

昭和48年度 日本体育協会スポーツ科学研究報告

NO. IV 巧緻性の解明
—第2次研究報告—

財団法人 日本体育協会

スポーツ科学委員会

巧緻性の解明 一第2次研究報告一

飯塚 鉄雄（東京都立大学）

1. 研究の立場

本研究はもともと前人未踏の未知の領域に対する解明を狙いとして始められたが、定義づけもないで2年間が過ぎた。もともと手探りと科学者、実践者としての「堪」を頼りにかつそれらのものの体系化へ向って、各研究者がそれぞれの立場で思索し、実験し、解釈してきたわけである。具体的な研究の中でも絶えず「巧緻性」そのもの本質についての哲学がなされ又今もそれが継続されている。というのは直ちにすべてが明らかにされるための、二、三の重要なヒントのようなものが求められるように内心期待はするが、それが一体人のどの部分にあるかが容易に判らないからである。あるいはそのようなものはないことが分るのかもしれない。しかしそれは決して本研究が無駄であったという非科学者の解釈とすべき結果ではない。あるいは研究費の労費でもない。というのではなく巧緻性というようなものが人の本質として、主要な作用点としてどこかに存在しそうであるという、実践面の立場から長い歴史を通じて提出されたテーマで、もともと、何かそこにあるであろうということでスタートした研究であるからである。今年度は更に1人の研究者を加え、特に実際的な立場から巧緻性の機構を探ったが、いろいろと興味深い結果が得られた。

2. 研究者とテーマ

シミュレーター（Simulator）を用いて、人間が本当にある場面に対応することを分析する人間工学的な研究や、実際の場面を色々と類似した状況で把握しようとするアナログ（Analogue）あるいはデジタル（Digital）コンピューターによる研究は、微細で複雑多様で同度にわれわれの観察や理解をこえている現象のアプローチに便利である。当然のこととしてその種の研究が中心となっていくが、ここにはそれぞれのテーマを紹介しておく。

(A) 巧緻性解明の視座

小林 一敏（筑波大学）

(B) 上肢の動きにおける調節の仕方から見た巧緻性

渡辺 俊男（横浜国立大学）

(C) 光刺戟に対する多様選択全身反応時間の分析に関する研究—鍛練効果を中心として—

藤田 厚（日本大学）

(D) 巧緻能の基礎的研究—手指描写運動の多変量相関分析—

永田 晨（東京都立大学）

(E) 動作の制御理論的研究II

増山英太郎（東京都立大学）

以上6テーマであるが、人間の自動制御のメカニズムそのものの解明にかかる問題であるだけに、そのものばかりという研究文献もないまま各研究者は大変創意を生かし、その客観性検討のために苦労をしたあとがある。

3. 研究の総括

思弁や実験によるその検討は科学用語や概念規定は勿論のことながら志向する目的の等価的把握を必要とする。その点技能と技術の関連について本研究全体の視点を明らかにしている研究(A)は終始パイロット・ライトとして貴重であり、巧緻性の概念規定にアタックしている。技能を主観的把握による合目的的自然法則性であり、技術をその客観的把握による合目的的自然法則性であるとする立場である。

人体がほぼ左右相称にできているというソマトタイプ（体型）の中で勿論複雑な刺戟伝達経路は各種の回路で関連しているが、たとえば左手右手利きという現象は、簡単なことがらにみて、そのメカニズムは複雑である。「右手動作、左手動作にみられ左右差は、入力情報を感覺し、判断する中枢部での差異よりも、むしろ筋から脊髄回路をふくむ末梢の閉回路に差異がある」という結論

は、巧緻性と器質の関連とその訓練という可能性を示唆していると思われる。

それに対して視覚（光刺戟）による動作開始に関する研究（C）では、「刺戟受容から反応生起に至る時間的経過の中に巧緻性を解明する手がかりを求めてみた結果、末梢的過程よりもむしろ中枢的過程の中でそれを追求する方が今後の方向としては大切なのではないか。」という「中枢説」もでてきた。

更に「巧みな調節は、中枢部分ではなく、第二次的調節系、すなわち筋肉を中心とした効果器、神経によって左右される。」という（D）研究者による提示があり中枢・末梢の両説があって、研究視点の置き方によって分離した結論を得ている。しかしあくまでも常識的な帰結である。いずれにしても問題はこの種の「人」という精密だが、末梢伝導回路と中枢連結回路とのスイッチの切替、目標設定、情報入力選択回路、Analogue から Digital への変換回路、運動、同経路そのものの中での調

節等、極めて緻密な測定が今後要求される。そのためには測定機器の他にそのデータの正確な分析評価が必要である。（E）研究は情報伝達の質・量的検索について重要な論拠を与えるものである。

4. 今後の研究

本研究は「未完にして完」であるといえるが、次年度には一応のまとめを経て貴重な研究努力と、寛大に与えられた研究費を無にしないよう少くとも普通の人々が理解できそうな段階までの解説をしたいものである。たとえば、巧緻性をめぐる諸種の用語、譬喻、勘などとの関連や、力学的方法・合理性と、未知・主観的色彩の強いこれらの課題、巧緻性のきめ手となる要因の所在についての説、大筋群と小筋群による身体運動による「巧緻性」や「巧みさ」の効果に関する異同等について解り易く報告をまとめたいものである。それぞれの研究分担者がここでは一応同じ具体的前提にそって考えた結果を、この「未完の完」として、今後の積み重ねの礎石とすればよいであろう。

巧緻性解明の視座

小林一敏(筑波大学)

1. 研究の基本的方針

巧緻性解明というテーマが研究委員会で採択されているという事実は、身体運動の中に、巧緻性とよぶべき特有の性質を、相当数の識者が感じていることを示している。しかし、解明という言葉にみられるように、明確な照準をつけられるほどには研究の対象が定まっていないと考えられる。

このような問題に対する科学者としての態度のあり方は、研究の進め方に重要な影響をもってくる。数学者・哲学者として高名なバートランド・ラッセルの、テレビにおける問答である「ラッセル放談録 (Bertrand Russell Speaks His Mind)」についての湯川秀樹氏による紹介と解説¹⁾は、筆者の興味を引くところが多かった。「哲学とは何か」に答えて「……哲学とは、正確な知識がまだ得られない事柄についての思弁から成るものである」といっている。また、「哲学と科学との違いはなにか」に答えて「大ざっぱにいって、科学とは私たちが知っているところのものであり、哲学とは私たちが知らないところのものである、といってよいでしょう。それは簡単な定義であり、また、そういう理由によって、知識が進むにつれて、いろいろな問題がつぎつぎと哲学から科学へ移されてゆきます」と述べている。また、哲学の効用について「哲学には、実際二つの効用があります。一つは、まだ科学知識にまでなり得ない事柄についての、生き生きとした思弁をつづけることであり、世界についての想像的見解を、仮説的領域にまで拡大させることであります。もう一つの効用は、私たちが知っていると思っていて、実は知らない事柄があることを示すことであります。」と述べている。彼のこの見解について湯川氏は、「彼がいうところの哲学の定義が、科学について私が考えていることと、ほとんど違わぬことである」と述べられている。

筆者は、巧緻性解明というテーマに対処するに

は、ラッセルのいう哲学的思考が出発点として重要であると考える。もしその過程を経ずに短兵急に事を運こぼうとあせると、問題を、あるべき事柄のごく小さな部分に固定化してしまったり、重要性の評価を誤またりする場合がおきえよう。

2. スキルのシステムと巧緻的要素

巧緻性は、ある目的を達成しようとする実践的行動に関連する概念と考えられる。目的をインプット、実現された成果をアウトプットとするシステムを考えたとき、我々が、一般に技をみがくというのは、このシステムの内部状態を目的に対して一層適応させる行動をさしている。

水泳の熟達者に指導をうけると未熟者が早く上達するとすれば、実技の能力というのは空間を伝わって他者に伝達可能な要素があることになる。教わるとすぐ上達できる内容と練習を繰り返さないと身につかない内容もある。強い力の出し方は、他人から教わっただけで、本人に筋力がなければ、実技能力とはならない。このように、ある目的の運動ができるためには、情報的要素と骨格や筋肉などの物質的要素と行動のためのエネルギー的要素が相互に関連し、統合される必要がある。筆者は、この習熟により統合された実技能力をスキル(skill)とよぶことにする。そこで、スキルのシステム構造を分析していったときに、その要素の中に巧緻性に関連する性質のものが、どのように含まれているかを考察することにしたい。

