農業気象 (*J. Agr. Met.*) 48 (4): 359–363, 1993

アオコの発生が水体の熱収支におよぼす影響

中山敬一*・浦野永久**・今 久*・松岡延浩*

(*千葉大学園芸学部
**茨城県園芸試験場)

The Effects of the Generation of Water Blooms on the Heat Balance in Water Body

Keiichi NAKAYAMA*, Towa URANO**, Hisashi KON* and Nobuhiro MATSUOKA*

(*Faculty of Horticulture, Chiba University, Matsudo, Chiba 271, Japan)
(**Horticultural Experiment Station of Ibaraki Prefecture)

To clarify the effects of water blooms on the heat balance in a water body, some heat balance components were observed in a small water pond (length and breadth of 160 cm; depth of 45 cm) made of polystyrene board of 15 cm thick.

Floatage of stratified water blooms increased the albedo on the water surface but decreased the net radiation in daytime. The water temperature near the surface was increased in daytime, and decreased in nighttime as a result of the floatage of water blooms. The amount of heat storage in the water body was reduced by the stratified water blooms, because of suppressing effect for transmission of solar radiation into the water body. The amount of latent heat flux was increased in daytime by the stratified water blooms but decreased in nighttime depending on the lower water surface temperature and the reduced heat storage in the water body.

Key words: Water blooms, Heat balance, Water temperature.

キーワード: アオコ, 熱収支, 水温

1. ま え が き

アオコは水温の高い時期に発生する藍藻類で、水質汚染の代表的なメルクマークの1つになっている。特に、最近では流域の都市化によって窒素やリンを含む生活排水の湖沼への流入が増加し、夏期にアオコの発生に悩まされている市町村が多くなっている。

また、アオコは細胞にガス胞を有しており、これを浮き袋として、水面に集積する性質を有している。発生量が多くなると、水面に緑色のペンキを浮かべたようになるが、このようになるとアオコ層は放射の吸収体となり、水体の熱収支に影響をおよぼし、延いてはアオコ自身の生育環境を変えることが予想される。中山ら(1987)は、千葉県の手賀沼において、夏期と冬期の気象環境と水面蒸発の観測を行い、汚濁物質、特にアオコの存在は表層

近くの日中の水温を高め、夜間の水温を低めていることを明らかにしている。このことは、上の予想を実証する現象であるといみなされる。しかし、この観測では水体の移動に伴う熱移流量を推定できなかったため、詳細な熱収支解析もできなかった。

本研究は、アオコの発生に伴う水体の熱収支構造の変化を、実験的に明らかにすることを目的として実施したものである。

2. 実験方法

実験は、厚さ15 cmの発泡スチロール板で作成した縦横160 cm、深さ45 cmの水槽を2個用いて行った。両水槽は1/3ほど地中に埋め込んだ。一方の水槽には井戸水とアオコの発生している手賀沼の水を入れ、アオコを培養しながら使用する、アオコ区とした。もう1つの水槽には、井戸水のみを入れ、さらにカルキを加えてアオコ

1992年8月31日 受付, 1993年1月6日 受理

を発生させない、井水区とした。アオコの有無の影響を解明するのであるから、本来ならアオコの発生している水体とそれからアオコを除去した水体を用いて比較すべきであろうが、多量の水処理が困難であったので、このような便法をとった。各水槽の水深は40~42 cmとした。水槽の材料に発泡スチロール板を使用した理由は、水体と地中との熱交換を遮断し、水体中の熱の水平移動を起こさないことにある。水槽の内面は、反射を防ぐために黒色に塗装し、その上に漏水を防ぐために透明のビニルを貼った。Fig. 1 は、実験に用いた水槽と観測機器の配置を示したものである。

Fig. 1. Outline of experimental ponds and arrangement of instruments.

①: Net radiometer, ②: Albedometer, ③: Point gauge, ④: Thermometers, ⑤: Psychrometer

このような水体の熱収支構造を比較するために、観測した気象要素は以下のとおりである。観測は8月8日から31日まで行い、解析はアオコの良く繁殖している、晴天日と曇天日のデータについてのみ行った。

気温、湿度：観測日の気象状態を評価するために、両水槽の中央部、水面上約60 cmの高さで、乾・湿球温度を通風型乾湿計で測定した。

日射量、反射量、純放射量：各区の水面が狭いことを考慮し、水面のほぼ中央部の水面上約18 cmにアルベド計（英弘精機MR21）と純放射計（英弘精機CM40）を設置し、観測した。測器の出力の差に基づく誤差をなくするために、同一測器を両区に1時間おきに付け替えて使用した。観測値は約1分間に1度の割合で自記電位差計に入力した。両区のアルベドや純放射量は、1時間の平均値として算出した。

