°C を超えるに従って低下するため、表層水は非常に暖かく軽くなり、下層の冷たい重い水と混ざらない場合があります。

池の水を暖かい層と冷たい層に分けることは、熱成層と呼ばれます。上部の暖かい層はエピリムニオンと呼ばれ、下部のより低温の層はハイポリムニオンとして知られています。エピリムニオンとハイポリムニオンの間で急速に変化する温度の層は、サーモクラインと呼ばれます。温度成層池の温度プロファイルを図 1.1 に示します。温帯地域では、大きな池が春に成層し、秋まで成層したままになることがあります。温帯地域の小さな浅い池と熱帯の池では、成層はしばしば日ごとの繰り返し変化を示します。日中、地表水は暖かくなり、明確な層を形成します。夜になると、地表水は下層水と 2 つの層が混ざり合い同じ温度に冷

却されます。熱成層化に関する広範な議論は、湖沼学に関するあらゆる標準的なテキストに記載されています。

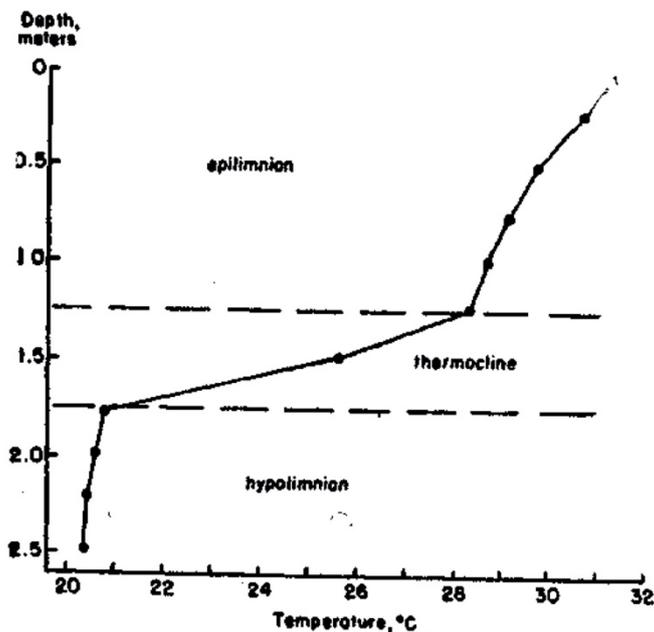


図 1.1 養魚池の熱成層のよく発達したパターン
 エピリムニオン、サーモクライン、ハイポリムニオンが示されています。

1.3 塩分

塩分という用語は、1リットルあたりのミリグラムで表される天然水中のすべての溶解イオンの合計濃度を指します。塩分の増加に伴い、溶液の浸透圧が増加します。魚種により浸透圧要件が異なるため、魚の養殖に最適な塩分は、種によってある程度異なります。池の魚のいくつかの養殖種の塩分情報を表 1.1 に示します。

表 1.1 一部の養殖魚の正常な生存と成長を可能にする最高濃度の塩分

Species	Salinity (mg/litre)
<i>Catla catla</i> (catla)	.. slightly brackishwater
<i>Labeo rohita</i> (roha)	.. slightly brackishwater
<i>Ctenopharyngodon idella</i> (grass carp)	.. 12,000
<i>Cyprinus carpio</i> (common carp)	.. 9,000
<i>Hypophthalmichthys molitrix</i> (silver carp)	.. 8,000
<i>Ictalurus punctatus</i> (channel catfish)	.. 11,000
<i>Tilapia aurea</i>	.. 18,900
<i>T. nilotica</i>	.. 24,000
<i>T. mossambica</i>	.. 30,000
<i>Mugil cephalus</i> (grey mullet)	.. 14,500
<i>Chanos chanos</i> (milkfish)	.. 32,000

魚は塩分の急激な変化に非常に敏感です。ある濃度の塩分濃度で水中に生息する魚を、塩分がはるかに高い、または低い水中に入れてはなりません。またほとんどの種の小魚や稚魚は、成魚よりも塩分の急激な変化の影響を受けやすい特性があります。

塩分の調整では、塩化ナトリウムが魚の飼育施設や小さな実験池の塩分を増加させるために使用される場合があります。また、塩分を下げるため小規模システムでは塩分の低い水を添加することにより、塩分を下げることができます。残念ながら、重力流や潮汐の動きによって海水が導入される汽水池を除き、通常、より大きな魚の養殖システムで塩分の調整することは現実的ではありません。

実際には、水中のすべてのイオンの濃度を測定することはほとんどできません。ただし、塩分が高くなると、水の電流を伝導する能力（導電率）が増加します。導電率計は、導電率を測定するために使用することができ、導電率値は塩分の概算を可能にしてくれます。

多くの導電率計には、塩分を直接読み取るための目盛りがあります。また水の大凡の塩分を知る別の方法は、総溶解固形分濃度（TDS）を測定することです。サンプルを上質紙でろ過し、既知の容量を蒸発させ、残っている残留物を計量します。ミリグラム/リットルの残留物の重量は、溶存固形物の総濃度であり、これは塩分に非常に近くなります。また汽水域では、塩分は塩化物濃度から次の式で推定できます。

$$\text{塩分(mg/L)} = \text{塩化物濃度(mg/L)} \times 1.805 + 30$$

実際には、塩化物濃度（塩素度）は、屈折計または温度補正された比重計で測定することができます。

水中の塩分の程度は、地質学および水文学的条件を反映しています。土壌が継続的に浸出する高降雨の地域の地表水は、通常、塩分が低くなります（10～250 mg/L）。乾燥地域では、蒸発する水の量が降水量を超えるため、蒸発の結果として塩分が増加します。このため乾燥地域の池の塩分値は、多くの場合 500～2,500 mg/L の範囲にあり、それよりはるかに高い値を目にすることがよくあります。降水量の多い地域でも、井戸の地下水は、乾燥地域の地表水で遭遇するものと同じくらい高い塩分値を示すことがあります。

海水は塩分が高いため（35,000 mg/L）、汽水池の塩分は、海水と淡水の希釈度を反映します。降雨量の少ない期間、汽水池の蒸発率が高いと、塩水は過度の塩分を含む可能性があります。45,000 mg/L を超える塩分は、海洋種でさえも生きることが困難になります。

1.4 濁度と色

混濁という用語は、水が光の通過を妨げる浮遊物質を含んでいることを示します。養魚池では、浮遊生物に起因する濁度の検出が望ましいのですが、浮遊粘土粒子によって検出される濁度は望ましくありません。後者の条件で、粘土粒子が魚に直接害を与えるほど水中に十分にあることはめったにありません。池に大量のシルト（砂と粘土の中間粒径）と粘土を運ぶ流出液が流入すると、シルトは池の底に沈み、魚の卵と魚の餌生物を窒息させます。

懸濁液に残っている粘土粒子は、光の浸透を制限し、植物の成長を制限します。水への可視性を 30 cm 以下に制限する永続的な粘土の濁度は、水の華（プランクトンブルーム）の発生を妨げる可能性があります。粘土の濁度を制御する方法については、後の章で説明します。

一部の池は、流域から植物性物質が流れ込みます。この植物材料（フミン酸塩）からの抽出物は、しばしば水に色を与えます。植物性抽出物の色は茶または薄いコーヒー色の外観を水に与え、暗い染みとして現れることがよくあります。フミン酸塩の濃度が高い池の水は、通常、非常に酸性で、総アルカリ度が低くなります。色は魚には直接影響しませんが、光の透過を制限し、植物の成長を抑えます。このため農業用石灰石が天然水からフミン酸塩を除去するために使用されています。

