

知ってますか??



雑学講座

地球気温の制御方法 [2]

- 青い海の反射能と鉄の物語 -

作・光藤 裕之 岡山理科大学 理学部応用物理学科 教授

〒700-0005 岡山市理大町1番1号 TEL/086-252-3161 FAX/086-255-7700

夏休みのバケツ実験

上述の私論は、「日射スペクトル中の緑色光を反射させると水温上昇が抑制される」との前提に立っている。この前提が間違っているとは思えないけれども、どの程度の効果があるのか？ 実測で確かめたいと、三鷹の梅林の涼体験以来の思いがつのってきた。日射その他の妨害の少ない自宅横の青空駐車スペース（少し離れた竹林のため夕日のみ早くかげる）と、雨の降らない連日の猛暑（雲量は日によって異なる）を利用して、多年の宿題を実行したのである。主たる資材の調達はホームセンターで間に合った。

1 深海を模したバケツ

プラスチック バケツ（容量 22ℓ，直径 34cm，高さ 35cm，灰色）を2個用意した。その内面につや消し黒ラッカーを塗布して、深海を模した。外側面を、ポリエステル/アルミ蒸着膜付き発泡ポリエチレン マット（8mm 厚，商品名＝アルミ キャンピング マット）で包んだ。外気との断熱とコンクリート地面からの照り返し抑制のためである。簀の子板（隙間なし）状の木製台の上に、人工芝様の緑色マットを敷き、その上にバケツ2個を載せた。バケツは互いに影を及ぼさない距離に置いた。

互いに等温の水道水を 20ℓ 注いで蓋板を置いた。蓋と水面間には 2cm の空間がある。厚さ 10mm の無色透明なアクリル樹脂板を、重しを兼ねて、両バケツ共通の蓋とした。これに、3種類の緑色体とアルミ箔付き発泡ポリエチレンマットを付け加えて、対照バケツとした。写真1にその様子を示す。

前日の夕方、直射光が陰ってから、上記を準備し、そのまま夜を過ごさせ、翌朝から夕方までの日射に曝すことを1サイクルとした。サイクルごとに、初期水温と日射の強さは幾分異なる。水温は、攪拌した後に、0.1℃分解能の熱電対式デジタル温度計で測った。



写真 1 日照下のバケツ

2 緑色体の反射スペクトル

この実験の主役を務める緑色体の、吸光と反射のスペクトルは、大阪府立産業技術総合研究所 材料技術部 超材料グループの山下忠興氏に測って頂いた。装置は、島津製作所製 UV3000 であり、反射率校正には硫酸バリウムが使われている。材質不明（塩化ビニール樹脂らしい）なのであるが、肝心の光学特性を知ることができた。

濃緑色板（厚さ 0.5mm）の波長 $\lambda = 185 \sim 2500\text{nm}$ 間の吸光スペクトルを図1に示す。可視部の吸光度の落ち込みは 500nm 付近に限定されている。緑色板もピーク値が低いだけで、曲線パターンは似ている。一方、周知のクロロフィル (a + b) の落ち込み領域は広

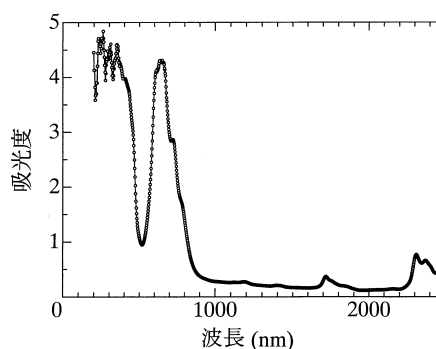


図 1 濃緑板の吸光度スペクトル

く、500~600nm(緑～橙色)に及ぶ。これが、緑葉の反射域(緑～黄色)にほぼ対応すると考えられる。従って、濃緑色板の反射スペクトル域は、図2に示すように、緑の葉よりも狭い。なお、濃緑色板は、1 μm よ

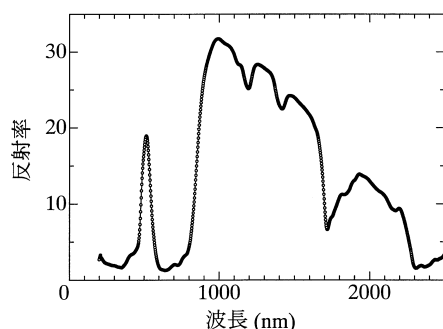


図2 濃緑板の反射率スペクトル

り長い近赤外域に反射率を示している。しかし、 $\lambda > 1 \mu\text{m}$ の太陽光入力 ($\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}$) は、 $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ 緑色光の1/2以下である。さらに、両バケツに共通のアクリル樹脂(ポリメチルメタクリレート)が赤外域に反射率をもつ¹³⁾。従って、両バケツの差は、主として緑色光の反射率の違いによる。