水温：両水槽のほぼ中央部の、水底からの高さ40、

35, 25, 15, 0 cmに、直径0.1 mmの銅-コンスタンタン熱電対を取り付け、水温を観測した。これらの熱電対には放射除けとして、先端から10 cm以上にアルミホイルを接着して使用した。

水面蒸発量：両水槽の側壁から約10 cmの水面にフックゲージを取り付け、水位の変化を朝8時（時には18時にも）に読み取り、1日当りの水面蒸発量を求めた。この場合、水温変化に伴う熱膨張の誤差を考慮しなければならないが、ここでは考慮していない。従って、1日当りの水面蒸発量に伴う誤差は、水温差が小さいので少ないと思うが、8時から18時と18時から8時までの水面蒸発量には誤差が含まれていると思われる。

3. 結果及び考察

1) 放射収支項の変化

ここでは、アオコの発生に伴う放射環境の変化について、8月9, 11, 26, 27日のデータに基づき検討する。9日と11日は、アオコの繁殖状態が良くない場合で、水体中のアオコを含む浮遊物質量はそれぞれ4.5と6.0 mg/lであった。また、26日と27日は、アオコが良く繁茂している状態で、水面は緑のペンキを浮かべたような状態になっており、攪拌して測定した水体中の浮遊物質量はそれぞれ50.8と30.6 mg/lであった。

Fig. 2 は、両区のアルベドを比較したものである。アオコの発生が悪かった9日のアルベドはアオコ区の方が

Fig. 2. Comparison of the albedo on both water surfaces.

井水区のものより明らかに小さい。井水区のアルベドが大きくなった理由は、カルキを使用し、水槽底部に僅かではあるが白色の粉が集積したためと思われる。1985年の夏期に観測した手賀沼のアルベドは0.8~1.0であったので、アオコ区の方が自然に近いと考えてよいであろう。9日の10時から15時までの平均アルベドは、アオコ区で約0.07, 井水区で約0.13であった。他方、アオコが水面に緑色のベンキ状に層をなして生育していた27日のアルベドは、アオコ区のもの明らかに大きい。同様に、この日の平均アルベドは、アオコ区で約0.13, 井水区で約0.10であった。以上のように、アオコの層状発生は水面のアルベドを増加するとみなしてよい。なお、井水区のアルベドが、27日に9日のものより低下した理由は、上述のカルキが汚れたことにあると思う。

次に純放射量を比較すると、Fig. 3 のようになる。8月9日の日中の両区には明らかな差異が認められるが、27日には明確な差異は認められない。また、図には示さなかったが11日と26日の値にも明瞭な差異は認められなかった。純放射量の測定は、同一測器を1時間おきに両区に付け替えて行ったので、雲の影響を大きく受けている可能性がある。そこで純放射量と日射量との間に直線関係があること（例えば Shaw, 1956；三原ら, 1959；中山ら, 1983 など）を考慮して、両者の比（純放射量/日射量, R_n/R_s ）を検討した。Fig. 4 は日中（10:00-15:00）の R_n/R_s とアルベドとの関係を示したものであるが、 R_n/R_s はアルベドの増加に伴って減

Fig. 3. Comparison of the net radiation on both water surfaces.

Fig. 4. Relation between the ratio of net radiation to solar radiation (R_n/R_s) and the albedo.

少し、同じアルベドであればアオコ区ものが小さいようである。このような点から、データが少なくて断言はできないが、アオコの発生は純放射量を若干小さくさせると判断される。

一般に、表面の放射収支は次式で示される。

$$R_n = (1 - \alpha) R_s - R_L \quad (1)$$

ここで、 α はアルベド、 R_L は長波有効放射である。この式で、 α が大きくなると正味の短波放射、 $(1 - \alpha) R_s$ は小さくなり、 R_n を小さくする。しかし、正味の短波放射が小さくなると、一般には表面温度が低下し、水面長波放射（上向き長波放射）を減少させる方に作用するので、 R_L も小さくなり、 R_n は増加することになるが、実際には後述するように、アオコ層が日射を吸収し、透過を抑制するので表面温度も高くなり、昼間の R_n を減少させる。つまり、アルベドの増加は R_n を増加したり減少したりする作用を有しているが、ここでは減少作用の方が大きく働いたとみなされる。

2) 水温と水体貯留熱量の比較

Fig. 5 は8月27日の両区の深さ別水温の日変化を示したものである。アオコ区の水面近く（40 cm）の水温は、井水区のものに比べると温度上昇が早く始まり、最高水温も高くなっている。しかし、水底（0 cm）の水温は逆に井水区の方が温度上昇も早く、最高水温も高い。アオコ区ではアオコ層が日射を吸収し、その周辺の水温を高めているのに対し、井水区では日射が水底まで透過するので、水体全体の水温はほぼ一様に変化したとみなされる。このような傾向は、アオコの発生の悪かった8月10日にも認められた。アオコは高温を好むといわれている。アオコがガス胞を使用して水面に集めることは、光合成有効放射の多い日中におけるアオコ自身の生育環境を改善しているのかもしれない。

水温変化のデータから、各時刻の単位水柱当りの貯留熱量が求められるので、この変化量を1時間毎に求めた。この貯留熱変化量 (S) は次式で求めた。

$$S = c \cdot \rho \cdot D \cdot d\theta/dt \quad (2)$$

Fig. 5. Comparison of the water temperatures at different depths in both ponds.

