

染色体と複屈折

Chromosome and Birefringence

佐藤 英美

Hidemi Sato

はじめに

生物の世界は、通常濾過性病原体 (Virus)、菌類 (Fungus)、原核生物 (Prokaryotes: Bacteria) および真核生物 (Eukaryotes) の4界に分けられるが、何れも遺伝子記号の基本構造としてデオキシリボ核酸 (DNA) を共有する。すなわち、一見似てもつかぬ迄に分化したこれ等の生物群は、43億年前に海水中に初めて出現した同一の生命起源体から出発し、Watson-Crick が提示した長い組状のDNAの2重らせん構造の基礎構造であるアデニンとチミン (A-T)、およびグアニンとシトシン (G-C) を2つの文字として様々な順序に組合せ、総ての遺伝子記号を綴っているのである。

言い換えると、生物は水という地球特有の物質をたん白質を主体とする生体構成物質の溶媒とし、DNAという安定な紐の上に刻まれた遺伝子記号に従って形態と機能を維持し、かつ次代へ伝承するという方法で生き長らえてきた。勿論、長い時間の経過のうちには、方言ができたり、新しい遺伝子が付け加えられたり、消されたりする。それが進化であり、現代の生物のDNAの上には、43億年の生物進化の歴史が刻まれていると考えてよいであろう。

DNA上の各遺伝子は、生命活性維持のために、アデニン、グアニン、シトシン、ウラシルの4文字のうち3文字の組合わせ、即ち $4^3=64$ 通りに転写され、メッセージは細胞質へと輸送され、そこで翻訳されて特定の^{ペプチド}アミノ酸配列を持つ^{ペプチド}合成が行はれる。それが重合して多種多様のたん白質になってゆく。生体の必須アミノ酸は20又は21種類であるから、64文字で充分なのである。

ビールス以外の生命体の基本構造を細胞 (Cell) と言ひ、DNAは核という多孔性の袋に容れられ

ているが、細胞は条件さえ整えば常に一定の速度でDNAを複製しており、複製が終ればDNAを等価配分する為に分裂する。それが細胞集合体である真核生物に進化し、機能分化と対応した細胞分化をおこすと分裂をやめ、代りに構造の複雑化と、それに引続く老化が始まる。所謂組織分化・器官分化と呼ばれる現象であるが、そのような組織細胞でも分化以前の状態に戻せば分裂を再開する。これが突発的に生体内でおこれば癌になり、人間の管理下で試験管内で行えば組織培養細胞となる。但し分裂を再開しても、組織培養細胞は突然変異をおこさぬ限り、単一細胞起源であるクローン細胞群は死滅する。分裂は細胞の重要な属性であるが、一旦分化した細胞の先祖返り系では、老化は避けられない。

染色体とは

細胞が増殖するときにDNAの複製は必ずおこるが、DNA分配の機構は生物群によって異なる。最も進化した真核生物では、有糸分裂という独特の形式がとられる。即ち細胞周期の合成期 (S期) を通じて複製されたDNAは、G-2期と有糸分裂期 (M期) の初期にかけて、丹念に2重・3重、時には4重のコイルに巻かれ、ヒストンで代表される塩基性たん白質で保護された紐様の塊りになる。人間の細胞の大きさは、平均して直径 $10\mu\text{m}$ 。DNAの容れものである核は、たかだか直径 $3\sim 4\mu\text{m}$ にすぎないのに、その中に封じこめられたDNAの全長は数メートルにも及ぶ。これを一繋ぎの^{リンク}遺伝子群 (linkage) 毎に、生物の種類によって定まった数と形のパッケージにまとめるのである。これが所謂染色体である。この染色体の形成過程に少しの誤りもあってはいけなひ。部分的な切断、修復の些細なミス、部分の欠失、D

NA破片の取り込み等は、何れも突然変異につながる。

生の分裂細胞内に形成される染色体は、通常の光学顕微鏡では殆んど視認できない。それは染色体と、それを取囲む細胞質の屈折率が殆んど等しいために、コントラストを作るのに十分な光路差ができないからである。可視光は電磁波の一部であり、光の透過は誘電体理論に従うが、透過する細胞構造の構成たん白質の濃度差が極めて小さいために波の遅れの差が僅かで、構造を識別できないのである。

そのため、19世紀中葉からは細胞や組織を固定し、染色して内部構造をみるという方法がとられた。E.R. Virchowは“細胞は細胞から生ずる”と喝破し、病理学者は必ず顕微鏡を使用するように説いたが、今世紀半ば迄、見難い細胞構造を見易

くするために敢て時間軸を放棄し、その代りにできる限り生きた状態に近く細胞を殺して保存し、構成たん白質のpHの差を利用して酸性や塩基性の色素で、或いは重金属イオンとの親和力を利用して構造を染め分ける工夫に全力が注がれた。染色体(Chromosome)という名称は、こうして生れた。DNAという核酸を基礎成分に持ち、有糸分裂期にコンパクトにまとめられるこの構造は、酸性であるために塩基礎性色素と反応し、良く染まったからである。因みにChromoは色を、Someは物の塊を表す。

しかし固定・染色法に頼ってはいは、細胞の動態は見えてこない。時々刻々と変化する細胞の生理状態を追跡することはできない。これを打破したのがF. Zernicke⁽²⁷⁾の結像理論に基く位相差顕微鏡の開発であり、実用化であった。屈折率の差

