

アオコ形成藍藻類の群体破壊に関する長さスケール

水資源機構 総合技術センター ○古里栄一
株式会社 テクノクリエイト 丸尾雅文

1.はじめに

アオコを形成する藍藻類の優占戦略の一つとして、大型の群体を形成することで、ストークス則に依りてガス泡による浮上速度を大きくすることに加えて、大型サイズにより動物プランクトンの捕食圧を低下させることがある。藍藻類は原核生物であるため単一細胞は直径が数 μm と小さい一方で、大型群体を形成する能力は生存において極めて有効である。近年は、こうしたアオコ形成にかかる生態学的な戦略を効率良く無効化することを図るシアノバスターシステムが開発され(古里ら 2010)、複数の水域での適用結果から効果も報告されている。一方で、その効果原理については全ては定量的に明らかになっていないことから、実施設計・管理の効率化のためには課題が残る。これまでの施設開発における経験則として、ポンプで加圧したチャンバー内(図-1)において微小なオリフィスから高速流で処理水が噴出する際のせんだん力によって約1mm弱のアオコ群体構造が破壊されると想定されているが、その定量的な説明はできていなかった。経験的には、オリフィス通過流速として約25m/s、オリフィス直径1cm以下においてアオコ群体が破壊されることがわかっている。本発表ではこのオリフィス条件について、アオコ群体破壊を念頭においた長さスケールを新たに提案し、効果の得られる施設条件について検討することを試みる。

2.シアノバスターの概要

シアノバスターは、水深数cmの水面浮遊と吹送流による風下集結というアオコの特性を活用して効率よくアオコを回収するシアノゲートと、アオコ形成藍藻類の生態学的競合戦略である、ガス泡を破壊して浮力を消失させるとともに、大型群体構造を破壊して直径数 μm の単細胞状態にさせるバスターマシンとからなる。気泡循環では対策効果の期待できない浅い水域における対策として開発された。本発表では、バスターマシンの機能のうち、細胞周囲の多糖質で形成される大型群体構造の破壊機能を対象とする。

3.群体破壊効果に関する長さスケール

一般的に水中での最小渦サイズはコルモゴロフ長さ($L_K=(\nu^3/\epsilon)^{1/4}$ 、 ν :動粘性係数(約 $1\cdot 10^{-6}\text{m}^2\text{s}^{-1}$ (25°C)), ϵ :粘性散逸率、 $10^{-10}\sim 10^{-4}\text{m}^2\text{s}^{-3}$)で評価される。 ϵ が大きい沿岸水域でも L_K は約1mmである。このことは、自然環境の水中はほぼ乱流状態であるにも関わらず、プランクトンはサイズが小さいために相対的に高い粘性の環境で様々な生物活動が可能であることの根拠とされる(Purcell 1977)。アオコ形成藍藻類は大きな群体を形成するために、その生活形のサイズは植

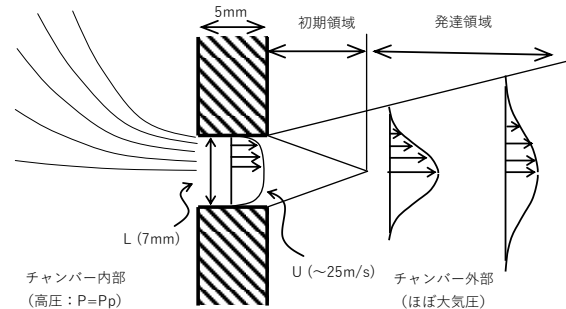


図-1 シアノバスターの処理部（バスターマシン(BM)）のオリフィス近傍での流れ

物プランクトン中では最大の空間スケールを有するが、それでも一般的に1mm以下であるために L_K より小さい。これは、アオコ群体のサイズが1mm以上にならない物理的な理由である可能性がある。

本研究では、バスターマシンのチャンバーにおける微小オリフィスの入口および出口で生じる微小スケールのせんだん力によるアオコ群体構造破壊効果に関する長さスケール(L_{BM})として以下を提案する。

$$L_{BM} = \left(\frac{\nu}{U/L} \right)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $L(\text{m})$:チャンバー内のオリフィス直径(代表長さ)、 $U(\text{m/s})$:オリフィスにおける代表流速である。本式は、送水ポンプの高圧によって強制的に狭いオリフィスを通過させる際の、せんだん力に対する粘性力の影響を長さスケールとして表すものである。本研究では L_{BM} はオリフィス前後の最小渦サイズに相当するのではないかと考えている。

実用に供されている施設における L_{BM} は、図-1に示した数値より約 $17\mu\text{m}$ となる。これはアオコの群体サイズよりも十分小さい長さである。上述の通り L_{BM} が渦サイズであるならば、通常自然水中では破壊されていないアオコ群体構造が、本施設の強いせんだん力で生じた小さい渦により破壊されている可能性がある。

4. L_{BM} と施設特性の関係

シアノバスターの現地における適用を考える上で、使用ポンプあたりの処理量は重要なファクターである。したがって、もし現在経験的に標準サイズとしているオリフィス直径よりも大きなオリフィスで群体破壊効果が得られるならば、同一ポンプでの処理量が増えることになり、経済性が高まる。しかも、小さいオリフィスサイズは浮遊ごみによる目詰まりのリスクが増大することからも、可能な限りオリフィス径の増大が好ましい可能性もある。このことから、使用ポンプの適用で用いられている経験式(式(2))を用いて、送水ポンプ圧力と L_{BM} との関係を解析する。なお式(2)は一つのオリフィスに関