Fig. 6. Comparison of the change of heat storage in both water bodies.

Table 1 Latent heat flux from both water surfaces (ly/time).

Date	Water blooms pond			Clean water pond		
	Daytime	Nighttime	Total	Daytime	Nighttime	Total
Aug. 9	75.4	81.2	156.6	92.8	81.2	174.0
Aug. 26	185.6	52.2	237.8	75.4	92.8	168.2
Aug. 27	214.6	98.6	313.2	121.8	191.4	313.2

Note

Daytime: 8:00–18:00, Nighttime: 18:00–8:00

ここで、 c は水の比熱、 ρ は水の密度、 D は水深、 θ は水温、 t は時間である。Fig. 6 はアオコ層が形成されていた 27 日の両区の貯留熱変化量を比較したものである。井水区の貯熱量がアオコ区のものより明らかに大きい。この差異は、両区の水体のアルベドの差異や透過率の差異によるものであろう。

3) 潜熱伝達量の比較

アオコの発生が水面蒸発量、延いては潜熱伝達量に如何に影響しているかを明らかにすることは興味深い。ここでは、水位観測によって求めた水面蒸発量から潜熱伝達量を算出した。

Table 1 は 1 日間を昼間 (8:00～18:00) と夜間 (18:00～8:00) に分けて観測した潜熱伝達量を示したものである。このように昼夜に分けて測定したデータは 3 日間分しかないので、明瞭な判断は難しいが以下のような傾向が見られる。アオコの発生は水面近くの昼間の水温を上昇するので、水面の水蒸気圧を増大させ昼間の潜熱伝達量を増加するが、夜間は水面近くの水温を低下させる上に水体の貯留熱 (水体の貯留熱が蒸発に大きな影響を及ぼすことは Yamamoto and Kondo (1964) も報告している) も少ないので水温の低下も早まり、潜熱伝達量も井水区のものより減少する。しかし、1 日間の両区の潜熱伝達量の差は、平均すると小さいと予想される。Table 1 の結果はこのような過程を反映したものと考えられる。

4. ま と め

このような狭い水面の熱収支には、移流熱が関与するので、熱収支構造を正確に把握することは難しい。本研究においては、純放射量、潜熱伝達量、水体の貯留熱変化量は観測しているが、顕熱伝達量と移流熱量は観測していないので、厳密な熱収支解析は出来なかった。しかし、これまでに示したように、アオコの発生に伴う水面あるいは水体の熱収支構造の特徴をいくつか明らかにすることはできた。それらの特徴は以下のようにまとめられる。

1. アオコの発生、特に層状の発生は水面のアルベドを増加させる。
2. アオコの発生は、昼間の純放射量を若干減少させる。
3. アオコ層は日射の透過を抑制するので、水面近くの水温を、より早く、より高くまで上昇させる。
4. しかし、深層の水温は低くなり、結果的に水体全体の貯熱量は減少する。

5, アオコの発生は, 昼間の潜熱伝達量を増加させ, 夜間は減少させる傾向にある。これは, 昼間は高い水面温度に依存, 夜間は低い水面温度と少ない水体貯留熱に依存しているようである。

本研究を実施するに当り, 種々協力頂いた千葉県水質保全研究所の本橋敬之助博士に, 心から謝意を表す次第である。

引用文献

三原義秋・内嶋善兵衛・中村千里・大沼一巳, 1959: 温水池の熱収支および水温上昇の研究, 農技研報告, A,

7, 1-43.

中山敬一・羽生寿郎・今久, 1983: 日射量による純放射量の推定, 農業気象, **38**, 415-418.

中山敬一・羽生寿郎・今久・岡野通明, 1987: 手賀沼の気象環境と水面蒸発の特性, 千葉大学環境科学研究報告, **13**, 25-30.

Show, R. H., 1963: A comparison of solar radiation and net radiation. *Bull. Am. Met. Soc.*, **37**, 205-206.

Yamamoto, G. and Kondo, J., 1964: Evaporation from lake Towada. *Journ. Met. Soc. Japan*, **42-2**, 85-96.