解　説

ヒトや動物はなぜ眠るのか

井　上　昌次郎[1†]
[1]東京医科歯科大学名誉教授

要旨　ヒトや高等動物は連続運転に最も弱い臓器である大脳に頼って生きている．その大脳をうまく管理するための自律機能が睡眠である．つまり睡眠の役割とは大脳を守り，修復し，よりよく活動させることである．発育初期には大脳を創り育てる役割もある．それゆえ睡眠は活動を停止した状態ではなく，活動モードを能動的に切り換えた状態である．大脳を点検修理して保全するノンレム睡眠と大脳を活性化し目覚めさせるレム睡眠とが，その役割を相補的に分担している．睡眠調節の部位は脳幹であり，概日リズム機構（約 1 日周期の眠気リズムを発信する）とホメオスタシス機構（睡眠の過不足から眠りの質と量を決定する）とが協調している．睡眠はさまざまな体内外の要因に依存して多様に修飾され順応性が高い．

キーワード：概日リズム，大脳，ノンレム睡眠，ホメオスタシス，レム睡眠

1.　睡眠の必要性

睡眠が必要不可欠であることは，体験的によく理解されている．慢性的な睡眠不足がさまざまな損失をもたらすことは，ストレスの多い現代の高度技術化社会に急増している睡眠障害によって実証済みである．ヒトや動物でくりかえし実施された断眠実験からは，全断眠（後述するレム睡眠・ノンレム睡眠の区別なく，すべての眠りを奪う操作）であろうと部分断眠（レム睡眠・ノンレム睡眠のどちらかの眠りを奪う操作）であろうと，ミクロのレベルからマクロのレベルまで，生体機能が劣化することが示されている．断眠が長期間にわたると，動物が死に至ることも確認されている．極端な例としては，冬眠中の動物が冬眠（環境温度まで体温を下げ，エネルギー消費を極度に抑制した不動状態）をつづけていると睡眠不足になってしまうので，間欠的に冬眠を中断して体温を上げ熟睡しないと，春まで生き延びられないという事実が知られている．

したがって，睡眠が生存に必須であることは疑う余地はない．しかし，睡眠がなぜ必要なのか，なぜ眠るのかという問題に対しては，いまだに満足すべき解答はない．もちろん，これまでにかなり多くの専門家がいろいろな説明をして，独自の仮説を提案してきた[1)]．とはいっても，それらは睡眠の果たす多様な機能の一部に触れているにすぎない．また，かならずしもその説を客観的に証明できていない．だから，依然として「なぜ？」という疑問は未解決のままである．ここでは，この問題に対して「睡眠は大脳の管理技術である」という見解から出発してみよう．

2005 年 7 月 21 日受付
†〒 143-0023　東京都大田区山王 1-41-18
東京医科歯科大学名誉教授
井上　昌次郎
Tel/Fax:03-3772-4061

2.　睡眠と脳の発達

睡眠はすべての生物に一様にそなわっているわけではない．多くの無脊椎動物や変温性の脊椎動物では，睡眠と覚醒を定義することがむずかしい．単なる休息ないし不動状態と活動状態とを厳密に区別できないからである．したがって，睡眠の起源はせいぜい脳をもつ比較的高等な動物が出現した時点までしか遡ることができない．さらに，“まともな眠り”（真睡眠）は恒温性の鳥類や哺乳類にしか認められない[2)]．

ヒトや高等動物を特徴づけるのは，大脳がよく発達していることである．神経細胞のネットワークからなる大脳は，迅速な情報処理と機能調節のための専用器官として，身体の最先端に配置され，機能を集中させ統合させる方向に進化してきた．その結果，“大脳のための管理技術”として，高度の活動を伴う「覚醒」を支えるため新たに自律的な生理機能が必要となった．これが「睡眠」である．つまり，睡眠と覚醒という意識状態の能動的な切替えは，大脳の発達とともに出現した高等動物の新しい生存戦略である．

睡眠を個体発生からみると，睡眠の質と量は年齢的な発育に大きく依存している．胎児期や新生児期の睡眠は未分化で睡眠総量が多く，昼夜にわたって小刻みにくりかえされる．ヒトの新生児や乳児の睡眠時間は，1 日の半分から 3 分の 2 を占める．そのなかで，レム睡眠の原型である「動睡眠」の割合がきわめて大きく，ほぼ 50％になる．ちなみに，成人の眠りにレム睡眠が占める割合は 20 ～ 25％である．

