長崎大学教育学部自然科学研究報告　第36号　43～54（1985）

# 開眼および閉眼条件における運動習熟の制御機構について

小原　達朗・小柳　勝彦*・松田　敏彦**

長崎大学教育学部保健体育教室

（昭和59年10月31日受理）

# On the Control System of Motor Proficiency during the Condition of Open and Closed Eyes

Tatsuro OBARA, Katsuhiko KOYANAGI and Toshihiko MATSUDA

Department of Health and Physical Education, Faculty of Education, Nagasaki University, Nagasaki

(Received Oct. 31. 1984)

## Abstract

In order to elucidate the function of motor control system through some phenomenons, studied the skilled process with training on the dynamic movement of posture holding. Particularly, remarked the programing of subroutine mechanism in cerebellum. In order to studied the reciprocal relation of motor control information, that is, vestibular input from vestibular apparatus, spinal input and cortex input with vision, subjects were trained who was separated into the groups of open and closed eyes.

The skilled indication of change in organism was that the brain wave become to $\alpha$-wave from $\beta$-wave in central nervous system. To say, observed sift to subcortex from cortex control. EMG indicated the information of output to peripheral from central system. The failure frequency of bongo-board exercise was external output.

The results were cleared as follows.

1) In the case of open eyes, increased emergence of $\alpha$-wave with decrease of failure frequency.

2) In the case of closed eyes, reached the top of decrease of failure frequency, the limitation of proficiency was acknowleged. And, $\alpha$-wave appeared

*昭和58年度卒業　現在，鶴鳴女子高等学校
**昭和58年度卒業　現在，松浦市立上志佐小学校

slightly.

3) In the case of the sift to closed from open eyes, failure frequency increased that it has decreased, didn't improve the performance. However, $\alpha$-wave increased on account of closed eyes, but, according as training it's emergency decreased gradually.

4) In the case of the sift to open from closed eyes, after the sift failure frequency decreased rapidly, and emergency of $\alpha$-wave increased gradually.

5) As the above results, it was more effective on program the case of open eyes that was input vestibular track and cortex track, than closed eyes that was input only vestibular track. And, it was consider that the program system in cortex of cerebellum form the effective program due to be interaction many information.

## 緒　　言

随意運動の発現に関する脳領域について久保田[7]は，1974年来の知見をまとめて図1のように示した。そして，運動野，運動前野および補足運動野を運動性皮質グループとし，前頭前野，頭頂連合野および側頭連合野の三つの連合野を連合性皮質グループとし，これに大脳基底核，視床，外側小脳および内側小脳を加えた六つのグループに細分し，それぞれのレベルの機能単位を行動のプログラム，運動のプログラム，運動の指令および運動の実行の中枢として随意運動発現の情報の流れを示している。ただし，各領域が特異的に情報を伝達するのではなく，いくつかの領域が複雑な相互作用を行なっていると考えることが重要な点である。

