

照明学会研究調査報告書

光放射の人間に対する生理的影響の評価に関する研究

光放射の人間に対する生理的影響の評価に関する研究調査委員会

2002年3月

社団法人 照 明 学 会

目 次

1. まえがき	1
2. 委員会の活動経過	2
3. 光放射と環境	
3. 1 光放射と放射源	6
3. 2 光環境における光放射の量的・質的特性	12
3. 3 光環境における光放射の生物・生体に対する作用	13
4. 人間の光放射に対する受容器官の構造と光反応機構	
4. 1 感覚器官（眼）の構造と機能	19
4. 2 眼の反応機構	24
4. 3 皮膚の構造と光受容器としての機能	29
4. 4 皮膚の光反応機構	30
4. 5 生体内光反応	32
5. 人間の生理的指標の種類と概要	34
6. 人工光放射の普及に伴う光環境の変化と人間に与える影響	
6. 1 人工光放射による光環境の変化	46
6. 2 人工光源による光環境の特徴	50
6. 3 人間に対する影響の実際	
6.3.1 眼精疲労	54
6.3.2 皮膚の光反応機構への影響	59
7. 関連応用照明器具および関連製品	
7. 1 交替勤務者の睡眠障害対策と応用器具	62
7. 2 快適覚醒促進照明器具	66
7. 3 紫外放射ダメージの皮膚内部からの防御・最近の光防御化粧品	71
7. 4 遠赤外放射の基礎と応用	77
7. 5 遠赤外放射領域における温熱療法（ハイパーサーミア）	82
8. あとがき	87

1. まえがき

“光 (light)” (正確には, “光放射 (optical radiation)”) は, 地球上の人間が生活する環境を構成している基本要素であり, 人間は, もし光が無くなれば, もはやそこで生活を営んでいくことが出来なくなる (要するに, 生きていくことが出来なくなる) ことから明らかなように, 光は, 各種の環境要素の中でも最も重要な要素である。この重要な要素“光”に注目した環境のことを“光環境 (lighted environment)”という。

既に具体的事例により良く知られているように, 光環境においては, 人間 (人間だけでなく, 動植物は全て) は, この環境要素である光によるいろいろな影響を受けている。これらの影響には, 生化学的・生物的側面もあり, 生理的側面もあり, また, 感情・情緒的な側面もある。したがって, 光環境において, 人間が快適な生活を営んでいくためには, これら光の諸作用について十分な知識を持ち, これらを充分考慮した上で, 適正な環境設計を行う必要がある。

光の諸作用について, 環境設計を行う上での最も重要な知識は, 光の人間に対するいろいろな影響の具体的内容についてであろう。そして, 環境設計に活かし, 光環境の“快適性”を高める方法を具現するという観点から見ると, 光の影響について, 定量的な評価が充分に実施されることが必要となる。

この光の影響の定量評価については, 例えば“紅斑作用”や“色素沈着作用”の様な生化学的・生物的作用については, 皮膚の色の測定など, 定量評価のための指標が, ある程度確立され, 実際に適用されているが, “眼精疲労”や“睡眠-覚醒のリズム制御”, “快-不快の感覚”などの, 生理的作用については, 定量評価システムが必ずしも充分確立されていない。

従来は, これら人間への生理的影響を定量評価するには, 官能試験を中心とする心理的評価法が適用されることが多かった (ほとんど全てであった)。例えば, 光環境における最適な色温度や演色性, 空間照度などをきめる場合に, 多数の人間を集め, “快-不快”, “好-嫌”, “安寧-緊張”など, 何段階かの段階評価による官能評価を実施してもらい, 得られたデータを統計的に処理する方法である。

しかし, これらの官能評価は, 複雑な人間の, 中でも最も複雑な心理的評価指標に依るため, 人間の個人差の補償をしようと思えば, 被験者の数を増やさなければならず, 反対に, 少ない数の被験者によるデータでは, 結果が普遍性に欠けるなどの難点があった。

これらの難点を解消・補完する, 生理作用の定量評価方法の一つとして, 人間の生体としての特性指標を利用する方法が考えられる。人間の生体としての特性指標として知られているものは, 例えば, 体温, 直腸温, 呼吸数, 脳波, 脈波, α 波, β 波, 心拍数, などいろいろあるが, これらを生理作用の評価と直接的に結びつけた研究はあまりない。

今回, 研究調査委員会を組織し, これらの現状を把握し, 将来の光の生理的作用の定量評価に応用する上の指針とすべく, 研究調査を実施した。

本報告書は, 平成11年~14年の3カ年の研究調査委員会の成果をとりまとめたもので, お忙しい中, 話題提供や執筆をお引き受け頂いた先生方に, 厚く御礼を申し上げる次第である。

(河本康太郎)

2. 委員会の活動経過

2.1 委員会の構成

本委員会は委員長以下幹事3名・幹事補佐1名の幹事団と、13名の委員（敬称略）により構成運営された。なお、途中交替は蓑原委員長より河本委員長、洞口幹事より阪口幹事、大川委員（滋賀医科大学精神医学講座）より内山委員、佐藤委員（東京電力㈱電力技術研究所）より武藤委員に、新任委員として佐々木委員、退任は岩尾委員（中部電力）、山田委員（農水省畜産試験場）の両氏である。また、蓑原委員長、洞口幹事には委員として留任頂いた。

委員長	河本康太郎	(社)日本電球工業会
幹事	菅沼浩敏	(財)電力中央研究所我孫子研究所応用生物部
幹事	阪口敏彦	松下電工㈱照明 R&D センターオブ ティックス研究所
幹事	田澤信二	岩崎電気㈱技術開発室技術研究所
幹事補佐	渡貫美衣	㈱マルトキ営業部
委員	朝倉健太郎	東京大学大学院工学系研究科金属工学専攻
委員	安西良矩	放電デバイス技術研究所
委員	内山 真	国立精神・神経センター精神保健研究所精神生理部
委員	小林敏孝	足利工業大学工学部経営工学科
委員	佐々木政子	東海大学総合科学技術研究所
委員	重光 司	(財)電力中央研究所我孫子研究所生物科学部
委員	清水孝一	北海道大学大学院工学研究科生体システム工学講座
委員	杉山貞夫	関西学院大学名誉教授
委員	福田 實	㈱資生堂基盤研究センター薬剤開発研究所
委員	藤本順三	(財)電力中央研究所ヒューマンファクター研究センター
委員	洞口公俊	ヤンマーディーゼル㈱産機事業本部船用システム事業部 大阪府立大学生物資源開発センター
委員	蓑原善和	国土環境㈱九州支店
委員	武藤敬子	東京電力㈱技術開発本部原子力研究所ヒューマンファクターグループ
事務局	宮尾慎一	(社)照明学会

2.2 委員会概要

本委員会は9回開催され、内2回は見学会（国立精神・神経センター精神保健研究所、東京電力㈱技術開発本部・ヒューマンファクター研究所）を併せて行った。開催時の話題提供と提供者は以下のとおりである。

話題提供および提供者一覧（敬称略）

- 1) 「人間の光行動学的要素としての眼の特性」
佐川 賢・通産省工業技術院生命工学工業技術研究所
- 2) 「人間の皮膚の老化（UV、特にUV-Bが起こす皮膚の組織学的損

- 傷)」西山敏夫・㈱資生堂
- 3) 「皮膚への光作用－病気と運動への紫外放射効果」
佐々木政子・東海大学総合科学技術研究所
- 4) 「光の覚醒作用を応用した快適照明環境の実現」
野口公喜・松下電工㈱
- 5) 「人間の眼の光に対する生理的作用」
所 敬・東京医科歯科大学
- 6) 「ヒトの睡眠とリズム」
内山 真・国立精神・神経センター精神保健研究所
- 7) 「当直勤務負担緩和に対する高照度光応用に向けての実験的検討」
武藤敬子・東京電力㈱
- 8) 「紫外線と電磁界との複合曝露による発ガン性評価実験の紹介」
重光 司・(財)電力中央研究所・我孫子研究所
- 9) 「人間に対する生理的影響の定量評価法としての生体情報計測」
河本康太郎・(社)日本電球工業会
- 10) 「遠赤外線の基礎と応用例」
朝倉健太郎・東京大学

[構成委員以外の話題提供者]

佐川 賢:通産省工業技術院生命工学工業技術研究所(当時。現在は、
独立行政法人・産業技術総合研究所・人間福祉医工学部門・感覚知
覚グループ)

西山敏夫:㈱資生堂・ライフサイエンス研究センター皮膚科学研究所

野口公喜:松下電工㈱電材分社照明R & Dセンター

所 敬:東京医科歯科大学

2. 3 配布資料

本委員会の配布資料は44通で、以下に一覧を示す。

- 1) 第1回 平成12年2月10日(木)
- 00-01 研究調査委員会名簿(河本副委員長)
- 00-02 研究調査委員会新設提案書(河本副委員長)
- 00-03 「人間の生理・行動に対する光放射の作用・効果に関する研究調査
報告書」目次(河本副委員長)
- 00-04 佐藤愛子他編「光と人間の生活ハンドブック」朝倉書店(1995)
目次(河本副委員長)
- 00-05 朝日新聞(夕)2000.01.28 記事「色と明るさ、進化の秘密は目に潜む」
(河本副委員長)
- 2) 第2回 平成12年6月21日(水)
- 00-06 研究調査委員会名簿(渡貫幹事補佐)

- 00-07 2000 照学全大シンポジウム計画 (河本副委員長)
- 00-08 DIMESHOP 記事 (河本副委員長)
- 00-09 非電離放射・第 4 回国際非電離放射線ワークショップ講演抄録集・抜粋
(重光委員)
- 3) 第 3 回 平成 12 年 9 月 21 日 (水)**
- 00-10 皮膚への光作用－病気と運動への紫外放射効果－ (佐々木政子先生)
- 00-11 新サラリー族がかかりやすい病気の症状と予防・治療法－非 24 時間睡眠覚醒症候群 (河本副委員長)
- 00-12 白内障 紫外線が関係 (重光委員)
- 00-13 元気 からだ－日光と肌：紫外線防ぎ若さ保つ (重光委員)
- 4) 第 4 回 平成 12 年 12 月 13 日 (水)**
- 00-14 委員会名簿
- 5) 第 5 回 平成 13 年 3 月 22 日 (木)**
- 00-15 委員会名簿
- 00-16 視物質の代謝・遺伝 (所先生)
- 00-17 網膜内情報処理と神経伝達物質 (所先生)
- 00-18 話題提供スライドコピー (所先生)
- 00-19 電気の暮らしと健康不安・電気学会小冊子・オーム社 (重光委員)
- 00-20 新聞記事「疲れは治せるか・睡眠と疲れ」東京スポーツ 3 / 8
- 00-21 「ご存じですか？光のこんな可能性」METORO
(株)地下鉄トラベルサービス冊子 No.19,p.10
- 6) 第 6 回 平成 13 年 7 月 11 日 (水)**
- 00-22 委員会名簿 (渡貫幹事補佐)
- 00-23 ヒトの睡眠と生物リズム (内山委員)
- 00-24 光と色がもたらす癒しのメカニズム (内山委員)
- 00-25 新・サラリーマンがかかりやすい病気の症状と予防・治療法
－時差症候群 (河本委員長)
- 00-26 サーカディアンリズム・ライティング・システムを知っていますか？
(重光委員)
- 00-27 ーどうしましたー光線過敏症 (重光委員)
- 00-28 BEAMS : Twenty-Third Annual Meeting (重光委員)
- 00-29 IARC FINDS LIMITED EVIDENCE THAT RESIDENTIAL MAGNETIC FIELD
INCREASE RISK OF CHILDHOOD LEUKAEMIA (重光委員)
- 00-30 研究調査報告書・目次および執筆者 (案) (河本委員長)
- 7) 第 7 回 平成 13 年 10 月 10 日 (水)**
- 00-31 各種照明環境が人間に与える生物学的影響について
- 00-32 ストレス反応の定量的評価をめざして
- 00-33 体内時計 巧みに利用
- 00-34 IARC (国際がん研究機関) での紫外線の発ガン評価
- 00-35 磁界と UV の重畳効果

00-36 低周波電磁界生体影響の諸外国での研究動向

8) 第8回 平成13年12月20日(木)

00-37 人間に対する生理的影響の定量評価法としての生体情報計測

(河本委員長)

00-38 引用文献出典リスト(第6回配布資料00-34用)(重光委員)

9) 第9回 平成14年2月28日(木)

00-39 委員会新設提案書(河本委員長)

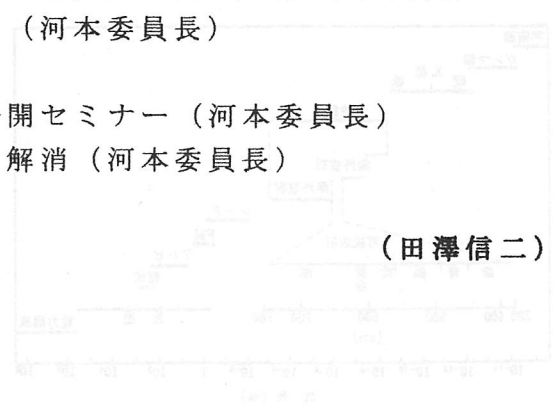
00-40 平成13年度 第4回研究運営規格委員会 議事録(河本委員長)

00-41 新設委員会設置のフローチャート(河本委員長)

00-42 平成13年度事業報告(田澤幹事)

00-43 太陽紫外線防御研究会 第8回公開セミナー(河本委員長)

00-44 CES速報 白色LEDで時差ボケ解消(河本委員長)



(田澤信二)

主 人	主 題	時 間
「低周波電磁界の生体影響」の 最新の研究成果を、本研究会 で、大塚先生の講演を以て、総論を 行った。また、田澤幹事の報告	低周波電磁界の生体影響の 最新の研究成果を、本研究会 で、大塚先生の講演を以て、総論を 行った。また、田澤幹事の報告	13時00分
「低周波電磁界の生体影響」の 最新の研究成果を、本研究会 で、大塚先生の講演を以て、総論を 行った。また、田澤幹事の報告	低周波電磁界の生体影響の 最新の研究成果を、本研究会 で、大塚先生の講演を以て、総論を 行った。また、田澤幹事の報告	13時30分
「低周波電磁界の生体影響」の 最新の研究成果を、本研究会 で、大塚先生の講演を以て、総論を 行った。また、田澤幹事の報告	低周波電磁界の生体影響の 最新の研究成果を、本研究会 で、大塚先生の講演を以て、総論を 行った。また、田澤幹事の報告	14時00分
「低周波電磁界の生体影響」の 最新の研究成果を、本研究会 で、大塚先生の講演を以て、総論を 行った。また、田澤幹事の報告	低周波電磁界の生体影響の 最新の研究成果を、本研究会 で、大塚先生の講演を以て、総論を 行った。また、田澤幹事の報告	14時30分

3. 光放射と環境

3.1 光放射と放射源

3.1.1 光放射

光放射は電磁波の一種である。電磁波は図 3.1 に示すように、その波長が 10^8m から 10^{-16}m の範囲にわたっているが、CIE（国際照明委員会）では $1\text{nm} \sim 1\text{mm}$ までの波長範囲の電磁波を光放射と定義している¹⁾。光放射は波長によってその作用・効果が異なり、CIEでは波長区分によって図 3.2 のように区分している¹⁾。

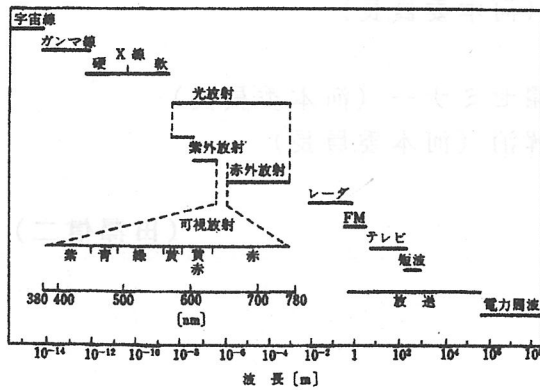


図 3.1 電磁波の波長と名称

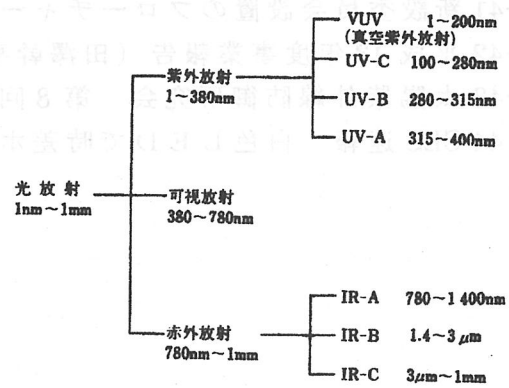


図 3.2 光放射の波長による区分

3.1.2 光放射源

光放射源は大別して太陽と人工光源に区分できる。それぞれの光放射源の特徴を比較したものを表 3.1 に示す。また人工光源をその発光原理によって区分すると図 3.3 のようになる。

表 3.1 太陽光と人工光の比較

	太陽光	人工光
分光分布	<ul style="list-style-type: none"> ●約 5500K の黒体放射に近似した連続分布と天空からの散乱放射の合成 ●日の出-日中-日没の間で若干の変化がある 	<ul style="list-style-type: none"> ●約 3200K 以下の黒体放射に近似した連続分布、または金属や気体の特性輝線、および蛍光の帯域発光、時間的変動はほとんどない。
周期性	<ul style="list-style-type: none"> ●強さについては季節、時間により変化する。日長時間は季節により変わる。 	<ul style="list-style-type: none"> ●変化なし
放射照度・照度	<ul style="list-style-type: none"> ●地上において最大 $1\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ または 120klx でこの限界を超えない。 	<ul style="list-style-type: none"> ●使用光源により放射照度、照度も異なる。
方向性	<ul style="list-style-type: none"> ●地上において光エネルギーの入射方向が 1 日の時間により異なる。 	<ul style="list-style-type: none"> ●光エネルギーの入射方向は放射源との相対位置により、ある程度制御できる。

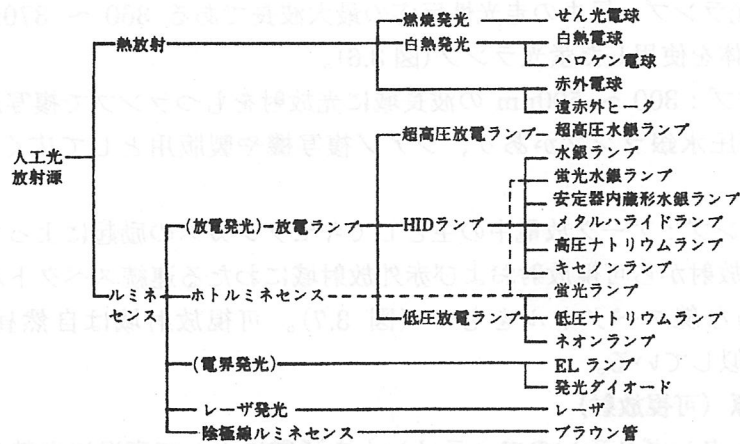


図 3.3 発光原理に基づく人工光放射源の分類

(1) 太陽

太陽の光放射特性は地球上からの高度や緯度、地形、あるいは季節、天候、時刻などによって変化するが、代表的な分光分布を図 3.4 に示す。地表上には 290 ~ 3200nm の波長範囲の光放射が到達しており、この範囲を超えるものはオゾン、酸素、水蒸気、二酸化炭素などの吸収および大気中の煙霧質による散乱などのため到達していない。

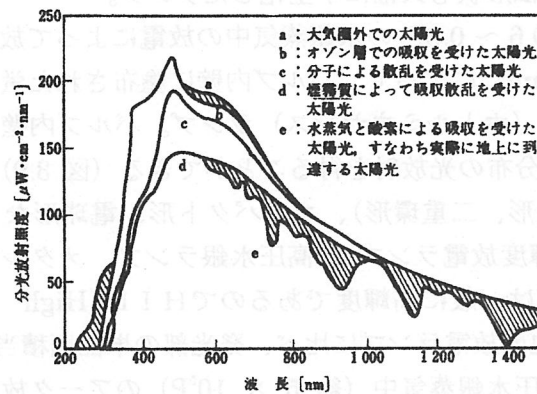


図 3.4 太陽光の分光分布(鈴木 守,1979)

(2) 人工放射源 (紫外放射)

(a) 重水素ランプ：重水素の放電による発光を利用したもので紫外放射域における連続スペクトルが得られる (図 3.5)。

(b) 殺菌ランプ：紫外放射透過ガラスを外管に使用し、殺菌作用のピーク波長 (250 ~ 260nm) に近い 254nm の水銀原子の共鳴線 (殺菌線) を直接外部に放射させる低压放電ランプ (図 3.6)。

(c) ブラックライトランプ：300nm 以下の波長をカットした特殊ガラスを外管に使用し可視放射をほとんどカットし、300 ~ 400nm の UV-A を主体に放射するランプ (図 3.6) でブラックライト蛍光ランプとブラックライト高压水銀ランプがある。300nm より短い波長はほとんど放射しないため、皮膚や目への傷害作用は低いが直視を避ける必要がある。

(d) 補虫用蛍光ランプ：昆虫の走光性反応の最大波長である 360 ~ 370nm に発光ピークをもつ蛍光体を使用した蛍光ランプ(図 3.6)。

(e) 複写用ランプ：300 ~ 500nm の波長域に光放射をもつランプで複写用蛍光ランプおよび複写用高圧水銀ランプがあり、ジアゾ複写機や製版用として広く用いられる(図 3.6)。

(f) キセノンランプ：アーク放電中の主としてキセノンガスの励起によって発光する放電ランプ。紫外放射から可視放射および赤外放射域にわたる連続スペクトルを有し近赤外放射部に強力な線スペクトルをもつ(図 3.7)。可視放射域は自然日光(色温度約 6000K) に近似している。

(3) 人工放射源(可視放射)

(a) 白熱電球：タングステンのフィラメントを通電によって高温に白熱し、その熱放射によって発光させるランプ。その発光特性はフィラメント温度と分光放射率によってほぼ一義的に定まる。代表的な 100W 白熱電球では、その色温度は約 2840K で分光分布は図 3.8 のようになる。

(b) ハロゲン電球：白熱電球の一種であるが、バルブ内に不活性ガスとともにハロゲン元素またはハロゲン化合物を封入し、ハロゲンサイクル(点灯中に蒸発したタングステンがハロゲン物質の媒介によってフィラメントに戻る作用)の利用によってタングステンの蒸発による消耗とバルブ内面の黒化を抑制し光束低下と長寿命化が図れ、同一定格の白熱電球に比べて寸法形状も大幅に小型化したランプ。

(c) 蛍光ランプ：低圧(0.6 ~ 0.8P)の水銀蒸気中の放電によって放射される紫外放射(主として 254nm と 185nm)によって、バルブ内壁に塗布された蛍光体を励起し、可視放射に変換・発光させる(ホトルミネセンス)ランプ。バルブ内壁に塗布する蛍光体の選択によって種々の分光分布の光放射を得ることができる(図 3.9)。蛍光ランプの形状には直管形、環状形(丸形、二重環形)、コンパクト形、電球形など各種のものがある。

(d) HIDランプ(高輝度放電ランプ)：高圧水銀ランプ、メタルハライドランプ、高圧ナトリウムランプなどは一般に高輝度であるのでHID(High Intensity Discharge Lamp)と総称され、他の放電ランプに比べ、発光部の単位面積当たりの光束が大きい。

高圧水銀ランプは高圧水銀蒸気中(約 5×10^5 P)のアーク放電によって放射される光放射を利用するHIDランプで水銀ランプとも呼ばれる。

メタルハライドランプは高圧水銀ランプに金属ハロゲン化物(メタルハライド)を添加し、これら金属蒸気中のアーク放電によって放射される金属特有の光放射を利用するHIDランプ。

高圧ナトリウムランプは発光管内に封入した高圧ナトリウム蒸気中のアーク放電による光放射を利用したHIDランプ。発光管内のナトリウム蒸気圧を約 10kP 以上に高めることにより、ナトリウムD線(589nm)近傍の発光が自己吸収され、D線の左右、特に長波長側に広がった連続スペクトルをもつ、黄味がかった白色光が得られる。

代表的なHIDランプの分光分布を図 3.10 ~ 3.12 に示す。

(e) マイクロ波励起ランプ：マイクロ波(数 100MHz ~ 数 GHz)で励起して発光させる無電極放電ランプ(図 3.13)で、電極の無い石英バルブの中に、水銀、ハロゲン化金属などと不活性ガスが封入されている。

(f) LED：LED（発光ダイオード）は電流で発光する注入形エレクトロルミネッセンスの発光を利用した光源で、LEDの材料は一般にⅢ－Ⅳ族の化合物半導体が使用される。pn接合を通して順方向に電流を流すと、n形領域にあった電子はp形領域の正孔と再結合しこのときエネルギーの一部が光として放出される。使用される化合物半導体の種類により、赤色、橙色、黄色、緑色、青色などのものがある。

(g) ELランプ：蛍光体に高電圧を印加したときに生じる発光現象を利用した光源で、蛍光体と蛍光顔料の組合せで青色、橙色、赤色、白色などのものがある。最近是有機材料を用いた有機EL素子が次世代発光素子として注目されている。

(4) 人工放射源（赤外放射）

(a) 赤外電球：放射効率と吸収率から加熱効果が最も大きくなるよう、フィラメントの色温度 2500K 前後に設計された電球で、硬質ガラスを使用した反射形電球タイプと石英ガラスを使用した管状形があり、特に石英形赤外電球は小形で出力が高い。赤色に着色したガラスバルブもあるが、これは心理的温暖感と可視放射のグレアを防止することを考慮したもので、赤外放射と言う観点からはその効果に差異はない。

(b) 遠赤外ヒータ：IEC（国際電気標準会議）の定義では $4\mu\text{m}$ より長い波長の赤外放射を遠赤外放射と呼び、この遠赤外放射を発生させる人工放射源として遠赤外ヒータがある。これには各種の構造のものがあるが代表的なものとしては、セラミック、金属などの遠赤外放射体を管状または板状に成型し、その内部にニクロム線、シーズヒータ、ハロゲンヒータ（ヒータ用ハロゲン電球）などの発熱体を埋込んだものや金属パイプや板に遠赤外放射体を溶射や焼付けコーティングし、その内部に発熱体を埋込んだものがある。

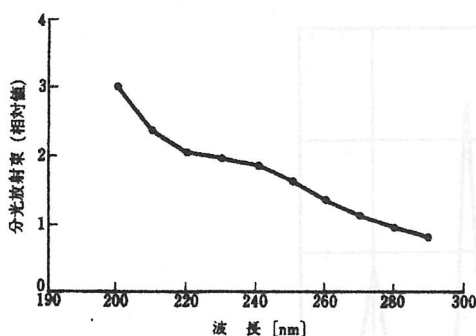


図 3.5 重水素ランプの分光分布
(中川靖夫,1977)

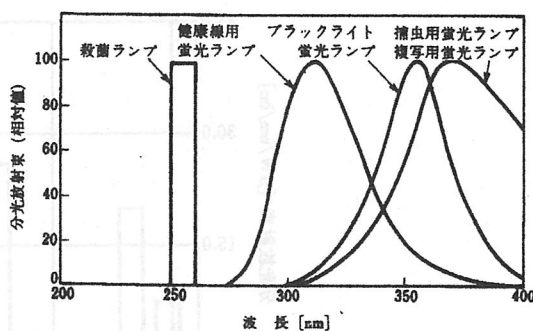


図 3.6 各種人工紫外放射源の分光分布

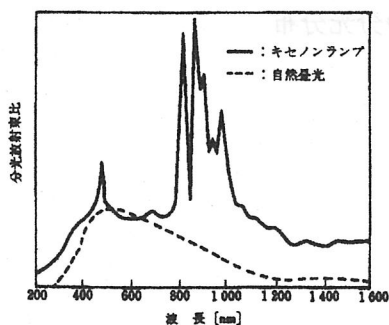


図 3.7 キセノンランプの分光分布

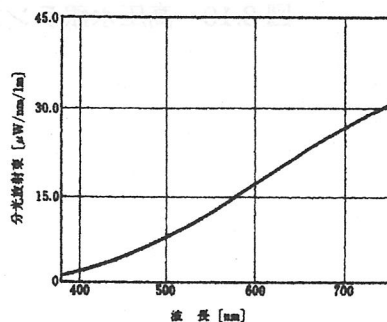


図 3.8 白熱電球の分光分布

(照学会:ライティングハンドブック,1987)

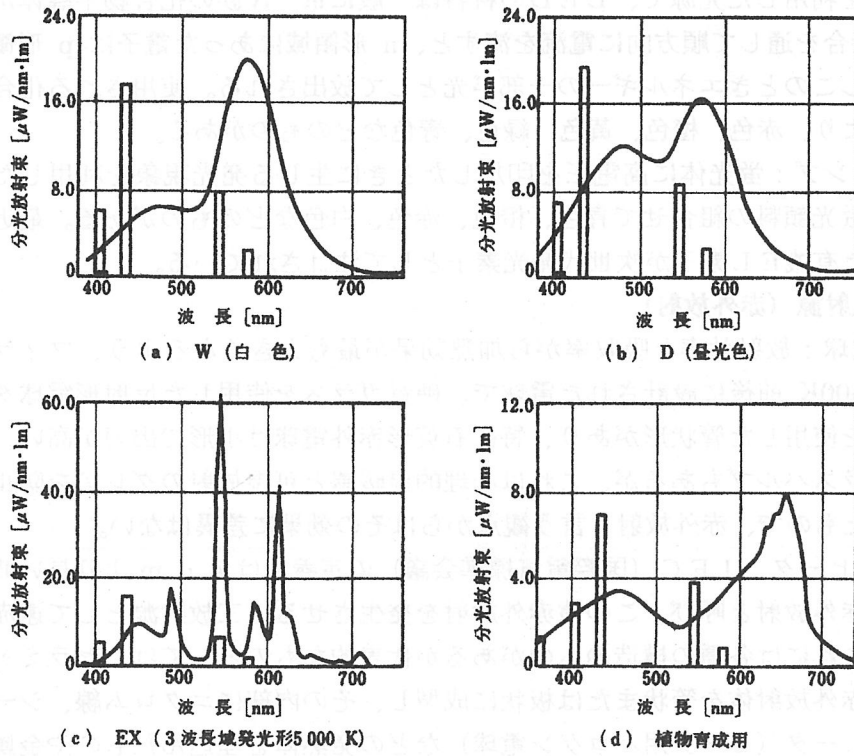


図 3.9 各種蛍光ランプの分光分布

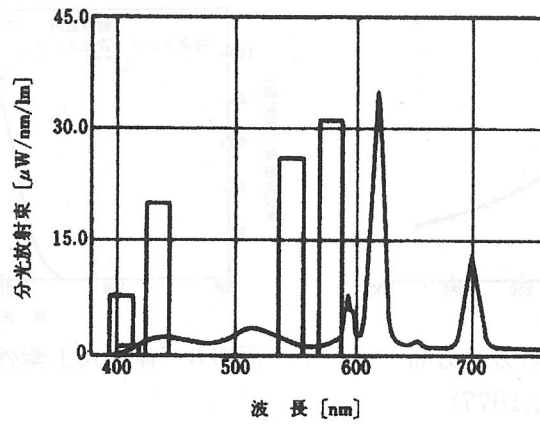


図 3.10 高圧水銀ランプ(蛍光形)の分光分布

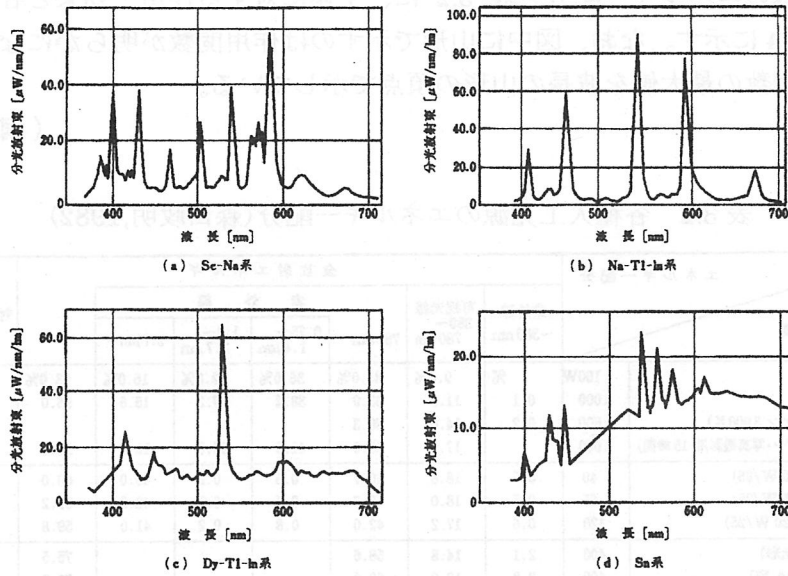


図 3.11 メタルハライドランプの分光分布 (照学会:照明教室 66,1989)

