

思想行維の技術相談 [019]

「アルゴン・プラズマの温度計測」

《技術相談.com——は、(株)技術開発総合研究所®の登録ドメインです》

《相談内 1》

「アルゴン・プラズマ」の温度を計測したい。温度は、「3,000~4,000(°C)」程度だと思いますが、相対温度であっても OK です。安定した温度で制御する為には、温度測定が不可欠です。現在の測定技術では、プラズマの温度を知る術を知りません。宜しくお願い致します。

【三菱ガス化学(株)新潟工場品質管理課 E L 班、落合 様】

《まえがき》

「落合」様のご相談を受けて、私は、2つの昔の事を思い出しました。一つが、①私が18歳の頃の「宇宙少年」で、「宇宙」に関する書籍を読み漁り、「東京大学航空宇宙技術研究所」がペンシル・ロケットを開発している時に、我が凡友の「旋盤工——吉田順——(東京都荒川区東尾久 在住)」君と、「φ60×L350(mm)」のロケットをイタズラ開発 {参考—1—①} していた事と、そして、二つ目が、②私が上智大学在職中に、当時の「上智大学大学院理工学研究科・機械工学専攻の「伊藤宏——」君 {(現)東京都立航空工業高等専門学校 機械工学科 助教授} に、差し上げた研究テーマ——《ラジカルの発光強度による瞬時空燃比の計測》 {参考—1—②}、の事です。

約30年位も前の、非常に古い話ですが、「(故)東京大学名誉教授 平尾 収」先生が主催していた研究会の席上で、私が、《多気筒ガソリン機関の混合気分配計測法》 {参考—1—③} について話題提供した際に、『マニホールドをいたてエンジンによってその息をえるとキリシンのののがるんがな』と何気なく言われた「平尾」先生の言葉です。その言葉が、私の心に強く残りました。

丁度、日々見ている“青空や茜空”について、考える機会が何もないければ、「今日は、綺麗だな〜」等の感慨だけで、それ以上の関心も無く、その物理的意味を知ろうともしません。私も、『排気の色——**燃焼ガスの色**』が違ふ事は、実験で認識していました。しかし、「平尾」先達 {= の の て つ の て す る が う ま し た } の話を伺うまでは、「それ以上を考える」事は無かったのですが、それを契機に、私の頭の中で、「**何故、排気弁を通る——燃焼ガスの色が違うのか、この現象を用いて、空燃比(=燃料に対する空気の重量割合)を確定できないか?**」との思いが湧き上がり、それ以後、頭の中でズット暖めていた研究課題でした。

偶々、「伊藤」君から、修士(博士)課程の研究テーマについて相談を受け、「が の て り て い た て ま の て に が しく (しかも) これを が が た ら ば の の て ま に る に な ら ば げ て も い 」

との想いから、私が大切にしていた“このテーマ”を、彼の修士(博士)課程の研究テーマとして上げた次第です。

何故、今回のご相談の“**まえがき**”でこんな古い話を出したのかと言いますと、物体の《**温度**》を上昇させますと、**図 1** {=余り良い表現では有りません} に示すごとく、「**固体**」→「**液体(分子)**」→「**気体(分子/ラジカル)**」→「**原子(プラズマ)**」と変化し、3,000~4,000(°C)の高温領域での温度計測には、「**ラジカルの発光強度計測**」が一つの方法である事を言いたかったからです。

例えば、「メタン・ハイドレード (MH, Methane Hydrate) (別名; **燃える氷**)」と言うメタン・ガス(CH₄)と水(H₂O)が高压下、0(°C)に近い温度で、水分子にCH₄が取り込まれて出来た“**抱接化合物**”を、酸素環境下で加熱しますと、固体の内は、「①伝熱」で熱が伝えられます。更に、加熱しますと、「メタン、水蒸気、酸素」の「②分子運動」で、そして、更に加熱しますと、「酸素との反応により燃焼」を生じ、ラジカル(分子)が発生します。それを更に加熱しますと、分子も壊れ、「③原子運動(プラズマ)」で熱が伝えられます。この表現(例)は、本当は余り良く無

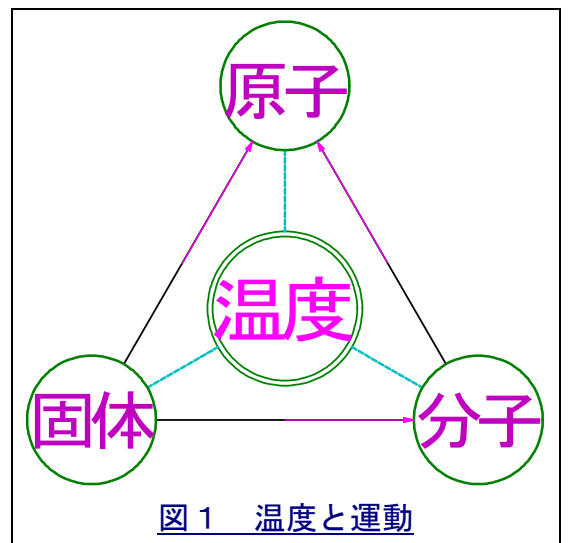


図 1 温度と運動

いのですが、温度の上昇が、「相変化無し」→→「相変化」→→「反応(ラジカル)」→→「分解(プラズマ)」の状態変化を生じることを説明したかったのです。そして、この「矢印」に移行するに付随して、“目で見える発光現象”を生じる事です。また、その他にも、「目に見えない発光現象——赤外線」が温度上昇に比例して、増加する事です。すなわち、ご質問の「温度領域」では、通常の接触式温度計測は不可能【できない はないが とうみを えてしまう】で、「赤外線やラジカルの発光」等の“光”による計測と成ります。

なお、「ラジカル(Radical)」あるいは「プラズマ(Plasma)」の表現ですが、明確な定義が有るのか否か不明ですが、回答者としては、①「固体—液体—気体—プラズマ」としての“第4の物質状態”としての「プラズマ」{参考—1—④}、②実際の意味は同じであるが、化学領域での「ラジカル(=正式には、フリー・ラジカル)」と物理学領域での「プラズマ」の表現、③燃焼等の反応領域での「ラジカル」と、放電・宇宙領域での「プラズマ」の表現、④身近な領域での「ラジカル」と巨大エネルギー領域での「プラズマ」表現、のように、感覚的に使い分けているのが現状です。但し、何れも、同じ状態を表現していると考えますが、回答者は、慣例的に使い分けしているため、ここでも、この2つの表現をしておりますが、この点、ご容赦下さい。