動睡眠の割合が大きいのは，眠りの進化という面からみると，レム睡眠が古い眠りであるからと考えられる．系統発生で古いものほど，個体発生で早く出現するという原則があるから，古いレム睡眠がまず優勢になるのである．ヒトの胎児では動睡眠が 100％の状態から，ノンレム睡眠の原型である「静睡眠」と「覚醒」が分化してくる[3)]．

動睡眠が個体の発育初期に非常に多いのは，これが脳の発育に貢献しているからである．動睡眠は発育途上の脳のなかで，神経回路網つまりハードウエアを構築し，試運転し，整備点検するのに利用されている．つまり，まだ覚醒していない構築中の大脳を覚醒させるためには，このような「眠り」が必要なのである．全睡眠に占める動睡眠ないしレム睡眠の割合は，発育とともに劇的に減っていく．これは大脳があるところまで成熟したからと考えられている．

3. 解析法からみた 2 種類の睡眠―行動睡眠と脳波睡眠

ヒトでは睡眠はみかけでそれとわかる．まず，まぶたが閉じられることが，最も基本的な変化として観察できる．ついで，頸筋が弛むので，頭がうなだれたり左右前後に揺れだしたりし始める．寝入りばなの浅い眠りでは，全身の筋肉がすっかり弛緩することはないから，立ったり座ったりしていてもうとうとできるが，しだいに深い眠りに入ると，身体を支えることがむずかしくなってくる．

こうして，ヒトも動物も独特の眠りの姿勢（寝相）をとって寝ることになる．寝相にはいろいろあるが，ヒトはふつう横になって眠る．基準化された行動から定義された睡眠を「行動睡眠」と呼んでいる．

下等動物では，行動睡眠から現象を解析するほかない．たとえば，多くの魚ははっきりとした昼行性または夜行性の活動パターンを示し，休息期には活動を停止する．砂に潜る・岩に寄りかかる・石や藻など物陰に隠れる・水面に浮かぶ・ゆっくり泳ぐなどの行動からみて，あきらかに眠っているようにみえる．しかし，魚類，両生類，爬虫類など外温性（変温性）脊椎動物の「眠り」は，内温性（恒温性）の鳥類や哺乳類の真睡眠とはかなり異なり，脳波の変化で睡眠と覚醒を厳密に判別できない．大脳は相対的に非常に小さく，意識水準の切り替えを脳波に反映するほどの正確な変化を示さないからである．

しかし，行動睡眠から睡眠と覚醒の正確な区別はできない．だから，高等動物で厳密な検査をするときは，大脳が発生させる電気変化（脳波）をもとにして判断する．これを「脳波睡眠」と呼んでいる．脳波はさまざまな周波数帯域の波（ベータ波，アルファ波，シグマ波，シータ波，デルタ波など）がある．脳波パターンから覚醒・レム睡眠・ノンレム睡眠の 3 状態が明確に定義できる．

4. 睡眠の進化

脳の発達とともに睡眠の様式も発達する．無脊椎動物の行動睡眠は，睡眠とは呼べないほど概日リズムの性質が強い．たとえば，昆虫の不活動状態は昼夜リズムと同調して，1 日の決まった時間帯にステレオタイプに出現する．

現代科学としての睡眠研究はほとんどが脊椎動物を対象にしておこなわれ，しかも大半が実験用に飼育されている哺乳動物でおこなわれてきた．だから，昆虫ばかりか無脊椎動物全般さらには非哺乳類の脊椎動物全般の睡眠についても正確な情報が欠けている．構造的にも機能的にも脊椎動物とは異なる中枢神経系をそなえた無脊椎動物の「睡眠様行動」が，どこまで哺乳類の睡眠と共通項をもっているのかという問題も，概日リズムに関連する遺伝子の類似性を除けば，ほとんど解明されていない．

脊椎動物は大脳つまり終脳を新しい中枢として発足させたから，終脳睡眠を指向する管理技術が開発されることになった．外温性脊椎動物である魚類や両生類の示す「原始睡眠」，これを一歩進めた爬虫類の「中間睡眠」，内温性脊椎動物である鳥類と哺乳類の「真睡眠」がそれである．さらに，鳥類と哺乳類は真睡眠を脳波睡眠として判別できるレム睡眠とノンレム睡眠へと分化させた．