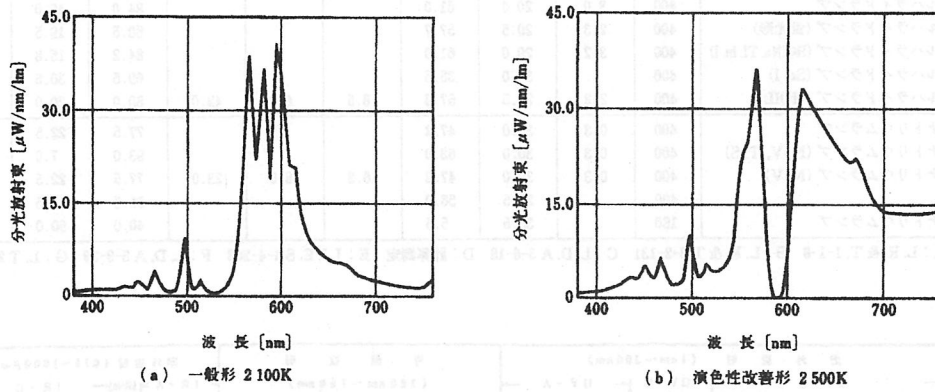


図 3.12 高圧ナトリウムランプの分光分布

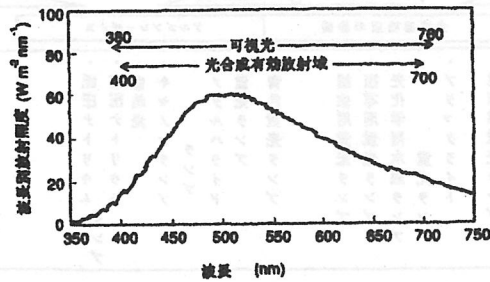


図 3.13 マイクロ波励起ランプの分光分布 (古在豊樹・北宅善昭,1993)
(ランプ入力 3.5kW、バルブ外形 30mm)

(洞口公俊)

参考文献

- 1) CIE : CIE Publ.No.17.4 International Lighting Vocabulary, (1987)

3. 2 光環境における光放射の量的・質的特性

各種人工光源のエネルギー配分を表 3.2 に、生体に対する作用・効果と各種人工光源との関係を図 3.14 に示す。なお、図中に山形で示すのは作用関数が明らかになっていることならびに作用関数の最大値を波長の山形の頂点で示している。

(洞口公俊)

表 3.2 各種人工光源のエネルギー配分(森田政明,1982)

光源の種類	エネルギー配分		全放射エネルギー					対流・伝導	備考*	
	100W	%	紫外線 ~380nm	可視光線 380~780nm	赤外線					
					780nm~	0.75~ 1.4μm	1.4~ 2.7μm			2.7μm~
白熱電球	1000	0.1	9.0%	84.0%	36.0%	32.0%	16.0%	93.0%	7.0%	A.G
白熱電球	1000	0.1	11.9	83.0	38.2	29.2	15.6	95.0	5.0	A.G
白熱電球(ハロゲン3000K)	500	0.2	14.0	80.3					5.5	D
白熱電球(ハロゲン・写真機形用・15時間)	1000		17.0	81.0	41.0	28.0	12.0	98.0	2.0	G
蛍光灯(L 40 W/25)	40	0.5	18.8	40.7	0.5	0.2	40.0	60.0	40.0	A.G
蛍光灯(L 65 W/25)	65	0.5	18.0	40.7	0.6	0.1	40.8	59.2	40.0	A.G
蛍光灯(L 120 W/25)	120	0.6	17.2	42.0	0.8	0.2	41.0	59.8	40.0	A.G
水銀ランプ(蛍光形)	400	2.1	14.8	58.6				75.5	24.5	A
水銀ランプ(HQA形)	400	3.8	13.0	60.0				76.8	23.2	B
水銀ランプ(蛍光形HQLS形)	400		20.0	60.0	6.8	4.2	49.0	80.0	20.0	G
水銀ランプ(混合ガスHWLS形)	250		7.6	72.3	19.2	21.1	32.0	81.0	19.1	G
	400		14.8	66.7				81.5	18.5	C
メタルハライドランプ	400	3.0	20.0	61.0				84.0	16.0	A
メタルハライドランプ(蛍光形)	400	2.3	20.5	57.7				80.5	19.5	A
メタルハライドランプ(HQNa.Tl.In.I)	400	3.2	20.0	61.0				84.2	15.8	B
メタルハライドランプ(Sc.I)	400		34.0	35.5				69.5	30.5	E
メタルハライドランプ(HQIL)	400	2.2	20.5	57.3	8.5	6.8	42.0	80.0	20.0	G
高圧ナトリウムランプ	400	0.3	30.0	47.2				77.5	22.5	A
高圧ナトリウムランプ(NaV, T.S)	400	0.3	30.0	63.0				93.0	7.0	B
高圧ナトリウムランプ(NaV)	400	0.3	30.0	47.2	16.2	8.0	23.0	77.5	22.5	G
	400		29.5	56.0				85.5	14.5	C
低圧ナトリウムランプ	180		35.5	5.5				40.0	60.0	F

*A: L.R.&T.1-1-8 B: L.R.&T.3-2-131 C: L.D.A.3-6-18 D: 計算測定 E: J.I.E.S.4-4-263 F: L.D.A.5-9-39 G: L.T.25-1-17

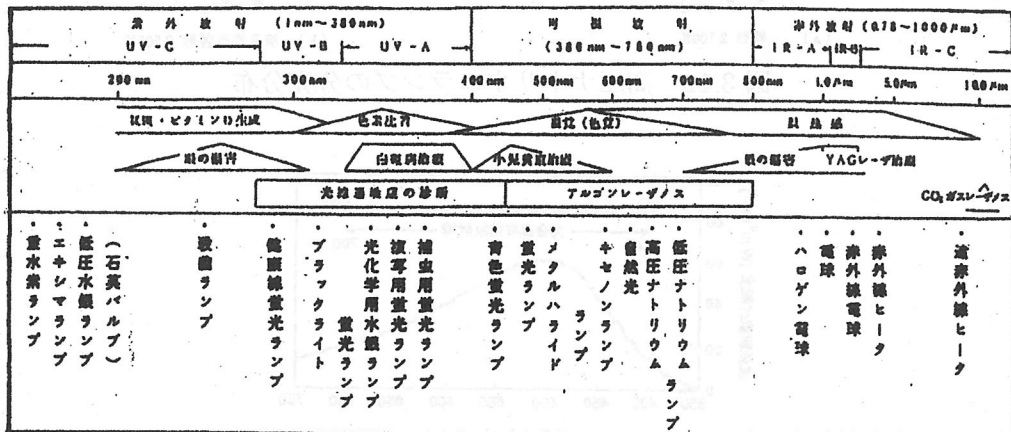


図 3.14 生体に対する作用・効果と各種人工光源(森田政明,1992)

3. 3 光環境における光放射の生物・生体に対する作用

地球表面に入射する自然光は、すべて太陽光に由来しているといえる。この太陽光の一部は直接地表に到達するが、雲や地球上の物体によって吸収され減衰したり、反射されたり、変質する光もある。これらの光は、生物の生育・成長、行動ならびに地球上における分布にも著しい影響を与えている。

本報告書においては、「光放射の人間に対する生理的影響」が主体である。そこで、本章においては、次章以降に詳細に述べられる「人間に対する生理的影響」の前段として、主な生物である動物（人間を含む陸棲動物）、昆虫、植物の生育・成長および行動等に光放射がどのように関わってきたか振り返ってみる（図3. 15）。

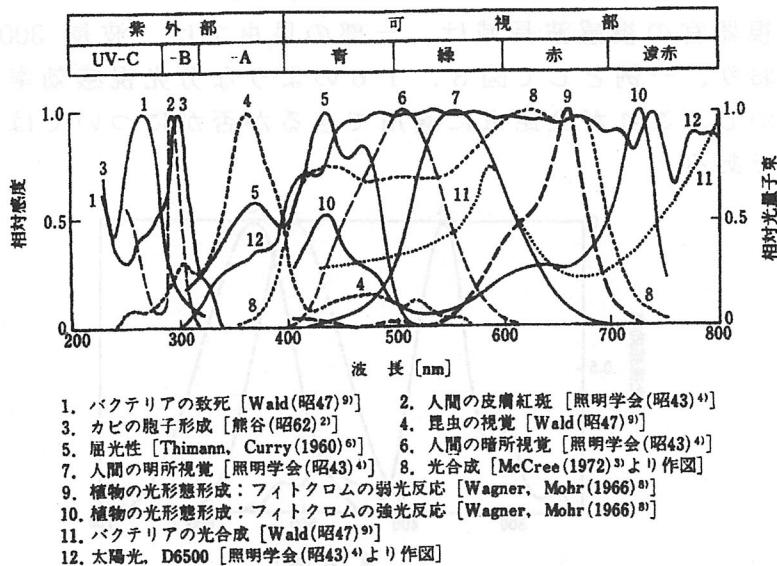


図3. 15 光に対する生物反応の分光感度特性と太陽光の分光光量子束分布

3. 3. 1 動物（人間を含む陸棲動物）

高等動物を取り巻く外部環境要因のうちで、光要因は地球上に生命が誕生して以来、いろいろな生物の生存や進化に重要な影響を及ぼしている。太陽からの光放射を受けて、人間を含む高等動物は、おのおのの生活環境に適した形態と機能を備えた高性能の光受容器を発達させ、自己の生存や行動に適した光感覚をもっている。光放射の高等動物に及ぼす影響は、単に光受容器を通しての光感覚にとどまらず、生体内でのいろいろな生理機能や行動にまでおよぶ。

脊椎動物のカメラ眼が最も発達している光受容器といえる。人間では、情報の80%以上は光、すなわち視覚によっているといわれている。

光受容体としての眼の構造、眼の光反応機構をはじめとする「光と眼」の関係、および皮膚の構造、皮膚の光受容器としての機能、皮膚の光反応

機構をはじめとする「光と皮膚」の関係、光環境の変化が人間に与える影響などについては、後章において詳細が述べられるので、この章では省略する。

3.3.2 昆虫

地球上に生息している昆虫の種類は、70万種類とも80万種類ともいわれている。これら昆虫の光放射に対する反応は、生息する地域の気象条件などによって様ではない。また、昆虫も他の動物と同様に、光エネルギーを直接生活のエネルギーとしているわけではなく、光に対する反応は、光を情報源として利用する場面に限る。

昆虫の光に対する受容体は視器官であるが、その機構や構造については、人間や高等動物の場合ほどはわかってはいない。

昆虫の視器官の視感波長域は、一部の昆虫では、波長300～400nmといわれており、一例として図3.16のような分光視感効率が紹介されている。しかし、これが全昆虫に適用できるか否かについては、さらなる検討が必要である。

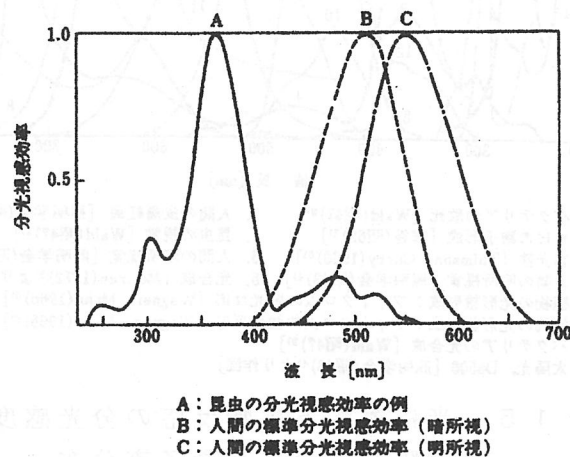


図3.16 昆虫の分光視感効率の例

高等な視覚が発達している昆虫においては、比較的視器官の特性が調査されており、例えば、ミツバチは人間と同じように、網膜に複数の色素細胞があり、色を識別する能力があるとの報告がある。また、モンシロチョウは、通常期と産卵期では視器官の光に対する絶対感度や波長特性が異なるとの報告もある。さらに、二化メイガの視感波長域は、300～400nmの他に、490～540nmにも視感度があるとの報告もある。

近年、農業分野において健康問題や環境問題に配慮した農薬の使用量の削減がうたわれており、その代替技術の一つとして「光による害虫の物理的防除法」が話題になっている。

昆虫の行動様式のうち光に関連するものとして走光性が上げられる。この走光性とは、自由な運動能力をもつ生物が外部からの光刺激に反応を起

こし、この運動に方向性が認められる時に用いられることばである。

光による害虫の物理的防除法は、この昆虫の走光性を利用して害虫を防除しようとするもので、このような走光性が発現する最低照度は二化メイガでは $7.4 \times 10^{-6} \sim 6.5 \times 10^{-6}$ lx といわれ、かなり低い。それ以上では、次の式が成り立ち、昆虫の反応 (E) は、刺激光量 (I) が大きければ大きいほど強くなる。

$$E = K \log I + C \quad E: \text{昆虫の反応、} I: \text{刺激光量、} K, C \text{ は定数}$$

また、一般的な昆虫の走光性の視感度は図 3. 17 に示すように、300 ~ 600nm の範囲で、人間の眼の感度範囲より約 100 nm 短波長側にシフトしている。

現在、主として検討されている光による物理的害虫防除法は「UV を利用した蛍光ランプ・水銀ランプによる誘引捕獲」と、果樹園などの吸汁性夜蛾類やカメムシ類用に利用される「黄色蛍光ランプなどによる害虫の行動抑制」の 2 種類に分類される。

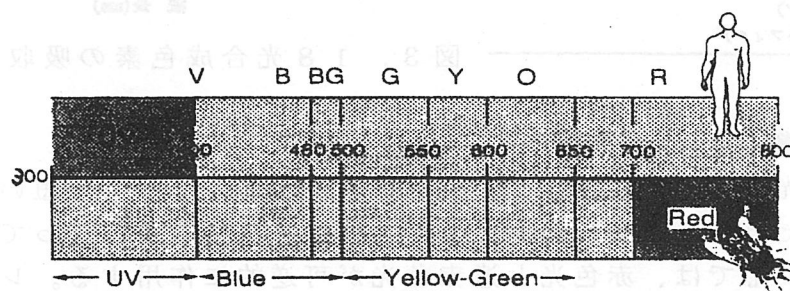


図 3. 17 昆虫の走光性の視感度

3. 3. 3 植物

植物は、光合成によって光エネルギーを固定し、生命を維持している。また、植物は、自ら移動することができないために、環境、特に光環境に適應する機構が発達している。このエネルギーの固定と適應機構を中心に光と植物の関係について考えてみる。

1) 光合成

植物は、光エネルギーを補足し、これを化学エネルギーに変え、水を分解する。生成されてくる水素と気孔から吸収した炭酸ガスによって還元性の炭素化合物を生産する。この光合成の仕組みは複雑ではあるが、大きくは次の二つの段階に区分できる。前段階は、光エネルギーの吸収から水の分解・酸化、電子の伝達、NADPH と ATP の生成までの明反応で、葉緑素の内部のチラコイド膜の上で行われる。その結果、ストロマに放出された NADPH と ATP によって CO₂ を還元し、糖として固定する後段階の反応系が暗反応である。

高等植物の光合成の作用スペクトルをみると、400 ~ 700nm の波長域に幅の広い作用が見られる。一方、光合成の光受容体の一つであるクロロフ

イル a は赤色部と青色部に吸収があるが、そのほかの波長域では吸収がない。しかしクロロフィル b が植物には存在するため、吸収波長域は広くなり、400 ~ 500nm、600 ~ 700nm の吸収が可能である。光合成色素および光合成色素の吸収スペクトルを表 3. 3 および図 3. 18 に示す。

表 3. 3 光合成色素

色 素	含有植物	吸収波長
クロロフィル a	全植物	赤, 紫-青
b	高等植物	赤, 紫-青
c	藻類	赤, 紫-青
	褐藻類	
d	紅藻類	赤, 紫-青
	紅藻類	
バクテリア	紅藻類	赤, 紫-青
クロロフィル	紅色細菌	近赤, 紫-青
バクテリオスピリジン	硫黄細菌	近赤, 紫-青
フィコシアニン	ラン藻類	橙-赤
フィコエリトリン	紅藻類	赤
	ラン藻類	
カロチノイド	紅藻類	赤
(カロテン)	全植物	青, 緑
(キサントフィル)		

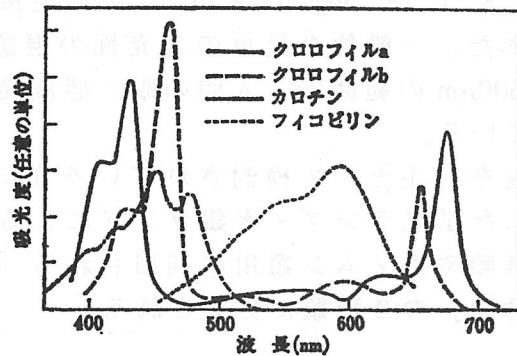


図 3. 18 光合成色素の吸収スペクトル

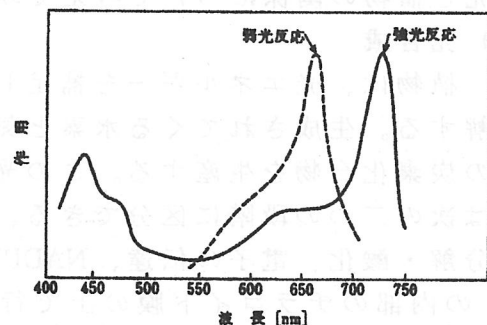
2) 光形態形成

植物の光形態形成には二つの反応様式がある。一つは、短い時間に弱い光を当てたときに起こる弱光反応で、光照射が引き金となって反応が起こる。弱光反応では、赤色光と遠赤色光が可逆的に作用する。レタス（品種：grand rapid）の種子発芽では典型的な赤・遠赤色光可逆性がみられ、レタスの光発芽は赤色光で促進され、遠赤色光で抑制されるが、最後に受けた光が赤色光か遠赤色光かによって発芽率が決まる。この弱光反応の光受容体は、赤・遠赤色光で吸収変化を示すフィトクロムである。

この弱光反応の例としては、種子の発芽の他に、葉の形成と成長、茎の成長、側根の分化、花芽分化、葉の就眠運動、光屈性の感度、重力屈性の感度、膜透過性、色素合成、酵素活性、遺伝子発現など様々な事象が上げられる。

光形態形成のもう一つの反応は、強い光のしかも長時間の照射によって起こる強光反応である。強光反応は、反応量が照射エネルギーに依存し、高エネルギー反応とも呼ばれる。

マスタードの子葉の伸長に対する作用スペクトルをとると、弱光では赤色光に効果が現れるが、強光ではピークが長波長側にずれ、青色光域に別のピークが現れる（図 3. 19）



(マスタード(*Sinapis alba* L.) の芽ばえに短時間(---)あるいは長時間(—)光を当てたときの子葉の伸長反応をもとにしている)

図 3. 19 弱光反応と強光反応の作用スペクトラム

3) 光周性と概日リズム

花芽や冬芽の形成は日長によって制御されている。短日性は限界日長よりも短い日長に反応することを意味し、長日性は限界日長よりも長い日長に反応することをいう。場合によっては、12時間以上の日長でも短日長になり得るし、逆に、12時間以下の日長でも長日長であることがある。

光周性とは、光と暗黒の時間が交互に存在することによって起こる現象である。光周性現象はフィトクロームを光受容体とする植物の反応であるといわれている。

概日リズムは、運動、代謝、生長などの反応が環境条件を一定にしても周期的に変化し、同じパターンを21～28時間周期で繰り返すことと定義できる。開花運動、葉の就眠運動にこのような現象が見られる。概日リズムの計時機構にもフィトクロームが関与することが考えられるが、フィトクロームだけでは説明できない現象も多く、光周性と同様に未知の計時機構が存在すると考えられる。

4) 屈光性と傾光性

光形態形成、日周性および概日リズムのほかに、赤・遠赤色光以外の波長域に対しても、植物は光反応を起こす。植物が光のくる方向に向く現象である屈光性は、青色光による反応である。この青色光を照射することによって変化する反応として、イネの第2葉の葉角などにみられる傾向性もある。

5) その他の光と植物の関わり

以上の他に、光照射による色素発現（着色促進効果）も認められている。光によって誘導されるフラボノイドの生合成作用についてみると、光→遺伝子転写→mRNA→酵素→色素合成の過程が考えられる。すなわち、紫外放射や赤色光が、それぞれの光受容体によって吸収され、未解明の細胞内信号が核のDNAに作用し、mRNAを生成し、これが細胞質にあるリボゾームに作用してPALやChalcone synthase等の酵素の合成を誘導するといわれている。植物にとっても強い紫外放射を浴び続けると、細胞に悪影響を受ける場合がある。しかし、フラボノイド系のアントシアニン、フラボン、フラボノールなどの色素は、人間におけるメラニン色素と同様に紫外放射を吸収する性質を持っており、これらの色素は、花卉や葉の表層の細胞に存在し、自らが紫外放射を吸収し、花卉や葉の内部への紫外放射の侵入を防いでいる。見方を変えれば、UV照射により花や葉の着色が促進され、利用面からすると光照射による着色促進効果といえる。

空気が澄んで紫外放射を含む日差しが強い高山帯に咲く花は、多くの紫外放射を浴び、その紫外放射を吸収してくれる色素を非常に多く蓄積するため平地に咲く花と比較すると、リンドウなどに見られるように、色が非常に鮮やかになる。

紫外放射と植物・色素と昆虫の関係からみると、この色素は、紫外放射から植物体を守るだけでなく、その紫外放射を吸収あるいは反射することによって、我々人間には、UVフィルターを使わなければ見ることのできない花のマークを浮かび上がらせ、紫外放射を色覚として感じることで昆虫に花の位置を知らせている。このことにより、花の位置を認識した昆虫は、食料として蜜や花粉を得るために向かい、結果的には、植物の花粉媒体にも役立っている。

(菅沼浩敏)

参考文献

- 1) (社)照明学会編：光バイオインダストリー・オーム(社)p.367(1992).
- 2) 稲田勝美編著：光と植物生育・養賢堂 p.415(1984).
- 3) 佐藤愛子他編：光と人間の生活ハンドブック・朝倉書店 p.373 (1995).
- 4) (社)照明学会編：UVと生物産業・養賢堂 p.231(1998).
- 5) 田澤信二：J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol.85 No.3 pp.217-221 (2001).
- 6) F.G.Barth：Insects and Flowers, Princeton University Press. p.113(1991).
- 7) 菅沼浩敏：電力中央研究所・調査報告 484006 p.27(1994).
- 8) 菅沼浩敏：農業電化 51 卷 11 号 pp.2-7 (1998).

4. 人間の光放射に対する受容器官の構造と光反応機構

4. 1 感覚器官（眼）の構造と機能

人間にとって、眼から入る情報は 80%といわれていて、大切な情報源である。この情報を感受する視覚器官は、眼球、視神経、視中枢と眼球附属器からなっている。

4. 1. 1 眼球

眼球は直径約 24mm、重さ 7.5g のピンポン玉程度の大きさの小さな臓器で、3層の膜と内容とからなっている（図 4. 1）。

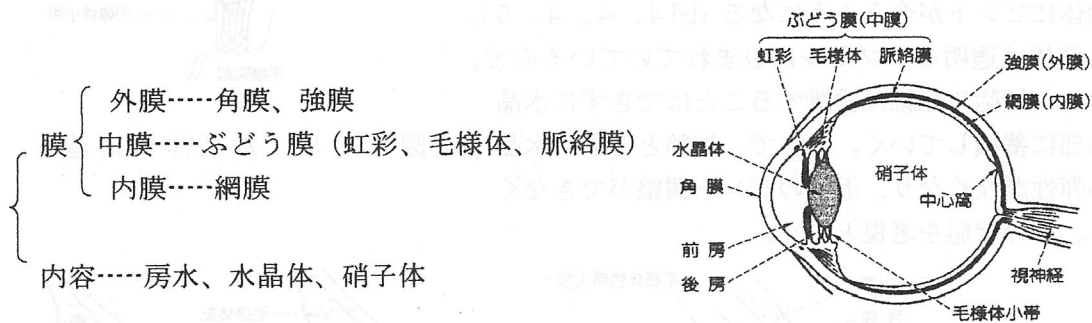


図 4. 1 眼球断面図

1) 角膜と水晶体（カメラのレンズ系に相当）

外界の情報を感知する眼球は、よくカメラにたとえられる。

カメラレンズに相当するのは時計皿のような形の角膜と錠剤のような形の水晶体である。角膜の屈折力は約 40 D（Dはジオプリーの略で、レンズの焦点距離（m）の逆数で表す）。水晶体屈折力は約 20 Dで眼全体の屈折力は約 60 Dの強い凸レンズである。

角膜は5層からなっている（図 4. 2）。表面から上皮層、ボウマン膜、実質層、デスメ膜、内皮層である。角膜中心部の厚さは約 0.5mm で周辺部では約 1mm である。角膜には血管はなく、組織内の細胞や線維の配列が規則的な透明組織である。角膜の裏面にある内皮細胞は房水は角膜内に入って膨化するのを防いでいる細胞である。この細胞は増殖することはない、加齢と共に減少する。この細胞は約 3,000/mm² あるがこれが約 1/10 に減少すると角膜内に房水が入り膨化して透明性を失う。そこで、手術的操作などでこの細胞を障害しないように注意しなければならない。

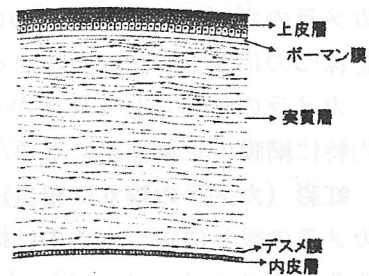


図 4. 2 角膜の構造

水晶体は角膜の後方にあり、透明な薄いカプセルに包まれている。前方には1層の上皮細胞があり、水晶体の赤道部で増殖している（図 4. 3）。水晶体にも血管はなく、細胞や線維の配列も規則的で透明である。水晶体の直径は約 9mm で厚さは3～4 mm である。水晶体は毛様体との間に張られている毛様体小帯によって、房水と硝子体の間に吊られている。この水晶体は眼のピント合わせの作用もある。調節とは水晶体屈折力が増して近くの物体に焦点が合うことをいい、焦点調節のことである。水晶体屈折力が増加する機序は

次の如く考えられている。すなわち、毛様体中の輪状筋（ミューラー筋：副交感神経支配）が収縮すると、毛様体の輪が小さくなって毛様体小帯はゆるむ。そこで、水晶体は自分の弾性で前方に膨隆して、その厚さを増し、屈折力が増加するので、近くの物体を明瞭に見ることができる。輪状筋が弛緩すると毛様体小帯が緊張して水晶体は扁平化するので、遠方の物体にピントが合うようになる（図4.4、4.5）。

水晶体は透明なカプセルに包まれているので、増殖した細胞や線維は排泄することはできずに水晶体内部に蓄積していく。そこで、加齢とともに水晶体の弾性がなくなり、近くのピント調整ができなくなる。この状態を老視という。

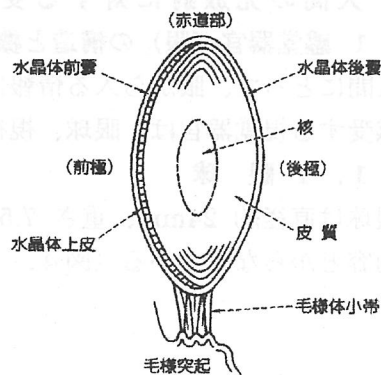


図4.3 水晶体の構造

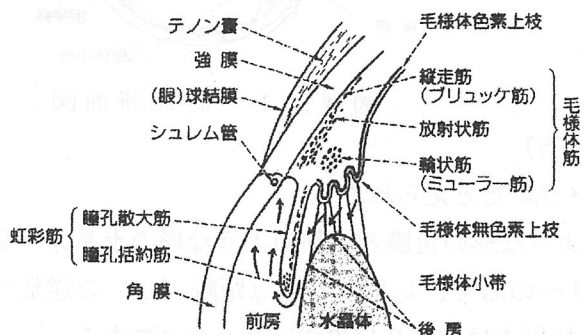


図4.4 虹彩・毛様体の構造

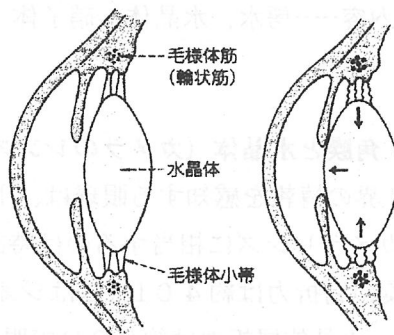


図4.5 調節の機序

2) 強膜と脈絡膜 (カメラのボディに相当)

カメラのボディに相当するのは強膜と脈絡膜である。強膜は不透明な硬い膜で眼球の形態を保つのに役立っている。この強膜の内面に脈絡膜がある。脈絡膜はメラニン色素に富み、カメラの暗箱として外界からの光線が眼内に入るのを防いでいる。また、血管に富み眼内特に網膜の栄養補給に重要な役割を果たしている。

3) 虹彩 (カメラの絞りに相当)

カメラの絞りに相当するのは虹彩で、その中央に瞳孔がある（図4.4、4.6）。虹彩はメラニン色素の多い黒人や黄色人種では褐色、メラニン色素の少ない白人では青色を呈する。虹彩には、瞳孔括約筋（副交感神経支配）と瞳孔散大筋（交感神経支配）とがあり、前者は働くと縮瞳、後者は働くと散瞳する。通常、明るい所では縮瞳し、暗い所では散瞳して眼内に入る光を調節している。

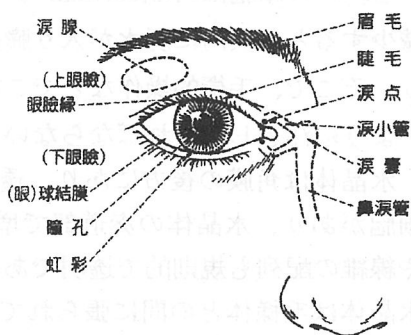


図4.6 眼部の正面図

4) 網膜 (カメラのフィルムに相当)

カメラで写真を撮る場合にはフィルムが必要である。これに相当するのが網膜である。

網膜は10層の組織からなっている(図4.7)。網膜の内層すなわち、内境界膜から外網状層までを脳層といい網膜血管から栄養されている。一方、視細胞を含む網膜の外層すなわち、外顆粒層から網膜色素上皮層までの神経上皮層は脈絡膜の血管から栄養されている。

網膜の最外層にある網膜色素上皮層は血管網膜関門としての働きをもっていて、脈絡膜から必要な物質のみを網膜に通す役割を持っている。

外界の物体は網膜の9層目にある視細胞に像を結ぶので、視細胞より内層の網膜は透明でなければならない。網膜のうち、最も感度の高いところは眼球後極部の黄斑の中央にある中心窩である(図4.8)。この部には網膜血管はなく、他の網膜部位に比べて透明性は高く、視力は最も良い(図4.9)。この中心窩はやや凹んでいて網膜脳層は薄く、脈絡膜からの栄養で十分まかなわれている。このように中心窩は他の網膜の栄養状態が異なり、機能的には良いが、種々の病気が起こりやすい。

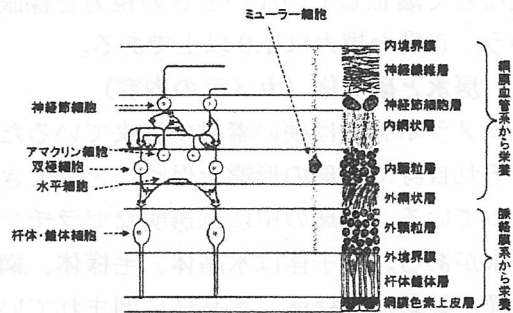


図4.7 網膜の構造

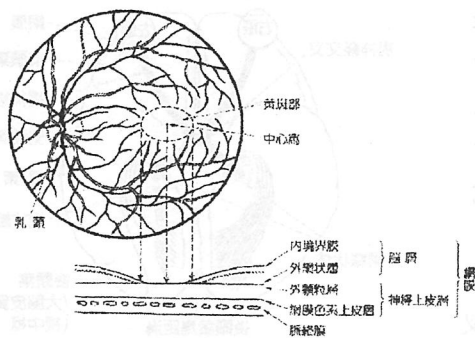


図4.8 黄斑部・中心窩

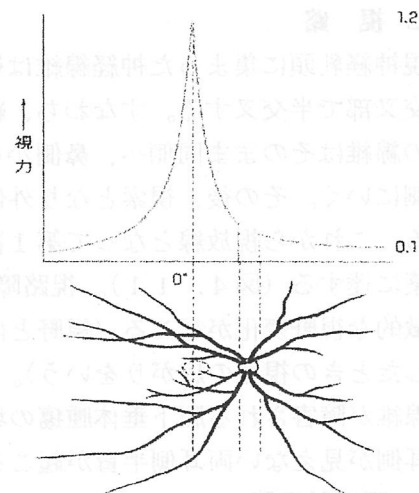
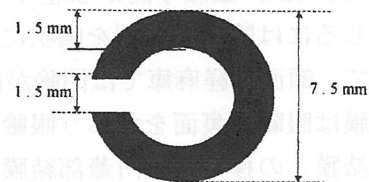