3. スキルにおける目的と目標

野球で、ストライクにしようという意志をもって、投球動作を行なうとする。この場合に、「ストライクにする」というように、実践的意志が先取的に定立する行動の目標とするものが運動の目的であるが、実際にその目的を達成するためには、腕を振り上げるとか、脚を振り上げるとかの具体的動作が必要である。このような身体各部の一連の運動関係の特徴を視覚的パターンでとらえたも

のが、いわゆる“良いフォーム”といわれるもので、目的が達成される過程に対応して、身体側にあらわれる現象である。たとえば、この“良いフォーム”というのは、運動主体がそこに向かって到達努力をしている直接的対象であるが、これが運動の目標である。

スキル的行動は大きく2つに分けて考えられる。一つの目的を達成するための具体的行動の目標はいろいろと存在しようが、その中で、最も合理的な目標を発見しようとする実践的行動がはじめにある。次にその目標を物理現象として実現するためには、運動実体の物理的機能、つまり身体の目標にたいする応答能力を適応させるための行動が必要である。

4. 自然法則性の客観的把握と主観的把握

われわれが、経験とか思索をすることに意味をもつのは、人間を含めて、自然には現象のあらわしかたや、はたらきかたに対して、法則的なものが感じられるためである。ここで、自然に本質的に存在している法則性を自然法則性と呼ぶと、それをわれわれは客観的にとらえたり、主観的にとらえたりしている。

たとえば、昔の刀鍛冶は、焼入れの湯加減を手の温度感覚により調節していたが、同じ湯加減でも、人により熱く感じたり、それ程でもなかったりというように、個人差のある主観的なものであったろう。現在では、鋼焼入れは、各種の温度計により正確に測定され、作業の管理が行なわれている。しかし、鋼の焼入れの現象そのものの本質は今も昔も変わらないし、昔の名工は、感覚的に、本質を正しくとらえていたに相違ない。

名人、名工といわれる人は、極めてすぐれた作品を作り出すが、それは、その人個人だけの能力であり、その伝承は、名人と共に、同じ場において長年修業してはじめて可能になる。名人の湯加減として、焼入れの自然法則性が主観的に把握されていたものを、温度計の目盛として、客観的に把握されるようになったとき、名人の個人的感覚は、客観的・社会的存在としての技術情報になる。実技能力としてのスキルは、本を読んだり、話を聞いたりするような、言葉によっても向上する部分がある。言葉は、表現法が正確ならば、意味

する内容を正しく伝達することができる。写真を見ても、何かを感じとり学ぶことができる。しかし、写真だけでは感じとり方は人により異なる。写真の見方について、言葉による解説が付けば、感じ方がはるかに共通してくれる。同じような視覚的パターンでも機械をつくるための図面は、読み取り方が客観的に約束されているので、客観的に情報の伝達が可能となる。

スキルの習得には、知識として学べる部分もあるが、直接に手で引っぱってもらって、筋感覚として学ぶ内容もある。すなわち、自然法則性というのは、客観的に把握できる客観的自然法則性だけではなくて、主観的な感覚として把握した主観的自然法則性により補わなければ、全体が把握できないのである。

人間の技術的行動には、主観的にとらえた自然法則性を客観的なかたちで置き換えることにより、個人の能力を社会の能力に変換しようとするはたらきがある。

このように、主観的自然法則性と客観的自然法則性とは、相互に深い関連をもちつつも、論理学的にも、社会学的にも異質のものとして截然と区別すべきであると考える。

5. 意識的情報と無意識的情報

スキルというのは、空中から落とされた猫が、体をひねって足から着地するというような生得的な能力ではなく、習熟により獲得される合目的的な実技能力である。たとえば空中から落ちる場合でも、すもうなら、土俵の内側に足以外のところが極力時間的に遅れて落ちるようになるのが合目的的であり、柔道ならば、落ちたときの体の構えが次の攻撃や防御に有利な状態になっているのが合目的的であるというように、目的により習熟すべき内容が違うのである。

したがって、合目的的な自然法則性を、感覚的であっても知識的であっても、意識しなければ、合目的的な習熟的行動が始まられない。合目的的な自然法則性を意識し、それに合うように行動をすること（意識的適用^{2),3)}）によりスキル的行動が成立する。これは原始的社会の人間や幼児においても見られる行動である。もしも、合目的的自然法則性が全く意識されていない反復行動ならば、

それは単なる癖とか習慣に類するもので、スキル的行動とは呼べないであろう。

また、自然法則性の合理的な利用とか応用⁴⁾というものは、自然法則性の認識が必要と考えられるが、そこまで進んでいない意識されている段階において、スキル的行動は存在すると考えられる。

スキルの習熟過程では、はじめは意識しながら行なっていた行動が次第に自動化されて、無意識的に行なえるようになってくる。さらに習熟が進むと、全く無意識で合目的的な対応行動をしている部分ができるてくる。

この過程と逆に、無意識的で合目的的でない対応行動（たとえば悪い癖）を意識化させて、合目的的な行動に修正させることもあるであろう。

以上は、目的に対応して、合目的的な目標値を得ようとする過程であり、何らかの方法あるいは時期には、個体から個体へと、他者の利用のために伝達できる情報となる可能性がある。

運動の効果器である脊髄反射レベルの筋・骨格系の力学的作動能力を運動能とよぶことにする。脊髄反射学の延長上に生れた一つの重要な概念⁵⁾として脊髄上位中枢が脊髄反射を制御するという考えがある。これによれば、運動の目標値が与えられたとき、それに対応して制御対象である運動効果器の運動能を最適状態で作動させるための制御信号を、制御装置である反射中枢が送り出していることになる。すなわち刺激に対する応答反応というのは、効果器の運動能と反射中枢の制御能の両者の総合特性によると見るのである。この反射中枢の制御情報は、一般にわれわれは意識することはできないと考えられる。

6. 情報の客観的伝達と主観的伝達

一般的に、客観的知識は論理的な言葉によって客観的に伝達することができる。しかし、人間の認識は、必ずしも論理的な思考が最も納得のゆく方法であるとは限らない⁶⁾。とともに説明してわからないことも、たとえ話をしたり、模型実験をやった後では簡単に納得されることが多い。これは一種のイメージによる思考を媒介しているので、情報の主観的伝達方法といえよう。このように、客観的情報であっても、その伝達方法には客観的伝達方法と主観的伝達方法が存在すると考えられ

る。

他方、主観的情報は、個人的、心理的、感覚的なものであるから、一般には個人から個人への正確な伝達は不可能であり、どのように相手側に伝わったかが確かめられない主観的伝達方法が多い。しかし、昔の刀鍛冶のように、温度計がなくて手の感覚で湯加減を覚える場合でも、師匠と弟子とが同じ水槽に手を入れて温度をみていて、師匠が“今の湯加減を覚えろ”と合図をすれば、兩人は主観的な感じは異なっても、それが同一の物理的温度を媒介として、情報の価値を客観的に伝達したと考えることができる。このような意味で、主観的情報にもその伝達方法には、客観的伝達方法と主観的伝達方法があると考えられる。

7. スキルのシステムとその要素

スキルの目的にたいして合目的的な自然法則性に合った目標を与える情報には、客観的自然法則性と主観的自然法則性とがある。

また、スキル的行動の習熟をめざす生体制御系には、運動主体によって意識されている情報と意識されていない情報がある。

さらに、客観的情報（客観的自然法則性）と主観的情報（主観的自然法則性）には、それぞれ客観的に伝達可能な場合と主観的に伝達可能な場合と、どちらの方法によっても他者へは伝達不可能な場合がある。

以上の各条件を組み合わせると、スキル的行動のための情報は次のようになる。

- (a) 意識されている、客観的に伝達可能な、客観的自然法則性。
- (b) 意識されている、主観的に伝達可能な、客観的自然法則性。
- (c) 意識されている、客観的に伝達可能な、主観的自然法則性。
- (d) 意識されている、主観的に伝達可能な、主観的自然法則性。
- (e) 意識されているが、伝達不可能な、主観的自然法則性。
- (f) 無意識的で、伝達不可能な、主観的自然法則性。
- (g) 無意識的で伝達不可能な、反射中枢系の制御情報。