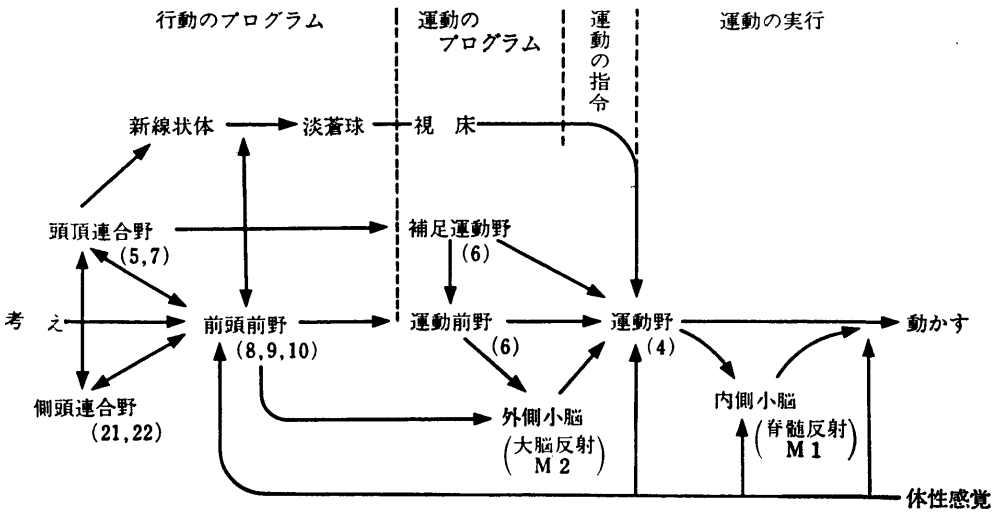



図1　随意運動の発現に関係した脳領域と神経情報の流れ（久保田[7]）

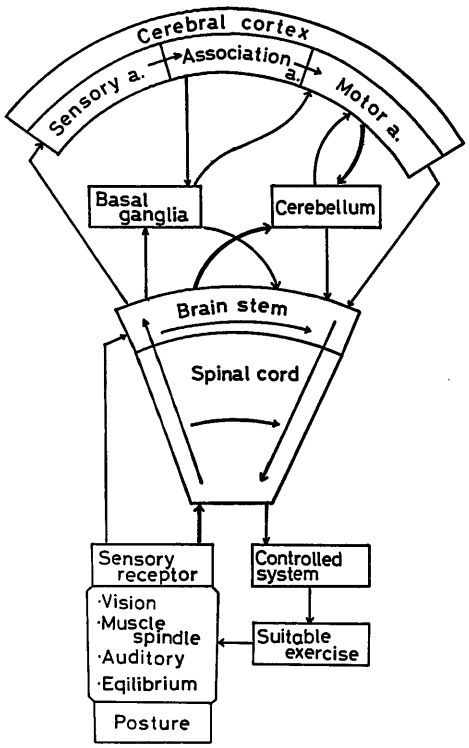



図2　運動制御系のブロック図
1983年発表[3]のものに姿勢そのものを入力として加え，小脳への入力は太線で示した。

図2は，小原[10]が運動制御系の全体について示したブロック図である。図1と異なる点は，運動性皮質および連合性皮質を大脳皮質として上位において随意運動発現の系を運動制御に重点をおき，制御の流れを階層構造として表わし，回路として示した点である。しかし，矢印のように，単に一方向への流れではなく，各機能単位が相互作用を行なっていることは前述のとおりである。運動制御系を階層構造で表わしたことには，次のような理由がある。

小原は，先行研究によって運動が習熟するにしたがって頭皮上脳波がβ波からα波化する傾向にあり，これはトレーニングを継続するにしたがって増大すること，また，それに対応して末梢における筋放電の減少を伴うことを報告した[9][10]。そして，これらの現象は，運動制御系の構造に由来するもので，運動習熟のメカニズムを表わしているものであると仮設し，検証してきた。

動作のステレオタイプ化[14][15]あるいは，自働化[3][8]にしたがって脳波にα波の出現が認められて意識集中の低下と運動習熟を関連づけている報告もある。

脳波は，網様体賦活系の機能による脳の全体的な興奮のレベルを示すけれども，頭皮上脳波は，大脳皮質の神経活動のレベルを示している。したがって，本研究では，少なくとも運動動作の脳波がβ波からα波化することは，随意運動発現の系（図1）が繰り返されたことにより運動制御の相互レベルが皮質以下に移行したものと仮定している。すなわち，Fits と Posner[1]が述べているように，知覚－運動スキルの階層構造は，電算機に類推することができる。動作の全体的過程を演算実行プログラムと考え，部分的あるいは一過性のユニットをサブルーチン機構と考えることができる。このことを応用すれば，演算実行プログラムは図1の運動性皮質グループに相当し，小脳や大脳基底核は，サブルーチン機構に相当し，相互作用しているものと考えられる。このうち，大脳基底核は，運動制御の重要な中枢ではあるが，個々の部分的な運動よりも非特殊的に作用していると考えられている[6]。このように考えるとき，運動制御系を階層構造にすることは理解を容易にする。そうすると，随意運動が習熟されて spinalization[13]される過程は，小脳を中心としたサブルーチン機構でのプログラムの形成にあるのではないかと考えられる。

ところで，小脳へのプログラム情報としての入力は，運動性皮質からの皮質小脳路，末梢の体性感覚器からの脊髄小脳路および前庭器からの前庭小脳路とがあり，これらの情報

は，小脳皮質において修飾されてプログラム形成されると予測されている[5]。中でも，前庭器からの耳石器入力は，前庭動眼反射および前庭脊髄反射を形成しており，運動や姿勢の保持には不可欠の機能を有している。さらに前庭動眼反射は，皮質小脳路からの視覚路と結合することにより最適運動を可能にしていると考えられている[5]。したがって，運動を開眼か閉眼かの条件に規定して行なうことは，これらの系の機能を検討するうえで有効な手段となる。

そこで，本研究では，中枢神経系における小脳を中心としたプログラム形成を大脳皮質活動（$\beta$波）が減少し，$\alpha$波化することから判定し，末梢神経系への出力を筋放電としてとらえ，さらに，被制御系への出力を運動 performance として定量してプログラムの成果を評価しようとするものである。本研究で習熟させようとする運動課題は，動的平衡姿勢保持運動であるボンゴボード運動である。これを，開眼および閉眼の入力情報の違いを設定してトレーニングし，運動制御系の機能を検討しようとするものである。

