

미국흰불나방(*Hyphantria cunea* Drury) 精子變形에 따른 미토콘드리아의 形態 分化

文明珍 · *金宇甲

檀國大學校 自然科學大學 生物學科, *高麗大學校 理科學大學 生物學科

미국흰불나방(*Hyphantria cunea* Drury) 종령유충과 蛹, 그리고 성충을 재료로하여 精細胞가 精子로 변형되는 과정에서 나타나는 미토콘드리아의 분화과정을 전자현미경으로 관찰하였다. 다핵체를 이루고 있는 초기 정세포의 미토콘드리아는 軸絲가 형성되는 부위를 중심으로 집적된 후, 서로 융합되어 대형의 미토콘드리아 복합체인 副核(Nebenkern)을 형성하였다. 부핵은 침체형성 시기를 전후하여 세포의 장축을 따라서 길게 신장되며, 편모가 형성됨에 따라 축사를 중심으로 두께와 전자밀도가 서로 다른 두개의 미토콘드리아로 분리되었다. 분화가 계속됨에 따라서 서로 동일한 모양으로 변형된 미토콘드리아의 주변에서는 장축방향을 따라 다수의 微細小管이 분포하였고, 기질에서는 intramitochondrial crystalloid의 축적이 관찰되었다. 精子變形이 끝난 성숙정자의 미토콘드리아는 기질내부에 전자밀도가 높은 準結晶物質이 함유된 미토콘드리아 誘導體로 변형되었는데, 정자의 中片에서는 하나로 융합되어 있는 반면, 尾部에서는 크기가 같은 두개의 유도체로 분리된 매우 독특한 형태로 관찰되었다.

KEY WORDS: Ultrastructure, Spermiogenesis, Mitochondria, Differentiation, *Hyphantria cunea*

昆蟲의 雄性生殖細胞에 대한 연구는 Anderson (1950), Phillips(1969, 1970, 1971), Baccetti (1971), Baccetti 등(1970, 1974, 1976), Dallai (1974), Dallai와 Afzelius(1980, 1982), Afzelius 등(1985) 등과 같은 연구자에 의해 몇가지 종을 대상으로 주로 성숙 정자의 미세구조가 관찰 보고된 이후, 현재에는 精原細胞로부터 정자가 형성되는 일련의 精子形成過程(spermatogenesis)이나 (Payne, 1966; Godula, 1979; Lee, 1985), 精細胞가 정자로 변형되는 精子變形過程(spermiogenesis)(Stanley *et al.*, 1972; Itaya *et al.*, 1980; Lee & Lee, 1987), 그리고 정자를 구성하는 여러 세포소기관의 分化過程(Tandler & Moriber, 1966; Pratt, 1968; Tokuyasu, 1974, 1975; Kessel, 1981, 1985)에 대한 연구들이 병행되어 이루어지고 있다.

정소내부에서 일어나는 정자형성과정은 종에 따라 매우 다양한 방법으로 이루어지고, 최종적

으로 형성된 정자의 형태도 서로 다르지만, 모든 정자가 單相(n)의 염색체를 가지게 되고, 핵과 세포질이 변형되며, 정자의 운동기관인 편모가 형성된다는 점 등의 여러가지 공통점을 지니고 있다. 특히 정자가 난자에 이르기 위해 일으키는 편모운동에는 많은 양의 에너지가 필요하며, 이러한 운동에너지의 원천은 편모의 주변부에 배열된 미토콘드리아에 의해 공급된다는 것은 주지의 사실이다. 그리고 미토콘드리아는 정자변형과정에서 여러가지 형태적 변화를 거쳐 축사의 주변부에 규칙적으로 배열하게 되는데, 이런 과정에 의해 형성된 미토콘드리아의 형태와 배열상태는 종을 구분짓는 key로 이용되고 있다(Phillips, 1971)는 점에서 매우 흥미롭다.