図4.9 中心窩では最も視力が良い

視細胞には錐体と杆体の2種類がある。

錐体は眼球の後極部の黄斑に最も多く、物体の形(形態覚)や色を感じ(色覚)明るい所で働く細胞である。形態覚を数量で表したのが視力である。杆体は眼底の周辺部に多く見られ、光を感じ(光覚)、特に暗所で働く。明所から暗所に入ると、初めは見えないが次第にみえてくる。これを暗順応といい、通常約30分で完成する。これが障害された状態を夜盲という。逆に、暗所から明所に入ると、初めはまぶしくて見えないが、すぐ見えるようになる。これを明順応という。眼の機能のうちで最も大切なのは視力である。視力とは眼の分解能であり、視力は判別できる最小視角(分で表す)の逆数で示す。視力測定に使う正式の視標はランドルト環である。標準のランドルト環視標は外径が7.5mmで幅と切れ目の幅は1/5の1.5mmのものをいう(図4.10)。



その視標は5mの位置から見ると切れ目の幅が1分に相当して視力1.0の視標である。眼

鏡などで矯正していないときの視力を裸眼視力といい、矯正したときの視力を矯正視力という。正常な視力は1.0以上である。

5) 房水と硝子体 (カメラの内容)

カメラボディは硬い素材で出来ているため変形することはないが、強膜が硬いといってもそれ自身で眼球の形態を保つことはできない。眼球は眼内から一定の圧力でその形態を保っている。眼球の中には透明なゼラチン様の半流動体組織である硝子体と、水溶透明な房水がある。硝子体は水晶体、毛様体、網膜に境されている。房水を満たしている眼房は角膜、虹彩、毛様体、水晶体に囲まれている部分で虹彩により前房と後房に分けられている。房水の産生は毛様体で行われ、後房に分泌される。その後、瞳孔領を通過して前房に入り、前房隅角を通過して血管系に排出される。この房水の産生と排出とのバランスが良いときには眼内の圧力、すなわち、眼圧は一定に保たれるがこのバランスが崩れると低眼圧や高眼圧になる。眼圧の高い眼を緑内障という。緑内障では高眼圧のために視神経が萎縮して眼圧を下げないと失明する。正常眼圧は10—21mmHgであるが、最近では眼圧が正常でも緑内障変化が起こる正常眼圧緑内障がある。これは、その眼が耐えられる眼圧すなわち、健常眼圧が低いことによると考えられている。

4. 1. 2 視路

眼底の視神経乳頭が集まった神経線維は視神経を通り視交叉部で半交叉する。すなわち、網膜の耳側からの線維はそのまま同側へ、鼻側からの線維は反対側に行く。その後、視索となり外側膝状体に達する。これから視放線となって第1次視覚領の後頭葉に達する(図4. 11)。視路障害によって特徴的な視野変化が起こる(視野とは、視線を固定したときの視覚の広がりという)。視交叉部で交叉線維が障害される脳下垂体腫瘍の場合には両眼の耳側が見えない両耳側半盲が起こる。

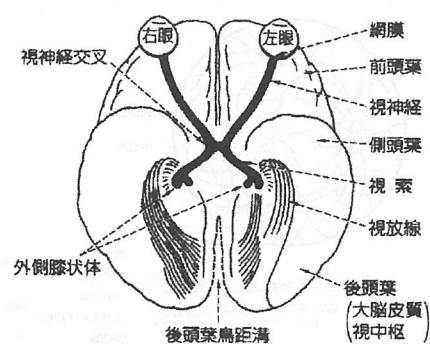


図4. 11 視覚路

4. 1. 3 眼球付属器

眼球付属器は眼球の周囲にあり、眼球の保護や運動に関与している。眼球付属器としては、眼瞼、結膜、涙器、外眼筋、眼窩内組織などである。

眼瞼は上眼瞼と下眼瞼からなり、その間を瞼裂という。瞼結膜と皮膚との移行部は眼瞼縁といい、睫毛が並んでいて外界からのゴミの入るのを防いでいる(図4. 6)。上下の眼瞼には軟骨の瞼板があり、上眼瞼の瞼板には(上)眼瞼挙筋(動眼神経支配)が付着していて、(上)眼瞼挙筋が収縮すると眼が開く。これが麻痺すると眼瞼下垂がおこる。眼を閉じるには瞼裂の周囲を輪状に取り巻いている眼輪筋(顔面神経支配)の収縮による。従って、顔面神経麻痺では閉瞼が出来ず兔眼になる。

結膜は眼瞼の裏面をおおう眼瞼結膜、眼球の前面で強膜をおおう眼球結膜、眼瞼結膜と眼球結膜との移行部を円蓋部結膜という。このように結膜は眼球と眼瞼とを連絡し、眼球の運動を円滑にする粘膜である。

涙器は涙腺と涙道からなる。涙腺は上眼瞼の外側上方奥にあり涙液を分泌する。涙道は涙の排出路であり、涙点、涙小管、涙囊、鼻涙管からなり、涙はこれらを通り下鼻道へ流

れる(図4.6)。涙液は上下の涙点から涙道内に吸引されるが、これは主として眼輪筋の瞬目運動に伴う涙嚢のポンプ作用による。この作用が弱いときにも流涙が起こるが、通常、流涙は涙腺からの過剰分泌か涙道の通過障害による。この両者のバランスが保たれているときには流涙はなく、この間に角膜、結膜が乾燥するのを防いでいる。涙の層は約7 μ で3層からなっている。表層は睫毛の付近にあるマイボーム腺からは脂肪が分泌されて、瞬目ごとに油の膜が涙の層を覆い乾燥を防いでいる。その内面には涙液層があり、更に、その内面には結膜の杯細胞から分泌されるムチン層があり、涙液の水濡れ性をよくしている。眼が乾燥するのは涙の分泌量が少ないのは勿論であるが、表面の油層が早期に割れてしまうと涙の乾燥が速まる。通常、油層は瞬目毎に新しい膜ができる。瞬目は1分間に15回程度起こるが、その前に油層が破れると眼は乾燥する。これを、通称、ドライアイという。

眼筋には、眼球内にある内眼筋と眼球外にある外眼筋とがある。内眼筋は調節に関与し、外眼筋は眼球運動をつかさどる。外眼筋は6本あり、4本は直筋、2本は斜筋である(図4.12)。直筋には上直筋、下直筋、内直筋、外直筋があり、眼球への付着部は赤道部より前で、筋の収縮で眼球は筋の名の示す方向に動く。斜筋は上斜筋と下斜筋で眼球付着部は赤道部より後極部であるため、上斜筋の収縮によって眼球は下外方に、下斜筋が働くと上外方に動く。神経支配は上直筋、下直筋、内直筋、下斜筋は動眼神経支配、外直筋は外転神経支配、上斜筋は滑車神経支配である。これらの外眼筋のバランスの異常で共同性斜視がおこり、外眼筋あるいは神経の麻痺によって麻痺性斜視がおこる。麻痺性斜視では通常、複視がおこる。

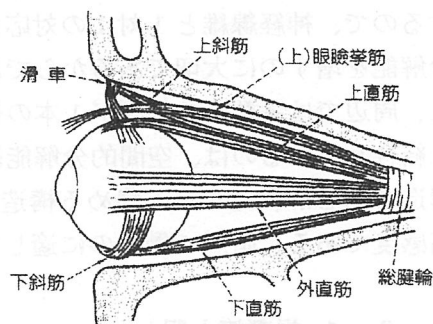


図4.12 外眼筋

正常の眼は両眼でみている。この機能を両眼視機能という。両眼視機能のもっとも高度のものは立体視である。斜視ではこの両眼視機能が障害される。近方の物体をみるとときには両眼の視線は内方にむかうが、遠方の物体をみるとときには視線は外方にむかう。前者を輻湊、後者を開散といい、両眼視に関係する。

眼窩は7つの顔面骨からなり眼窩口を底とし、視神経管を頂点とするほぼ円錐形をなしている。眼窩内組織には、眼球、神経、血管、外眼筋、脂肪組織があり、眼球は眼球被膜(テノン囊)で包まれている。テノン囊と強膜との間に滑液腔があり、眼球運動を滑らかにしている。眼窩の下壁の骨は薄く、ふきぬけ骨折blowout fractureの好発部位で、脂肪組織、下直筋あるいは下斜筋が骨折部に嵌頓し上方視ができなくなる。また、視神経管骨折は眉間外側を強打すると発症しやすいので注意が必要である。

(所 敬)

参考文献

- 1) 所 敬、金井 淳編：現代の眼科学(第7版)金原出版(2001)。
- 2) 所 敬：I.感覚器系、眼、看護の人間科学(森 亘他編)文光堂、pp357-366(1982)。
- 3) 所 敬、山下牧子：目でみる視力・屈折検査の進めかた。金原出版(2000)。

4. 2 眼の反応機構

角膜から入射した光線は角膜、前房、水晶体、硝子体を通過して網膜に達する。網膜の厚さは100～400 μmで10層からなり網膜の内層から9層目に視細胞があり、ここに外界の像が結ぶ。視細胞には錐体と杆体の2種類がある。錐体は約600万個で高解像力で明るいところで高感度である。主として眼球の後極部特に黄斑部に多い。錐体は赤錐体、緑錐体、青錐体に分かれている。そして、視力、色覚をつかさどる。一方、杆体は約1億2千万個で眼底の周辺部に存在して光覚をつかさどる。これらの視細胞からでた神経線維は視神経に集まるが、その数は100万本といわれている。そこで、すべての視細胞から1本の神経線維が出て視神経になるのではない。すなわち、中心窩に近い部位の錐体と神経線維は1対1に対応しているが、中心窩から離れるにしたがって複数の視細胞と1本の神経線維が対応している。さらに、周辺の杆体は多数の細胞が1本の神経線維と結合している(図4.13)。これは、錐体は視力に関係するので、神経線維と1対1の対応が空間的分解能を増すのに大切であるからである。また、周辺では多数の視細胞が1本の神経線維と結合しているのは、空間的分解能には劣る構造であるが、光を広く集める構造でもあり、高感度である。暗所で働くのに適している¹⁾。

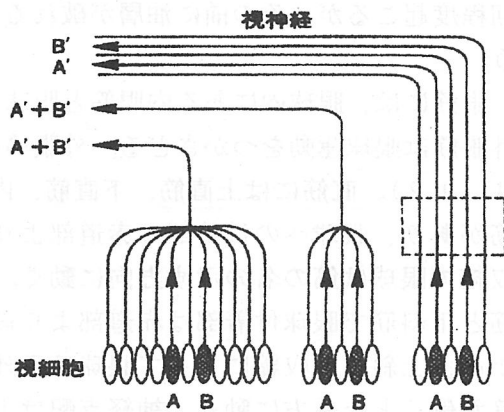


図 4. 13 視細胞と視神経の繋がり

4. 2. 1 視環境と眼

網膜の役割は外界の情報を正確に処理して大脳に送り込むことである。光を最初に感受するのは視細胞であるが、地球上は四六時中光が射しているわけではない。直射日光下では1万から10万ルクス、曇りでは1,000ルクス程度、満月の夜は0.1ルクス、三日月の夜は0.01ルクス、星空では0.001ルクスで1億倍もの範囲がある¹⁾(表4.1)。カメラではこのような環境を写真に取るときには高感度或いは低感度のフィルムを使うが、眼では錐体と杆体でこれを処理している。このような視環境に適応して、正確な情報を大脳に伝達するには、前述のような視細胞と視神経線維の数の対応の他に種々の機構を備えている。

表 4. 1 太陽光の強さ (視環境)

• 直射日光下	1万～10万ルクス	} 8桁の差
• 曇り	1,000ルクス程度	
• 満月夜	0.1ルクス	
• 三日月夜	0.01ルクス	
• 星空	0.001ルクス	

・視細胞(錐体、杆体)は広範囲の光の変化に対応

4. 2. 2 網膜内の情報伝達

眼球の光学系を通して網膜に到達した光信号が、視細胞で電氣的信号(過分極性の視細

胞電位)に変換される。網膜内の情報伝達には縦方向の伝達と横方向の伝達とがある。縦方向の伝達は視細胞に投影された像が後述するように電気信号に変換され双極細胞でシナプスを変え、神経節細胞で再びシナプスを変えて視神経にはいる。ここでの神経伝達物質はグルタミン酸である。縦方向の情報に対して、横方向の情報は水平細胞とアマクリン細胞が調節している²⁾(4. 1項、図4. 7参照)。

1) 視細胞と光受容

視細胞には錐体と桿体の2種類がある。機能上、錐体は明所で作動し、桿体は暗所で作動する。構造上、両視細胞とも外節、内節およびシナプスから構成される。外節は光受容器で、桿体では円柱状に発達した形質膜の筒の中に円板が幾重にも重なった構造をしている。一方、錐体の外節は形質膜自体が幾重にも折りたたまれた構造になっている(図4. 14)。この外節中に視興奮関連分子が存在している。両細胞の内節には視細胞が生存するための核やミトコンドリアなどが存在する。シナプスは光受容に伴って発生した電気信号を次ぎの細胞に伝えるための部位である³⁾。

視覚情報処理機構のうち最初の段階である桿体の光信号の受容および伝達のしくみがほぼ明らかになってきているが、錐体のそれは未解決の点が多い。眼に入る光に最初に反応するのは網膜の視細胞の外節にある視物質であり、一連の反応はこの視物質から開始される。この視物質には桿体に存在するロドプシン(視紅)と錐体に存在する3種類の青色感受性色素、緑色感受性色素、赤色感受性色素がある。ここでは、研究のもっとも進んでいるロドプシン(図4. 15)を中心に述べる。

暗黒中では、シナプスから神経伝達物質

であるグルタミン酸が常に放出されているが、光刺激でその放出が停止することで信号が伝達すると考えられている。桿体に光が当たり、外節円板膜上にある光受容体蛋白質ロドプシンは、蛋白質部分(オプシン)と色素部分(11-シスレチナール)からなる色素蛋白質である。11-シスレチナールが光を吸収すると、オールトランスレチナールに分解される。この過程で作られる中間生成物がトランスジューシンを活性化する。活性化トランスジューシンはcGMPの分解酵素であるcGMPホスホジエステラーゼ

を活性化し、これによって桿体のcGMPは分解される。すなわち、暗黒中では視細胞は脱分極状態にあるが、光が当たると、その細胞質中のcGMPが急速に減少する結果、桿体形質膜のcGMP感受性陽イオン透過性チャンネルが閉鎖して細胞外からの陽イオン(Na⁺、

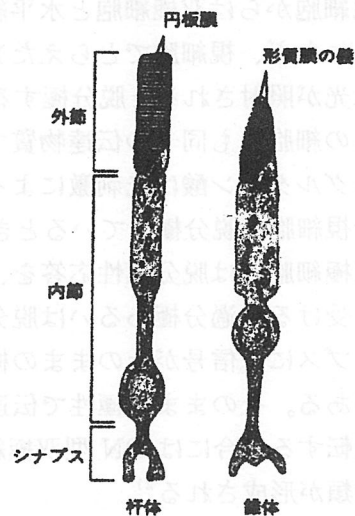


図4. 14 桿体と錐体

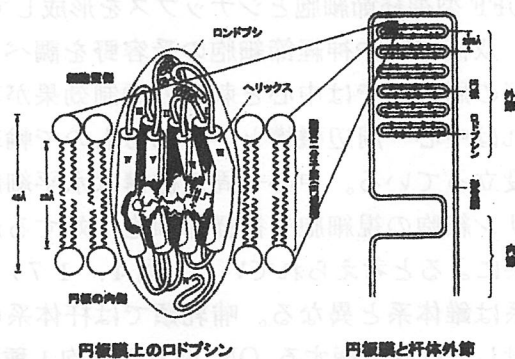


図4. 15 ロドプシンの構造とその所在

Ca²⁺など)などの流入が停止し、過分極性の膜電位変化を生じる^{2~5)}。過分極のために杆体から双極細胞に対するグルタミン酸の放出が止まる。このように視細胞は光信号を電気信号に変換させるが、次の光信号に備えてすみやかに視興奮を停止させて視物質を再生させる機構も存在する(図4.16)。錐体の視物質もレチナールとロドプシンの蛋白質に類似の錐体オプシンから構成されていて、錐体における光受容メカニズムも杆体のそれによく似ている。

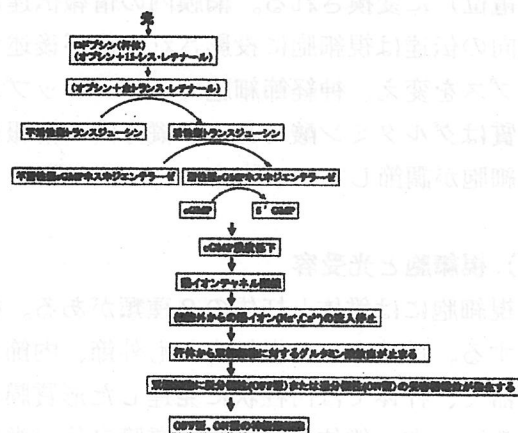


図4.16 ロドプシンの光受容

2) 網膜内の信号伝達

視細胞からは双極細胞と水平細胞に情報伝達が行われる。双極細胞は視細胞と神経節細胞をつなぎ、視細胞でとらえた光の情報を視細胞に伝える役割を果たしている。双極細胞には光が照射されると脱分極する ON 型と光照射で過分極する OFF 型とがある^{2, 6)}。どちらの細胞にも同一の伝達物質であるグルタミン酸が作用する。視細胞の神経伝達物質であるグルタミン酸は光刺激によって放出が止まり、暗所で放出される。グルタミン酸は暗所で視細胞が脱分極しているときに放出されているので、グルタミン酸は水平細胞と OFF 型双極細胞には脱分極性応答を、ON 型双極細胞には過分極性応答を引き起こす。錐体は光を受けると過分極あるいは脱分極する。視細胞から双極細胞に刺激が伝わる時そのシナプスには信号がそのままの極性で伝達されるものと逆の極性で伝達されるものの2種類がある。そのままの極性で伝達される場合、その細胞は OFF 型双極細胞になり、極性が反転する場合には ON 型双極細胞になる。このように双極細胞レベルで ON と OFF の2種類が形成される²⁾。

双極細胞から神経節細胞への接続は単純で ON 型双極細胞は ON 型神経節細胞と、OFF 型双極細胞は OFF 型神経節細胞とシナプスを形成している。

双極細胞や神経節細胞の受容野を調べると、受容野の周辺部では中心と刺激の抑制効果が現れる。これは中心一周辺機構といわれるもので輪郭の強調に役立っている。中心一周辺機構は水平細胞やアマクリン細胞の視細胞や神経節細胞に対する周辺抑制効果によると考えられている(図4.17)^{2, 7)}。杆体系は錐体系と異なる。哺乳類では杆体系の光刺激に対しては脱分極する ON 型双極細胞1種類しかないものが多い。杆体双極細胞は1つで多数の杆体と接続しているので、空間解像力は悪いが感度はよい。杆体双極細胞は ON 型1種類であるが、この細胞は神経節細胞と直接接続してなく、アマクリン細胞を介し

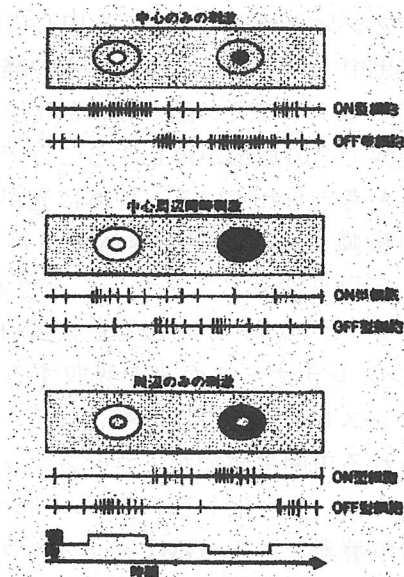


図4.17 ON型とOFF型の神経節細胞の応答

て ON 型、OFF 型両方の神経節細胞に信号が伝わるようになっている。

4. 2. 3 視神経から外側膝状体

網膜神経節細胞から出た神経線維は視神経を通り視交叉で半交叉した後に外側膝状体でシナプスを変える。外側膝状体は網膜からの視覚情報を視中枢に送る中継点的な場所であり、これから大脳皮質第1次視覚野 (V1、ブロードマンの17野) に入力される。

外側膝状体は冠状断でみると上下に6層の細胞層で構成されている(図4. 18)。眼球からの神経線維は視交叉で半交叉しているため、一側の外側膝状体には同側眼の耳側網膜と対側眼の鼻側網膜から投射を受けている。外側膝状体は腹側から背側に向かって第1層から第6層まで番号がついている。腹側から数えて2,3,5層は同側(非交叉線維)、1,4,6層は反対側(交叉線維)の網膜の神経節細胞の軸索線維を受ける。各層間で情報が干渉

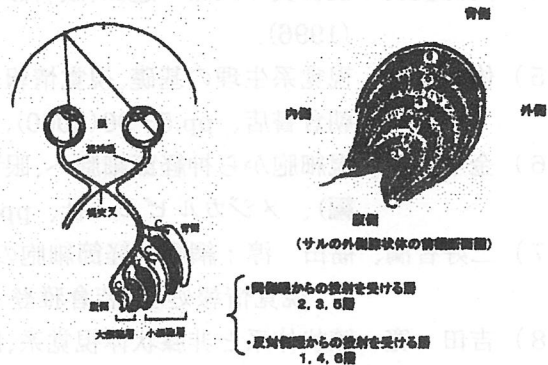
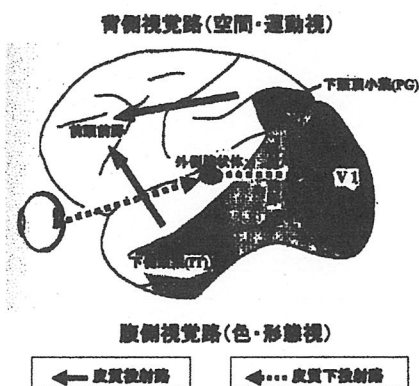


図4. 18 網膜から外側膝状体への投射⁵⁾

したり混じりあったりすることはない。1,2層は大細胞層 *magnocellular layer* と呼ばれ、主に Y 神経節細胞の軸索が終止する。運動視や空間視に必要な情報をつかさどる。3,4,5,6層は小細胞層 *parvocellular layer* と呼ばれ、主に X 神経節細胞の軸索が終止する。形態視や色覚に必要な情報に関与する。外側膝状体細胞は互いに拮抗的な「中心・周辺」の同心円状の受容野 (ON 中心、OFF 中心) をもっている。しかし、この拮抗作用は網膜神経節細胞より顕著で抑制野と興奮野の釣り合いがよくとれている。すなわち、ON 中心型受容野では中心部への照射で放電がみられ、周辺部の照射では放電が停止する。OFF 中心型受容野ではこの逆になる^{5, 8, 9)}。外側膝状体では網膜からの視覚情報が精度よく選り分けられ、整理され、また、強調される機能をもっている。このような情報が大脳皮質第1次視中枢に送られる。

4. 2. 4 大脳皮質1次視覚野 (V1, ブロードマンの17野)

後頭葉視覚中枢では精度の高い視覚情報をもとに正確な統合作用が営まれている(視覚情報の階層的处理)。V1 から側頭連合野を経由する腹側投射路を通して色や形態視の情報を前頭前野に、V1 から頭頂連合野を経由する背側投射路を通して空間視や運動視の情報を前頭前野に出力される(図4. 19)。前頭前野では記憶情報とのマッチングが行われて認知が成立すると考えられている^{5, 10)}。



(所 敬)

図4. 19 脳における視覚情報の流れ

参考文献

- 1) 池田光男：眼はなにを見ているか、視覚情報処理、平凡社、pp.10-181(1990).
- 2) 直井信久：網膜内情報処理と神経伝達物質、眼科診療プラクティス 22、文光堂 pp.270-273(1996).
- 3) 大黒 浩、秋野豊明：視細胞における情報、眼科 New Insight 1 視覚情報処理(若倉雅登 編)、メジカルビュー社、pp.10-20(1994).
- 4) 阿部俊明：視物質の代謝・遺伝、眼科診療プラクティス 22、文光堂 pp.252-255(1996).
- 5) 佐藤宏道：視覚系生理の基礎、視覚情報ハンドブック(日本視覚学会編)、朝倉書店、pp.53-96(2000).
- 6) 金子章道：視細胞から神経節細胞へ、眼科 New Insight 1 視覚情報処理(若倉雅登 編)、メジカルビュー社、pp.21-34(1994).
- 7) 三好智満、福田 淳：網膜神経節細胞の機能分化と並列情報処理、眼科 New Insight 1 視覚情報処理(若倉雅登 編)、メジカルビュー社、pp.35-47(1994).
- 8) 吉田 寛：膝状体系と非膝状体視覚系、眼科 New Insight 1 視覚情報処理(若倉雅登 編)、メジカルビュー社、pp.48-59(1994).
- 9) 高橋洋司：外側膝状体の機能、眼科診療プラクティス 17、文光堂 pp.147-151(1995).
- 10) 佐藤宏道、津本忠治：大脳における視覚情報処理とその可塑性、眼科 New Insight 1 視覚情報処理(若倉雅登 編)、メジカルビュー社、pp.60-73(1994).



4. 3 皮膚の構造と光受容器としての機能

人体の光受容器である皮膚は身体の最外層を覆う臓器である。内蔵を守り体温を調節し、さらに光を必要なだけ取り込むフィルターとしても機能している。また、肌の色で人の健康状態も判るといわれる。身体の表面を覆う皮膚は弾力性や伸縮性に富み場所によって厚みが違う。大人では体重の約15-16%を占め総面積は約1.6m²である。皮膚の構造は図4. 20に示すように、表層から順に表皮、真皮、皮下組織からなる¹⁾。表皮の最下層には基底細胞が基底層を形成しており、この所々にメラノサイトがある。皮膚が紫外放射を吸収するとメラニン色素顆粒が産生してここに蓄えられる。表皮の基底層では常に細胞分裂が起こり新しい細胞が生まれ、上層細胞へと分化し最上層で核を失った死細胞となり、角質化し垢として絶えずはがれ落ちている。この細胞分化は表皮のturnoverと呼ばれ健常表皮では26-28日の周期で繰り返される。紫外放射で日焼けした肌も約一ヶ月後には元の肌色に戻るの表皮のこの仕組みによる。真皮は繊維が主成分で、表皮の数倍の厚さがあり硬く、ここには皮膚附属器官といわれる毛包、脂腺、汗腺、血管とリンパ管が通っている。

皮膚への光の吸収・透過特性は図4. 20に示したように波長に大きく依存する。紫外放射は皮膚の表面でその殆どが吸収される。310 nmより短い紫外放射は皮下0.1 mmまで2-8%透過するが、0.5 mmより深くには達しない。360nmより波長の長い紫外放射の透過率は、皮下0.1 mmで50-60%、0.5mmで7%、1.0 mmでは0.5%と低下しつつ真皮まで届く。一方、波長の長い可視放射や赤外放射は真皮ま

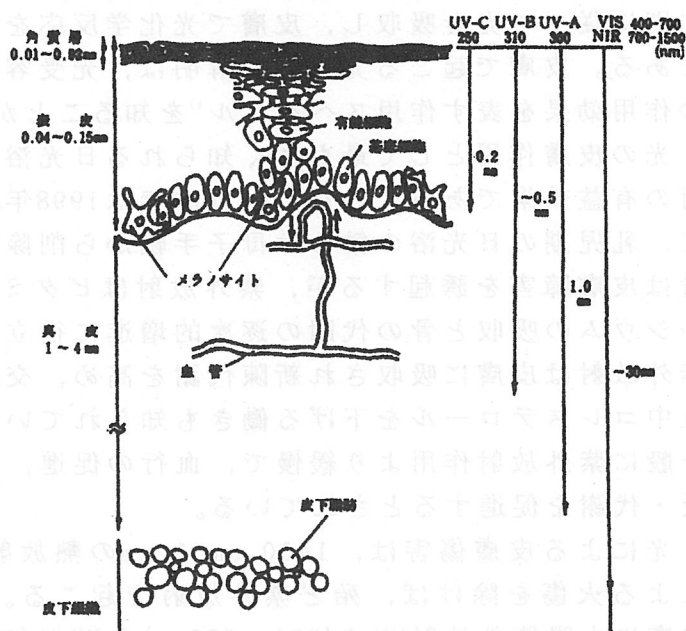


図4. 20 皮膚の構造と光の透過特性
で容易に透過する。また、皮膚の色は人種、生活環境によって異なるから光に対する応答特性も当然異なっている。白い皮膚では320-400 nmの紫外放射の平均30-40%が反射されるが、黒い皮膚では16%程度しか反射されない。白い皮膚は反射によって、黒い皮膚は吸収によって紫外放射傷害から皮膚を守っているといわれる²⁾。しかし、290~320nmの日焼け作用の強い紫外放射の皮膚透過率は皮膚色にはあまり依存しないと考えられている。

(佐々木政子)

参考文献

- 1) 佐々木政子：メディカルフォトケミストリーの現状と可能性，光化学，

7, 17-28(1983) ; 最近の光環境の変化, JJSHP(日本病院薬剤師会雑誌), 30(5)536(1994).

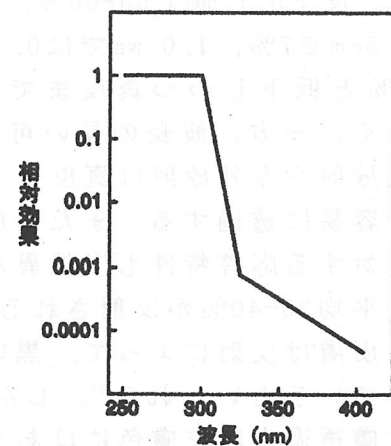
2) 清寺真, 高橋正昭, 棚橋善郎: II. ヒト皮膚の光線に対する防御機構について, 「光と皮膚」(金原出版)(1973) pp. 75-92.

4. 4 皮膚の光反応機構

光受容器である皮膚の光反応は大きく二つに分類される。一つはビタミンD₃合成のような有益作用であり。いま一つは紅斑産生や光線過敏症などの有害作用, 生体傷害反応である。これらの反応は何れもミクロにみれば皮膚を構成する分子の光化学反応であり, さらに細胞レベルでみれば光分子生物学反応として捉えることができる。これを我々はマクロにはからだの異変, ビタミンD₃不足による骨粗しょう症, 日焼けや白内障などとして認識する。しかし, 生体内で起こるこれらの光反応の起点は分子レベルでの光化学反応である。光化学反応は対象とする物体に光が吸収されることから始まる。つまり, 体内にある光吸収物質が, 光化学第1法則あるいはGrotthus-Draperの法則に従って光を吸収し, 皮膚で光化学反応を誘起するのがすべての始まりである。皮膚で起こる光反応の解明は, 光受容物質が吸収する光の波長ごとの作用効果を表す作用スペクトル¹⁾を知ることから開始される。

光の皮膚作用として最もよく知られる日光浴は, 太陽の紫外放射と赤外放射の有益効果である。しかし, 日本では1998年に紫外放射の有害面を考慮して, 乳児期の日光浴の勧めは母子手帳から削除された。なお, 過度の紫外放射は皮膚障害を誘起するが, 紫外放射はビタミンD₃を光合成し, 小腸でのカルシウムの吸収と骨の代謝の逐次的増進に役立ち, 殺菌作用も示す。また, 紫外放射は皮膚に吸収され新陳代謝を高め, 交感神経の緊張を解き, 血糖, 血中コレステロールを下げる働きも知られている。一方, 赤外放射の作用は一般に紫外放射作用より緩慢で, 血行の促進, 血圧の降下, 脈拍の充実, 呼吸・代謝を促進するとされている。

光による皮膚傷害は, 1400 nm-1 mmの熱放射による火傷を除けば, 殆ど紫外放射で起こる。皮膚に太陽紫外放射UV-B(290~320nm)とUV-A(320~400nm)が照射されると, 程度の差はあっても誰にでも日焼けが起こる。日焼けは, 臨床的には火傷のように赤くなるサンバーン(sunburn, 紅斑生成)反応とサンタン(suntan, 色素沈着)反応との総合反応である²⁾。サンバーンの作用スペクトル(図4. 20)³⁾の極大値は, UV-C域の250 nm付近にある。しかし, 地表の太陽光にはU



V-Cは含まれていないから, 屋外スポーツなどで 図4. 20 CIE標準紅斑曲線のサンバーンでは紫外線UV-Bが主役となる。サンバーンを起こすような過度の日焼けは皮膚の老化を促進し, 良性・悪性腫瘍発症の誘因となる。一方,

紅斑を生じない程度の弱いUV-Bの長時間照射が発がん率を高め、成層圏オゾン破壊によるUV-Bの増加が皮膚がんを増加させ⁴⁾、あるいはストレスが日焼けに影響する⁵⁾などの報告もある。なお、日本人の皮膚がん発生率は30年前に比較して約10倍となっており⁶⁾、屋外スポーツやアウトドア・レジャーでは、サンバーンのような日焼けを起こさないための十分な紫外放射UV-Bカット対策が必要といえる。

日焼け以外にも紫外放射で起こる皮膚傷害がある。良く知られているのは光線過敏症^{7,8)}である。これは体内に何らかの形で取り込まれた物質が起こす光増感反応で、サンバーン現象が増強される。殆どの場合320-400 nmのUV-Aが作用光となる。光線過敏症の原因となる物質(光増感剤)は植物、食品、医薬品、化粧品、香料、化学工業薬品、除草剤、殺虫剤など様々な物質の中に数多く見いだされる。東海大学皮膚科で過去に光線過敏症の原因となった薬剤の例を表4. 2に示す。

表4. 2 薬剤性光線過敏症の原因薬剤と症例数

光線過敏症には光毒性型と光アレルギー性型がある⁹⁾。光毒性型は原因となる物質と作用光のどちらも十分な量あれば、すべての人間に起こり得る一過性の光中毒反応である。なお、光毒性反応は逆に難治性皮膚病の光化学療法に利用されているものもある¹⁰⁾。一方、光アレルギー性型は、体内に取り込まれた物質が光化学反応過程で体内の蛋白質と結合して抗原となり、抗体が産生された個体だけに発現する。光吸収物質の量および光量と反応との間には相関はなく、免疫機能の関与が大きい。

高齢化社会を迎えた日本では、薬剤性光線過敏症の増加が危惧されており、真剣に取り組むべき医療環境問題の一つとさえ考えられている。また、最近はアウトドア・レジャーが盛んになり紫外放射を浴びる機会は増えている。UV-Bによる皮膚がんやUV-Aによる光線過敏症から皮膚を守るためには、太陽紫外放射の一日の時間変動や季節変動を知らねばならない。ここでは、太陽紫外放射の変動などについての参考文献¹¹⁾を提示するに留める。

(佐々木政子)

内服薬剤	症例数
利尿剤および非チアジド系降圧剤	
Trichlormethiazide	4
Hydrochlorothiazide	6
Benzylhydrochlorothiazide	5
Methyclothiazide	1
Penfluzide	1
Clofenamide	5
Furosemide	1
Meticrane	2
抗生物質製剤	
Doxycycline hydrochloride	1
Griseofulvin	2
サルファ剤	
Sulfamethiazole	1
糖尿病用剤	
Tolbutamide	1
中枢神経用剤	
Afloqualone	2
精神神経用剤	
Chlorpromazine hydrochloride	2
Diazepam	1
Chlordiazepoxide	1
非ヒスタミン剤	
Mequitazine	1
睡眠鎮静剤	
Triazolam	1
心臓異常興奮調製剤	
Alprenolol hydrochloride	1
冠血管拡張剤	
Diltiazem hydrochloride	1
Trimetazidine hydrochloride	1
解熱・鎮熱・消炎剤	
Piroxicam	3
肝臓疾患用剤	
Protoporphyrin disodium	1
抗悪性腫瘍剤	
Tegafur	2
合計	47

(昭和50年~62年3月末日)

参考文献

- 1) 伊藤隆: 9. 作用スペクトル, 「フォトバイオロジー」(松本, 松平,

篠原編)pp.205-216,学会出版センター(1989).