1.5 プランクトン

プランクトンは、水中に浮遊しているすべての微視的生物で構成されており、小さな植物（植物プランクトン）、小動物（動物プランクトン）、細菌が含まれています。

水中にプランクトンがあり、変色して濁ったように見える場合、その水にはプランクトンの「ブルーム」（水の華）が含まれていると言われています。植物プランクトンは、無機塩、二酸化炭素、水、日光により独自の食物を生産しています。動物プランクトンは、生きている、または死んだプランクトンと水中の他の小さな粒子または有機物を食べます。バクテリアは、水中のあらゆる種類の有機物を食物として利用しています。食物連鎖の環境にある魚の養殖システムでは、プランクトンは食物連鎖の最も豊富な基礎を形成します。

魚の養殖システムにおける食物連鎖の例を図 1.2 および 1.3 に示します。両方の食物連鎖は植物プランクトンの成長から始まります。図 1.2 では、オオクチバスで終わる前にいくつかのステップがあります。一方、図 1.3 では、ティラピアは直接プランクトンを食べているので、食物網はより単純です。食物連鎖の各ステップはかなり非効率的であるため、より直接的な食物連鎖を備えた魚の養殖システムは、より大きな重量の単位面積あたりの魚の収穫を行えます。たとえば、6 か月の期間中、サンフィッシュバスの養殖では 200 kg/ha を生産でき、ティラピアの養殖では 1,000 kg/ha を簡単に生産できます。

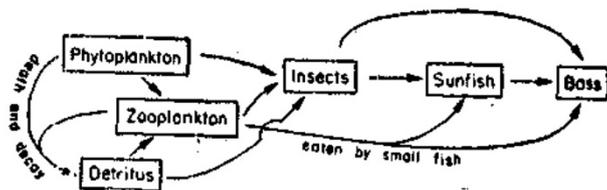


図 1.2 サンフィッシュバスの池の代表的な食物網。

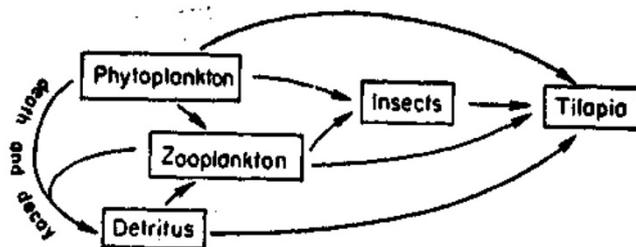


図 1.3 ティラピア養殖に使用される池の代表的な食物網。

プランクトンは食物連鎖の原点にあり、そこにはプランクトンの豊富さと魚の生産との密接な関係があります (図 1.4)。

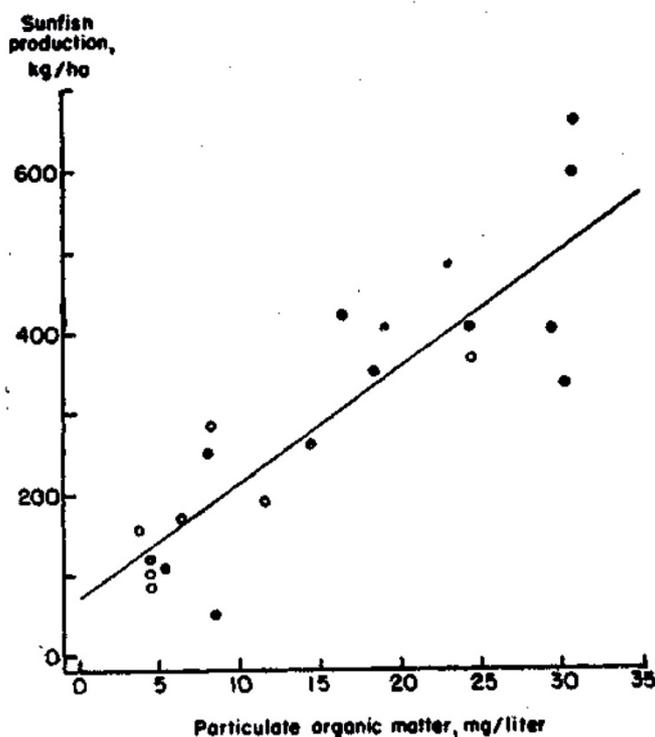


図 1.4 プランクトンの生産 (粒子状有機物) と池でのサンフィッシュの生産

プランクトンは、魚の成長を促進することに加えて、水を濁らせ、日陰を通して望ましくない水生雑草の成長を防ぎます。

養殖池でプランクトンブルームという利点があるのですが、成長のために魚が利用できるよりも多くのプランクトンが生まれることがあります。重いプランクトンブルームには、通常、表面にスカムを形成する可能性のある藍藻が多数含まれています。これらのスカムは日中は熱を吸収し、浅い温度成層を引き起こします。夜間は、プランクトンの激しいブルームが大量の溶存酸素を消費し、翌朝には酸素欠乏を引き起こす可能性があります。またプランクトンのスカムは突然死に絶え、分解し、酸素欠乏を引き起こす可能性があります。

プランクトンと溶存酸素の関係については、後の章で詳しく説明します。この重いプランクトンブルームは溶存酸素の問題を引き起こすこと、またそれにより生じる他の生物は、魚の肉に強い異臭を与える物質を生成することがあります。

植物プランクトンの存在量、または代謝活性を測定するためのいくつかの手法があります。最も一般的なものは、クロロフィル a の測定と一次生産性の測定です。クロロフィル a の方法は後の章で説明します。プランクトンの総量は、多くの場合、粒子状有機物分析から確認されます。残念ながら、これらのテクニックは、実際の魚の養殖に使用するには余りにも面倒です。一般的な粘土濁度を含まない池で使用するための最も実用的な手法は、透明度板の可視性を測定することです。透明度板測定の詳細については後の章で説明しますが、透明度板の可視性は、現在の基準で直径 20 cm の円盤で、黒と白の四分円が視認できなくなる深さと説明できれば十分です。図 1.5 (1) * に示すように、透明度板の可視性とプランクトンの存在量の間には高い相関があります。

魚の養殖にとって理想的なプランクトン濁度を確立することは不可能です。ただし、30 ~ 60 cm の範囲の透明度板の可視性は、良好な魚の生産と水中の雑草の遮光の測定において一般的に適切です。透明度板の視認性が 30 cm 未満に低下すると、溶存酸素の問題の頻度が増加します。60 cm を超える値では、光はより深いところまで浸透し、水中の大型植物の成長を促し、魚や魚の餌生物の餌として機能するプランクトンは少なくなります。

プランクトン群集は、種の構成と総量が絶えず変化しています。これにより、透明度板の可視性と池の水の外観が変動します。プランクトン群集におけるこれらの変化は、魚の養殖業者を困惑させるかもしれません。ただし、プランクトンが非常に高密度になり、溶存酸素の問題が発生する場合や、水中の雑草を助長するほど密度が下がらない限り、その変化は魚の生産にそれほど影響しません。

定期的に (週に 1 回または 2 回) 透明度板の可視性を監視し、水の様子を観察することで、魚の養殖業者は、池のプランクトン群集の継続的な状態と魚の餌生物の供給に関する情報を得ることができます。