## 研　究　方　法

### 1. 被　験　者

被験者は，大学男子学生10名で，覚醒時脳波に $\alpha$-block の生じる一般的脳波所見をもつものである。

### 2. 運　動　課　題

運動課題は，ボンゴボードテスト[12]と呼ばれる直径 9 cm，長さ 30cm ほどの円柱を横たえた上に平板（40×60× 3 cm）を中心線よりずらさないように固定して乗せ，その上でバランスをとるものである。この運動課題は，被験者が，これまで経験したことがほとんどなく，トレーニング中も日常経験することのない運動である。

### 3. 脳波および筋電図の測定

脳波は，日本電気三栄測器製の 6 素子の脳波・筋電計を用いて有線により測定した。脳波誘導の電極は，国際10/20法を参考にして単極誘導により Cz と，$C_4$ と $T_4$ の間に置く 2 誘導を記録した。また，電極は，皿電極と針電極を併用した。感度は，50$\mu$V/5mm で，ペーパースピードは，25mm/sec であった。

筋電図は，予備実験によりボンゴボード運動の姿勢調節に大きく関与すると考えられる前脛骨筋 M. tibialis anterior（T. A.），ヒラメ筋M.soleus（Soleus）および腓腹筋外側 M. gastrocnemius lateralis（Gastro.）について皿電極を用いて測定した。感度は，200$\mu$V/5mm とした。なお，脳波は右側に，筋電図は交叉肢である左脚に電極を装着した。また，測定室は，シールドしてノイズの混入を防いだ。

### 4. 失敗数および失敗時点の測定

ボンゴボードの回転軸にポテンションメータを取付け，その左右への傾きと床に触れた状態（失敗）を検出し，脳波および筋電図と同期して記録した。失敗時間の１秒以上は，１秒を１回とした。

### 5. トレーニングの方法と測定期間

トレーニングは，ボンゴボード運動を１分間運動して１分間休む組合せを１回とし，１日に５回を１セットとし，60セット（60日間）継続して行なった。このうち，60セットすべて開眼で行なう群（Ｏ－Ｏ群），60セットすべて閉眼で行なう群（Ｃ－Ｃ群），１～30セットまで開眼で31～60セットまで閉眼で行なう群（Ｏ－Ｃ群），１～30セットまで閉眼で31～60セットまで開眼で行なう（Ｃ－Ｏ群）の４群に分けてトレーニングを行なった。各群の被験者は，ランダムに選択した。

脳波と筋電図は，検査日として10日ごとに測定したが，通常の１セットではなく，各群とも開眼あるいは閉眼で３回，引き続きその逆の条件で３回で開眼閉眼の両方について測定した。失敗数は，毎回測定して運動成績は１セットの１分間の平均で表わした。ただし，検査日は３回の平均で表わした。

## 結　　果

### 1. Performance（失敗数）の変化

図３の実線は，各群の各被験者の60セット（60日）目までの１セットの平均の失敗数の推移について示したもので，31日からトレーニングの条件が開眼と閉眼の逆の条件へ移行した群では，移行後の条件のものが実線で示してある。破線は，10日ごとの検査日に測定したそれぞれのトレーニング条件の逆の場合の推移である。

