

III—5 生物学に対する物理学のアプローチ

5-1 生物学と物理学 岡 小天 (都立大・理・物理)

1. 生物の定義

i) 細胞より成る, ii) 個体性, iii) 代謝, iv) 成長, v) 刺激を感じ反応する, vi) 増殖, vii) 適応, 合目的性, これらは生物であることの判定条件とはなり難い, 生命は定義できない, Pirie, 生物の多様性, ウイルス, 生物と無生物の境, 地球外生物

2. 生物学が物理学の発展の動機となった例

- i) 生物電気——Galvani (1786) のカエルの実験, Volta (1799) の電池の発明
- ii) ブラウン運動——Brown (1837) 花粉のブラウン運動, Einstein (1905), Smoluchowski (1908), Perrin (1908), Wiener (1930), Theory of Random Functions, Schrödinger (1931), Fürth (1933)
- iii) 管内の血液の流動——Poiseuille (1842~46), Hagen (1839), Wiedemann (1850), Hagenbach (1860)
- iv) 静脈血の色——Mayer (1842~45), エネルギー保存の法則
- v) 筋肉内の熱の発生——Helmholtz (1847), エネルギー保存の法則, 生物界にも適用, 聴覚, 3 原色説, 血液の運動から流体力学へ, 渦定理
- vi) 細胞膜の半透性——Pfeffer (1877) による浸透圧の測定, van't Hoff (1887) の式
- vii) 動物軟組織の熱弾性——Wöhlisch (1926), ゴム弾性の本質はポテンシャル的でなく kinetic, Mayer, Guth, Mark (1934), Kuhn (1934), ゴム弾性の統計理論, 高分子物理学の最初の礎石

3. 物理学や物理的測定技術が生物学の発展に寄与した例

- i) 光学けんび鏡——Leeuwenhoek (1682) 微生物の発見, Hooke (1665) 植物細胞を発見, Abbe の収差論, Zeiss のけんび鏡, Schleiden (1838) 細胞説, Schwann (1839) 細胞説, 紫外線けんび鏡, 蛍光けんび鏡, 位相差けんび鏡, Zernicke (1955), Zeiss の試作 (1941), 生きたバクテリアの観察
- ii) 電子けんび鏡——de Broglie (1923), G. P. Thomson (1927), 電子の波動性, 電子けんび鏡, 生体組織の微細構造, ウイルス, 電子回折
- iii) X線——Röntgen (1895) によるX線の発見, 透過写真—病気の診断, 微小生物のX線写真, 回折像—生体組織, ウイルス, 生体高分子の構造, Perutz, Kendrew
- iv) 同位体 (アイソトープ)——Hevesy (1923), RaD (Pb の同位体), 植物体内における Pb の吸収, 移動, RaE (Bi の同位体), Joliot-Curie (1934) による人工放射能の発見, Chiewitz, Hevesy (1935), ^{32}P によるネズミの P 代謝, サイクロトロン, 原子炉
- v) その他の物理的測定技術——超遠心機 (Svedberg, タンパク質, ウイルス), 電気泳動装置 (Tiselius, タンパク質), 紫外線吸収スペクトル, 可視光線吸収スペクトル, 赤外線吸収スペクトル, 偏光, 旋光分散, 光散乱, ラマン散乱, 磁気共鳴 (NMR, ESR), レーザー, 薄膜法, レオメーター (粘性, 弾性, 粘弾性)

4. 生物体の構造のいろいろなレベル

個体 (organism level)—系統 (system level)—器官 (organ level)—組織 (tissue level)—細胞, バクテリア (whole cell level)—生体膜, 細胞膜, 核 (subcellular level)—遺伝子, ウイルス, フェージ (virus-gene level)—生体高分子 (タンパク質, 核酸), 低分子 (水, 有機化合物), 原子, イオン (molecular level)—電子, 光子 (submolecular level)

5. 理論物理学から生物学へ

- i) 流体力学——Gadd (1951, ヘビ, ウナギ), 鞭毛運動 (G. I. Taylor, 1951, 1952), Hancock (1953,

Gray (1955), Gray, Hancock (1955), Lighthill (1952)