これらの各要素の説明に入る前に、スキルに関するいくつかの用語の問題⁷⁾に簡単に触れておく方が理解を容易にすると思われる。用語の規定にあたっては体育・スポーツの全技術史が正しく深く扱え、さらに、他の専門分野とも交流可能な概念になっていることが必要であると考える。人から人へと伝承されるもの²⁾と、その特質をみると、本能というのは肉体の中に宿って、遺伝情報として肉体に伝承する。技能というのは、肉体に宿っているけれども、肉体から肉体へは伝承できなくて見習わねば伝承できない感覚的情報による習熟を通して肉体の中に宿る。技術というのは知識の形で人から人へと伝えることができる。つまり客観的に伝えるということで社会的なものといえる。

技能というのは、本能的な運動としてあることができるとか、習慣的なくせがついたとか、偶然的にあることができるという状態ではない。ある目的を達成するための合目的的な自然法則性を、たとえば勘などのように感覚によりとらえ、それを意識的に適用しようとするところに技能的行動があるといえる。

これに対して、技術は、対象の中に法則性を意識し適用する。客観的法則性の場において行動するということを意識していて、それを適用しようとするところに技術的行動がある。

スキル的行動の中には、知識による技術的行動と、勘による技能的行動が共に含まれている。そして、ある人にとっては技能である内容が、他の人にとっては技術になっているということもあるといえる。

習熟が進むと、始めは意識していた行動も自動化が進み、その一部は、無意識化されてしまう。「巧みさ」というのは、この段階で現われる特性であろう。技術、技能のもつ合目的的な性質を保存しながら自動化された無意識的な行動であるから知識や勘を意識的に適用している技術や技能とは異なる性質をもっていると考えられる。このように、自動化され無意識化された合目的的行動能力を振りに「巧緻能」とよぶことにする。

先にあげた(a)～(g)の要素によるスキルのシステムモデルに上述の用語を対応させたものが図であ

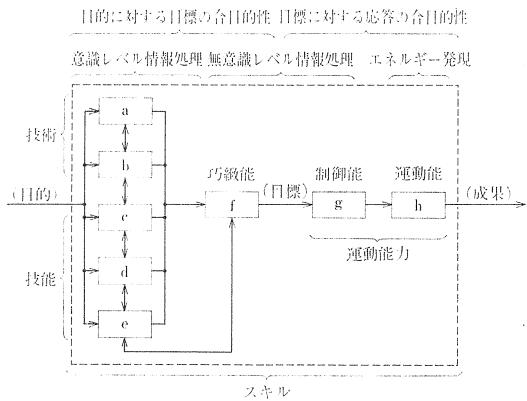


図1 スキルのシステム

る。

(a), (b)はともに技術情報であり、正確に伝達できる客観的な言葉によって表現されている自然法則性である。正確に伝達できる表現というのは、直ちに理解されることではない。ちょうど物理学や数学と似ている。したがって、納得させるためには指導の内容とともに、指導方法の技術と技能が問題になるのである。指導者の立場から簡略な表現をすれば、(a)は運動技術の指導技術であり、(b)は運動技術の指導技能である。

(c)は、前述の刀鍛冶が湯加減を教える例である。指導者の立場からは、運動技能の指導技術といえる。

(d)は、筋力の出し方などを、言葉のイメージで伝えたり、写真を見せて真似させるような場合である。指導者の立場からは、運動技能の指導技能といえる。

(e)は、水泳でよくいう「水をつかむ感じ」のように、運動者の感覚では意識されていても、適切な伝達の仕方がわからない場合である。運動者自身の創造的学习の役割が大きい要素である。

(f)は、運動のリズム感、タイミング、なめらかさ等の巧みな動作に関係し運動者自身も意識しないままに、身体が自然に合目的的な応答動作をしている部分が多いと考えられる。巧緻能の学習には、学習対象に意識を向けさせずに、他の部分の随伴運動として習熟を進める方法がよいと考える。

(g)と(h)は、前述の制御能と運動能をあらわしており、両者の総合特性を運動能力と呼ぼう。した

がって、運動能力に目的が導入されたときにはスキルとなる。

8. 巧緻能と巧緻性

スキルシステムにおいて、目的を実現するため技術は客観的にとらえた合目的的自然法則性として、技能は主観的にとらえた合目的的自然法則性として、ともに本質概念としてとらえるべきことを述べた。一方、運動能力は、一般に敏捷性とか持久性とか、瞬発力とかの諸側面によって表わそうとしているが、これは、運動実体そのものではなく、実体の特性を現象概念としてあらわしたものとみられる。

巧緻能は、合目的的自然法則性と運動能力との最適マッチングに関係していると思われる。このように考えるとき、巧緻能の特質の具体的諸側面を表現するものとしての巧緻性は、関係概念とし

てあらわされる可能性が大きいと思われる。

巧緻性解明にあたって、以上のような視座のもとに、具体的問題の考察にすすむのが筆者の今後の研究課題となると考えられる。

引用文献

- 1) 湯川秀樹；本の中の世界，126-133，岩波書店，1972.
- 2) 武谷三男，星野芳郎；科学と技術，勁草書房，1969.
- 3) 小林一敏；運動機構論（その1），体育科教育，3，1974.
- 4) 鳥居廣；「資本論」からみた技術の概念、技術と人間，221-229, 10, 1973.
- 5) 伊藤正男；神経中枢の運動制御，203 生体の運動機構とその制御，杏林書院，1971.
- 6) 湯川秀樹，梅棹忠夫；人間にとって科学とは何か，45-71，中央公論社，1967.
- 7) 小林一敏；運動技術指導学（1-13）体育科教育1973年5月から連載中。

上肢の動きにおける調節の仕方から見た巧緻性

渡辺俊男（横浜国立大学）

I. 緒 言

最近では巧緻性に関する問題がよりしばしば取りあげられるようになった。元来「巧緻性」という語に対してはいろいろな捉え方があり、その本質を分析的思考や手法によって求めようとすれば、かえって「巧緻性」の概念は分解され、いわゆる「巧緻性」の実際の様相から遠のき、これを総合的に把握しようとすれば、個々の事例に対してはよく理解できるが、だからと言って「巧緻性」とは何かという疑問に対して答えるものとはならない。従来の論議もまた分析と総合の間を往復しているようである。

多くの動物は左右対称である。勿論これにも例外がある。一般に浮遊動物や水底に固着しているような動物は点対称のものが多い。動物の運動は骨と筋であり、そのため左右対称の形態は動物の運動様式に關係あると考えられている。しかしながら位置移動のような動作は、人間と動物とで、いずれも機能的にも左右対称であるが、巧緻性が最もすぐれていると考えられている手の動作では、左右の働きが非対称であることが多い。左右の分化の非対称性は、人間では上肢に著明であるが顔にもまた「利き顔」があると考えられ、時実^{1), 2)}, 3), 4), 5)

は利き側、非利き側の筋の機能的特徴を報告している。人間は民族、人種、性別にかかわらず、右利きであるのが通則であり、左利きは、むしろ例外的発現であると考えられている。

人体には有対性的器官が多いが、もし生物が生命保持に対して合目的性をえらぶとするならば、左右性が非対称性になるのは、その必要性があり、そのことが有利でなければならないと考えられる。

左右不対称であっても、形態上の非対称にまでは分化していない。動物性器官でも、基本的生命維持に關係の深いものは、左右相違の発達が少なく、左右の分化は、むしろ前進運動、摂食動作、

視覚などに關係した器官に認められる。

左右の非対称性は、単に生物と自然環境の間にあって、できあがったものではなく、特に人間の動作においては、社会的制約によってより分化させられた面もあり、万井⁶⁾ はその出現の度合を報告している。