따라서 본 연구는 北美가 원산이며, 1958년 국내에 유입된 대표적 도입해충인(Kim, 1967) 미국 흰불나방을 재료로 하여 정자변형과정에 따른 정자내 미토콘드리아의 形態分化過程을 규명하고자

시도하였다.

材料 및 方法

서울 근교의 야산에서 채집한 미국흰불나방 (*Hyphantria cunea* Drury)을 실내에서 사육하여 終齡幼蟲과 蛹(번데기), 그리고 羽化直後の 성충중에서 雄性 개체만을 선별하여 실험재료로 사용하였다.

해부현미경하에서 적출한 精巢를 2.5% paraformaldehyde-glutaraldehyde(4°C, pH 7.4, phosphate buffer)와 1% OsO₄(4°C, pH 7.4, phosphate buffer)로 前固定 및 後固定한 다음, ethanol 농도상승 순서로 脫水하였으며, propylene oxide로 치환하여 Epon-Araldite 혼합액에 包埋하였다. 포매된 조직은 LKB ultramicrotome 으로 초박절편을 제작하여 copper grid에 부착시킨 다음, uranyl acetate와 lead citrate로 二重染色하여 JEM 100 CX-II형 전자현미경으로 80 kV에서 관찰하였다.

結果

성세포내 미토콘드리아의 형태 분화가 시작됨을 탐지할 수 있는 징후는 감수분열 중 제 1차 성숙분열이 끝난 후 형성된 제 2차 정모세포 시기에 세포질내 산재되었던 많은 미토콘드리아가 핵을 중심으로 세포질의 한쪽 부분에 집적되기 시작함으로써 시작되었다.

제 2차 정모세포의 핵은 불규칙하게 分枝된 葉狀이었고, 핵의 체적에 비해 仁(nucleolus)이 발달되어 있었으며, 핵질의 전자밀도는 비교적 낮고 일정한 진정염색질(euchromatid)의 상태를 유지하고 있었다. 세포질에서 미토콘드리아가 집적되는 부위는 침체 형성에 관여하는 골지복합체의 생성부와 항상 반대쪽에 위치하였고, 집적되기 시작하는 미토콘드리아의 주변부에서는 세포운동과 관련된 微細小管(microtubule)이 발달되어 있었다(Fig. 1).

제 2차 성숙분열이 끝난 직후에 형성된 정세포

에서는 핵 주변부의 세포질에 집적되었던 많은 미토콘드리아가 상호 융합되고 신장되면서 전체적으로 구형 또는 타원형의 미토콘드리아 복합체를 형성하였으며, 복합체의 주변부에는 미세소관이 다수 분포하였다(Fig. 2). 이 복합체는 정세포가 정자변형과정에 들어간 후, 거대한 미토콘드리아 구형체인 副核(Nebenkern)을 형성하였으며, 이때 형성된 부핵의 직경은 약 4.0 μ m로서, 이 시기 핵의 평균직경인 2.4 μ m에 비해 훨씬 대형이었다(Fig. 3).

부핵의 주변부에는 미세소관이 집중 분포되어 있었고, 대략 좌우대칭을 이룬 부핵의 대칭면 한쪽에는 미세소관의 조합에 의해 이루어진 軸絲(axial filament)가 형성되어 있었다. 골지복합체로부터 분비된 침체과립이 핵의 한 부분에 부착되기 시작하는 시기를 전후하여 중심체에서 형성된 축사가 정세포의 장축을 따라 伸張되기 시작하였으며, 이에 따라 부핵도 동일한 방향으로 신장되기 시작하였는데, 이러한 신장현상은 성숙정자에 필요한 편모의 길이에 이를 때까지 계속되었다(Fig. 3).