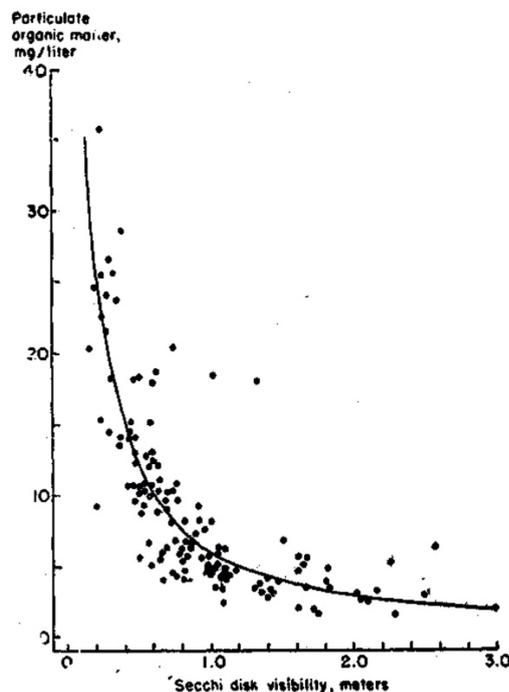


図 1.5 魚のいる池におけるプランクトンの存在量（粒子状有機物）と透明度板の可視性の関係

水がプランクトンを生成する能力は多くの要因に依存しますが、最も重要なのは、通常、植物プランクトンの成長のために必要な無機栄養素の存在です。植物プランクトンの成長に不可欠な要素には、炭素、酸素、水素、リン、窒素、硫黄、カリウム、ナトリウム、カルシウム、マグネシウム、鉄、マンガン、銅、亜鉛、ホウ素、コバルト、塩化物などが含まれます。リンは、ほとんどの場合、池の植物プランクトンの成長を調節する要素です。リン酸肥料を追加すると、ほとんどの池でプランクトンの生産量が増加し、魚の生産量が増加します。一部の池では、窒素、カリウム、炭素の供給が不十分なため、植物プランクトンも制限されています。汽水域と海水池では窒素が制限されている可能性があります。

池の基本的な肥沃度は流域の管理と土壌によって大きく異なりますが、ほとんどの池でのプランクトンの生産レベルは、良好な魚の生産に必要なプランクトン生産の範囲内で上げることができます。プランクトンの生産量を増やすために、肥沃度の低い池に無機肥料を追加することが考えられます。一部の池では、プランクトンの生産量を増やすために、石灰と肥料の両方の散布が必要になる場合があります。肥料もプランクトンの生産を増やします。

1.6 溶存酸素

溶存酸素はおそらく魚の養殖において最も重要な水質項目です。このため養魚家は池の溶存酸素濃度の変動に対しより注意しておく必要があります。大気は酸素の膨大な貯蔵庫ですが、大気中の酸素は水にわずしか溶けません。さまざまな温度および標準的な海面の大気圧力での淡水中の酸素の溶解度を表 1-2 に示します。この表から、温度が上昇するにつれて酸素の水への溶解度が減少することが分かります。今水が、現在の温度での水に対する酸素の溶解度と等しい溶存酸素濃度が含まれている場合、その水の溶存酸素は飽和していると言われます。

表 1.2 標準海面における純水中の溶存酸素の溶解度大気圧 (1 気圧)

°C	mg/litre	°C	mg/litre	°C	mg/litre
0	14.16	12	10.43	24	8.25
1	13.77	13	10.20	25	8.11
2	13.40	14	9.98	26	7.99
3	13.05	15	9.76	27	7.86
4	12.70	16	9.56	28	7.75
5	12.37	17	9.37	29	7.64
6	12.06	18	9.18	30	7.53
7	11.76	19	9.01	31	7.42
8	11.47	20	8.84	32	7.32
9	11.19	21	8.68	33	7.22
10	10.92	22	8.53	34	7.13
11	10.67	23	8.38	35	7.04

水に特定の温度で必要な量よりも多くの溶存酸素が含まれている場合、水は過飽和の状態です。水には、飽和値より溶存酸素が少ない場合もあります。溶存酸素の溶解度は、大気圧（気圧）の低下に伴って減少します。たとえば、25°C での水への酸素の溶解度は、標高によって次のように異なります。

各高度における 1 リットルあたりの溶存酸素濃度 (ミリグラム)

0m	8.4 mg/L
500m	7.9 mg/L
1,000m	7.4 mg/L
1,500m	7.0 mg/L
2,000m	6.6 mg/L
2,500m	6.2 mg/L
3,000m	5.8 mg/L

20~35°C の温度では、溶存酸素の溶解度は、塩分が 210 mg/L 増加するごとに約 0.008 mg/L 減少します。したがって、塩分は淡水において酸素濃度を調節する重要な要素ではありません。海水は塩分が高く、飽和時の溶存酸素濃度 (表 1.3) は淡水よりもかなり低くなっています。溶存酸素は水に拡散しますが、拡散速度は非常に遅いため、植物プランクトン

による光合成が、魚の養殖システムにおける溶存酸素の主要な供給源になっています。結果、魚の養殖業者は、溶存酸素が水から除去される速度に注意をすることになります。

表 1.3 標準海面気圧 (1 気圧) における海水中の溶存酸素の溶解度 (塩分約 36.75g/L)

°C	mg/litre	°C	mg/litre	°C	mg/litre
0	11.41	12	8.58	24	6.83
1	11.11	13	8.41	25	6.71
2	10.83	14	8.24	26	6.60
3	10.56	15	8.07	27	6.49
4	10.30	16	7.91	28	6.38
5	10.05	17	7.78	29	6.28
6	9.82	18	7.61	30	6.18
7	9.59	19	7.47	31	6.08
8	9.37	20	7.33	32	5.99
9	9.16	21	7.20	33	5.90
10	8.96	22	7.07	34	5.81
11	8.77	23	6.95	35	5.72

池の溶存酸素の主な損失は、プランクトンによる呼吸 (植物プランクトンを含む)、魚による呼吸、底生生物 (泥に生息または付着している生物) による呼吸、空気中への酸素の拡散が含まれます (7、10)。池内の溶存酸素の増減を表 1-4 にまとめます。

表 1.4 1.0 から 1.5 メートル平均深度の魚の生息する池における
 さまざまなプロセスによって引き起こされる溶存酸素の予想される増減の範囲

Process	Range mg/litre
Gains	
Photosynthesis by phytoplankton	.. 5 to 20
Diffusion	.. 1 to 5
Losses	
Plankton respiration	.. 5 to 15
Fish respiration	.. 2 to 6
Respiration by organisms in mud	.. 1 to 3
Diffusion	.. 1 to 5

いくつかの値は、毎日の増減の一般的な大きさを表しています。プランクトンと魚の呼吸が溶存酸素の主要な消費を引き起こし、光合成が最大の供給源であることは明らかです。池への酸素の拡散は、水が飽和以下の場合にのみ発生し、池からの酸素の拡散は、水が過飽和の場合にのみ発生します。池の水の溶存酸素濃度と飽和時の溶存酸素濃度との差が大きいほど、拡散速度が大きくなります。風と波の作用も拡散を促進します。魚の養殖システムでは、生物が使用するよりも多くの酸素がプランクトンによって水中に拡散するか、水中で生成される必要があります。そうでなければ溶存酸素が減少してしまいます。

プランクトンが増殖するのに必要な養分は、管理された養魚池では豊富にあるため、光が植物プランクトンによる光合成を調節する主要な要因になります。光は水を通過するにつれて、強度が急激に減少します。これは純水でも同じですが、浮遊生物や他の浮遊物質や溶解物質が光を反射して吸収するため、養魚池での減少はさらに速くなります。したがって、植物プランクトンによる酸素生成の速度は深さとともに減少し、特定の深さを下回ると、酸素は生成されなくなります。

