

アリストテレスの逍遙学派

— 神経生理学的考察 —

高野光司

Peripatos of Arisoteles

— Neurophysiological Viewpoint —

Kohsi Takano

Abstract :

Environmental stimulation is necessary for keeping wakefulness. Some stimulation like soft background music can elevate the level of the consciousness even during a student's desk work. However strong stimulation may deprive him of concentration on his work. The most ideal input in the brain for this effect might be stimulation we are unaware of. While walking information from muscle receptors like muscle spindles is powerful but they do not disturb one's concentration. This might be the reason why the Aristotelian were able to philosophize better during their walking (peripateien) time.

キー・ワード：逍遙学派，ナガラ族，伸展反射，筋紡錘，ガンマ運動系

1. まえがき

アリストテレス (BC384-322) は晩年になって、アポロン・リケイオン神殿のかたわらに哲学の学校を建てた。学校の名は神殿にちなんでLykeionという。energia, symposionなど多くの言葉とともに、この言葉は英、仏、独語にそれぞれlyceum, lycée, Lyzeumとして残っている。アリストテレスは、Lykeionの回廊 (Peripatos) を歩きながら講義をしたり思索にふけたので、この学派を逍遙学派 (Peripatos, peripatecian) という。なぜ、彼らは、歩きながら哲学にふけたのであろうか。

ナガラ族というのは、主として音楽を聞きながら勉強する学生のことを称するようである。学生は聞きなれた、好きな、あまり刺激的ではない音楽を聞くようである。興味を強くひく音楽や、テレビだと、そちらに気が散って、勉強にならない。簡単な家事をラジオを聞きナガラするのは、どちらが主であるかわからないから、ここでは論じない。テレビ

を見ながら食事をするというのは、マナー違反であるからこれも論外とする。

通常は目を覚ましている昼間の時間でも、快適な温度で、真っ暗な静かな部屋の柔らかいベッドに横になっていると、眠り込んでしまう人も多い。実験動物で皮膚からの感覚を遮断し、音、光、匂い、味などいわゆる五感からの情報を断つと、動物は目を覚ましているという（出典不詳、1960年頃、時実東大脳研究所長の千葉大学生理学教室でのセミナーで聞いたと記憶している）。つまり、われわれが意識のレベルを保つには、外界からの刺激が必要なのである。

ナガラ族は、このことを応用して、意識レベルを向上させて、勉強の能率をあげているということができる。

テレビを見ながらでは勉強はできない。これは、目からの情報量が多すぎるので、勉強をする脳の能力を侵してしまうからであると考えてよからう。

理想的には、意識に上らずに、我々の意識レベルを持ちあげてくれるような、刺激があればよいことになる。

いわゆる“五官”のほかに、あまり知られていない、しかし情報量も多く、意識レベルを高めるのに有力な第六番目の感覚がある。（いわゆる第六感ではない）。筋肉や関節の中には、筋肉や関節がどうなっているか、延ばされているか、曲がっているかなどを知覚する感覚器が存在する。これらを総称して筋感覚という。

2．感覚器の一般性質

2．1．距離，速度，加速度と感覚器の反応と比較

一般に感覚器は、刺激の大きさの絶対値、その変化、変化の仕方の変化を感知することができる。車に例えれば、絶対値をはかるのは距離計、その変化の仕方をはかるのは速度計である。変化の仕方の変化とは加速度のことである。数学的にいえば、それぞれ、ゼロ次、一次、二次微分である。この場合私たちの絶対値の感覚は、大まかであったり、わからなかったりすることもある。見知らぬ土地、たとえば砂漠を走る列車に乗っていて、もう始発駅からどれだけ来たかはっきりわからない。速度は外の景色が後に去っていく速さから、大体わかる。目をつぶればこれもわからなくなるし、夜の飛行機ならさっぱりわからない。（飛行機の速度は知らない、時計も持たないとする）しかし加速度は後から追突されたり、急ブレーキをかけられたりすればよくわかる。

