解　説

感覚器の成長・発達

常石　秀市[1†]
[1]医療福祉センターきずな

要旨　ヒトにおいて視覚は最大の情報量を得る感覚器であり，その発達は胎児期から始まり幼児期にかけてめざましく進む．その過程には遺伝的要因のみならず，環境要因も大きな影響をもつ．視機能は視力だけでなく，両眼視（立体視），視野，視覚認知も含めたバランスのとれた発達が重要である．聴覚は出生時にはかなり完成しており，言語発達に不可欠なものである．視覚・聴覚中枢の発達にはそれぞれ臨界期があり，発達障害を早期発見しないと修正治療が不可能である．触覚も出生時にほぼ完成しているが，その有効な情報処理には視覚をはじめとした他の感覚との協調と経験が不可欠である．これら感覚器から得られた情報は，姿勢・運動の巧緻性のために不可欠なものである．

キーワード：視覚，聴覚，触覚，視覚誘発電位，聴性脳幹反応

1.　視覚の成長・発達

1.1　はじめに

高等動物において最も多くの情報を感知する感覚器は視覚であり，その発達は出生～3年の間にダイナミックに進行する（表1）．大脳視覚野はカラム構造単位が整然と形成され，対象物の形，色，移動速度・加速度，方向など，それぞれを感知するための視細胞群と視覚皮質カラムが対応している．伝達された視覚情報は，二次，三次視覚中枢，さらに連合線維を介して，前頭葉，側頭葉へと伝達処理され，画像として認識される．これら高次な視覚中枢の発達には，それぞれの機能に対応した発達の臨界期がある．

1.2　視覚器の発生

眼小窩とよぶ浅い凹みが二重壁の眼杯となり，外板は網膜色素上皮に，内板は神経網膜へと分化していく．胎生6週には網膜神経節細胞が現れ，胎生3か月に錐体細胞（色調感知），7か月に桿体細胞（明暗感知）がそれぞれ出現する．胎生8か月頃までには網膜の構築はほぼ完成するが，最も感度の高い黄斑部は生後数か月までを要する．

1.3　胎児期（早産児）の発達

子宮内で視覚刺激を受けることのない胎児においても，視神経から皮質視覚領までプログラムどおりに発達成熟していく．一方，在胎26週の超早産児であっても，生下時，すでに開眼し光を感じることが可能であり，視覚の発達は生後の視覚刺激の影響を受ける．新生児医療の進歩により早産児の障害なき生育が可能となり，本来子宮内でプログラムどおりに進行する神経系の発達を胎外で観察できるようになった．

表1　PL法による視力の発育曲線 (文献5より引用)

胎生 26 週	光に対する瞬目反射　閉瞼反射
	光視覚誘発電位陽性
30 週	対光反射陽性
32 週	視神経の髄鞘化のはじまり
34 週	内耳性眼振
37 週	視放線の髄鞘化のはじまり
新生児	**視力 0.03 ～ 0.05**
（40 週）	視運動眼振
	水平共同運動陽性
	姿勢反射陽性
生後 1 か月	良好な対光反射
2 か月	両眼固視のはじまり
	垂直共同運動陽性
3 か月	非視性輻輳
	眼前のものに対する瞬目反応
4 か月	良好な両眼固視
6 か月	**視力 0.2**
	視性輻輳
8 か月	視野の発達
1 歳	良好な融像
3 歳	**視力 1.0**
	両眼視（立体視）の完成
5 歳	フロスティッグ視知覚発達検査可能年齢
	WISC- Ⅲ 知能テスト検査可能年齢

2008年2月4日受付
†〒675-2456　兵庫県加西市若井町字猪野83-31
医療福祉センターきずな
常石　秀市
Tel: 0790-44-2881　Fax: 0790-44-2929
e-mail: tsuneishi@key.ocn.ne.jp

(1) 視覚誘発電位による視覚発達評価 [1]

早産児の光視覚誘発電位において，主要なピーク N1a 潜時は在胎 30 ～ 40 週（満期）にかけてほぼ直線的に短縮する [2]．このピーク潜時の短縮は視覚路の髄鞘化を反映しており，早産に関係なくプログラムどおりに受胎後週数に相関して進むことが明らかとなった [2－4]．一方，発達によるピーク N1a 振幅の低下は視覚領皮質の分化，すなわち，抑制性後シナプス電位の増強や抑制性サーキットの発達を反映していると考えられる．この波形変化は受胎後週数だけでなく，早産による胎外視覚刺激によって促進修飾される [4]．