장축방향의 신장이 계속됨에 따라서 부핵의 직경도 급속히 가늘어져서, 결국 축사를 중심으로 거의 대칭을 이룬 두개의 미토콘드리아 誘導體(mitochondrial derivatives)로 이분되었는데, 이분된 미토콘드리아의 모양과 전자밀도는 대부분 동일하였으나, 일치하지 않는 경우도 흔히 관찰되었다(Fig. 4). 또한 두 미토콘드리아 유도체의 사이와 각 유도체의 주변부에 8-10개의 미세소관이 정세포의 종축방향을 따라서 규칙적으로 배열되어 있었고, 그 주변부에는 횡축방향과 평행하게 배열된 다수의 미세소관도 형성되어 있었는데, 특히 횡축방향의 미세소관은 미토콘드리아뿐 아니라 축사의 주변부에서도 관찰되었다(Fig. 5).

정자변형과정이 계속 진행됨에 따라서 미토콘드리아 유도체들은 더욱 가늘게 신장되었고, 부위에 따라서는 좌우가 비대칭적으로 나타나기도 하는데, 특히 미토콘드리아 주변에 장축방향으로 배열된 미세소관의 수가 이 전의 시기에 비해 조금씩 감소되기 시작하였으며(Fig. 6), 이런 현상은 분화가 진행됨에 따라 더욱 현저하여 분화가

완료된 성숙정자에서는 완전히 소실되었다(Fig. 9). 또한 이 시기를 전후하여 미토콘드리아 유도체의 기질 내부에는 전자밀도가 높은 구형의 결정과립들이 형성되기 시작하였다(Fig. 6). 특징적으로 이 과립들은 축사를 기준으로 먼 원위부쪽에서부터 생성되었고, 생성후에는 상호 융합되면서 準結晶物質의 덩어리를 형성하였다(Fig. 7).

미토콘드리아 분화의 후기단계에서 원형질막으로 둘러싸인 각 정세포의 평균직경은 미부의 경우 약 $0.7 \mu\text{m}$ 정도로 이전의 시기에 비해 급격히 축소되었고, 미토콘드리아의 경우는 장축의 직경이 약 $0.3 \mu\text{m}$, 단축의 직경은 약 $0.1 \mu\text{m}$ 로 감소되었다. 미토콘드리아 유도체를 종축방향으로 둘러싸인 미세소관의 수는 약 5-6개로 더욱 줄어들었고, 미토콘드리아 내부의 준결정물질은 더욱 집적되어 전자밀도가 매우 높은 덩어리를 이루었다(Fig. 7).

정자변형과정이 완전히 끝난 성숙상태의 미국 흰불나방 정자는 두개의 미토콘드리아 유도체가 축사를 따라서 정자의 말단부까지 길게 형성되어 있었는데, 모든 정자에서 거의 동일한 위치에 부착되어 있었고 전자밀도가 높은 준결정물질이 기질 내부를 완전히 채우고 있었다(Fig. 8).

미국 흰불나방 성숙정자의 미토콘드리아는 尾部(tail region)의 경우 대칭을 이룬 두개의 타원형 미토콘드리아 유도체로 분리되어 있는데 비해(Fig. 8), 中片(middle piece)에서는 두개의 유도체가 하나로 완전히 융합되어 있는 특이한 형태로 관찰되었다. 또한 완전히 성숙된 정자에서 미토콘드리아 유도체의 대칭면은 두개의 중앙미세소관을 지니는 편모의 대칭면에 대해 항상 오른쪽으로 기울어져 있었고, 그 각도로 항상 일정한 것으로 관찰되었다(Fig. 9).

考 察

Anderson(1950), Phillips(1969, 1970, 1971), Baccetti 등(1970, 1974, 1976), Dallai(1974), Dallai와 Afzelius(1980, 1982), Afzelius 등(1985), Moon 등(1988a) 등은 주로 Dermoptera, Plecoptera, Hemiptera, Diptera, Tricoptera,

Lepidoptera 등의 여러종을 대상으로 관찰한 결과, 종에 따라 한 피낭속에 간직된 정자의 수와 정자의 모양이 매우 다양함을 밝힌 바 있는데, 특히 정자의 형태적 차이는 주로 축사의 둘레에 부착된 미토콘드리아의 구조적인 차이에서 기인하는 것으로 보고되고 있다.