2. 2. 感覚器の役割分担理解のための反応モデル

さまざまな感覚器は、役目の分担があつて、特定の刺激に応ずるもののうちでも、大きさ自体に敏感なもの、刺激の大きさの変化すなわち速度に敏感なもの、加速度に敏感なものがある。どの感覚器も多かれ少なかれ、この3つの変数に感ずる。どの変数に特に応じやすいかの役割分担があると思えばよい。

感覚器の反応パターンを理解するために、筋を一定速度で伸展した場合（ramp and hold, 最上段）の反応モデルを図1に示す。

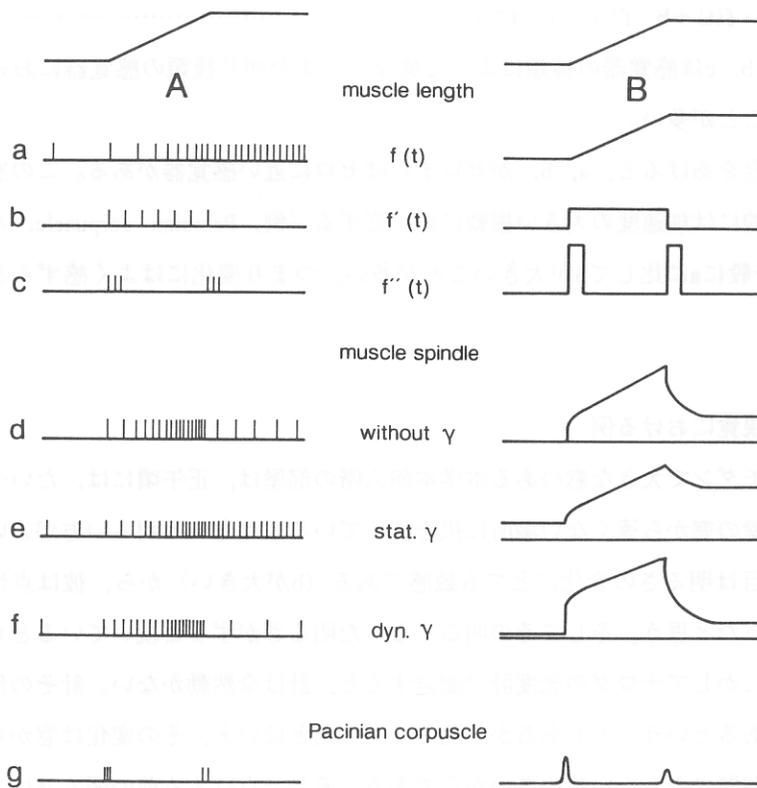


図1 筋紡錘とパチニ小体の発射パターンを示す模式図。

筋を第1段に示したように、例えば長さ50mmの骨格筋を、一定速度2mm/sで10mm伸展する。B列 $f(t)$ は0次微分すなわち長さを示す。 $f'(t)$ はその1次微分つまり速度成分。 $f''(t)$ はその2次微分すなわち加速度成分。 $f''(t)$ はこの場合数学的には、無限に狭く、無限に+および-方向に大きいのが、生物では、たとえばここに示されたように反応する。B列の $f(t)$ 、 $f'(t)$ 、 $f''(t)$ をFM変調するとA列a, b, cに示すようなスパイクの列となる。これらは感覚神経線維の活動電位（インパルス）に相当する。B列はmuscle spindle（筋紡錘）の実際の反応（receptor potential）に近い。without γ はガンマ運動系の活動のない場合。stat(ic) γ は0次微分成分が強化されたもの。dyn(amic) γ は1次微分成分が強化された場合。A列d, e, f, はそれぞれの場合の単一感覚神経線維の活動電位を示す。gは加速度成分 $f''(t)$ にのみ反応するパチニ小体の反応を示す。（Takano & Student, 1975）