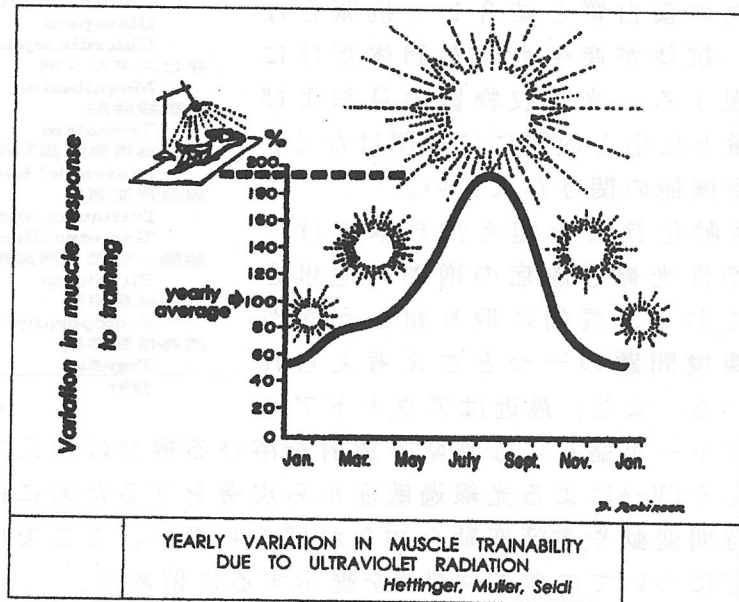
- 2) 松尾 朗:3-1光ではじまる皮膚障害-サンバーンとサンタン “生物の光障害とその防御”(共立出版)(2000) pp.65-79.
- 3) Mckinlay A. F., B. L. Diffey and B. Meul, CIETC-1.7 (1983).
- 4) Medows,D.H., D.L.Medows and J.Randers,Chapter 5 in Beyond the Limits, Chelsea Green Publishing Co.,Vermont (1992).
- 5) Kaminaga,H., Photomed. Photobiol., 15,113-116 (1993).
- 6) 上田正登,遺伝,53(5)25-29(1999).
- 7) 佐藤吉昭編,「光線過敏症」(金原出版)(1991).
- 8) Deleo,V.A.,「Photosensitivity」(Igaku-Shoin) (1992).
- 9) Emmett,E.A.,Photochem.Photobiol.,30,429 (1979).
- 10) 佐々木政子,10.病気も光で治る,「光が活躍する」-億人の化学15,日本化学会編(大日本図書)(1993) pp.203-229.
- 11) 佐々木政子,オゾン層破壊と地表の太陽紫外線 “生物の光障害とその防御機構”(共立出版)(2000) pp.1~16;紫外線環境と計測,化粧品誌,22(2)102~110(1998);照明学会誌,80,18-23(1996).など.

4. 5 生体内光反応

殆どの生理活性物質はプロスタグランジンやステロイドを除けばタンパク質という巨大分子である。これらタンパク質の分子構造はようやく解りかけてきたのが実状であり,その生理活性ましてや光による生理活性発現と作用スペクトル研究は将来の研究課題に属している。ここでは,筋肉トレーニングと太陽紫外放射の相関についての興味深い研究論文¹⁾をご紹介します。若者のサッカー熱だけでなく,ママさんバレー,年輩者のゲートボール等々,日本人が一生の内に屋外スポーツをする時間は確実に増加している。しかし,屋外で必ず浴びる紫外放射とスポーツとの相関については殆ど研究報文がない。この興味深い論文は一読の価値がある。

著者Hettinger,は筋肉トレーニング効果

は季節変動に依存する 図4.22 筋肉トレーニング効果の季節依存性と書いている。このトレーニング効果の季節変動(図4.22)を見たとき,



その季節変動が太陽UV-Bの季節変動に酷似することに驚かされた。筋肉トレーニング効果は8月にピークを示し、12月1月の冬の時期に最低となっている。しかも、その変動幅はUV-Aではなく、UV-Bの変動幅に明瞭に重なる。これは筋肉トレーニングにUV-Bが寄与することを意味している。

ビタミンD₃合成の関与も示唆されるが、夏は気温が高く筋肉がリラックスし、ビタミンC豊富な果物の摂取が容易なことも貢献しているのではないかと考察される。Hettingerも紫外放射の寄与については男性ホルモンの関与などを含めて、未知の課題が多く一層の研究が必要としている。しかし、真っ赤に日焼けするほどの紫外放射の照射後に、筋力アップがみられたという5年間の研究成果は事実である。最近では真っ赤に日焼けする紅斑は皮膚がんの原因と懸念されており、スポーツにおいてもUV-Bカットを目指す方向にある。UV-Bを多く取り込むという約40年前のこのトレーニング法は、最新のスポーツ医学の手法で再検討すれば有意義な結果に変えられる可能性がある。“紫外放射とスポーツトレーニング”は「光放射の人間に対する生理的影響評価」という課題に対する格好の未知課題を提供しているといえよう。

補足：一般に男性は日焼けのリスクや紫外放射カットに対する認識が甘い。身近な60歳以上の男性方のお顔には老人斑とよばれるしみが必ず見つかる。これは、若い頃に紫外放射カットを軽視した後遺症である。男性は女性に比べて、平均値で見ると、少ない紫外放射量で日焼けを起こす²⁾という事実は意外に知られていない。現在、スポーツマン人生を謳歌している青年も人生80年の時代を迎えた昨今、男性への紫外放射防御に関する啓蒙が必要でな時期が到来していると考えられる。

(佐々木政子)

参考文献

- 1) Hettinger, T., Chapter II Strength in relation to age and sex in 「Physiology of Strength」 Charles C Thomas Publisher (1961).
- 2) 長沼雅子, 福田実他, 日本皮膚科科学雑誌, 105 (11)1427-1430 (1995).

5. 人間の生理的指標の種類と概要

5. 1 はじめに

医学と工学との境界に位置している医用生体工学 (Bio-Medical Engineering) が学際的な研究領域として格段の進歩が遂げられた。特に、生体の持つ様々な情報を客観的に計測するための手法がエレクトロニクスの発展に伴って、進歩してきた。これらの情報は物理量、化学的な量からなっており、通常の計測技術が適用できる場面が多い。しかし、生体の情報を経時的、連続的にまた動的に計測するために、一般的な計測で用いられている手法を適用するには、対象となる情報量の信号レベルが非常に小さいこと、生理的条件や外部の環境条件で大きく変動することなどによる問題点がある。そのため、生体の持つ情報の計測には様々なセンサ、電極などが用いられている。

近年、ヒトの作業による疲労、ストレス、覚醒度、注意力などを始め、生活・労働時の心身状態を調べ、作業効率や作業誤りの割合を客観的に評価することが多くなってきた。特に、情緒的な変化においては、血圧や心拍の上昇など身体内部の生理的変化が見られる。これらは、中枢神経系や自律神経系の活動に関係しているが、直接的に評価することが困難であるため、生理的指標を用いた評価が行われるようになってきている。

ここでは、生体の持つ電気的な現象を計測する手法について簡単に取りまとめ、また生体の計測分野とその対象としての生理指標に着目し、代表的な指標について取りまとめる。

5. 2 生体電気現象

イタリアのガルバニーが 1786 年にカエルの下肢筋が痙攣し、生物が電気によって刺激されるといふ実験によって生物電気を発見した。解剖していたカエルの下肢が、近くで働かせている起電機の作用で痙攣すること。その後、空中の電気によっても痙攣が見られるかどうかを確認するために、鉄格子にカエルの足が触ると痙攣が起きることを観察した。これらはカエルの持つ生体電気の働きによるものであると推察した。古くは、紀元 1 世紀に、電気魚を利用して頭痛や痛風を治療することが知られていた。また、ドイツのパラケルスス (1493 - 1541) が磁石を使って下痢、ヘルニア、黄疸や出血を治療したことが言われている。

このように、電気と生物との相互作用については、古くから興味ある対象として取り上げられ、電気と生命現象の間にどのような関係があるのか、電気は生物に如何に作用を加えているのか、生体が如何に電気情報を利用しているかなどについて多くのヒトが興味を持って実験、理論的な検討がなされてきた。

生体の持つ電気的な特性は能動的な特性と受動的な特性の 2 通りが考えられる。前者は神経や筋肉が刺激によって興奮・収縮するような現象で、後者は生体が通常持っているような特性である。先に述べたカエルの下肢筋の動きなどは、まさしく生体の持っている能動的な特性を示している。

生体が発生する電位には静止電位 (resting potential) と活動電位 (action potential) がある。細胞膜を境として細胞内外に一定の膜電位があり、細胞内外に存在するカルシウム、ナトリウムイオン濃度に関係している。細胞内部は外部に対して約 - 100 mV 程度の電位になっており、膜電位は Nernst の式で記述できる。一方、神経や筋肉が興奮した際には活動電位が生じる。これは細胞膜におけるイオンの透過性が変化することで生じるも

ので、脱分極 (depolarization) と呼ばれている。膜電位は+数十 mV まで上昇し、その後、再分極 (repolarization) し、静止電位に戻る。このような膜電位変化が神経に沿って末端まで興奮部位から未興奮部位へと局所電流として流れ、組織として電位分布が生じ、活動電位が記録される。

生体の持つ受動的な電気的特性としては、細胞レベルと巨視的には組織レベルを考慮すれば良い。細胞レベルで見ると、細胞膜は2層の脂質分子からなり、厚さは50 - 100 Å、電気抵抗は500 - 10 kΩ/cm²、電気容量は1 - 10 μF/cm²であり、細胞内液はほぼ電解液と考えられる。比誘電率はほぼ水のそれ、50 - 80 程度に等しい。組織レベルでは生体の電気的特性は周波数依存性が強く、表5. 1 種々の生体電気信号の波形とその特徴¹⁾ 周波数に対して緩和現象 (α、β、γ分散) が見られる。また、生体への電気刺激についても、心細動を引き起こす電流も周波数に強く依存している。その他、生体は電氣的に異方的な特性や、非線形的な性質を持っている。例えば、電流密度が1mA/cm²程度までは生体組織の受動特性は線形と見なして取り扱うことができる。

表5. 1 に生体の電気信号波形とその特徴を示す。心臓の心筋で生じる活動電位を記録したものが心電図であり、脳の細胞での活動電位を記録したものが脳波である。表5. 2 に生体の電気現象の特性としてその振幅の大きさおよび周波数範囲を示す。また、これらの生体情報を如何なる手段によって検出するかの変換器 (トランスデューサ) の代表例を示す。

種類	波形	周波数帯域 (Hz)	電圧	インピーダンス
心電図 (ECG) Electrocardiogram		0.1~200	1mV前後	1~20kΩ
脳波 (EEG) Electroencephalogram		0.5~80	数μV~300μV	10~50kΩ
筋電図 (EMG) Electromyogram		10~2,000	10μV~15mV	1~数十kΩ
平滑筋の活動電位 (腸壁の例)				
筋の活動電位 (嗅液腺の例)				
皮膚の活動電位 (GSR) Galvanic Skin Reflex		0.03~15	数1μV~数mV	1~数十kΩ
網膜電図 (ERG) Electroretinogram		DC~200	50μV~1mV	数十kΩ
神経の活動電位		DC~数十	数1mV	
損傷電位				

表5. 2 生体電気現象の特性の例²⁾

種類	周波数帯域 (Hz)	電圧	インピーダンス (kΩ)
心電図 (ECG)	0.1~200	1mV前後	1~20
脳波 (EEG)	0.5~70	数μV~300μV	10~50
筋電図 (EMG)	10~2000	10μV~15mV	1~数十
皮膚電気反射 (GSR)	0.03~15	数十μV~数mV	1~数十
網膜電図 (ERG)	DC~200	50μV~1mV	数十
細胞内活動電位	DC~3000	数十mV	10~50×10 ³

注) ECG: electrocardiogram ; EEG: electroencephalogram ; EMG: electromyogram
GSR: galvanic skin reflex ; ERG: electroretinogram

5. 3 生理的指標

生体反応は中枢神経系 (central nervous system) の活動および末梢神経系 (peripheral nervous system) の活動に二分される。末梢神経系はさらに体性神経系 (somatic nervous system) と自律神経系 (autonomic nervous system) とに大別される。前者は骨格筋の収縮、通常感覚に関係し、後者は内臓とか血管、分泌腺に分布して

いる。自律神経系は交感神経系 (sympathetic nervous system) と副交感神経系 (parasympathetic nervous system) に区分される。心臓、胃、小腸、大腸、肺、腎臓などはこれらの 2 系統から支配を受けており、内臓とか皮膚の血管、汗腺や立毛筋などは交感神経系による単独支配である。

交感神経系は個体の緊急状態に対処する神経系であり、副交感神経系は心臓の働きを抑制し、休息・休養を取るような働きをしているとも考えられている。即ち、両神経系は拮抗的に作用していると言われる。例えば、交感神経パルスで瞳孔は散大し、気管支は拡張し、心臓の働きは高まり、消化器の働きは抑制させるのに対して、副交感神経パルスは瞳孔を縮小し、気管支は収縮し、心臓の働きは抑えられ、消化器の働きは高まることなどが例として知られている。そのような交感および副交感神経系の臓器に対する働きを表 5. 3 に示す。

Cannon は交感、副交感神経系は外部環境の変化に対処して個体の内部環境を恒常に保つ働きをしているものと見なし、このような働きを恒常性 (homeostasis) と名づけている。このようなことから自律神経系支配の反応、自律反応をストレス、疲労、感情変化など心理的な事象変化の評価指標として用いられてきた。緊張度を検出するには、脳波、心臓 (心拍)、血圧、アドレナリン (ノルアドレナリン) などの尿中排泄量、皮膚電気反射などが、また、筋肉的な活動については筋電図、疲労度などは反応時間やフリッカー値などが代表的な例として考えられる、特に、表 5. 3 に示すように身体器官の変化が神経系の活動に拮抗的な作用をもたらすことが分かる。このような器官の反応を含め生体の持つ多くの情報を検出し、連続記録が

表 5. 3 臓器に働く交感神経系と副交感神経系の機能³⁾

身体器官	交感神経系の活動	副交感神経系の活動
心臓	促進	抑制
血管	一般に収縮	
瞳孔	散大	縮小
網膜体筋		収縮 (遠近調節)
涙腺		分泌促進
唾液腺	分泌 (軽度促進)	分泌促進
汗腺	分泌	
消化管	運動抑制 (括約筋促進) 分泌抑制	運動促進 (括約筋抑制) 分泌促進
胆嚢	弛緩	収縮
膀胱	弛緩	収縮
虹彩	瞳孔散大 (瞳孔散大筋の収縮)	瞳孔縮小 (瞳孔括約筋の収縮)
毛様体筋		収縮
気管支	拡張	縮小
胃	抑制	蠕動亢進、分泌亢進
脾		分泌亢進
小腸・大腸	抑制	蠕動亢進、分泌亢進
副腎	髄質よりアドレナリン、ノルアドレナリン分泌	
子宮	収縮 (反応多様)	弛緩 (反応多様)
外生臓器	血管収縮	血管拡張
四肢、軀幹、内臓の血管	収縮	
立毛筋	収縮	

を与えて内臓・臓器の形態や機能を検出するものであり、手段によって X 線 CT, MRI, 超音波画像などが該当する。

表5. 4は生体から得られる情報源を、表5. 5には医用センサと検出情報量の例を示す。さらに、表5. 6には生体系毎に、代表的でかつ汎用性のある計測機器の例を示す。表5. 7には生理的な信号の大きさ、振幅ならびに周波数範囲を示す。変換器はこれらの生理的情報を精度より検出するための特性を有することが望まれる。

表5. 4 生体計測用の情報源²⁾

脳神経系	脳波、神経電流
呼吸器系	換気量、呼気ガス(分析)
循環器系	心電、心磁、心音、血液量、血圧、脳波血球数、血中ガス(分析)、血液pH
消化器系	pH、温度、出血、内圧
筋肉	筋電、筋コンプライアンス
感覚器	眼球運動、眼圧、聴力、温覚、痛覚
その他	陣痛、胎児心電、胎児心音、組織中のガス、組織中のpH、皮膚抵抗

表5. 5 医用センサの例²⁾

測定する物理量/化学量	測定対象の例	センサの例
圧力	静脈血圧、動脈血圧、膀胱内圧	ピエゾ抵抗素子、ワイヤストレインゲージ
温度	体表面温度、体深部温度	サーミスタ、赤外線検出器
速度・加速度・流量	血流速度、呼/吸気速度、血液量、呼/吸気流量	電磁血液計、超音波圧電素子
振動	脈波、心音	圧電素子、発光ダイオード+ホトトランジスタ
電位	心電、筋電、脳波	銀-塩化銀電極
磁気	心磁	コイル、ジョセフソン素子
ガス分圧	血液中のO ₂ やCO ₂ など	クラーク型電極、セベリングハウス型電極
イオン濃度	血液や尿中のNa ⁺ など	ガラス膜などを使ったイオン選択性電極
pH	血液や培養液のpH	ガラス電極
生化学成分の濃度	血液中のグルコースや、尿酸など	酵素電極
放射線量	人体を透過したX線など	Bi ₂ O ₃ O ₅

表5. 6 生体計測に必要な機器

	循環系	脳神経系	感覚器系	呼吸系	消化系	泌尿生殖器系	その他	全般	
生体電位	心電計 ベクトル心電計 ヒス束心電計 ホルター心電計 付置電圧増分電計 心磁計 心電図自動診断システム	脳波計 脳電計 脳磁計 各種誘発電位計 トポグラフ 脳波分析装置 タイポール解析装置	網膜電位計 錐電計			胎児心電計	微小電極増幅機	医用データ処理装置 心電図モニター 一装置	
	力・圧力・変位	電気血圧計 (動・静脈血圧) パリストカルフジオグラフ 脈波計 ホルター血圧計	MT計 膀胱内圧計	細動脈血圧計 電気血圧計 型心電計	ポディーブル テスモグラフ 胸部バンド	食道胃内圧計 収合力計	肺動脈 圧計、尿道内 圧計	筋力計 心臓機能 角速度計	血圧モニター 筋力 体電計
	音	心音計 (心音・心電計) 心臓音計 非動脈血圧計			呼吸音計		胎児心音計 (胎児心音心電計)		電気聴診器
	流量				呼吸流量計				
温度熱					サーミスタ呼吸計			電子体温計 サーモグラフ	
その他	トレッドミル エルゴメータ 心磁計	皮膚抵抗計 脳磁計			スパイロメータ 呼吸代謝測定計 呼吸ガスモニタ	マイクログラフ セル		医用画像ビデオシステム	
	電圧を年える	インピーダンス プレステモグラフ インピーダンス スケルディオグラフ	皮膚抵抗計 電気刺激装置 (電圧・電流)		パルスオキシメータ 呼吸計(インピーダンス流)	電気味覚計			
光を年える	フォトプレステモグラフ 非動脈血圧計 心拍出量計 (色散法) 血管内探照	光刺激装置 (パターン制御) 装置を含む	眼底カメラ 非外視鏡孔度 応答装置	パルスオキシメータ 気管支ファイバースコープ	胃十二指腸 小腸・大腸 ファイバースコープ	膀胱鏡 ファイバースコープ	関節鏡 伸縮鏡	ビデオマクロ スコープ	
	電圧を年える	超音波血圧計 超音波内探照	関節鏡 ドブラ血液計	オーディオメータ		超音波内探照	胎児心電計	各種超音波診断装置	
その他	電磁血液計 心拍出量計 (超音波法)		関節鏡・温度 覚知装置	経皮的Po ₂ Po _{o2} 、モニタ					

表 5. 7 各種の生理学的信号の特性と適用変換器

生理学的信号	振幅範囲	周波数範囲	変換器
心電図	0.7~4mV _{F-T}	0.1~100	電極
心音図		30~100	圧電ピックアップ、マイクロホン
筋電図	0.1~4mV _{F-T}	2~10 ⁵ (病床: 10~500)	電極
脳波	10~75μV	0.5~200	電極
胃電図	10~350μV	0.05~0.2	表面電極
血圧	0~400mmHg	0.5~100	ひずみゲージ、水力学的結合
血流	1~300cm/s	1~20	電磁流量計・超音波流量計
胃腸内圧	20~100cmH ₂ O	0~10	可変インダクタンス
膀胱内圧	0~100cmH ₂ O	0~10	ひずみゲージ
体温	32~43°C	0~0.1	サーミスタ
呼吸率		0.15~6	電極インピーダンス、気流計
一回換気量	50~1000ml/回	0.15~6	インピーダンス形気流計
肺の力	1~40g/0.2×0.8cm	0~1	ひずみゲージ
胃pH	3~13	0~1/60	ガラス電極
神経電位	0.1~3mV _{F-T}	1000cps まで、立上り 0.3 μs	電極

5. 4 生理的指標の種類および計測

ヒトの生理的指標を評価する代表的な方法は、心電図による自律神経系の活動、脳波による覚醒度評価、ならびに体温変化による生体リズムを調べることなどである。以下にこれらの代表的な例に加えて生理的指標として取り扱われている幾つかを示す。

5. 4. 1 心電図

簡単には心筋の活動に伴って発生する活動電位を計測したものが心電図 (electrocardiogram; ECG) である。心電図の計測には、表 5. 8 に示すように標準肢誘導法と単極肢誘導法がある。標準肢誘導法は右手、左手および左足のいずれかに電極を置き記録するもので、第 I 誘導 (右手—左手)、第 II 誘導 (右手—左足) および第 III 誘導 (左手—左足) の 3 通りの組み合わせがある (図 5. 2)。誘導電極については、皮膚との接触抵抗 (インピーダンス) の小さいものが望まれる。図 5. 1 には心電図波形を示しており、一心拍の間に P、Q、R、S、T、U のそれぞれの波形がある。ここで QRS 波が比較的検出しやすく、QRS 波を起点にして他の波形を識別する方法が取られる。心電図の振幅、時間幅、周期などを求め、心臓疾患の診断に利用している。また、心電図のスペクトル解析を行うことで、交感神経系と副交感神経系の活性の度合いを調べる方法もある。

心電図をとるには、トレッドミルなどを用いた負荷試験が行われており、時間的な経過を記録することができる。また、長時間

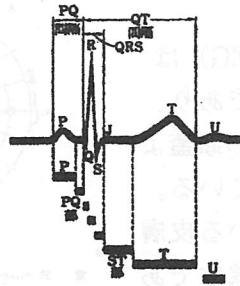
にわたっては Holter 心電計により、体に電極を装着し、作業時の連続記録が可能である。

さらに、電話回線による心電図の伝送システムも実用化されている。

心電計には、1) 要素心電計、2) 多要素心電計、3) マッピング心電計、4) 負荷心電計、5) 心電図電話伝送装置などがある。

表 5. 8 誘導の種類と部位¹⁾

項目	誘導記号	誘導名	誘導部位と極性
標準肢誘導	I	第 I 誘導	正 右手 (R) 負 左手 (L)
	II	第 II 誘導	正 右手 (R) 負 左足 (F)
	III	第 III 誘導	正 左手 (L) 負 左足 (F)
単極肢誘導	AV _R	ゴールドバーガー誘導 (右手)	右手 (R) の中間端子
	AV _L	ゴールドバーガー誘導 (左手)	左手 (L) の中間端子
	AV _F	ゴールドバーガー誘導 (左足)	左足 (F) の中間端子
単極胸部誘導	V	ウィルソン単極誘導	胸部 (C) ウィルソンの結合端子



	持続時間	振幅	備考
P	0.1秒以内	0.25mV以下	ただしP ₁ は0.1mV以下
PQ 間隔	0.20秒以下		
QRS 群	0.08~0.1秒	1mV以内 (±)0.05mV以内	ただし(II)では1.6mV以下
ST 一部			
T	0.1~0.25秒	0.2~0.5mV	ただし(III)では下向きこともある

() 内の数字は導出法

図 5. 1 基本的な心電図波形と主要成分の正常値¹⁾

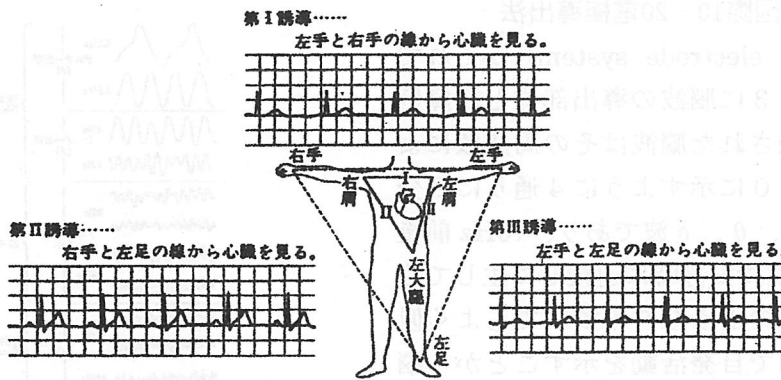


図 5. 2 心電図の標準肢誘導法とその波形¹⁾

5. 4. 2 心拍数

1 分間の心臓の拍動数を心拍数 (heart rate) といい、年齢、個人差が大きいが、新生児で約 130、健康な成人では約 70 - 75 程度である。これは運動、緊張、飲食などによって大きく増加する。また、温度・湿度などによっても変化する。心拍を変える要因はノルアドレナリンやアドレナリン、アセチルコリンなどの神経伝達物質による。心拍数を変える要因を表 5. 9 に示す。心拍数を増加させる刺激は血圧を下げ、逆の場合には血圧も低下する。

表 5. 9 心拍数の変化要因⁵⁾

心拍数増加	心拍数現象
睡眠、左心室、肺循環に存在する圧受容器の興奮減弱	睡眠、左心室、肺循環に存在する圧受容器の興奮増加
心房性神経受容器の活動増加	呼吸
吸息	恐怖
興奮性情動	怒意
憤怒	三叉神経痛覚繊維の刺激
強い疼痛刺激	頸部内圧上昇
低酸素症	
身体運動	
ノルアドレナリン	
アドレナリン	
甲状腺ホルモン	
発熱	
Bainbridge 反射	

※ノルアドレナリンは心臓に直接作用し、正の変時性効果を示すが、生体内にあっては血圧も上昇するため、圧受容器反射に基づく迷走神経の反射性緊張増大により、直接作用による心拍数増加はおおわれてしまつて鈍感が起こる。

5. 4. 3 脳波

脳波 (electroencephalogram; EEG) は脳からのシグナルを記録したものであり、1929年にドイツの Berger がヒトの頭蓋より記録に成功し、臨床に応用されている。すなわち、頭蓋骨とそれを覆っている皮膚を通して大脳皮質から誘導される電位であり、数 μ V から数百 μ V にまたがる微弱な電気信号である。振幅、周波数、誘導部位に特徴的な波形などから診断情報が得られる。脳波の計測には、針状電極や皿状の電極が用いられ、計測に対する電極の配置は国際脳波学会提案の標準電極配置法が使用されており、国際10-20電極導出法

(ten-twenty electrode system) がそれである。図5. 3に脳波の導出部位と記録例を示す。記録された脳波はその周波数によって表5. 10に示すように4通りに区分される α 、 β 、 θ 、 δ 波であり、10Hz前後の α 波が閉眼で安静時に連続して生じてくる。これはどのような脊椎動物でもよく似た周波数範囲で自発活動を示すことから脳波の基本リズムであると言われている。表5. 11に示すように脳波は意識によって大きく変化し、覚醒から睡眠までの意識レベルを脳波のパターンでいくつかの段階に分けられている。

神経の興奮で頭部に生じる電位が脳波であるが、興奮によって脳内に生じる活動電流による磁界を測定したものが脳磁図

(magneto-encephalogram; MEG) である。

磁界はベクトル量で、大きさと方向を持っているため、計測される磁界から興奮する活動電流の発生源を推定でき、この脳磁図を計測することで脳機能を明らかにすることができる。

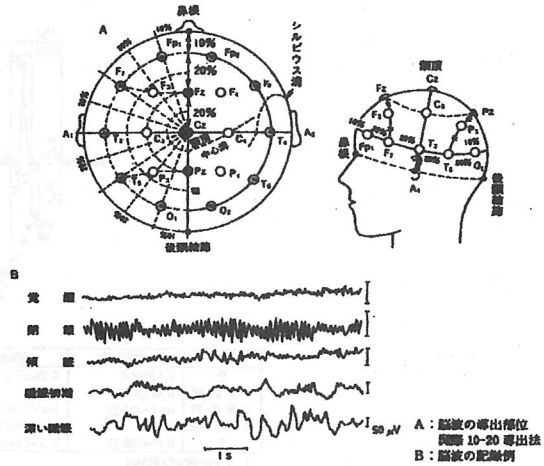
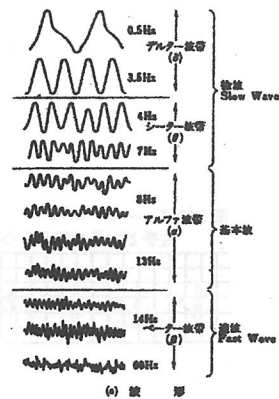


図5. 3 脳波の導出部位及び記録例⁶⁾

表5. 10 脳波波形とその分類¹⁾



分類	周波数	振幅	特徴
α 波 (基本波)	8-13 Hz	10-20 μ V	正弦波状の波形。安静時時に主として枕部から記録される。閉眼、入眠により誘発
β 波 (遊波)	14-20 Hz	10 μ V 以下	安静時時に前頭部から記録される。
θ 波 (徐波)	0.5-3.5 Hz	数+300 μ V	高周波の不規則な波で成人では、深い睡眠時にみられる。
δ 波 (徐波)	4-7 Hz	δ 波よりも一般に振幅大	小児期後の基本状態で前頭-側頭部に著明

表5. 11 意識レベルと脳波⁶⁾

意識状態	意識状態と持続時間	脳波のパターン
第1段階	本人は自覚していると思っ ているが、反応性は低く、 短い夢を見る。1-7分間 継続。全睡眠の5%。	α 波消失、 δ 波出現。
第2段階	意識は消失するが、音など の強い感覚刺激でK波合が できる。全睡眠の50%をし める。	1-2秒続く12-14Hzの初 級波が出現する。 K波合は、2相性の大型 後波とこれに続く過渡波。
第3段階	意識は全く消失し、完全な 無覚状態。全睡眠の10%を しめる。	200 μ V 程度の大きな δ 波 が20%。後波も出現。
第4段階	最も深い睡眠。夜の早い時 期にここまで到達する。全 睡眠の10%をしめる。	δ 波が50%をしめ、第3段 階での初級波がみえる。
レム睡眠 (急速眼球運動)	第3段階睡眠の深さの睡眠 で覚醒しにくい。鮮明な夢 を見る。朝に近づくにつれ 出現時間長く、全睡眠の 25%。	入眠時に似た覚醒状態に近 い脳波だが、急速眼球運動 (REM)、筋緊張の消失、四 肢の麻痺を伴う。