このことは、大脳皮質の運動支配領野における一側優位をもたらすことになり、巧緻性は大脳皮質の機能に帰結されるところが多い。

このような生物の発達史よりみると、巧緻性の解明に対して左右の非対称の解析は何らかの示唆を与えるものであり、この方面的研究も少くない。あるものは大脳両半球の分化に巧緻性を求め、またあるものは筋及び、中枢と末梢の神経回路と巧緻性の関係を追求している。倉田^{7), 8), 9), 10)} は筋感覺による筋力調節能から巧緻性にアプローチしている。

本実験は巧緻性を如何に捉え、巧緻性を増強するため如何なる指導法があるべきかを求めて行ったものである。ここでは末梢の筋感覺情報が皮質に受容され、ついで皮質において処理され、効果器にあらわれる回路について左右の相違を比較検討し、巧緻性成因の要因を明らかにしようとしたものである。

II. 実験方法

左右手を用いて行う動作は、図1に示すように、被験者を椅子閉眼位にせしめ、上腕を体側にそわせ、肘関節を90°に屈曲して、前腕を机上におき、手掌面で下方向の押し動作をくり返すものである。この押し動作はペーパーストレインギージを貼付した板(30×25cm)上に取りつけた直徑4cmの凸部を手掌で押すもので、この際に加えられた力を、重量として記録し、動作量の示標とした。

発揮した力を動作量とみなして、その際の調整

EXPERIMENT METHOD & PROCEDURE

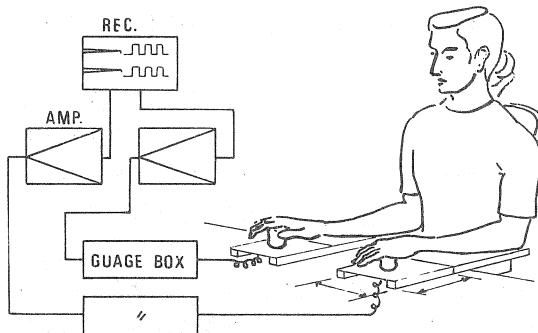


図 1

を検索するために、発揮する力を Maximum にしたりあるいは、Maximum の $1/x$ と規定せずに、各被験者が最も発揮しやすい任意の力で押し動作を遂行させた。

押し動作のプログラムは、左右上肢の脊髄回路に入る情報量の相違を意図し、次のように組み立てた。いずれの動作プログラムにおいても、押し動作は 3 秒間とし、次の押し動作までは 3 秒間の休みを挿入した。押し動作のくり返しの回数は、疲労による影響を考慮して 50 回とした。各 50 回の動作量は、被験者が同一量であると意図して発揮せしめたものである。各回の動作量は被験者に

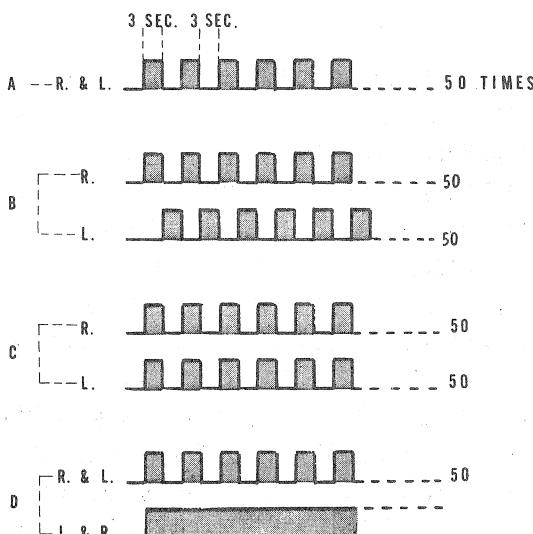


図 2

feed back されなかった。各動作プログラムの所要時間はおよそ 5 分間である。

押し動作のプログラムは、図 2 に示すように、次のプログラムである。

- (A) 右手または左手の片手で動作をする場合。
- (B) 右手と左手を交互に動作する場合、この場合、右手、左手とも交互に各 50 回行う。
- (C) 右手と左手を同時に動作する場合。
- (D) 右手または左手で動作する際、他側の左手または右手で持続的に動作をしつづける場合。この際の持続動作量は、他側の動作量と同程度のものである。

この際の動作量は三栄測器製の歪増幅器を介して記録した。動作時の筋電図は、左右の M. flexor capri radialis から表面電極を介して導出した。筋放電量は積分計によって積分値を求めた。

被験者は 20~24 才の健康な男子 6 名、女子 2 名を用いた。

III. 実験結果

(A), (B), (C), (D) の各動作プログラムにおける 50 回の動作量の平均値、標準偏差および変動係数を被験者別に表 1 に示した。

表 1 The Pressure of Right and Left Hand in Each Case (A, B, C, D) of All Subjects

sub.		A		B		C		D	
		RIGHT	LEFT	RIGHT	LEFT	RIGHT	LEFT	RIGHT	LEFT
T M	m	2.1	2.6	2.8	3.8	2.1	2.6	2.3	2.5kg
	s	0.15	0.29	0.42	0.29	0.29	0.23	0.45	0.34
	c	6.8	11.3	14.7	7.6	14.0	8.9	19.9	13.9%
M M	m	3.1	2.4	3.1	3.1	3.0	3.2	2.7	
	s	0.34	0.24	0.46	0.51	0.25	0.26	0.50	0.29
	c	11.0	9.9	14.8	16.5	8.2	8.7	15.5	10.9
M T	m	2.0	2.2	2.6	3.2	2.1	2.3	3.7	4.7
	s	0.16	0.29	0.17	0.28	0.49	0.40	0.57	0.49
	c	7.9	13.0	6.5	8.5	23.4	17.5	15.4	10.5
S N	m	5.1	5.4	5.0	5.0	4.6	4.1	3.5	5.2
	s	0.44	0.45	0.49	0.55	0.41	0.32	0.40	0.69
	c	8.7	8.3	9.9	11.0	9.0	7.7	11.4	13.3
K M	m	2.5	1.7	1.8	2.2	1.6	1.3	1.5	1.6
	s	0.42	0.28	0.37	0.25	0.24	0.30	0.38	0.22
	c	16.7	16.7	21.3	11.2	15.1	23.6	26.2	14.4
Y K	m	2.3	2.2	2.5	3.0	2.1	2.5	2.8	2.9
	s	0.45	0.41	0.49	0.58	0.49	0.54	0.41	0.34
	c	19.3	18.8	19.5	19.3	23.1	21.5	14.7	11.8
T W	m	2.0	2.4	1.2	1.3	1.5	2.0	1.2	1.3
	s	0.33	0.21	0.13	0.16	0.13	0.38	0.13	0.16
	c	16.7	9.0	10.6	12.6	8.9	19.3	10.6	12.6
Y K	m	1.8	1.5	2.2	1.8	1.6	1.5	1.9	1.3
	s	0.19	0.14	0.14	0.14	0.22	0.12	0.16	0.17
	c	11.4	9.6	6.5	8.0	14.0	8.1	8.3	12.8

それぞれの被験者によって、最大力が異なっているため、表1にみるように任意に発揮される動作量にも左、右手とも個人による差異が認められる。しかし、個人が発揮する動作量は、動作プログラム(A), (B), (C), (D)ともほぼ同程度であり、発揮しやすい動作量は、動作様式が変化してもあまり変わらないことがわかる。この際発揮された動作量は、いずれの被験者でも最大力の20%前後であり、日常動作時に発揮する頻度の高い動作量で応じているものと推定される。

右手と左手の動作量の違いは、個人によってその傾向は異なるが、概して左手の方が動作量の多い被験者(T. M, MT, SN, YK, TW)と右手の方が動作量多い被験者(MM, KM, YuK)とがあり、この傾向は、各動作様式(A), (B), (C), (D)ともに認められる。

情報量の異なる動作プログラムにみられる動作量の変化を、8人の被験者の平均値からみると、表2、図3にみられるように、両手同時動作(C)時

表2

		A	B	C	D
M	RIGHT	2.6	2.7	2.4	2.5
Kg.	LEFT	2.6	2.9	2.4	2.8
CV	RIGHT	9.9	13.0	14.5	15.3
%	LEFT	9.7	11.8	14.4	12.5

HAND PRESSURE PERFORMED IN EACH CASE (A, B, C, D)