酸素は池の生物相によって継続的に使用され、植物プランクトンによって日中のみ生成されるため、植物プランクトンによる溶存酸素の生成と拡散によって分布する深さは、池の生命による溶存酸素の複合利用にちょうど等しい深さがあります。池の生物層のこの深さより下では、水には溶存酸素が含まれません。池の溶存酸素の成層は通常、熱成層に密接に対応しています (3)。エピリムニオンには溶存酸素が含まれており、ハイプリミオンは溶存酸素が枯渇しています。熱成層化と同様に、溶存酸素の成層化は小さな浅い池で発生する可能性があります。

明らかに、過剰な溶存酸素を提供するのに十分な光合成を行うのに十分な光度の深さは、プランクトン密度に関連しています。光合成は光の強度の減少に伴って減少し、プランクトンがより豊富になるにつれて、プランクトン群集による酸素消費率が増加します。プランクトンの存在量が多い場合、溶存酸素の生成は表面近くで非常に高くなります。日陰のため、

酸素の生成速度は深さとともに急速に減少し、表面水の薄い層のみ、多くの場合 1m 未満にはかなりの溶存酸素が含まれます。プランクトンが少ない池では、溶存酸素の生成率は光が届く水の層内ではそれほど高くありませんが、プランクトンの濁度が高い池と異なり、より深いところでかなりの酸素生成と余剰の溶存酸素を発生します。池内の溶存酸素の深度分布に対するプランクトン濁度の影響については図 1.6 のようになります。一般的なルールとして、ほとんどの池には、透明度板の可視性の少なくとも 2 倍または 3 倍の深さまで魚をサポートするのに十分な溶存酸素が含まれています。

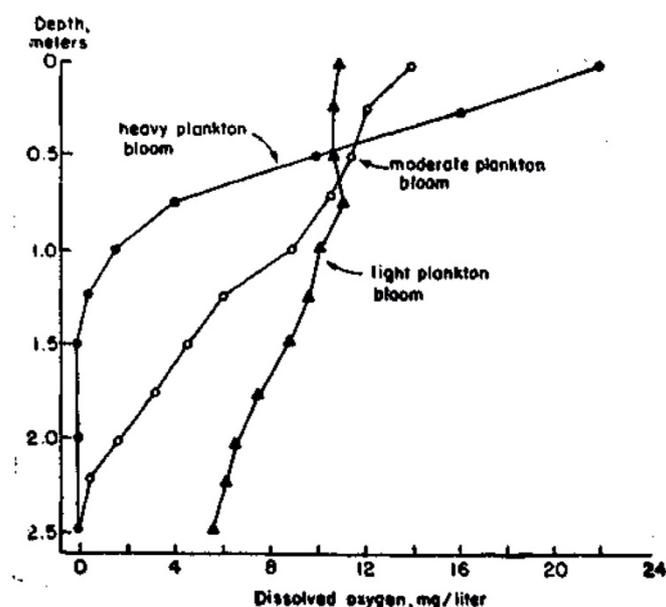


図 1.6 プランクトンの密度が異なる池の、異なる深さでの午後の溶存酸素濃度

また、池では 24 時間の間に溶存酸素濃度に顕著な変動があります。溶存酸素濃度は、日の出直後の早朝が最も低く、日中は午後遅くに最大になり、夜間は再び減少します。変動の大きさは、プランクトンの増加が多い池で最も大きく、プランクトンの量が少ない池で最も少なくなります。プランクトン密度の異なる池の溶存酸素濃度の日変化を図 1.7 に示します。

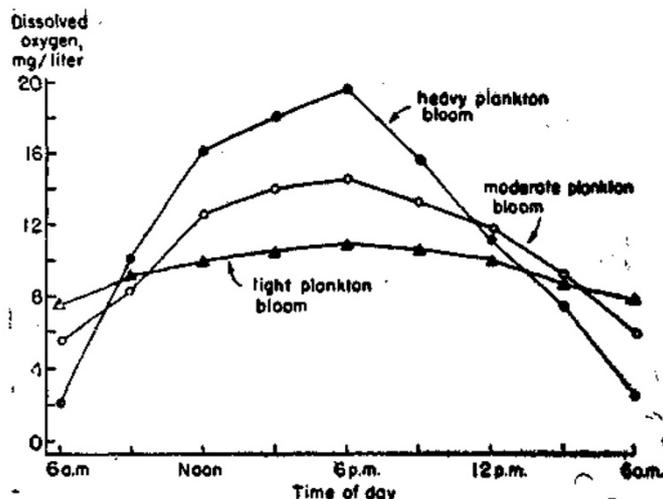


図 1.7 プランクトンの密度が異なる池の表面水の溶存酸素濃度の日変動

プランクトンが非常に密に増える池では、溶存酸素濃度は早朝に 2 mg/L 未満になることがよくあります。曇りの時期には、濃度は特に低くなります 16 * (5、12)。曇りの日の酸素の生成は、晴れた日や一部曇りの日よりも少ないため、溶存酸素濃度は通常の午後のレベルまで増加しません。その結果、翌朝の溶存酸素濃度は通常より低くなります。曇った天候が長期間続くと、プランクトンブルームが中程度に重いブルームのある池でも、溶存酸素濃度が危険なほど低くなる可能性があります。曇天の溶存酸素濃度への影響を図 1-8 に示します。

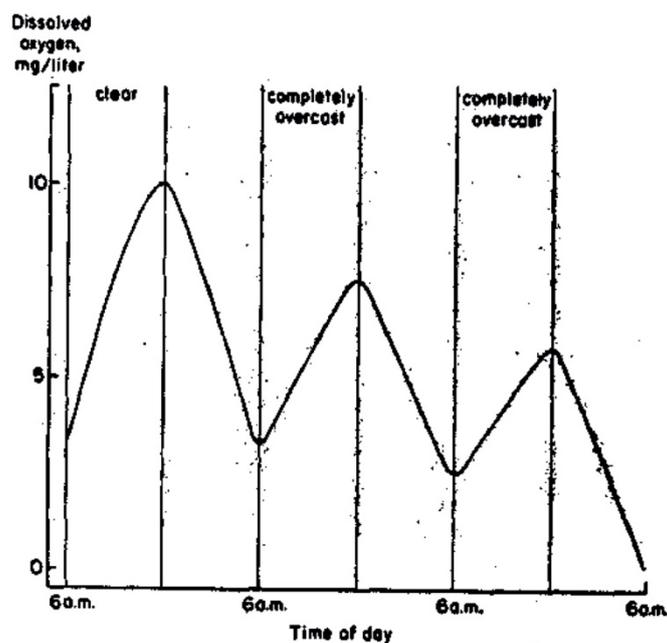


図 1.8 魚のいる池の溶存酸素濃度に対する曇天の影響

プランクトンブルームが多い池では、藻類のカスが地表に形成されます。時折、これらのスカム内の藻は突然死に、それらの分解は溶存酸素の枯渇をもたらします (2, 6, 12)。たとえば、図 1.9 は、魚のいる池での植物プランクトンの突然の死を示しています。