5. 4. 4 血 圧

血液の圧力を血圧 (blood pressure) といい、心臓のポンプ機能によって血管内に血液を流し、これにより圧力が加えられる。血圧は通常 1 気圧 (760mmHg) を 0 とし、水銀柱で表す。心臓の収縮、弛緩に関係して血圧の変化があり、収縮期血圧を最高血圧、弛緩期血圧を最低血圧という。最高血圧と最低血圧の差を脈圧という。平均血圧は、最低血圧 + 脈圧 / 3 で表される。健康な成人では最高血圧は約 120mmHg、最低血圧は約 80mmHg 程度である。従って平均血圧は約 93mmHg である。150mmHg 以上を高血圧、90mmHg 以下を低血圧という。

血圧の測定には 2 通りの方法が用いられ、触診法と聴診法がある。前者は、健康診断で良く用いられており、圧力計とつながったゴム帯 (マンシエツト) を用いて、上腕に巻きつけて、空気を送り込み、動脈を圧迫させて、血流を阻止して測ることになる。最初は圧力を挙げ、次第に下げて行った場合、最初に聞こえた音が最高血圧に、音がかすかになって行く場合が最低血圧である。後者は、聴診器による血管の音を聞く方法である。

5. 4. 5 血 流

血管のある点を単位時間あたりに流れる血液量を血流 (blood flow) といい、単位は l / m である。血流は血管の抵抗に関係する。血圧 = 血流 \times 血管抵抗と考えれば、血流は血圧の増減に比例する。血管抵抗は血流を妨げる要因であり、粘性のある血管が移動する際に生じる抵抗である。

血流の測定は電磁血流量計 (electromagnetic flow meter) が主に用いられている。血液は導体であるから、磁界内に導体が流れていると電位が発生し、その大きさが導体の流れる速度に比例するという原理、すなわち血流の速度に比例した電位が記録される。超音波ドップラー流量計 (Doppler flow meter) なども用いられている。

5. 4. 6 呼 吸

呼吸 (respiration) は大気中の酸素を吸収し、血液によって酸素を末端組織に運搬し、体内で生じた二酸化炭素を対外に放出する現象である。呼吸機能の測定には簡単な装置としてスパイロメータがあり、肺活量、呼気を吐く速度などを求めることができる。

呼吸数の計測には、1) マスクによる流量計測、2) 胴体周辺長の変化を計測するの 2 通りの後方がある。これらから、一回換気量 (tidal volume; 1 回の呼吸で吸入され、あるいは呼出されるガス量で安静呼吸では約 500 ml)、分時換気量ならびに呼吸回数、呼吸周波数、規則性が求まる。

作業時の呼吸機能の計測は、酸素、炭酸ガス、呼吸リズムなどが取り上げられており、作業変換時などの評価指標のモニターとなっている。換気量、酸素消費量、呼吸数と深度、リズム変化などが作業の負荷状態をモニターする指標となっている。

5. 4. 7 筋電図

筋電図 (electromyogram; EMG) は筋の活動電位を記録したものである。筋電図の測定は、表面電極および針電極を用いる方法がある。筋電図はランダムな波形を示し、その波形の加算平均やスペクトル解析を行うことにより、労働作業時の負担評価などに用いら

れる。経皮的に末梢神経に電気刺激を加えて、筋の収縮を電極により筋電図を記録することを誘発筋電図法という。これは潜時や波形の詳細を分析できる。図5. 4に筋電図波形の例を示す。しかし、表面電極などでは皮膚表面の筋線維の分析に限られるため、筋の断面方向の情報、電位分布を明らかにするにはSQUIDによる筋磁図が必要であろう。

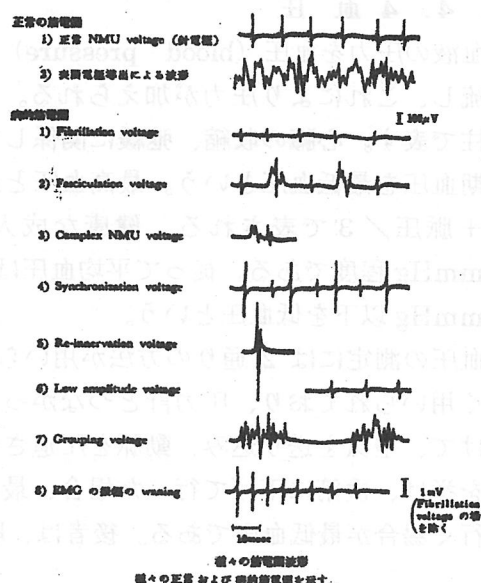


図5. 4筋電図波形³⁾

5. 4. 8 眼球運動

眼球運動 (eye movement) の特性を調べることで、疲労感や視覚に関係した負荷を明らかにすることができる。眼球運動には、1)衝動性眼球運動 (saccade)、2)追従性眼球運動 (smooth pursuit)、3)視機性眼球運動の3通りがある。眼球運動を捉える方法として、眼球電図 (electrooculogram) がある。眼球の上下、左右の皮膚面にそれぞれ一対の電極を固定し、対になっている間の電位差を記録すると 10mV 前後の電位が観察され、記録から運動が区別できる。すなわち、サカド運動と呼ばれる注視点が1点から他の点に急速に移動する場合とゆっくり動くものを注視する場合の追従運動である。このような運動を組み合わせた眼球電図を記録することで疲労感などを調べることができる。

瞳孔 (pupil) は入射する光強度によって変化する。理論的には直径1.5 - 8mmの範囲で変化するが、普通は2 - 6mmの範囲で動作することが知られている。瞳孔の大きさは、自律神経系の状態、不安、驚愕、精神的な緊張や感動などによって大きさは変化する。自律神経系に作用する薬物、アセチルコリンは縮小させ、麻酔が深くなると瞳孔は縮小し、カフェインなどによっても影響を受ける。

光が点滅するとし、光のちらつきが感じられるが、その刺激頻度がある値以上になるとちらつきが消え、連続的な光として感じるようになる。このように点滅周波数を変化させ、光が連続的に見られるか断続光に見えるかの境界、ちらつきの融合が生じるのが臨界融合頻度 (critical fusion frequency; CFF) といい、この融合閾値を測定する方法がフリッカー (ちらつき) 融合法と呼ばれている。フリッカー値の変化は大脳皮質の活動に対応していると考えられているため、本方法は精神的に緊張した状態での作業の疲労、夜間の作業低下・疲労などを大脳皮質との活動の変化を調べるのに有効とされている。

5. 4. 9 感覚誘発電位

5. 4. 3で記したように脳波は安静時に記録される自発的な電位である。一方、外部より感覚刺激を加えた場合、神経系に誘発される電位を感覚誘発電位 (evoked

potential) といひ、光や図形で眼への刺激を加えた場合の視覚刺激によって誘発される電位を視覚誘発電位 (visual evoked potential)、手足などの末梢神経に電氣的な刺激を加えた場合に誘発される電位を体性感覚誘発電位 (somatosensory evoked potential)、単純な音による耳への音刺激で誘発される電位を聴覚誘発電位 (auditory evoked potential) がある。これらの電位は非常に小さく、脳波の中に埋もれているため、波形の加算平均を取ることによって、本来の誘発電位波形が得られる。誘発電位の計測は、脳の機能を調べるのに役立つ。

5. 4. 10 発汗

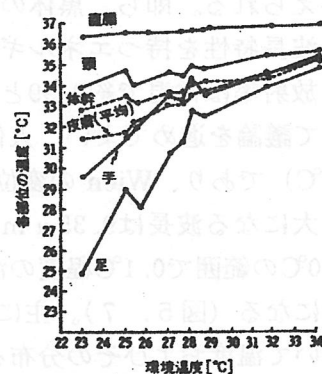
発汗 (sweating) は温熱性発汗と精神性発汗に区分される。温熱性発汗は温熱刺激で、全身の皮膚に現れる発汗であり、汗の蒸発で体温を放散することである。これは交感神経系で支配されている。一方、精神性の発汗は緊張や感動によって手、足などに現れる現象である。発汗には塩分濃度の計測も必要である。

5. 4. 11 皮膚電気反射

5. 4. 10 の発汗に関係するが、汗腺の多い部分の電氣的な抵抗変化をはかることで、うそ発見器や心理的な動揺の測定に用いられる (galvanic skin reflex: GSR)。皮膚の電気抵抗、インピーダンスは発汗によって減少する。電気抵抗の変化は、100 μ A 以下の直流を通電することで測定される。測定電極は、1) 2本の指先の腹部位、2) 手のひらの小指丘部位のいずれかに装着し、反射による電位の検出の場合には、2つの電極を手のひらの小指丘と手首付近と離して装着する⁷⁾。

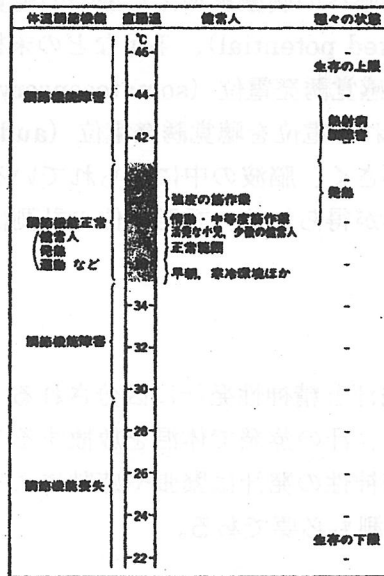
5. 4. 12 直腸温

ヒトの体温は一定ではないし、環境の温度変化によって変化する。特に、環境の温度変化によって生体の体表面近くでは、体温は変化する。これは外殻体温 (shell temperature) と呼ばれている。一方、環境の温度変化によっても体温の変化しないのは核心体温 (core temperature) と呼ばれ、体温調節機能により一定に保たれている。図 5. 5 に環境温度に曝された時の身体各部位の体温を示す。ヒトでは核心体温の指標としては、直腸温、口腔温、腋が温がある。ここで直腸温は体温計を 10cm 以上内部に入れた場合で、平均して 37.5 $^{\circ}$ C 付近であり、腋が温は約 1 $^{\circ}$ C ほど低い。ヒトの核心体温は規則正しい日周期変動 (0.5 - 0.7 $^{\circ}$ C) を示し、図 5. 5 環境温度に曝されたときの安静時では午前早く最低、夕方最高となる。



裸のヒトが熱量計内のいろいろの環境温度にさらされた時、身体各部位の示す温度 (Hardy JD, DuBois EF: Basal metabolism, radiation, convection and vaporization at temperatures of 22~35 $^{\circ}$ C. *J Nutr* 1938; 15: 477 により書き改める)。

図 5. 6 には直腸温と体温調節機能との関係を示す。図から分かるように、運動や作業をした場合、また感情的に興奮した場合に僅かに上昇する。

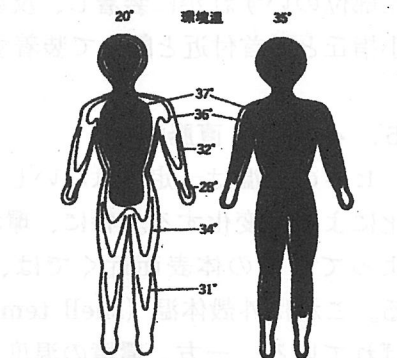


通常人および種々の状態における直腸温と
体温調節機能
(Guyton: Textbook of medical physiology, 1976を
改変)

図 5. 6 直腸温と体温調節機能⁸⁾

5. 4. 13 皮膚温度分布

生体の表面温度分布は皮膚等よりの赤外線を計測し、その部位の画像を表示した結果、得られるものである。サーモグラフィー (thermography) による本手法は無侵襲、非接触な方式である。本方式は、プランクの輻射の法則で与えられる。即ち、黒体の温度が決まるとそれに対応する波長特性を持つエネルギーが放射される。生体の皮膚の放射率は常温で約0.99と言われ、ほぼ黒体輻射を想定して議論を進めてよい。人体は絶対温度で表すと310K (37°C) であり、Wienの変位則から赤外放射エネルギーが最大になる波長は9.35 μmである。皮膚温の測定には0 - 50°Cの範囲で0.1°C程度の温度差が計測できれば



環境温20°Cと35°Cにおける身体内部の温度勾配、等温線を模式的に示す
(Aschoff and Wever: Nat. Wiss., 45: 477, 1965より)

よいことになる (図 5. 7)。主に赤外サーモグラフィー 図 5. 7 身体内部の温度勾配⁸⁾ 装置を用いて温度およびその分布を測定する場合に、測定環境の温度、蒸散、輻射熱などにも注意する必要がある。血行障害、血流、組織代謝率や神経障害などの判定などに用いられる。

5. 5 生理的指標変化を用いた例

感覚、感情、疲労感、ストレス、思考など、ヒトの生理状態を客観的に評価する必要がある。そのような評価項目としての生理的指標の幾つかを4節に示した。要約すると、生理的な指標としては以下のような項目が考えられる。1) 生体の電気的な現象としては、

心電図、脳波、筋電図、皮膚電位 表 5. 1 2 ヒトの感覚量と生理的指標との相関性⁹⁾

、交感神経の活動、2) 生体の化学的な成分変化については、呼吸に関係するガス成分、血中糖度、血中ガスおよび血中ホルモンの各濃度、3) 物理的な変化として、血圧、血流、体温、呼吸数、眼球、4) その他：発汗、体温など。表 5. 1 2 にはヒトの感覚量と生理的指標との相関性を示す⁹⁾。同表に示している生理指標の幾つかはヒトの生理

系	生理指標	生体適性度		ストレス		メンタルワークロード	疲労度 ◎は顕性
		覚醒度	生体貯力	慢性性	一過性		
循環系	心電図、心拍数 血圧、脈圧 呼吸数 血中 O ₂ /CO ₂ 濃度		○		○ ○ ○	○ ○ ○	○
呼吸系	呼吸数 呼吸中 O ₂ /CO ₂ 濃度				○	○	○
神経系	脳電位 瞳孔位置 CNV	○			○ ○ ○	○ ○ ○	
視覚系	瞳孔位置 瞬目 瞳孔径 焦点位置	○				○ ○ ○ ○	● ● ● ●
身体運動系	筋電図、筋活動電位 身体各部運動時間 (重心位置など)	○				○	○ ○
生体代謝系	皮膚電位活動 フリッカー値 体温、脈動数、呼吸数 汗腺皮膚温分布 発汗量	○ ○	○ ○		○ ○ ○ ○	○ ○	●
内分泌系	カテコールアミン コルチゾール			○ ○	○ ○		

状態を反映し、かつ相関性が見られる。このことは、幾つかの指標を組み合わせることで生理状態を計測することが可能であることを示している。

最後に、生理的指標を用いて機能変化を調べるのは主に作業時の疲労感の客観的な評価などに用いられている。疲労などの測定には連続測定法と生理・心理機能検査法の 2 通りが考えられる¹⁰⁾。連続測定法は作業行動を中断せずに経時的に機能変化を計測できる利点がある。生理・心理機能検査法には、生理・心理機能の閾値を測定する方法、作業遂行に課題を提示してそのパフォーマンスを測定する方法がある。閾値の測定には、認知閾値法および弁別閾値法があり、前者は刺激に対して感覚器官がその特性を正しく認知するかどうかの境界、閾値を測定する方法で、後者の弁別閾値法は僅かに異なる 2 通りの刺激を同時に、また継続的に加えた場合にその違いを区別できるかどうかを測定する方法である。認知閾値法は近点距離測定法、動体視力測定法、筋圧迫痛閾値測定法、弁別閾値法は触 2 点弁別閾値測定法、フリッカー検査法がある。

(重光 司)

参考文献

- 1) 桜井靖久編：医用工学MEの基礎と応用・共立出版、昭和 55 年
- 2) 南任靖雄・江澤 正著：医用電子と安全技術・工学図書株式会社、平成 7 年
- 3) 藤森開一他著：生理学・南山堂、1976 年
- 4) 宇都宮敏男編：新医療機器事典・産業調査会、1997 年
- 5) 星猛他訳：医科生理学展望・丸善株式会社、平成 8 年
- 6) 岩瀬善彦：やさしい生理学・南江堂、1988 年
- 7) 池田謙一他著：医用電子工学・コロナ社、昭和 55 年
- 8) 本郷利憲他編著：標準生理学 (第 4 版)・医学書院、1996 年
- 9) <http://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/tokuron98/soukann.html>
- 10) 三浦豊彦他編著：現在労働衛生ハンドブック (増補改訂第 2 版)
(財) 労働科学研究所、1994 年

6. 人工光放射の普及に伴う光環境の変化と人間に与える影響

6. 1 人工光放射による光環境の変化

6. 1. 1 人間と光

人間がこの地球に出現したのは、およそ数 100 万年前（“数”は 2～3）といわれている。一方、現在の地球上の人間の光環境における最大の環境要素である太陽が誕生したのは約 25 億年前である。したがって、人間が地球に出現した時には、この地球の近傍では現在とほぼ同等の光環境が形成されていたことになる。即ち“始めに光があった”訳である。そして人間はその出現以来、太陽によって形成される光環境の諸要素（始めにあった光）に好むと好まざるとに関わらず順応してきたことになる。

ところで、人間が出現した時に形成されていた地球上の光環境は、太陽と地球の相対位置関係により（地球の場所によって差があるが）きわめて規則的かつ周期的に変化している。即ち昼と夜の交替がその代表的な一例である。地球上の光環境には、昼間は余るほど十分な量の環境要素としての光が存在するが、夜は反対に、あってもごく僅かの量の月の光や星の光が存在するだけで、とても“光環境”とは呼べない状況である（“陰環境”ともいうべきか？）。

いうまでも無く、光は人間にとって重要な環境要素である。これは、ひとつには、地球における全ての植物や動物の生活のためのエネルギーのほとんど全てが、太陽から光の様態のエネルギーによって供給されているということがある。これはこれで大変重要なことではあるが、本研究調査委員会のねらいとは別の視点なので、ここでは触れないこととする。光が重要である今一つの背景は、光が人間の視覚支援の媒体となっているからである。既にいろいろなところで述べられているように、人間は、生活し生命を維持していくための周辺からの情報の 80 % 以上を、五感の中の視覚を通じて入手している。そして、光は人間が視覚を通じて情報を得るための重要な媒体となっている。

したがって逆に光というと、人間の目に入って視覚を生じさせる部分のみをいうことが多い。これは、人類の誕生以来、最重要な環境要素である太陽の光（実際には、人間の視覚に直接関係する可視放射だけでなく、紫外放射・赤外放射を含んでいる）が、主として人間の視器官である目を通じて、視覚によって認識されてきたからであると考えられる。そのために、視覚支援の媒体としての光は、視覚がいろいろな感覚の中で最重要な感覚であることと相俟って、人間の生活環境において最も重要な環境要素となっている。即ち、環境に光が無ければ人間は満足に生活を送ることができないであろう。このことは、例えば月も星も出ていない真夜中の深山の奥を体験してみればよく理解することができる。そのような状況では、一步を歩くことすら困難極まりないことになる。

したがって人類は、その出現以来の大部分の期間（およそ 3000 年前位までは）日の出と共に起きて昼間に活動して、日が落ちて夜が来ると休む、という生活をしてきたものと考えられる。たまたま、満月の夜などに多少は活動していたであろうか？

そして、前に上げた深山の真夜中の暗闇においても、蠟燭や懐中電灯のようなごく小さな光でも、光があればその重要性を充分理解できることから明らかなように、夜の闇における光への希求は非常に強かったであろうと想像される。

この希求を具現したものが人工光源であることはいうまでもない。

現在では、良く知られているように、数多くの種類の人工光源が身近に使用されており、

特に日本の都会のようなどころでは、人工光による照度も上がり、夜になっても照明が暗くて困るようなことは先ずなくなった。それどころか、夜間の人工照明のお陰で、生活のパターンが夜にシフトし過ぎ、本来の昼間の活動性が低下したり、夜間照明が明るくなり過ぎて、種々の問題が生じているケースもある。

本研究調査委員会では、光環境の重要要素である光について考える中で、この人工光源についてもいろいろな角度から、検討を加えてきた。ここで、人工光源が光環境に果たしてきた役割と、その功罪などについてまとめてみることにした。

6. 1. 2 人類の進歩と人工光源の変遷

(1) 最近の人工光源

最近、スペース・シャトルなど、宇宙技術の開発により、地球を宇宙空間から眺めることができるようになった。そして、宇宙から撮った地球の写真が公開されている。この中で、夜間の地球を撮影したものがあがるが、日本列島など一部の先進国の夜の明るさが大いなる話題になっている。“夜が明るすぎる。”とか、“この夜の明るさが人間に対して種々の影響を及ぼす。”などともいわれている。

しかし、このスペース・シャトルからの写真でいささか強調されて過ぎて報道されているくらいがないでは無いものの、確かに、日本の一部の都会の夜は明るいかも知れないが、日本の東京や横浜のような大都会においてさえ、現在の段階でも、明るすぎて困る場所よりは、暗くて困る場所の方がずっと多いのである。

表 6.1 (次ページ) に、人類がこれまでに開発・使用してきた人工光源の変遷をまとめたものを示す。

(2) 火の利用——人工光源の始まり

人間を他の動物から決定的に差別化している点は、“火”を利用していることであるといわれており、実際にその通りであると考えられる。人類の歴史を振り返って見てみると、人間は“火”を調理などの熱源および太陽光の無いところでの照明用光源として利用してきている。そして確かにそのことが、生活レベルにおいて、人間を他の動物たちから遙かに引き離れた高いレベルに置くことになった決定的要因になっている。

したがって、人工光源の始まりは火の利用であるということが出来る。人類が何時頃から火を光源として利用してきたかは、明らかでは無い。旧石器時代（およそ 3 万年から 5 万年前）には既に人工的に火を造り出す技術を持っていたといわれているが、実際には自分で火を造り出す以前に、火山の溶岩や落雷などによる自然の発火の火を利用していただけと考えられる。考古学的には、50 万年以上前と推定されるが、いずれにしても人類数 100 万年の歴史から見ると、近年のことであることは間違い無い。

火をいわゆる光源の形として利用し始めた最初の形態は、焚火のような形態であったと考えられる。即ち適当な木片に火を写し、適度の速度で燃焼させ、しかも余り煙りが出ないような木が試行錯誤により調査され、利用されたものと思われる。そして、この木片が様々の工夫を経て、松明や篝火などとして改良され、やがて抽出された液体の油の利用へと発展する。石で出来た容器に油を入れて燃焼させ、光源として利用する、いわゆる油灯といわれるものが利用され始めたのは、今から約 4000 年前の紀元前 2000 年頃のことと推

定されている。したがって人類の歴史からみると、ごく最近のことであるといえるのかも知れない。

次いで加工性に優れた金属の利用技術が開発され、金属製の油灯が製作・使用されるようになったのは、それから3000年を経過した紀元1000年頃のことであるといわれている。金属の加工技術とメカニズムの工夫・開発により、石を利用した油灯に比べて、ぐっと人工光源らしくなったものと考えられる。そして、火を利用した光源は、表6.1に示したように、その後、燭台、蝋燭、いわゆる西洋式ランプを経て、1792年のW. Murdock (イギリス)によるガス灯の開発へと受け継がれることになる。

表6.1 人工光源の変遷

年次	人工光源の変遷	一次エネルギー	備考
紀元前数100万年			人類の出現
紀元前50万年頃	○火の利用の始まり	○木 材	
	○石囲式炉、竈	○木 材	
	○囲炉裏	○木 材	
紀元前4000年	○松明、篝火、篝火	○脂入り木材	
紀元前2000年	○油燈	○油(魚油)	
	○ランプ、燈臺	○油(植物油)	
1000年	○石燈籠	○油(植物油)	
	○ローソク、紙燭	○油(植物油)	
1400年	○蝋燭	○油(植物油)	
	○行燈	○油(植物油)	
1600年	○燈臺	○油(植物油)	
1792年	○ガス燈の開発 (W. Murdock)	○石炭ガス	
1801年			19世紀
1808年	○アーク灯の開発 (H. Davy)	○電 気	
1850年	○石油ランプ	○石 油	
1878年	○白熱電球(炭素)の開発 (J.W. Swan)	○電 気	
1879年	○白熱電球(炭素)の実用化 (T.A. Edison)	○電 気	
1901年			20世紀
1906年	○高圧水銀ランプの開発 (R. Kuch)	○電 気	
1910年	○白熱電球(引線タングステン)の実用化 (W.D. Coolidge)	○電 気	
1931年	○ナトリウムランプの開発 (M. Pirani)	○電 気	
1938年	○蛍光ランプの実用化 (G.E. Inman)	○電 気	
1959年	○ハロゲン電球の開発 (E.G. Zubler)	○電 気	
1961年	○メタルハライドランプの開発 (G.E. Reiling)	○電 気	
1961年	○高圧ナトリウムランプの開発 (GE)	○電 気	
1969年	○LED(赤色)の開発 (GE)	○電 気	
1986年	○LED(白色)の開発 (日亜化学)	○電 気	
2001年			21世紀

(3) 電気エネルギーを利用した人工光源の開発

火を利用した人工光源は、前項で概略述べたように、焚火や松明に始まり、燭台、蝋燭、ランプ、そしてガス灯へと受け継がれ、その度に改良されて、つかいながらも良くなってきたが、エネルギーの変換に火(燃焼)を利用するため、人工光源としては、次のような決定的な難点があった。

[ガス灯以外のものは]

- (1) (適当な大きさのものでは) 光束が小さい。—使用した時に暗い。
- (2) 一次エネルギーの継続的補給が容易でない。
- (3) (炭素からの熱放射を利用しているため) 煤の発生を伴う。

[ガス灯は以上の難点のある程度克服・改良はしているが]

(4) 点灯が必ずしも簡便ではない。

(5) 広域における一次エネルギーの供給システム（ガスの配管システム）の設備投資金額が過大となる。

[そして、これが決定的な難点であったが]

(6) 火災のリスクが大きい。

それ故、これらの難点を克服するために、ガス灯が普及し始めた頃に、ほぼ並行して開発された新しい一次エネルギーである電気エネルギーを変換して光を得る技術の人工光源への適用が検討された。電気エネルギーは、1800年、A. Voltaによる電池の発明および、1831年の、M. Faradayの電磁誘導現象の発見に基づいて、発電機が開発されることによって、利用分野が検討されはじめたものであるが、当時は力学的エネルギーを得るための動力としての利用が先行しており、モーターが開発された結果、農業や工業の生産設備や交通機関などに利用されていた。また、一部調理用や暖房用のヒーターなどにも使用されていた。

電気エネルギーを光エネルギーに変換して、照明に利用した最初のもは、1808年 H. Davy によるアーク灯の実用化である。この頃は、まだ発電機が開発されていなかったもので、この Davy のアーク灯は、電池により点灯された。この時検討されたのは、炭素電極によるアーク放電である。即ち、外径約 5 mm、長さ約 30 mm の炭素の棒 2 本を接触させて電流を流しておき、その後、2 本の炭素棒を 0.5 mm 程度引離すと、そのギャップの間にアーク放電が生じ、光エネルギーに変換される方式のものである。

余談であるが、わが国で、このアーク灯が初めて点灯されたのが、1878年 3月 25日、虎ノ門の工部大學校の大ホールで開催された電信中央局の開業祝賀会においてである。この時、工部大學校の学生を指導して点灯を実施したのがイギリスから来日していた、いわゆる“お雇い外国人” W.R. Ayrton であり、指導を受けた学生の中に藤岡市助がいた。“グローブ電池 50 個を使用して点灯したが、束の間に消えてしまった。”との記録が残っている。また、この初点灯日を記念して、1927年に、3月 25日が“電気記念日”に制定された。

アーク灯は、それまでのランプやガス灯に比べると、1灯当りの光束も多く、遥かに高輝度であった。一説には、“2000 燭光”（25,000 lm に相当）であったといわれている。したがって、アーク灯の場合は、室内で使用するに際して、明るさそのものよりもむしろその光を小さく分割することができないことが問題となった。また、炭素電極から蒸発する炭素蒸気による（室内の）よごれも問題であった。

(4) エジソンによる白熱電球の実用化

電気エネルギーによるアーク灯は、光束、光色はなかなかのものであったが、前項で記述したような問題点がある。そこでこれらの難点を解消した電気エネルギーによる人工光源が検討され、その結果 T.A. Edison により、実用的白熱電球が開発された。時に、1879年 10月 21日のことである。

このエジソンによる白熱電球実用化の経過については、数多くの文献に詳述されているので、ここでは省略する。ただ、これも過去十分に伝えられていることであるが、白熱電球については、エジソンと同世代または、エジソンの以前に、白熱電球の開発を手掛けていた技術者や研究者はエジソン以外にも沢山いた。エジソンがこれらの技術者や研究者に比べて優れていたのは、白熱電球を開発しただけでなく、それを世間に普及させることに對しても同等の（むしろ見方によっては同等以上の）力を尽くしたことである。

即ち、エジソンは電球と同時に発電機を製造し、その電気を各家庭にまで配分するために、配電の方式を開発（“エジソンシステム”といわれる。）すると共に、配電の実務推進のために、エジソン・カンパニーという配電を事業とする電燈会社を設立した。この時エジソンが開発した配電方式は、直流 210 V の三線方式であった。

また、白熱電球用の簡便かつ信頼性の高い口金を開発・実用化し、それを世界的に標準化した。現在世界中で広く使用されている E 形口金（ねじ込み形の口金）がこの口金であり、E 形の“E”は Edison の“E”に因んで命名されたものである。

この白熱電球の開発成功の発表に當って、エジソンは次のように言ったと伝えられている。

“この白熱電球の良さが一般大衆に知れ渡った時、そして、それはもうまもなくのことであろうが、炭化水素ガスによる照明は完全に棄て去られるであろう。10 か 20 の発電機があれば、私は、ニューヨークの下層地域の隅々まで余すところ無く照明して見せる。”

その後の経過は、歴史が示しているように、エジソンのこの言葉通り、炭化水素ガスによるガス灯は、照明の主役の座を追われ、ほとんど使用されなくなったに對し、白熱電球は現在もなお、人工光源の主力のひとつとして、人間社会の夜を照明している。

なお、電気エネルギーを利用した人工光源は、表 1 に示すように、エジソンの白熱電球実用化以降、1938 年の蛍光ランプの実用化や、1906 年の高圧水銀ランプの開発を起点とする、その後のメタルハライドランプ（1961 年）、高圧ナトリウムランプ（1961 年）等の HID ランプの開発・実用化を経て今日に至っているのは、良く知られている通りである。また、1969 年に赤色が開発・製品化された発光ダイオード（LED）は、1996 年に白色 LED が開発・商品化され、21 世紀の新光源として期待されている。

これらの光源開発の詳細については、別の文献のご参照をお願いしたい。

（河本康太郎）

6. 2 人工光源による光環境の特徴

6. 2. 1 人工光源と自然光源の比較

前項までに記述してきたように、地球上の人類の光環境における光源としては、長い間の太陽を主とし、一部夜の月や星などを含む光源（自然光源）だけの時代を経て、現在の、特に夜が見違えるばかりに彩られる人工光源を併用する時代へと変ってきた。そして、人工光源により、夜が明るくなるにつれて、人間が自然光源だけで無く、人工光源からの光の照射を受ける機会も増加し、照射される量も増加してきた。その結果として、とにかく人工の光があればそれだけでありがたかった時代から、人工光源からの光の質に対する要求が強くなるようになってきた。

そこで、太陽を主とする自然光源と、エジソンの実用化以降、電球、蛍光ランプ、

HID ランプによった代表される人工光源について、関連の諸特性を比較して見た。結果を表 6. 2 に示す。この表を見ると、やはり自然光源と人工光源には非常に違った点があることが分かる。最近の光環境の質的議論において、そのことが大きな話題になっている面もあり、このことについても、最近はいろいろな面において議論され、指摘されている。

表 6. 2 光環境要素としての自然光源（太陽）と人工光源の比較

区 分	光色の変動	分光分布	光量の時間的変動		光の空間分布の変動	
			マクロな変動	ミクロな変動		
太陽	大気外	億年単位で安定。	連続スペクトル	億年単位で安定。	不規則な微小変動はあるが概ね安定。	億年単位で安定。
	地球上	天候、気象条件、地球の自・公転などにより変動。 [変動範囲] 8000～12000 [K]	連続スペクトル(大気の変動などにより、大気圏外とは異なる。)	太陽と地球との相対位置により、周期的に(日周期と年周期)変動。天候、気象条件により変動 [変動範囲] 0～120000 [lx]	不規則な微小変動はあるが、ミリ秒単位では安定。	太陽と地球の相対位置などにより変動。
人工光源	光源の種類によって異なるが、同じ光源については使用中の変動はほとんど無い。	使用中連続スペクトルの他に、線スペクトル、狭帯域発光の組合せなどがある。	使用中にゆるやかに(数 1000 時間単位で)減衰。	100 Hz または 120 Hz で脈動(商用交流電源の場合)。	組合せる照明器具の空間分布は器具によって異なるが、同一の光源・器具については、使用中変動はほとんど無い。	