各群ともトレーニング初期には，開眼でも閉眼でも１分間に25～50回の失敗数であり，群間および各群内の開閉眼間で顕著な差は認め

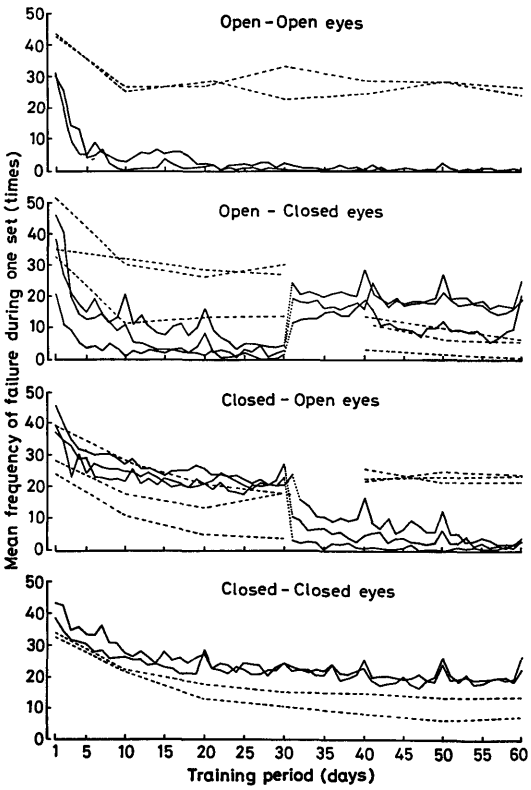



図３　各群の各被験のトレーニングにともなう失敗数の変化

られなかった。これが，トレーニングにともなって，それぞれ固有の変化を示した。

O－O群は，開眼トレーニング条件のみであるが20セット目でほとんど失敗はなくなり，この状態が60セットまで継続した。このとき閉眼条件（破線）で測定すると10セット目までやや減少し，以後60セット目まで減少しなかった。O－C群は，開眼トレーニング条件ではO－O群に比べてやや変動が大きいものの30セット目ではほとんど失敗はなくなった。その後閉眼トレーニングに移行すると失敗数は，20回前後に急増し，60セット目までわずかの減少はあるがほぼ横ばい状態であった。また逆の条件（破線）で測定すると，開眼トレーニング条件の間の閉眼での測定では30セット目までO－O群と同様の傾向を示した。移行後閉眼トレーニング条件の間の開眼での測定では，開眼の30セット目までほとんどなくなっていた失敗が10回前後に増大し，その後60セット目まで若干減少した。C－O群は，30セット目までの閉眼トレーニング条件の間は，O－O群およびO－C群の閉眼での測定（破線）と同様の傾向を示した。その後開眼トレーニング条件へ移行すると失敗数は急減し，O－C群の1～30セット目までと同様の経過で60セット目まで至り，ほとんど失敗はなくなった。また逆の条件（破線）で測定すると，30セット目までの閉眼トレーニング条件の間は，開眼で測定してもO－O群やO－C群のような失敗数の大きな減少はみられなかった。移行後の開眼トレーニング条件の間の閉眼での測定では，移行前の閉眼トレーニング時（実線）と同レベルの横ばい状態にあった。C－C群は，閉眼トレーニング条件のみであり，15セット目までわずかに失敗数は減少しているが，以後60セット目まで横ばい状態であった。その間の開眼での測定では，失敗数が30セット目あたりまでわずかずつ減少しているが，その後は15回前後の失敗数のまま60セット目まで至った。

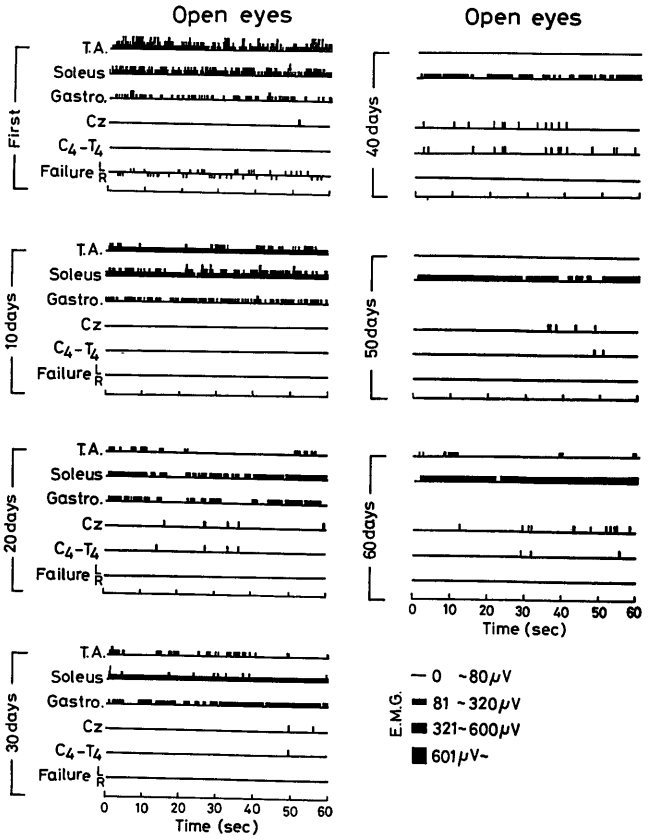



図4－a　トレーニングにともなう各群のひとりの被験者の筋電図，α波および失敗の記録の模式図（O－O群）

## 2. トレーニングにともなう脳波，筋電図および Performance の変化の様相

図４－ａ～ｄは，トレーニングにともなう脳波（Cz，$C_4-T_4$），筋電図（T. A., Soleus, Gastro.）および Performance（Failure）の10日ごとの変化の様相について模式的に示したものである。筋電図は，その voltage を図右下に示したように４段階に分けて示した。脳波は，α波の出現のある間上側に黒く突出して示した。失敗については，左右別に上下に黒く突出して示した。各図とも各群の被験者のうちのひとりのものについて示した。なお，40日目以後 Gastro. の一部に記録の不鮮明な部分があったので割愛した。

