

## 「シャボン玉の七色」 - 光の干渉を考える -

2021/10/31 ZOFFY

やっと自分もコロナワクチンを2回接種しました。嫁様と比べて遅れて出てきた副反応を「高齢者の筋肉痛のようなもの」と表現され、妙に納得してしまいました。(；^ω^)

さて引き続き一見異なる光と電気信号が、「波」として見れば同じ物理現象であることを伝えたく、身近な現象を例にして紹介します。本稿では「干渉」を、これまで取り上げた光の「屈折」「反射」に加えて、電気・電子技術者の目線で考えてみました。

### 1. 七色のシャボン玉

シャボン玉がなぜ七色に綺麗なのかを考えてみました。図1の様にシャボン玉が七色に見える理由は、光の波長に近い厚さを持つシャボンの膜とこれを挟んだ空気層の間で光が多重反射し、波長(=色)ごとに異なった干渉が生じ、強め合う色と弱めあう色が有るためです。

シャボン玉の膜(厚さ  $1\mu\text{m}$  弱、屈折率 $\approx 1.5$ )を空気(屈折率 $\approx 1$ )で挟んだ状態での光の反射と透過を図2に表しました。図の左側からの入射光は、シャボン玉膜の左側の界面で透過および**反転**位相で反射します。シャボン玉膜に入り込んだ光は、更に右側の界面で透過と**非反転**位相で反射します。それぞれの反射光は、緑色の矢印と紫色の矢印で表しました。そして入射光側(外側)の空気層において、それぞれの反射光は干渉を起こし、位相が揃っていれば強め合い、逆相であれば弱め合います。次頁の図3で示すようにシャボン玉の像として眼に入ってくる光は、干渉したそれぞれの反射光です。

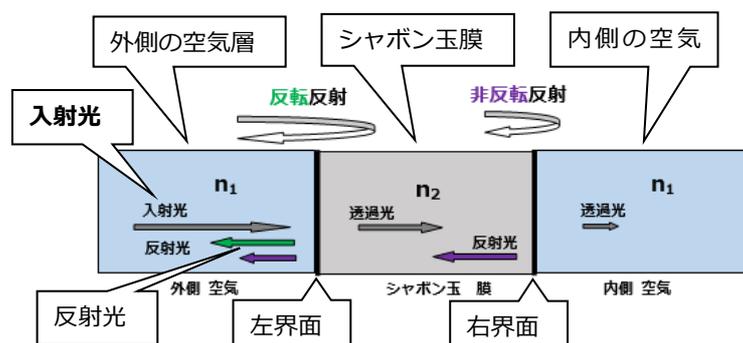


図1、シャボン玉<sup>1)</sup> 図2、シャボン玉の膜を空気層で挟んだ時の光の反射と透過

上図2の状態での反射光の干渉条件は下の通りです。

- 強め合う場合：同じ位相 → シャボン玉膜の往復の光学長が半波長の奇数倍
- 弱めあう場合：逆位相 → シャボン玉膜の往復の光学長が半波長の偶数倍

## 2. シャボン玉の膜で起きる光の干渉をシミュレーションした。

シャボン玉の膜でおきる光の反射・透過・干渉をシミュレーションしました。結果を図3<sup>2)</sup>に示します。図は光の進行方向位置を横軸に、縦軸を電界強度とし、定常状態における一瞬を切り出したものです。進行波、反射波とこれらが干渉した結果である合成波を表しました。反射光が目に見えるシャボン玉の映像です。条件は入射光の波長を600nm(赤色)とし、シャボン膜の厚さと屈折率をそれぞれ100nm、1.5としました。