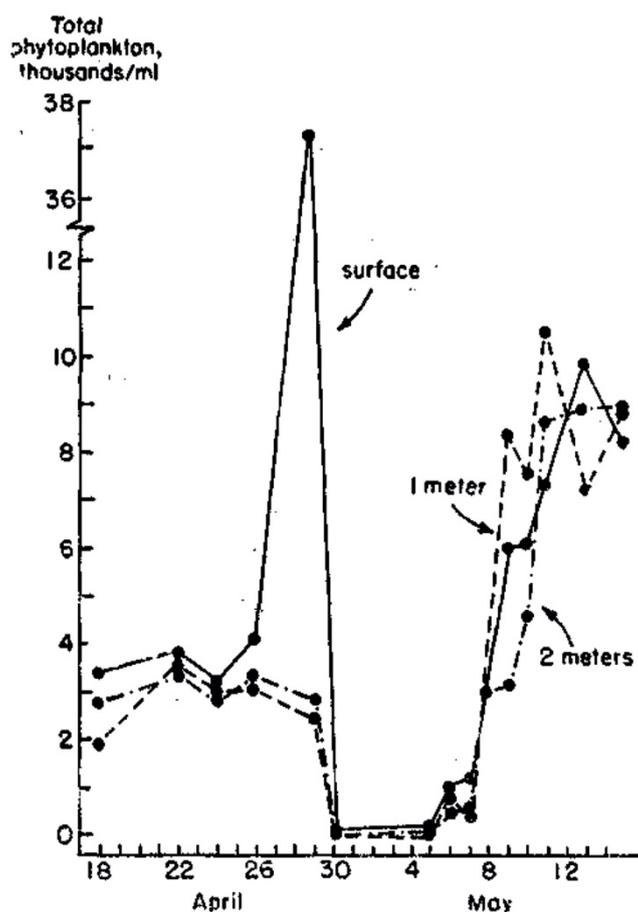


図 1.9 魚のいる池で植物プランクトンが死滅した後の植物プランクトンの減少
ダイオフは4月29日に始まりました

植物プランクトンの死の発生により溶存酸素濃度はすぐに検出可能なレベルを下回りました (図 1.10)。新しい植物プランクトン群集が樹立されるまで、溶存酸素濃度は正常レベルに戻りませんでした (図 1.9 および 1.10)。

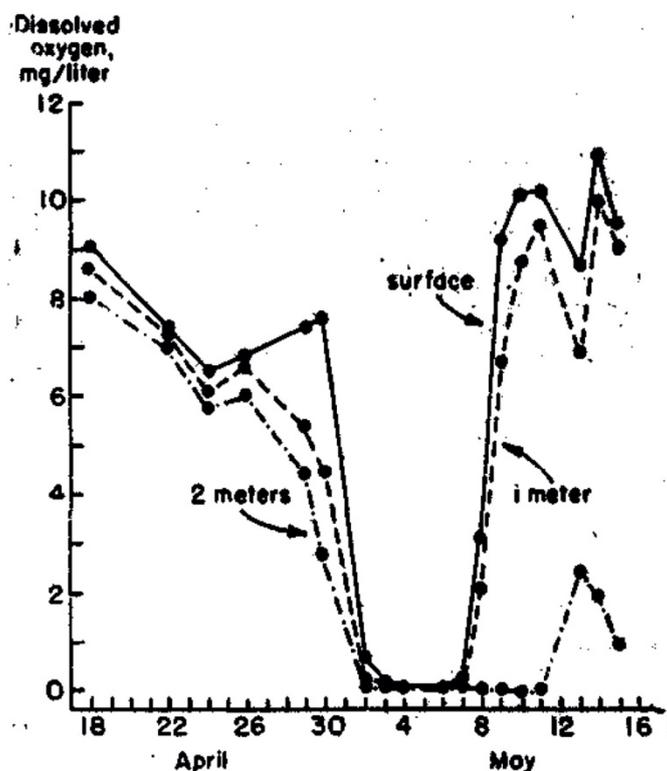


図 1.10 魚のいる池での植物プランクトンの死滅前後の溶存酸素濃度
植物プランクトンは4月29日に死に始めました

植物プランクトンの死滅は、通常、穏やかで晴れた暖かい気候の間に行われます。藻のスカムが劣化し、水が茶色または灰色の外観を示し、それによりプランクトンの死滅を知ることができます。風や激しい冷たい雨が池の熱成層を破壊し（12）、低層水と表層水の酸素を含む水が完全に混合（「逆転」）することがあります。このため池に無酸素水が大量に含まれていると、酸素が減少する可能性があります。

魚は生存と成長のために適切な濃度の溶存酸素を必要とします。魚の生存の最小濃度は、曝露時間によって異なります。魚は数時間、特に低濃度の溶存酸素による悪影響に耐えることができますが、この同じ濃度に数日間さらされると死亡します。池の魚が許容する溶存酸素の濃度を図 1.11 に示し、酸素要件に関する追加データを表 1.5 に示します。

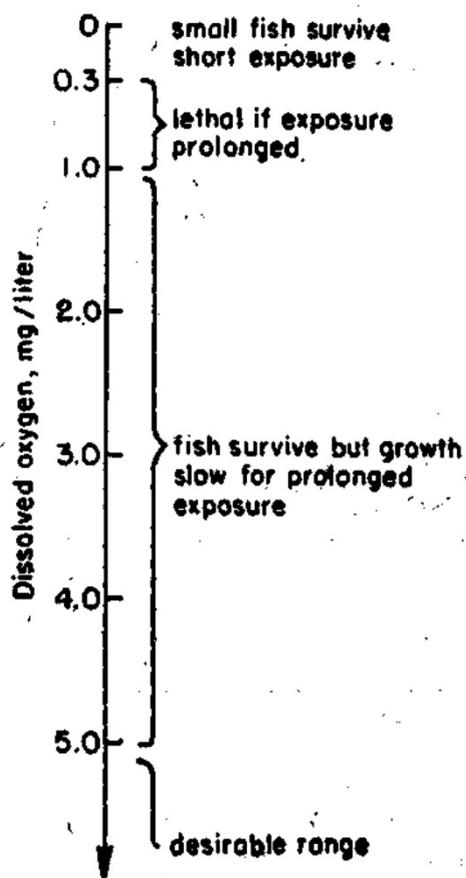


図 1.11 池の魚に対する溶存酸素濃度の影響

表 1.5 池の魚の溶存酸素の致死濃度の報告

Species	Lethal level (mg/litre)
<i>Carassius auratus</i> (goldfish)	.. 0.1 to 2.0
<i>Catla catla</i> (catla)	.. 0.7
<i>Cirrhina mrigala</i> (mrigal)	.. 0.7
<i>Ctenopharyngodon idella</i> (grass carp)	.. 0.2 to 0.6
<i>Cyprinus carpio</i> (common carp)	.. 0.2 to 0.8
<i>Hypophthalmichthys molitrix</i> (silver carp)	.. 0.3 to 1.1
<i>Labeo rohita</i> (rohu)	.. 0.7
<i>Ictalurus punctatus</i> (channel catfish)	.. 0.8 to 2.0
<i>Lepomis macrochirus</i> (bluegill)	.. 0.5 to 3.1
<i>Micropterus salmoides</i> (largemouth bass)	.. 0.9 to 3.1

溶存酸素濃度が低いと、死を引き起こさないレベルでも魚に悪影響を及ぼし、寄生虫や病気にかかりやすくなります (9)。さらに、溶存酸素濃度が継続的に 4 または 5 mg/L を下回ったままの場合、魚は摂食も成長もしません (5)。魚の池の溶存酸素の毎日の変動は、その日の最小溶存酸素濃度が早朝に 1 または 2 mg/L 未満に低下せず、数時間以内に飽和に近づく限り、給餌と成長にほとんど影響がないようです。

