

I-61

光力学の美観論

(株)北日本ソイル研究所 正員 中村作太郎

1. まえがき

変位,変形,振動などの光計測の進歩によつて、その測定理論も発達しつつある。しかし光力学としてまとめられた理論体系はまだ出来上つていないし、量子力学との関連についてもまだ追求されていない。そこで光力学の位置づけをするため、全般的力学の分類表を作つて見る。

表 一 1 固 体 力 学
材 料 力 学
構 造 力 学
弾 ・ 塑 性 力 学

表 一 2 流 体 力 学
水 力 学
空 気 力 学

表 一 3 土 質 力 学
土 壤 力 学
地 盤 力 学
岩 盤 力 学

表 一 4 生 物 力 学
動 植 物 力 学
微 生 物 力 学

表 一 5 人 間 力 学
人 体 力 学
心 理 ・ 精 神 力 学

表 一 6 建 造 力 学
造 船 力 学
航 空 力 学
軌 道 力 学
橋 梁 力 学
建 築 力 学

表一1は固体力学,表一2は流体力学,表一3は土質力学,表一4は生物力学,表一5は人間力学,表一6は建造力学,表一7は光熱力学である。上述のとおり、光力学は熱力学,量子力学とならぶ配列にあり、その中でも光力学は電磁波光線により測定する光の計測理論と波長の大小,レーザー光の放出などによる応用研究によりミクロの発達を遂げるものと思う。また光力学を更に分類すると、光の古典理論,光の実験的量子力学になる。

表 一 7 光 熱 力 学
熱 力 学
量 子 力 学
光 力 学

The Beauty Theory of Ray Mechanics
by Sakutaro NAKAMURA

2. 光力学の歴史的変遷^{1) ~ 3)}

透明で均一な組織を有する弾性体に外力をかけると、結晶体に見られるような複屈折性を生じる。この現象は一時的な複屈折といわれるが、これを最初に発見したのはイギリスのSir David Brewster氏(1816)で、ガラスを使つて圧縮、曲げなどの実験を行つている。この応力測定の研究はきわめて独創性に富んでおり、その後の物理学者達の研究によりその起因をも見出されるようになった。

また常光線および異常光線の性質については、A. Fresnel, F. E. NeumannおよびJ. Kerr氏等が貴重な研究成果を発表し、F. PockelsおよびL. N. G. Filonの両氏は光弾性係数(stress optical coefficient)と光波長との関係を見出し、両者は互いに独立するという従来の論説を覆えた。弾性限界を越えた場合の応力と光波位相差との関係については、E. C. NeumannおよびK. C. Chakko氏の重要な研究報告があり、L. N. G. Filon氏はこれに対し更に精密な研究により、直線関係の一般法則を発見した。またF. E. Neumann氏はこの問題を数学的に取扱い、微小変形を仮定した古典理論から複屈折の主応力差との比例関係を導いた(1841)。これはBrewsterの法則といわれるもので、J. C. Maxwell氏もまた独立にこの関係を誘導している。

その後結晶光学の立場より、P. P. Ewald, W. L. Braggの両氏およびK. F. Herzfeld氏等は、理論的立場より重要な論文を発表している。またE. G. Coker氏が試験片として用いたガラスの代りにセルロイドを用いてからは、この物理現象が工学の各分野に広く利用されるようになった。

光弾性学においては、主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ を測定することが可能となつたが、フランスのA. Mesnager氏がE. G. Coker氏に対し、 $\sigma_1 + \sigma_2$ の測定による解析法を指示したのである。またL. N. G. Filon氏には図式積分法による純光学的の計算法を指示し、現在における最も合理的方法として広く用いられるようになった。その後光計測としては、モアレトポグラフィ、ホログラフィ干渉法による測定のほか、シエアリング干渉法等が変形、変位、振動などの計測にも用いられるようになりつつある。