ある『新しい技術開発』を行なう場合には、それを取り巻く周辺情報を、総て収集・理解する事が重要と、回答者は思います。このため、ここでは、「ラジカル(プラズマ)」、「光(電磁波)」、「高温物体」に関して、脈絡なく触れて置きました。本論とは外れる部分が多々ありますが、「落合」様に置かれましては、必要な所、興味を引く所のみ、参考にして下さい。

**「温度」現象は、分子運動←←(反応)→→原子運動からなり、
反応が伴う場合や高温の場合は、<赤外線>以外に、<ラジカル発光>現象等を伴う。**

例えば、ガソリン等の炭化水素系燃料が燃焼しますと、「 C_2^+ 」、「 CH^+ 」、「 OH^- 」ラジカルが生成します。そして、空燃比が大きくなる(=燃料に対して空気の量が多くなる)に連れて、観測される発光色(=火炎の色)が、『赤→橙→青→白』に変わります。そこで、火炎の色を決定する要素{この っの のラジカル ぼ (伊藤君の研究成果)}により、エンジン内の局所空燃比等を“μ秒”で瞬時計測できないか、と考えた訳です。

但し、エンジンの場合は、デポジット(Deposit){=堆積物}等の影響が有るため、それら各成分の強度計測だけでは問題が有り、実際に空燃比計測するためには、ある一つの工夫が必要と、当初から考えておりましたが、その方法について、誰にも教えないまま、現状に至っております。

「伊藤宏一」君が、修士～博士課程で行なった成果を纏めた、博士論文の審査提出の際、上智大学・大学院卒業生で、当時、東京都立工業高等専門学校に奉職していた「古川純一」君{(現)同工業高等専門学校 教授、専門分野=燃焼学)が、私の上司の「五味 努」教授{(現)上智大学名誉教授)に、<<この ラジカルの ぼ による の にするんらの ぼ になる になつて いる>>と言ったとの事で、「五味」先生から、私は呼ばれて、『が この の ぼ に らない に している と っているけど ば なのか』と私は聞かれた訳です。そこで、私は、『ですヨ セば いんで しまう』と即答しました。

その当時、「古川」君は、燃焼研究の大御所であった「河野通方」{(現)東京大学名誉教授}先達の所に入出入りをしており、私としては、“虎の衣を借りた発言なのか?”あるいは、“河野」先生ご自身のご発言なのか?”思案しつつ、『理論的且つ具体的な問題点指摘がなく、論文そのものをダメ発言』する、彼の研究者に有るまじき態度に、大変憤慨しました。

こういった背景が有ったものですから、その後、「河野」先達から、「伊藤宏一」君に戴いた「質問状」に回答するに当たり、あらゆる角度から思考を重ね、私としてその当事考えられる最良の回答を認め、先生に提出させて戴きました。

また、「に らない が している」との「古川」君の発言に立腹していたため、不遜にも私は、「河野」先達には、大変辛辣な回答を起案し、「伊藤宏一」君にしてからが、『こんな て いの ですか』と大変心配させた次第です。しかし、私は、先達には大変失礼ながら、『け が のんら なら ば ずや を さされる であるう もし そうで なかったら ぼ を めなさい』と言って、そのままの文言で回答させて戴きました。その背景には、『理論構築や技術開発は、真剣勝負である』との私自身の想いが有ります。結果として、彼一「伊藤宏一」先生の博士論文は、無事審査を通り、彼には、博士号が授与されました。

その後、この研究には、(株)堀場製作所<<<http://www.jp.horiba.com/>>>の「堀場」社長様からも関心を戴き、私に話を聞きたいとお話があり、社長以下20名位の社員の前でお話をさせて戴いたことが有ります。しかし、その後、私

も、上智大学を飛び出した事と、「伊藤」先生もその後の研究継続しないまま、今日に至っております。

今回、「落合」様の「**技術目言炎**」を受けて、改めて、若干の調査を行なったところ、「2001年09月」に、《局所火炎発光 (OH*、CH*、C2*) 計測によるS Iエンジン内のA/F特性 {金子 誠(神戸大学大学院)、池田 裕二・中島 健(神戸大学)} 》の発表の中で、『**CH*とOH*の比とC2*とOH*の比は、各サイクルのA/Fの計測に利用できることを確認した**』との報告や「エネルギー使用合理化燃焼等制御システム技術開発(最終評価報告書)〈平成12年03月〉 {「エネルギー使用合理化燃焼等制御システム技術開発評価委員会」(委員長：正田英介 東京理科大学教授)} における下記の評価報告 {**参考—2**} が有り、約30年前の私の洞察(=技術考案)に、やっと追いつき始めている状況かな、と当時を懐かしく回顧させて戴きました。

なお、蛇足ですが、回答者(**本望行雄**)等が、約25年も前に、その可能性を洞察(技術創出)した証左として、《エンジンの空燃比計測装置(特・出願番号 63-136121) {《註》商品化の意図が無いため審査請求は取り止め} **【内容：燃焼光中の3種のラジカル相対発光強度を計測して、局所の空燃比を瞬時計測する方法】** 》として、特許申請(共同出願)していた経緯があります。

エンジンの燃焼光の色を決定する「**ラジカル発光強度**」により、
局所の**〈燃焼時空燃比〉**等を決定する事が可能！！
また、この「**ラジカル発光強度**」には、多くの「**燃焼情報**」が溢れている！！

—参考— 1

- ①噴射試験用も含め、合計=52機のロケットを試作し、「 $\phi 60 \times L 350$ (mm)」のロケットは、私の最終開発品で、約1(km)の飛行能力を有していました。しかし、ノズルの絞り比を大きく設計し過ぎて、爆発し、私は、太股を損傷しました。ぶつかった位置が、あと5(cm)ずれていたら、今、右足の消失等の大変な事態に成っていた筈です。若気の至りで製作しましたが、今現在、この最終製作ロケットは飛ばなくて良かったと思っています。その理由は、「荒川河川敷」を、我が試験場として飛行実験していましたが、このロケットは、前述のように、1(km)の飛行能力を有しており、万一、方向性を間違えると、市街地に飛び可能性も有り、今、思い出すと、随分、危険且つ無茶な事をやっていたと思います。なお、この「ロケット」を製作した、凡友の「**吉田**」君は、私の無理な求めに応じ、ステンレス製のプラントル・ノズルを1(mm)の薄さで切削する“超名人”で、その後、出合った旋盤工の中でも、3本の指に入る“**超職人**”の一人です。
- ②《ラジカルの発光強度による瞬时空燃比の計測》 伊藤宏一、本望行雄、五味努、(社)日本機械学会論文集、No.52 巻481号]、その他。
- ③《多気筒ガソリン機関の混合気分配が機関性能に及ぼす影響(空気・燃料分配の測定法)》 本望行雄、能城一郎、五味努、(社)日本機械学会論文集 No. 770-09(1977年8月21日~23日)
- ④「**本望**」の“非理論(感覚)”では、第4の物質——「**プラズマ**」の次に、「**無(Origin)**」が有ると考えます。その状態は、「原子、電子」が分解され、素粒子構成される**〈物質状態——ブラック・ホール〉**です。しかし、我々とは触れ合う事ができないため、現実的な物質状態は、「固体、液体、気体、プラズマ」と成ります。

