

グリーンフラッシュ現象の解明と教材化

壺井宏泰（兵庫県立北須磨高等学校）

【要約】グリーンフラッシュを目撃した感動経験から理論と再現実験と物理教材としての活用を試みた。グリーンフラッシュの主たる要因である大気分散について理論と再現実験を実施した。波動分野での物理教材としての活用方法について検討した。物理 I における温度勾配がある時の音波の進み方の記述について各社の記述を調査し、改善するべき内容を見つけた。

【キーワード】 グリーンフラッシュ、分散、散乱、干渉、屈折、大気差、大気分散、温度勾配、波の進み方

1. はじめに

グリーンフラッシュとは日の出、日の入り時に稀に見られる緑色の閃光である。幸運なことに、2009年7月22日早朝に北硫黄島近海で非常に鮮やかなグリーンフラッシュを目撃することができた。その感動経験から、理論を調べ、再現実験を試み、物理教材としての活用を検討したので報告する。

2. 大気差と大気分散

(1) 大気差

大気差とは、天体からの光が真空の宇宙から地球の大気層に入ると屈折し、見かけの高度（視高度）が真高度より大きくなる現象（量）のことである。特に地平線に近い高度の低い天体に顕著である。太陽の視直径は約32分である。理科年表より視高度 0° の大気差は約34分であるから、日の出時にちょうど太陽が出てきた時には、実際の太陽はまだ地平線の下にあるということになる。

(2) 大気分散

波長により屈折率が異なるために大気差は波長によって異なり、太陽光線は分光される。これを大気分散という。理科年表によると、 15°C 、1気圧の標準空気の屈折率は380nmで1.0002839、780nmで1.0002752であり、0.0000087の差がある。（①式より）

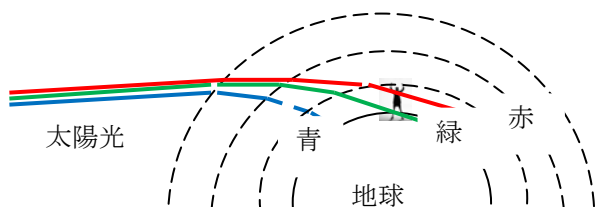


図1 大気分散の様子

大気分散を考慮して日の出を考えるとまず青い太陽が出てくるがこれはレイリー散乱により観測者まで届かない。次に緑色の太陽が出てくる。次の赤い太陽が出てくるまでのわずかな時間がグリーンフラッ

シュであると考えられている。

(3) グリーンフラッシュの見える条件

- ・上空に乾燥した空気があつて透明度が高い。
- ・逆転層（下冷上暖）ができています。
- ・風があまりない
- ・地平線まで障害物がない

3. 空気の屈折率の理論

種々の波長 λ （真空中の値、単位は μm ）に対する標準空気（炭酸ガス0.03%を含む 15°C 、 $1\text{atm} = 0.101325\text{MPa}$ の乾燥空気）の屈折率 n_s （真空に対する値）は、 λ が $0.20 \sim 1.35 \mu\text{m}$ の範囲内でつぎの式によって与えられる。

$$(n_s - 1) \times 10^8 = 6432.8 + 2949810 / (146 - (1/\lambda^2)) + 25540 / (41 - (1/\lambda^2)) \dots \text{①式}[1]$$

（1952年の国際分光学会議で採択された式）

温度 T （K）、気圧 P （hPa）、水蒸気圧 F （hPa）、観測波長 λ （ μm ）とすると CO_2 含有量0.03%の空気に対して

$$(n_0 - 1) \times 10^8 = C(\lambda) \times (P/T) [1 + P\{57.90 \times 10^{-8} - 9.3250 \times 10^{-4} \times (1/T) + 0.25844 \times (1/T)^2\}] \times 0.16F/P \dots \text{②式}[2]$$

$$\text{ただし } C(\lambda) = 2371.34 + 683939.7 (130 - 1/\lambda^2)^{-1} + 4547.3 (38.9 - 1/\lambda^2)^{-1}$$

4. 再現実験

上記理論のようにファクターが多すぎて考察が困難なため、ファクターを温度勾配にしぼり再現実験を実施した。

図のようにヒーターと冷却水で鉛直方向に温度勾配をつくり、RGBのレーザーを入射して屈折の様子を観察するという簡単な実験装置である。

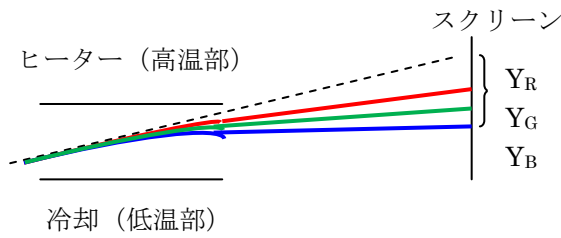


図2 実験の様子

温度勾配により屈折率が連続的に変化するため、分散が起こり、波長の長い赤い光が最も曲げられる。RGB それぞれの変位 Y_R 、 Y_G 、 Y_B の関係を調べ、理論と比較する。