この過程には，外温性から内温性への移行に伴って，概日リズムの拘束を離れ，時刻に依存しないで脳のホメオスタシスを確立することが必要となったからと考えられる．内温性への移行は，外部環境のみならず内部環境（体内環境）の諸条件への適応も要求されるからである．

レム睡眠は原始睡眠さらには中間睡眠と共通する性質をもっている．レム睡眠は，大脳皮質があまり発達していなかった外温性動物が，身体を休ませることを主目的に開発した休息法を基本としている．そこでは身体を不動化させることが，最も重要な機能だった．言い換えれば，骨格筋の緊張を解いて，身体を麻痺状態におくのである．こうすれば意識水準の低下した状態で，勝手に動いて危険を招くこともない．また，変温動物では，活動しないと体温は自然に下がるから，エネルギーの節約にもなったはずである．

しかし，鳥類や哺乳類のような内温性動物になって，大脳が大きく発達すると，事情は一変した．骨格筋の緊張を解いて身体を不動化させるだけでは，体温を下げてエネルギー節約をはかることも，発達した大脳機能を低下させることもできない．だから，レム睡眠はそのままでは欠陥技術となってしまった．そこで新たに開発されな新技術がノンレム睡眠であろう．そのさいレム睡眠は捨てられることなく，新しい付加価値とともに生き残った．レム睡眠の最も重要な役割は，意識水準や体温を下げてしまうノンレム睡眠と，その逆の性質をもつ覚醒との間にうまく橋渡しをすることである．ちなみに，胎児脳を覚醒させるのは，レム睡眠の原型である動睡眠なのである（前述）．

5. 2 種類の脳波睡眠―ノンレム睡眠とレム睡眠

レム睡眠とは，急速眼球運動（レム）を伴う睡眠という意味である．体はぐったりしているのに，脳は覚醒に近い状態になっていて夢を見ていることが多い眠りである．ノンレム睡眠とは，レム睡眠でない眠りという意味で，いわゆる安らかな眠りである．ヒトでは，浅いまどろみの状態から，ぐっすり熟睡している状態まで，脳波をもとに 4 つの睡眠段階に分けている．

健康な成人では，これら 2 種類の眠りが約 1.5 時間の単位

をつくり，いくつかの単位がまとまって 1 夜の睡眠を構成している．最初の 2 単位つまり寝入りばなの約 3 時間のあいだに，深いノンレム睡眠（熟睡）がまとまって出現する．以後は，浅いノンレム睡眠とレム睡眠の組み合わせとなる．そして，各単位の終了時ごとに目覚めやすくなる．

レム睡眠とノンレム睡眠はたくみに組み合わされ，それぞれが異なる役割を分担しながら，睡眠状態は時間的にも内容的にもきわめて動的に構成されている．大脳があるところまで成熟した段階では，ノンレム睡眠は大脳を鎮静化する眠り，レム睡眠は大脳を活性化する眠りとなる．したがって，大脳の温度・血流量・ブドウ糖代謝・ニューロン活動・意識水準のいずれも，ノンレム睡眠時に下降しレム睡眠時に上昇する．

このように，両者の性質は対比的であり相補的である．だから，俗にいう「ノンレム睡眠は脳の眠り・レム睡眠は体の眠り」とか「ノンレム睡眠は深い眠り・レム睡眠は浅い眠り」のような言い回しは，単純明快ではあるがいずれも正しくない．修正されなければならない重大な誤解である．

6. 2 種類の睡眠調節法―概日リズムとホメオスタシス

睡眠調節には 2 つの基本法則がある．「睡眠は 1 日を単位とするリズム現象であり，脳内に存在する生物時計の影響下にある」というのが第 1 法則である．これを概日性の調節方式あるいは時刻依存性の調節方式と呼ぶ．「先行する睡眠不足の程度によって，後続する睡眠の質と量とが決定される」というのが第 2 法則である．これを時刻非依存性の調節方式あるいホメオスタシス性の調節方式と呼ぶ．