《エネルギー使用合理化燃焼等制御システム技術開発(最終評価報告書)》——参考— 2

OH、CH 及び C2 ラジカルは、それぞれ波長 308(nm)、432(nm)、516(nm)に強い発光スペクトルを有している。これらのラジカル発光は、空気比などの燃焼状態の変化によって強度比が変化する。燃焼制御システムにおける火炎スペクトル・モニターに必要な 3C-SiC を Si 基板上に、ヘテロエピタキシャル成長させる技術を開発した。Si 表面炭化、3C-SiC(001)成長表面についての機構説明、MBE の精密制御好防、CVD の高速成長を利用し、3C-SiC の高性能化を行い、火炎の 431(nm)波長 {CH ラジカル} 及び 517(nm)波長 {C2 ラジカル} の発光に対して感度を有する、光センサーの作製に適用した。燃焼等制御システムの調査研究を行い、各種燃焼機関の現状調査を行ったのみならず、燃焼炎のラジカル発光スペクトルに基づいて、空気比制御(燃焼制御)を行う、新しい燃焼制御法を提案した。ブタンガス火炎の OH {308(nm)}、CH {432(nm)} 及び C2 {516(nm)} ラジカル発光の強度比と空気比の関係を利用し、発光スペクトルの測定値から空気の出送量を制御する、燃焼制御システムのモデル実験装置を試作し、システムの基本動作を確認した。ラジカル発光の検出には、本プロジェクトで開発した 6H-SiC-UV フォトセンサー {308(nm)}、3C-SiC フォトセンサー {431(nm)} 及び市販の Si フォトセンサー {516(nm)} を使用した。従来の燃焼炎の発光に基づく燃焼制御は、燃焼炎の検出が主であるが、本研究開発において、燃焼炎の発光スペクトルに基づく燃焼制御を実現したことは最先端の成果である。

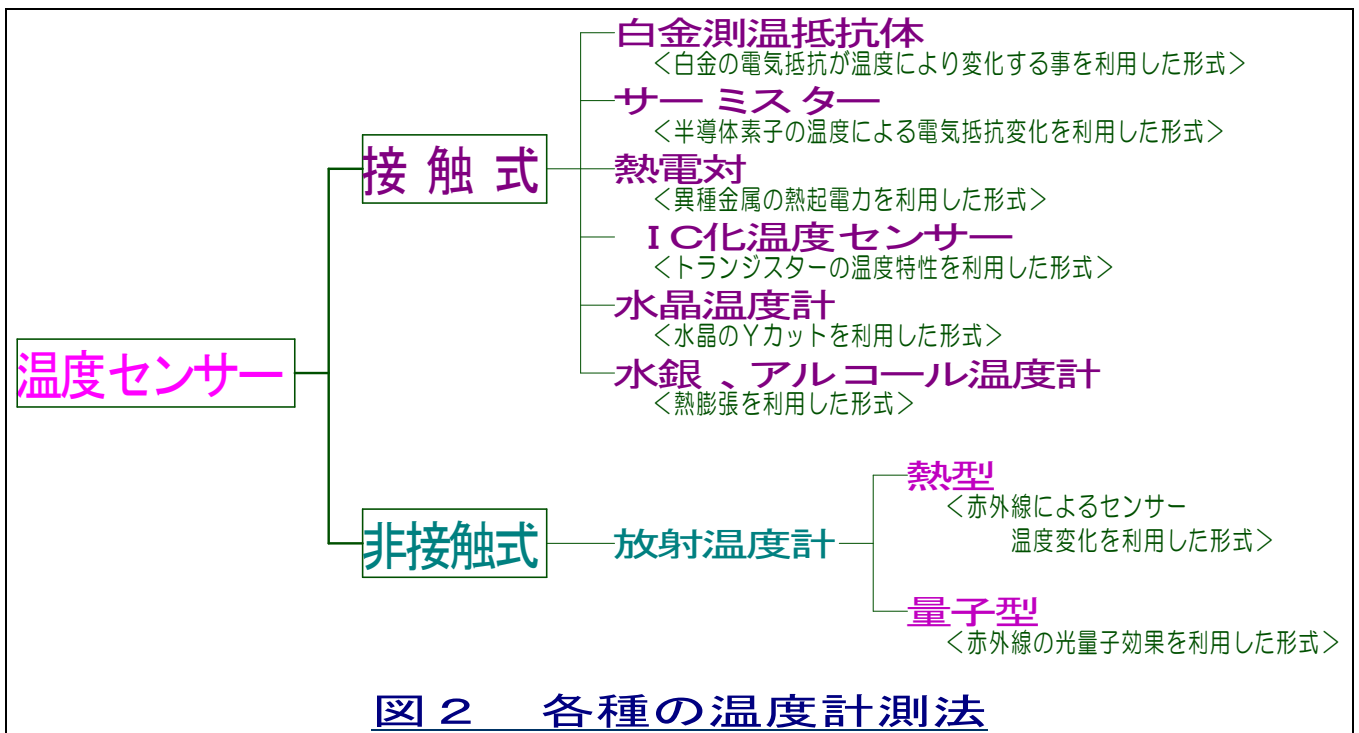
《(株)イオン工学研究所——(<http://www.ion-eng.co.jp/index.html>)》

《高温計測の現状について》

今回のご相談の《アルゴン・プラズマ温度計測》には適用できませんが、基本計測方法が同じ事、また、他の人への参考に供するため、最初に、現状の『高温計測方法』について、見てみましょう。

図2に、各種の温度計測法を示しますが、1,500(°C)を越える“高温計測”には、接触式の計測法は不可能で、「**非接触式計測法**」しか適用できません。しかも、この「非接触式計測法」としては、現状では、《放射温度計》しかありません【できない はないが ほうみを えていもう の が る】。市販の《**放射温度計**》は、熱源から赤外線が放射される事を利用したもので、①**熱型**——<赤外線を受けたセンサー素子の温度変化を利用したもの>と②**量子型**——<赤外線の光量子を受けたセンサー素子の変化を利用したもの>があります。