量子論の初めは1900年にドイツの物理学者Planckが発表した量子仮説とされており、「量子」はラテン語のquantumを意味するが、物理量の不連続的な表現に用いられる。最初Bohrの水素原子模型に代表されるように、古典力学のNewtonian mechanicsやMaxwellの電磁気学を用いて現象の説明に努力したが、古典理論では役に立たず、量子力学の体系されたWave mechanics(波動力学)を用いることとなつた。また量子力学は粒子と波動の二重性を定式化した理論で、熱放射、ボーアの原子模型、不連続なエネルギー状況の実験的証明、光電効果、コンプトン効果、ド・ブロー波と電子回折等が観測されるようになった。

3. 光の古典理論^{1) ~ 3)}

光の量子力学は原子や原子核の系を取扱う理論で、古典物理学(Newtonの力学, Maxwellの電磁気学)から発展したものである。

Newton 力学としての運動法則は、 $(力) = (質量) \times (加速度)$ (1)

またMaxwell の方程式は、

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2\right) E(x) = 0, \quad \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2\right) B(x) = 0 \quad (2)$$

光の典型的な波は次式によつて示される。

$$\exp[-i(\omega t - k \cdot x)] \quad (3)$$

$$\omega = |k| c \quad (4) \quad \text{ここに、}\omega: \text{角振動数, } k: \text{波の基本物理特性を示す数値, } c: \text{速度}$$

Lorentz の法則は次のように示される。

$$E: \text{電場, } B: \text{磁場, } v: \text{速度 とし、} F(x) = e[E(x) + v \times B(x)] \quad (5)$$

4. 光の量子力学論⁴⁾～6)

光については古典理論によつてすべてを説明することは出来ず、原子の諸現象や光子の波動性問題、離散的なエネルギー問題などについては、実験的確認の範囲において研究が進められている。

(1) 輻射の粒子性とPlankの仮説

古典力学の破綻は黒体輻射現象に現われ、電磁波と物質の間のエネルギー交換の熱力学に関連しており、角振動数 ω の光は物質に吸収されたり、物質から放出されたりする。

またPlanckの仮説は(6)式で示され、エネルギーEは(7)式で表示される。

$$h = 2\pi\hbar = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec} \quad (6)$$

$$E = \hbar\omega \quad (7)$$

粒子(光子)のエネルギーと運動量の間の相対論的關係式は(8)式で示される。

$$E^2/c^2 = p^2 + m^2c^2 \quad (8)$$

光子では、 $m=0$ であるから

$$p = E/c \quad (9)$$

そこで、(4)、(7)、(9)の方程式から光速 c を消去すれば、(10)式が得られる。

$$\begin{aligned} E &= \hbar\omega \\ p &= \hbar k \end{aligned}$$

(10)

$\hbar\omega$ が W より大きければ、電子は運動エネルギー T をもつて放出されるから(11)式を参照されたい。

$$\hbar\omega = W + T \quad (11)$$

また輻射そのものの粒子性は電子によるX線の散乱に最も明確に見られる。これCompton効果といわれている。

運動量の保存則によれば、

$$p_1 = p_2 + p_e \quad (12)$$

図-1 は運動量 p_1 の光子が静止している電子に衝突し、電子は反跳 p_e を受け、光子は運動量 p_2 になるときの図を示したものである。また式(13)～(16)が次のとおり表示される。