緑色板(1.0mm厚)の反射スペクトルは、図3に見られるように、500nm付近の反射率ピークは30%である。農業用の緑色箔(25 μm 厚)は、図4に見られるように、500nm付近の反射率は低く(ピーク値～5%)、ブロードである。600～700nm域にも反射率曲線が広がり、黄色味を帯びた緑色である点で、葉緑素に近い。

表1

バケツ条件	初水温 T_i °C	終水温 T_f °C	$(T_f - T_i)$
A:アクリル板のみ	25.9	39.8	13.9
B:濃緑板追加	25.9	35.8	9.9
A-B	0.0	4.0	

表2

バケツ条件	初水温 T_i °C	終水温 T_f °C	$(T_f - T_i)$
A:アクリル板のみ	25.7	37.3	11.6
C:緑板追加	25.7	33.8	8.1
A-C	0.0	3.5	

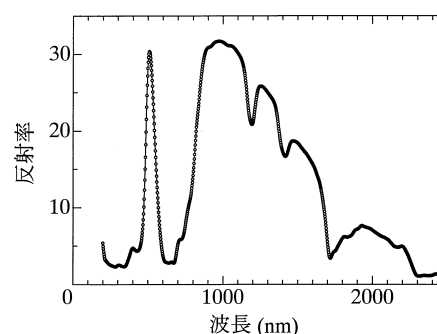


図3 緑板の反射率スペクトル

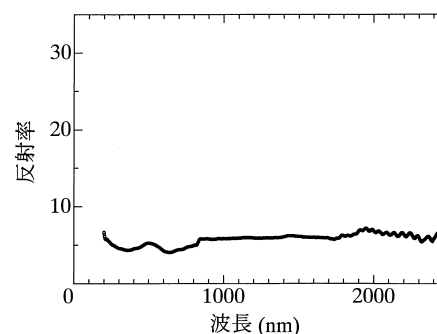


図4 緑箔の反射率スペクトル

3 水温上昇の実測結果

準備期間を除いて、8月11日夕方から17日夕方までの実験のうち5通りの条件下で得た結果を、表1から表5に示す。表2の条件でのみ重複して2サイクル試みたが、十分な再現性を示した。無色透明のアクリル樹脂板の下に、緑色体あるいはアルミニウム箔付き発泡ポリエチレンマットを挟んだ。

濃緑色板B(図2)と無色透明アクリル基準蓋Aとの並行実験の結果を表1に示す。翌日夕方の攪拌後終水温 T_f には、4.0℃の差が生じた。1℃程度の効果が出るだろうかと予測していた身にとっては、驚きの瞬間であった。

緑色板C(図3)の効果を表2に示す。攪拌後終水温の差は3.5℃である。

表3

バケツ条件	初水温 T_i °C	終水温 T_f °C	$(T_f - T_i)$
A:アクリル板のみ	25.9	38.3	12.4
D:緑箔3重追加	25.9	33.6	7.7
A-D	0.0	4.7	

表 4

バケツ条件	初水温 T_i °C	終水温 T_f °C	$(T_f - T_i)$ °C	表層終水温 T_s °C	底層終水温 T_b °C	上下差 $(T_s - T_b)$ °C
A:アクリル板のみ	25.9	33.6	7.7	36.0	32.7	3.3
E:緑箔 1 重追加	25.9	32.8	6.9	37.2	31.0	6.2
A-E	0.0	0.8		-1.2	1.7	

表 5

バケツ条件	初水温 T_i °C	終水温 T_f °C	$(T_f - T_i)$ °C	表層終水温 T_s °C	底層終水温 T_b °C	上下差 $(T_s - T_b)$ °C
C:緑板追加	25.8	36.3	10.5	48.1	31.0	17.1
F:アルミ箔マット追加	25.8	31.9	6.1	36.9	30.0	6.9
C-F	0.0	4.4		11.2	1.0	

基準バケツ A について、表 2 の $(T_f - T_i) = 11.6$ °C は表 1 の 13.9 °C よりも低い。日によって異なる日照の影響である。濃緑 B と緑 C の効果の差であるか否かは定かではないが、温度差 3.5 °C は大きな値である。