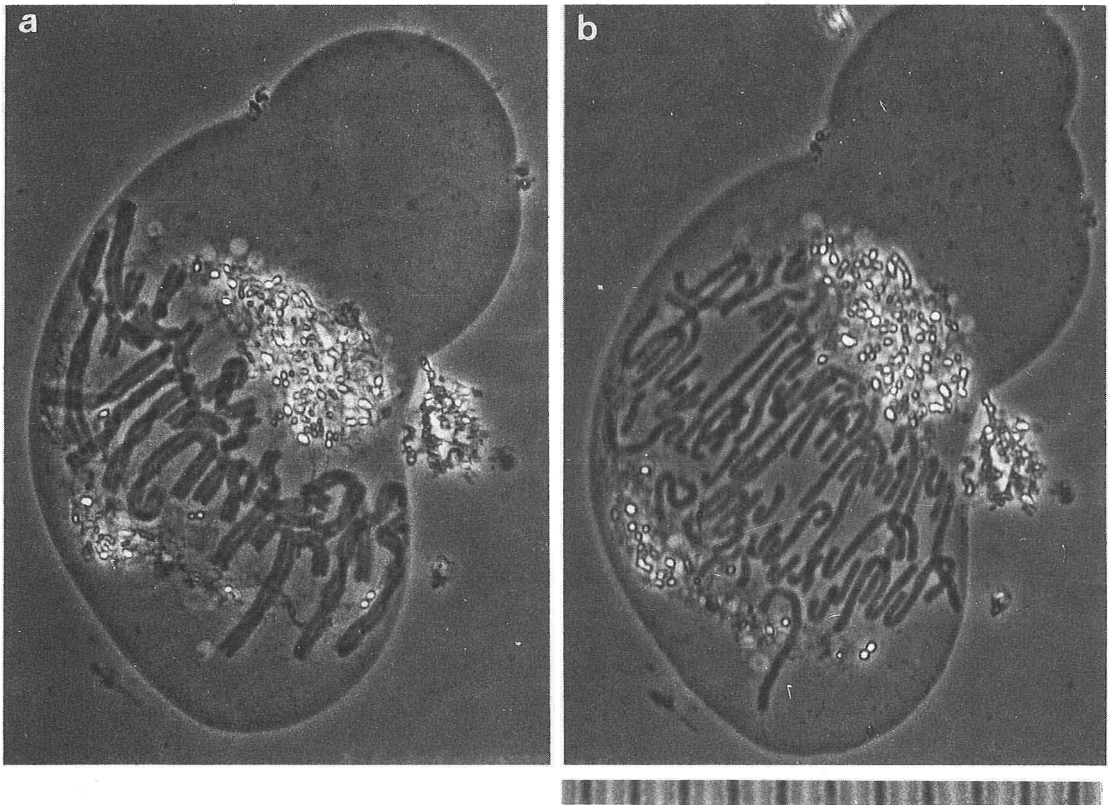


図1 アマリリス科の *Haemanthus katherinae* の内胚乳細胞内に、形成された有糸分裂期の染色体を示す。aは中期染色体で核板を形成している。bは20分後に後期に入り、対合していた娘染色体が分離して両極へ移動している像を示す。ただし、紡錘体は観察できない。位相差顕微鏡像。右下段のスケールの1目盛は10 μ m。

が僅少なために観察し難かった生体細胞内構造を、小さな屈折率差を増幅してコントラストに変えることに成功したこの装置は革命的であった。その例を図1に示す。

さらに偏光を効果的に利用することで、これ迄見ることのできなかつた細胞内超微細構造の配列や生体高分子の配向の動態を、複屈折性または偏光のベクトルを利用した光干渉を強調してコントラストへ変換し、定量する方法が確立された^(9,20,21)。顕微鏡の改良が、これ迄の形態学の泣き所であった時間軸の導入を許し、細胞に直接問いかけ、生体内反応を追跡することを可能にした。1950年の頃である。この時から、形態記載に終始していた細胞学は、学際的な細胞生物学へと大きく変貌してゆく。

複屈折について

例を方解石にとる。方解石は立方体と異り歪んだ結晶、即ち光学的異方性を持つ結晶の代表であるが、方解石が作る二重像は子供達にとっては驚異的であり、それは子供にとって宝であった。この二重像は、入射光がSnellの法則に従う正常光と、従わない異常光の2つのベクトルに分けられる為におこる。この現象を、互に直交する光の二成分が夫々異なる屈折率 n_o と n_e に分かれることによって結像されたと考え、複屈折(Birefringence)と呼ぶ^(9,20,21)。コラーゲンやDNA分子のように、分子内原子配列自体に光学的異方性があるために起こる複屈折を固有複屈折という(図3)。これに対してもともと複屈折性を持たないたん白質などのミセルが、分子配向して規則正しい微細構造を作った時、分子配向度やミセル相互間の距離、ミセルと媒体または溶媒との屈折率の差等から生起する複屈折性を構造複屈折という。生体内微細構造では、横紋筋や微小管で構築された分裂紡錘体(図2)がこの例である。この場合、構造と溶媒の屈折率差が無くなると構造複屈折は失われるが⁽²²⁾、DNAなどの固有複屈折は媒体の屈折率の変動とは無関係であり、媒体の屈折率を変えることで両者を識別できる(図4)^(9,21)。

このほかに流動複屈折、構造の撓みや曲げモーメントによって起る歪み複屈折、液晶等が知られている。複屈折性は生命現象と深く関わっており、

細胞骨格の構築、細胞運動、細胞流動等には複屈折性がしばしば単独に、あるいは複数の要因となって関連し、発現している場合が多い。

DNAは分子自体強い固有複屈折性を持ち、偏光係数($n_e - n_o$)は 10^{-2} 、負の複屈折性を示す。それにも拘らず、真核生物の染色体は全く複屈折性を示さない。これは保護物質である塩基性たん白質のヒストンが、DNA分子を染色体内でばらばらにほぐしたためにおこる分子配向の乱れが複屈折性を相殺した結果であろうと推測されてきた。しかし、分離した染色体を誘電率の低いアルコール中で引張ると、強い、固有複屈折が発現する。これはDNA分子が並んだ、或いは無理に配向された為と説明されてきた。しかし、複屈折性を示さぬ真核細胞の染色体は長い間謎のまま放置されていた。

細胞分裂と核分裂装置

図2に示すように、核分裂装置は真核細胞が有糸分裂を行う時に構築される一過性の細胞骨格であって、複製されたDNAの束である染色体を赤道面に配列し、染色体分離、染色体輸送に直接関与する細胞器官である。中心体と星糸からなる両極の星状体と、中央の染色体を含む紡錘体が主な構造であり、一般に光学的異方性を示すから^(18,22)、高感度高解像偏光顕微鏡で容易に識別できる^(9,25)。これは観察光の波長領域よりずっと小さな次元での分子配向や微小管の配列によって生ずる構造複屈折による⁽²²⁾。ウニ受精卵の核分裂装置は、骨組みとなっている微小管たん白質、チューブリンの誘電率を下げるか、または疎水性を高めるなどの操作で安定化し、細胞外へ取だすことができる。この分離紡錘体の横断面を電子顕微鏡で観察すると、紡錘体は両極間のに配列された約5,000本の微小管で構成されていることが明らかになる。従って紡錘体が示す構造複屈折は、微小管の配列と微小管数を正確に反影しており、その動態は一見安定にみえながら、実は細胞の生理条件の僅かな変動に鋭敏に反応する動的平衡系であることが明らかになった^(12,13,23)。