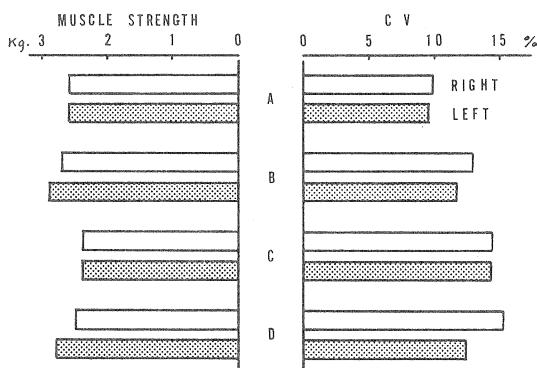


図3

に、左右手とも動作量が少なく、とくに左手では、片手交互動作(B)や緊張負荷動作(D)時で右手よりも動作量が多いにも拘らず、両手動作(C)で右手と同じになっている。

各被験者は、各自が同一の力50回を発揮して動作を行ったものとしても、各回の値は必ずしも同一ではなく、また毎回の値は被験者に知らされないことから、動作量の変動がみとめられる。

各50回の動作量の変動を、平均値と標準偏差の比から変動係数を求めて検討した。動作量の変動には個人差がみられるが、表2にみるように(A)(B)(C)(D)のいずれの動作でも、概して右手動作の変動が大きい場合が多い。

8人の被験者の値をこみにした各動作プログラムにみられる変動率の変化は表2、図3のとおりである。これにみられるように片手動作(A)に比べて、左右手を同時又は交互に使用する場合には(B, C, D), 変動率が高くなるが、とくに両手同時動作の変動率は左右手ともに高くなっている。

片手交互動作時に左手動作量の変動が大きくなるのは、動作の多い右手動作にひきつづいて動作をすることから、右手動作に追従することによって変動が大きくなったものと推定される。

このような左右動作にみられる動作量とその変動率の差異は、左右両手の機能の相異を示すものだろう。

IV. 考 察

自分の行った動作の結果に対して、視覚や、言語によってもたらされるフィードバックを遮断したような場合、発現した動作が、目的とした動作量に適合したものであったか否かは主として、皮膚感覚や筋感覚、腱器官などの感覚受容器からの情報に依存せざるを得ない。本実験で行った動作は、等尺性収縮によるもので、張力の変化を主として筋紡錘を検出器としてとらえているが、動作の発現に際しては上肢を含めた脊髄回路、さらに上位の脳幹網様体の関与および知覚領、運動領野を介した閉回路によって調整され、変容されていることはいうまでもない。この際、感覚器から入力した情報がいかに加工処理されるかは、上位の中権によるもので、ここは black box として、

表 3

		A	B	C	D
EMG	RIGHT	11.7	12.6	11.7	12.7
	LEFT	10.8	9.8	10.2	12.9
CV	RIGHT	17.5	15.4	16.1	16.6
	LEFT	24.4	19.3	16.6	19.3

そこからの出力がいかに効果器で発現されるかによってその black box の様相を類推するよりほかに現在そのすべてをもたない。しかし Sherrington 以来、多くの研究者によって脊髄レベルまではかなり明確な知見が得られている。運動に関与する中枢の働きを black box とするならば、脊髄レベルでの調整は gray box としてみなされよう。

さらに γ 系を介しての網様系の関与や錐体外路系による筋トーヌスの変化などによって末梢からのフィードバック量が変化することによって、中枢からの情報の末梢の表出は変容されうる。このようないくつもの閉回路により調整のバランスが変化している中で、動作の発現が目的とされる動作量に合致すべく調整されるには、複数した機能の関与が考えられる。

本実験では、末梢からの入力量を変化させることによって、このような運動調整のメカニズムを検討しようとしたものである。

さらに動作は左右手とも、同様な動作プログラムで行なった場合、右手と左手の動作様式にいかなる差異が生じるものかを検討した。

表 1 にみられるように動作量の平均値は利き手、非利き手にかかわらず、右手の方の動作量の多い被検者は、動作プログラムが異ってもその傾向が保持されており、左手の動作量の多い場合も同様な傾向がみられる。しかし概して非利き手の左手の方が動作量がおおい場合が多い。とくに図 3 にみると右と左手交互(B)の場合や、右手の持続緊張を伴った左手動作(D)のように、右手で発現された動作量が、左手動作の目標値となるような場合には、左手動作量が多くなる傾向が目立っている。このことは、左手が右手と同量の動作量を意図しても、より多くの筋緊張を伴わなければ同量と感知しない感覚性のものか、あるいは中枢からの出力情報が、すでに末梢での筋のトーヌスが高まっているため α 運動ニューロンの閾値の低下により増幅されて、動作量の増加をみるといった、末梢の応じ方に差異があるためではないかといった疑問が生じてくる。そこで動作の 1 つの目安として、該当筋である M. flexor capri radialis から筋電図をとり、このときの積分値をとって、左右手動作を比較すると、表 3、図 4 のように、

ELECTROMYOGRAMM INDUCED BY PRESSING WITH HAND

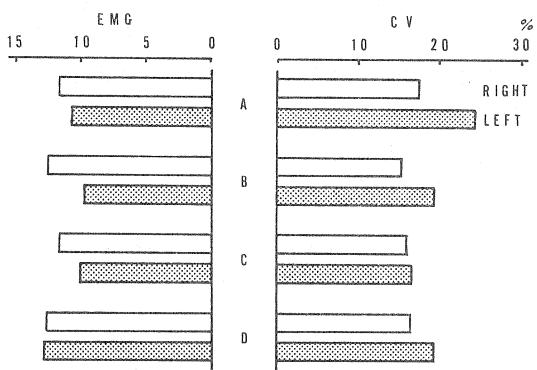


図 4

交互動作(B)の場合、左手の筋放電量は右手より少なく、緊張負荷動作(D)では右手とほぼ同程度の筋放電量がみられる。筋放電量と動作量とは必ずしも一致しないにしても、動作量の多い左手で筋放電量が、逆に少ない(B)、あるいは右手とかわらない傾向(C)がみられる。等尺性の動作であるため、該当筋と同時に拮抗筋の緊張も加わり、その結果、左手の場合には張力の発生が大となっているとも推定される。該当筋は拮抗筋の相反抑制によりやや放電量の減少がみられるものと思われる。このことは、左手動作が、右手に比して、動作の発現に際して緊張度が高く、この場合中枢での差異よりも、むしろ日常生活における利き手、非利き手の機能の発揮の仕方が末梢の機能の差異を生じさせているものと思われる。動作の習慣が筋の機能をかえ、Kinetic あるいは Tonic な筋の機能を変えることは川崎¹¹⁾などによっても指摘されており、また万井⁶⁾らも単純な動作では左右差が少ないと、筋の協調や時間的調整を要する動作では左右差が大きくなることをみており、左右手動作の違いは

むしろ末梢の筋の機能に求められるようである。

各動作プログラムによって、情報量を操作した場合、動作量にみられる変化は、両手動作時に変化がみられる。両手の同時動作(C)では両側から脊髄回路に同時にインパルスがおくられるため、相反抑制による影響をうけ、左右手とも動作量の減少がみられたものと推定される。またこの際の左手の動作量が他の動作プログラムの時より少ないのは、右手に追従して動作が行なわれたためと解される。

しかし概して各動作プログラムにみられる動作量に差異が少ないのは、被験者が任意の力を発揮したにしても、発揮しやすい力の最適範囲があるためと解される。

右手と左手による動作発現時にみられる相互の関連性を相関係数からみてみると、表4にみると

表4 Co-relation Between Pressing By right and Left Hand

	A	B	C	D
T. M.	0.228	0.529**	0.398*	0.298*
M. M.	0.104	0.799**	0.802**	0.401
M. T.	0.544**	-0.051	0.598**	0.268
S. N.	-0.043	0.555**	0.854**	0.202*
K. M.	-0.199	0.195	0.768**	0.381
Y. K.	0.485**	0.176	-0.472**	-0.151
T. W.	-0.315	0.237	0.543**	-0.198
Y. K.	0.020	0.019	0.501**	-0.213