緑色箔 (図 4) の 3 枚重ねバケツ D の効果を表 3 に示す。搅拌後終水温の差 4.7 °C には再び驚かされた。そこで、緑色箔 1 枚だけのバケツ E の効果を調べた結果を表 4 に示す。両バケツの搅拌後終水温差は小さく 0.8 °C であった。基準バケツ A の $(T_f - T_i) = 7.7$ °C がかなり小さいことを考慮に入れると、日射の強い日の昇温抑制効果は 0.8 °C よりも大きいであろう。これは、500nm 付近の反射率ピーク値 ~ 5 % (図 4)、厚さ 25 μ m のフィルム 1 枚の働きなのである。

可視光は水を透過してバケツの黒色の内面で光熱変換されるから、底層水の加熱に有効である。表 4 には搅拌前の終水温をも示す。たった一枚の緑色箔が追加されているバケツに比べて、可視光の全スペクトルに透明なバケツ A は、底層では 1.7 °C 高く、表層では逆転して 1.2 °C 低い。緑色箔は、反射した緑色光と透過した光以外を吸収し熱に変え、自らを加熱する。この緑色箔の発する熱放射は表層水を加熱する。

水は、波長 $\lambda > 2.7\mu$ m の赤外領域に極めて高い吸光係数 ($10^4 \sim 10^6 \text{ m}^{-1}$) をもつ¹⁴⁾。緑色体の熱放射赤外線は水面の極めて薄い層で吸収され、底層水には届かない。もしも、緑色体が水面に接しているならば、緑色体の熱は熱伝導により水の巨大な熱容量に吸い込まれ、緑色体自身の昇温幅は小さい。

水温上昇に寄与するエネルギー流入は、バケツの上面からの直接入射光だけではない。大気からの熱伝導や照り返しによる熱入力がある。上面の蓋にアルミニウム箔

付きマットを加えて全スペクトルの直接入射を遮ったバケツ F の搅拌後 $(T_f - T_i) = 6.1$ °C は、緑板追加バケツ C の搅拌後 $(T_f - T_i) = 10.5$ °C よりも 4.4 °C 低い (表 5)。従って、上から入射した可視光の水温上昇への寄与は、(全スペクトル入射) > (緑色光を除くスペクトルの入射) > (全スペクトルの遮断) の順になっている。

表 5 には搅拌前の終水温をも示す。バケツ F での表層終水温 T_s と底層終水温 T_b の差、つまり上下差 $(T_s - T_b) = 6.9$ °C は、対流の結果であろう。一方、緑板追加バケツ C の $T_s = 48.1$ °C は異常に高く、 $(T_s - T_b) = 17.1$ °C にも及ぶ。底層終水温のバケツ差 (C - F) は 1.0 °C に過ぎない。濃緑色板 (軟化点 65 °C) と緑色板 (軟化点 70 °C) はともに初回の実験中に軟化し、バケツの外周にはみだした余り部分が垂れ下がった。板自体は 100 °C 程度になったであろうか。ここでも、高温になった緑色体による水面の熱線加熱が見られる。

これらバケツ内の垂直温度分布は、海とは異なる。海の場合、水深 100m 程度までに光は吸収され、主として熱に変わる。緑色光反射表層があってもなくても、垂直分布に関していえば、光熱変換量は水面に近いほど大きい。しかし、バケツ水が得た積分熱量 (搅拌後の上昇温度に比例) は、海が得た積分熱量に対応する。青い海では、植物性プランクトンによる緑・黄色光の上空への反射相当分が、熱への変換から除外される。緑色体の蓋をもつバケツと事情は変わらない。

4 緑陰・青い海・黒い海・広い海

陸上の緑の葉は、緑・黄色光を宇宙へ捨てるとともに、蒸散によって自らの過熱を防ぎ熱放射をも抑制して

いる。バケツ実験は、三鷹駅前梅林で感じた涼しさに裏付けを与えた。十分に広い面積の板で、バケツ上端から数 10cm 以上離れた空間を覆う（準備が大変！）ならば、蒸発熱効果を取り入れ、“覆い”からの熱放射を軽減させることができる。しかし、風は余りにも気候に吹きゴミまで運んでくれる。結局、できるだけ簡便な実験条件を選んだのであった。

海洋の“植物性プランクトンによる気温制御”が、話の本筋である。バケツ実験で、アクリル樹脂板に緑色体が加わることによって、攪拌後の終水温は常に低下した。蒸発熱を奪われていないので、太陽光エネルギーの熱への変換量低下は、緑色光の反射による。