紡錘体微小管は明かに染色体輸送に直接関係する重要な骨組みであり、核毒や分裂抑制剤と反応して脱重合すると染色体運動は停止する⁽²⁴⁾。微小

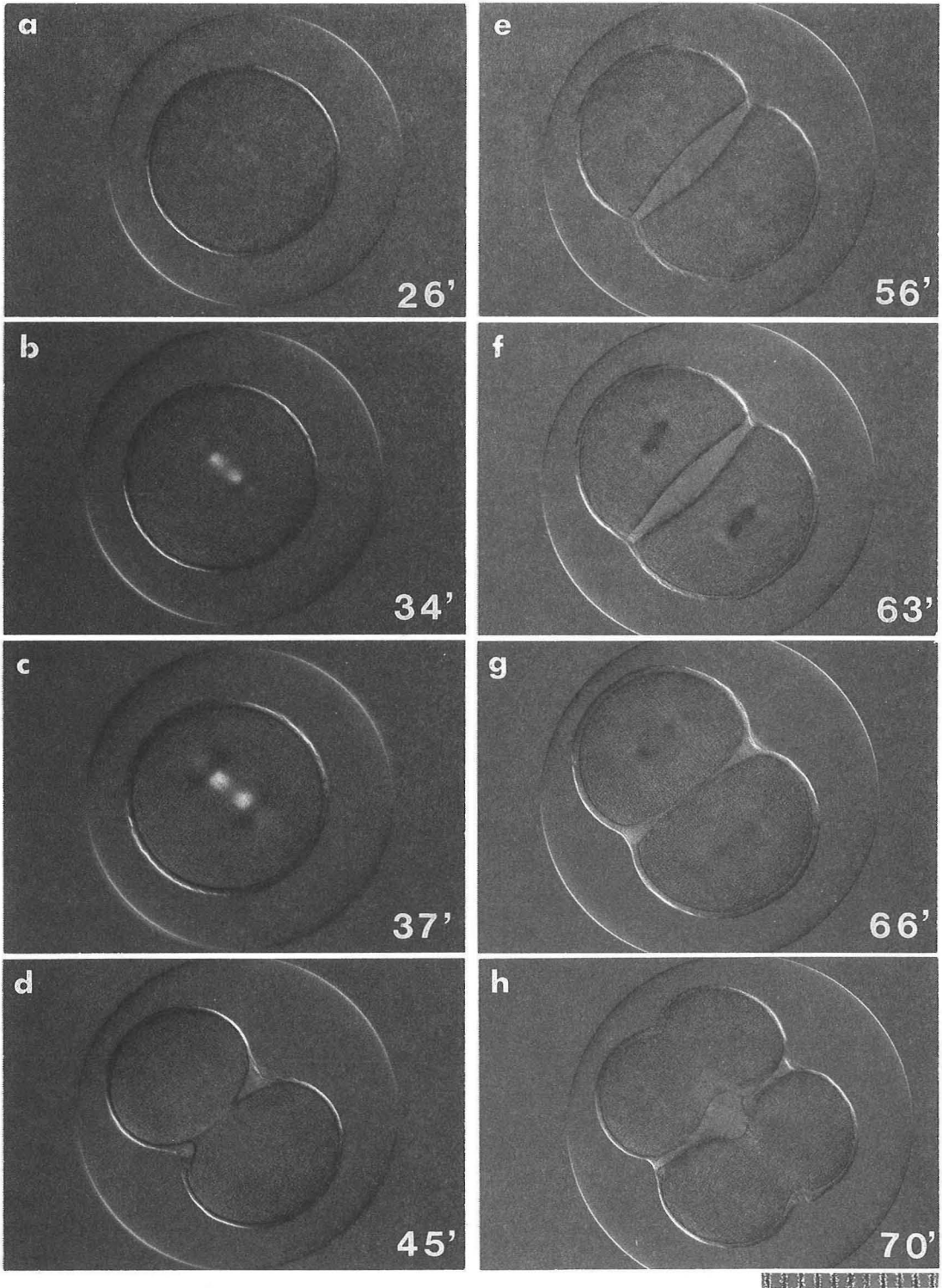


図2 コシダカウニ (*Mespilia globulus*) 受精卵の第1分裂期における紡錘体の構築と脱構築の過程と、それに対応した複屈折性の消長を示す。配向微小管数を反影する紡錘体の構造複屈折は明かに認められるが、染色体は全く複屈折性を示さない。連続写真の各右下段の数字は媒精後の発生時間を示す。偏光顕微鏡像。右下段のスケールの1目盛は $10\mu\text{m}$ 。

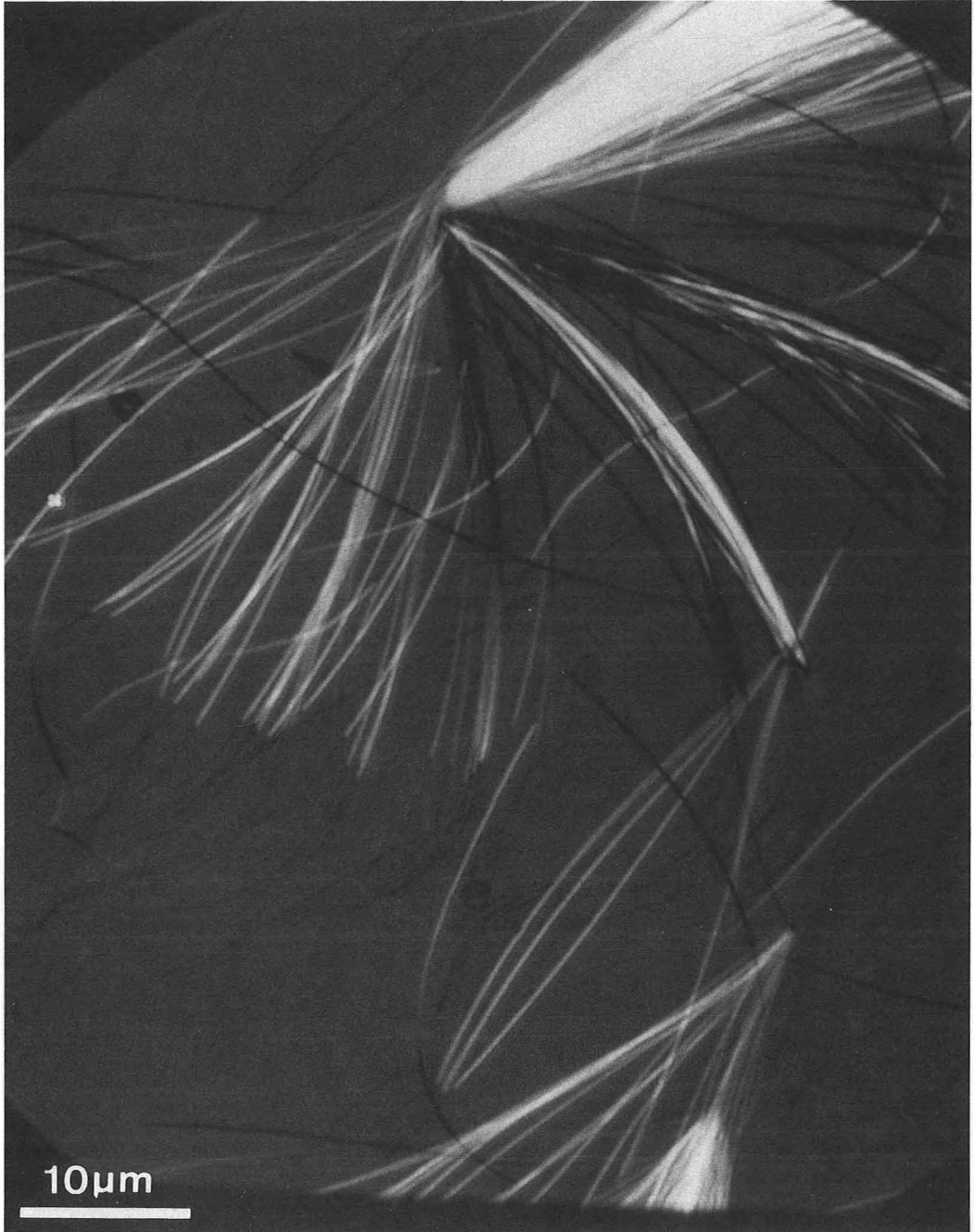


図3 典型的なバットの成熟精子。精子頭部は精子染色体内に束ねられたDNA分子の量と比例した強い負の固有複屈折を示す。これに対して9+2のパターンをとる微小管を基本構造とする精子鞭毛は、正の構造複屈折を示す。偏光顕微鏡像。(井上・佐藤、'66より)。