Ｏ－Ｏ群（図４－ａ）は，トレーニング初期に大きな voltage でしかも持続的に筋放電が出現していたが，α波の出現の始まる20セット目あたりから低 voltage で筋放電の出現の有無が明瞭になり，この状態は60セット目までさらに顕著になった。ただし，Soleus は，Ｏ－Ｏ群に限らず各群とも低 voltage ながら常に持続性に出現していた。Ｏ－Ｃ群（図４－ｂ）は，トレーニング初期から30セット目まではＯ－Ｏ群とほぼ同様のパターンを示した。しかし，閉眼トレーニング条件に移行するとこれ以上の変化は認められず T. A. においては筋放電の増大のまま推移した。しかしながら，わずかながらα波の出現が認められた。Ｃ－Ｏ群（図４－ｃ）は，トレーニング初期から30セット目まで高 voltage で頻発する筋放電と，わずかながらα波の出現するパターンを持続していた。しかし，開眼トレーニング条件に移行した40セット目以後は，低 voltage の筋放電となり，60セット目ではα波の出現が顕著であった。Ｃ－Ｃ群（図４－ｄ）は，すべてのトレーニングセットにおいてほとんど同様の高 voltage の筋放電で失敗の多いパターンを示した。多少異なる点は，31セット目以後

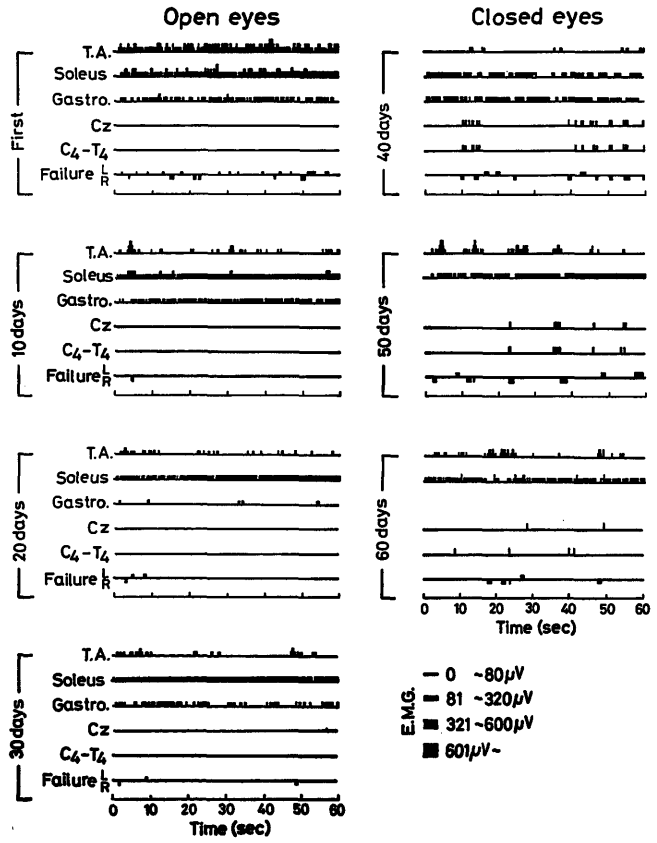



図４－ｂ　（Ｏ－Ｃ群）

60セット目までα波の出現が増大傾向にある点であった。

### 3. α波の出現と Performance との関係

図5は，中枢におけるプログラム形成を意味するα波の出現とプログラムの成果である外部出力としての失敗数の変化をトレーニングにともなって各群の各被験者ごとに対応させて示したもので，図4－a～dを定量的に示したものである。

O－O群は，失敗数の急速な減少に対してα波が明らかに出現するのは40セット目あたりからであった。O－C群は，いずれの被験者も30セット目には失敗はほぼなくなるが，α波はほとんどみられなかった。閉眼に移行すると失敗は増大して横ばい状態であったが，それにもかかわらず急激にα波の出現が認められた。しかし，このα波の出現は40セットをピークにして漸減した。C－O群は，閉眼時には失敗の減少はほとんど認められなかったが，α波は頭初から認められ増大する傾向にあった。開眼に移行後，失敗は漸減して60セット目にはほとんどなくなった。α波は，40セット目にはほとんど認められなかったが，失敗数の減少とともに増大する傾向にあった。C－C群は，失敗数が10セット目までわずかに減少しその後減少せず横ばい状態であった。α波は，ほとんどすべてのセットにわたって出現しない者と，31セット以後出現の著しい者とがあった。