日の出の後。溶存酸素濃度が長期間3または4 mg/L未満のままである場合、魚は摂食または成長を停止します。

1.7 pH

pHは水素イオン濃度の尺度であり、その反応で水が酸性か塩基性かを示します。pHスケールの範囲は0~14で、pH7が中性点です。したがって、pH7の水は酸性でも塩基性でもありませんが、pHが7未満の水は酸性で、pHが7を超える水は塩基性です。pH7からの逸脱が大きいほど、水は酸性または塩基性になります。

天然水のpHは、酸性物質である二酸化炭素の濃度に大きく影響されます。植物プランクトンや他の水生植物は、光合成中に水から二酸化炭素を取り除きます。そのため、水域のpHは、日中は上昇し、夜間は低下します(図1.12)。

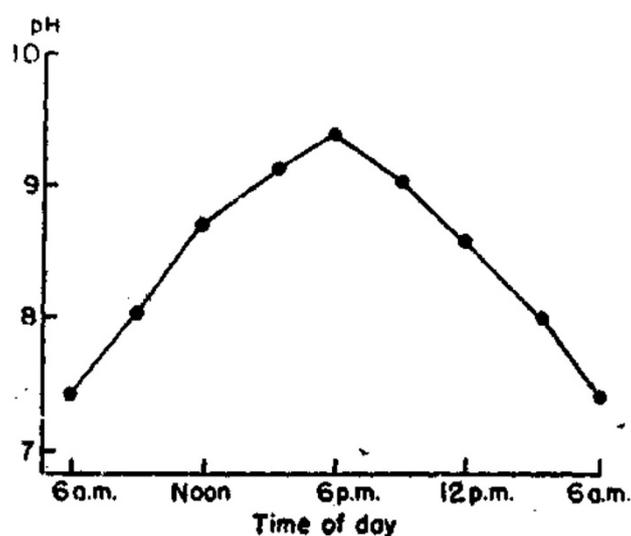


図 1.12 養殖池の pH の日変動

アルカリ度の低い水は、多くの場合、夜明け前の pH 値が6~7.5ですが、植物プランクトンの成長が激しい場合、午後の pH 値は10以上に上昇する可能性があります(11)。pHの変動は、総アルカリ度が高い水中ではそれほど大きくありません。通常、pH値は、夜明けに7.5または8、午後に9または10の範囲です。

全アルカリ度が非常に高い一部の水、特に全アルカリ度が高く、全硬度が低い水では、急速な光合成中に pH 値が11を超えることがあります(11)。

このことから池の典型的な pH パターンを評価するために、早朝と午後に pH 測定を行う必要があります。

夜明け時の pH 値が6.5以上で9までの範囲の水は、魚の生産に最適と考えられています。酸性の土壌や沼からの排水を受けるいくつかの池は、魚の生産には酸性すぎる可能性

があります。総アルカリ度が非常に高い水は、魚の養殖には高すぎる pH 値を持つ場合があります。池の水の pH を増減する方法については、後の章で説明します。

池の魚の酸性およびアルカリ性の死点は、それぞれ約 pH4 および pH11 です (11)。魚は生き残るかもしれませんが、早朝の pH 値が 4 から 6 の間、および 9 から 10 の間の池では、生産は貧弱になります (図 1.13)。多くの魚の養殖システムの午後の pH は、魚に悪影響を与えずに短期間で 9 または 10 に上昇します。

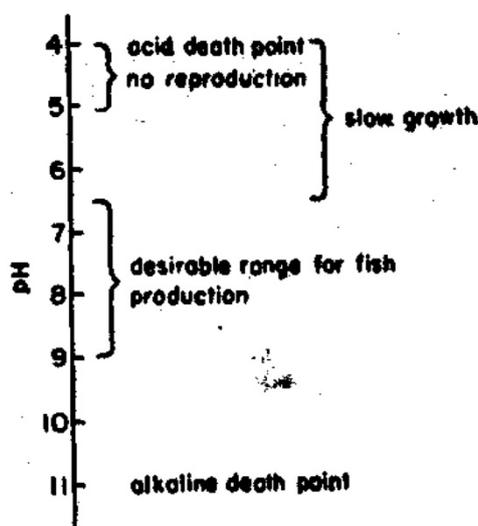


図 1.13 池の魚に対する pH の影響

1.8 二酸化炭素

魚は 5 mg/L ほどの低レベルを避けますが、高濃度の二酸化炭素は許容できます。濃度が高い場合、ほとんどの種は 60 mg/L までの二酸化炭素を含む水中で生存します (8)。また溶存酸素状態が低い場合、かなりの二酸化炭素の存在が魚による酸素の取り込みを妨げます。残念ながら、溶存酸素濃度が低い場合、二酸化炭素濃度は通常非常に高くなります。これは、二酸化炭素が呼吸で放出され、光合成で利用されるためです。溶存酸素が少ないと、光合成が急速に進まないため、呼吸によって放出された二酸化炭素は、光合成する植物プランクトンに吸収されず、池の二酸化炭素濃度が上昇します。二酸化炭素と呼吸および光合成の関係により、二酸化炭素濃度は通常、夜間に増加し、日中に減少します。特に高濃度の二酸化炭素は、植物プランクトンの消滅後や温度成層の破壊後、および曇天時に池で発生します。

pH に対する光合成の影響は、次の方程式による二酸化炭素の取り込みによって引き起こされます。



植物が光合成に使用するために二酸化炭素を取り除くと、炭酸塩が水中に蓄積します。炭酸塩は次のように加水分解します。



右の水酸化物の蓄積により pH が上昇します。夜になると、植物は二酸化炭素の除去をやめ、呼吸プロセスから発生する二酸化炭素が水中に蓄積します。二酸化炭素、炭酸塩、水が反応して重炭酸塩を形成するため、これにより pH が低下します。つまり、上記の反応は、日中は右側に進みますが、夜間は左側に戻ります。

1.9 アンモニア

アンモニアは魚の代謝と細菌による有機物の分解の産物として池の水に到達します。水中では、アンモニア性窒素は、pH と温度依存の平衡状態で、非イオン化アンモニアとアンモニウムイオンの2つの形態で発生します。



pH が上昇すると、非イオン化アンモニア (NH) がアンモニウムイオンに比べて増加します。温度も非イオン化アンモニアの比率を増加させますが、温度の上昇の影響は、pH の上昇の影響よりも小さくなります。さまざまな温度および pH 値での非イオン化アンモニアの割合を表 1.6 に示します。

表 1.6 異なる pH 値と温度の水溶液中の非イオン化アンモニアのパーセンテージ

pH	Temperature (°C)								
	16	18	20	22	24	26	28	30	32
7.0	0.30	0.34	0.40	0.46	0.52	0.60	0.70	0.81	0.95
7.2	0.47	0.54	0.63	0.72	0.82	0.95	1.10	1.27	1.50
7.4	0.74	0.86	0.99	1.14	1.30	1.50	1.73	2.00	2.36
7.6	1.17	1.35	1.56	1.79	2.05	2.35	2.72	3.13	3.69
7.8	1.84	2.12	2.45	2.80	3.21	3.68	4.24	4.88	5.72
8.0	2.88	3.32	3.83	4.37	4.99	5.71	6.55	7.52	8.77
8.2	4.49	5.16	5.94	6.76	7.68	8.75	10.00	11.41	13.22
8.4	6.93	7.94	9.09	10.30	11.65	13.20	14.98	16.96	19.46
8.6	10.56	12.03	13.68	15.40	17.28	19.42	21.83	24.45	27.68
8.8	15.76	17.82	20.08	22.38	24.88	27.64	30.68	33.90	37.76
9.0	22.87	25.57	28.47	31.37	34.42	37.71	41.23	44.84	49.02
9.2	31.97	35.25	38.69	42.01	45.41	48.96	52.65	56.30	60.38
9.4	42.68	46.32	50.00	53.45	56.86	60.33	63.79	67.12	70.72
9.6	54.14	57.77	61.31	64.54	67.63	70.67	73.63	76.39	79.29
9.8	65.17	68.43	71.53	74.25	76.81	79.25	81.57	83.68	85.85
10.0	74.78	77.46	79.92	82.05	84.00	85.82	87.52	89.05	90.58
10.2	82.45	84.48	86.32	87.87	89.27	90.56	91.75	92.80	93.84