1.4 生後の発達

新生児の眼球は構造上もほぼ完成しているが，最も感度の高い中心窩領域は生後 4 か月頃まで成人に近い完成がみられない．乳幼児の屈折状態は遠視であり，3 か月で遠視が一旦強くなり，1 歳で軽減する．

視覚路の髄鞘化は視神経で在胎 32 週，視放線で 37 週に始まる．この現象は光視覚誘発電位のピーク潜時の短縮からも観察できる [3]．すべての視覚路線維が有髄になるのは生後 7 か月頃である．外側膝状体における神経細胞は生後 1 年で急速に大きくなり，2 歳で成人の大きさに達する．皮質ニューロン網の構築は在胎 25 週に始まり，出生ごろに最も活発となり 2 歳頃まで成熟していく．

(1) 視力の発達

視力とは物の形態を識別する能力のことで，2 点を 2 点として分離して認めうる，その間隔の最小値（最小の視角の逆数）で表す．早期に視機能の状態を把握することは，弱視の予防・治療上，非常に重要であり，視力検査法も種々のものが考案され発展してきた．

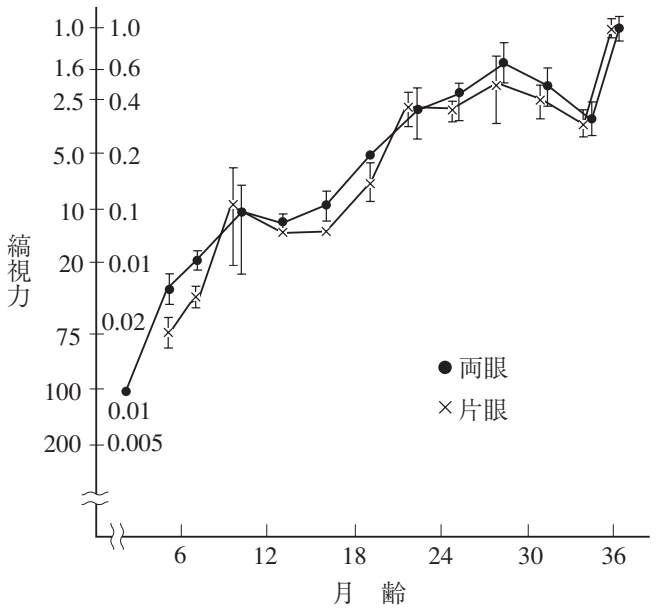


図　PL 法による視力の発育曲線（文献 5 より引用）

a) 視運動眼振（optokinetic nystagmus，OKN 法）

眼前で縞模様のドラム視標を回転させて，誘発される規則性二相性の眼振発生の有無を観察することにより，識別可能な視角（解像力）を求める．

b) 視覚誘発電位（visual evoked potential，VEP 法）

格子縞模様を刺激とした pattern reversal VEP により，P100 ピークを出現させうる最小誘発可能視角をもって視力とする．得られる視力は他の方法よりも良好であり，6 か月で成人レベルの 1.0 に近づく．

c) preferential looking 法（PL 法）

乳幼児が均一な画面よりも模様のある画面を好んで選択し，注視するという生来の特性を利用したものである．様々な縞幅の縞模様を無地の画面と同時に呈示し，被検者の眼の動きから注視したかを評価する．2 か月ごろから　であり，比較的信頼できる方法と考えられている．図に PL 法による視力発育を示す [5]．

d) grating acuity cards 法（縞視力カード法）

原理的には PL 法と同様であるが，さらに簡素化され，新生児や早産児にも行える．一窓法式で縞指標を見せ，中心から約 15cm ほどカードを左右に動かして，それに伴う被検者の眼の動きを眼球電図に記録して判定する．

OKN 法，VEP 法，PL 法などを用いた研究では，以前の報告よりも乳幼児の視力は良好であると考えられており，新生児は 0.03 ～ 0.05 程度の視力をもっていることになる．その後も急激に視力は発達し，6 か月で 0.2，3 歳で 1.0 以上の視力を獲得する．

(2) 両眼視（立体視）の発達

視力を形態知覚の鋭敏さと定義すると，立体視の完成も重要である．生後 16 週頃から眼球の共同運動が確立することにより立体視能は芽生え，20 週までに急速に発達する．立体視の成立には両中心窩固視，融像という機能が必要であり，その完成には 3 歳ごろまでかかる．