うに、両手同時動作(C)では、いずれの被験者においても右手と左手動作に有意な相関関係がみとめられる。しかし他の動作プログラム(A, B, D)では相関関係は少ない。両手動作時の右手、左手動作の相関は左手の動作量や変動係数が他の動作プログラム時と異なっていることからみても、左手の右手動作への追従によるものとみなされよう。

本実験では動作をくり返す場合、動作の結果は、筋感覚を介してフィードバックされるため、目標値は毎回のフィードバック量によって変動する。そこでこの変動の巾を目的動作に対する判断能としてみると、片手動作(A)に比して、片手交互(B)、両手(C)、緊張負荷(D)と動作による入力情報が増加すると、変動係数が大きくなるのは、情報量の増

加に伴う脊髄回路内の疎通現象によるためか、あるいは、情報量の増加に伴う中枢のblack box内のdecisionに原因するものと考えられる。しかし動作プログラムに伴う動作量の増加がみられないことから、また、中枢内部の両側を同時に使う動作時に左右の変動率が等しく大きいことから、中枢における情報処理が困難になると、それに伴って判断誤差が生じてきたものと解される。

くり返し動作が行なわれ際、結果に対するフィードバックが筋感覚によるならば、その感覚量が次の試行の目標値になりうことから、各試行がその一試行前の動作量に対してどの程度の誤差を生じるかということからも動作調整の様相を知ることができよう。そこで、50試行の各1回毎の値を毎回前試行値に対する割合を算出して検討を加えた。すなわち、前試行の値を目標とした場合、次試行は、この目標値の何%増または減で発揮されたかを算出したものである。目標値よりも多く次試行が発揮される場合を(+)誤差とし、少なく発揮された場合を(-)誤差として取り扱かった。

誤差の出現頻度・誤差量および変動係数を表5、図5に示した。目標値よりも多いか少ないかといった(+)または(-)誤差の出現頻度(N)をみると、各動作プログラ(A), (B), (C), (D)における(+)誤差および(-)誤差の出現頻度は(A), (B), (C), (D)のいずれの動作プログラにおいても、19~20回と(+)(-)とも同程度である。すなわち前試行にひきつづく次試行が、(+)誤差をもって発揮されるか(-)誤差で発揮されるかの頻度には、動作プログラムによる差異がみとめられないことが示される。またこの際の誤差頻度には左右差がみとめられない。

ある目標値を設定して動作が遂行される場合には、その目標値に対して興奮量のフィードバックが行われ、目標値を中心として興奮量の過不足が同頻度に行なわれることによって、目標値を維持しようとする自動制御の調整が働くものと推定される。

さらにその際の一回あたりの(+)誤差および(-)誤差にみられる誤差量の推移をみると、(A), (B), (C), (D)のいずれの動作プログラムにおいても、(+)誤差量が(-)誤差量よりも多く、脊髄回路へ

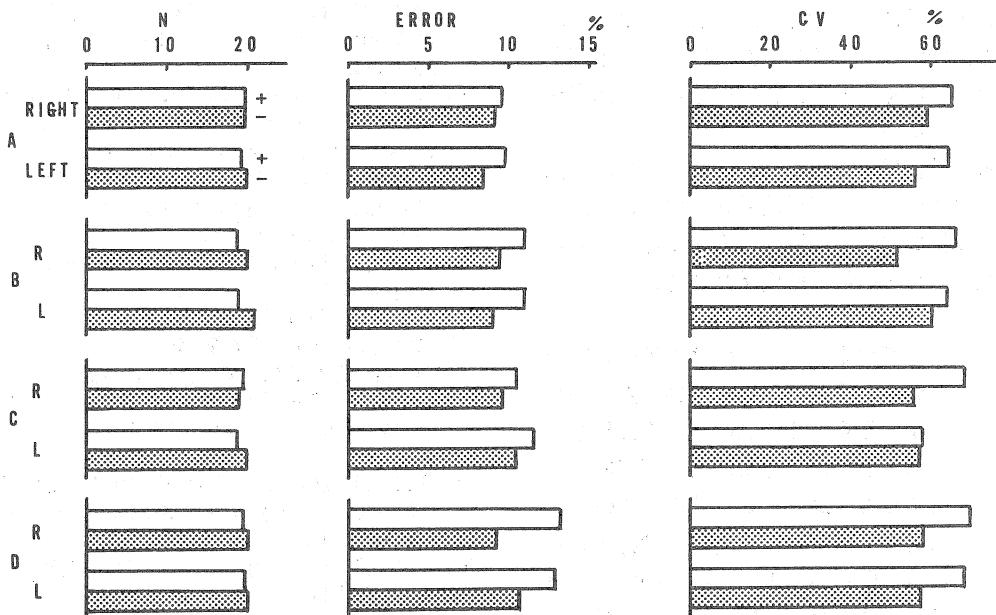
表5 Errors From the Preceded Pressing in Each Case (A, B, C, D)

		A		B		C		D	
		+	-	+	-	+	-	+	-
N	RIGHT	19.9	19.9	18.6	20.3	19.6	19.0	19.5	20.3
	LEFT	19.3	20.0	18.9	21.0	18.9	20.0	19.9	20.1
ERROR %	RIGHT	9.6	9.3	11.1	9.5	10.5	9.7	13.2	9.3
	LEFT	9.9	8.5	11.0	9.0	11.9	10.4	12.9	10.8
CV %	RIGHT	65.7	59.3	66.4	51.5	68.7	55.6	70.3	58.6
	LEFT	64.8	56.1	64.1	60.7	57.9	57.5	68.4	57.1

の入力量が増加する動作プログラム(B), (C), (D)とくに(D)動作ではこの傾向が顕著である。しかし(-)誤差については、(A), (B), (C), (D)動作プログラムの間に差異がみとめられず、入力量の違いによる変化はみとめられない。このことは、動作がくり返されることによって脊髄回路内では α 運動ニューロンの疎通、および γ 系を介しての網様体からの興奮のフィードバック、上位中枢の興奮水準の上昇により、(+)誤差量が(-)誤差量を上

まわったものと推定される。入力情報の多い動作プログラムほど、この傾向が著しいのは、入力情報量の多少が、これらの疎通や興奮水準に影響していることを示唆している。しかし興奮水準が上昇し、(+)誤差量が増加したにも拘らず、(-)誤差量の減少がみられないのは目標とする動作量を一定に保とうとする生体内の意図された動作プログラムが、過分な興奮量をチェックするフィードバック回路をもって(-)誤差量の減少を妨げてい

ERRORS FROM THE PRECEDED PRESSING IN EACH CASE (A, B, C, D)



N : +または(-)の出現回数をます

図5

るものと推定される。

また右手および左手における前試行に対する誤差量および(+)誤差、(-)誤差方向への誤差頻度は、いずれの動作プログラムにおいても左右差はみとめられない。このことは、前試行を目標値として感覚し、表出することには左右差はないが、表出された動作量にちがいが生じていることを示している。すなわち表出する末梢の働き方に左右差があるものと解される。しかし、右手、左手とともに、表出された動作量をいかに感覚し、その感覚の feed back をいかにするかといった上位中枢の働きには差異がみとめられないようである。

V. 総 括

右手および左手による押し動作を対象として、動作発現の調整に検討を加えた。さらに両手動作を組み合せ、動作による入力情報の相違が、動作発現の調整にいかなる差異を生じるかを動作量およびその変動から検討した。合せて、右手動作と左手動作の差異について考察した。

1. 押し動作を任意の力 (sub maximal) でくり返す場合、いずれの被検者とも Maximum な力の約20%の力が発揮される。右手に比して左手の動作量はやや多い傾向がみられた。
2. 右・左手による動作の組み合せによって、入力情報が多くなるにしたがい、変動率が左右手とも多くなる。動作量の平均値には変化がみられない。
3. 右手動作は、左手動作に比してやや変動係数が大きいが、両手同時動作の場合は、左手の変動係数が右手と同様に大きくなる。右手と左手動作量の相関は両手動作時に有意であった。
4. 動作時の筋放電量の積分値は右手動作の方が大きいが、変動係数は小さい。左手動作は、動作量にみられる変動率が右手に比して小さいにも拘らず筋放電量に変動が多い。
5. 動作をくり返す際、前試行値を目標値として、次試行の誤差をみた場合、前試行よりも動作量の多い(+)誤差と、少い(-)誤差の出現頻度は同じであり(A), (B), (C), (D)の動作プロ