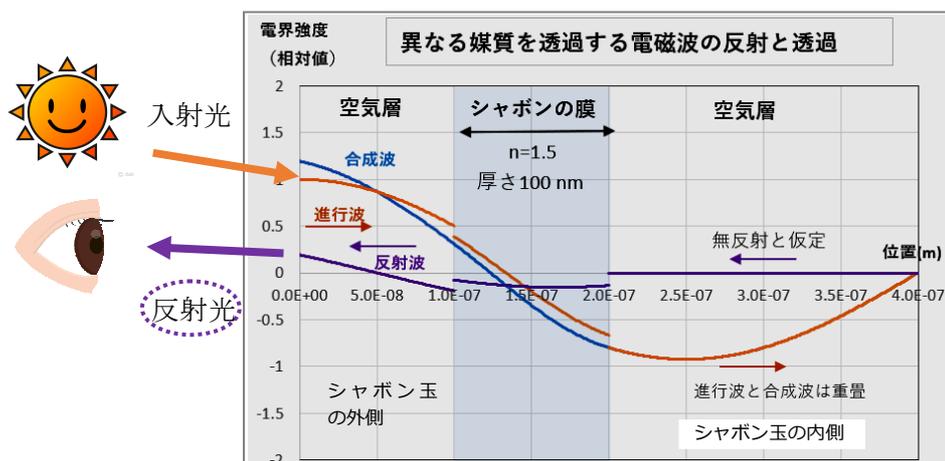


図3、空気層でシャボン玉の膜を挟んだ時の光の反射と透過

上図のシミュレーションソフトは、竹下の友人である Ultraman-Genius 氏に提供いただきました。

## 3. 無反射コーティングのからくり

以前より気になっていたレンズの無反射コーティングについて調べました。この原理は反射防止膜の厚さを調整することで、それぞれの界面で生じる反射波を逆位相の関係とし、干渉によりこれら反射波を相殺することと分かりました。

図4<sup>2)</sup>は無反射コーティングのシミュレーションです。空気層に挟まれた反射防止膜の厚さを100nm、屈折率を2とし、波長400nmの光が入射したと仮定しました。膜厚の往復光学距離を入射光の1/2波長にすることで、反射防止膜の左右界面で生じた二つの反射波は入射側空気層で逆位相になり、干渉により相殺されます。