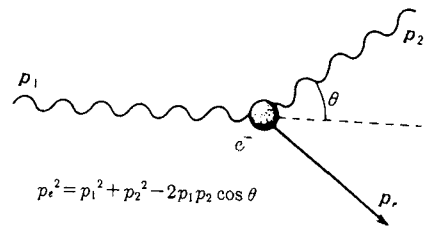


図-1 光子-電子衝突を表わす図

$$p_1 + mc = p_2 + \sqrt{p_e^2 + m^2c^2} \quad (13)$$

$$mc(p_1 - p_2) = 2p_1p_2 \sin^2(\theta/2) \quad (14)$$

$$\lambda = \hbar/p \quad (15)$$

$$\lambda_2 - \lambda_1 = 2\lambda_e \sin^2(\theta/2) \quad (16)$$

λ は Compton 波長とよばれ、(17)式によつて示される。

(2) 物質の波動性と de Broglie の仮説

上述した輻射の粒子性と全く相補的な現象が Germer(ガーマー)の実験において見られたといわれている。またBroglie波は(18)式によつて示される。

$$\lambda_e = \frac{\hbar}{mc} \simeq 4 \times 10^{-13} \text{ m} \quad (17)$$

$$\exp[-i(Et - p \cdot x)/\hbar] \quad (18)$$

Davisson-Germerの実験より前に、de Broglieは輻射の粒子像と波動像を関連づける式(10)は電子にもあてはまることを示した。

(3) 離散的エネルギー準位とBohrの仮説

電子の運動の解析に古典概念を適用出来ないことは、水素原子の問題で最も明確に現われており、Balmer(バルマー) はすでに 1885年に (19) の実験式をみ出すことを見出している。

$$\omega = N \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n=3, 4, 5, \dots) \quad (19)$$

$$\text{電子のもつ角運動の大きさ } l \text{ は, } l = n\hbar \quad (n=1, 2, \dots) \quad (20)$$

$$\text{また 輻射の角振動数 } \omega_{nn'} \text{ は (21) 式によつて示される。} \quad \hbar\omega_{nn'} = |E_n - E_{n'}| \quad (21)$$

次に Coulomb の引力を動径方向の加速度と結びつける運動方程式は、(22) 式によつて表示される。Bohr の条件、半径の大きさ、角速度の値は、(23), (24), (25) 式によつて示される。

$$\frac{e_M^2}{a^2} = maw^2 \quad (22)$$

$$ma^2w = n\hbar \quad (n=1, 2, \dots) \quad (23)$$

また離散的なエネルギーの値は、(26) 式により示される。(24) で定義される基本的の長さ a_0 は最も小さい Bohr 軌道の半径である。

$$a_n = \left(\frac{\hbar^2}{me_M^2} \right) n^2 \equiv a_0 n^2 \quad (24)$$

なお(21) 式による輻射の可能な角振動数は (27) 式により表示される。

$$\omega_n = \frac{me_M^4}{\hbar^3} \frac{1}{n^3} \quad (25)$$

5. 光力学の視感覚美観 ^{4) ~9)}

(1) 構造美観哲学

風景美と人類とのふれあひは、古代より現代に至るまで延々と続いており、古代のロマンテツクな美から未来の科学的美観の夢まで渡つて

$$\left. \begin{aligned} E_n &= \frac{m}{2} a_n^2 \omega_n^2 - \frac{e_M^2}{a_n} \\ &= -\frac{me_M^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2} = \left(-\frac{1}{2} \frac{e_M^2}{a_0} \right) \frac{1}{n^2} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

いる。構造景観美は、構造力学的安定美を調和・創造して行くところに生れるものと思う。土木系構造物の美観を論じるにあたり、その構造美観の基本的原論と地域景観論について考察してみる。

土木系構造物は天然自然の環境の中に造られるものであるから、自然の景色の中に融合させることが第一条件であると思う。次には自然の風景と構造物の景観が互に歩みよつて融和することが第二の条件になると思う。また大構造物が主流となる地域環境においては、新しい環境創造が必要であり、これが第三条件と考えられる。

土木系構造物の建造に際し、力学的の構造美観の重要なことは昔もいまも変りはないと思うが、古代人と現代人とはいささかその美観内容に違いがあり、力学的美感覚の科学上からみた吟味が必要である。特に構造力学を専門に勉学した者と全く未知の者とは、力学的美感覚に著しい違いがあると考えられる。古代人は建造した構造物に対し、長い間の経験と実績からロマンテツクな力学的美観を体ごと直感したが、近代人は色々の要素を内に秘めた繊細な力学的美観を科学的のマイクロセンスとして受けとめている。