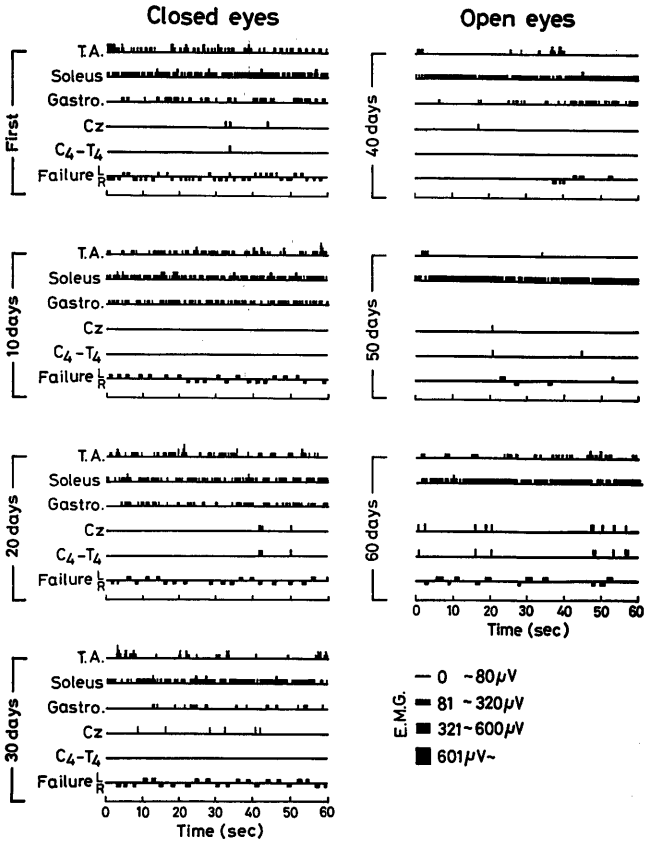



図4－c （C－O群）

## 考　　察

### 1. 開眼・閉眼条件が運動制御におよぼす影響

運動を制御している系は，図1および図2に示すように運動性皮質，連合性皮質を上位におき，これらの行動および運動プログラムを実行してい

るサブルーチン機構としての大脳基底核および小脳が運動出力の中枢と考えられている[5)7)]。このうち大脳基底核は非特異的に全身的に身体を制御していると考えられている[6)]。したがって，本研究では，ひとつには小脳が運動習熟のために特異的に機能しているのではないかという観点から脳波による検討を行なった。すなわち，小原[9)10)]は，先行研究において運動習熟により脳波がβ波からα波化することを検証し，これは，運動制御機構の中心が大脳皮質からそれ以下のレベルへ移行したためであると報告した。今回も，この考え方が根底になっているために同様な方法を用いた。ふたつには，これに加えて小脳への入力経路に視覚性のものあるいはそれ以外のものがあり[4)5)]，視覚の影響の有無を設定することは，小脳の機能を推測するうえで有効であると考えられるので，開眼および閉眼の条件を設けた。また，開眼のみ閉眼のみでなく，閉眼から閉眼，閉眼から開眼へ入力情報が変化した場合にいかなる変動を呈するかについて検討した。

小脳への直接の入力は，特殊感覚器からの情報を随意性に大脳皮質から入力しているところの皮質小脳路・筋紡錘・ゴルジ腱器官・触受容器などの体性感覚情報を入力しているところの脊髄小脳路および前庭器により頭位の変化を入力しているところの前庭小脳路がある[2)]。皮質小脳路からは，視覚そのものの情報が広汎に入力しており，閉眼による情報の遮断の影響を直接に受ける。脊髄小脳路は，開閉眼にかかわらず共通に入力している。前庭小脳路は，前庭動眼反射と前庭脊髄反射を生ずるところのふたつの経路が重要である。いずれの反射も耳石器性の入力を受けており，前庭動眼反射は，前庭器 — 動眼運動ニューロン — 外眼筋という開ループを形成して眼位の変化により頭位の変化があっても外界に相対的な眼位には体位の変化を生じないという反射である。前庭脊髄反射は，前庭器 — 脊髄 — 頸部・軀幹筋 — 頭部運