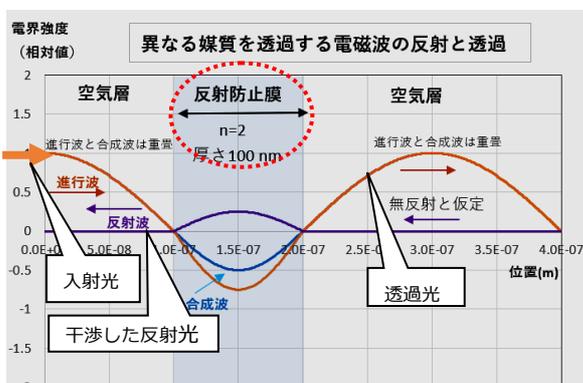


図4、無反射コーティングの原理<sup>2)</sup>

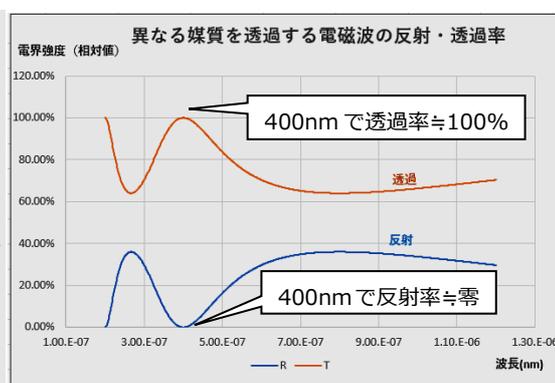


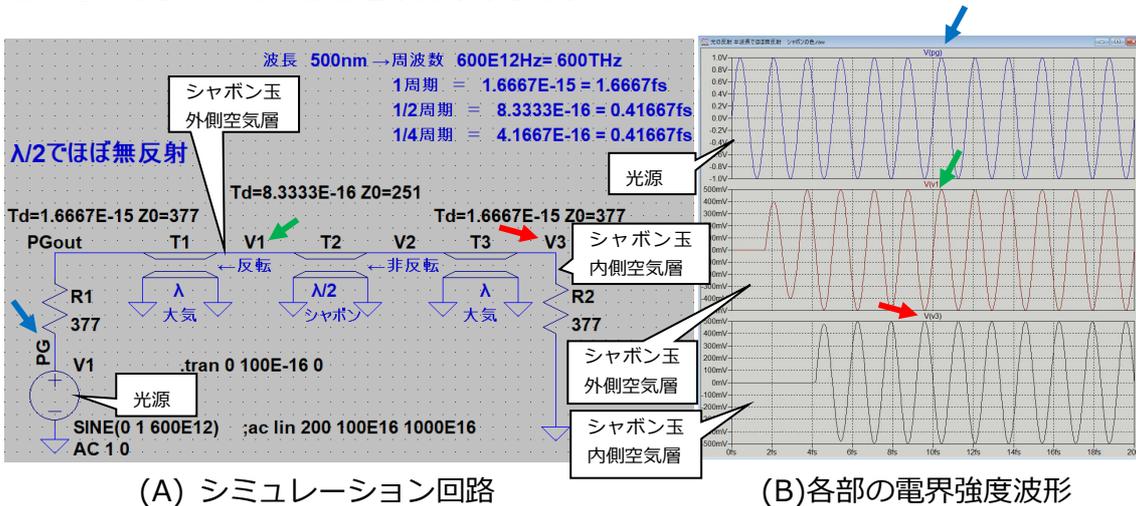
図5、反射率の波長特性

#### 4. LTspice で無反射コーティングをシミュレーションした。

LTspice で無反射コーティングの原理検証をシミュレーションしました。緑色に当たる周波数 600THz の光が、厚さ 1/2 波長のシャボン膜を透過する設定です。LTspice は、反射波と進行波を分けての表示ができず、干渉した結果のみのグラフとなります。

図 6 (A) のシミュレーション回路では、光源 (PG) からの出力が、空気 (T1) →シャボン膜 (T2) →空気 (T3) と伝わる構成を伝送線路で表しました。空気の実インピーダンスは、ご存じの様に  $120 * \pi = 377\Omega$  です。シャボン膜は、屈折率が約 1.5 より、特性インピーダンスを  $377 \div 1.5 = 251\Omega$ <sup>3)</sup> として計算しました。

結果である図 6 (B) の波形は上から、光源、シャボン玉外側の空気層、シャボン玉内側の空気層における電界強度です。定常状態に至るとシャボン玉外側空気層の電界強度は、光源のちょうど半分です。これは反射がないことを意味します。また、シャボン玉内側空気層の電界強度も光源出力の半分であることから、反射が無く、光エネルギーが最大効率で伝わっていることが分かります。



(A) シミュレーション回路

(B) 各部の電界強度波形

図 6、伝送線路による無反射コーティングのシミュレーション

#### 5. 干渉を利用したノッチフィルタ

波の干渉は、高周波伝送でも利用されています。STUB を使った周波数フィルタが一例です。図 7 は OPEN STUB を使った、マイクロストリップラインによるノッチフィルタです。電磁界解析による表面電流分布が併せて表示されています。<sup>4)</sup> OPEN STUB の長さを阻止したい周波数の 1/4 波長にすることで、開放端面からの反射波の位相が STUB の分岐部で反転となります。この結果、分岐部で入射波と STUB 端からの反射波は干渉により相殺され、出力端に伝わりません。