現在、土木系構造物の設計においては、構造力学の計算を行い、安全度を確認した上で美観の評価を行つている。しかし設計計算を行う前に美観のデザインに関し、視野を広くして研究すべきである。パークリイ氏は視覚空間とその他の知覚空間を別個のものとして取扱つているが、カント氏が考えていたように同一空間とした方が精神力学的論理からすればより適当であると思う。

力学的安定度の高い構造体と不安定領域の構造体では、その美観評価に関し微妙な差異があり、そ

の領域付近の美観感覚については、新しい評価方法の検討・研究が必要と思われる。

(2) 光力学の科学的美観^{1), 5), 6)}

各種の光計測として、長さの計測、形状の計測、光プローブ法(臨界角法、非点収差法、ナイフエッジ法、ヘテロダイン法)、三角測量法、光切断法、干渉法、モアレトポグラフィ法、ホログラフィ干渉法、ステレオ法、オートコリメーション法、シエリング干渉法などがあり、また変位、変形、振動の計測として、ホログラフィ干渉、ホログラフィ振動解析、スペックル法、モアレ法等がある。

そのほか、速度、温度、圧力の計測として、ドップラー計測、信号処理、光ファイバセンサなどの計測があり、光回折による欠陥検査、散乱による欠陥検査その他のほか、光音響映像法、SLAM法等がある。

以上の光計測などで得られたデータを用い、情報処理技術の酷使によつて各種の縞解析を行えば、力学的に面白い成果が得られる。自動縞解析法としては、処理手順、デジタル画像処理法、縞ピーク追跡、画像処理ソフトウェア法などの適用によつて画像美の追求を行いたいものである。また、光の古典理論、量子理論の調和により、画像美観の極限を探研したいと思つている。

(3) 宇宙空間の多次元的美観⁴⁾

空間と時間は互に独立しており宇宙空間と時間は一体の中にありながら、別個に理解されて来たが特殊相対論によつてこの考えは打破られてしまつたのである。宇宙空間の時間性については、正しい世界点指示表現によらなければならない。世界点の指示は (x, y, z, t) で、 (x, y, z) は空間位置の指示と見えるが、世界線の指示が正しく、 (x_0, y_0, z_0, t_0) として表示しなければならない。 (x_0, y_0, z_0) は、実のところ (x_0, y_0, z_0, t) の t を変数とする世界線を指示しているのである。そして t に特定時刻 t_0 を指定することによつて世界点 (x_0, y_0, z_0, t_0) の指示が得られるのである。

我々のとり扱う時空四次元は、空間と時間との組み合わせではなく、先に時空四次元があつて、その中でのみ空間と時間の分別があるのである。すなわち物理現象の時間表示も世界点指示の中においてのみ成立つのである。我々の取り扱う視覚風景は光速度が有限であることによつて過去透視になり、これを世界点を使つていい直すと、視覚風景には過去世界点が露出していることになる。

また視覚風景が四次元あるいはそれ以上の多次元の美観を表示出来るとすれば、知覚風景の中で幻の存在も肯定出来ると思うし、視覚風景と触覚風景との整合対応も可能であると思う。

最近科学技術の著しい進歩により各種の光計測方法が開発され、特種の力学的縞模様が画かれるようになり、内面に秘められた力学的美観を評価出来るようになって来た。これは四次元および多次元のコンピュータ・グラフィックスによる画像処理能力の向上によるもので、今後新しく建造される土木系構造体の美観に関し、光力学を主流とする研究を開発したいものである。

(4) 心理力学的美観

人類は古代より現代に至るまで平和で豊かな生活を営むためには、天然自然の風景に調和し、川、山、家、人、動植物などとの触れあいによる風景構成を行つて来たのである。美観構成の基本は太陽から発する光であり、風景美観はその光により心に映じるのである。また光計測の場合も光の間接的の応用で、力学的美観のマイクロ・メカニズムとして評価出来ると思う。