정자형성과정에서 일어나는 미토콘드리아 재배열 현상에 관한 연구는 일찌기 Bowen(1922), Pollister(1930) 등에 의해 감수분열 직후, 세포의 일부분에서 거대한 구형체를 만드는 재배열과 융합과정이 시작되는 것으로 보고된 이후, André(1962), Pratt(1968) 등은 전자현미경적 관찰을 통해 정모세포 미토콘드리아의 점진적 융합에 의해 서로 맞물린 두개의 미토콘드리아가 형성된다고 하였으며, Phillips(1971)는 이런 과정을 거쳐 형성된 두개의 미토콘드리아는 그 형태가 복잡하지만, 기능적으로 다른 미토콘드리아와 동일하다고 하였다.

미국 흰불나방의 경우 미토콘드리아 분화의 시초단계는 제 1 차 성숙분열이 끝난 제 2 차 정모세포의 말기에, 산재되었던 미토콘드리아가 세포질 일부에 집적됨으로써 시작되었고, 이 시기를 전후하여 핵주변부의 세포질에 침체과립의 분비와 관련된 골지복합체가 발달되기 시작하는 점으로 미루어 미토콘드리아의 집적시기는 침체형성시기와 일치함을 알 수 있었다. 또한 제 2 차 성숙분열 후의 정세포에는 집적된 미토콘드리아의 신장과 융합에 의해 거대한 구형의 미토콘드리아 복합체가 형성되었고, 이 시기는 미세소관들의 조합에 의해 이루어진 축사가 형성되는 시기와 거의 동일한 것으로 관찰되었는데, 이는 *Euschistus*속의 경우 서로 맞물린 2개의 미토콘드리아 복합체가 구형을 형성하는 시기를 전후하여 핵주변부의 중심체로부터 편모가 자라나온다는 보고(Phillips, 1970)와도 일치하였다.

이러한 거대 미토콘드리아 복합체는 副核(Nebenkern)이라고 명명되었는데, 부핵의 모양은 보통의 곤충들에서는 구형이지만, 어떤 종류에서는 環(ring)의 모양을 하고 있으며, 형태에 관계없이 서로 맞물린 두개의 미토콘드리아 덩어리를 형성할 때까지 미토콘드리아의 융합은 계속된다고 하였다(Pollister, 1930). 미국 흰불나방의

경우도 동일한 과정에 의해 침체과립이 핵의 한 부분에 부착되는 시기에 부핵의 장축방향 신장이 시작되었고, 결국 2개의 미토콘드리아 유도체를 형성하였는데, 種에 따라서는 이 과정이 일어나는 동안 두개의 유도체가 편모주위에 나선모양으로 위치하는 경우도 보고된 바 있다(Phillips, 1970).

그리고 정세포에서 두개의 유도체가 축사의 양쪽에 위치한 후, 종축방향으로의 신장이 계속되는 동안에 미토콘드리아의 cisternae는 수직방향으로 매우 규칙적인 배열상태를 유지하고 있음이 본 실험에서 관찰되었다. 이러한 현상은 Yasuzumi와 Oura(1965), Tokuyasu(1974, 1975), Kessel(1981, 1985), Moon 등(1988b) 등에 의해 여러 종에서 관찰된 결과들로 미루어 볼때, 미토콘드리아 유도체의 cisternae 배열상태는 모든 곤충의 정자에서 거의 동일한 것으로 생각되며, 일부 종에서 이러한 미토콘드리아 구조에 대한 관찰이 미비되어 있는 이유는 André(1962)가 일찌기 밝힌 것처럼 미토콘드리아 유도체의 cisternae 구조가 수직방향으로 배열되어 있으므로 횡단면에서는 흔히 관찰되지 않기 때문인 것으로 사료된다.