B列 $f(t)$ はゼロ次微分, $f'(t)$ は一次微分すなわち速度成分, $f''(t)$ は二次微分で加速度成分を示す。感覚器では, これらの成分がどのように合成される可能性があるかをその下に示してある。witout を基本とするとstat(ic) は全レベルが上昇したもの, dyn(amic) は速度成分が増えた反応を示す。これを, 実際の神経線維上のパルスとしてFM化 (frequency modulation) したものがA列に示してある。筋紡錘 (後出) の反応, 刺激の強さを中枢に伝える神経線維上の周波数 $F(t)$ は, 筋伸展 (muscle length) に対して,

$$F(t) = a \cdot f(t) + b \cdot f'(t) \quad \text{となる。} \quad t \text{は時間。}$$

一般的にはこれに加速度成分が加わり,

$$F(t) = a \cdot f(t) + b \cdot f'(t) + c \cdot f''(t) \dots\dots\dots (1)$$

となる。a, b, cは感覚器の種類によって異なり, また同じ種類の感覚器においても, おおいに違うことが多い。

極端な場合をあげると, a, b, がゼロまたはゼロに近い感覚器がある。この感覚器は加速度, 具体的には加速度の大きい振動にだけ応ずる (例, Pacinian corpuscle, パチニ小体, 図 1 g)。一般にaに比してbが大きいことが多い。つまり変化にはよく感ずるといふものである。

2.3. 視覚における例

例えば, モダンで大きな窓のある本学本館六階の部屋は, 正午頃には, たいへん明るいのにこの部屋の窓から遠くない場所に机を持っている人はもっと明るい方がよいと思って点灯する。目は明るさの変化にとっても敏感である (bが大きい) から, 彼は点灯した瞬間に明るくなったと思う。そしてその明るくなった明るさがずっと続いているとも思っているだろう。しかしアナログの光度計で測定すると, 針は全然動かない。針その他の機械部分の慣性があるということもあるが, 明るくなったとはいえ, その変化は窓からの明るさに比して, 問題にならない程小さいからである。そして点灯する前の明るさは, 彼の家の照明の明るい夜のリビング・ルームの明るさの何倍も明るかったのである。つまり点灯の必要は全くなかったのである。いささが不正確な例になるが, 目の場合はcがすこぶる小さいから, 蛍光灯は60 (50) Hzで点滅しているのに, われわれの目はそれに気付かない。この問題でもいろいろ生理学的な考察ができるのだが, 本論ではないのでこれ以上言及しない。(図 1 参照)

3. 筋感覚器

さて本題に戻ろう。広い意味での筋感覚は、筋、関節、筋肉内の血管壁、骨膜などにある感覚器によるものである。これには痛覚や温度感覚も含まれるが、本論で重要なのは、機械的的刺激（長さ、張力、角度など）を受容するものである。そのうち、筋内にある筋紡錘、筋線維（筋繊維の生理学用語）と腱との付着部にあるゴルジの腱器官、関節器官などが、運動の調節や姿勢の保持に大切な役割をしめるのであるが、ここでは、本題ともっとも関係が深い筋紡錘に議論を集中しよう。

4. 筋紡錘の形態

動物によって異なるが、ここでは主として、ヒトのものに近く、またよく研究されているネコの筋紡錘に関して述べるが本質的にはヒトにおいても同様である。

4.1. 大まかな形

筋肉の形により小差はあるとしても、普通の筋線維はほぼ平行して走る、筋線維は直径がおおまかにいって、毛髪の太さくらいの、とても細長い細胞である（ヒトの縫工筋では約50cmもある）。筋紡錘は、この筋線維のどこかに、筋細胞と平行に付着している細長い感覚器である。長さは3mm弱から10mm以上に及ぶ（ $5.8 \pm 1.86\text{mm}$ ）。太さは膨大部でも数十 μm くらいだから、とても細長い感覚器官であるといえよう。この細長い器官の中央部は膨らんでいて、両端が細くなっている、つまり紡錘型なのでこの名が与えられた。（図2aおよび図3）

4.2. 数

一般的にいって大きな筋肉のなかにある筋紡錘の数は大きい。精密、正確、繊細な運動に関与する筋肉には多い。だがこれは矛盾した表現でもある。繊細な運動に関与する筋肉

表1 ヒトの各筋における筋紡錘の数と密度

	筋の重量	筋紡錘の数	g当たりの筋紡錘の数
上頭斜筋	3.3g	141	43 / g
短母指伸筋	2.7g	80	29 / g
上腕三頭筋	364g	520	1.4 / g