人間は体と心が一体となつて、その底に Black Box が図-2のように画かれ、風景構成と投影を対象させて美の創造を生むのである。

心理学上部分的に安定し、局部的バランスのとれている美を局部的安定美といい、心理学上部分的にも不安定で、局部的バランスの欠けている場合を美の崩壊といつている。また全体的にバランスのとれている美を全体的安定美といい、全体的にバランスのとれていない場合を異状美といえる。

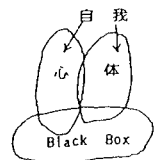


図-2 心と体の一体

(5) 各種の力学的縞模様とその美観

各種構造体の模型実験において、モデルの変位、変形、振動その他の測定法が開発され、非接触でも高感度の測定が可能となつた。光弾性実験では各種の二次元モデルの等色線縞、等傾線縞などのほか、三次元モデルの各種縞に近代的の力学美観を感じさせられる。またモアレ法としては、各種の力学的モアレ縞に直感的の力学美観を感じるし、フイゾー干渉計測定、ホログラフ干渉計測定による縞模様にも力学感あふれる独特の近代美観を感じさせられる。そのほか量子力学としての局部的縞模様も求められると思うので、この方面の研究・開発にも力を注ぎたいと考える。

6. あとがき

(1) 人間の知覚と触覚

パークリイ氏が純粋視覚を追求したのは有名な話であるが、人間生活にとつて最も基本的なものは触覚であるといわれている。確かに人間という生物が生きて行くためには触覚が基底となり、それからあらゆる知覚が発達したものと見られる。その中でも特に視覚空間の次元として、視覚的直(一次元)、視覚的平面(二次元)、視覚的立体(三次元)、視覚的多次元(四次元、五次元それ以上)を確認する手段として触覚その他の知覚を用いることが肯定出来ると思う。

(2) 風景美の創造と崩壊

風景美の基本は自然美であり、自然美の始まりは森羅万象の摂理による視覚美より構成されている。また視覚美を主流とする風景美にも、聴覚、嗅覚、味覚、触覚、第六感覚等の生む快感美も関与すると考えられる。風景美は心理力学的バランスのとれたときに生じる快感で、アンバランスのときには不快感が残るだけで美は感じられない。風景は人間とのふれあいとして、我々の回りに川あり、田あり、道あり、草木あり、花あり、家あり、人あり、動物あり、石や洞窟ありであつた。このようなアニミズムの世界が風景そのものであつた。また心理的アンバランスのときにも風景の崩壊が生じ、人間と風景とのふれあいは古代より続いている。

(3) 光力学の古典理論と量子理論との調和

光の古典理論は時の流れをくむ神秘的な美の配列によつて創造され、未来に向けてのロマンテツクな美観構造体を開発して行かなければならない。また量子理論によるマイクロ・メカニックスの成果を古典理論に導入し、古、新の融合・調和によつて新しい構造美観を開発したいと思つている。

謝 辞

本研究論文を作成するにあたり、下記の文献に負うところきわめて多く、その著者、発行機関などに対し心から感謝の意を表する。

文 献

- 1) 中村作太郎：土木構造物の新構造美観論，個人出版（1990）。
- 2) 辻二郎，西田正孝，河田幸三：光弾性実験法，日刊工業新聞社（1977）。
- 3) 西島和彦：力学系の自然法則，産業図書（1980）。
- 4) 大森荘蔵：新視覚新論，東京大学出版会（1986）。
- 5) P. T. マシユーズ著，藤井昭彦訳：初等量子力学，培風館（1992）。
- 6) 榎藤靖夫：量子力学概論，コロナ社（1993）。
- 7) 好村滋洋：光と電波，培風館（1990）。
- 8) 谷田貝豊彦：応用光学—光計測入門—，丸善（株）（1988）。
- 9) 藤井陽一監修：光ファイバ利用技術，（株）アグネ（1985）。