또한 정세포에서 두개의 미토콘드리아 유도체가 편모의 양쪽에 위치하게 된 후, 최종적으로 그 종에 특징적인 미토콘드리아 유도체의 재형성과정과 분화가 시작되는데, 종에 따라 크기가 같고 대칭적인 두개의 유도체를 가지거나(Tandler and Moriber, 1966), 크기가 서로 다른 두개의 유도체를 가지며(Yasuzumi and Oura, 1965), Trichoptera에 속하는 종에서와 같이 단지 하나의 유도체를 가지는 종류도 보고된 바 있다(Phillips, 1971).

그러나 미국흰불나방에서 관찰된 것처럼 中片에서는 하나로 융합되어 있고, 尾部에서는 크기가 같은 두개의 유도체로 분리되어 있는 모양은 현재까지 보고된 바가 없는 특이한 형태인 것으로 확인되었다. 그러나 본 연구에서 관찰된 미국흰불나방 정자의 일반적인 구조가 나비목의 다른 종의 것과 본질적으로 거의 유사하다는 점으로 미루어 미토콘드리아 유도체의 이러한 구조가 유일하게 이 종만이 가지는 특징적 구조라고는 생각되지 않으며, 다른 종에서 이런 구조에 대한 관찰이 미

비되어 있는 이유에 대해서는 검토가 필요한 것으로 생각된다.

한편, 미토콘드리아 cisternae의 재배열이 이루어진 후에 미토콘드리아 유도체의 기질내부에 함유되는 準結晶物質(paracrystalline material)의 존재는 André(1962)에 의해 처음으로 보고된 이후, 지금까지 관찰된 거의 모든 종에서 그 구조가 확인되었다. 준결정물질도 종에 따라서 다양한 형태로 관찰되었는데, 횡단면으로 관찰했을 때, 육각형의 격자모양이나 벌집모양, 또는 작은 반점이 있는 육각형으로 나타나거나(Phillips, 1969), 종단면에서 주기적인 줄무늬가 나타나는 종류도 있으며(André, 1962), 형태적으로 상이한 두종류의 물질로 이루어져 있거나, 보통의 crystalloid 대신에 치밀한 無定型的의 물질을 가진 종류도 보고된 바 있다(Phillips, 1970).

미국흰불나방의 경우, 전자밀도가 높고 치밀한 준결정물질은 미토콘드리아 유도체의 기질이 이 물질로 완전히 대체될 때까지 계속적인 축적이 일어나는 것으로 관찰되었으며, 준결정물질의 기질 내 생성 및 축적과정은 항상 축사를 중심으로 遠位部에서부터 시작됨을 확인할 수 있었다.

引用文獻

- Afzelius, B. A., R. Dallai, and P. Lindskog, 1985. Spermatozoa of Saldid bugs (Insecta, Hemiptera, Leptodomorpha). *J. Ultrastruct. Res.* **90**: 304-312.
- Anderson, J. M., 1950. A cytological and histological study of the testicular cyst-cells in the Japanese beetle. *Physiol. Zool.* **23**: 308-316.
- André, J., 1962. Contribution a la connaissance du chondriome. Etude de ses modifications ultrastructurales pendant la spermatogenèse. *J. Ultrastruct. Res. Suppl.* **3**.
- Baccetti, B., 1972. Insect sperm cells. *Adv. Insect Physiol.* **9**: 315-397.
- Baccetti, B., R. Dallai, and H. Rosati, 1970. The Spermatozoon of Arthropoda. (VII) Plecoptera and Trichoptera. *J. Ultrastruct. Res.* **31**: 212-228.
- Baccetti, B., R. Dallai, F. Giusti, and F. Bemini, 1974. The Spermatozoon of Arthropoda. (XXIII) The "9-9-3" spermatozoon of simuliid Diptera. *J. Ultrastruct. Res.* **46**: 427-440.
- Baccetti, B., V. Pallini, and A. G. Burini, 1976. The accessory fibers of the sperm tail. *J. Ultrastruct. Res.*