《①熱型センサー》は、赤外線を受けることにより、受光部分の温度が上昇する事を利用したもので、この温度上昇によって起こる『焦電現象や熱起電力』の変化などの電気的性質を、電気信号に変換します。この熱型センサーとしては、『焦電素子』、『サーモパイル』等があります。また、《②量子型センサー》は、赤外線を受けると、センサー自体が直接励起され、電力的な性質に変化を生じます。この変化量を電気信号に変換します。この量子型センサーには、『シリコン・センサー』、『ゲルマニウム・センサー』などがあります。



これらの《放射温度計》の基本は、《我々の身の回りにある総ての物体が、赤外線を放射している！！》に有ります。すなわち、『赤外線エネルギー』を測定して、物体の温度を決定する方法が、前掲の“放射温度計”の原理です。「**物体の温度**」を変化させると、「放射される赤外線の強さ」や「赤外線の波長」が変化します。ある波長で固定して見た場合、「温度が高くなるに従って、赤外線エネルギーが急激に増加」します。この事を利用して、ある特定の波長をあらかじめ決めて、その波長の赤外線エネルギーの強さを測定すれば、その物体の温度を知ることができます。これが赤外線を利用した温度測定の原理です。

「放射温度計」の原理からは、全温度範囲の温度測定が可能ですが、赤外線エネルギーの弱い物体を測定する場合（＝温度が低く、長波長測定）は、測定波長域を少し広げ {例えば 8~14(μm)の範囲} て、その波長域間の赤外線エネルギーを全部集めることによって計測精度を上げて、温度測定するようにしています。

赤外線の全波長域の全面積を求めても温度が分かります。しかし、大気中にある“水蒸気”や“炭酸ガス(二酸化炭素)”は、ある特定の波長域の赤外線エネルギーを吸収する性質が有ります。このため、測定物体までの距離などによって赤外線エネルギーの吸収度が変わり、全波長域の赤外線エネルギーを検出して温度計測する事は難しい面が有ります。このため、現実には、『特定の波長域』を選んで測定します。つまり、「波長」と「赤外線エネルギー」の関係から、全波長の赤外線エネルギーを測定しなくても、特定の波長域の赤外線エネルギー量を測定すれば、温度として変換できるのです。

大気による吸収がない「1.7(μm)」と「10(μm)」の波長を比較すると、①1.7(μm)では、赤外線エネルギーの放射が低温域では殆んどなく、高温域で強い特性を有しています。また一方、②10(μm)では 1.7(μm)に比べて、低温域で赤外線エネルギーの放射が強く、高温域では弱い特性を有しています。すなわち、この結果から、**高温の温度測定**には「1.7(μm)」の方が、また、**低温の温度測定**には「10(μm)」の長波長の方が適していることが分

かります。また、ピーク（赤外線エネルギーの頂上）の描く軌跡（特性曲線）は、高温ほど短波長側に、低温ほど長波長側に寄っています。このことから、短波長側を高温測定に用い、長波長側を低温測定に用いるのが一般的な波長域の選び方と言えます。このような特性から、市販の放射温度計では $1(\mu\text{m})$ 付近の短波長を $600(^{\circ}\text{C})\sim 3,000(^{\circ}\text{C})$ の高温域測定に用い、 $10(\mu\text{m})$ 付近 ($8\sim 14(\mu\text{m})$) の長波長を $-50(^{\circ}\text{C})\sim 1,000(^{\circ}\text{C})$ の低温域測定に用いています。

また、可視光線の領域では、光を良く反射する物体は「**白く**」、そして、光を反射せず吸収する物体は「**黒く**」見えます。同じように赤外領域でも、赤外線を良く反射するものを「白い物体」と言い、吸収するものを「黒い物体」と表現しています。そして、あらゆる光を完全に吸収する物体を「**完全黒体**」と言います。また、赤外線を良く吸収する物体ほど、赤外線を良く放射する関係にあります。

『**完全黒体**』は光を反射せず、あらゆる光を吸収し、プランクの放射法則に応じた赤外線を放射します。しかし、現実には同じ温度の物体でも、材質や表面状態などによって、それぞれ、赤外線の放射量は違っています。実際の物体は、完全黒体に比べ赤外線を放射する割合は少なくなっています。この完全黒体の特性曲線と実際の物体の特性曲線の面積比を、『放射率』と呼んでいます。完全黒体の放射を「**1**」として算出していますから、通常の物体の放射率は総て「**1以下**」ということになります。放射温度計で実際の物体を測定する場合は、本体に、放射率を設定する機能が備えてありますから、様々な物体の正確な温度測定が可能です。実際には、それぞれが採用している測定波長 {例えば $8\sim 14(\mu\text{m})$ } の面積比が放射率になります。また、放射率は、放射温度計の測定波長によってそれぞれ異なりますので、放射温度計であればすべて同じ放射率になるとは限りません。

ご質問者の「計測環境」がどのような構造になっているか、不明ですが、「放射温度計」の欠点として、「**①**計測窓 (Glass-window)」あるいは、「**②**オプティカル・ファイバー (Optical fiber)」を介して、温度情報を入手する事が必要です。「ガラス」は、約 $2.5(\mu\text{m})$ より短波長を透過、長波長——赤外線を吸収する性質を持っています。したがって、放射温度計でも、約 $2.5(\mu\text{m})$ より短波長を使う放射温度計（一般に中高温用）は、ガラスを通して測定できます。しかし、約 $2.5(\mu\text{m})$ より長波長を使う放射温度計（一般に低温用）では測定できませんが、今回のご質問の「アルゴン・プラズマ温度計測」においては、後述するように、上記の「**①**」、「**②**」の方法による“ガラス”影響は関係ないため、計測対象の装置に最適な、いずれかの方法を採用致します。

市販の<高温—放射温度計>では、「 **$1(\mu\text{m})$ 付近の赤外線**」を利用して計測。
温度情報の採取のための、最適な「**Measuring-window**」を取り付ける！！