- ii) レオロジー——変形と流動の科学, ③ ヘモレオロジー (Hemorheology)——血液の活性, 降伏値, 血管内の流動, 赤血球の凝集, 赤血球の粘弾性, 血液の凝固, 凝固過程における粘弾性, 血管の弾性, 粘弾性, 脳波の伝播, リンパ液, 微小循環, ④ 生物レオロジー (Biorheology)——骨の強度, 弾性, コラーゲン, 軟組織 (筋肉, 心臓, 膀胱) の粘弾性, 椎間板の粘弾性, 水晶体の粘弾性, 原形質の弾性と粘性, 原形質流動, 細胞膜の張力, 関節液の曳糸性, 脳せきずい液, 痰の粘弾性, 子宮分泌液の弾性, 前眼房水の対流, 絹糸腺内容物の繊維化, ウナギの分泌粘液, 生体組織の圧電気, 合成ポリペプチド, 合成核酸, タンパク, 核酸, ウイルス, ⑤ サイコロロジー (Pyscorheology), Scott Blair, Psychophysics, 触覚
- iii) 熱力学——第2法則 (エントロピー増大の法則) と生物, Brillouin, 非可逆過程の熱力学, Prigogine, de Groot, 摩擦, 熱伝導, 拡散, 電気伝導
- iv) 統計力学——固体物性論, 液体物性論, 高分子物性論
- v) 量子力学——量子生物学 (Quantum Biology, Submolecular Biology)—Jordan, 生体高分子の電子状態, エネルギー移動, 発癌物質の電子状態, 光生物学 (Photobiology)—視物質, 生物発光, 光合成, 放射線生物学 (Radiobiology)—Lea, Pollard, Delbrück, 放射線の生物作用
- 6. 数学的方法の生物学への応用
 - i) 解析学——数理生物学 (Mathematical Biology) 生物の増殖, 人口の増加, 細胞内の拡散, 細胞の成長, 分裂, 神経における興奮伝導, 血管内における血液の流動, 循環, 血行力学, 動物の構造, 機能と大きさとの関係
 - ii) 確率論, 統計学 (Statistics)——個性性, 複雑な因子, 生物統計学, 帰納的推論, 特殊から一般へ, 推計学 (Stochastics), Fisher
 - iii) 情報理論 (Information Theory)——通信, 情報量, bit, エントロピー, 生体高分子のもつ情報量, DNA→RNA→タンパク質, Coding Theory, Gamow, 遺伝の情報, DNA によるタンパク合成, 酵素作用の特異性, 抗原抗体反応の特異性, 分子病 (Molecular Disease)
 - iv) サイバネティックス (Cybernetics)——自動制御, フィードバック, 動物における調節作用, ホメオステシス, 神経系, ホルモン, 血液 (pH, 水分量, タンパク質量, 血糖量, 細胞量) N. Wiener: Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine, 1948.
- 7. 物理的に見た生物の特徴
 - i) 開放系 (Open system)——物質およびエネルギーの交換, ターンオーバー
 - ii) 動的平衡 (Dynamic equilibrium)——Du Bois-Raymond, 流動平衡 (Fließgleichgewicht), Bertalanffy
 - iii) 秩序 (Order) の生成と維持——Schrödinger, 負エントロピーの摂取
 - iv) 非可逆性 (Irreversibility)——個体の発生と成長, 死, クラヴェリナの退化, 種の進化
 - v) 自動制御 (Automatic control)——フィードバック, Wiener, organized complexity
 - vi) 非線形性 (Nonlinearity)——刺激に対する応答, 閾値 (Threshold)
 - vii) 合目的性——生物と機械, 電子計算機, 記憶, 学習, Oparin
- 8. 生命に対する考え方
 - i) 万物有生論 (Animism), ターレス, スピノザ, ロビネ, ブライヤー, Whitehead
 - ii) 神の創造
 - iii) エンテレケイア, アリストテレス, 自然発生説, デカルト, ニュートン
 - iv) 生氣論 (Vitalism)——活力 (Vital force), 新生氣論 Driesch, ウエの受精卵, Entelechie, Wholism, 全体性 (Ganzheit)
 - v) 機械論 (Mechanismus)——La Mettrie (1748), Wiener (1948), 脳と電子計算機, DNA の二重らせん