ログラムにかかわらない。右手、左手とも同様な傾向がみられ、左右差はない。

6. 前試行に対する誤差量は、入力情報の多くなる動作プログラムになるにつれて(+)誤差量が増大する。(−)誤差量は動作プログラムにかかわらずほぼ一定である。前試行に対する誤差量には左右差はみられない。
7. 以上より、目標値を設定して、くり返し動作が遂行される場合、末梢の感覚受容器からの入力情報の多少によって、動作量の変動率は変化するが、平均動作量は、ほぼ一定の値を示す自働制御機序がみとめられた。右手動作、左手動作にみられる左右差は、入力情報を感覚し、判断する中枢部での差異よりも、むしろ、筋から脊髄回路を含む末梢の閉回路に差異があるものと推定された。

VI. 参 考 文 献

- 1) 時実利彦、津山直一 (1953) 筋電図とその臨床的応用—総覧—、東京医学誌、59, 62~87.
- 2) 時実利彦 (1953) 骨格筋の機能的分化と収縮の調節—筋電図の一つの応用—、医学のあゆみ、15, 146~156.
- 3) 時実利彦 (1955) 人間の骨格筋の機能分化 I—運動の Corticalization と Spinalization—科学、25, 229~233.
- 4) 時実利彦 (1955) 人間の骨格筋の機能分化 II—運動の Corticalization と Spinalization—科学、25, 291~297.
- 5) Tokizane, T. & Shimazu, H. (1964) Functional differentiation of human skeletal muscle, University of Tokyo Press, Tokyo 1~60.
- 6) 万井正人、谷口豊子、伊藤一生、菊地邦雄：人の作業特性としての右利き、左利きの研究、人間工学 Vol. 7, Vol. 2, p. 99~105.
- 7) 倉田 博、馬詰良樹、柳本昭人、森下芳郎、山本直道：筋力の調節能力について、体力科学 Vol. 19, No. 1, 2, p. 36~46 昭和45年6月。
- 8) 名取礼二、五十島長太郎、坪田修三、馬詰良樹、倉田 博、柳本昭人、森下芳郎、山本直道、石井令三：等尺性強縮時の張力時間関係からみた筋力指標について 体力科学 Vol. 19, Vol. 3, p. 75~85 昭和45年9月。
- 9) 倉田 博：筋力調節における運動単位の活動特性の2, 3 の検討。体力科学 Vol. 21, No. 4, p. 183~187, 昭和47年11月。
- 10) 倉田 博：単一運動単位の興奮の相対閾値変動について、体力科学 Vol. 21, 昭和47年。

光刺激に対する多様選択全身反応時間の分析に 関する研究（鍛練効果を中心として）

藤田 厚（日本大学）

巧緻性解明のためのプロジェクト研究の一環として、本研究は刺激受容から反応に至る知覚一運動系の機能の中に巧緻性を解明する手がかりを求めるようとした。すなわち、光刺激に対してなされる多様選択全身反応において、眼球運動を介して刺激を受容し、その刺激を弁別確認して、それに対して適切な反応を行なうという時間経過を相として分析することによって、巧緻性なるものがどの時間相に最も影響するものであるか、また、その際に、刺激の出現様式を予測して、あらかじめ反応の構えを作ることがどの時間相にどのような影響を与えるものであるかについて検討しようとした。

多様選択全身反応時間の分析によって巧緻性を解明する上記の目的を容易にするために、本研究では、巧緻性が高いとみられるすぐれたスポーツマンと、巧緻性の低い一般大学生の反応時間相を比較検討することにした。

〔方 法〕

1. 実験のデザイン

シールドした暗室の中で、ストレイン・ゲージを貼った跳躍板 ($50 \times 50 \times 11\text{cm}$) の上に被験者を楽な姿勢で立たせ、前方の眼の高さにあるランプを凝視させる。ランプが消えると視角 30° の左右いづれかの点に光刺激が点灯されるが、その中には↑のような上向きの矢印と↓のような下向きの矢印のいづれかが見えるようになっている。被験者は中央のランプが消えて左右いづれかのランプが点灯したら、周辺視によってそのランプの位置を知り、その位置に眼球運動を行ない、中心視によって矢印を確認して、上向きだったら高く、下向きだったら足が板上から離れる程度だけ軽く跳躍するという上下方向に対する全身的な選択反応

を行なうように実験に先立って教示された。

被験者の眼球運動を知るために右眼の内外角に直径 10mm の皿電極を貼り、眼球運動によって生ずる網角膜電位の変化を眼球運動 (Eye Movement) としてオシログラフに記録した。また、被験者の跳躍による全身反応をみるために跳躍板に貼ったストレイン・ゲージによる歪変化を反応曲線 (Response Curve) としてオシログラフに記録する一方、その反応曲線の解釈を助けるために、表面誘導によって、右脚の前脛骨筋 (M. Tibialis Anterior) と同脚の腓腹筋 (M. Gastrocnemius) からの筋電図をオシログラフに同時に記録した。用いた記録器は三栄測器製 IA-52 型脳波計である。

以上の記録に基いて I. 中央のランプが消えて左右いづれかのランプが点灯した際にその方向に眼球運動を開始するまでの潜時 (Latency of Eye Movement), II. 眼球が右または左に運動する所要時間すなわち眼球運動時間 (Eye Movement Time), III. 刺激を受容した後、中枢でそれを弁別確認して、反応様式を決定して、腓腹筋にその命令を下すまでのいわゆる決断時間 (Decision Time), IV. 腓腹筋の放電が始まってから脚が跳躍板上を離れるまでの筋収縮時間 (Contraction Time), そのうち放電開始から歪曲線の最大変化時前の時間 (IVa. Contraction Time before Max.) 歪曲線の最大変化時から脚が跳躍板を離れるまでの時間 (IVb. Contraction Time after Max.) の各相に分析し、それらの合計を V. 反応時間 (Reaction Time) とした。

なお、これらのほかに、VI. 中央のランプが消えてから跳躍の予備動作として脚をあげるために前脛骨筋が放電を開始するまでの時間 (Latency of Leg Flexion) と、VII. 歪曲線の上で、脚が板

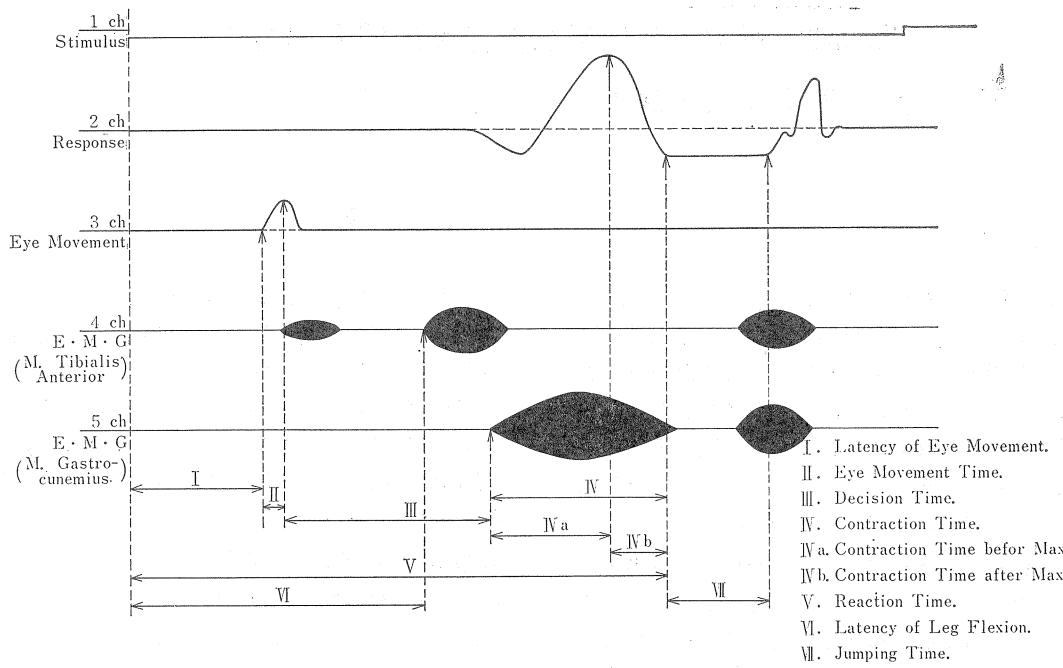


図1 Phase of Body Reaction Time.