Mathews (1972) p.48より、その他の筋についても同著参照

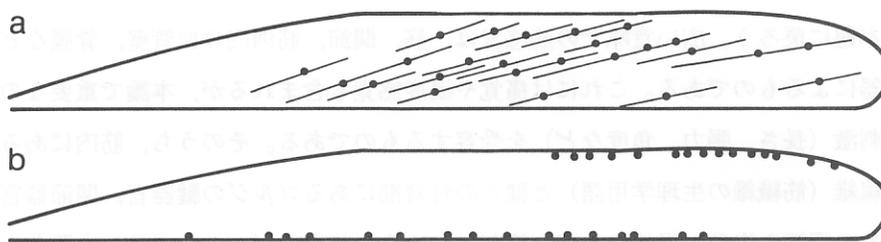


図2 ネコの外側ひ腹筋の側面からの投影模式図。

a: はほぼ半数の筋紡錘の長さ(—)と、のう包部の位置(●)が示されている。大部分の生理学の教科書には、のう包部が1つのものしか記載されていないが、この図が示すように、のう包部が2つあるものがかなりあり、まれに3つあるものも見られる。

b: 約半数の腱器官の位置を示す。多くの医学徒はその名称故に(この筋ではアキレス)腱内にあると理解しているが、腱内(図の左端部)には存在しない。筋の全長は約4 cm。(高野, 1995; Eldred et al., 1962を改変)

は小さいからである。言い換えれば、大きな筋肉内の筋紡錘の絶対数は大きいですが、単位質量当たりの数は小さい。小さい筋肉内の筋紡錘の数は小さいが、単位質量当たりの数は大きい。(図2, 表1)

4. 3. 赤道部と極部

中央膨大部分を赤道部といい、カプセルに被われている。(図3)赤道膨大部分には、感覚器の本来の役目を果たす、いくつかの種類、図において左右に伸展されることを受容する部分(終末部分)がある。らせん形の部分がそれである。赤道部分を貫いて、これも数種の、普通の筋よりずっと細かい筋紡錘が約10本以下存在する。筋紡錘の中にあるので、錘内筋線維といい、普通の筋線維と区別している。錘内筋の種類、役割分担は複雑であるが、ここでは問わない。

4. 4. グループ I a 感覚神経線維とガンマ運動神経線維

らせん状の終末部分から、グループ I a およびグループ II と呼ばれる感覚神経線維が中枢に向かう。グループ I 線維は我々の身体のなかで最も太い神経で、ヒトでは直径 $10\mu\text{m}$ を少し超すものもある。一般に生理学の教科書にのっているのはネコのもので(ネコとことわっているものは少ない)、最大 $20\mu\text{m}$ としている(私の測定では $20\mu\text{m}$ より太いものもまれでなく、最大 $24\mu\text{m}$)。他方、種々の錘内筋線維を支配する(収縮の命令を伝える)種々のガンマ運動線維があるが、ここでは、ガンマ運動線維として一括して論ずる。