睡眠はこれら二本建ての調節方式でコントロールされている．第 1 法則には，体外環境の安定した未来を当て込んで，前向きにプログラムが設定されている．また，第 2 法則には，体内環境の変動した過去を振り返り，後向きに補償できるようになっている．

これら 2 つの法則は協調して相補的であるが，ほんらい生体が進化の過程で別々に獲得したものとみなされ，それぞれ独立に作用を発現することができる．後者のほうがより新しい高度技術であり，より適応性に富んでいる．なぜなら，大脳の発達とともに，より高い覚醒レベルとより長時間の覚醒の持続が可能となったが，このような機能を支持しているのが後者の機構であるからである．

第 1 法則によって，眠気は時刻とともに変化する．生物時計の活動－休息リズム（概日リズム）信号にもとづいて脳は眠気を発生させるから，休息期の時間域（ヒトでは夜間）のほうが，活動期の時間域（昼間）よりも眠るのに都合がよい．また，ヒトでは約半日周期のリズムもあるから，正午過ぎの一時期に眠気がすこし高まる．睡眠はさらに短い周期（長さは動物種で異なり，ネズミでは約 10 分）の超日リズム現象でもあり，小刻みな睡眠エピソードのくりかえしで構成される．

おもしろいことに，生物時計の 1 日は正確な 24 時間ではない．種差・個体差があって，多くは 20 ～ 28 時間の範囲に分布する．「概日」とはその意味である．たとえば，ヒトでは約 25 時間である．したがって，1 日が 24 時間という外界の昼夜リズムとのずれを生じる．このずれを修正するため，外界の昼夜リズムや社会リズムが主時計の役割をして，無意識のうちに生物時計をリセットしている．

しかし，活動と休息のリズムがたいへん不規則あるいは恒常で，外界要因が生物時計をリセットしにくくなると，生物時計の生得的なリズムで生活する結果になる．こうなると，昼夜や社会の 24 時間周期と同調できなくなり，ときには昼間にたえがたい眠気に襲われることにもなる．社会生活との不適合が生じるのである．眠気ないし眠りのコントロールにとって規則的な生活をすることが大切なのはそのためである．

第 2 法則によって，睡眠をコントロールする脳（眠らせる脳）は，1 日の時刻にかかわりなく，先行する睡眠不足量をもと，後続する眠りの質と量を決定している．そのため，眠らずにいる時間（断眠時間）と睡眠欲求とのあいだには強い相関関係があって，断眠時間が延長するにつれて，眠気は直線的に増大する．なにはともあれ眠りたくなり，自力で覚醒しつづけることは不可能となる．

断眠後の睡眠（回復睡眠）には，不足量に応じて睡眠が質的にも量的にも大きく変化し，いわゆる「はねかえり現象」（リバウンド）が出現する．断眠時間が長いほど，深い眠りが多量に出現するのである．これが熟睡であり，ヒトでは日常でも寝入りばなの約 3 時間のあいだに最も優先的に配分され，睡眠不足の埋め合わせに大きな役割を果たしている．つまり，断眠で生じた眠りの損失分が一定の方式で埋め合わされることになる．

この事実は，生体に一定内容の睡眠が必須のものとしてプログラムされていることを示している．そして，睡眠の不足量が負のフィードバックによって補償される機構が，生体に組み込まれていることがわかる．このさい，睡眠物質（後述）が重要な役割を演じていると考えられる．

7. 2 種類の睡眠調節機構―神経機構と液性機構

「眠らせる脳」である脳幹は 2 種類の脳波睡眠を 2 種類の法則によって調節しているが，睡眠調節機構自体も 2 種類に分化している．すなわち，ニューロン活動にもとづく神経機構と，睡眠物質にもとづく液性機構とであり，両者の相互作用のもとに睡眠覚醒状態が動的に修飾されている．

レム睡眠とノンレム睡眠の睡眠のそれぞれに対して，脳幹は複雑な階層性の神経回路を構成している．しかし，その分化の程度はあまり特殊化したものでなく，広範囲な構造の中に散らばっている．レム睡眠の中枢は，古い脳のなかでもより古い「眠る脳」（中脳・橋・延髄）に首座を置いている．また，ノンレム睡眠の中枢は，古い脳のなかでもより新しい間脳（主として視床下部）および前脳基底部に首座を置いている．それぞれの中枢に対応して並行的に，