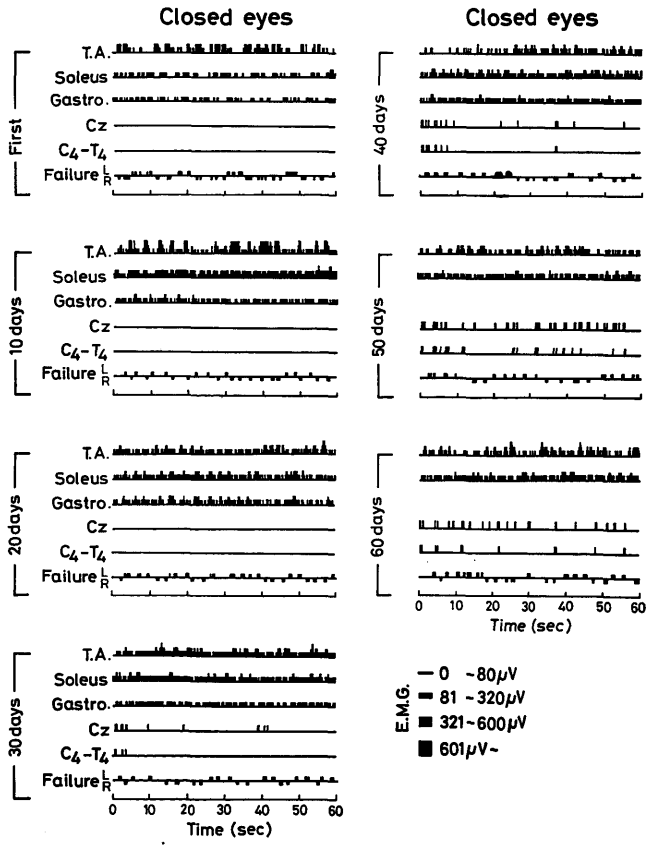



図4—d　（C—C群）

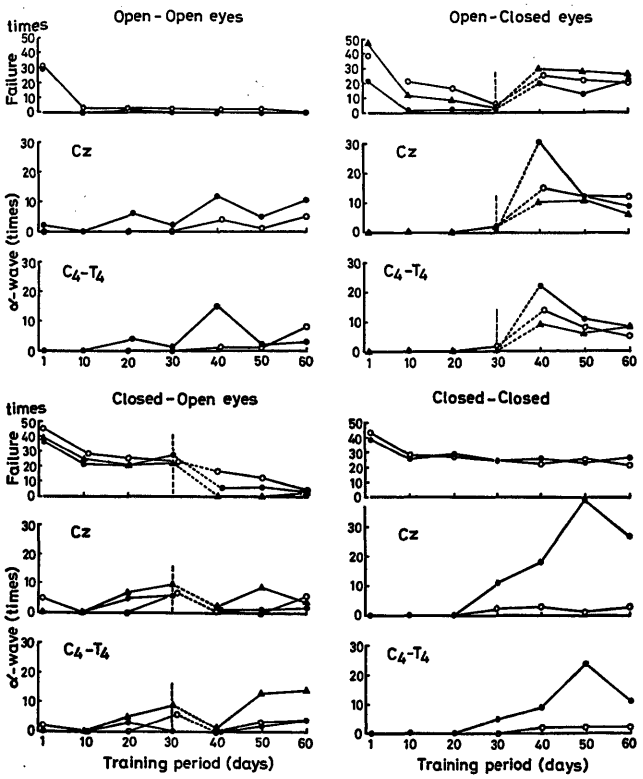



図5 各群の各被験者のトレーニングにともなう失敗数およびα波の変化の対応関係

動 — 前庭器という閉ループを形成して四肢軀幹筋の緊張を変えて頭位の変化に対して体位を調節するという反対である。したがって，閉眼の影響は前庭動眼反射および皮質小脳路に大きく現われると考えられる。

## 2. 脳波，筋電図および Performance の変動と運動制御系の関係

失敗数の変化（図3）については，開眼でトレーニングした場合O－O群，O－C群の30セット目までおよびC－O群の31～60セット目までに示されたようにおよそ30セットで，このような運動の場合には失敗はなくなった。一方，閉眼でトレーニングした場合はO－C群の31～60セット目まで，C－O群の30セット目まで，およびC－C群に示されたように若干の失敗数の減少はあるもののほとんど習熟の可能性のないことが示唆される。また，開眼あるいは閉眼でのトレーニング中にその逆の場合について測定すると（破線），そのトレーニング条件の影響は小さく開眼，閉眼それぞれ独自の変化を示したことから，運動習熟のプログラム機構に固有の機能があることが示唆される。

さらに，各群の各被験者の筋電図，脳波（α波）とこれらの失敗の様相について検討すると（図4－a～d），失敗数の多い部分では，筋放電は高 voltage 持続的である。また，筋放電の低い部分かあるいはほとんどないところにα波の出現する傾向があり，末梢への出力と中枢での変化が対応していることが認められる。これまで，運動の習熟には，不応期，反応期，形成期，完成期の4相があることを報告してきた[10]が，開眼条件でトレーニングした場合には，期間の相違はあるが，いずれもこの段階が存在することは明確に示されたと考えられる。ただし，筋電図の中で Soleus のみがどのような習熟段階でも持続的に出現した。このことは，Soleus は，少なくとも本運動課題に対しては，運動の制御因子ではなく，T．A．あるいは Gastro，に制御能を発揮させるためのボンゴボード姿勢の駆動因子であると考えられる。

小脳を中心とする入出力系へのプログラムの形成を示すα波の出現と，プログラムの成果を示す失敗数との関連について図4および図5について検討すると，O－O群のように，確実に失敗数がほとんどなくなるとしだいにα波が増大しプログラムの形成が推測される。このことは，C－O群の40セット目から60セット目にも同様のことがいえる。しかし，α波の出現の多い部分でO－C群の40セット目以後，C－O群の30セット目までおよびC－C群の黒丸の被験者については，失敗数の減少の全くない部分での出現であることから，これらについては単に閉眼状態における徐波化とオーバラップしているものと考えられる。この意味では，α波がすぐにプログラムの指標と考えることに対する問題点も含んでいると考えられる。本研究では，偶然にもこれらの条件が対照となったと考えられる。したがって，これらの点を考慮しても閉眼条件は，プログラム形成に対して明らかに情報の不足を招くと考えられる。このことは閉眼条件群の失敗数の減少が頭うちで横ばい状態になることからも明らかである。