純水の水蒸気圧の温度 T °C に対する依存は 3 次式に近く、20 °C の 0.025bar は 30 °C の 0.04bar に増加する¹⁵⁾。海水面の蒸発速度は、温度依存よりも風速依存の方が大きいであろう。風速効果を除くと、水面温度が高いほど、蒸発の冷却率は大きい。プランクトンの緑・黄色光反射の水温抑制効果の一部は、蒸発熱によって割り引かれる。青い海と黒い海を模したバケツモデルでの攪拌後上昇温度差 (0.8~4.7 °C) は、蒸発熱の補正を受けねばならない。しかし、有限の温度差は残る。そして、海は広いのである。

海面温度が高く風速が大きい程、蒸発速度は増す。このときの蒸発熱消費に見合って、海面から大量に水蒸気が大気を送り込まれる。この水蒸気は、上からの太陽光の赤外線と下からの地球熱放射の赤外線を吸収する。この水蒸気は大気を暖める。かくて、バケツと海の水温上昇の差は、大気の高湿多湿化に投資される。

5 室戸岬の磯の緑と小魚たち

「暑過ぎて仕事にならず!」「猛暑 中小企業にマイナス」は、本年 9 月 28 日付け新聞記事の見出しである¹⁶⁾。大阪市信用金庫が 9 月上旬に大阪府内の取引先にアンケート調査し、1,155 社から得た回答の集計結果である。海で珊瑚が苦しむとき、陸の人間も苦しいのである。

以上は、猛暑の苦しまぎれの思案と実験であったが、その打開策の夢も湧いてきた。うまくすれば、温暖化対策と同時に、エネルギー問題、食糧問題と広義の環境問題の解決にも役立つように思えてならない。1993 年の冷夏は、野菜価格の急騰、米の緊急輸入をもたらした。細長い外米を美味しく炊く方法なども話題になった。

砂漠は寒暖の差が大きい厳しい気候を呈する。陸の砂漠と海の“砂漠”の緑化は、地球気候を地域的・季節的に緩和し平準化するのではなからうか。海洋水の巨大熱容量による緩衝効果は大きい。今夏、庭の雑草たちは例年になく深く根を伸ばして、乾燥と高温に耐えていた。彼等は地中の水を汲み上げて緩衝作用に供していたのである。

室戸岬の磯の緑と小魚たちの姿は涼しそうに見えた。彼等は、猛暑解消方法を示唆する妖精のように思えた。

謝辞

バケツ実験に使った緑の板および箔の分光吸収・反射特性は、日下忠興氏（大阪府立産業技術総合研究所 材料技術部 超材料グループ）に測っていただいた。有り難うございました。

[参考文献]

- 1) 光藤裕之: “今年の夏はなぜ暑いのか=セラミックスと植物と気候の関わり仮説=”, *Materials Integration*, **12**, 10-12 (1999).
- 2) 松井孝典著: “地球進化探訪記”(1994.3, 岩波科学ライブラリー)
- 3) 勝木渥著: “物理学に基づく環境の基礎理論”(1999, 海鳴社)
- 4) R. カンデル著, 飯山敏道訳: “気候の未来”(1993.5, 丸善)
- 5) 国立天文台編: “理科年表”(1996, 丸善)
- 6) 近藤純正編著: “水環境の気象学”(1994.4, 朝倉書店)
- 7) 野崎義行著: “地球温暖化と海-炭素の循環から探る-”(1994.3, 東京大学出版会)
- 8) 吉田秀樹著: “よくわかる海洋深層水”(2000.8, コスモトゥーワン)
- 9) 鈴木淳, 川幡穂高: “骨格の酸素・炭素同位体比分析によるサンゴ白化現象の解析” *Isotope News*, No.556 (2000.9.) p.2
- 10) 日本経済新聞 (2000.9.26)
- 11) C. ジンマー著, 渡辺政隆訳: “水辺で起きた大進化”(2000.1, 早川書房)
- 12) 日本土壌肥科学会編: “金属関連化合物の栄養生理”(1990, 博友社)
- 13) V.M. ゴロタリョフ, V.N. モロゾフ, E.V. スミルノーフ著, 遠藤敬一訳: “天然および人工媒質の光学定数”(1986, 日ソ通信社)
- 14) E. アイゼンバーク, W. カウズマン著, 関集三, 松尾隆祐訳: “水の構造と物性”(1975.12, みすず書房)
- 15) “Handbook of Chemistry and Physics 80th edition”(1999, CRC Press)
- 16) 読売新聞 (2000.9.28)