模型 Watson, Crick (1953), DNA の合成 (Kornberg), RNA の合成 (Ochoa), 分子生物学, 分子の不斉, Feynman

批判: Bohr (生命と分析的方法との相補性), Oparin (生命の起原), Heitler (科学の限界, 定量化, 因果律, 極めて小さな確率で起こる現象, 全体的計画 (Gesamtplan), 唯物論と観念論)

9. 生物学と物理的科学の境界領域

生物物理学 (Biophysics), 理論生物学 (Theoretical Biology), 医学物理 (Medical Physics), 量子生物学 (Quantum Biology), 分子生物学 (Molecular Biology), 放射線生物学 (Radiobiology), 数理生物学 (Mathematical Biology), 医用電子 (Medical Electronics, ME), 生物工学 (Biological Engineering), 生物物理化学 (Biophysical Chemistry)

5-2 生体と統計力学 斎藤 信孝 (早大・理工・応物)

生体の物質的研究は生体から物質を抽出することからはじまる。その物質がどのような物性を持ち、どのような機能を果たすかが問題である。その機能は時として極めて特異的であり、また一般に調節作用をもっている。このような事情は物質のどのような性質によるのだろうか。

もちろんこれに対し一般的な答は無理である。生体の中にはさまざまな物質がある。その中で最も重要なものは蛋白質と核酸であろう。これらの物質のもつ機能を解明するひとつの武器は量子力学であるのは当然であるが、それがすべてではない。転移現象という統計力学的協力現象も大きい役をしているように思われる。この意味について考えてみたい。

先ず第一に、転移現象は極めて特異的であり、物質の個性の発現である。このことは水の沸騰点や、金の融解点などが温度の定点になっていることを考えればすぐわかる。第二に、転移点の前後で物性が急激に変化する。転移と共に新しい物性、たとえば結晶状態とか、強磁性とかの発生が伴っている。いわば新しい機能を生んでいる。第三に転移現象は調節作用をもっている。温度を 0°C に保つには氷の融解点をつかうのが便利であることをみればわかる。温度が少し上ろうとすれば氷がとけてその融解熱により、一定温度 0°C に保つことが出来る。融解熱のような潜熱を伴う転移を一次の転移という。一次の転移は自動調節の機能をもっていることになる。これに対し二次の相転移といわれるものは (例えば強磁性の転移) 潜熱がなく、この自動調節の作用はない。しかし調節作用には目標値が必要であって、転移点はこの目標値となることが出来るものである。自動調節を行なうためには目標値との差を検出しなければならないが、転移点前後の物性の大きな差を利用すればよい。それと feed back のメカニズムを別に用意しておいてくみ合せればよいのである。

生体高分子における転移の中で最もよい模範となるものは α -helix と random coil の間の転移である。この転移の性格は diffuse な一次転移である。この分子的なメカニズム、特に転移を許しているエネルギーの構造は多くの他の現象に対して示唆にとんでいる。一般に一次元的物質では、相互作用が短距離のとき、相転移はおこらない。diffuse な転移のおこる条件をしらべておくのは興味がある、ヘリックス・コイル転移では Lifson-Roig の理論によればひとつのアミノ残基がコイル状態にある確率を u , ヘリックス状態にあって、水素結合がつくられている状態の確率を w , ヘリックスの出来はじめて、まだ水素結合の出来ていない状態の確率を v とすると、diffuse な相転移のおこるのは $v \ll u, w$ のときである。高分子の内部回転と、水素結合などの短距離の力がこれを可能にしているわけである。このような事情は、もっと一般的な蛋白質の構造にもあるものと思われる。蛋白質の3次構造の安定性が、蛋白質のもろもろの性質の基礎であるはずである。

蛋白質の調節作用として注目すべきものはアロステリック効果である。最終生産物の酵素作用の調節、ヘモグロビンの酸素吸着の非結合性などの説明に使われているモデルは蛋白質が subunit からできていて、その状態に2つの異なる状態があるという考えである。2つの状態の間の転移とみることが出来るから、これも相転移の問題である。しかし現在のところ、半現象論的な取り扱いであって、転移についてのくわしいことは殆んどわかっていない。これは今後の問題であるが、本質的には3次構造の安定性の問題につながっているもので