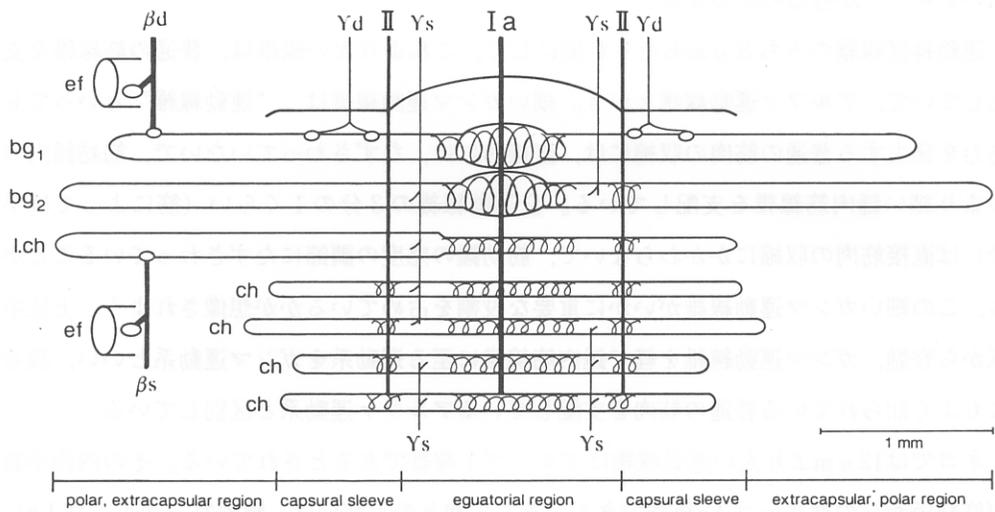


図3 標準的な筋紡錘の模式図。

個々の筋紡錘の長さ、各種錘内筋 (bg_1 , bg_2 , $l.ch$, ch) の数の長さ、神経支配は非常に多様である。Ia, II, は感覚神経線維, βd , γd , γs などは運動線維である。ef は錘外筋。尺度は横方向にのみ有効。筋紡錘が複雑、多様な構造を持つことを知ってもらうために示した。(高野, 1995; Boyd, 1985, Kucera, 1985 その他を参照にして作図)

4. 5. 筋を支配する神経線維

図4は、ネコとヒラメ筋(左) 膝筋(右)を支配する神経線維の直径(横軸)のヒストグラムである。黒い柱は運動神経線維, 灰色(点)部分は感覚神経線維直径の $2\mu m$ 毎のグループの線維数(縦軸)である。一見してわかるように、両方の線維とも太いグループと

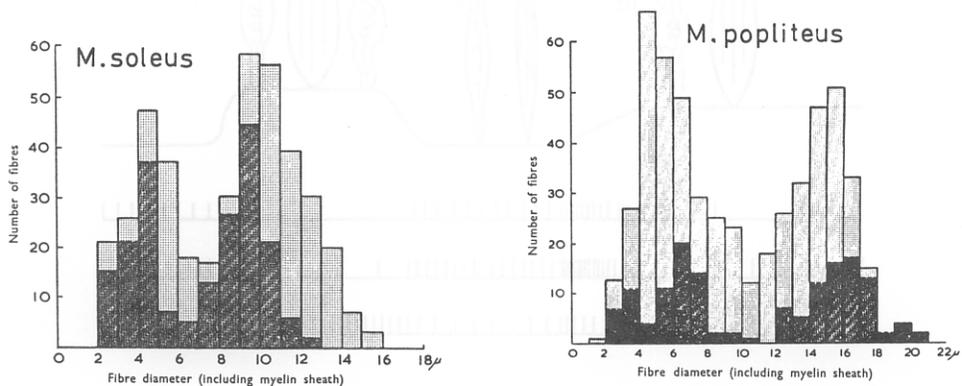


図4 神経線維の直径のヒストグラム。

黒い部分は運動神経, 灰色部分は感覚神経。左の図は赤筋の典型, ひらめ筋 (M. soleus) のもの。右は白筋の典型, 膝窩筋 (M. popliteus)。運動神経にも二つの山がある。太いグループは α 運動神経。細かいグループは γ 運動神経のものである。感覚神経線維の数が多いことにも注目せよ。(Boyd, 1966; 赤筋, 白筋については高野, 1998参照)

細いグループが有るのがわかる。

運動神経線維のうち $8\mu\text{m}$ あたりを境にして、これより太い線維は、普通の筋線維を支配していて、アルファ運動線維という。細いガンマ運動線維は、“運動線維”といっても、筋力を発生する普通の筋肉の収縮には、直接的には、たずさわっていないで、筋紡錘内の、つまり細い錘内筋線維を支配している。全運動線維の3分の1くらい（筋によっては半分）は直接筋肉の収縮にかかわらないで、筋紡錘の感度の調節にたずさわっていることから、この細いガンマ運動線維がいかに重要な役割を占めているかが想像されよう。上位中枢から脊髄、ガンマ運動線維を経て錘内筋線維に至る運動系をガンマ運動系といい、読者にもよく知られている普通の筋肉を支配しているアルファ運動系と区別している。