人工光源が地球環境の夜間に光を提供したことを“人工光源の光の部分”とすれば、この問題となっている自然光源との質的差の面は、いわば、“人工光源の陰の部分”と言えるかも知れない。そこで、以下にこの比較表(表 6. 2)の中から、1～2 の特性について、この人工光源の光と陰の部分に注目しながら、特に、新しい問題点について述べて見たい。

6. 2. 2 光の照射リズムに関連する諸問題

地球上の光環境における人工光源と自然光源の決定的違いのひとつは、表 6. 2 に示したように、(マクロに見て)自然光源の照射条件は変化するのに、人工光源の照射条件は、変化しない点である。

既に良く知られているように、自然光源の照射条件は、地球と太陽との相対位置関係によって、実に規則正しく周期的に変化している。(この背景には、光源としての太陽の放射特性[大気圏外での特性]が極めて安定していることがある。太陽が実に億年単位で、安定した放射特性を保持していること、すなわち地球に対して極めて安定した一定の放射エネルギーを供給してくれていること、は良く考えて見ると実に驚異的な事である。この理由については、本稿の内容を逸脱するので、ここでは触れないこととする。別の機会にしたい。)

そしてこの周期的変化のリズムに長年(何世代にも亘って)順応した結果、人間を始めとするこの地球上の植物・動物の生活リズムが形成されてきた。ところが、一方人工光源は、日常生活において一旦設備されると、原則的には(多少の on-off 以外は)照射条件は変化しない。そのため、人工光源による照射を受ける機会が増加し、人工光源の照射量

が多くなると、本来の（長年の自然光源との関連で形成された）リズムが乱され、いろいろと影響が出てくることになる。この影響の具体例については、本特集号の別の資料でも論じられているので、ご参照下さい。

6. 2. 3 光のマイクロな変化

前項で人工光源からの光の照射条件は、一旦設定するとマクロには変化しない、と記述したが、実は表6. 2に示したように、大半の人工光源の照射条件はマイクロには、実に規則的・周期的に変化している。この理由は世界中で大半の人工光源を点灯するために配電されている電力が 50 Hz または 60 Hz の交流であることに起因している。

実は前節で述べたように、エジソンが白熱電球の点灯のために開発した配電システムの場合の電力は、210 V の直流であった。これがその後どのような経緯を経て現在の交流配電になったのかは、現在必ずしも明らかではないが、結果的な理由としては以下のように考えられている。即ち、配電線路内の電力損失は、電圧の2乗に逆比例するから、大電力を効率良く送るには電圧を高くした方が良い。ところが直流は簡単に電圧を上昇させる装置が無いのに対して、交流の場合は変圧器があり、簡単に昇圧することができるからである。そして、時代の推移と共に直流配電システムは姿を消し、50 Hz または 60 Hz の交流配電システムが主流となってしまった。

したがって、現在広く使用されている人工光源である白熱電球、蛍光灯、HID ランプなどは、一部の、例えば高周波に変換して点灯するような回路を除いては、点灯中に放射される光は 100 Hz または 120 Hz の周波数で脈動していることになる。

この脈動が人間や動・植物にどのような影響を与えるかは、未だ充分明らかにされていない。余り影響が無いという見解もある。実際に、現在でもその影響の結果は確認できていない。ただし、現在影響が現れていないから、大丈夫であると断言するのは早計である。何世代かを経た後に影響が現れる可能性があるからである。これら電気による人工光源が地球の光環境に登場してから、高々 100 年 — 3 世代である。3 世代は影響が現れるには短すぎる、という意見もある。

資料的に確認されてはいないが、もしかするとエジソンが直流で電球を点灯することを提唱したのは、このような要素も考慮したからなのかも知れないと思われる。

（河本康太郎）

参考文献

- 1) 週刊朝日百科：日本の歴史 34 — 原始・古代① 宇宙と人類の誕生，朝日新聞社（昭 61）
- 2) (社)日本電球工業会・編：日本電球工業史 第3追補版（平 5）
- 3) 柳田 國男：火の昔，實業之日本社（昭 19）
- 4) 熊谷清一郎：火，岩波書店（昭 54）
- 5) 關 重廣：燈火の變遷，河出書房（昭 16）
- 6) 照明學會・編：照明工学ポケットブック，（昭 16）
- 7) 小林 秋男：電燈の話，岩波書店（昭 28）
- 8) (社)日本電球工業会・編：日本電球工業史，（昭 38）

- 9) 澤田 謙：エジソン傳，大日本雄辯會講談社（昭 4）
- 1 0) 沢田 謙：エジソン，偕成社（昭 27）
- 1 1) 三石 巖：エジソン，金子書房（昭 29）
- 1 2) M. Josephson：Edison - a Biography, McGraw-Hill Paperbacks(1959)
- 1 3) 中山 光義：エジソン，偕成社（昭 42）
- 1 4) スターリング・ノース（藤川正信・訳）：メンロパークの魔術師，学習研究社（昭 49）
- 1 5) 光瀬 龍：エジソン，講談社（昭 63）
- 1 6) 生江 有二：エジソン，ブロンズ新社（平 2）
- 1 7) 飯野 貞雄：エジソンシステム，照学誌，63-10, pp.603-608（昭 54）
- 1 8) R.C. Chirnside（河本康太郎・訳）：スワンと白熱電球の発明，照学誌，63-10, pp.614-619（昭 54）
- 1 9) 日本電氣事業史編纂會・編：日本電氣事業史，電氣之友社（昭 16）
- 2 0) 内山 一正，尾見 定之：送電配電と屋内配線，オーム社（昭 35）

6. 3 人間に対する影響の実際

6. 3. 1 眼精疲労

6. 3. 1. 1 はじめに

人間の脳に伝わる情報の85%以上が目から入ると言われ、情報化社会の発展とともに、労働環境や家庭環境における視覚負担の割合が増加しつつある。このため国際的にも、VDT (Visual Display Terminal) と人間との関わり合いをテーマとした研究活動が活発に展開されている。

現在、日本人の約55%が眼鏡やコンタクトレンズを使用しており、また65歳以上の高齢者が約18%¹⁾を占めているから、職場や家庭において視覚機能に対する格別な配慮が求められている。ここでは、VDT作業を中心とした眼精疲労について述べる。

(1)眼精疲労とは

疲労 (fatigue) の概念づけは古くから試みられている課題で、誰もが知っており理解できる概念である。しかし、疲労を定義づけようとする、多数の学説があり未だに明確な定義には至っていない。一般的に広く用いられている定義としては、「精神的または肉体的に活動した後続く、仕事量の減少、遂行の非能率化などを特徴とする状態」であるとしている。また「仕事の結果として生じ、休養を要し、その人の機能的な能力の低下した状態」とも言えることから、疲労は人間の生理的活動に変化をきたし、機能の変化、物質変化、主観的訴え、能率の変化などを生ずる現象として捉えられている。²⁾

VDT作業に限らず、視作業を続けることにより「物がぼやける」「眼が痛む」「涙がでる」「眼と眼の間・鼻のつけ根・額の部分の圧迫感、不快感」さらには「頭痛」「めまい」「はきけ」「胃の不快感」などの不定愁訴を主体とする症候群は眼精疲労 (asthenopia) の特徴として挙げることができる。このことから眼精疲労は、平易に言えば“物をよく見ようとするときにおこる苦痛”であると定義できる。

(2)眼精疲労と眼疲労³⁾

目の疲れは眼精疲労と眼疲労に分けられている。一般に眼精疲労と眼疲労とは同じような意味をもつ言葉と理解されているが、眼精疲労と眼疲労は使い分けがされている。つまり眼精疲労とは、視機能に病的な疲労を含んでおり、疲労が解消されても症状が改善しないものを指している。一方、眼疲労は生理的な疲労であり、休息によって視機能が正常な状態に戻ることを意味している。一般に目が疲れると言っている大部分は眼疲労に分類されることになる。

(3)眼精疲労の要因

眼精疲労、眼疲労ともに、その原因として以下の4つの要因が考えられている。

①外環境要因：照明条件、温度や気象条件、音響刺激、化学刺激等。

②内環境要因：全身病、身体疲労、病的体質等。

③心的要因：精神異常、神経症、気がまへの不足等。

④眼局所の異常：屈折異常、調節障害、斜位、不同視、不等像視、眼疾患等。

上記の4要因はどれをとっても目の疲れの原因になっているが、眼精疲労の多くはそれ

それ単独ではなく、相互関係をもって症状を起こしていることが多い。したがって眼精疲労は眼科医だけでなく、精神科、内科などの医師を含め、しばしば労務管理を含めた環境問題の解決も必要になっている。ここでは眼精疲労として考慮すべき主要因である①と②について詳述する。

①外環境要因

人間が生活している環境や仕事の質や量などが原因になることがある。照明に関係した光環境、化学的刺激、粉塵、騒音等の悪環境に長時間にわたって暴露される場合や、精密作業、コンピューター・ワープロ操作などの近くのものを見続ける仕事をしている場合がそれにあたる。とくに照明は、目を使う仕事をする環境として重要な要因の一つに挙げられる。VDT作業の光環境についてはノートパソコンに用いられているFlat Panel Displayが急速に普及していることからVDT作業のガイドラインについて見直しが行われている。表6. 3に旧労働省がまとめたVDT作業の指針を示す。

表6. 3 VDT作業のための労働衛生上の指針について（抜粋）⁴⁾

<p>■照明及び採光</p> <p>(a)室内は、できるだけ明暗の対照が著しくなく、かつ、まぶしさを生じさせないようにすること。</p> <p>(b)陰画表示のCRTディスプレイを用いる場合のディスプレイ画面における照度は500ルクス以下、書類及びキーボード面における照度は300ルクスからおおむね1000ルクスまでとすること。また、CRTディスプレイ画面の明るさ、書類やキーボード面における明るさと周辺の明るさの差はなるべく小さくすること。</p> <p>(c)直接太陽が入射するなどの高輝度の窓については、ブラインド又はカーテン等を設け、必要に応じてその輝度を低下させることができるようにすること。</p> <p>■グレアの防止</p> <p>CRTディスプレイは、作業者の視野内には高輝度の照明器具・窓・壁面や点滅する光源等がなく、かつ、CRTディスプレイ画面にこれらが映り込まないような場所に設置すること。映り込みがある場合には、必要に応じ、次の措置を講じること。</p> <ul style="list-style-type: none">・CRTディスプレイ画面の前後の傾斜の調整を行うこと。・低輝度型照明機具を使用すること。・CRTディスプレイにフード又はフィルタを取り付けること、又は反射防止型CRTディスプレイを用いること。・その他グレアを防止するための有効な措置を講じること。

表6. 3は、1985年のガイドラインであり、ディスプレイ画面の照度は500lx以下を推奨しているが、この照度では室内を薄暗い感じにする必要がある。最近のディスプレイ性能の向上により鉛直面照度が600lx程度でも目が疲れにくい人間工学的設計によるディスプレイが開発されている。

細かい文字を読んだり、記号等での判別作業等を長時間にわたって続けると、視機能は疲労していく。視機能の疲労が顕著に表れるのは、毛様筋の疲労により収縮、弛緩が緩慢となり、遠近調節時間が長くなることである。

図6. 1は、一定の照度で精密判別作業を30分間行った後の遠近調節時間の変動率（作業前を1.0とする）を示したものである。500lxは視機能の疲労の少ない最低照度であり、1000～2000lxが望ましいことが分かる。

視覚による繰り返し作業での判別ミスは、作業時間の中間から後半に発生する傾向が見られるが、これは疲労による視機能の低下、確認意欲の減退を物語っている。特に、視力判別業務比率の高い作業では、眼球、視神経等の眼疲労から、肩こり、頭痛の訴えが多く見られる。⁵⁾

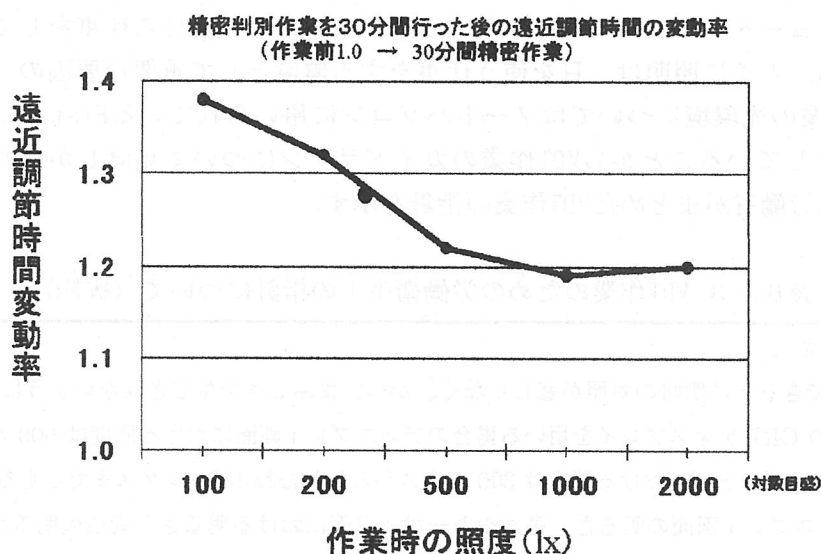


図6. 1 照度と遠近調整時間変動率の関係⁵⁾

②内環境要因

眼精疲労では、目そのものに異常のある場合が多くみられ、それが外環境要因や全身的な状態とからみ合っ起こしている場合が多い。このため眼精疲労をその原因から調節性眼精疲労、筋性眼精疲労、症候性眼精疲労、不等像性眼精疲労、神経性眼精疲労に分類されている。

■調節性眼精疲労

調節衰弱（近くにピントを合わせ作用の弱くなった状態）や老視（水晶体の弾力が低下し、ピントを合わせる距離が遠ざかった状態）などの調節異常のときには、近くを無理にみようとするために、目に負担がかかり疲れる。また、遠視の人が視力がよいからといって眼鏡をかけないでいると、近くをみるとき余分な調節（水晶体を厚くすること）を強いられるため、疲労を訴えることがある。

■筋性眼精疲労

目を取り巻く筋肉の異常で、斜位（潜伏性斜視）やふくそう障害（近いものを一点で見ることが出来ない）などがある。斜位の方は、両目でものをみるのに無意識に目を寄せる努力が必要なので、目を動かす筋肉に負担がかかって疲労する。

■症候性眼精疲労

目や全身的な病気が原因となって起こり、なかでも眼精疲労が唯一の自覚症状となる緑

内障の時もある。

■不等像性眼精疲労

眼鏡の度の左右差が大きい場合や、片目のみ水晶体摘出を受けた場合など、不同視（左右の目のどちらかが極度の近視、又は遠視）の場合に起こる。

■神経性眼精疲労

眼球そのものには異常がなく、ヒステリーや神経衰弱等の神経症のために目が疲労する。身体的な疾患だけでなく精神的なストレスが目の疲労に大きな影響を与えられている。

最近では、上述した5分類で分けられない眼精疲労として、VDT症候群とドライアイがクローズアップされている。VDT作業による視機能障害として、眼の疲れ・視力障害・眼がかすむ・眼痛などの症状が現れ、眼科的異常として、眼精疲労・近視化・角結膜炎・眼圧上昇・涙液分泌障害などがいわれているが、これを総じてVDT眼症（テクノストレス眼症）と称している。

ドライアイは、涙液の量低下または質異常をきたした状態と定義され、日本では角結膜障害の有無を問題にしていない。シェーグレン症候群（主として中年女性に好発する涙腺・唾液腺を標的とする臓器特異的自己免疫疾患）などの原因のはっきりした疾患ではないのに、角結膜障害を伴わない眼乾燥感や乾燥検査所見のあるドライアイやコンタクトレンズ装用などの誘因で発症するドライアイなどで問題になる不定愁訴が多く、眼が疲れやすい・不快・乾燥感・重い感じ・光をみるとしみる・痛い・かすみ目・目ヤニなどがある。この原因として、涙液産生量が少ないため、涙液層破壊時間が短縮し、眼の表面が乾きやすくなっていることがある。これに加えて特にVDT作業時、瞬目（まばたきの）回数が減って、正常時の1/4～1/5程度になることがある。これらの条件により、瞬目と瞬目との間の時間が涙液層破壊時間をはるかに上回ることになる。さらに、涙液の質的变化も関与しており、アレルギー性結膜炎との合併も多い為、ますます不定愁訴が増えて行くことになる。

VDT作業の時、垂直眼位が大きくなる（画面位置が高くて見上げる）と^{けんれつはば} 瞼裂幅（目を開けたときの上下まぶたの距離：日本人の平均瞼裂幅=9.4^{mm}）が大きくなり、直眼位がマイナスになる（画面位置が低くて見下ろす）と、瞼裂幅が小さくなることから、画面位置が高く上向きになると涙液の蒸発量が多くドライアイが起りやすいことが指摘されている。したがって、VDT作業時には画面位置を下げて、視線方向が下向きにした方が合理的である。現在、ドライアイに対しては防腐剤無添加の人工涙液の頻回点眼、モイスチャーエイド（湿ったスポンジをつけたプラスチックカバーをメガネにとりつけたもので、目のまわりの湿度を高くして涙の蒸発を抑える）というドライアイ用眼鏡（図6.2）の処置がとられている。

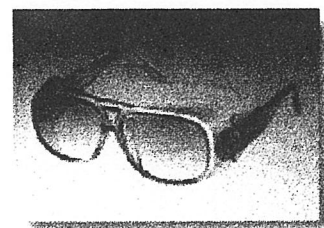


図6.2アシストグラス

6. 3. 1. 2 おわりに

VDT作業に従事している労働者の8割が身体的疲労を自覚しており、4割が精神的疲労やストレスを感じていることが旧労働省の「技術革新と労働に関する実態調査」^{B)}で報告されている。この調査は1998年10月に実施されたものであるが、VDT作業者の健康診断を実施していない企業が90%もあり、その理由として6割の事業所が「定期健康診断で十分」と考えている。

一方、VDT作業で身体的疲労・自覚症状を感じている労働者は77.6%を占め、疲労を部位別（複数回答）にみると、「目の疲れ・痛み」が90.4%と最も多い。VDT作業の今日の状態を見るならば、従来のVDT作業管理（1日の延べ作業時間、一連続作業時間、休憩時間等）や職場環境条件、および健康管理とともに視覚環境の視点に立った対策が望まれる。

（藤本順三）

参考文献

- 1) 高齢者人口の現状と将来、総務省・統計局統計センター、2001.9.15 発表
- 2) 大島正光、疲労の研究、同文書院、p.2-8、(1980).
- 3) 渥美一成、調節・眼精疲労、金原出版、p.6、(1999).
- 4) 「VDT 作業のための労働衛生上の指針について」、労働省労働基準局発第 705 号、昭和 60 年 12 月 20 日.
- 5) 労働安全衛生広報、No. 133、p.7、(1996.10.1) .
- 6) 産業疲労ハンドブック、労働基準調査会、p.198-206、(1995) .
- 7) 遠藤幸男、VDT 作業の近況、労働科学研究所、サイエンスワークレポート、No. 1533・1534、(1998).
- 8) 技術革新と労働に関する実態調査、労働省、労働省政策調査部編、(1999) .
- 9) VDT ガイドラインに関する報告書、(社)日本電子工業振興会、(1985) .

6. 3. 2 皮膚の治療と診断への人工光利用

人工光の皮膚影響としては、紫外放射の工業・産業利用の現場で不用意な対応による障害の発生と人工光の医学利用という観点がある。近年の光の産業利用には目覚しいものがある。しかし、これらに関する系統的な報告は散見されるに過ぎない。ここでは、医学利用に的を絞って記述する。

人工光を医学利用する場合、大きく二つに分けられる。第1は光治療であり、第2は光診断である。前者では、光は反応場としての皮膚に、内在あるいは外からもたらされる光感受性分子に吸収され何らかの光化学反応を誘起し、これが病気治癒の効果をもたらす。後者は、光による診断利用においては、光は生体信号のモニターとして使われる。治療を目的とする場合、照射光の生体内侵達度と無害性が重要因子となる。人体への光照射は、外面からあるいは光ファイバーなどで体内面から照射される。このとき、被照射面の波長別の光吸収率・光侵達度等への理解が是非とも必要である。4. 3項でのべたように、皮膚の光吸収率は波長に大きく依存する。波長の短い紫外線は表面で吸収されやすく、波長の長い可視光・赤外線の内侵達度は大きい。照射光はひふ表面でまず反射、散乱され、拡散されながら皮膚の内部へ透過吸収されていく。また、散乱の度合いは波長が短いほど大きい。これらの光特性は、光をモニターとして利用する場合にも考慮すべき重要因子である。

光を利用する治療法は表6. 4に示すように大きく3つに分類される。

表6. 4 光を利用する病気の治療法

療 法	適用症例 (療法名)	作用光と適用光源	手 法
光療法	季節性感情障害 レーザー屈折矯正 糖尿病網膜症 むし歯 あざ 新生児黄疸	高照度白色光(2500 から 10000 ルックス) 193 nm : エキシマーレーザー 488 nm, 514 nm : Ar, Kr レーザーなど 2.94 μm : Er-YAG レーザー 各種連続発振、パルスレーザー 400~700 nm : 昼光色, 青白色蛍光灯 400~550 nm : ハロゲンランプ	1~2 時間連続照射/日 レーザー照射 レーザー照射 レーザー照射 レーザー照射 可視光連続照射
光化学療法	尋常性乾癬 アトピー性皮膚炎 (PUVA療法)	320~400 nm : UV-A 光源 (ブラックライト)	ソラレン誘導体化合物 を内服・外用後に連続照射
光力学的治療	表在性がん (PDT)	650nm, 664 nm : エキシマーダイレーザー	ヘマトホルフィリン誘導体 (HpD)やフォトフリンを投与後 レーザー照射

第1の光療法は光線療法あるいはライトセラピーともよばれ、治療法としては外部から皮膚へ光を照射するだけである。ヒトや動物の急性あるいは慢性病への太陽からの青色光の有用性が、すでに100年前の米国で報告されている¹⁾。また、1903年にはFinsenが真性皮膚結核の紫外線療法でノーベル医学生理学賞を授与されている。その後、光療法は民間療法としては継続されたがみるべき発展はなかった。1950年代に入り、新生児黄疸の光療法が開発され光療法は再び活気をおびた。最近では高齢者の睡眠障害や季節性感情

障害(冬季うつ病)への高照度光照射療法が注目されている。なお、様々な疾患に対するレーザー治療が実用段階に入ってきた²⁾。

第2の光化学療法は体外から光感受性物質をとりこませ、この物質が吸収する光を照射して病変細胞に光毒性反応を起こさせて疾患を治す療法である。

照射光には通常、皮膚発がんの危険性がない UV-A(290 ~ 320nm : 光源ブラックライト)が使われる。光感受性物質としては、UV-A 光では決して光アレルギー性反応を起こさず、光毒性反応だけを起こす物質が使用される。この療法の代表例は、PUVA 光化学療法である。PUVA は治療薬である光感受性物質ソラレン(Psoralens)の頭文字 P と作用紫外放射 UV-A からつくられた造語である。PUVA 療法の適用例は数多いが、尋常性乾癬の治療が最も普及している。この皮膚疾患は発病因子が完全には解明されておらず、慢性、難治性、再発性で、患者数は日本に 2 ~ 3 万人、米国では 200 ~ 800 万人と推定されている。PUVA 光化学療法は細胞異常増殖に対して抑制効果があり、古くから使われてきたゲッカーマン療法に代わるクリーンな療法として登場した。PUVA 療法の主反応機構は DNA 複製阻害による表皮細胞の異常増殖抑制と考察される³⁾。この反応機構を踏まえて、皮膚 T 細胞リンパ腫のフォトフェレシスが実用化されている。

第3の PDT(Photodynamic therapy)として知られる光線力学的治療法は、腫瘍細胞に親和性のある感光色素を投与した後に、その感光性色素の発する蛍光をモニターとして、病変部を特定し、ここにレーザー光を照射し腫瘍細胞を選択的に破壊する療法である。代表例は、感光色素ヘマトポルフィリン誘導体(HpD)を用いる PDT で、管腔臓器や体表面の固形腫瘍—肺がん、食道がん、胃がん、膀胱がんなどの転移前の早期治療に現在約 8 割を上回る好成績を上げている。

ここでは、光療法の副作用についてはふれなかった。しかし、未成熟な治療法では副作用の解明に到っていないものもある。光の利点を最大限に利用し、かつ副作用のない光療法の開発が強く望まれている。

光診断の利点は人体の非破壊検査、つまり皮膚組織の切開、切除のない無侵襲性にある。無侵襲性病気診断は従来から尿中の蛍光性排泄物の同定、肌色や皮膚様相による診断などがある。しかし、現在開発が進められている光診断法は、生体組織や病変組織が発する光信号を実時間画像として提示し診断に使う手法である。細胞のエネルギー状態、特定イオン濃度や特定遺伝子のモニターとなる種々の光造影剤、蛍光剤などが開発されつつある。光 CT (Optical Computed Tomography)も今世紀半ばには実用段階を迎えると期待される⁴⁾。

光は従来、医療現場で紫外線殺菌ランプ、顕微鏡や分光光度計などを始めとするハードウェアとして機能してきた。この傾向は今後ともそのニーズと共に日進月歩の発展を遂げていくことは疑いもない。加えて、脳研究の近年の展開を考えると、照明環境をも含めた光の人体心理作用など、光のソフトウェア的関与が医療現場で徐々に重要視されてくると期待される。

参考文献

- 1) G.A.J.Pleasanton, *Influence of the blue ray of the sunlight and or the blue colour of the sky*, Claston, Remsen & Haffelfinger, Pub.(1877).
- 2) 日本光生物学協会編“光による医学治療”，共立出版(2000).
- 3) M.Sasaki et al, *Mut.Res.*,**197**, 51-58 (1988).
- 4) 日本光生物学協会編“光による医学診断”，共立出版(2001).

7. 関連応用照明器具および関連製品

7. 1 交代制勤務者の睡眠障害対策と応用器具

7. 1. 1 はじめに

エジソンが電灯を発明してから 120 年あまりたった今日、昼夜の分かちなく活動を求められる分野は生産だけでなくサービス、金融、情報など拡大を続けている。が、一方、その活動を支える側の人間には昼夜に従って変動するリズムが存在する。この変動の発生とコントロールは、脳内の視交叉上核 (SCN) にある時計細胞によってなされているという説が現在有力である。この説に従えば、睡眠—覚醒リズムのコントロールは、目から入ってくる光の量を SCN が感知し、光量が少なければメラトニン (睡眠物質を誘発するホルモン) を生成する指令を松果体に出す、光量が多ければメラトニンの生成を抑制する、というメカニズムとなる。また、この昼夜コントロールに呼応して、自律神経系の活動やそれに伴うホルモンの分泌、循環器系や消化器系の活動などの生体反応も、昼は活動に適したように、夜は休息に適したように、調和して変動している、という。このコントロールのメカニズムについては仮説の域を出ていないという意見もあるが、具体的な昼夜変動そのものは様々な形で確認されており、少なくとも現時点ではもっとも妥当な仮説であると考えられる。

この 1 日周期の昼夜変動を「サーカディアン (概日) リズム」と称する。

社会を構成する人員の大半は「昼は活動、夜は休息」のサイクルに従って社会生活を送っている。しかしながら、社会のニーズを満たすために、体内時間の夜間に活動をし、体内時間の昼に休息を取ることが求められているのが、夜勤・交代制勤務に従事する労働者 (交代制勤務者) である。交代制勤務者は、生理的なリズム、社会的なリズムからずれたかたちで働かざるを得ず、このずれによって問題が引き起こされやすい状況にあるといえる。この章では、交代制勤務者の抱える問題とその対応策について、現状を概説することとしたい。

7. 1. 2 交代制勤務者と睡眠障害

人間が夜間を活動期にすえざるを得ない場合、まず問題となってくるのが夜間の覚醒水準の維持と、それを補償する昼間の睡眠の質である。作業を行なうなどの目的で夜間を活動する時間帯にすえると、覚醒水準はなにも手立てを打たなければリズムに従って落ちる事が、実験および様々な業態における調査で確認されている。一方、脳は一定期間活動をした後には睡眠をとって回復をはかる必要がある脆弱性を持った器官である。人間の睡眠は、「脳」の機能回復・維持のために進化の過程で特化された活動的機能であるということもできる。しかし、本来は活動期である昼間に睡眠を取るとなると、それまでの活動によって疲労した脳の回復に必要な睡眠の量・質が確保できづらくなることも実験や調査などの結果からわかっている。作業の量と質を揺るがす覚醒水準の低下と、脳の機能回復に必要な睡眠の質の低下

を放置しておく、短期的な作業の安全性低下のみならず、中・長期的には健康への影響要因となりうると言えよう。

例えば、大井田ら（2001）の総合病院の看護婦を対象にしたライフスタイルに関する調査の結果が、交代制勤務者の健康影響と作業安全の問題点の一端をしめしている。この調査は、アンケートの結果を勤務形態によって夜間勤務のある群とない群に分け、両者を比較している。この結果から、夜間勤務のある看護婦群で、自動車の運転中、食事中、社会活動中に眠気を感じる頻度や、眠気による仕事上のミスを経験が有意に高いことが示された。これは、交代制勤務者の作業の安全性低下を示唆していると言えよう。さらに、同調査によれば、夜間勤務のある看護婦群で、入眠障害の頻度や、早朝覚醒の頻度が有意に高いことが示された。これは交代制勤務の睡眠の質低下への影響、ひいては健康への影響について示唆しているものといえよう。

7. 1. 3 睡眠障害対策の応用器具—高照度光照射装置—

交代制勤務者が訴える睡眠障害の主な原因は、夜勤とそれに伴う昼睡眠といった睡眠—覚醒リズムの人為的混乱であろう。睡眠障害の治療法としては、睡眠薬などを使用する投薬療法のほかに、睡眠—覚醒リズムを支配するとされる「光」を利用してリズムを調整する治療法が有効であると言われている。この光を利用する治療法（「光療法」）は、大きく分けて太陽光を利用する生活リズムの改善と、高照度の人工光を適切な時間帯に照射する手法の2つがある。

このうち、高い照度の光を人工的に適切な時間帯に照射してリズムをコントロールするためのデバイスとしては、以下のようなものがある。

- ・ 「光治療室」

国立精神・神経センター精神保健研究所内にある光治療室（タバイ・エスペック社製）は、壁面が一面光源となっている。治療を受ける者は治療者の指示のもと、スケジュールに従って光源の前に座し、一定照度を浴びることになる。同様の治療装置は滋賀医科大等も所有している。

- ・ 「光治療機」

サン・ザ・ポータブル（アコードインターナショナル株式会社）は、卓上に置けるポータブル高照度光照射装置で、光源から30センチで垂直照度3000ルクスを確保できる。これも、治療者の指示のもと、スケジュールに従って使用することで効果を得るものである。同様の目的をもった機器は松下電工などからも販売されている。

これらの機材を使用した「高照度光治療法」は、シフトワークが原因の睡眠障害のみならず、体内時間のずれ、乱れが原因となる睡眠障害の治療には広く応用されている。

7. 1. 4 高照度光のシフトワーカーの負担緩和への応用

高照度光照射法をシフトワークの負担緩和を目的として現場に応用した事例としては、ハーバード大医学部のツァイスラーらが特許を持つ「**Circadian Lighting System**」というシステムがある。

このシステムは、作業場に設置された専用のデバイスから、特定のアルゴリズムに従って42段階にコントロールされた高照度光を照射することにより、対象者の睡眠-覚醒リズムを夜間に適応させるというものである。現在はこの特許の使用権を持つ米国の「**Shiftwork Systems Inc.**」がシステムの設計、施工、導入および調整を行っている。

このシステムを導入、使用する事により、本来は就業時間帯に訪れる作業者の睡眠-覚醒リズムの底点（もっとも覚醒水準が落ちる時間）を、高照度光の作用によってシフトさせることができるとされている。また、このリズムシフトにより就業中の覚醒水準の維持、帰宅後の睡眠の質の向上という効果が得られるとされている。

欧米諸国では、すでに米国原子力規制委員会の緊急対策指令センターやコネチカットヤンキー原子力発電所の中央制御室、化学プラントの製造ラインなどに導入され、実績をあげている。また、使用者の主観評価の結果を見ると、作業中の主観的覚醒水準維持効果および帰宅後の主観的睡眠の質向上の効果がある、という結果が得られている。

しかし、高照度光によって睡眠-覚醒リズムをシフトさせるには、すくなくとも2日以上照射期間が必要である、という実験およびシミュレーションの結果もあることから、全ての交代制勤務者の対して万能の手法ではなく、限界があるということは勘案しておく必要がある。欧米での評価結果については、導入されたいずれの職場も、1周期中に夜勤が4～6日程度連続する交代制で勤務する者を対象者としており、高照度光によるリズムシフトのメリットが得やすい条件である、という前提があることを考慮すべきである。

日本国内では、株式会社関西テックが同システムの patents を有しており、設計、施工、導入等を担当している。現在導入されているのは以下の3箇所である。

- ・ 関西電力株式会社 関西国際空港エネルギーセンター 中央制御室
- ・ 関西電力株式会社 神戸給電所 司令室
- ・ 関西電力株式会社 大飯原子力発電所 防護本部

関西国際空港エネルギーセンターと神戸給電所については、対象者の主観評価を行っており、夜間の主観的覚醒水準維持ならびに主観的睡眠の質の向上に効果的であるという結果が得られている。

しかしながら、国内の交代制勤務の大勢を占めているのは、1周期中に1～2日程度の夜勤というスケジュールである。となると、国内での応用にあたっては、前述した高照度光適応の限界に抵触する可能性が大きいことをまず考える必要があるだろう。また、勤務のスケジュールを変更するには、組織をまたいでの調整や検討が必要となり時間と労力がかかることが多いことから、少なくとも当面はこの短周期スケジュールと高照度光照射法の適合性を検討していく事が重要となるであろう。

今後、交代制勤務者向けの高照度光照射法を国内で広く展開していくは、これまでの主観指標による評価に加えて、いずれかの段階で生理指標による評価も必要になってくると考える。

(武藤敬子)

参考文献

- (1) 早石 修 監修：「快眠の科学」朝倉書店(2002).
- (2) 高橋正也：「概日リズムと交替勤務」神経研究の進歩・特集
生体時計と概日リズム 第45巻第5号(2001).
- (3) C. A. Czeisler, et al: Exposure to bright light and darkness to treat physiologic maladaptation to night work, The New England Journal of Medicine, Vol322, No.18 (1990).