＜温度と光について＞

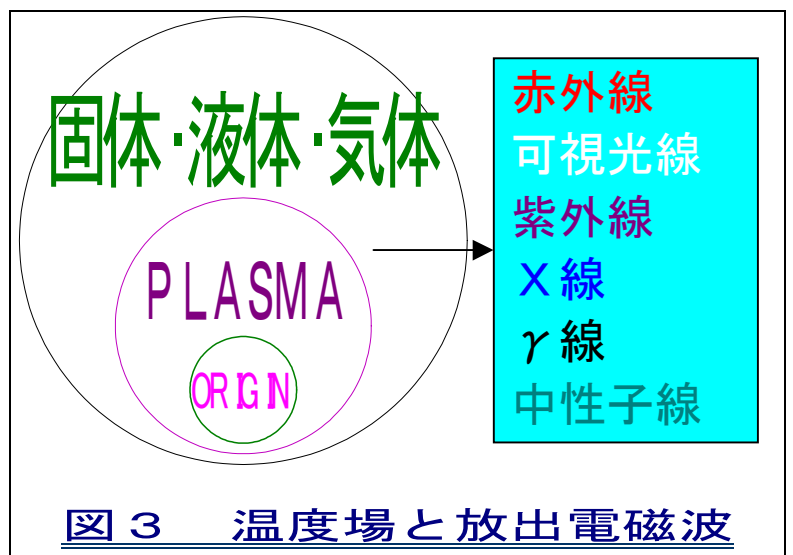
「太陽光」を観測すると、実に、様々な光の成分からなっています。「光」の正体は「光子」で有り、「光子」はフォトン (Photon) あるいは「光量子」とも呼ばれ、光（一般に電磁波）のエネルギーを担う<基本的粒子>です。

私達は、「光」と言うと、一般的に、自分の目で見える「可視光」を思いますが、「光」の正体は、<電磁波>で、電磁場の振動が波として、真空中または物質中を伝搬する現象です。真空中を伝わる平面波は光速で進行し、電場と磁場の振動方向は互いに垂直で、共に進行方向に垂直です。

『電磁波』は、波長の短い方から、 γ 線、X線、紫外線、可視光線、赤外線、電波等に分類され、実に、多種多様です。1864年に、マクスウェルが、理論から“電磁波”の存在を予言し、1888年には、ヘルツが、電気火花により実証しました。「量子理論」によれば、電磁波は粒子の性格を持っており、電磁波の粒子的性質が問題になる時、振動数 ν の電磁波は、エネルギー $h\nu$ と運動量 $h\nu/c$ (h はプランク定数、 c は真空中の光速) を持つ光子の集合と考えます。この考えは、1905年、アインシュタインが光電効果を説明するため、光量子仮説として提唱し、その後、コンプトン効果や光化学反応により確認されました。

このことから、「**温度現象**」は、その温度領域から放射される「**光の振動数**」と「**その強さ**」を決定すると考える事が出来ます。別な表現で言えば、「**温度現象**」は、「**熱放射** (= 温度放射、熱輻射、温度輻射)」と一義的な関係に有り、「**熱伝導**」や「**対流**」と共に、熱伝達の一形態です。

「**熱放射**」とは、物体を構成する原子の集団が熱によって励起された結果、<電磁波を放射する現象>、あるいは



その電磁波を言います。この「放射エネルギー」と「スペクトル分布」は、<物体の種類と温度>だけで決り、温度が高い程、波長の短い放射が強く放出されます。我々の身の回り {=経験できる温度場の中} では、これらの電磁波の中で、「赤色可視光」～「電波」との間にある 700(nm)～1,000(μ m)の波長帯にあるものが「**赤外線**」と呼ばれ、我々が経験する身近な場では、この赤外線放射量が、温度(熱)との相関が強い事から、これを「**熱線**」と呼称して、この赤外線放射量から温度を計測する方法が、前掲の放射温度計(非接触温度計)の原理です。現在、放射温度計で利用している波長域は、その中の短波長——「700(nm)～14(μ m)」です。

『**赤外線**』は、上述のように、「可視光線の長波長端」～「マイクロ波のミリメートル波」に至る、波長約700(nm)～1000(μ m)の電磁波の総称で、1800年に、F. W. ハーシェルが、太陽スペクトルの赤色部外に発見しました。「波長=数(μ m)以下」を<近赤外>、「25(μ m)以上」を<遠赤外>に分け、「1.3(μ m)以下」を<写真赤外部>とも呼びます。

分子内の原子または原子団の振動・回転の周波数は、赤外線の周波数とほぼ同範囲にあるため、<あまり高温でない物体からの熱放射は、主に赤外線によって>行われ、また、外部から入射した赤外線は、物質原子と電磁的共鳴を起こしてその温度を高めます。短波長の赤外線はこの熱作用の他に、写真作用・蛍光作用(蛍光)・光電作用(光電効果)等を持ち、通信・写真・暗視・自動警報器・物質鑑定等にも利用されています。

なお、ある特定波長の赤外線を計測するために『入光する波長範囲を制限』するには、種々のフィルターや回折格子が使用されます。「赤外線用のプリズムやレンズ」は、水晶、ホタル石、岩塩、臭化カリウム等で作られます。

長波長の赤外線の検出には、熱電対やボロメーターを用いて、赤外線吸収による温度上昇を測定しますが、短波長域に対しては、約1.3(μ m)以下の場合、赤外線写真乾板、光電管、燐光(りんこう)体、約7(μ m)以下の場合、光導電セルや光電池、約40(μ m)以下の場合、亜鉛を不純物を含むゲルマニウム検出器が使用されます。

我々の身近な場での「**熱放射**」は、「固体」、「液体」、「気体」におけるものですが、その上に、「プラズマ」があります。今回のご質問の“計測物体”は、この「プラズマ」です。「**プラズマ**」とは、正負の電荷をもつ粒子(おもに陽イオンと電子)がほぼ同密度に分布し、全体としてほぼ電気的中性を保つ粒子集団の事を言います。普通の気体は、数万($^{\circ}$ C)以上でほぼ完全に電離し、プラズマになります。また、真空放電の陽光性、高温の炎、電離層、太陽・恒星の内部・外気、星間物質等も、プラズマの一例です。「プラズマ」は高い導電性を持ち、内部でほとんど電位差がなく、特有の疎密振動(プラズマ振動)を生じる等、「固体」、「液体」、「気体」物質と異なった物性を示すため、「第4の物質状態」と言われます。身近な現象の場合は、「熱放射」として、赤外線のみを考えれば(=計測すれば)良いが、太陽や超新星の場合は、更に、温度が高くなるため、図3に示すように、「**可視光線**」→「**紫外線**」→「**X線**」→「 **γ 線**」→「**中性子線**」→「**ゼロ**(=本望の独断表現)」と成ります。