- 54: 261-275.
- Bowen, R. H., 1922. Studies on insect spermatogenesis. (II) The components of the spermatid and their role in the formation of the sperm in Hemiptera. *J. Morphol.* **39**: 79.
- Dallai, R., 1974. Spermatozoa and phylogensis. A few data on insect apterygota. *Pedobiologia* **14**: 148-156.
- Dallai, R. and B. A. Afzelius, 1980. Characteristics of the sperm structure in Heteroptera (Hemiptera, Insecta). *J. Morphol.* **164**: 301-309.
- Dallai, R. and B. A. Afzelius, 1982. On a zipper-lines or particle arrays within the plasma membrane of hemipteran spermatozoa (Heteroptera, Insecta). *J. Ultrastruct. Res.* **80**: 197-205.
- Godula, J., 1979. Studies of the spermatogenesis in the firebug, *Pyrhocoris apterus* L. (Heteroptera). (1) A unique basal body-associated plaque carrying a microtubule organizing center (MTOC) in spermatids. *J. Ultrastruct. Res.* **75**: 72-96.
- Itaya, P. W., S. A. Thompson and P. M. Heidger, Jr., 1980. Fine structure of late storages of spermiogenesis in *Leptocoris trivittatus* Say (Hemiptera: Coreidae). *Int. J. Insect Morphol. & Embryol.* **9**: 135-145.
- Kessel, R. G., 1981. Origin, differentiation, distribution and possible functional role of annulate lamellae during spermatogenesis in *Drosophila melanogaster*. *J. Ultrastruct. Res.* **75**: 72-96.
- Kessel, R. G., 1985. The relationships of annulate lamellae, fibrogranular bodies, nucleolus, and polyribosomes during spermatogenesis in *Drosophila melanogaster*. *J. Ultrastruct. Res.* **91**: 183-191.
- Lee, Y. H., 1985. Spermatogenesis of the water strider, *Gerris paludum* (Heteroptera: Gerridae). *J. Ultrastruct. Res.* **90**: 235-250.
- Lee, Y. H. and C. E. Lee, 1987. Ultrastructural studies of spermiogenesis in *Lacotrepes japonensis*. *Korean J. Entomol.* **17**: 199-214.
- Kim, C. W., 1967. The control of fall-web worms, *Hyphantria cunea* Drury. *Entomol. Res. Bull.* **3**: 6-30.
- Moon M. J., K. O. Lee, C. W. Kim, and W. K. Kim, 1988a. Studies on the testis of the fall-web worms, *Hyphantria cunea* Drury. (I) Fine structure of the testis. *Korean J. Electron Microscopy* **18**: 49-59.
- Moon M. J., B. H. Lee, C. W. Kim, and W. K. Kim, 1988b. Studies on the testis of the fall-web worms, *Hyphantria cunea* Drury. (II) Fine structure of the mature sperm. *Korean J. Entomol.* **18**: 155-167.
- Payne, F., 1966. Some observations on spermatogenesis in *Gelastocoria oculatus* (Hemiptera) with the aid of the electron microscope. *J. Morphol.* **119**: 357-382.
- Phillips, D. M., 1969. Exceptions to the prevailing pattern of tubules (9-9-2) in the sperm flagella of certain insect species. *J. Cell Biol.* **40**: 28-43.
- Phillips, D. M., 1970. Insect sperm: their structure and morphogenesis. *J. Cell Biol.* **44**: 243-277.
- Phillips, D. M., 1971. Morphogenesis of the laciniate appendages of lepidopteran spermatozoa. *J. Ultrastruct. Res.* **34**: 567-585.
- Pollister, A. W., 1930. Cytoplasmic phenomena in the spermatogenesis of *Gerris*. *J. Morphol.* **19**: 155.
- Pratt, S. A., 1968. An electron microscope study of nebenkern formation and differentiation in spermatids of *Murgantia histrionica* (Hemiptera, Pentatomidae). *J. Morphol.* **126**: 31-66.
- Stanley, H. P., J. T. Bowman, L. J. Romrell, S. C. Reed, and R. F. Wilkinson, 1972. Fine structure of normal spermatid differentiation in *Drosophila melanogaster*. *J. Ultrastruct. Res.* **41**: 433-466.
- Tandler, B. and L. G. Moriber, 1966. Microtubular structures associated with the acrosome during spermiogenesis in the water-strider *Gerris remigis* (Say). *J. Ultrastruct. Res.* **14**: 391-404.
- Tokuyasa, K. T., 1974. Dynamics of spermiogenesis in *Drosophila melanogaster*. (IV) Nuclear transformation. *J. Ultrastruct. Res.* **48**: 284-303.
- Tokuyasa, K. T., 1975. Dynamics of spermiogenesis in *Drosophila melanogaster*. (V) Head-tail arrangement. *J. Ultrastruct. Res.* **50**: 117-129.
- Yasuzumi, G. and C. Oura, 1965. Spermatogenesis in animals as revealed by electron microscopy. (XV) The fine structure of the middle piece in the developing spermatid of silkworm *Bombix mori* L.. *Z. Zellforsch.* **67**: 502.