光源はレーザーポインタを用いた。

今回実験に使用した波長は赤が $655 \pm 5\text{nm}$ 、緑が 532nm 、青が 405nm のレーザーである。

(1) 再現実験の理論[3]

屈折率が高さだけの関数で表されると仮定し、 $n(y)$ と表記する。

まず $n(y)$ が微小高さ Δy ($y_{m+1} - y_m$) において不連続であれば

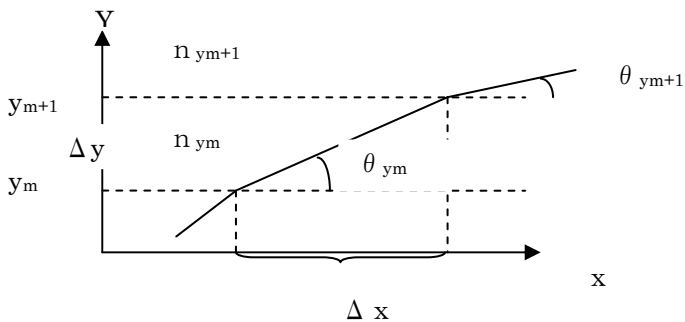


図3 屈折率が不連続の場合

$$n(y_m) \cos \theta_{ym} = n(y_{m+1}) \cos \theta_{ym+1} \quad (3\text{式})$$

(θ_{ym} 、 θ_{ym+1} は境界面となす角とする)

$$\Delta x = \frac{1}{\tan \theta_{ym}} \Delta y \quad (4\text{式})$$

となる。次に屈折率が高さ a から b まで連続的に変化する場合を考える。そのためには a から b の間を微小 Δy の間隔で細かく区切り、 $\Delta y \rightarrow 0$ とすれば良い。屈折率が $n(a)$ の高さ a に θ_a で入射して高さ b に届くまでの水平距離を L とすれば、

$$L = \int_a^b \frac{1}{\tan \theta} dy \quad (5\text{式})$$

③式より

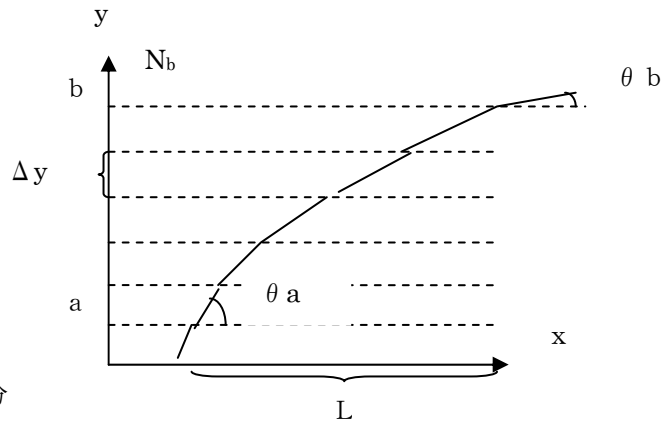


図4 連続した屈折率の場合

$$\begin{aligned} dy &= \frac{n(a) \cos \theta_a \sin \theta}{\frac{dn(y)}{dy} \cos^2 \theta} d\theta \\ &= \frac{n(a) \cos \theta_a \sin \theta}{n' \cos^2 \theta} d\theta \quad (6\text{式}) \end{aligned}$$

⑥式を変数変換すると

$$\begin{aligned} L &= \int_a^b \frac{1}{\tan \theta} dy \\ &= \int_{\theta_a}^{\theta_b} \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \frac{n(a) \cos \theta_a \sin \theta}{n' \cos^2 \theta} d\theta \\ &= \frac{n(a) \cos \theta_a}{2n'} \ln \frac{(1 + \sin \theta_b)(1 - \sin \theta_a)}{(1 - \sin \theta_b)(1 + \sin \theta_a)} \end{aligned}$$

⑦式 となる。

(ただし $n(y)$ を一次関数近似して n' を定数とした。)

(2) 定性実験

目に見える分散を得るには温度勾配が急である必要があるため、鉄板をカセットコンロで加熱し、その直上にレーザーを通すという方法で、定性的な実験を試みた。

まず、温度勾配がどのようにになっているかを測定した。

図1は鉄板上、鉄板から5cm、10cmの3か所の加熱による温度変化を1秒ごとに測定したものである。鉄板上は300℃近くになっているにも関わらず、5cm、10cm離れると50℃程度でほとんど差がないことがわかる。そこで、さらに鉄板の近くを詳細に調べるために鉄板上、鉄板から1cm、2cmの3か所で測定したものが図2である。やはり、鉄板上は350℃近くになっている

