

うか。いいかえれば、せん毛やべん毛にもミオシンとアクチンが含まれているであろうか。これに対する答えは、少なくとも今までのところ、“ミオシンとアクチンそのものは存在しないが、両者にあたるような蛋白質は共存する”とあってよさそうである。それがここにのべるダイニン (dynein) とチュービュリン (tubulin) である。

この方面の研究は、1963年に Gibbons がせん毛の新しい分画法を開発して以来飛躍的に進歩した。彼はせん毛を EDTA を含む低温濃度の液に透析することにより、ATP アーゼの大部分を抽出し、さらにこれを密度勾配遠心法で分離した。この ATP アーゼに対してダイニンの名が与えられ、せん毛の微細構造の中の腕にあたることが確かめられた。われわれがウエの精子のべん毛でえた結果によれば、ダイニンは分子量約 35 万、直径 $100\text{\AA}$ 前後の顆粒で、 Mg^{++} と Ca^{++} で活性化されるが EDTA による活性化はみられない。筋肉のアクチンとの相互作用も認められていない。

一方せん毛やべん毛からアクチンを抽出する試みはすべて失敗に終わっているが、微細構造の中にアクチンにあたるものを探すと、いわゆる $9+2$ の微小管が浮び上がってくる。分離した微小管の分析結果によると、微小管蛋白質は分子量約 5 万、直径 $50\text{\AA}$ 前後の顆粒で、アミノ酸組成はアクチンに似ている。しかし筋肉ミオシンとの相互作用の違いや、分子中に GTP, GDP を含んでいる点でアクチンとは異なっている。そこでわれわれはこの蛋白質をチュービュリンと呼ぶことにした。

せん毛やべん毛の運動には当然この 2 つの蛋白質、いいかえれば腕と微小管とが関与すると考えられるが、現在のところ、両者の間のすべりあいによるのか、あるいは微小管の収縮によるのか、いずれとも結論はでていない。

べん毛運動のエネルギー論

柳沢富雄 (都立大・理・生)

べん毛運動の解析には、べん毛の細胞全体に占める割合が大きく、べん毛に余分な補助的構造を伴わない点などで、ウエ精子は優れた材料である。ここでは、主にこれを用いべん毛運動のエネルギーの

問題を考察した。

精子は、運動に関与する $\sim\text{P}$ 化合物として、かなりの量の ATP とクレアチンりん酸 (CP) を含む。これらが主に中片と尾部に含まれるとすれば、その含有量はカエル筋肉に匹敵する。べん毛をもつ精子は無脊椎動物でも、すべてりん原質として CP を含むことは注目すべきである。CP・ATP の精子細胞内の局在性については、これが主に中片に含まれることを示唆する結果が得られている。

精子のべん毛運動時の $\sim\text{P}$ の変化をみると、ATP は多少減少の傾向を示すが、著明な変化を示すものは CP で、初めの 1 分に大部分の CP が消失するが、時間と共に回復して、もとのレベルにもどる。最初の 1 分の $\sim\text{P}$ の減少量から使われたエネルギー量は約 $3 \times 10^{-7} \text{ ergs/sec/cell}$ となり、力学的計算で得られたべん毛運動のエネルギー量と良く一致する。

しかし、CP・ATP は構造には結合せずに存在するもののようで、グリセリン処理精子・分離した尾部・構造蛋白質 tubulin に含まれるのは、ATP ではなくて、GDP と GTP がおもに含まれていた。

^{32}P で標識した ATP を加えて、グリセリン処理の精子鞭毛の運動をうながすと、ATP の $\sim\text{P}^*$ は GTP に移動することが確かめられた。このことから、べん毛構造に結合しているのは GTP (GDP) で、べん毛運動の直接のエネルギーは GTP から得られるもので、ATP は GTP を介してはじめてべん毛運動と関連をもつものと考えられる。

せん毛べん毛運動の物理学

平本幸男 (東大・理・臨海)

せん毛やべん毛がどのような機構で運動するのかしらべる第 1 歩として、ムラサキイガイの鰓の large abfrontal cilia およびヒトデの精子べん毛の運動を高速度顕微鏡映画 (毎秒 500 駒、1 回の露出 $1/20000 \sim 1/10000$ 秒、 $40\times$ 又は $100\times$ 対物レンズ使用) で記録した。この記録を利用してせん毛、べん毛の屈曲度と外液の抵抗による曲げモーメントの時間的変化をしらべたところ、両者とも運動にともなって周期的に変化するが、その位相は屈曲度の方が抵抗による曲げモーメントに先行していることがわ