管の再構築を誘導すると、染色体輸送は再開される。

一見安定に見える染色体も、核毒投与により、

明かに変化を受ける筈なのであるが、それが複屈折性の変化として表われてこない。真核細胞の染色体は、多量のDNAを含むにも拘らず、どうし

ても固有複屈折を示さないのである。

精子染色体

ところが例外があった。精子染色体である。精子形態の記載で浩瀚な業績を残した Retzius⁽¹⁶⁾は、精子を4つの基本型に分け、そのうちの下等生物に共通な精子を“原始型”精子とよんだ。しかし精子のかたちの複雑化と進化とは必ずしも対応せず、非複屈折性の原始型は水中に卵と精子を放出して体外受精を行う種類に広く分布する。一方、体内受精や特殊な生殖様式を持つ動物では、複雑な形態をもつ精子が多く認められるから、多様な精子形態は生殖様式に深く依存し、またその変化に伴う卵保護層の分化や組織の違い等も原因となっているのであろう⁽¹⁷⁾。但し精子の多様性についての十分な説明は未だなされていない。

生殖細胞の原細胞は、発生のかなり早い時期に体細胞から分化してくる。そして何回かの分裂と成熟を繰り返した後に、雄性体に形成される精母細胞は、減数分裂とよばれる連続2回の分裂を経て、染色体数が半減した4個の精細胞となる。染色体の複製は、例外を除いて第1減数分裂の前期で終り、第2減数分裂およびそれに引続く精子形成過程を通じてDNAの複製は行われない。但し部分的なターン・オーバーはあるという⁽⁷⁾。従って個々の精細胞に配分されたDNA基幹の遺伝情報群は、増減することなくそのまま、精子頭部へ凝縮され、頑丈に保護されてゆく。Courot⁽⁴⁾や Fawcett等^(6,7)は、精子の形態変化を、1) 球状の精細胞核の形成、2) 精核の伸長又は横方向への凝縮、3) 精子の形成の3つに分けて考える。特に図3に示すように、バツタ等の直翅類の針状精子頭部形成を取上げ、精子形成過程を通じて精子1個当りのDNA量は全く変化しないという顕微測光の事実と、核質の規則的凝縮を最大のイベントとして考えている。

精子頭部の形成は、精子染色体の顕著な凝縮と、代謝からみても完全に不活性で酵素消化を受けない高度に安定な構造の構築という点で際立っている。例えばイカやバツタの精子では、頭部の乾燥重量の殆んど40%がDNAで占められるから、頭部の光学的密度、即ち屈折率は高くなり、微細構造の解像は不可能になる。しかも、成熟につれ

て負の固有複屈折が急速に増す。紫外線吸収二色性やX線回折像の解析から、イカやバツタの精子頭部の複屈折性は、DNA(染色体)がほぼ長軸方向に規則正しく配列し、半結晶状構造となっている事が強く示唆される^(10,11)。但し、扁平又は球状の非複屈折性の精子でも、やはり規則正しく凝縮されたクロマチンの存在が予想される⁽⁷⁾。

カマドウマの仲間である cave cricket の針状精子(図4)の頭部には、ジグザク状に配列した多数の固有複屈折性のマイクロドメインが認められる。この微細構造の中にDNAがどのような結晶体となっているかについて、井上と佐藤^(10,19)は高感度・高解像偏光顕微鏡と紫外偏光顕微照射法とを組合せ、理論と実験による偏光解析から、次のような結果をえた。

- 1) Cave cricket の精頭部には約250個の負の複屈折性マイクロドメインがあり、これが精子核の主構造を形成している。
- 2) DNAゲルと等しい強複屈折性のマイクロドメイン群は、精子長軸に対して $\pm 10^\circ$ の方位角を持って配列されている。
- 3) 紫外線スペクトルの吸収の方向性の解析結果から、各マイクロドメインは主軸に対して $\pm 15^\circ$ の傾き角を持つDNAの束で構成されている。従って全マイクロドメインは、 $+25^\circ$ 、 $+5^\circ$ 、 -5° 、 -25° の4成分で作られているはずである。

Cave cricket の精子の巾は $0.8\mu\text{m}$ 、計算されたDNAの束の外径は 150nm 、ピッチ角は $\pm 10^\circ$ 、複屈折量の測定値から、2つのマイクロドメは対を作っていると考えられる。これから、実際の精子核構造は、2本の2重コイルの重ね合せになっている筈である。唯これ丈では充分ではない。二重コイルの重ね合わせを少し押しつぶし、断面が楕円になるようにすると、すべての測定値が満足される。図4Bは、偏光解析から理詰めで作図された“Cave cricket の精子頭部内におけるDNA分子配列模型”である。このモデルは理論計算値とも良く一致した^(10,11,19)。

では、実際の精子染色体の配列パターンはどうなっているのだろうか？ 精子形成過程を通じて凝縮され、箱詰めにされた精子染色体は、マイクロドメインの整然たる配列から考えると、当然規則正しい配列をとる可能性が大きい。従って染色