のに、1cm、2cm 離れた場所では 100°C に達していない。つまり、鉄板上の 1cm の間にはかなりの温度勾配があることがわかり、そこにレーザーを通し、10m 離れたスクリーン上のスポットの変位を測定することにした。

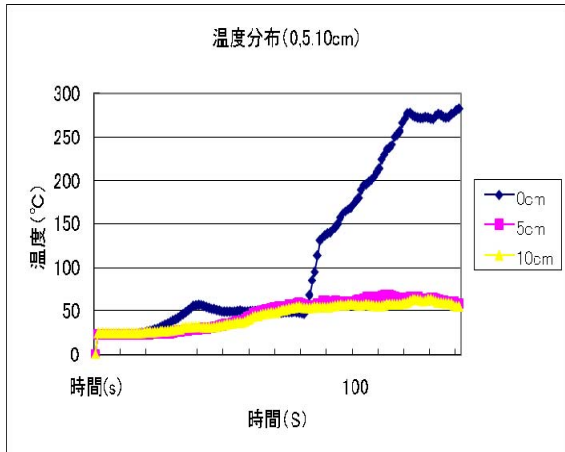


図5 鉄板上、鉄板から 5cm、10cm の 3 か所の加熱による温度変化

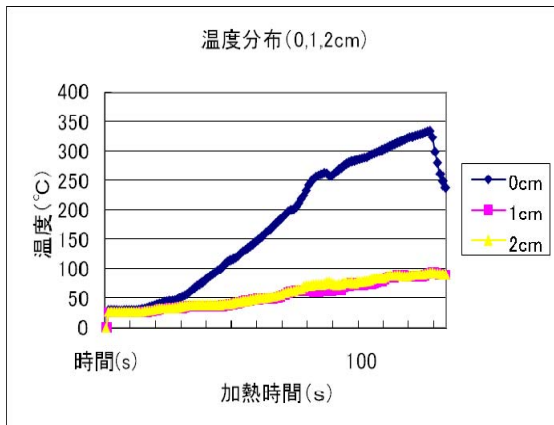


図6 鉄板上、鉄板から 1cm、2cm の 3 か所の加熱による温度変化

しかし、激しい上昇気流のためか、スポットが激しく揺れて分散の様子がはっきりとは確認できなかった。



加熱前

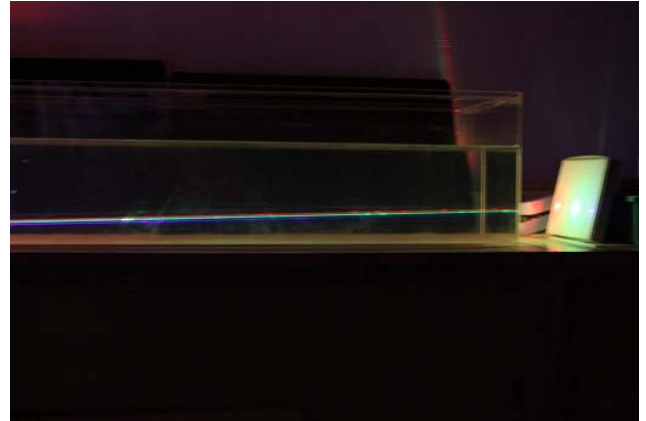
加熱後

5. 定量実験

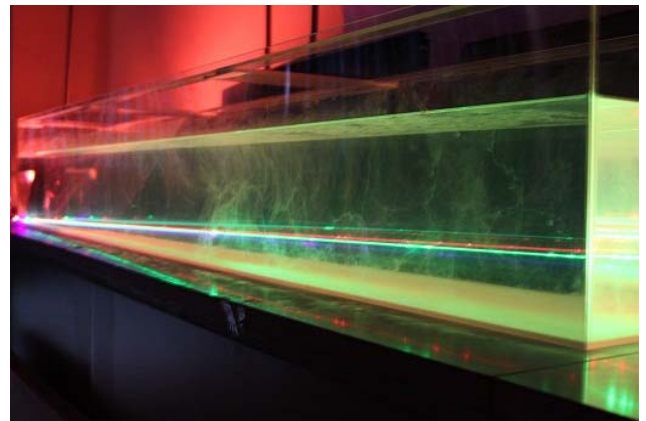
(1) 実験装置

30×30×300cm の水槽に砂糖を溶かして長時間安定にすると、底の付近はほぼ飽和状態に近いで非常に濃い濃度で、水面付近は非常に濃度が薄い状態になり、急な濃度勾配ができる。その連続した屈折率勾配を利