立体視に影響する両眼視機能としての輻輳は，視力調節能の発達する 2 ～ 3 か月から芽生えてくる．固視反射は生後 1 か月を過ぎてから出現しはじめ，徐々に固視持続時間も長くなり，4 か月では確実に出現するようになる．眼球運動自体は生後 1 か月までは協調のとれた共同運動は発達しておらず，4 か月以降に確立する．滑動性眼球運動，衝動性眼球運動，眼－頭位協調運動，前庭動眼反射などの出現もこのころである [6]．

両眼視機能の発達には感受性期間が重要であり，生後 3 ～ 4 か月に始まり，2 歳ころが頂点といわれている．この期間における片眼病変や片眼遮蔽による両眼視刺激の欠如は，永続的な障害を残してしまう．

(3) 視野の発達

従来の動的量的視野の検討では，少なくとも 5 歳以上の小児では年齢による視野の発達は認められず，性差も確認できない．視野の中へ視標が入ってくると固視を移動して視標を見る眼球運動が起こることを利用し，この固視移動点をもって幼児の視野を測定する方法が新たに用いられている [7]．本法によると生後 2 か月まではほとんど視野の発達をみないが，その後 8 か月までに耳側と上方への急激な視野拡大が認められる．LED 光刺激と forced choice 観察法を用いての検討では，6 ～ 7 か月の乳児の両眼視野がほぼ成人レベルと同じであると報告している．しかし，片眼視野については鼻側を中心に成人視野よりも狭い．

(4) 視覚認知の発達

固視の発達とともに，いわゆる乳児の微笑み返しとして視覚認知が芽生えてくる．乳児にヒトの顔を見せて，その反応より視覚認知の発達を検討すると，生後 1 か月半では揺れ動くものやコントラストがはっきりしているものなら何にでも微笑むが，3 か月にはヒトの顔に最も反応するようになる．でたらめに目，鼻，口を並べた顔には反応しない．生後 6 か月には見慣れたヒトの顔に最も反応し，7 ～ 9 か月には人見知りが始まる．生後 2 ～ 3 か月において，母親と同じ髪型の顔模型によく反応するという報告もある．

より高次な視覚認知機能の発達評価には対面法などを要するため，被検者の年齢が重要である．視覚認知機能に関連のある定量的検査には，知能テスト（WISC － III）やフロスティッグ視知覚発達検査などがある．その実施が可能となるのは就学前ころである．

2. 聴覚の成長・発達

2.1 はじめに

聴覚は視覚とともに人間が社会生活を営むうえで非常に重要な感覚である．聴覚の発達障害は言語発声にも障害が及び，コミュニケーションの障壁と成りうる．発生上，聴覚器は出生時に成人とほぼ同じ形態を備えており，音刺激に反応する能力をすでに有している．しかし，音を認識し解釈する機能は，生後の発達の中で獲得されていく．

2.2 聴覚器の発生 [8]

(1) 外耳

ヒトの耳介は音の方向感のために重要であるが，その集音効果は小さい．外耳道は共鳴腔として約 10dB の音圧増強効果をもつ．胎生 4 週ごろ耳介結節が形成され，互いに融合して外耳孔を取り囲む耳介を形成する．下顎が発生するにつれ耳介は頭部の外側部に移動し，眼の高さにまで上昇する．外耳道は出生時には比較的浅く，9 歳ころに成人並みの長さに達する．

(2) 中耳

中耳は鼓膜へ伝わった空気振動を内耳液に伝える impedance matching device として機能する．鼓膜とアブミ骨底の面積比，耳小骨連鎖のてこ比にて約 30dB の音響利得がある．耳小骨原基は鼓室腔内に吊り下げられたような形になり，胎生 16 週にツチ骨，キヌタ骨，アブミ骨の順に化骨が始まる．鼓膜は出生時にすでに成人の大きさに達している．

(3) 内耳

アブミ骨から伝えられた音の周波数分析を行い，電気的信号に変換して聴神経へ伝達する．胎生 7 週に内リンパ液を入れた球形嚢から蝸牛管が形成され，2.5 回転してカタツムリ状になる．胎生 8 週ごろ蝸牛管内に感覚上皮の分化が始まり，16 週で頂回転まで順次進んでいく．