かった。この事実はせん毛、べん毛の屈曲は基部以外の部でも外力による受動的なものではなく、せん毛、べん毛内に積極的に屈曲させる生理学的変化がおこっていることを示している。

イガイせん毛の運動中、ガラス針でせん毛を曲げてその際加えられた力のモーメントと屈曲度の変化を測定した結果、せん毛の曲げに対する抵抗は測定された時点（有効打の始め）では有放打の方向もその反対方向も等しく、またせん毛は正常運動の場合の海水の抵抗ではほとんど変形していないことがわかった。この実験結果から繊毛を構成している微小管の弾性率を求めたところ、もし微小管相互の間に強固な結合がなく自由に滑っていると仮定すると $2 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$ となり、生体材料としては考えられない大きさになる。従って微小管相互の間には結合があって自由に滑り得ないものと考えられる。この結果は繊毛運動機構に関する収縮説に有利な事実である。

屈曲波の伝導速度はイガイのせん毛でもヒトデ精子のべん毛でも 1 mm/sec 程度である。力学的測定のデータを利用して屈曲波の伝導機構について論じた。

形質膜の電気発生によるせん毛運動の制御

内藤 豊（東大・理・動）

細胞体から遊離された繊毛がなお打つ事実は繊毛自体に運動の機構が存在することを示す。一方繊毛の活性は細胞の電氣的活性と密接に関係する。例えば、繊毛虫の繊毛の有効打逆転は膜の脱分極を、正常方向打強化は過分極を伴う。また外向電流による脱分極は有効打逆転を、内向電流による過分極は正常方向打強化を惹き起こす。このような膜電位変化による繊毛運動の制御機構を知ることは、繊毛運動自体の機構の解明に重要と考えられる。

繊毛虫ゾウリムシの静止膜は、K, Ca 双方に透過性を示す。[K] は細胞内が濃く、K 平衡電位は細胞内が負、[Ca] は細胞外が濃く、Ca 平衡電位は細胞内が正となる。静止膜電位はこの二つの平衡電位の中間の値となる。若し刺激の結果膜の Ca 透過性が高まれば、膜電位は Ca 平衡電位に近づくので、膜は脱分極を示し、K 透過性が高まれば、K 平

衡電位に近づくので、膜は過分極を示すはずである。またゾウリムシの細胞内は事実上等電位である。これは、細胞の一部に生じた膜電位変化が、減衰も、時間的遅れもなく細胞全面に拡がることを意味する。これらの電氣的性質はゾウリムシにおける繊毛運動の制御に重要な意味を持っている。例えば、前進遊泳中のゾウリムシがその前端部で物体に当たった際、その部位の Ca 透過性が高まり、脱分極が生ずることが知られている。これは細胞全面に拡がり、さらに膜電位依存の一時的な Ca 活性化過程によって大きな脱分極性活動電位となり、有効打方向を逆転せしめ、後退運動を起こさせる。反対に、細胞後端部の機械的刺激は、K 透過性を高め、その結果生じた過分極は正常方向打の強化を惹起し、ゾウリムシは前進遊泳速度を増大して刺激源から逃れようとする。

膜電位変化が繊毛打を制御する機構は不明の点が多い。しかし、有効打逆転反応が、膜の Ca と ATP に依存する事実は、この機構が脱分極に伴う内向きの Ca 電流に密接に関係している可能性を示している。

I-3 行動学と生理学の接点

オルガナイザー：日高敏隆（東京農工大・生）

最近とみに行動の問題に関心がもたれるようになってきたが、“行動学”なるものが何を意味するかは必ずしも明確ではないようである。行動学は生態学の一分野だという考えかたもあれば、行動の問題はすべて生理学に還元されるという考えかたもある。

一方、電気生理学を中心とする生理学の発展はめざましいものがあり、この両者がいかなる関係にあるか、行動学とはどういうインプリケーションをもつ学問なのかについて、討論しておくべきではないか——このシンポジウムはそのような観点からおこなわれた。

まず、行動そのものからアプローチした例、感覚受容器からアプローチした例、運動の coordination という面からアプローチした例を次の 3 スピーカーに短時間提供してもらった。

そのおのおのについて、テクニカルな問題、考え