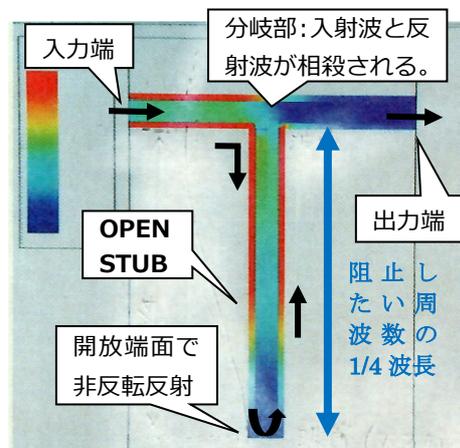


図 7、ノッチフィルタの表面電流分布<sup>4)</sup>

図7の電磁界解析に加えて、OPEN STUB型ノッチフィルタの周波数特性をLTspiceでシミュレーションしました。阻止周波数は100MHzです。シミュレーション回路を図8(A)に、周波数伝達特性を同図(B)に示します。

図8(B)より、100MHzにて伝達効率が大きく下がっており、ノッチフィルタができていることがわかります。入射波とOPEN STUBからの反射波の位相関係が逆相となる100MHzの奇数倍周波数でも、同様に伝達効率が下がっています。

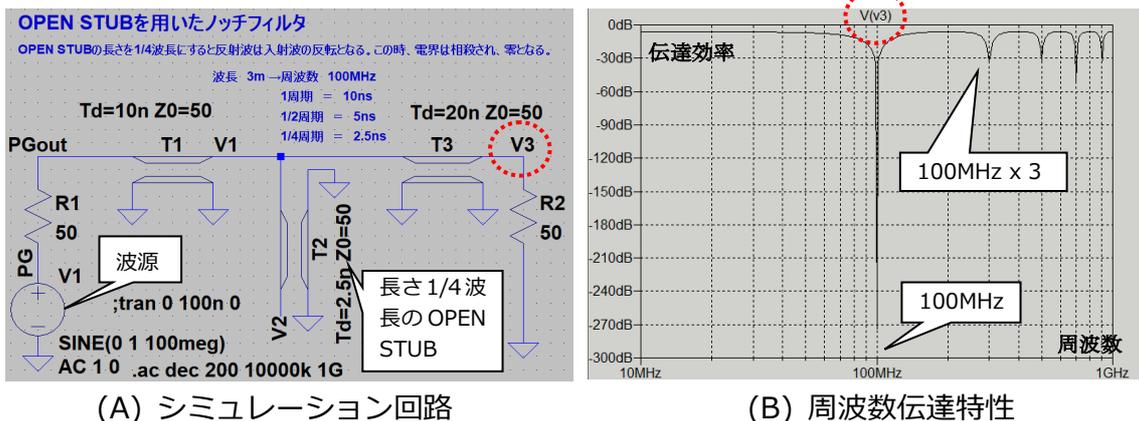


図8、OPEN STUBによるノッチフィルタ

## 6. まとめ

光は周波数の高い電磁波であり、位相により電界強度が変化することから相互に干渉を起こします。本稿では、この干渉によりシャボン玉が七色に見えることを述べました。また、無反射コーティング膜は、それぞれの界面で生じる反射光の位相関係を逆相とし、干渉により反射波を相殺していることを検証しました。加えて、干渉を利用している身近な応用例としてマイクロストリップラインのノッチフィルタを挙げました。

ここで改めて考えますと、共振や発振も波同士が強め合う干渉現象です。次回は干渉の応用である「レーザー光」について考察します。半導体レーザーは電気電子技術者として馴染みがありますし、光の量子的な振舞いが現れています。半導体レーザーの発光を例にして光の波動性と、加えて量子性について考えます。

乞うご期待です。！？ ちょっときびしいかも。

## 引用文献

- 1) シャボン玉のフリー画像 <https://www.bing.com/images/search?view>
- 2) Great\_杉浦氏提供 自作シミュレータ
- 3) SHARING#105 P.68 ⑥式 「ガラスが消える1？」竹下
- 4) トランジスタ技術 分かる高周波回路新設計法 AUG.1992 P.261

(以上)