アンモニアの分析手順では、非イオン化アンモニアとアンモニウムイオン（全アンモニア窒素）の両方を測定します。適切な温度と pH に対する非イオン化アンモニアのパーセンテージに総アンモニア窒素濃度を掛けて、非イオン化アンモニアの濃度を推定できます。

たとえば、pH が 9.0、温度が 28°C、アンモニア-窒素の合計が 1.0 mg / L であるとします。非イオン化アンモニアの割合は、pH 9 および 28°C で 41.2% です。非イオン化アンモニア濃度は $1 \times 0.412 = 0.41$ mg/L です。アンモニアに変換するには、17/14 の比率（窒素の原子量に対するアンモニアの分子量）で倍数にします。

水中のアンモニア濃度が増加すると、魚によるアンモニアの排泄が減少し、血液や他の組織のアンモニアのレベルが増加します。その結果、水による魚の浸透圧が影響を受け、内部イオン濃度が増加、血液の pH が上昇し、酵素触媒反応と魚の表面を覆う膜の安定性に悪影響を及ぼします。アンモニアは組織による酸素消費を増加させ、鰓を損傷し、血液が酸素を輸送する能力を低下させます。組織学的変化は、致死量以下の濃度のアンモニアに曝された魚の鰓、腎臓、脾臓、甲状腺、および血液で発生します。亜致死濃度のアンモニアにさらされた魚でも、罹病性が高まります。

アンモニアに対する魚の耐性は、種、生理学的条件、環境条件によって異なります。短期暴露（24～72 時間）の致死濃度は、0.4～2 mg/L です（5）。致死量未満の影響（組織学的変化）は、0.01 mg/L という低いアンモニア濃度に起因するとされています。アメリカナマズの例では、0.06 mg/L という低いアンモニア濃度では成長をわずかに減少させました。0.52 mg/L は、この種の成長を 50% 減少させ、0.97 mg/L では成長をしないという結果でした。

pH の変動は毎日のため、池のアンモニア濃度を評価することは困難です。イオン化されていないアンモニアは、午後になると非常に高く、夜間は無視できる水準が考えられます。

1.10 亜硝酸塩

亜硝酸塩が魚に吸収されると、ヘモグロビンと反応してメトヘモグロビンを形成します。メトヘモグロビンは有効な酸素運搬体ではないため、亜硝酸塩の継続的な吸収は低酸素症およびチアノーゼを引き起こす可能性があります。

メトヘモグロビンを含む血液は褐色であるため、魚の亜硝酸塩中毒はしばしば褐色血液病と呼ばれます。養魚池の亜硝酸塩の発生源は明確に特定されていませんが、最も可能性の高い発生源は、嫌気性泥中での硝酸塩の亜硝酸塩への還元です。発生源に関係なく、池には 0.5～10 mg/L の亜硝酸塩濃度が含まれることがあります。

亜硝酸塩の毒性は水質に関係しているため、亜硝酸塩の致死しきい値を設定することは困難です。塩化物とカルシウムイオンに関しては、亜硝酸塩の魚への毒性を減らします。

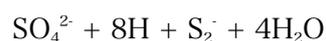
塩化物の亜硝酸塩に対するモル比が 3 未満に下がらない限り、アメリカナマズは亜硝酸

塩によって害を受けません。したがって、亜硝酸塩濃度が高い場合、塩化ナトリウムの散布をして、褐色血液疾患を予防することができます。塩化カルシウムは、マスおよびサケの亜硝酸塩毒性を軽減する場合において塩化ナトリウムより効果的です。したがって、亜硝酸塩の毒性レベルは、塩化物濃度、おそらくカルシウム濃度によって異なってきます。

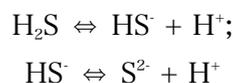
もちろん、特定の水中の特定のレベルの亜硝酸塩は、魚のメトヘモグロビンの特定の割合での発生につながります。ただし、魚に害を及ぼすに必要なメトヘモグロビンの割合は、溶存酸素濃度によって異なります。亜硝酸塩の毒性は pH の低下とともに増加するという証拠もあります。水中の 1 mg/L を超える亜硝酸塩濃度は、塩化物濃度が 1 リットルあたり数ミリグラムでない限り、通常は望ましくないと見なされます。

1.11 硫化水素

嫌気性条件下では、特定の従属栄養細菌は、以下に示すように、代謝および排泄硫化物の末端電子受容体として硫酸塩および他の酸化硫黄化合物を使用します。



排泄される硫化物は、水素、硫化物のイオン化生成物であり、次の平衡に関与します。



pH は、その形態間の総還元型亜硫酸塩の分布を調節します。イオン化されていない硫化水素は魚に有毒ですが、その解離から生じるイオンはそれほど有毒ではありません。分析手順では、総硫化物を測定します。以下の値は、イオン化されていない硫化水素とさまざまな pH 値の割合を示しています。

pH	Hydrogen sulphide (%)
5.0	99.0
5.5	97.0
6.0	91.1
6.5	76.4
7.0	50.6
7.5	24.4
8.0	9.3
8.5	3.1
9.0	1.0

001~0.05 mg/L の硫化水素濃度は魚にとって致命的であり、水中において硫化水素の検出が可能な濃度は望ましくないと考えられています。石灰化によって水の pH を上げることができれば、硫化水素の毒性は減少します。

1.12 全アルカリ度と全硬度

総アルカリ度という用語は、相当する炭酸カルシウムのリットルあたりのミリグラムとして表される水中の塩基の総濃度を指します。

天然水では、これらの塩基は主に炭酸イオンと重炭酸イオンです。アルカリ性を考えるもう1つの方法は、塩基性と pH 変化に対する耐性の点です。所定の体積の水で pH の特定の変化を引き起こすために必要な酸の量は、水の総アルカリ度レベルの関数として増加します。早朝の pH は、総アルカリ度が低い水よりも中程度または高い総アルカリ度の水で高くなります。

植物プランクトンの成長のための二酸化炭素の利用可能性は、アルカリ度に関連しています。総アルカリ度が 15 または 20 mg/L 未満の水には、通常、利用できる二酸化炭素は比較的少ないです。

総アルカリ度が 200~150 mg/L の水には、適切な量の二酸化炭素が含まれており、養殖用のプランクトンを生産できます。総アルカリ度が 1 リットルあたり 200~250 mg を超える水では、二酸化炭素の供給量が少ないことがよくあります。

総アルカリ度の低い水中の午後の pH は、中程度または高い総アルカリ度の水中と同じくらい高い場合があります。アルカリ度の低い水は pH の変化に対して十分に緩衝されておらず、二酸化炭素の除去により pH が急速に上昇します。