するものであり、バスターマシン全体では複数オリフィスが設けられているために、それらの合計がシステムとして総流量となる。

$$Q = U\pi L^2 = C\pi L^2 P^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 Q :オリフィス通過流量(処理流量)(m^3/s)、 C :施設固有係数($84.8 \times 10^{-4} ((m^3/kg)^{1/2})$)、 L :オリフィス直径(m)、 U :オリフィス内平均流速(m/s)、 P :ポンプ圧力(Pa)である。

式(2)は、ポンプからチャンバーオリフィス内までの流量と圧力の関係を経験的に単純化したものであり、形式的にベルヌーイ式に概ね合致している。また、係数の C の値は、オリフィス部における入口・摩擦および出口損失の一般的な値にほぼ一致する。式より自明であるが、オリフィス内流速(U)は P のみで定まる。なお式(2)は広い範囲の圧力および流速条件での流量計測結果で成立することが確認されている。式(1)、(2)から流速 U を消去すると L_{BM} とポンプ諸量との関係は以下となる。

$$L_{BM} = \left(\frac{\nu L}{4C} \right)^{1/2} P^{-1/4} \quad (3)$$

式3から明らかとなっており、 L_{BM} はオリフィス直径(L)の増加で大きくなる一方、ポンプ圧力(P)増加で小さくなる傾向がある。図-2に、これらの関係を図示する。図では実施設を念頭におき、オリフィス直径の異なる場合を示した。式(3)から自明であるが L の増加に応じて L_{BM} は大きくなる。また、同一の L であってもポンプ圧力の増加により、 U が速くなるために L_{BM} は小さくなる。なお、実施設条件(図中緑線で示した)においては L_{BM} は上述のとおり約 $17 \mu m$ となる。なお経験的には $0.5MPa$ 条件においてオリフィス直径 $10mm$ までは群体破壊効果が確認されている。この場合の L_{BM} は約 $20 \mu m$ であり、アオコ群体の長さスケールに対して十分小さいことは、こうした経験則の根拠である可能性がある。

図-2では、アオコ対策の観点から、ガス胞破壊可能圧力と群体破壊可能な L_{BM} 条件も示した。圧力は細胞内膨圧を考慮すればゲージ圧として約 $0.3MPa$ 以上であればガス胞破壊と沈降可能であることが経験的にわかっている。一方で、群体破壊については経験に基づく仮定であるが L_{BM} として約 $35 \mu m$ を示した。現時点では実験データが存在しないために根拠は薄いですが、経験的に得られている L_{BM} の倍程度ならば、群体破壊に関する同程度の効果が得られる可能性があると考えたことに基づく。こうした場合は施設条件としては低圧かつ短 L_{BM} の限界条件として圧力 $0.3MPa$ においてオリフィス径は約 $20mm$ となる。経済設計の観点からは低圧とオリフィスの大型化は好ましいことから、今後はシアノバスターの更なる改良や社会実装においてこれらも考慮する必要がある。

5. 課題

本要旨では群体破壊効果を考察したが、長さスケールのみを検討したために、力学的にチャンバーが何故アオコ形成藍藻類の群体を破壊できるのかについては不明である。この群体は細胞外の多糖質粘性

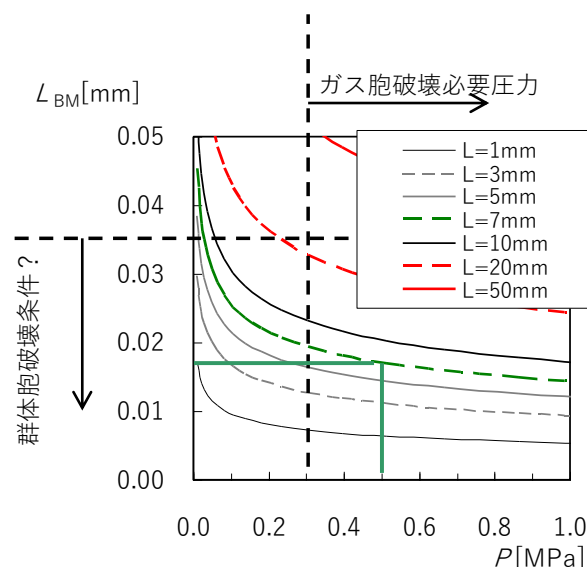


図-2 圧力と L_{BM} との関係 (図中緑実線は、実施設の条件を示す)

物質で形成されている(Drews and Weckesser:1981). 理論的に推定される $10 \mu m$ スケールの渦の力学的な強度と多糖類の粘性との関係を明らかにする必要がある。なお著者らによる先行研究では、棒状の一次群体構造を有するAphanizomenon属に対しては、阿木川ダムでのシアノバスターの適用において棒状構造は破壊できなかった(福井・秋竹 2005)。今後はシアノバスターシステムにおけるバスターマシンに関しては、こうした観点からの研究も必要である。さらに今回は長さスケールを用いたが、式(1)の分母である U/L そのものも時間の逆数の次元を有する数値であり、チャンバーによる何らかの効果を表している可能性もある。今後はこれらについても検討を進める予定である。

謝辞：本原稿作成にあたり、鹿児島大学の伊藤祐二准教授に貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を示す。

【参考文献】

- 1) 古里栄一・藤野毅・浅枝隆・有田正光, 物理的処理によるアオコ対策の効果に関する基礎的実験, 水工学論文集, 54, pp.1483-1488, 2010.
- 2) E. M. Purcell, Life at low Reynolds number, American Journal of Physics, 45 pp. 3-11, 1977.
- 3) G. Drews and J. Weckesser, Function, structure and composition of cell wall and external layers. The Biology of Cyanobacteria, N. G. Carr and B. A. Whitton, eds., Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp 333-357. 1981.
- 4) 福井正泰・秋竹孝雄, 阿木川ダムにおけるアオコ発生初期の対策とその効果に関する検討, ダム技術, 224号, 62-68, 2005.