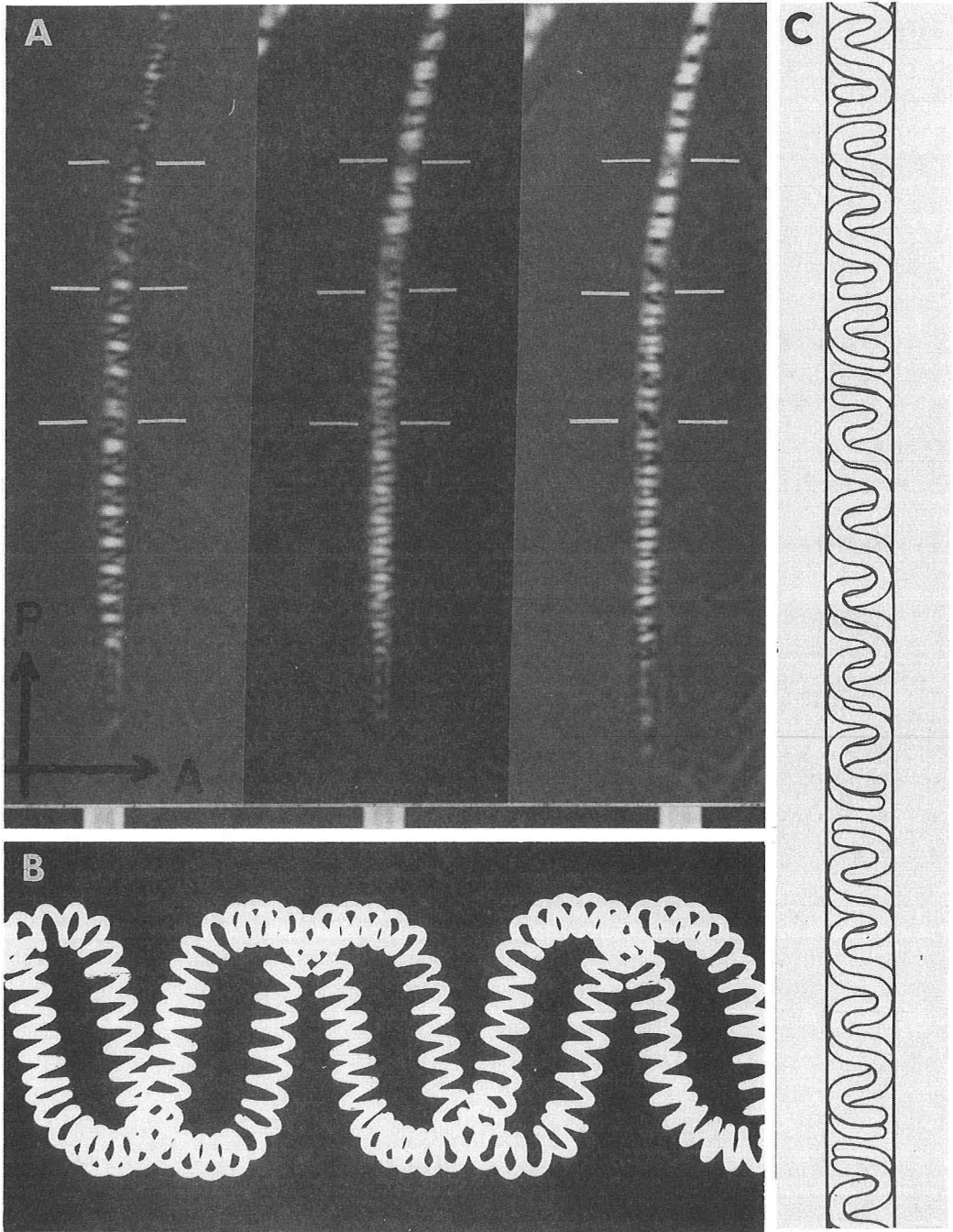


図4 直翅類カマドウマの仲間である Cave Cricket (*Ceuthophilus nigricans*) の成熟精子の頭部をダイメチルサルフォキシド (DMSO) で液浸し、膜、微小管等に由来する構造複屈折を消去すると、紐状となった精子染色体の基幹構造であるラセンに巻いたDNAの分子配列が明瞭に示される。Aの3枚の写真は同一精子の頭部を補償板の補償角を少しづつ変えることで精子染色体の切れ目を明かにした組写真。Bは偏光解析からえられた精子染色体の2本撚りになったDNAの2重ラセン構造のモデル。断面は楕円となるように少し押しつぶしてある。Cは、偏光解析の結果から明かにされた精子染色体のタンデム配列の様様。精子染色体は決して雑然とつめこまれた構造ではない。一定の順序に従って、整然と配列されていると考えられる。

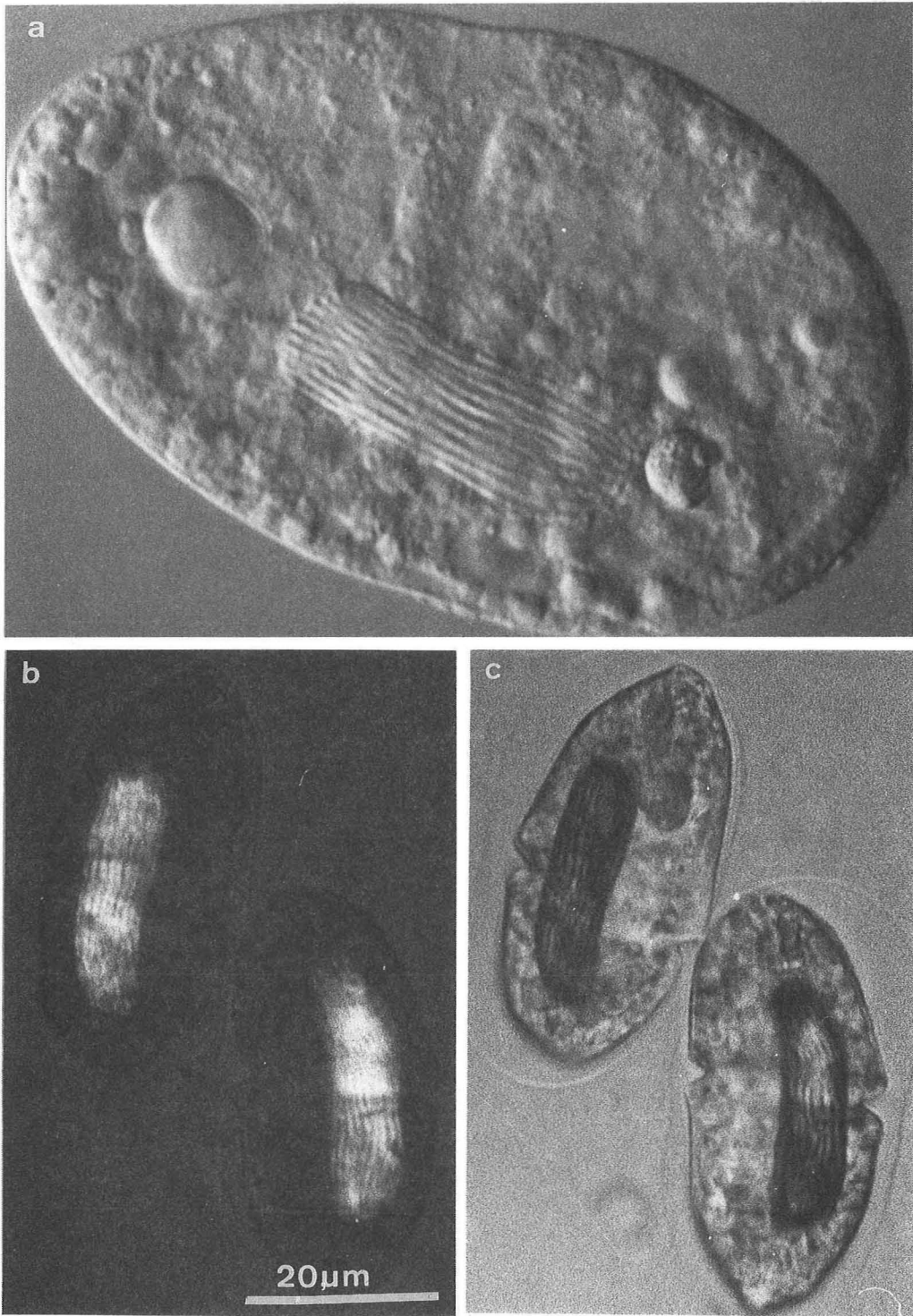


図5 分裂中の渦鞭毛虫 *Gyrodinium sugashimani* の棒状に並んだ染色体群。この類は典型的な核内核分裂を行い、決して中期赤道板を形成することはないが、複製された娘染色体群は紡錘体微小管によって両極に分配される。aは微分干渉位相差像 bとcは偏光顕微鏡像であって、補償板を回転し、染色体の強い正の複屈折を白および黒のコントラストで示す。胴体中央のくびれは、分裂割溝面である。