用し定量実験を試みた。その下の写真①、②のように RGB 別に分散することが確認できるようになった。



実験結果①



実験結果②

(2) 課題

- ①濃度勾配の制御が難しい
- ②少しの振動でも濃度勾配が変化してしまう
- ③底の付近は溶液が不安定で、光が拡散してしまい、スポットが広がり測定が困難になった。



6. 物理教材としての活用

(1) 温度勾配がある時の音波の進み方

連続的に屈折率(温度)が変化する状況での波の進み方の例として、昼と夜の音の伝わり方の違いが各教科書会社で取り扱われている。今回は実教出版、第一学習社、東京書籍、啓林館、数研出版、三省堂の 6

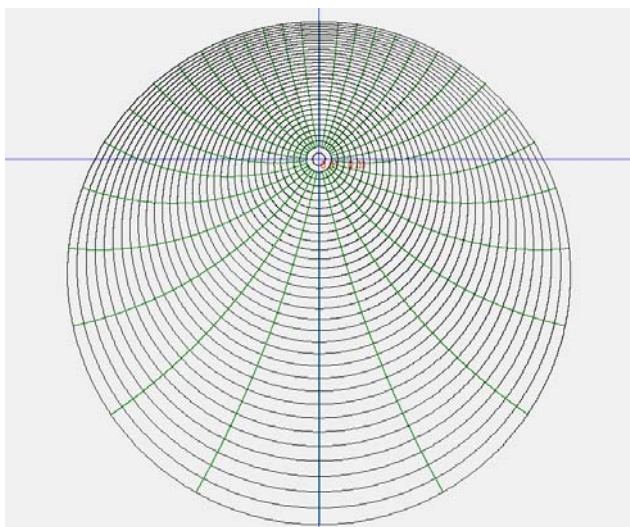
社の音の屈折の説明部分を比較して表にまとめてみた。

大きく分けて3種類の説明方法がある。一つは温度が高いほど音速が速くなることから波面を考え、波面に垂直な方向に波が進むから屈折するという説明(波面重視)、次は温度が高いほど音速が速くなることから高さに依存した等温度線を考え、屈折するという説明(等温度重視)、最後に屈折の法則から屈折を説明(屈折の法則)である。波面重視では、三社が明らかに誤表記であると思われたので編集部連絡したところ、正確さに欠ける表記であるとして修正するとの回答を得ている。次に等温度重視であるが、全反射が説明できないため、夜の説明に限界を感じた。屈折の法則による説明は今回の理論と同じ考え方で、ベストであると考える。

	波面重視	等温度重視	屈折の法則	総合
実教出版	△(不正確)	△	×	△
第一学習社	△(不正確)	×	×	△
東京書籍	×	△	×	△
啓林館	○	×	△	○
数研出版	×	△	×	△
三省堂	△(不正確)	×	×	△

(2) コンピュータシミュレーション

温度勾配がある時の音波の進み方をコンピュータシミュレーションで作成してみた。その結果、各教科書会社の図は正確さに欠けていることがわかった。



7. 今後の計画

- (1) 上昇気流を防ぐために図2のように上部を高温部にしたり、側部を高温部にしたりして実験をする。
- (2) 制御可能な安定した温度勾配の作成とレーザースポットの変位の正確な測定を可能にして定量的な実験をすること
- (3) グリーンフラッシュの継続的な観測により発現時の気象データ等を調べ、発生条件を詳細に調査すること。
- (4) グリーンフラッシュをモデル化し、そこから得られる理論式と実験データ、気象データを比較することにより、モデルの正当性を検証する。

8. 謝辞

本研究は「平成22年度 兵庫教育大学と大学院同窓会員との共同研究」事業で実施したものです。兵庫教育大学からは貴重な研究費を頂き、庭瀬敬右教授と石原論准教授には共同研究者として本研究に関してたくさんの貴重なアドバイスをいただきました。また、コンピュータシミュレーションについては倉佐悦司教諭にご協力いただきました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。ありがとうございました。

9. 参考文献

- [1]理科年表
- [2]Owens:Applied Optics,6,51(1967)
- [3]層気楼の形状による気温分布の計算 長谷川能三 大阪市立科学館研究報告 16、69-72(2006)
- [4]高等学校 物理 I (実教出版)
- [5]高等学校 物理 I (第一学習社)
- [6]高等学校 物理 I (東京書籍)
- [7]高等学校 物理 I (啓林館)
- [8]高等学校 物理 I (数研出版)
- [9]高等学校 物理 I (三省堂)