ネコでは $12\mu\text{m}$ より太い感覚線維はグループ I 線維であるとされている。その内約半数が筋紡錘からのグループ Ia 線維である。そして残りの大部分は、腱器官（グループ Ib）と関節器官からである。

5. 錘内筋線維の働き

筋紡錘は普通の、つまりアルファ運動系の筋肉（ここでは錘外筋と呼ぶ）にそれと平行

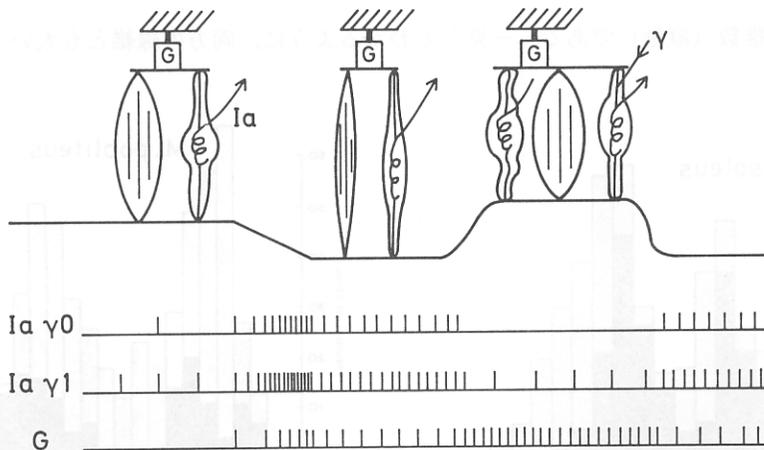


図5 筋紡錘 (Ia), 腱器官 (G) の筋伸張および収縮時の発射パターンを示す模式図。

骨格筋（錘外筋）と並列する筋紡錘から Ia 発射は筋伸張時に頻度を増すが（中縦列右伸張時の速度成分に注意）収縮時には発射を休止する（右縦列左と Ia γ 0）。右縦列右の Ia γ 1 は運動系の活動が高まって錘内筋が収縮している時。錘外筋と直列に配置する腱器官 (G) では伸張、収縮いずれに対しても発射頻度が高まる。一般に腱器官は筋紡錘に比して反応が鈍い。ネコのひ腹筋を 10mm 、 $10\text{mm}/\text{s}$ で伸張し、発射頻度を図示されているものの約10倍にすれば、それぞれの発射パターンは実際の場合に近い。

に付着していることはすでにのべた。錘外筋が収縮するとそれに平行に付着している筋紡錘はたるんでしまっ、この状態にある時、筋肉が引き伸ばされても、筋紡錘は、反応しない。これを防ぐには錘内筋が収縮して、筋紡錘のたるみを除けばよい。ガンマ線維や錘内筋の種類が種々あることから、複雑な役割をめていることが想像されようが、ここではこれ以上言及しない。(図5)

6. グループ a線維の働き

6.1. 腱反射

力を抜いた足のアキレス腱を叩くと、足は反射的に伸展方向に働く。この腱反射の機構は次のごとくである。アキレス腱に連なる腓腹筋内の筋紡錘が、のばされた長さ $[a \cdot f(t)]$ は短い、急速に引き伸ばされた情報 $[\text{大きな} b \cdot f'(t)]$ をグループ a線維を通じて脊髄に報告する。脊髄はただちに、その入力を計算して、伸ばされた筋肉をもとの長さにもどそうとする。その結果足が反射的に動いたのである。膝下の膝外腱を叩くと、大腿4頭筋(太ももの前側の筋)が収縮して下肢がのびる。ただし、アキレス腱や膝外腱が叩かれるなどというのは、日常的な入力ではないので、脊髄は計算間違いをして、下肢がピョンと飛びあがるのである。この伸展反射は中枢神経(ここでは脊髄)内でシリーズには、ただひとつのシナプスを経由する、単シナプス反射を主とする最も単純な反射である。伸展反射以外には単シナプス反射は知られていない。念のために記すが、腱器官は腱反射には関与しない。筋紡錘は長さに関する感覚器であるが、腱器官は筋の張力を計測する器官である。