覚醒中枢が同様な階層性の神経回路を構成している．

各部位のニューロンが放出あるいは受容する神経伝達物質の種類や役割は，現在さまざまな神経科学・分子生物学・遺伝子工学的な方法を用いて解析されつつあり，かなりよく分かってきた．しかし，全貌はいまだ明らかでない．

神経機構と相補関係にあって，比較的広域的な脳部位を持続的に影響下におくのが液性機構である．液性機構を担う「睡眠物質」は，睡眠欲求の高い状態で脳内あるいは体液内に出現して覚醒を抑制し，睡眠を誘発あるいは維持させる物質の総称である．睡眠物質は現在では数十にものぼり，多種多様である．睡眠物質は，脳脊髄液を介して脳全域に伝えられ，ニューロン活動を広域的に修飾することによって睡眠と覚醒をコントロールしている．筆者らが発見した酸化型グルタチオンという睡眠物質は，睡眠を促進するだけでなく，覚醒時にニューロンの過剰な活動によって生じる細胞毒を解毒して，細胞膜の傷害や細胞死を防ぐとともに，過度の学習および記憶を抑制することにも貢献しているようである．つまり，行動レベルでの睡眠は，分子レベルでは脳内のニューロンを保全しているのである．

最近では睡眠調節機構に関する遺伝子レベルでの研究が急速に進展しつつあるので，脳内の物質的な変化によって睡眠のメカニズムを理解することが近い将来もっと容易になるものと期待される．

8. 睡眠の多様性

睡眠は環境に適応するための技術であり生体を防御するための技術でもある．さまざまな身体内部および外部の環境条件に合わせて，大脳をうまく休息させ，そののちよりよく活動させるための柔軟な生存戦略である．だから，どんな動物も睡眠を放棄したり克服することはできなかった．現存する高等動物はみな眠るのである．睡眠は脳の進化とともにその役割を拡張してきた．しかし，眠ることは筋肉を緩ませる・意識レベルを下げる・栄養補給を断つなどの危険を伴う“命がけ”の行為である．それだけに，睡眠中の安全が確保できる条件をととのえないと，眠るわけにいかない．優先してなすべきことがほかにあるなら，睡眠は順位をそちらに譲らなければならない．

そうなると，安心して睡眠に割り当てられる時間は，かなり限られたものになってしまう．さらに，いつも同じ条件がつづくとは限らない．1 日のうちの限られた条件と時間のもとでうまく眠り，うまく目覚めるために，高等動物は進化の過程でさまざまな方式を開発してきた．睡眠に驚くほどのバラエティーがあることはそのあらわれである．だから，睡眠は本来多様性に富むものである．

睡眠が種属，生息環境，食性，季節，天候，個体，年齢，性，体調などで多様に変化し，高度の順応性を示している事例は，ひろく紹介されよく知られている[1-3]．しかし，柔軟で性能の高い睡眠能力にも許容範囲が存在する．現代社会では長期にわたって過度に睡眠を軽視したり，睡眠パターンを一律な枠に閉じ込めて不自然に歪めたりすることなどによって，深刻なストレスひいては睡眠障害を多発させている．個人の健康のみならず家族や社会の安全ひいては国益を損なうこのような傾向に，わたしたちはいま真剣に対処することを迫られている．

謝辞

本稿執筆の機会を与えてくださった埼玉県立大学保健医療福祉学部の久保田富夫教授に，この場を借りてお礼を申しあげる．

参考文献

1) 井上昌次郎：ヒトはなぜ眠るのか，筑摩書房 (1994).
2) 井上昌次郎：動物たちはなぜ眠るのか，丸善 (1996).
3) J・アラン・ホブソン：眠りと夢，東京化学同人 (1991).



井上　昌次郎（いのうえ しょうじろう）
1965 年東京大学大学院生物系研究科博士課程修了，理学博士．1972 年東京医科歯科大学医用器材研究所教授・大学院医学系研究科教授．睡眠科学・生体制御学専攻．1999 年同大学生体材料工学研究所所長・大学院医歯学総合研究科教授．2001 年定年退官・東京医科歯科大学名誉教授．世界睡眠学会連合理事，アジア睡眠学会会長，日本睡眠学会理事，米国睡眠学会運営委員，ヨーロッパ睡眠学会編集顧問ほか歴任．