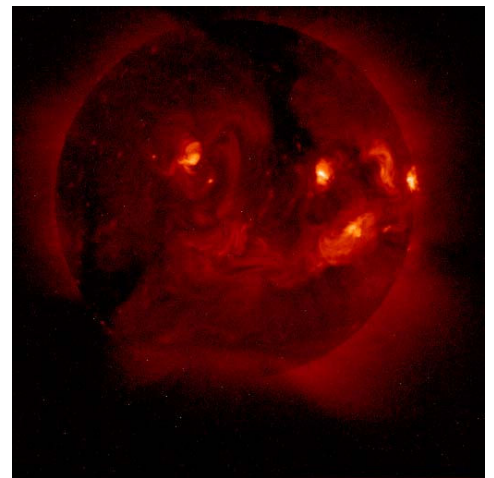


写真1 X線で見える「太陽」

写真1に、約6,000($^{\circ}$ C)と言われる“太陽”のX線写真<Internet Space Watching Release.2.1 Copyright ©1996-1997 Takashi Morimoto (e04406u@cc.miyazaki-u.ac.jp) and Miyazaki University Astronomical Laboratory により、引用>を示す。この写真より、「～4,000($^{\circ}$ C)」の温度で有りながら、「**光球**」による背面輻射の影響で、赤外線のみならずX線も放出されている事が分かる。

今回のご相談の「2,000～4,000($^{\circ}$ C)」の温度での計測では、「700(nm)～可視光線」の領域 {=アルゴンの発光スペクトルも含む} の放射光が対象となると考えます。但し、『開発研究を行なう場合』は、念のために、総ての放出電磁波のスペクトル調査も行なう事が重要です。

<温度場>では、「**熱放射** {電磁波(光)}」を生じ、温度が高くなると、

「**赤外線**→**可視光線**→**紫外線**→**X線**→ **γ 線**→**中性子線**」

と、熱放射される光の振動数が大きくなる

《～6,000(°C)～数億度の超高温》——参考— 2

※「**超新星**」は太陽の100億倍の明るさを有し、新星に似ているが、明るさが新星の100万倍にも達する。超新星には、I型とII型があり、光度曲線の形、スペクトルの特徴が異なる。「I型」には水素がなく、「II型」は水素を多く含み、化学組成は太陽に近い。「I型」は比較的年齢の古い軽い星の爆発で、「II型」は年齢の若い大質量の星の爆発と考えられる。恒星の進化の最終段階で起こる大爆発が、超新星現象で、その中心部に、「中性子星」が残るか、「ブラックホール」になるものと考えられる。

※「**中性子星**」は質量が太陽の1～2倍、半径は10(km)程度、内部の物質密度は1(cm³)当り10億(t)で、太陽の全放射量の1万倍のエネルギーを放射している。星が超新星爆発を起こし、外層が吹き飛ばされて残った中心核は、超高密度に圧縮されるが、その質量が太陽物質の約2倍以上の場合は「ブラックホール」に、2倍以下の場合は「中性子星」になると考えられている。

※「**X線星**」はX線源の通称。太陽の放射するエネルギーの1000倍を超えるエネルギーを、X線として放射しており、その多くは、中性子星、ブラックホール等の超高密度星と恒星からなる近接連星と考えられている。解放された重力エネルギーによって円盤をつくっている「プラズマの温度」は、「数千万～数億度の高温」になり、熱放射としてX線を放出する。

※「**ブラックホール**」では、重力が強いため、光を含め如何なるものもそこから脱出できない面(=事象の地平面)が存在する天体。「ブラックホール」を観測した時、「光も電波もX線」も出てこないで、宇宙の背景放射の中に全くの黒い穴として見える。ブラックホールを特徴づける第1の要素は、重力質量で、現実的に考えられるものとしては、①太陽の質量{2×10²⁷(t)}の10倍程度のブラックホール、②太陽の質量の「100万倍～1億倍程度」の超大質量ブラックホール、③10億(t)程度のミニブラックホールがあげられる。

《アルゴン・プラズマ温度の計測について》

最初に、参考のために、「2,000～4,000(°C)」に達する『**燃焼温度**』の計測について考えて見ましょう！

この領域では、《発生した“燃焼熱”により加熱された“気体”から放出される赤外線》を計測する事により、温度計測が行なわれます。すなわち、『赤外線を吸収・放出する気体』の存在がなければ、放射温度計での計測は出来ません。

このため、エンジン等の《燃焼ガス(火災)の温度を測る》場合は、温度計の測定波長を、赤外線を吸収・放射する——ガスの成分、例えば、二酸化炭素(4.24(μm))、一酸化炭素(4.64(μm))、酸化窒素(4.74(μm))等の吸収波長にそれぞれ正確に合わせて計測します。

空気等の『**気体**』や『**炎**』は、背後にある他の物質から放射される赤外線の一部を透過させるため、計測成分に合わせた「専用の放射温度計」が必要です。一般に、計測される放射強度は、測定物体の距離に反比例します。また、近距離の場合は、測定面積が小さいため、受光する赤外線量も少なくなります。一方、遠距離の場合は、測定面積が広く、受光する赤外線の量も多くなります。このように、両者の影響が相殺するため、単位面積当たりの赤外線量を測定する放射温度計は、近距離でも遠距離でも、赤外線量が同じになり、距離の影響は有りません。

また、程度にも拠りますが、赤外線は、水滴によって吸収・散乱させられます。すなわち、《**煙・粉塵・水蒸気などの存在、窓を介した測定、視野欠けがある**》・・・このような悪環境下では、対象物からの放射エネルギーが減衰するため、「**単色式温度計**」では正確に測定できない問題があります。この様な場合に有効なのが、「**2色温度計**」です。

「2色温度計」は、“異なる2波長帯での放射エネルギー”を取り込み、放射エネルギーの比より、既定の演算式で温度値が割り出され、出力されます。放射エネルギーが減少しても、2つの波長帯でのエネルギーは同じ様に減衰するため、比率は変わりません。「絶対エネルギー」が減少しても、比率が変わらなければ、正しい温度表示ができるとの理論に基づいた温度計が、「2色式」です。この方法は、測定対象物が小さい、対象物と温度計の間に部分的な障害物が有る等で、視野が完全に確保できない場合に、有効な温度計です。なお、「放射温度計」は、一般の温度計とは違い、「空気」の温度は測れません。その理由は、空気はほとんどエネルギーを吸収せず、従って放射するエネルギー量もきわめて少ない事によります。この結果、対象物と温度計の間に大気があっても、測温に影響がないため、『**アルゴン・プラズマ温度計測**』の際も、大気による影響を無視することが出来ます。また、『アルゴン・プラズマ』計測環境において、デポジット(**Deposit**) {=堆積物}等の付着影響も無いと考えられますので、観測窓若しくはオプティカル・ファイバーを介して計測しても、何ら問題がないと判断されます。