体の一部分であるマイクロドメインをつなぎ合せた画像構築から、常に精子頭部の同じ位置に切れ目ができ、定まった長さの撚糸構造が定位置に再現されることが明らかになった。つまり、2本撚りのクロマチンからなる精子染色体は、精子頭部にタンデムに並べられており、順序も定まっていると結論できる。それを図4Cに示した。

渦鞭毛虫類の染色体

若い精細胞の染色糸や、真核細胞の有糸分裂時に形成される染色体が複屈折性を示さないことは、既に指摘しておいた。そして、染色体内ではDNA分子は配向せずにはぐれた状態になっており、その隙間をヒストン等の塩基性たん白質が埋めているために、DNAの固有複屈折が相殺されているのだと説明しておいた⁽¹⁷⁾。しかしDNAが染色体の基幹構造である以上、どうしても納得がゆかない。これが永い間、頭にこびりついて離れぬ疑問であった。

ところが、複屈折性の染色体を持つ生物が見近かにいたのである。まさに燈台もと暗しであった。それは海産又は汽水域産の渦鞭毛虫類 (Dino-

flagellate) の休止核および分裂核の染色体であった⁽³⁾。図5に名古屋大学理学部附属臨海実験所付近で採集した *Gyrodinium sugashimani* (故Jean Cachon 教授によって新種記載) の強複屈折性の染色体を示す。図5 a は休止核染色体を微分干渉顕微鏡像で、図5 b, c は分裂期の染色体を偏光顕微鏡像で白又は黒のコントラストで示す。染色体の複屈折は、染色体の長軸に対して正である。^(2,3) これは大変重要なことであり、DNA分子の固有複屈折の符号は分子長軸に対して負であるから、渦鞭毛虫類の各染色体は、長軸方向へしっかりとコイルに巻いたDNAで構成されていると考えなければならない。偏光係数 ($n_e - n_o$) は $+2 \times 10^{-2}$ と計算され、純粋のDNAゲルの値と等しい。また、顕微測光のデータも、また干渉法や溶媒の屈折率を変える方法でも偏光係数は変わらないから、ヒストンや塩基性たん白質は殆んど存在しないと考えられる。Herzog等⁽⁸⁾ や Rizzo等⁽¹⁷⁾ も、細胞化学的に渦鞭毛虫類の始原型種の核には塩基性たん白質は無いから、*Gyrodinium* 等の原始的渦鞭毛虫類の染色体は、原核生物であるバクテリアの nucleoid に比肩すべき構造であり、その

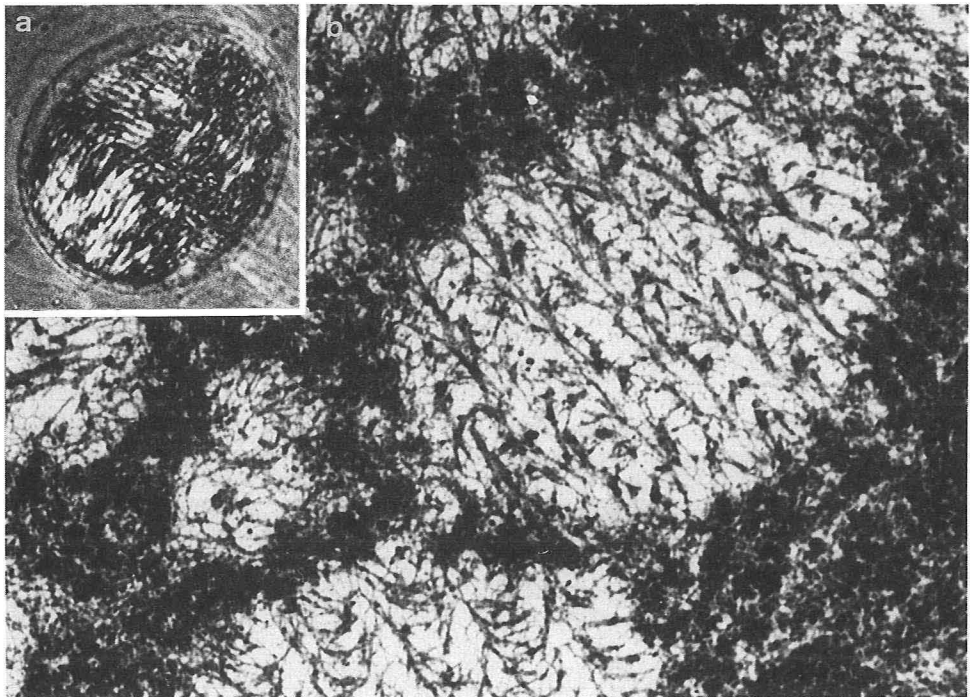


図6 渦鞭毛虫 *Gyrodinium sugashimani* の休止核の偏光顕微鏡像を a に示す。b は同種の核の強拡大電子顕微鏡像で、染色体の縦断面の微細構造を示す。倍率：×50,000。

意味で渦鞭毛虫類は中間生物として取扱われればならぬと主張する。

図6は、*G. sugashimani* の分離核と電子顕微鏡像であるが、染色体はDNAの単一又は2重コイルではないかという従来の考え^(5,15)、又は解釈と全く一致しない像であり、やはりDNAの束が染色体の長軸に対してコイルとして巻かれていると

みるべきであろう。そして、塩基性たん白質以外のマトリックスの存在を予測させる像でもある。

現在世界で飼育・培養されている渦鞭毛虫類は数十種あるが、そのうちの数種類はフランスで培養されている。その一種の電子顕微鏡像と正の複屈折性を示す核の偏光像から、Bouligandら^(2,14,26)は、このような正の固有複屈折を示す染色体は、