(4) 聴覚求心路

聴神経の発達も蝸牛の基底回転から頂回転へ進み，出生までに髄鞘化は完成する．脳幹の聴覚路は橋延髄結合部の蝸牛神経核から視床の内側膝状体に至る一連の中継核と伝導路からなる．髄鞘化は尾側から吻側に進み，下部脳幹は出生時までに十分髄鞘化している．上部脳幹の上丘，さらに内側膝状体は出生時には髄鞘化していない．皮質への投射線維の髄鞘化は出生時には十分ではなく 4 歳までに完成するが，皮質間連合線維の髄鞘化は思春期まで続く．

2.3 聴覚の発達

(1) 胎児期の発達

視覚と異なり子宮内でも胎児は聴覚刺激を受けており，早産による聴覚の発達への影響は視覚ほどには大きくない．早産児の聴覚評価法として聴性脳幹反応が利用される．この検査法は再現性，客観性に優れ，また意識レベルに影響されない点で臨床上有用である．

a) 聴性脳幹反応の発達

髄鞘化の指標としてのピーク潜時の短縮は，在胎 36 週頃までにピーク I － III 間潜時（聴神経～下部脳幹）が短縮し，生後から 1 歳までにピーク III － V 間潜時（脳幹～間脳）が短縮していく．反応波形も同様に，III 波までは生下時すでによく発達しているが，後期成分の成熟は 2 歳頃までかかる．このことは，胎児期に下部脳幹まで髄鞘化が完成しており，上部脳幹の髄鞘化が生後頭側方向へ進むことによく合致している．早産児の研究から潜時の短縮は受胎後週数に比例しており，子宮外においても子宮内同様の発達過程をとることが明かとなっている．

(2) 生後の発達

他覚的な聴力検査法が，各年齢，各発達段階に合わせて考案されている．

a)　聴性行動反応検査（新生児～生後 4 か月）

90dB 前後の強い音刺激に対するモロー反射，驚愕反射，眼瞼反射などの筋収縮に基づく脳幹レベルの反射的運動で評価するものである．聴性脳幹反応の閾値よりも 30dB 程度高い．大脳皮質の発達につれて発現頻度が低くなり，生後 4 か月以降では実際の聴力閾値以上の音刺激が必要になる．

b)　条件詮索反射聴力検査（4 か月～ 2 歳）

音刺激の音源方向に振り向く詮索反応を利用するもので，大脳皮質の関与した反射である．1 歳半～ 2 歳では正確な閾値が測定可能である．

c)　遊戯聴力検査（3 ～ 4 歳）

子どもの遊戯に検査を導入して興味を持たせ，遊びのうちに聴力を測定するものである．音刺激に反応して遊ぶことができるという聴覚と運動能力の発達を応用したもので，より高次な機能検査である．

d)　純音聴力検査（5 歳～成人）

5 歳以上では成人同様な純音を用いた正確な検査が可能である．

これらの聴力検査法によると，4 歳でほぼ成人同等の聴力を獲得すると考えられている．

(3)　先天性難聴

純音聴力検査の閾値の上昇の程度によって，軽度難聴から全聾まで分類される．高度難聴児の発生頻度は 1 万人に 4 ～ 8 人とされるが，米国での聴覚障害児の出生率は 0.4% とも報告されている．言語習得のための臨界期は 3 歳までと考えられており，早期発見と教育が重要である．近年，簡易自動型の聴性脳幹反応測定器を用いて，数分で検査するマス・スクリーニング法が米国で確立された [9]．生後 3 か月以内にすべての難聴児を見いだし，6 か月までに補聴器の活用を始めることが目標とされている．

3.　触覚の成長・発達

3.1　はじめに

触覚は五感のひとつで，生直後の新生児においても十分に発達している．触覚関連には触・圧覚，振動覚，痛覚，温度覚などからなる皮膚感覚と，位置，動き，力，重さなどからなる深部感覚（自己受容感覚）に分類される．皮膚感覚に対応する受容器として，それぞれ機械受容器，痛覚受容器，温度受容器が存在する．深部感覚の受容器は筋，筋膜，腱，関節など身体の深部組織に存在する．これらの受容器は神経終末として様々な形態をとっており，体中のあらゆる部位に存在している．皮膚感覚と自己受容感覚は常に相互に協調し，姿勢保持や運動制御に関与している．

3.2　触覚の発生

触覚関連の受容器は脊髄神経節細胞からの神経線維終末であり，出生時には発生解剖学的に十分に形成されている．痛覚や温度覚の感覚終末となる神経線維の多くは髄鞘を被っておらず，いわゆる原始的な無髄神経であり，その求心路もコンパクトな線維群を形成せずに，まばらな線維束の状態である．一方，触覚，振動覚の神経線維は有髄線維が多く，その求心路も太い線維群を形成している．新生児は触覚が鈍いなどとの指摘もあるが，それは入力系の問題ではなく，その入力の処理機構の未熟さによるものと考えられる．