(Accepted November 30, 1991)

**Morphological Differentiation of the Mitochondria during Spermiogenesis
in *Hyphantria cunea* Drury**

Myung Jin Moon and *Woo Kap Kim (Department of Biology, Dankook University, Cheonan
330-714, Korea; *Department of Biology, Korea University, Seoul 136-701, Korea)

Morphological differentiation of the mitochondria in fall-web worms, *Hyphantria cunea* during the spermiogenesis was studied with electron microscope. Small mitochondria of the early spermatid were aggregated into a rounded mass and were transformed into giant mitochondrial derivatives, known as the Nebenkern. The Nebenkern was elongated along the longitudinal direction of the spermatid, and subdivided into two mitochondrial derivatives. Each derivative contains unequal size and electron densities at first, but possesses equal morphology by the successive differentiation. Mitochondrial derivatives of the late spermatid show a granular accumulation of the paracrystalline inclusion within the matrix, and these derivatives were surrounded by several microtubules. Mature sperms contain two mitochondrial derivatives with electron dense paracrystalloids at the tail region, but only one derivatives persist at the middle piece of the sperm characteristically.

Explanation of Figures

Fig. 1. Mitochondria (M) of the late spermatocytes are aggregated at one side of the cell but are still separate. N: nucleus of the spermatocyte. ($\times 17,000$).

Fig. 2. Partial aggregation of the spermatid mitochondria, apparently signaling the beginning of Nebenkern formation. ($\times 21,000$).

Fig. 3. Numerous small mitochondria are aggregated into a rounded mass and are transformed into giant mitochondrial derivatives, the Nebenkern (NK). ($\times 23,000$).

Fig. 4. Longitudinal sectioned electron micrograph showing the elongation of the Nebenkern mitochondria (NK). N: nucleus of the spermatid. ($\times 16,000$).

Fig. 5. At the early stage of the Nebenkern elongation each spermatid possesses two mitochondrial derivatives (M) of unequal size and unequal electron density. These mitochondrial derivatives are surrounded by several microtubules (arrows). But no intramitochondrial paracrystalloid has yet formed in either derivatives. F: axial filament. ($\times 70,000$).

Fig. 6. Mitochondrial derivatives show a small accumulation of dense granules (arrows). This granular accumulation is an early stage in formation of the intramitochondrial paracrystalline inclusion. ($\times 164,000$).

Fig. 7. At the late stage of the mitochondrial differentiation, each spermatid possesses two mitochondrial derivatives (M) of equal size. The paracrystalline inclusion (arrows) within the derivatives is larger than that in Fig. 6. Microtubules lie close to the two mitochondrial derivatives. ($\times 212,000$).

Fig. 8. At the tail region of the mature sperm, apparently two mitochondrial derivatives (M) containing intramitochondrial paracrystalloids are observed in equal size. ($\times 330,000$).

Fig. 9. At the middle piece of the mature spermatozoa two mitochondrial derivatives are fuse into one and persist only one derivative (M) which also contains intramitochondrial paracrystalloid. ($\times 88,000$).