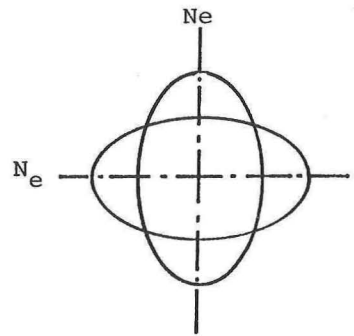
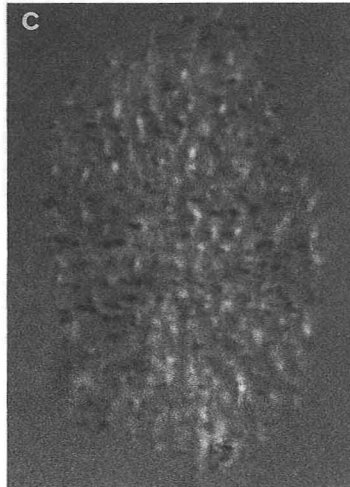
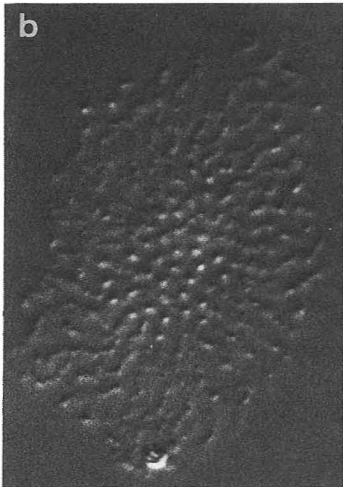
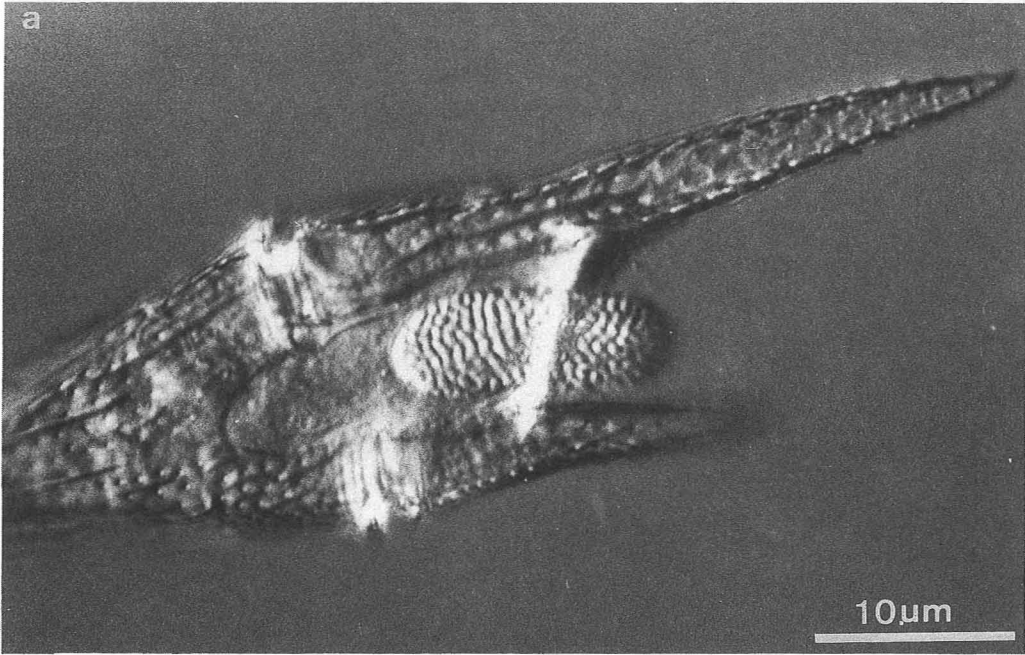


図7 渦鞭毛虫 *Ceratium furca* の半ば脱殻した休止核と染色体を示す。bおよびcは脱殻した休止核の押しつぶし標本を微分干渉顕微鏡像 (b)、偏光顕微鏡像で示す。この類の染色体はコイル様に巻いており、コイルの方向によって正又は負の複屈折性が示されている。下段右の図は屈折率楕円であってNeは異常光を長軸を表わす。下端のスケールの1目盛は10 μ m。

TABLE 1. — Comparison between the 3 types of chromosomes in dinoflagellates.

Item	Type A	Type B	Type C
Rep. sp.	Prorocentroid <i>Gyrodinium</i> <i>Erythroopsis</i> <i>Actiniscus</i> <i>Brachydinium</i> <i>Procystis</i>	Peridinioid Dinophysoid (entire group) Gonyaulacoid <i>Ceratium</i>	Gymnodinioid <i>Noctiluca</i> <i>Leptodiscus</i> <i>Kofoidinium</i> <i>Oxyrrhis</i> Parasitic Dinoflagellates <i>Blastodinium</i> <i>Haplozoon</i> <i>Oodinium</i> <i>Apodinium</i>
BR signal	Positive	Positive and negative mix	Weak negative, then positive
Nature of BR	Intrinsic	Intrinsic	Intrinsic and from
Presence of basic proteins	No	No or few	Yes but few
Molecule responsible	DNA	DNA	DNA and proteins
Coefficient BR/(N _e -N _o)	+2×10 ^{-2*}	±1×10 ⁻² to ±5×10 ⁻³	-5×10 ⁻³ or less then +1×10 ⁻²

表1 染色体の複屈折を指標にすると、渦鞭毛虫類は3群に大別されるのであるが、形態学的に組立てられた系統樹とは一致しない。しかし私達は複屈折性からみて、渦鞭毛虫類はA型→C型というパターンをとりながら進化したのではないかと考えている (Cachon, Sato, Cachon, Sato, '89)

長軸方向に折り畳まれたDNAの液晶であろうと推論した。面白い仮設であり、彼は頑固に液晶説を信奉しているのだが、仮りにそうだとすると、短い細胞周期で急速に増殖するこの生物の染色体DNAの複製は期待できない。Cachonと私は、*Gyrodinium*の個々の染色体は、やはりバクテリアのnucleoidと対比されるべき構造ではないかと考えている。そうであるとするなら、てDNAの複製は個々の染色体毎に独自に行われ、複製が一区切りつけば中期核板を形成することなく、ずるずると両極へ移動する核内核分裂という独特の分裂様式が説明できるのである⁽⁹⁾。

渦鞭毛虫類の系譜

染色体の複屈折性、換言すれば裸のDNAで作られた染色体の発見は、私達を採集可能な総てのプランクトン型のdinaflagellatesのサーベイへと駆りたてた。火がついたのである。そして渦鞭毛虫類は、染色体の複屈折性を指標にとると、大別して3群に分けられることがわかった。即ち、
A) 正の強い固有複屈折を持ち、塩基性たん白質を欠くグループ、
B) 正・負の固有複屈折が混在し、かつ少量の塩基性たん白質を持つグループ (図7)、
C) 通常の後生生物のように染色体は殆んど複屈折性を示さず、かつヒストン系の塩基性たん白質

を相当量含むグループである。

表1に示すType Aが始原型であり、この類のあるものが液晶型の染色体を持つであろう可能性は否定できない。Rep. sp.は各グループに属する代表種を、BR signalは複屈折性の符号を、Nature of BRは複屈折性の起源、即ちDNA自身によるのか、またはたん白質の混在による構造複屈折が附加されているか否かについてを、そしてCoefficient BR/(N_e-N_o)は偏光係数、すなわちDNAや塩基性たん白質の量と配向の度合を指す。

この類別による渦鞭毛虫類の系譜は、これ迄の形態に重点を置いた進化の系統樹から大きくはずれ、最も進化していると考えられてきたグループがAグループとCグループであり、進化していないと考えられた、系統樹の下段のグループが実はCグループであったりする。この研究は今も継続中であり、日本とフランスの協力研究という形をとり続けることになろう。