6.2. 姿勢の維持

重力に逆らうことによって姿勢が維持される。例えば、立っているとき、体が前に傾けば、腓腹筋(ふくらはぎの筋)は伸ばされる。伸びた量、つまり長さの変化を筋紡錘が中枢に報告することによって、伸びた分だけ筋が収縮して、もとの長さに戻ろうとする。これが本来の伸展反射である。姿勢の維持は伸展反射が常に身体に必要な各所で生じているので、保たれている。この場合の伸展反射には単シナプス経路のみならず、多シナプス経路を含む。

6. 3. 歩く運動と求心性情報

歩いている時には時々刻々に、筋の長さ、張力、関節の角度が変わる。その情報は全て脊髄と脳に伝えられる。グループ I 感覚線維だけでも、アルファ運動線維と同じくらいの数がある。数は同じくらいだが、線維を伝導する情報量（平均および最大周波数）は感覚線維において、運動線維よりもはるかに大きい（図6）。歩くと、大量の情報が脳に殺到する。しかし、脚の筋肉がのびたり、引っ張られたり、関節が回ったりする情報は我々の意識にはのぼらない。

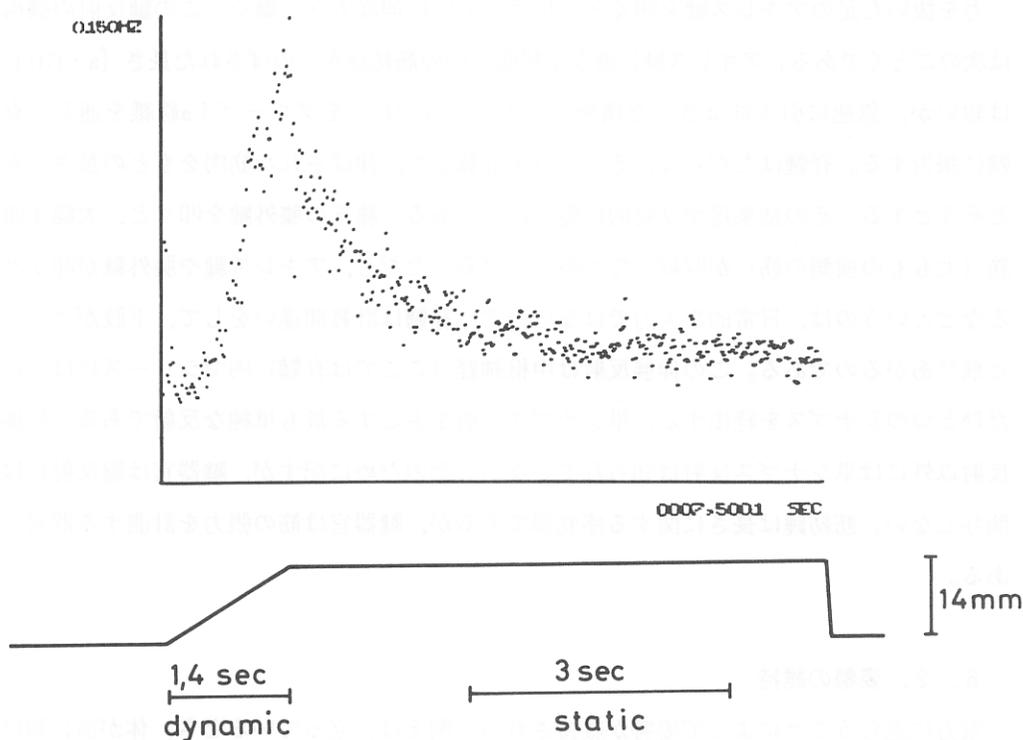


図6 典型的な筋紡錘の発射の実際。

ネコの下腿三頭筋（ふくらはぎの筋）を10mm/sの速さで14mm伸張した（下段）。上段グラフ縦軸（150Herz）は筋紡錘から単一 I a感覚神経線維の発射頻度、横軸は時間（7.5s）。一つの点は活動電位の一つのスパイクを現わすが、縦軸の位置はコンピューターによって計算された瞬時周波数を示す（秒で現わした先行スパイクとの間隔の値の逆数）。この平均的な筋紡錘は速度要素 [数式(1)のb] が比較的大きい。（Takano & Student, 1978）