さて、我々の身近な存在である「**太陽**」は、今回のご質問者の対象物質である《**プラズマ**》から構成されます。このため、これを考える事は、一つの参考に成ると思います。すなわち、《**プラズマ**》状態の「**太陽**」からは、赤外線は勿論のこと、『**可視光線、紫外線、X線、太陽電波、太陽風**、等』の多くの“**光(電磁波)**”が放出されています。その内部では、4個の水素核から1個のヘリウム核に変わる<原子核融合反応>【(註)参考— 4に示すごとく、異論が有るが、回答者は、この理論では、エネルギー発生を説明できないと考える】により、『エネルギー』が放出され、太陽中心部の温度は「約1,500万(°C)」、周囲温度は「約6,000(°C)」、内部圧力は数千億気圧、物質密度は水の約100倍と推定されております。

《太陽の構造》——参考— 3

太陽は、「核」、「放射層」、「対流層」、「光球」、「低温層」、「彩層」、「コロナ」から構成される。

*「**核**」——太陽の中心は密度が $1.56 \times 10^5 (\text{kg}/\text{m}^3)$ で、「熱核融合反応」によって、水素がヘリウムに変換されている。1 秒当たりでは約 8.9×10^{37} 個の「陽子（水素原子核）」がヘリウム原子核に変化しており、これによって 1 秒間に 426 万トンの質量が $3.83 \times 10^{26} \text{W}$ のエネルギー（TNT 火薬換算で $9.15 \times 10^{16} (\text{t})$ に相当する）に変換されている。このエネルギーの大部分は「ガンマ線」に変わり、一部が「ニュートリノ」に変わる。ガンマ線は周囲の「プラズマ」と相互作用しながら次第に「穏やかな」電磁波に変換され、数十万年かけて太陽表面にまで達し、宇宙空間に放出される。一方、ニュートリノは物質との反応率が非常に低いため、太陽内部で物質と相互作用することなく宇宙空間に放出される。それ故、太陽ニュートリノの観測は、現在の太陽中心部での熱核融合反応を知る有効な手段となっている。太陽の中心核は熱核融合によって物質からエネルギーを取り出しているほとんど唯一の領域である。核の大きさは約 0.2 太陽半径である。

*「**放射層**」——太陽半径の 0.2 倍～0.7 倍までの層では、放射（輻射）による熱輸送を妨げるほどには物質の不透明度が大きくない。したがって、この領域では対流は起こらず、放射による熱輸送によって中心核で生じたエネルギーが外側へ運ばれている。

*「**対流層**」——0.7 太陽半径から 1 太陽半径までの層では、微量イオンが原因となって不透明度が増し、放射によるエネルギー輸送よりも、対流による輸送の方が、効率が良くなる。

*「**光球**」——光球より下の層では、太陽は電磁波に対して不透明になっている。光球より上では太陽光は散乱されることなく宇宙空間を直進する。光球の粒子密度は約 $10^{23} (\text{個}/\text{m}^3)$ である。これは地球大気の上層での密度の約 1% に相当する。光球よりも上の部分を総称して太陽大気と呼ぶ。太陽大気は電波から可視光線、ガンマ線に至る様々な波長の電磁波で観測可能である。太陽光のスペクトルは約 6000(K) の黒体放射に近く、これに太陽大気物質による吸収線（フ라운ホーファー線）が多数乗っている。光球の表面にはしばしば黒点と呼ばれる暗い斑点状の模様が現れる。黒点部分の温度は約 4000(K) と周辺に比べて低いため黒く見える。

*「**低温層**」——光球から 500(km) ほど上の領域は太陽で最も温度が低い層である。この領域の温度は約 4000(K) で、太陽の中で一酸化炭素や水などの分子が存在できる唯一の場所である。これ以外の領域では温度が高すぎるため、分子の化学結合は全て切れてしまう。

*「**彩層**」——我々が見ることのできる太陽表面の上には厚さ約 2000km の薄い層があり、この層から来る光には様々な輝線や吸収線が見られる。この領域を彩層と呼ぶ。皆既日食の始まりと終わりには紅色の彩層を見ることができる。

*「**コロナ**」——コロナは太陽大気の外層である。コロナは太陽半径の 10 倍以上の距離まで広がっている。コロナからは太陽風が出ており、太陽系と太陽圏 (heliosphere) を満たしている。コロナの太陽表面に近い低層部分では、粒子の密度は $10^{11} (\text{個}/\text{m}^3)$ 程度である。

《太陽は、プラズマ発光体？》——参考— 4

太陽とは核融合で燃える天体などではなく、巨大な地殻と海域を有し、分厚い大気圏がプラズマ発光する巨大天体です。宇宙の全ての恒星も同じメカニズムを持っており、アカデミズムが唱えるような「核融合炉」ではありません。その意味では、宇宙空間に存在する無数の恒星は、それぞれが凄まじい光エネルギーを放出するプラズマ放射天体です。恒星ほど巨大な天体になると、磁界は一つではなく、四方八方に向かって放射する特徴を持っています。そのため磁力線の交差が無数に発生することになり、太陽大気圏をプラズマ化させています。

これは磁場が無数に存在しており、太陽大気圏は高密度のプラズマ状態にあることを示唆しています。その小型版が、オーロラですが、太陽は桁違いのオーロラが渦巻く、凄まじいプラズマ大気現象の世界を持つ惑星です。巨大なプロミネンスも磁界のループであり、プラズマの巨大な太気光学現象なのですが、言い換えると、プロミネンスやフレアの数ほど磁界が存在し、無数の磁力線の交差が、大気プラズマを常時生み出し放出しているのです。プラズマは電波や磁力線でも発生するため、太陽が核融合炉でなくとも、核融合と全く同じ放射線を放出させることができます。だからこそ、アカデミズムはその部分で大きく錯覚する事になっています。なぜなら、核融合では、ガンマ線、エックス線、紫外線、可視光線、赤外線、電波等が放射されるが、プラズマも全く同じ放射線をだす事ができると言われているからです。すなわち、太陽が地球と同じような天体だとしても何らおかしい事ではありません。]