おわりに

裸のDNAから成る染色体の発見は、私達に大きなインパクトを与えた。30年間抱き続けた疑問に解答が与えられたからである。同時にこの発見は新たな疑問を生む。

Gyrodinium sp. は、裸のnucleoid様のDNA

を持つにもかゝらず、その核内核分裂は有糸分裂型である。電子顕微鏡像も、蛍光抗体染色法も、ともに染色体の輸送は微小管によって行われていることを示している。これはチューブリン分子が核内に存在すること、有糸分裂が行われる事を意味する。もともと、運動器官として2本の鞭毛を持ち、それを巧みに操りながら運動する非細胞性とも言える生物であり、中にはレッキとしたレンズと光感覚色素を備えた種類もある。しかるに、他の重要な細胞骨格たん白質であるアクチンや中間径フィラメントは存在しない。代りにアクチンより細い微細繊維が、細胞運動に深く関係している。アクチンや中間径フィラメントの遺伝子は初めから無かったのか、それとも失われたのか、また、進化の途中で一体何が起きたのか、甚だ興味をそゝる。

何よりも、染色体が裸のDNAでできているという事実は、見逃すわけにはいかない大きな謎である。染色体を保護していると考えられるヒストンは、渦鞭毛虫類の進化の後期になって獲得されたのか、それともAグループでは一旦存在していたヒストン遺伝子が不活性化したのか、疑問が次々と湧き出てくる。

Gyrodiniumとその仲間は、実は赤潮 (Ocean bloom)の原因になる原生物である。裸のDNA群の複製は速く、増殖率は極めて高い。かつて第3紀にGyrodiniumのような渦鞭毛虫類が大発生し、100万年のオーダーで巨大な死骸の堆積を海底に作り、それが石油へと変質したのではなからうか？ 石油の無機生成説には無理があり、石油はやはり化石燃料とすべきであろう。とも角夢を持たせる可能性を秘めた生物群であり、将来裸のDNAからなる染色体がその謎を解く鍵となるであろうと考えている。

(さとう ひでみ 教授)

1992. 4. 14受理)

参考文献

1. Baccetti, B. & Afzelius, B. A. The biology of sperm cell. Monographs in Dev. Biol., S. Karger, Basel (1976)
2. Bouligand, Y., Soyer, M. O. & Puisieux-Dao, S. La structure fibrillaire et l'orientation des chromosomes chez les dinoflagelles. *Chromosoma*, 24; 251-287. (1968)
3. Cachon, J., Sato, H., Cachon, M. & Sato, Y. Analysis by polarizing microscopy of chromosomal structure among dinoflagellates and its phylogenetic involvement. *Biol. of the Cell*. 65; 51-60. (1989)
4. Courot, M., Hochereau-de Revies, M-T. & Ortavant, R. Spermatogenesis. In; The testis (ed. by Johnson, A. D., Gomes, W. R. & Vandemark, N. L.), Vol. I. p. 339-432. Academic Press, New York. (1970)
5. Dodge, J. Chromosome structure in Dymophycear. I. The spiral chromonema. *Arch. Mikrobiol.*, 45; 46-47. (1963)
6. Fawcett, D. W. The mammalian spermatozoon. *Dev. Biol.*, 44; 394-436. (1975)
7. Fawcett, D. W. & Bedford, J. M. (eds.) The spermatozoon maturation. Motility, surface properties and comparative aspects. Urban & Schwarzenberg, Bergel. (1979)
8. Herzog, M. & Soyer, M. O. Aspects particuliers de la chromatine des protistes dinoflagelles. *Biol. Cell*, 35; 64a. (1979)
9. Inoué, S. Videomicroscopy. Plenum Press, New York. (1986)
10. Inoue, S. & Sato, H. Arrangement of DNA in living sperm. A biophysical analysis. *Science*, 126; 1122~1124. (1962)
11. 井上信也・佐藤英美、精子核内のDNA分子配列——生体超微細構造解析のための光学的アプローチ。生物物理学講座、(日本生物物理学会編)、vol. III “遺伝情報III”、p. 151~22. (1966)
12. Inoué, S. & Sato, H. Cell motility of labile association of molecules: The nature of mitotic spindle fibers and their role in chromosome movement. *J. Gen. Physiol.*, 50; 259-292. (1967)
13. Itoh, T. J. & Sato, H. The effect of deuterium oxide ($^2\text{H}_2\text{O}$) on the polymerization of tubulin *in vitro*. *Biochem. Biophys. Acta*, 800; 21-27. (1984)
14. Livolant, F. La structure cristalline liquide de l'ADN *in vivo* et *in vitro*. These Doctorat Etat, Univ. Paris VI. (1984)

15. Livolant, F. & Bouligand, Y. New observations on the twisted arrangement of spread dinoflagellate chromosomes. *Chromosoma*, 80 ; 97-118. (1980)
16. Retzius, G. *Biologische Untersuchungen, Neue Folge*. Vol. XII, XIV, XVI, Gustav Fischer Verlag, Jena. (1906-1911)
17. Rizzo, P. J. & Nooden, L. D. Isolation and chemical composition of dinoflagellate nuclei. *J. Protozool.*, 20 ; 666-672. (1979)
18. Sato, H. Role of spindle microtubules for the anaphase chromosome movements in fertilized sea urchin eggs. *Cell Diff.*, 2 ; 345-348. (1982)
19. 佐藤英美、精子の形成と構造：染色体の配列、臨床科学、20 ; 620~631. (1984)
20. 佐藤英美、偏光による構造則定、生体の科学、39、別刷“細胞光学特性測定法”、530-533. (1988)
21. 佐藤英美、偏光で見たいものだけ選んで見る (偏光顕微鏡)、日本分光学会、測定法シリーズ(宝谷絃一・木下一彦編)、21、31~51、学会出版センター、東京 (1991)
22. Sato, H., Ellis, G. W. & Inoue, S. Microtubule origin of mitotic spindle form birefringence. Demonstration of the applicability of Wiener's equation. *J. Cell Biol.* 67 ; 501-517. (1975)
23. Sato, H. & Bryan, J. The thermodynamics of molecular association in the mitotic spindle with or without heavy water (D₂O). *Zool. Sci.*, 5 ; 733-742. (1988)
24. Sato, H., Kobayashi, A. & Itoh, J. T. Molecular basis of physical and chemical probes for spindle assembly (Review article). *Cell Struct. and Funct.*, 14 ; 1-34. (1989)
25. Sato, H., Takenaka, H. & Niboshi, T. An attempt to construct super-sensitive polarizing microscope with Video-enhanced system. *Acta Histochem. Cytochem.*, 24 ; 343-347. (1991)
26. Stzelecka, T. E. Davidson, M. W., & Rill, R. I. Multiple liquid crystal phases of DNA at high concentrations. *Nature*, 331 ; 457-460. (1988)
27. Zernike, F. The wave theory of microscopic image formation. In ; *Concepts of Classical Optics* (ed. Strong J.). p. 525-536. W. H. Freeman Co., San Francisco. (1958)