7. 結論

6.3. に述べたごとく、歩いている時の筋感覚からの情報は大量であるので、我々の意識レベルをおおいに高める。それでいてこの情報は我々の意識にのぼらないので、我々の思考を妨げない。これが思索は、そして、よき討論は、歩きながらするのが、一番よいという理由である。哲学のみならず、たとえば、ゲッティンゲンの森、ハインベルクをニールス・ボーアとウエルナー・ハイゼンベルクは原子論の討論をしながら歩いた。ダヴィッド・ヒルベルトとマクス・ボルンとその弟子たちは毎土曜日に、ヒルベルトの家の黒板が立っている前庭で、お茶を飲みながら討論をして、その続きはハインベルクを歩きながらしたという。その他、ゲッティンゲンの、偉大なる、偉大ならざる学者達もハインベルクを歩きながら考えたり、議論したりした。私もこの森をおおいに歩いたし、またこれからも歩きたい。

本稿は、高松大学地域情報研究所研究会において2000年12月21日に口述したものの概略である。原稿に目を通してくださった高松短期大学秘書科の旧同僚諸氏に感謝する。

引用文献

- Boyd I.A. & Davey M.R. (1966) The composition of peripheral nerves. In : Control innervation of skeletal muscles. Andrew B. L. (ed.) Livingston, London, 35 - 52.
- Boyd I.A. (1985) Internal working of muscle spindles. In : The muscle spindle. Boyd I. A. & Gladden M.H. (eds.) Stockton Press, New York, 129 - 52.
- Eldred, W., Bridgeman, C.F., Swett J.F. (1962) Quantitative comparisons of muscle receptors of the cat's medial gastrocnemius, soleus and extensor digitorum brevis muscles. In : Muscle receptors. Barker D. (ed.), Hong Kong University Press, Hong Kong, 207 - 13.
- Kucera, J. (1985) Selective and non selective motor innervation of intrafusal muscle fibres in the cat. In : The muscle spindle. Boyd I. A. & Gradden M. H. (eds.), Stockton Press, New York, 45 - 56.
- Mathews, P.B.C. (1972) Mammalian muscle receptors and their central action. Arnold, London.
- 高野光司 (1995) 筋感覚と反射張力。新筋肉病学。杉田秀男ほか編。南江堂。東京, 123 - 32 .
- 高野光司 (1998) 赤筋と白筋。ゲッティンゲン便り。日本図書刊行会, 東京, 197 - 208 .
- Takano K. & Student Ch. (1975) A - 2.3. Grundlagen der Sinnesphysiologie 3. Kinaesthese. Handbuch der Ergonomie. Schmidtke H. (ed.) Luftfahrt-Verlag, Steinbach, 1 - 7 .
- Takano, K. & Student, Ch. (1978) Effect of diazepam on the gamma motor system indicated by the responses of the muscle spindle of the triceps surae muscle of the decerebrate cat. Naunyn-Schmiedberg's Arch. Pharmacol, 302, 91 - 101.

後記

当原稿は、本年三月、定年退任された高野教授に、特にお願ひして、昨年十二月二十一日開催の本学地域経済研究所研究会で発表していただいた退任記念講演の一部である。高野先生の益々のご健勝をお祈り申し上げます。

(学長 三浦 和夫 2001年11月記)

高松大学紀要

第 37 号

平成14年 2月25日 印刷

平成14年 2月28日 発行

編集発行

高 松 大 学
高 松 短 期 大 学

〒761-0194 高松市春日町960番地

TEL (087) 841 - 3255

FAX (087) 841 - 3064