3.3　触覚の発達

触覚が最も鋭敏な部分である手指を例にその発達を解説する [10]．触覚能力の指標として 2 点弁別閾が用いられる．針状のもので圧刺激を加えた 2 点を二つの点であると分離して感知可能な最小値で表す．指先で 2mm，指先以外の指の部分で 3.7mm，手掌で 7.7mm という報告がある．その発達に関しては，5 ～ 6 歳で成人と同じ閾値を示す子どもがあり，少なくとも 9 歳では成人レベルになる．2 点を指先で動かした場合には感度が上昇し，4 歳でも 2mm という報告がある．

手指によって触覚的に入力できる情報としては，触り心地，肌触りなどの触感，硬さ，重さ，温度，形，大きさなどがある．特に触感は，物の粗さ－滑らかさ，硬さ－柔らかさ，表面温度や熱伝導率の差など，いくつかの情報が組み合わさることで物としての触感が成立する．物を触る場合には手指の姿勢（関節屈曲度）は変化するものであり，変化しつつ触ることで，その物の形をはじめとして，触感，硬さ，重さなどの特性がより良く感知できるのである．形については物の輪郭をたどったり，角や端を触る，触感については表面を指でこする，硬さについては圧してみる，重さについては手掌に乗せたり，持ち上げてみるといった，それぞれの特性を感知するうえで有効な手指の動きがある．この動的な触覚（触運動感覚）には視覚情報との協調が大きな要素となる．

経験が少ない乳幼児ほど視覚情報が優位にあり，触覚能力は日常の経験を積んでいくことで発達していくのである．日常の遊びの中で経験を積むことで，3 歳児においてどんぐりの大小を触覚のみで判別できるまでに発達する．

4.　おわりに

視覚，聴覚，触覚などの感覚情報は，大脳・小脳へ大量の情報を入力し，その統合処理の出力として，姿勢・運動を制御し，滑らかな動きを可能ならしめる．これらの感覚は胎児期から乳幼児期にめざましい発達を遂げるが，その発達を規定するものは生来の遺伝的要因のみならず，生後の環境要因の影響も大きい．発達を的確に評価し，その発

達障害に対して適切な修正・治療を行うことは，発達臨界期を有するこれら感覚器において特に重要である．

参考文献

1) 常石秀市：神経生理学的アプローチー VEP を中心にー，脳と発達，34(2), 141-146, (2002).
2) Tsuneishi, S., Fock, A.M., Hirano, S. and Casaer, P.: Establishment of normal values for flash visual evoked potentials (VEPs) in preterm infants, Electroenceph. clin. Neurophysiol., 96, 291-299, (1995).
3) Tsuneishi, S. and Casaer, P.: Stepwise decrease in VEP latencies and the process of myelination in the human visual pathway, Brain Dev., 19, 547-551, (1997).
4) Tsuneishi, S. and Casaer, P.: Effects of preterm extrauterine visual experience on the development of the human visual system: a flash VEP study, Dev. Med. Child Neurol., 42, 663-668, (2000).
5) 山本節：視力の発達，神経眼科，5, 258-264, (1988).
6) 秋谷忍：視覚器の発生・視機能の発達，周産期医学，25, 1169-1172, (1995).
7) 山本節 他 : 乳児視野測定の試み , 眼科臨床医報 , 84, 326-329, (1990).
8) 切替一郎，野村恭也（編）：新耳鼻咽喉科学，3-7, 南山堂，(1998).
9) Mason, J.A. and Herrmann, K.R.: Universal infant hearing screening by automated auditory brainstem response measurement, Pediatrics, 101, 221-228, (1998).
10) 金子健：触覚の発達，子どもと発育発達，4(1), 32-38, (2006).



常石　秀市（つねいし　しゅういち）
1986 年神戸大学医学部卒．1992 年神戸大学大学院医学系研究科修了．医学博士．1992 年ベルギー王国ルーベン大学小児神経科にて早産児の視覚誘発電位の臨床研究に従事．1994 年神戸大学小児科助手．神経疾患，発達障害の診療に従事．2003 年同助教授．2007 年医療福祉センターきずな院長, 現在に至る．日本小児科学会専門医．日本小児神経学会専門医，同評議員．日本小児保健協会評議員．