7. 2 快適覚醒促進照明器具

光は即効性の覚醒作用を有しているが、屋内生活に大きく依存した現代社会においては、その恩恵を十分に受けられないことも少なくない。そこで、ここでは照明器具を用いた覚醒補助の有効性に関する2つの研究事例を紹介する。

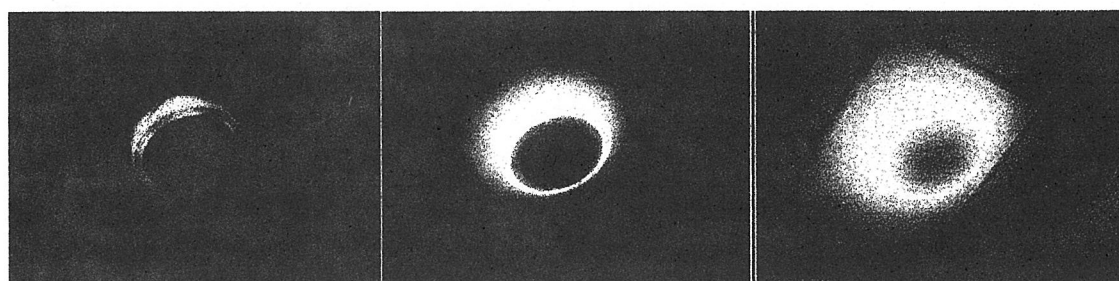
7. 2. 1 起床前漸増光照射による目覚めの質的改善

朝の目覚めは毎日の生活のはじまりであり、起床後の充実した活動のためには心地よい目覚めを獲得することが重要である。ところが、白川らの実態調査¹⁾によると、起床がかなり困難、あるいは非常に困難という人の割合は、若年層を中心に1～2割存在することが報告されており、心地よい目覚めのための環境整備が要求されている。起床前の光は自然な覚醒を促し、心地よい目覚めをもたらすことが知られている²⁾。日の出とともに目覚め、活動を始めていた近代以前においては、人類にはこの心地よい目覚めが保証されていたと思われるが、現代生活においては、ライフスタイルの多様化による自然光と起床とのタイミングのずれや、住宅事情から起床時の自然光の確保が困難となっていることなどから、上述したような不快な目覚めの問題が生じているものと推測される。そこで、本研究では起床時の朝日の入射を人工照明によりシミュレートした漸増光照射を行うことにより、目覚めにどのような影響が生じるかを調べることを目的として評価実験を行った。

○実験方法

被験者は20代の健康な男性8名(平均年齢25.25歳)である。実験条件は、起床前30分間の漸増光照射(顔面照度0→100lx)を行い目覚まし音で起床するL条件、0lxから目覚まし音のみで起床するNL条件の2条件である。漸増光照射は天井照明器具によりおこなった(図7.1)。実験期間は全体で16日間であり、全期間を通して被験者には生活調整(就床・起床時刻の厳守、飲酒や激しい運動の禁止など)を行ってもらった。実験室での測定は2夜連続(1夜目は順応夜)で行い、1週間の間隔をあけて2条件をカウンターバランスで設定した。測定室入室から退室までは脳波(国際10/20法のC3,C4,O1,O2)、心電図、眼球運動(左右単極、双極)、オトガイ筋筋電図、呼吸曲線(腹部バンドにより測定)の連続記録を行い、Rechtschaffen&Kalesの判定基準³⁾による終夜データの睡眠ステージ判定を行った。また、就床前と起床後には主観評価(VAS⁴⁾、KSS⁵⁾と血圧測定、Alpha Attenuation Test⁶⁾を行い、深部体温(直腸温)の測定は1夜目から2夜目の終了まで連続して行った。

図7.1 漸増光照射(天井部の状態)



○結果と考察

主観評価 VAS の項目"気分"の結果を図 7. 2 に示す。目覚まし音のみでの起床条件 (NL 条件) では平均値が大きく気分の悪い方向へシフトし、ばらつきも大きく、不安定であるが、漸増光照射を行った起床条件 (L 条件) では比較的安定して気分の良い状態を維持している。起床前 30 分間における睡眠構造の変化を図 7. 3 に示す。睡眠段階 2 (起床前では比較的深い睡眠) の出現時間は漸増光の照射で有意 (対応のある t 検定; $p < 0.05$) に減少し、逆に覚醒状態にある段階 W の出現時間は有意に増加した。また、起床直前の睡眠ステージの集計において、NL 条件では 8 例中 5 例が睡眠段階 2 からの起床であったが、L 条件では 8 例中 5 例が睡眠段階 1 からの起床であり、睡眠段階 2 からの起床は 1 例も見られなかった。これらの結果から、漸増光照射を行うことにより、まぶたを通して入力された光が感覚刺激となり脳の活動レベルを興奮させることで睡眠が浅くなり、その結果、目覚まし音による急激で不自然な覚醒が回避され、VAS の結果 (図 7. 2) に示されるように目覚めの気分が改善されたのではないかと推測される。また、深部体温と起床後における血圧、AAC (Alpha Attenuation Coefficient) については条件間での差は確認されなかった。漸増光照射条件では、起床時刻より早く覚醒方向へ導くことによる起床後の眠気などの副作用を考慮する必要があるが、起床後のこれらの指標に差が確認されなかったことから、今回行った起床前漸増光照射ではそのような副作用のない範囲で目覚めの改善が促されることが確認された。

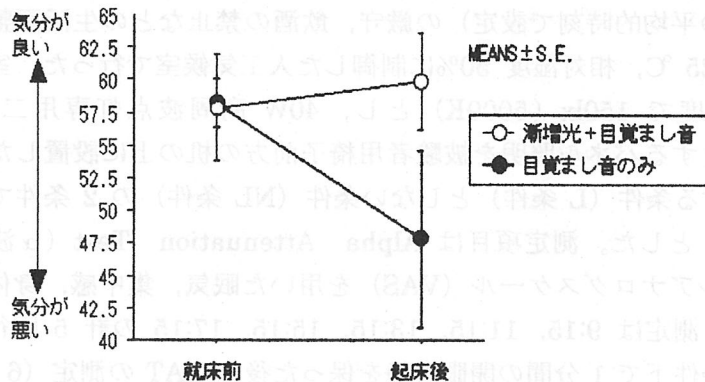


図 7. 2 VAS 「気分」の変動

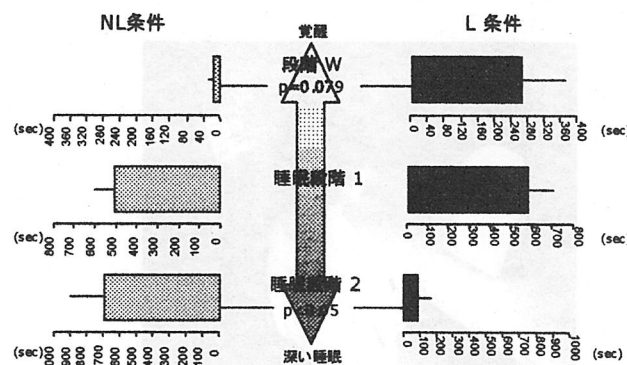


図 7. 3 起床 30 分前における睡眠構造の変動

7. 2. 2 日中の高照度光照射による覚醒補助

光には脳の覚醒中枢に直接働きかけて、ヒトを即効的に覚醒させる作用があり、1日の自然光の変化は日中の十分な覚醒と夜間の良質の睡眠という睡眠-覚醒リズムの基盤をつくり出す役割を果たしている。しかし、人工照明に大きく依存した現代の生活環境では、我々の日中の受光量は大幅に減少している。小山⁷⁾はオフィスワーカーの平日の受光量が、終日屋外で過ごす休日の受光量の20分の1程度(ピーク時)であることを報告しており、10000lxまでの照度の上昇にともない覚醒度が上昇することを報告した萩原ら⁸⁾の研究結果と合わせて考えると、現代の光環境はその覚醒作用という観点からは最適なものと言えない可能性がある。1997年健康・体力づくり事業財団の調査によると、日中の過剰な眠気を訴えている人は20～30代で20%以上、40～50代で10%以上存在するとされており、現代社会における日中のこのような覚醒の質の低下に、上記のような受光量不足が関与していることも否定できない。

そこで本研究では、照明光による日中の覚醒サポートの有効性を検討することを目的として、卓上パネル照明を用いた高照度光照射の覚醒作用について生理・心理評価により検証を行った。

○実験方法

被験者は20～30代の健常成人男性(会社員)10名であり、実験2日前から就床、起床時刻(各被験者の平均的時刻で設定)の厳守、飲酒の禁止などの生活調整を行ってもらった。実験は室温25℃、相対湿度50%に制御した人工気候室で行った。室内の照度は床面中央部水平面照度で150lx(5000K)とし、40W高周波点灯専用二重環形蛍光灯(5000K)を光源とするパネル照明を被験者用椅子前方の机の上に設置した。実験条件はパネル照明を点灯する条件(L条件)としない条件(NL条件)の2条件で、L条件での顔面照度は2500lxとした。測定項目はAlpha Attenuation Test(α 波減衰テスト; AAT)とビジュアルアナログスケール(VAS)を用いた眠気、集中感、身体的疲労に関する主観評価である。測定は9:15、11:15、13:15、15:15、17:15の計5回行った。各時刻において、一方の条件下で1分間の開眼安静を保った後にAATの測定(6分間)、主観評価(1分間)を行い、先行する条件の影響を排除するために、被験者に実験室外で軽い歩行を行ってもらってから、もう一方の条件下で同じ測定を行った。実験風景を図7.4に示す。



図7.4 実験風景

なお、2条件の順序はカウンターバランスで設定した。AATの測定において、脳波は

Pz 部位より導出し、各 1 分間の閉眼・開眼を交互に 3 回繰り返してもらい、閉眼時の α 波パワーの総和を開眼時の α 波パワーの総和で除して Alpha Attenuation Coefficient (α 波減衰係数; AAC) を算出した。

○結果と考察

各時刻における AAC の変動を図 7. 5 に示す。経時変化としては、午前から午後前半にかけて覚醒度が低下、夕方にかけて上昇するという明瞭なサーカディアン変動を示し、L 条件では全体的に覚醒度が上昇する傾向がみられた。反復測定分散分析 (repeated measures ANOVA) の結果、時刻要因と照明条件要因ともに有意 (それぞれ、 $p < 0.01$, $p < 0.05$) となった。さらに、各時刻で paired t-test による下位検定を行った結果、9 時の計測のみで有意 ($p < 0.05$) となった。

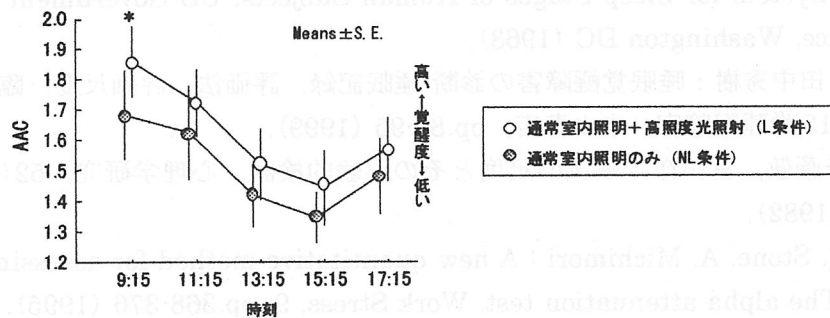


図 7. 5 AAC の変動

また、主観的眠気は午後前半にピークとなる明瞭なサーカディアン変動を示し、L 条件において全体的な眠気抑制の傾向がみられた (図 7. 6)。反復測定分散分析の結果、時刻要因と照明条件要因でともに有意 (それぞれ、 $p < 0.05$, $p < 0.01$) となり、下位検定では 9 時、11 時、15 時で有意 (それぞれ $p < 0.01$, $p < 0.05$, $p < 0.05$) となった。

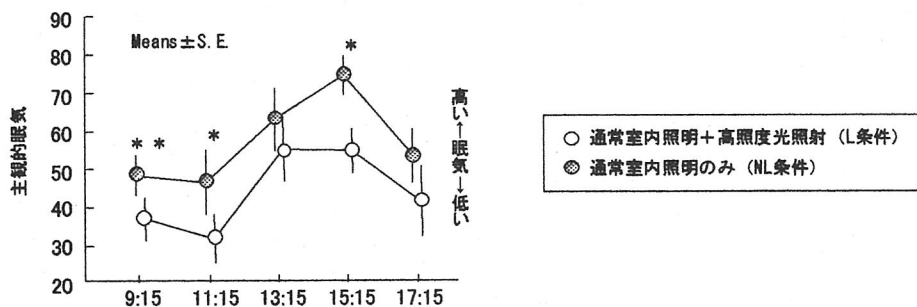


図 7. 6 主観的眠気の変動

これらの結果から、数分間の高照度光照射により覚醒度の上昇とともに眠気の抑制を促すことができることが示された。また、とくに 9 時の測定においてその効果が顕著であったことから、現代生活における QOL の向上に向けて、とくに起床後の生活動作の活性化やオフィスでの円滑な始業のサポートなどの形でこのような照明の応用が期待される。

7. 2. 3 さいごに

現代の照明環境は、主に「明視性」という観点から最適化が行われてきたが、今回紹介した研究結果からすると、「覚醒作用」という観点から、その見直しが行われるべきではないかと考えられる。今後、その重要性が広く認識され、照明器具が新たな形で活用されるようになることを期待する。

(野口公喜)

参考文献

- 1) 白川修一郎ほか：起床前漸増低照度光照射の目覚め感に対する効果，第6回日本睡眠環境学会大会報告集，pp.3-6(1997).
- 2) 松下電工技術研究所編：眠りと寝室の科学，松下電工ライフスケッチ研究所(1988).
- 3) A. Rechtschaffen, A. Kales: A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects, US Government Printing Office, Washington DC (1968).
- 4) 白川修一郎，田中秀樹：睡眠覚醒障害の診断-睡眠記録，評価法，評価尺度，臨床精神医学講座 第13巻睡眠障害，中山書店，pp.83-95 (1999).
- 5) 石原金由，斎藤敬，宮田洋：眠気の尺度とその実験的検討，心理学研究，52(6)，pp.362-365 (1982).
- 6) C. Stampi, P. Stone, A. Michimori : A new quantitative method for assessing sleepiness ; The alpha attenuation test, Work Stress, 9, pp.368-376 (1995).
- 7) 小山恵美：生体リズムと光環境，組織培養工学，24(3)，pp.124-127(1998).
- 8) 萩原啓ほか：脳波を用いた覚醒度定量化の試みとその応用，BME，11(1)，pp.86-92 (1997).

7. 3 紫外放射ダメージの皮膚内部からの防御—最近の光防御化粧品—

7. 3. 1 はじめに

我々が地表で被曝する光は紫外放射、可視放射、赤外放射であるが、皮膚に有害な影響を直接的に及ぼすのは紫外放射であり、光防御化粧品は即ち紫外放射防御化粧品であると言っても過言ではない。勿論、ある種の光線過敏症は可視放射に作用波長を持ち、赤外放射は紫外線皮膚障害を増強することは良く知られた事実である。通常の化粧品に配合される粉体は可視放射と赤外放射に対し、一定の防御効果を持つことも一般に良く知られている。しかし化粧品は可視放射と赤外放射の防御を主たるターゲットに設計されていない。逆に紫外放射は徹底的に防御し、可視放射は可能な限り透過させる技術開発が進歩し、皮膚の透明感や自然な仕上がりを実現した光防御化粧品が実用化されている。

2000年にSPFの表示上限が50+に設定^{1) 2)}されてから、光防御化粧品の機能に新しい動きが顕著となってきた。この最も顕著な動きが「紫外放射ダメージを皮膚内部から防御」しようとする動きである。紫外放射を皮膚外面で遮断する従来型の紫外放射防止剤に加え、本来、皮膚自体の持つ紫外放射防御機能・回復機能を高めることを意図した素材や手段を開発しようとする試みである。

7. 3. 2 紫外放射の免疫抑制作用の解除

紫外放射は表皮に存在する免疫担当細胞であるランゲルハンス細胞の数と機能を低下させ、免疫反応を抑制することが知られている。この紫外放射による免疫抑制を光防御化粧品が防御するとの研究が数多く報告されているが、必ずしも防御効果は完全でなくSPF値とも相関するとは限らない。この原因はランゲルハンス細胞の抗原提示機能に影響を与えるのはUVBだけでなく、UVAも抑制作用を持つのではないかと考え、岩井ら³⁾はランゲルハンス細胞にUVAを照射し抗原提示能を表すT細胞の抗原特異的増殖反応を調べたところ、明らかな低下を観察した。同時に彼らはグルタチオンを培養系に添加すると、ランゲルハンス細胞のco-stimulatory分子の発現の低下と抗原提示機能の低下を有意に防御することを発見した(図7. 7)。

グルタチオンはチオール基を有するオリゴペプチドで、生体内の多くの細胞中でグルタチオンペルオキシダーゼの基質として抗酸化的に働いているが、それ自体でも抗酸化作用を持つと考えられており、グルタチオンの塗布がUVAのランゲルハンス細胞の機能低下を防御し、免疫抑制に効果的であることが報告³⁾されている。グルタチオンの塗布がUVAによる免疫抑制を有意に防御することが示され、皮膚内部での紫外放射防御機能を持つ光防御化粧品へ応用されている。

マウス背部に130mJのUVAを照射し、照射中に3%グルタチオン溶液または溶媒対照を塗布した。翌日TNBCを照射部位に塗布し、3日後に局所リンパ節細胞に取り込まれた^{3) H}

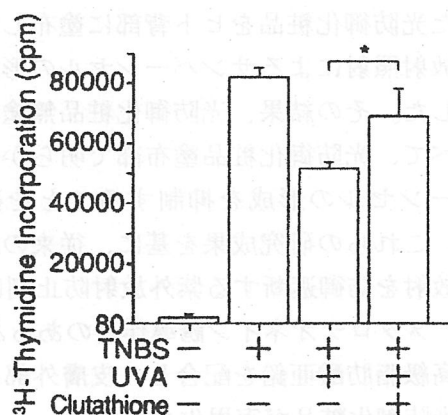


図7. 7 UVAによる免疫抑制に対するグルタチオンの防御効果³⁾

チミジンの放射活性を測定した。グルタチオンは UVA により誘導されるランゲルハンス細胞の抗原提示機能の低下を防御した。

* $p < 0.05$

7. 3. 3 生体防御タンパク質メタロチオネインの誘導

紫外放射は活性酸素を介し、サンバーンセルを形成する。サンバーンセルは紫外放射により角化細胞が損傷を受けて修復困難な状態に陥ったときにアポトーシスが誘導された状態と考えられている。ヘマトキシリン・エオシン染色ではエオシンに好染性の細胞質とヘマトキシリンに良く染まる凝縮した核を有する細胞として観察される。サンバーンセルの意義は未だ明らかになっていないが、DNA 損傷を受けた細胞の排除を目的とするとの説が有力である。

サンバーンセルは損傷細胞の自発的排除であるが、その排除機構を停止させるのではなく、サンバーンセルが形成されないように紫外線を防御する観点からの研究が進められている。

メタロチオネインは分子量約 6500 のタンパク質で、その構成アミノ酸の約 3 分の 1 をシステインが占める。分子内に S-S 結合はなく、システインはすべて SH 基が遊離した形で存在する。皮膚以外に肝臓や腎臓などの他臓器にも含まれる。メタロチオネインの生理的役割は、①重金属の解毒作用、②生体必須金属の代謝調節作用、③フリーラジカル消去作用（とくにヒドロキシラジカルの消去作用）などが考えられていて、生体防御タンパク質と考えられている。メタロチオネインが誘導されれば紫外放射によって惹起されるサンバーンセルの形成が抑制されることが報告されている⁴⁾。これらの知見は、もしメタロチオネインを予め安全な方法で皮膚に誘導できれば、紫外放射を被曝してもサンバーンセルの誘導を抑えるのに効果を持つ筈である。この様な考え方から、畑尾ら¹⁰⁾は種々検討の結果、皮膚器官培養中の培地に水溶性の亜鉛化合物を添加すると、メタロチオネインが誘導されること、これに UVB を照射するとメタロチオネインを誘導しないものに較べて明らかにサンバーンセルの形成抑制を確認した(図 7. 8)。

ミリスチン酸亜鉛とグルコン酸亜鉛を配合した光防御化粧品をヒト背部に塗布して、紫外放射照射によるサンバーンセルの形成を測定した。その結果、光防御化粧品無塗布部に較べて、光防御化粧品塗布部で明らかにサンバーンセルの形成を抑制することを確認した。これらの研究成果を基に、従来の皮膚外放射を防御遮断する紫外放射防止剤に加えて、メタロチオネイン誘導作用のある種の高級脂肪酸亜鉛を配合し、皮膚外部と皮膚内部の両面からの紫外放射防御機能を併せ持つ光防御化粧品が実用化された。

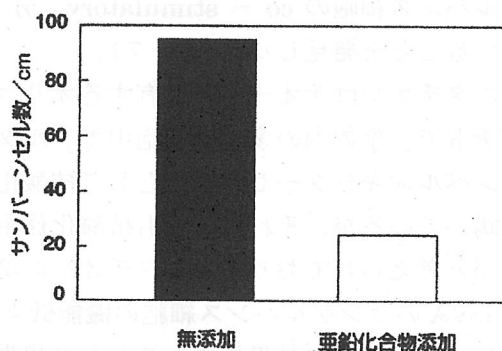


図 7.8 メタロチオネイン誘導によるサンバーンセル形成の抑制

7. 3. 4 DNA損傷の修復

紫外放射の皮膚細胞に対する直接的な作用の典型的な例は DNA に対する損傷である。代表的な DNA 損傷には、シクロブタン型ピリミジンダイマーと 6-4 光生成物である。こうした DNA 損傷は、我々が日常生活で僅かな太陽紫外放射を被曝することによって大量に生成することが知られている。しかし、これらの「DNA の傷」は我々が生体内に保有する DNA 修復酵素の働きで、通常は短時間で修復され、修復された細胞は通常の細胞として機能するように回復するため、生体に大きな影響を受けることは少ない。

しかし一度に大量の紫外放射を被曝したり、繰り返し長期間紫外放射に暴露されると、修復が間にあわず、誤った遺伝情報を持った DNA が合成され、所謂突然変異が起り、皮膚癌の発症原因となる。事実 CC → TT、C → T などの塩基の突然変異が癌抑制遺伝子 p 53 の機能を失わせることが皮膚癌発症に大きな影響を与えることが報告されている⁵⁾。⁶⁾

最近、紫外放射を照射した皮膚に UV-エンドヌクレアーゼをリポソーム製剤にして投与すると、紫外放射によって惹起された DNA 損傷（ピリジミンダイマー）の修復⁷⁾が促進され、免疫抑制も阻害されるとの報告⁸⁾⁹⁾もある。さらに DNA 損傷が皮膚の黒化や紅斑に関係しているとの知見がある。これらの知見をベースに T4N5 エンドヌクレアーゼや Photolyase を光防御化粧品に配合し、DNA 損傷を短期間に修復させ、紫外放射障害を防御する考え方も提案されている¹⁰⁾。

7. 3. 5 活性酸素の消去¹⁰⁾

皮膚中で活性酸素が発生すると、ラジカル反応が起こり、過酸化脂質の生成、タンパク質の変性や DNA 損傷を誘発する。抗酸化剤はこのラジカル反応を阻害し、紫外放射障害を抑える効果がある。化粧品に配合できる抗酸化剤はビタミン C、ビタミン E、チオタウリン、ヒポタウリン、グルタチオン、αリポ酸などがある。また、一重項酸素のスキャベンジャーである 2,4-hexadien-1-ol をエトキシ化した化合物を塗布すると、UVB の繰り返し照射によって生成されるしわの形成を抑制する効果があった¹¹⁾。

生体内在性の抗酸化酵素、SOD、カタラーゼ、セレン依存性グルタチオンペルオキシダーゼなどは活性酸素を消去する作用を持つが、これらは不安定であり、また経皮吸収されにくい。そのため化粧品に配合しても有効な作用を発揮することが期待できない。そこでこれらの内在性抗酸化酵素を活性化する作用を持つ天然成分の探索がなされており、植物のアマニンの抽出物が線維芽細胞のカタラーゼ合成を促進し、紫外放射による細胞損傷を軽減する効果が報告¹²⁾されている。また温泉水中のセレンが線維芽細胞のグルタチオンペルオキシダーゼの活性を高め、UVA による脂質の過酸化を抑制し、細胞の損傷を抑える働きも報告¹³⁾されている。

7. 3. 6 基底膜の維持とラミニン5の産生の亢進

最近、慢性的に紫外放射の被曝を受けると、30歳の日本人であっても皮膚の基底膜 (basal lamina) が断裂、多重化することが見出され、基底膜構造の乱れと破壊が光老化の初期過程に重要な意義を持ち、光老化の予防には基底膜構造の維持・修復が重要であることが解明されてきた¹⁴⁾。この基底膜を構成する主要な糖タンパク質がラミニン5で、

表皮細胞を結合組織に接着させる働きのほかに、増殖を促進し、遺伝子発現を調節し、神経細胞の突起伸長促進作用を持つことが知られている。三次元培養皮膚に紫外放射を照射すると、基底膜構造が破壊されるが、あらかじめラミニン5を添加しておくことで基底膜は破壊されず正常に近い構造が維持されることが見出された。

ラミニン5の産生を亢進する薬剤が種々探索され、ある種のレゾレシチンが基底膜の形成を促進することも報告されている^{14) 15)}。これらの科学的知見も紫外放射による老化を防御する化粧品にすでに応用・実用化されている。

7. 3. 7 ゼラチナーゼの阻害

紫外放射を日常的に被曝する顔面は他の部位と比較して“しわ”などの老化現象が早期に顕在化する。この原因は紫外放射による皮膚の構造変化（コラーゲンやエラスチンなどの膠原線維や弾力線維の分解・変性）で生ずることが多くの研究者から指摘されている。顔面皮膚中のゼラチナーゼの存在を調査した結果では、日々紫外放射に曝されている顔面の表皮に活性化したゼラチナーゼが多く存在すること、さらに表皮最下層の基底層で作られたゼラチナーゼが最外層の角層にまで達していることが明らかになった。このゼラチナーゼは通常紫外放射に曝されていない腹部や上腕内側などの角質層ではほとんど検出されなかった。紫外放射が表皮細胞におけるゼラチナーゼ遺伝子を発現し誘導することも証明された。また45歳以上の中高年女性の顔面角質層ではほとんどの人にゼラチナーゼの存在が確認され、しわ形成の促進因子となっている。ゼラチナーゼの活性を効果的に抑制する物質の中に東南アジア原産のウコンエキスに優れた効果があること、その有効成分はクルクミンというウコン特有の成分であることが分かっている¹⁶⁾。このウコンを配合した紫外放射によって惹起される光老化を抑制する化粧品も市販されている。

7. 3. 8 おわりに

この10年間に消費者の意識は劇的な変化を遂げた。一部の若者の間で流行した「顔黒」風俗を除けば、「紫外放射の有害性と防御の重要性に対するコンセンサス」が社会的に定着した。

これは「紫外放射が皮膚老化の原因」となり、「皮膚の免疫力を低下させ」、「紫外放射防御は子供のうちから」必要であるとの、行政や一般への啓発活動が、各種シンポジウムや公開セミナーを初め、学会、業界、新聞、TV、雑誌などで頻繁に行われた成果である。この意識の変化は、1999年に母子手帳から「日光浴」が消えたことに象徴的に現れている。今や、時代は完全に「日焼けから、日焼け止め」へ変化した。この意識の変化と光防御化粧品の有効性への信頼が急激な市場の拡大に繋がっている。

一方では国内はSPFの上限が設定され、「SPF」戦争に終止符が打たれた。今後の紫外放射防御化粧品は、皮膚表面で紫外放射を遮断するだけでなく、メタロチオネインの誘導、グルタチオンによる皮膚免疫力の低下防止などの皮膚内面からの紫外放射防御機能の付加、多糖類や植物エキスによる肌荒れ防止、あるいは美白などの機能を併せ持つ商品コンセプトの開発が進んでいる。

また国際的なSPF測定法のハーモナイゼーションも順調に進んでいる。2000年4月にマルタ共和国にCOLIPA（欧州化粧品工業会）、JCIA（日本化粧品工業会）、CTFA（米国

化粧品工業会),CTFA/SA(南アフリカ化粧品工業会),CTFA/AS(豪州化粧品工業会)の5団体の代表が集まり、日本側の提案で、まず技術的な観点からハーモナイゼーションの可能性を詰めることで一致した。

マルタ会議を受けた2000年9月のブラッセルの会議は、個々のSPF測定条件を各国化粧品工業会の専門家の中で議論し、国際的な統一化の方向性を探ることを目的に開催された。この会議は非常に成功裡に終わり、①統一して1つの測定法とすること、②標準誤差、照射増量幅、塗布量の誤差範囲などの幾つかの課題を残したものの、その他の多くの条件で合意を見た。そして、日本にとって最後の課題であった「光源の規格と保守点検」についても、2001年10月の東京会議、2002年2月のブラッセル会議での議論を経て、合意がえられ、長年の懸案であった「国際SPF測定法基準」が2002年10月の南アフリカ会議で合意される見通しである。これにより、少なくとも日本、欧州、南アフリカの3団体の測定方法が統一される運びである。

(福田 實)

参考文献

- 1) 福田 實、新井清一、河合通雄、鈴木正、長沼雅子、岡田富雄、正木仁、本好捷宏：紫外線防止用化粧品と紫外線防止効果—SPFとPA表示—、日本化粧品工業連合会、2000年1月20日
- 2) 福田 實：SPF競争の行方—SPF値に上限は設けるべきか？太陽紫外線防御研究委員会学術報告、9(1),pp.35-42(1999)。
- 3) Iwai I., Hatao M., Naganuma M et al: UVA-induced immune suppression through an oxidative pathway. *J.Invest.Dermato.*, 112,19(1999)。
- 4) Hanada K., Gange R.W., Siebert E et al: Protective effects of cadmium chloride against UVB injury in mouse skin and in cultured human cells: a possible role of cadmium-induced metallothionein. *Photodermatol. Photoimmunol.Photomed.*,8,111(1991)。
- 5) Ziegler A., Leffell D.J., Kunala S et al: Mutation hotspots due to sun light in the p53 gene of non-melanoma skin cancers. *Proc.Natl.Acad.Sci.*,90,4216(1993)。
- 6) Ziegler A., Jonason A., Simon J et al: Sunburn and p53 in the onset of skin cancer. *Nature.*, 372,773(1994)。
- 7) Kripke M.L., Cox P.A., Alas L.G et al: Pyrimidine dimers in DNA initiate systemic immunosuppression in UV-irradiated mice. *Proc.Natl.Acad.Sci.*, 89,7516(1992)。
- 8) Yarosh D., Alas L.G., Yee V et al: Pyrimidine dimer removal enhanced by DNA repair liposomes reduces the incidence of UV skin cancer in mice. *Cancer Research*, 52,4227 (1992)。
- 9) Wolf P., Yarosh D.B., and Kripke M.L: Sunscreens and T4N5 liposomes differ in their ability to protect against ultraviolet -induced sunburn cell formation, alterations of dendritic epidermal cells, and local suppression of contact hypersensitivity. *J.Invest.Dermatol.*, 104,p.287(1995)。
- 10) 畑尾 正人：紫外線ケア化粧品、化粧品の有用性(原田ら編)、フレグランスJ社、