同等の炭酸カルシウム 1 リットルあたりのミリグラムで表される二価の金属イオン（主にカルシウムとマグネシウム）の総濃度は、水の総硬度と呼ばれます。水中のカルシウム、マグネシウム、重炭酸塩、および炭酸イオンは地質堆積物中の石灰岩の溶液から同等の量で得られるため、通常、総アルカリ度と総硬度の値は同じです。ただし、一部の海では、総アルカリ度が総硬度を超える場合があります、その逆の場合もあります。全アルカリ度が高く、全硬度が低い場合、急速な光合成の期間中に pH が非常に高いレベルに上昇する可能性があります。魚の養殖に望ましい全硬度と全アルカリ度のレベルは、一般に 20~300 mg/L の範囲内です。

全アルカリ度と全硬度が低すぎる場合は、石灰処理によりそれらを上げることができません。しかしながら、一般に、それらが望ましいレベルを超えている場合、全アルカリ度および全硬度を低下させる実際的な方法はありません。

原則として、魚の養殖に最も生産的な水は、ほぼ同じ大きさの全硬度と全アルカリ度の値を持っています。たとえば、全アルカリ度が 150 mg/L で全硬度が 25 mg/L の水は、全アルカリ度が 150 mg/L で全硬度が 135 mg/L の水ほど魚の養殖に適していません。

1.13 水生植物

魚のいる池で育つ大きな水生植物(水生大型植物)は通常望ましくありません。それらは、曳網、給餌、魚の収穫などの魚管理活動を妨害し、栄養素を求めて植物プランクトンと競争し、捕食魚が捕食魚から逃げるための避難所を提供し、それにより不均衡な魚の個体数を促進し、蚊の生産を促進し、蒸発散による水分損失に寄与します。

水生大型植物には、糸状藻類および水中、浮遊葉、浮遊および新興の大型植物が含まれます。池の底で成長する水生大型植物は、比較的透明な水に限られています。したがって、プランクトンの濁度を優先する管理手順では、大型植物を排除することがよくあります(13)。明らかに、浮遊または浮遊葉の大型植物は他の方法で制御する必要があります。

参考文献

- ALMAZAN, G. AND C. E. BOYD 1978. An evaluation of Secchi disk visibility for estimating plankton density in fish ponds. *Hydrobiologia*, 65 :601-608,
- BARICA, J. 1975. Summerkill risk in prairie ponds and possibilities of its prediction, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1975, 32(8): 1283-1288
- BIASLEY, P. G. 1963. The penetration of light and die concentration of dissolved oxygen in fertilized pond waters infested with *Microcystis*. *Proc. Ann. Conf. Southeastern Assoc. Game and Fish. Comm.*, 17 :222-226.
- BOYD, C. E. 1976. Water chemistry and plankton in unfertilized ponds in pastures and in woods. *Trans. Amer. Fish. Soc.*, 105 :634-636.
- 1982. *Water quality management for pond fish culture*. Elsevier Sci. Publ. Co. Amsterdam. 318 pp.
- E. E. PRATHER AND R. W. PARKS 1975. Sulden mortality of a massive phytoplankton bloom. *Weed Set.*, 23 :61-67.
- R. P. ROMAIRE ANDE. JOHNSTON 1978. Predicting early morning dissolved oxygen concentrations in channel catfish ponds. *Trans. Amer. Fish. Soc.*, 107:484-492.
- HART, J. S. 1944. The circulation and respiratory tolerance of some Florida freshwater fishes. *Proc. Fla. Acad. Sci.*, 7:221-246.
- PLUMB, J. A., J. M. GRIZZLE AND J. DEFIOUEIREDO 1978. Necrosis and bacterial infection in channel catfish (*Ictalurus punctatus*) following hypoxia / *Wild life Diseases*, U: 247-253.
- SCHROEDER, G . L . 1975. Nighttime material balance for oxygen in fish ponds receiving organic wastes. *Bamidgeh*, 27:65-74.
- SWINGLE, H. S. 1961. Relationship of pH of pond waters to their suitability for pond fish culture. *Proc. Pacific Sci. Congress* 9 (1957), 10 (Fisheries): 72-75.

海水飽和酸素濃度と温度

温度 (°C)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	11.41	11.38	11.35	11.32	11.29	11.26	11.23	11.20	11.17	11.14
1	11.11	11.08	11.05	11.03	11.00	10.97	10.94	10.91	10.89	10.86
2	10.83	10.80	10.78	10.75	10.72	10.70	10.67	10.64	10.61	10.59
3	10.56	10.53	10.51	10.48	10.46	10.43	10.40	10.38	10.35	10.33
4	10.30	10.28	10.25	10.23	10.20	10.18	10.15	10.13	10.10	10.08
5	10.05	10.03	10.00	9.98	9.96	9.94	9.91	9.89	9.87	9.84
6	9.82	9.80	9.77	9.75	9.73	9.71	9.68	9.66	9.64	9.61
7	9.59	9.57	9.55	9.52	9.50	9.48	9.46	9.44	9.41	9.39
8	9.37	9.35	9.33	9.31	9.29	9.27	9.24	9.22	9.20	9.18
9	9.16	9.14	9.12	9.10	9.08	9.06	9.04	9.02	9.00	8.98
10	8.96	8.94	8.92	8.90	8.88	8.87	8.85	8.83	8.81	8.79
11	8.77	8.75	8.73	8.71	8.69	8.68	8.66	8.64	8.62	8.60
12	8.58	8.56	8.55	8.53	8.51	8.50	8.48	8.46	8.44	8.43
13	8.41	8.39	8.38	8.36	8.34	8.33	8.31	8.29	8.27	8.26
14	8.24	8.22	8.21	8.19	8.17	8.16	8.14	8.12	8.10	8.09
15	8.07	8.05	8.04	8.02	8.01	7.99	7.97	7.96	7.94	7.93
16	7.91	7.90	7.88	7.87	7.86	7.85	7.83	7.82	7.81	7.79
17	7.78	7.76	7.75	7.73	7.71	7.70	7.68	7.66	7.64	7.63
18	7.61	7.60	7.58	7.57	7.55	7.54	7.53	7.51	7.50	7.48
19	7.47	7.46	7.44	7.43	7.41	7.40	7.39	7.37	7.36	7.34
20	7.33	7.32	7.30	7.29	7.28	7.27	7.25	7.24	7.23	7.21
21	7.20	7.19	7.17	7.16	7.15	7.14	7.12	7.11	7.10	7.08
22	7.07	7.06	7.05	7.03	7.02	7.01	7.00	6.99	6.97	6.96
23	6.95	6.94	6.93	6.91	6.90	6.89	6.88	6.87	6.85	6.84
24	6.83	6.82	6.81	6.79	6.78	6.77	6.76	6.75	6.73	6.72
25	6.71	6.70	6.69	6.68	6.67	6.66	6.64	6.63	6.62	6.61
26	6.60	6.59	6.58	6.57	6.56	6.55	6.53	6.52	6.51	6.50
27	6.49	6.48	6.47	6.46	6.45	6.44	6.42	6.41	6.40	6.39
28	6.38	6.37	6.36	6.35	6.34	6.33	6.32	6.31	6.30	6.29
29	6.28	6.27	6.26	6.25	6.24	6.23	6.22	6.21	6.20	6.19
30	6.18	6.17	6.16	6.15	6.14	6.13	6.12	6.11	6.10	6.09
31	6.08	6.07	6.06	6.05	6.04	6.04	6.03	6.02	6.01	6.00
32	5.99	5.98	5.97	5.96	5.95	5.95	5.94	5.93	5.92	5.91
33	5.90	5.89	5.88	5.87	5.86	5.86	5.85	5.84	5.83	5.82
34	5.81	5.80	5.79	5.78	5.77	5.77	5.76	5.75	5.74	5.73
35	5.72									

0.1°C単位の飽和酸素濃度は1°C単位の値の線形補間で求めています。