[1994 年 9 月] [7 日、太陽が南極上空 3 億 5200 万キロに差しかかった太陽極域軌道探査機ユリシーズは、アカデミズムの唱えるような、巨大な太陽磁極を全く発見できませんでした。代わりに発見したのは、螺旋の渦を巻く、無数の磁力線の無秩序な蛇行状態だったのです。この事実は無限大の磁力線交差を生み出す事を示唆しています。と言う事は、当然のごとく、太陽大気に一種の光学現象が無限に拡大し、太陽大気圏全体にプラズマ現象が発生することになります。すなわち、今現在、地球から見えている太陽の姿です。アカデミズムはこれを「核融合炉」という解釈でしか説明できません。太陽はプラズマ現象で発光しています。《<http://elbaal.hp.infoseek.co.jp/taiyo.htm>》より引用。

私は、エンジンの燃焼温度しか経験がないため、明確な判断は不可能ですが、「ご質問の 3,000(°C)→→→→太陽表面 {「**低温層**」～「**光球**」} の 4,000～6,000(°C)」の領域では、『**赤外線**～**可視光線**～**紫外線**(?)』の放射の内、『**可視光線**』が支配的と考えられます。そして、「太陽“**核**”での、～1,500万(°C)」の

領域で、『**可視光線**～**紫外線**～**X線**～**γ線**』の放射が行なわれているのではないかと推察される。

すなわち、『**アルゴン・プラズマ温度計測**』を行なう場合に、(1) 最も手っ取り早い方法は、既存の「放射温度計(非接触温度計)メーカー」に相談する事で有り、(2) 独自開発を希望する場合は、①現状での『**赤外線**～**可視光線**～**紫外線**(?)』のスペクトル(Spectre)解析に合わせて、②「**アルゴン発光スペクトル・センサー**」を製作して、～1,500(°C)雰囲気での基礎データを採取し、外挿法による温度計測技術の開発研究を行なう事と考える。

「アルゴン・プラズマ」温度計測は、<アルゴン>スペクトルを計測して求める。
このためには、①「**市販メーカー**」に相談するか、②「**自社開発**」する！！

【文責；(株)技術開発総合研究所® 本望 行雄】
(2006年03月05日記述)

<本望行雄>の選ぶ——『七十七賢人』

《**平尾 収**》先達は、“物事”の本質を捉える「直観力」と「洞察力」、そして、理論体系を構築される能力に卓越しておられ、先達の“涼しく光る眼”の中に、**X線**のごとき“力”を感じた。私は、先達から、①「話をする時に、話をする相手に合わせなさい」、②「常に前に出なさい、しかし、出過ぎてはいけない」、③「来る者は拒まず、去る者は追わず」、の3つの事を会得させて戴いた。私が勝手に思う“**心の師**”である。

《参考資料》

《**可視光線**》とは、電磁波のうち、人間の目で見える波長のもので、いわゆる“光”の事を言う。『JIS Z8120』の定義によれば、可視光線に相当する電磁波の波長は、おおよそ、短波長側が 360(nm)～400(nm)、長波長側が 760(nm)～830(nm)である。そして、可視光線の外に位置する『**赤外線**』と『**紫外線**』を指して、**不可視光線**と呼ぶ場合もある。

『**可視光線**』は、太陽やその他、我々の身近な様々な照明器具から発せられる。通常は、様々な波長の可視光線が混ざった状態であり、この場合、光は白に近い色に見える。「**プリズム**」などを用いて、可視光線をその波長によって分離してみると、波長の短い側から順に、「青紫」—「紫」—「青緑」—「緑」—「黄緑」—「黄」—「黄赤(橙)」—「赤」で、俗に七色と言われるが、これは連続的な移り変わりである。波長ごとに色が順に移り変わる事、あるいはその色の並び様を、「**スペクトル**」と呼ぶ。

『**可視光線**』より、波長が短くなくても長くなくても、人間の目には見る事ができなくなる。可視光線より波長の短いものを『**紫外線**』、長いものを『**赤外線**』と呼ぶ。動物種によっては、一部の「昆虫類」などは(人間にとっての)紫外線をも見る事ができる。「可視光線」は、通常は人間の体に害はないが、強い可視光線が目に入ると網膜の火傷の危険性がある。

《**紫外線**》の波長は、「可視光線」より短く、「**X線**」より長い、不可視光線の電磁波で、その波長は 14～400(nm)の範囲にある。光のスペクトルで、「紫」よりも外側になるのでこの名がある。英語の **Ultra-violet** からUVと略される。『**赤外線**』が物理的作用を及ぼすのに対し、『**紫外線**』は化学的な作用が著しい。このため、<化学線>とも呼ばれる。『**紫外線**』の有用な作用として殺菌消毒、ビタミンDの合成、生体に対しての血行や新陳代謝の促進、あるいは皮膚抵抗力の昂進などがある。

『**紫外線**』は、一つの分類法として、「UV-A」、「UV-B」、「UV-C」に区別される事がある。その内、「UV-A」、「UV-B」は「**オゾン層**」を通過、地表に到達する。『UV-A』は、波長 315(nm)～400(nm)で、太陽光線の内 5.6(%)通過し、皮膚の**真皮層**に作用し蛋白質を変性させる。細胞の物質交代の進行に関係しており、細胞機能を活性化させ、また、『UV-B』によって生成された「**メラニン色素**」を酸化させて褐色に変化させる。

『UV-B』は、波長 280(nm)～315(nm)で、太陽光線の内 0.5(%)が通過し、表皮層に作用するが、色素細胞がメラニンを生成し防御反応を取る。この作用が、いわゆる日焼けである。また『UV-B』には、「**発癌性**」が指摘されるが、発癌するのは高齢者、しかも肌の露出した部分のみというケースが多い。

『UV-C』は、波長=14(nm)～280(nm)で、「**オゾン層**」で守られている地表には、今のところ到達しない。強い殺菌作用があり、生体に対する破壊性が最も強い特徴を有する。

《電波》とは、無線通信に利用される『電磁波の総称』で、電波法では、周波数=3,000(GHz)以下【波長=0.1(mm)以上】の“電磁波”を言い、11の周波数帯に分けられる。波長の長いものから、①U L F【30~300(Hz)】、②E L F【300~3,000(Hz)】、③ミリアメートル波(超長波) V L F【3~30(kHz)】、④キロメートル波(長波) L F【30~300(kHz)】、⑤ヘクトメートル波(中波) M F【300~3,000(kHz)】、⑥デカメートル波(短波) H F【3~30(MHz)】、⑦メートル波(超短波) V H F【30~300(MHz)】、⑧デシメートル波(極超短波) U H F【300~3,000(MHz)】、⑨センチメートル波(マイクロ波) S H F【3~30(GHz)】、⑩ミリメートル波 E H F【30~300(GHz)】、⑪デシミリメートル波【300~3,000(GHz)】、に区分される。