結局，小脳へ入力している経路の中で視覚の影響を受けるところの皮質小脳路および，前庭動眼反射の系は運動の制御およびプログラム形成に対して重要な経路であるといえる。裏をかえすと，小脳への入力経路を明らかにしたうえで，それらの経路に条件を加えた本研究の設定に合致したことから，小脳に運動習熟の機能が存在することが検証されたと考えられる。一方，酒田[11]は，無麻酔のサルを使って頭頂連合野に網膜からの視覚情報と眼球運動の情報を統合して三次元の自己中心的視空間中の運動識別の細胞のあることを述べている。したがって，単に，小脳のみのプログラム機構と考えるよりは，サブルーチン機構としての小脳の役割にさらに大小脳間の相互作用の系全体にもプログラムの機構があるものと考えることが現段階では妥当性がある。

## 要　　約

運動制御系の機能を現象的に解明するために，動的平衡姿勢保持運動のトレーニングによる運動習熟過程について検討した。とくに，小脳のサブルーチン機構としてのプログラム形成に注目し，運動制御情報としての前庭入力，脊髄入力および皮質入力の関連を調べるために開眼および閉眼の群に分けて視覚性の入力に違いを設けてトレーニングした。

習熟の生体内変動の指標は，中枢神経系では脳波が習熟するにしたがってβ波からα波へ移行すること，すなわち，皮質制御から皮質下制御へ移行することを観察した。末梢では，筋電図を用いて中枢からの情報の出力をみた。外部出力としてボンゴボード運動の失敗数から運動成績を観察した。

その結果，以下のようなことが明らかになった。

1) 開眼条件では，失敗数の減少とともにα波の出減が漸増した。
2) 閉眼条件では，失敗数の減少が頭打ちとなり習熟の限界が認められた。
3) 開眼から閉眼へ移行する条件では，開眼で減少していた失敗数が閉眼で増大し，成績の向上はみられなかった。
4) 閉眼から開眼へ移行する条件では，移行後に失敗数が急速に減少し，α波の出現が漸増した。
5) 開眼条件では，筋放電の voltage の低下とα波の出現は対応しており，中枢と末

梢の制御関係に関連が認められたが，閉眼条件では，筋放電の voltage の高い状態や失敗数の多い場合でもα波の出現が認められ，閉眼による脳波の徐波化とオーバラップしていた。

6) 筋放電よりみて，失敗と対応する筋（T. A. Gastro.）と対応しない筋（Soleus）が認められた。前者は，運動制御能を後者は運動駆動能を発揮していたものと考えられた。

7) 以上の結果，各トレーニング条件に共通に存在する脊髄情報を除くと，皮質情報および前庭情報のなかでも前庭動眼反射系の入力していると考えられた開眼条件が前庭脊髄反射系および脊髄情報のみ入力している閉眼に比べてプログラム形成に有効であり，小脳皮質を中心とするプログラムの系は，その入出力路を通じて多くの情報を相互作用させることにより効果的なプログラム形成をなすと考えられた。

本研究の要旨は，第32回九州体育学会（沖縄・那覇市，1984）において発表した。

## 参 考 文 献

1) Fitts, P. M. and Posner, M. I., Human Performance, Belmont, California, Books. Cole (1967)
2) Guyton, A. C., 内薗耕二・入来正躬監訳，ガイトン人体生理学（下） 2版，611—612 廣川書店 (1982)
3) 萩原 仁・根本和丈，体育科教育 22（7），52—55 (1974)
4) 伊藤正男，神経進歩 17（5），857—867 (1973)
5) 伊藤正男，生体の運動機構とその制御，真島英信・猪飼道夫編，208—220 杏林書院 (1975)
6) 伊藤正男，自然 34（5），90—97 (1979)
7) 久保田 競，神経進歩 28（1），3—6 (1984)
8) 根本哲郎・荻原郡次・和田 尚・播本定彦・吉田浩重・平井富弘，体力科学 26（1），30—43 (1977)
9) 小原達朗，長崎大学教育自然研報 (32)，215—226 (1981)
10) 小原達朗，　同　上　(34)，63—74 (1983)
11) 酒田英夫，神経進歩，27（5），809—821 (1983)
12) 体育科教育研究会編，体育実験演習概説，215 大修館書店 (1979)
13) Tokizane, T. and Shimazu, H., Functional differentiation of human skeletal muscle corticalization and spinalization of movement, Univ. of Tokyo Press (1964)
14) 山崎 健，新潟大学教育学部高田分校研究紀要 (23)，81—91 (1979)
15) 山崎 健，　同　上　(25)，147—162 (1981)