- pp.125-143(2001).
- 1 1) Bisset D.L., Majeti S., Fu J.J L: Protective effect of topically applied conjugated hexadiens against ultraviolet radiation-induced chronic skin damage in the hairless mouse. *Photodermatol. Photoimmunol.Photomed.*,7,p.63(1990).
 - 1 2) Yahagi S., Tsurumi Y., Oobayashi K: A possible role of catalase on protection against oxidative stress in human dermal fibroblast: Development of enhancer on catalase synthesis.第45回 SCCJ 研究討論会要旨集、 p.15 (1999).
 - 1 3) Moysan A., Morliere P., Marquis I: Effects of selenium on UVA-induced lipid peroxidation in cultured human skin fibroblasts. *Skin Pharmacol.*, 8,p.139 (1995).
 - 1 4) Amano S., Matsunaga Y., Akutsu N etal: Proceedings of 21th IFSCC Congress pp.97-114(2000).
 - 1 5) 福田 實: 皮膚科学と化粧品、色材 : 74,pp.30-38(2001).
 - 1 6) SHISEIDO NEWS RELEASE:2000-7, 00060

7. 4 遠赤外放射の基礎と応用例

7. 4. 1 はじめに

「紫外放射」の功罪は比較的詳しく調べられている。紫外放射は可視放射よりの波長が短く、X線よりも長い光で、波長が 10 ~ 380 ナノメートルの範囲。目には見えないが写真フィルムを感光させたり、各種の色素を色あせたりさせるように化学作用も強い。とくに白内障（水晶体が濁って不透明になる）の原因や、皮ふのしみ（色素斑）や沈着を誘発させる因子として知られている。また人体内にビタミンDをつくる作用があり、カルシウム代謝を促進するため、くる病や皮ふ疾患、貧血などの治療にも使われている。市販の水銀殺菌灯は特殊ガラスが使われるため 253 ナノメートルの強い紫外放射を出すために、この光が殺菌のはたらきをする。

これに対して赤外放射は工業的に多様されているにもかかわらず、あまり知られていない。遠赤外放射は目に見えないため、その効果が疑われる。健康サウナ、遠赤外放射繊維の保温効果、味がよくなる調理ボール、カルキ臭がとれるセラミックボールなど遠赤外放射を利用した製品や技術が市場を席卷している。しかし、詳細なメカニズムはよくわからないケースが多い。これらの視点から 1992 年には社団法人「遠赤外線協会」が設立され、独自の認定制度をつくっている。

7. 4. 2 赤外放射の発見

ドイツの科学者ハーシェルは 1800 年に、太陽放射のスペクトルを研究中に、赤色の外側でも寒暖計に感じる熱放射があることを発見した。この熱放射は目には見えないが、寒暖計を温度上昇させる度合いは赤色光よりも大きかった。彼は、この熱放射が赤色光の外側にあるため、「赤外線」と名付けた。（現在では線 (ray) から放射 (radiation) に用語が変わっている。）

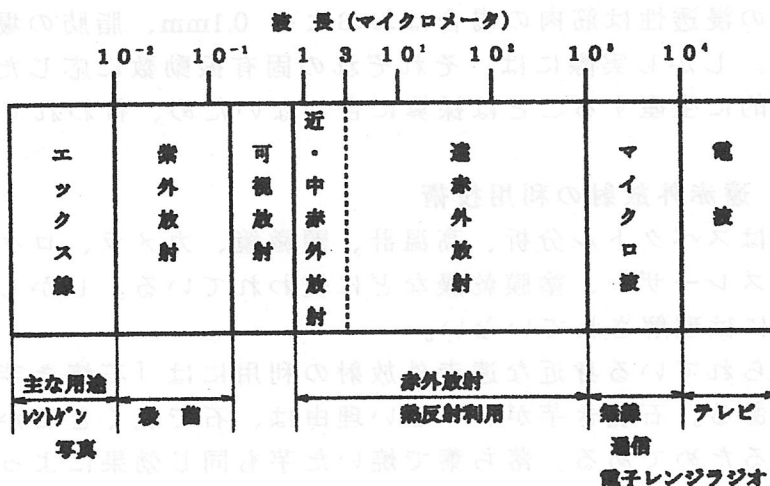


図 7. 9 電磁波のスペクトル

赤外放射はテレビやラジオの電波、電子レンジに利用されているマイクロ波、紫外放射やX線などと同じように電磁波の一種である。波長は、図7.9に示すように0.74～1000マイクロメートル（740～10⁶ナノメートル）の範囲で、可視放射とマイクロ波の中間に位置している。さらに赤外放射は近赤外放射、中間赤外放射、遠赤外放射に区分されている。波長0.74～1.5マイクロメートルまでを近赤外放射、1.5～3マイクロメートルを中間赤外放射、3～1000マイクロメートルを遠赤外放射と呼んでおり、可視放射の波長と比べるとかなり長い。

7. 4. 3 人間の身体は熱吸収体

人体は特定の波長、つまり遠赤外放射に対して吸収体である。別の言い方をすれば、ほとんどすべての有機物は、遠赤外放射の波長領域で「吸収特性」を示す。近遠赤外放射の波長域では熱吸収特性が悪く、エネルギーは反射あるいは透過されてしまう。これに対して遠赤外放射の波長領域では熱吸収をする。熱吸収するということはエネルギー（熱放射）を吸収して、有機物の内部発熱（加熱）を誘起するため、乾燥にも有効であることを示す傍証である。

一般に金属は遠赤外放射の吸収が低いため、ほとんどを反射してしまう。とくにアルミニウムや金、銀など熱伝導率の高い材料は遠赤外放射を出さずに、反射してしまう。他方、金属やセラミックの表面に金属酸化物配合の特殊セラミックをコーティングしたものは、全波長領域にわたって遠赤外放射を放射し、この効率は95%にも達している。

有機物はそれぞれの物質により、熱に対する固有振動数をもっている。したがって有機物の固有振動数に合った遠赤外放射（エネルギー）を放射すると、もっとも熱効率の高い吸収ができる。つまり遠赤外放射の振動数と有機物の固有振動数がほぼ一致すると、共振作用によって内部で自己発熱が生じる。人体への浸透性は筋肉の場合はおおよそ0.1mm、脂肪の場合はおおよそ0.5mmある。しかし実際には、それぞれの固有振動数に応じた波長の遠赤外放射を工業的に生産することは採算に合わないため、行われていない。

7. 4. 4 遠赤外放射の利用技術

赤外放射はスペクトル分析、高温計、顕微鏡、カメラ、ロケット誘導、遠赤外放射ガスレーザー、塗膜乾燥などに使われている。しかし実態は使われているほどには理解されていない。

昔から知られている身近な遠赤外放射の利用には「石焼き芋」や「天津甘栗」などがある。石焼き芋がおいしい理由は、石で焼くと石から遠赤外放射が放射されるためである。落ち葉で焼いた芋も同じ効果によっている。つまり落ち葉の灰（セラミックの一種）から放射される遠赤外放射に起因している。遠赤外放射の効果は熱浸透性であることは前述した。通常、ナベなどで調理するときは熱伝導（伝達）、あるいは熱対流によって加熱される。これ

は表面から内部に向かって熱が浸透していくことによる。

しかし石焼き芋の場合は、芋の表面が加熱されるのと同時に、内部も加熱される。皮が焼けると、内部も焼きあがっている。電子レンジの原理もこれと似たような現象が生じている。つまりマイクロウェーブを利用したものである。原理は水分子の摩擦（振動）により電磁エネルギーが熱エネルギーに変化し、物質に吸収されて加熱する。熱の発生は内部が主である。そこで遠赤外放射について整理してみると、

- 1) 遠赤外放射の熱の伝わり方は「熱伝播」である。空気中であっても、空気を暖めることなく、光のように物質に到達する。
- 2) 人間やモノの「波長吸収特性」と遠赤外放射の「波長」がおおよそ一致しているため、エネルギーの反射や透過が少ない。このため、エネルギーのほとんどが物質中に「内部吸収」される。したがってエネルギー効率にすぐれていると指摘できる。
- 3) 遠赤外放射はモノの内部まで浸透する。すると遠赤外放射の振動数（波長の逆数）と、モノの振動数が一致すると共振作用が生じて、「内部自己発熱」がおきる。つまり内部と外部とが同時に温度上昇することになるため、内部と外部の温度差がきわめて小さくなる。

7. 4. 5 遠赤外放射の利用と評価法

加熱利用に関しては、以下の事実がよく知られている。

- ・電気、ガスなどを用いて遠赤外放射の放射効率の高い「放射体（表7. 1参照）」を加熱することにより、その表面からの熱放射（遠赤外放射）が出る。この熱放射が利用されている。
- ・しかし 500℃以上の温度域になると、近赤外放射の放射量が増えるため遠赤外放射の有効利用にならない。
- ・常温付近では、その温度に適した遠赤外放射を放射し、有効利用している。とくに水処理や保温繊維などが注目されている。

表7. 1 遠赤外放射の利用と評価法¹⁾

材 料	放射材料	セラミック：粉末、パイプ、板
	反射材料	天然鉱物、SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、TiO ₂ 、複合酸化物
	透過材料	カーボン、SiC、セラミックス被覆金属、高分子
加熱利用	ヒーター	各種放射型ヒーター（棒状、面状、異形）
	加熱装置	塗膜乾燥、焼き付け、各種乾燥、食品加熱、
	温熱器具	生体温熱治療、サウナ、殺菌、集熱センサー
常温利用	温熱衣料	常温域における作用・効果？
	熱成鮮度保存	熱的作用・効果？
	抗菌防臭	人体生理に対する効果？
測定評価	放射吸収特性	分光放射・分光反射・分光吸収スペクトル
	評価 効果認定	積分放射率、反射率、透過率、熱移動量 速度解析、分子構造、状態解析

1) 材料

材料としては放射材料、反射材料、透過材料などがあげられる。一般には放射材料としてはセラミックが使われている。形態としては粉末、パイプ、板などがある。反射材料としては天然材料から生成されたものが多くSiO₂、Al₂O₃、TiO₂。透過材料には複合酸化物やカーボンなどを薄くコーティングしたものがあ

2) 加熱利用

遠赤外放射利用の放射体としては、金属あるいはセラミックの表面に金属酸化物を配合した特殊セラミックをコーティングしたものが多用されている。電気やガスで放射物を加熱することにより、放射体表面から遠赤外放射を放射することができる。ヒーターに各種あるが棒状、面状、異形放射体などがある。このための加熱装置としては塗膜乾燥、焼き付け、各種乾燥、食品加熱などがある。加熱装置としては生体温熱治療、サウナ、殺菌、集熱センサーなどがつくられ、利用されている。

3) 常温利用

常温域での遠赤外放射の効果については不明な点が多い。たとえば、かいわれ大根の生育速度が歴然と異なったり、パンの発酵時間が大幅に短縮されるなど遠赤外放射が水に何らかの作用を及ぼすことが報告されている。この原因を「水が活性化される」と解析している報告がある²⁾。

これによると、「外部から遠赤外放射、磁力、音響など何らかのエネルギーを与えると、水の酸素と水素の結合角がわずかにずれることにより水の活性力が増し、外部から酸素、窒素などの気体分子を取り込む力が現れ、総合的に活性化された水になる」と説明している。水分子は正常（安定）状態では酸素原子1個、水素元素2個からなり、この原子間のなす角が104°31'である。そこに上記したエネルギーを与えると、O-H結合がわずかにずれる。このように分子内結合は完全ではなく、不完全な状態が「活性化状態」である。不安定であるということは、外部から酸素や窒素などの気体分子を取り込み易くする。つまり遠赤外放射を放射することにより、「溶存酸素が増える」ことに起因していると考えられる。

さらに水を遠赤外放射処理すると、図7.10に示すようにpH7からpH8.3の弱アルカリ（アルカリイオン水）になると報告されている。もちろん、この遠赤外放射体は熱源不要である。

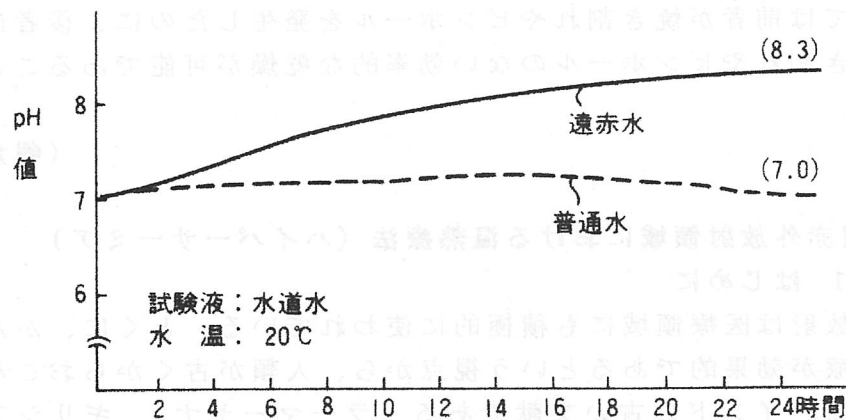


図7. 10 遠赤外放射による水道水 (20℃) 処理²⁾

最近、温熱（保温）衣料に関しては多くの報告がある。具体的には肌着、靴下、サポーターなどの繊維製品が多く出回っている。通常は遠赤外放射加工を施した繊維で製品をつくる。しかし繊維の保温効果は素材、織り、糸の太さ、厚みなどトータルで効果の差となって表れる。また繊維にセラミックを練り込んだ製品も開発されている。㈱クラレが開発した遠赤外放射ポリエステル繊維「ロンウェーブ」は、260℃で溶かしたポリエステルのなかに粒径1μm以下の特殊セラミックスの微粉体を練り込んで紡織したものは、通常のポリエステルに比べ0.5～0.8℃ほど暖かい³⁾。

4) 測定評価

高温域での遠赤外線については分光放射、分光反射、分光吸収スペクトルなどから放射吸収特性を、さらに積分放射率、反射率、透過率、熱移動量などから評価されている。しかし常温域の遠赤外放射は適当な評価手段がなかった。サーモグラフィという計測手段があるが、遠赤外放射の量を直接測るものではない。温度上昇分を間接的に計測する温度計である。対象物の温度分布を面全体としてとられることができ、しかも温度分解能が0.1℃の高性能製品がある。これによれば使用前後の変化を瞬間的に捉えることも可能である。

5) 遠赤外放射製品

遠赤外放射の製品は数多くある。健康製品から工業用まで幅広く使われている。従来のニクロム線ヒータでは近赤外放射しか放射しない（身体の表面部のみしか暖かくなならない）のに対して、カーボン製発熱体からは遠赤外放射が放射していることが確認されている。遠赤外放射によると30～40mm程度の深部まで温める効果があり、神経痛や筋肉痛などの緩和効果が報告されている。

ウレタン塗装の乾燥時間について比較したケースである。シーズヒータの場合には炉内温度が90℃、乾燥時間が40分かかっていた。これに対して遠赤外放射セラミックヒータを利用すると入り口温度110℃、出口温度

80℃で、5～10分で乾燥が可能である。つまり30分以上の時間短縮ができた。ましては前者が焼き割れやピンホールを発生したのに、後者は厚い塗膜でも、焼き割れやピンホールのない効率的な乾燥が可能であることが証明されている。

(朝倉健太郎)

7. 5 遠赤外放射領域における温熱療法 (ハイパーサーミア)

7. 5. 1 はじめに

遠赤外放射は医療領域にも積極的に使われている。とくに、がんの治療には温熱療法が効果的であるという視点から、人類が古くからおこなってきた治療である。インドの古い文献である「ラーマーヤナ」、ギリシアのヒポクラテス(400B.C.)やローマのガレン(200B.C.)などの記録がある。「手当て」なども温熱療法の一種であると考えられている。

悪性腫瘍の患者がインフルエンザやマラリア、さらには丹毒(傷口から連鎖状球菌が入り、急性の化膿性の伝染病)にかかって「発熱」した後にがん細胞が消失したという報告も多くあった。そこで平熱の体温以上になったことにより、選択的にがん細胞を殺すのに使えるのではないかと考えた先人がいた。

他方、第二次大戦後のがん治療は化学療法と、放射線治療が主体となっていた。このような時代背景から西洋医学の分野においては、欧米でも日本でもハイパーサーミアが注目されたことはなかった。1975年に、ワシントン D.C.で温熱と放射線によるがん治療についての最初の国際シンポジウムが持たれた。これを契機として欧米およびわが国でハイパーサーミアによるがん治療の新しい研究の対象として取り上げられるようになった。

装置としては新技術開発事業団(科学技術振興事業団)の研究費によって「サーモトロン RF-8」が開発され、1984年にわが国で、最初のがん治療用の医療用装置として厚生省の認可を得ている^{4), 5)}。この治療法は以下のように科学的な根拠に基づいている。

- 1) 電磁波温熱療法として1985年に新しくできた高度先進医療制度にとり入れられ、1990年からは放射線併用電磁波温熱療法が「健康保険の適用」になった。
- 2) 約25年前から臨床的に使われている科学的理論に基づいた治療法である。
- 3) 高温によって、細胞が壊死(死滅)する性質を利用している。

7. 5. 2 ハイパーサーミア(温熱療法)の科学的根拠

後述するように、がん細胞は加熱することにより死滅させることができる。ハイパーサーミアは、このための治療法である。この根拠になっているのが、人間の細胞は42～43℃を過ぎると、急激に死滅するという医学的実績である。30～60分の加温でよい。さらに放射線療法や化学療法と併用することによって、その効果を著しく高めることができる。治療の最適なサイクルは週1

回程度が普通である。一度がん細胞を加温すると熱耐性を生じ、温熱感受性が著しく低下する。このため、つぎの加温治療は3日後が望ましい。図7.

11はハイパーサーミアによる腫瘍が縮小した一例である。

医師の間でも、ハイパーサーミアは東洋医学的要素があるため十分に理解されていない。ましては一般の方にはなじみが薄い。詳細な記述は、日本ハイパーサーミア学会のホームページがあるので参照されたい⁶⁾。以上をまとめると、42~43℃の加温がコントロールできれば、がん治療として理想的と考えられている。ハイパーサーミアの研究は多くあり、科学性についても証明されている⁴⁾。

1) 正常組織に比べてがん細胞の温熱感受性が高い。一般にがん細胞は正常組織に比べてpHが低く、低pH下のがん細胞は正常細胞より温熱感受性が高い。

2) がん細胞は加温時に温度上昇する。詳細は後述するが、正常組織は加温に対して血流が増加する。通常は温熱が施されても体外に熱を放出するため、いつも一定の温度が保てる。がん細胞は加温に対して血流はほとんど増加しないか、逆に低下する。しかも冷却効果がないため容易に温度上昇する。

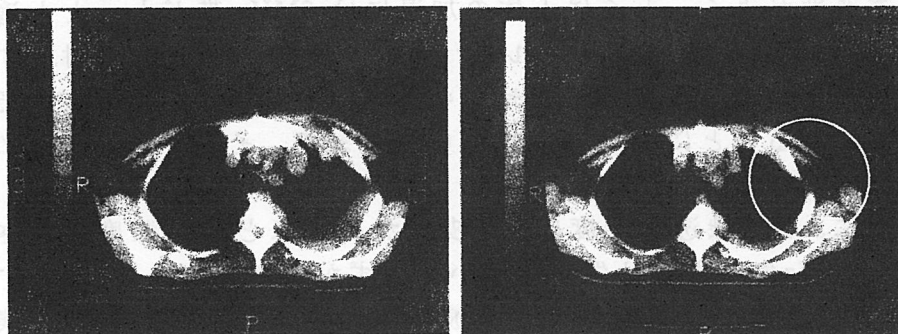
3) 放射線療法への補完。ハイパーサーミアは化学療法、放射線療法を併用した場合に、その効果をもっとも著しい。放射線療法は直接的にがん細胞を壊死させるほか毛細血管周辺など酸素分圧の高い部分に有効であるが、血管から遠い低酸素部分では効果が低い。これに対してハイパーサーミアは血管から遠いところほど温度上昇しやすい。両者は互いに補い合う効果が高い。

4) 温熱療法は制がん剤の効果を高める。

ハイパーサーミアと化学療法を併用することにより、抗がん剤の種類により抗がん作用の増強が期待できる。

5) 薬品の投与量をへらすことが可能であることから、薬剤への副作用を抑えられる。つまり副作用が低減できる。

6) 43℃までの温熱は、正常組織にとっては生理的範囲にあり問題はない。ただ加温技術によっては部分的な異常高温を生じることがあり、それが火傷や脂肪組織の硬血をまねいたりする。ほとんどのものは一過性であるが、虚弱者に対しては身体的負担が大きい。



照射前

照射後

図7. 11 ハイパーサーミアによる腫瘍の縮小例¹⁾

7. 5. 3 正常組織とがん細胞の温感感受性

身体の表面に熱が伝わると血管は拡張し、血流が増える。通常は、前述したように体外に熱を放出するため、いつも一定の温度が保てる。しかし悪性腫瘍（がん）の中を通る血管は、正常な組織とは異なり、熱が伝わっても拡張しない。このため熱がこもり、患部が高温になる。そして細胞の温度が42℃以上になると壊死する。

このように温熱に対して正常組織とがん細胞では、「致死感受性」に著しい差異が認められている。正常組織の血管は加温することにより拡張し、44～45℃程度まではほぼ直線的に血流が増加する。がん組織の血流はほとんど増えずに、42～43℃を超えるとむしろ減少する。

何度の言うようにがん細胞を43℃以上、正常組織を45℃以下に保てば、がんを選択的に殺傷（壊死）することができる。このようにハイパーサーミアは、加温によって両組織の血流量の差異が生じることを利用している。またハイパーサーミアと放射線療法、化学療法などを併用することにより、放射線抵抗性の腫瘍の感受性を上げることが期待できる。

7. 5. 4 ハイパーサーミア用加温装置

熱が体内深部に浸透し、内部で発熱することが器具（装置）としての具備条件である。ハイパーサーミア装置としては以下のものが実用化されている。またマイクロ波や超音波などの試作が試みられているが、その限界や問題点も指摘されている。たとえば、マイクロ波はエネルギーが体の表面や浅い部分に集中して吸収され、深部までは到達しないとか、温度分布が不均一になりやすいなど、その適用部位は限定されている。

1) 電磁波ハイパーサーミア

周波数の違いによりRF（Radiofrequency；誘導型）とマイクロ波（照射型）に分かれている。日本では誘導型をはじめとする外部加温法が主流である。体外より電磁波を照射すると、組織内のイオンは800万Hzで回転、振動する。このため摩擦熱を発生する。これは組織自体が「自己発熱」をおこすためである。身体の表面から深部まで一様に加温される。

電磁波を用いて加温を行うが、使用する周波数によって特性は異なる。RF波は透過性がよく、とくに人体の加温には8MHz帯がもっとも適している。サーモトロン・RF8と命名されたハイパーサーミアは、相対向する平板電極の間に加温する部位を介在させるキャパシティブ方式。対向する電極を大小組み合わせることによって浅部から深部まで、それぞれの病巣の深さに合わせた選択的な加温を可能にした。

電磁波による組織透過深度は、周波数が高いほど透過深度が小さい。たとえば、①1GHzの高周波は生体表面からわずかに2～3cmしか加温できない。②10MHzの比較的低い周波数では、波長が長いためエネルギーの集束が難しい。

2) 超音波ハイパーサーミア⁶⁾

遠赤外線分野とは異なるが、超音波を用いたハイパーサーミア技術は浅部から深部までの領域を加温できる装置として注目されている。この装置は適用部位に応じて、出力する超音波の周波数を選択することが可能であり、セカンダリーボラスを使用することによって患部との密着性を改善している。このように超音波では治療が困難とされていた部位に対しても、有効な治療が行なえるようになってきている。超音波ハイパーサーミア装置を図7. 12に示す。①直径5.5cmで、曲率半径13cmの凹面型圧電振動子が4個配置され、②各振動子の軸が1点で交わる、③共振周波数は800kHz、④集束領域：深さ2cm、横方向6mm、さらに振動子と体表面の距離を変えることで、目的の深さに熱発生の最大値が移動できるなどの構成要素がある。

超音波ハイパーサーミアによる臨床試験の一例(肝臓がん)について述べる。現在、肝左葉外側区に8cm大の腫瘍、腫瘍部分の温度が43℃になるように超音波を約60分(1回)照射、合計6回照射し、放射線治療(40GY)を併用したところ、治療前に比べて腫瘍が縮小、もしくは腫瘍が壊死したことを示すX線吸収領域が確認されている。

本装置は、電磁波(マイクロ波、高周波)を用いる方法に比べて、高い集束性と浸透性をもち、身体の表面を温めることなく、深部の局部腫瘍(がん)だけを無浸襲で温めることができる。とくに音響インピーダンスの大きく異なる境界に適すると報告されている。特徴は、①空気/軟組織、骨/軟組織界面などで強い反射や屈折がおきる、②肺や消化器などのようにガスの多い部位や骨のある領域は困難。具体的な治療対象部位は表在性腫瘍、乳房、腹部臓器などが最適である。

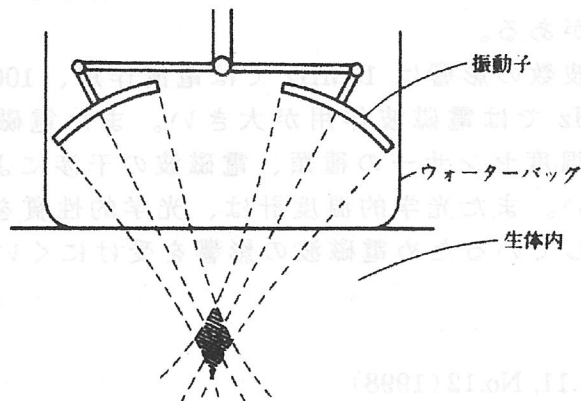


図7. 12 超音波ハイパーサーミアの構造⁶⁾

7. 5. 5 加温性能評価指標⁷⁾

ハイパーサーミア用加熱装置の加温性能評価の指標には、SAR(Specific Absorption Rate)が広く利用されている。SARは単位質量当たりの電磁波エネルギーの吸収量であり、(1)および(2)式で表されている。また電磁波(RF波)による外部加温法は周波数によって異なり、100MHzが境となっ

ている。

・低い周波数（100MHz以下）

低い周波数帯では、①電流として作用する。②電気抵抗によるジュール熱により発熱。脂肪などの電気抵抗の高いところは加温され易い。

・高い周波数（とくに1000MHz以上）

高い周波数帯では、①波動として作用し、体内に浸透する。②組織の電気損失によりエネルギーを失い発熱する。

1) SAR（エネルギー吸収効率）

エネルギー吸収効率は、SAR(Specific Absorption Rate)として(1)式で評価されている。

$$SAR = \sigma |E|^2 / (2\rho) \quad (\text{W/kg}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし σ ：媒質の導電率(S/m)、 $|E|$ ：電界の振幅(V/m)、 ρ ：媒質密度(kg/m³)とする。あるいは(2)式で表すことができる。

$$SAR = |J|^2 / 2\rho\sigma \quad (\text{W/kg}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし J ：電流密度、 ρ ：組織の密度、 σ ：組織の伝導率で表す。脂肪と筋組織の導電率は、筋組織のほうが大きい。したがってSARは脂肪の方が大きくなり、筋組織より発熱・加温されやすい。

2) ハイパーサーミア用ファントム

生体の加温現象をシミュレーションするには、生体に近い模擬材料（生体）を用いることが重要である。この模擬生体をファントムという。RF用（8～13.56MHz）ファントムは生理食塩水と寒天が広く使われている。マイクロ波用（430、925、2450MHz）ファントムは主として寒天が使われるが、筋肉と等価な誘電率を実現したものには、生理食塩水とポリエチレン粉末にゲル剤を混入したものや、炭素やグラファイトの粉末をパラフィンや樹脂で成形したものなどがある。

人体に対する周波数の影響は10MHzでは電流作用、100MHzでは電流＋電磁波作用、3000MHzでは電磁波作用が大きい。また電磁波加温における温点（Hot Spot）は温度センサーの種類、電磁波の干渉によっても温度分布が不均一になるやすい。また光学的温度計は、光学的性質を利用した光ファイバーをリード線としているため電磁波の影響を受けにくいなどの性質がある。

（朝倉健太郎）

参考資料

- 1) TRIGGER : Vol.11, No.12(1998)
- 2) 江川芳信：ここまでの遠赤外線、人間と歴史社、(1988)
- 3) 平松憲二（クラレ）：私信
- 4) 百万遍ネット：<http://www.taishitsu.or.jp/hyperthermia/index.html>
- 5) 日本ハイパーサーミア学会：<http://www.gakkai.net/JSHO/index-j.html>
- 6) 佐野孝之、高村祥司、丸目 尚、高山直彦、竹村國彦；島津評論 51 [1、2] (1994) pp.107-120
- 7) 伊藤公一、古屋克己、浜田リラ：金属、66(1966),pp.611-616

8. あとがき

以上、光（光放射）の人間に対する生理的影響の評価システムについて研究・調査を行ってきた。特に、工学として進める上で重要な定量評価のための生理的指標に視点を置きながら調査を進めてきた。

光環境設計を行う上での必要な知識は、光の人間に対するいろいろな影響の内容についてであろう。中でも、光環境の“快適性”を高めるという観点から見ると、光の生理的影響についての知識が重要であろう。そして、これらの諸知識を環境設計に活かすとすれば、生理的影響の評価、特に定量評価が充分に実施されることが必要となる。

表8. 1に、光の社会における機能と重要性をまとめたものを示す。

表8. 1 光の社会における機能と重要性

区 分	内 容	機能・作用効果の例
視覚・視作業支援のための環境要素	生活環境における視覚・視作業(視感覚器官を通じての、周辺環境からの情報収集など)を支援するために不可欠な基本要素。 [不可欠のこの要素(光放射)が存在する環境のことを光環境という。]	人間の視覚支援、 動物の視覚支援
エネルギーの一種態	放射の形態により、移動・伝達されるエネルギーの実体。太陽から地球へのエネルギーの伝達は、この形態に拠っている。エネルギーの実体としての放射が生物・生体や物質に供与され、吸収されると、そのエネルギーの大きさに対応して色々な作用効果を及ぼす。	(植物の)光合成、紅葉、日焼け、変退色、光重合、光架橋、光解離、光分解、光電離、蛍光、加熱・乾燥、光加工、光治療、など
情報処理のためのメディア	人間や動物の視覚情報、動植物の受光器官への情報、および情報伝達、情報処理(情報の記録、保管、読み出し、など)、情報の加工、などのメディア。および、人間が動植物に対して応用する技術。	光周性、概日リズム、屈光性、走光性、光通信、光ディスク、写真、光複写、光コンピュータ、視覚信号、標識、標示、ディスプレイ、 視覚情報端末、発光形商業広告、など
光アート	光の持つ属性を活かした芸術および芸術作品。	レーザー・アート、ホログラフイー、蛍光材料利用壁画・ディスプレイ、光ファイバー、利用装飾品、など

また、表8. 1に示した、人間社会における光の各機能について、実際の光環境において、環境要素として使用されている光源（自然光源である太陽の光を含んでいる。）との対応をまとめたものを、表8. 2に示す。

表 8. 2 光の各機能と光源の対応関係のまとめ

区 分	機能の具体的内容例	関連の光源
1. 視覚支援の媒体	<ul style="list-style-type: none"> ○ 環境の照明 ○ 作業のための照明 ○ 安全・危険防止のための照明 ○ OA機器などの表示部の照明 	<ul style="list-style-type: none"> *太陽光。 *白熱電球、蛍光灯 HIDランプ
2. 情報処理の媒体	視器官への情報伝達支援 <ul style="list-style-type: none"> ○ 各種視覚信号 ○ 交通信号 ○ 航空障害灯 ○ 燈台 ○ 自発光形のディスプレイ ○ 電光掲示板、大形映像装置、CRT式のTVやディスプレイなど ○ 光源一体形液晶ディスプレイ 	LED、白熱電球、小形放電管(小形蛍光灯)、CRT、プラズマディスプレイ、EL、白熱電球、蛍光灯
	光を媒体とする情報処理 <ul style="list-style-type: none"> ○ 光通信 ○ 光コンピューター ○ レーザー・レーダー ○ RSによる資源探査 	LED、レーザー
3. エネルギー移動の様態	<ul style="list-style-type: none"> ○ 太陽エネルギーの地球への移動。 ○ 放射冷暖房 ○ 光化学産業 	太陽光 赤外ヒーター 大出力光化学用光源
4. 光アート	<ul style="list-style-type: none"> ○ 光による美の表現芸術 など 	レーザー フラッシュ・ランプ

実際の光環境において使用される光源は、多岐・多様に亘っており、光環境における生理的影響を論じるに当たっては、単に、光との相関を考えるだけでなく、“光源からの光”の影響として検討を加える必要があるものと考えられる。

このことは、今回実施した研究調査の、次のステップの課題であると考えられる。

(河本康太郎)

研究調査委員会報告書の著作権について

本報告書の著作権は（社）照明学会に帰属します。

複写をされる方に

本報告書に掲載された著作物は、政令が指定した図書館で行うコピーサービスや、教育機関で教授者が講義に利用する複写をする場合等、著作権法で認められた例外を除き、著作権者に無断で複写すると違法になります。