上から離れて再びそこに着くまでの滞空時間 (Jumping Time) を分析した。

記録による反応時間相の分析の観点は図1の矢印によって示されており、各時間相は矢印と矢印の間で知ることができる。

2. 実験の手続き

被験者は跳躍板の上に染な姿勢で立ち中央のランプが消えると同時に左右いづれかに点灯されたランプの中の矢印を確認して、それに従って跳躍をする。刺激の呈示順序は右の上向き5回、左の上向き5回、右の下向き5回、左の下向き5回の計20回をランダムに呈示し、これを選択反応とした。

次に2分間の座位での休憩の後に、右の上向き15回、左の上向き15回、右の下向き15回、左の下向き15回の計60回、ランダムに呈示される刺激に対して、その刺激が右に呈示されるか左に呈示されるかを発声を伴って、例え「右！」「左！」のように予測させ、注意を他側に向かながらもなお一方、重点的に予測した側に注意を集中して構えを作らせて反応させた。なお60回の刺激呈示の中

間で座位で2分間の休憩をとらせた。

このようにして予測をさせたものと、刺激の呈示が一致したものを予測一致反応とし、不一致であったものを予測不一致反応とした。

3. 被験者と実験期日

被験者として、日本大学の運動部に所属する軟式テニス、陸上競技短距離、器械体操のいづれも一流選手20名を鍛練者として用い、日本大学文理学部所属の一般学生20人を非鍛練者として用いたが、前者の中で特にVの相の反応時間の短かい者を10人、後者のうちでそれの特に長いものを10人選んでデーターとして用いた。

実験は昭和48年6月25日から7月30日まで午後3時から7時までを特に選んで、日本大学文理学部体育学実験室で行なわれた。

〔結果と考察〕

オシログラフの上に現われた各個人の時間相をm単位で計測し、その平均値と標準偏差を算出したt検定を行なった後に、それを時間に換算した。平均値と標準偏差の算出に当っては小数点2位を

表1 Original Data (msec)

Phase			I	II	III	IV	IVa	IVb	V	VI	VII
			$\bar{X} \cdot (S.D.)$								
Selective Reaction Time	high jump	S N=94	282 (68)	68 (18)	328 (108)	283 (70)	163 (62)	120 (27)	960 (152)	303 (145)	435 (107)
		N.S N=99	278 (62)	73 (42)	435 (187)	293 (90)	177 (65)	122 (47)	1084 (188)	457 (213)	457 (20)
	low jump	S N=96	277 (63)	68 (13)	347 (187)	275 (85)	157 (78)	122 (22)	964 (407)	330 (127)	237 (105)
		N.S N=95	260 (58)	70 (17)	455 (187)	280 (87)	172 (70)	115 (37)	1084 (228)	450 (222)	288 (110)
Reaction Time of Correct Prediction	high jump	S N=127	303 (87)	63 (12)	232 (160)	287 (67)	182 (53)	107 (33)	882 (152)	332 (110)	442 (97)
		N.S N=136	245 (47)	72 (12)	388 (112)	322 (92)	190 (77)	133 (47)	1032 (248)	362 (120)	478 (62)
	low jump	S N=131	278 (60)	62 (23)	277 (150)	270 (18)	148 (82)	110 (20)	890 (153)	327 (82)	247 (60)
		N.S N=151	248 (58)	70 (10)	395 (182)	302 (75)	178 (77)	123 (30)	1022 (117)	397 (152)	303 (97)
Reaction Time of In-correct Prediction	high jump	S N=128	282 (57)	67 (17)	355 (112)	273 (85)	168 (57)	122 (28)	964 (195)	377 (210)	423 (87)
		N.S N=129	272 (45)	68 (18)	395 (112)	303 (72)	180 (67)	128 (38)	1040 (162)	378 (48)	462 (73)
	low jump	S N=112	288 (72)	68 (17)	343 (132)	282 (80)	167 (105)	117 (27)	967 (183)	395 (195)	245 (75)
		N.S N=107	273 (62)	73 (37)	405 (142)	305 (83)	183 (78)	125 (38)	1059 (157)	388 (150)	322 (27)

S : Sports man N.S : Non-Sports man

表2 Comparison of Selective Reaction Time between Sportsmen and Non-Sportsmen (msec) (high jump and low jump)

Phase		I	II	III	IV	IVa	IVb	V	VI	VII
high jump	difference	4	- 5	-107	- 10	- 14	- 2	-124	-154	- 22
	t	0.425	1.060	4.809	0.854	1.523	0.358	4.997	5.880	1.999
low jump	difference	17	- 2	-108	- 5	- 15	7	-120	-120	- 51
	t	1.931	0.910	3.974	0.400	1.392	1.584	2.500	4.572	4.502

*** : significant at 0.1 percent level ** : significant at 1 percent level * : significant at 5 percent level

表3 Comparison of Correct Prediction Reaction Time between Sportsmen and Non-Sportsmen (msec) (high jump and low jump)

Phase		I	II	III	IV	IVa	IVb	V	VI	VII
high jump	difference	58	- 9	-156	- 35	- 8	- 26	-160	- 30	- 36
	t	6.744	6.060	9.181	3.496	0.972	5.144	5.848	2.103	3.599
low jump	difference	30	- 8	-118	- 32	- 30	- 13	-132	- 70	- 56
	t	4.241	3.854	5.856	4.741	3.150	4.192	8.152	4.686	5.696

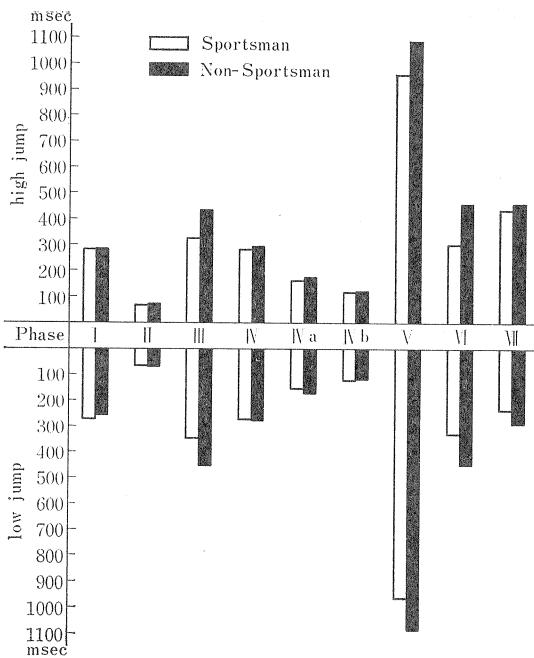


図2 Comparison of Selective Reaction Time between Sportsmen and Non-Sportsmen
(high jump and low jump)

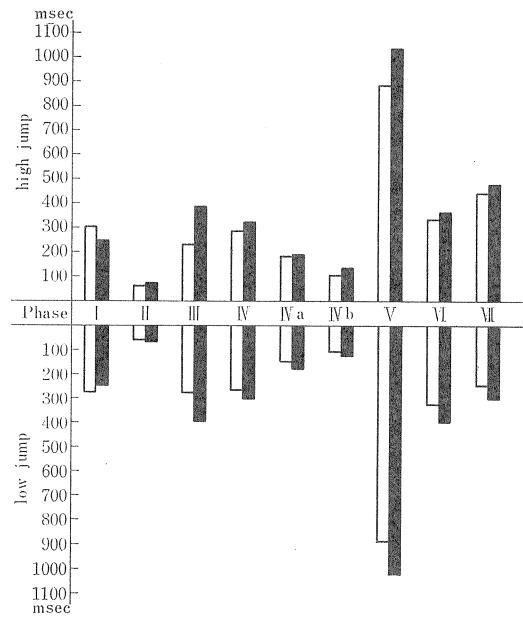


図3 Comparison of Correct Prediction Reaction Time between Sportsmen and Non-Sportsmen
(high jump and low jump)

4捨5入して小数点1位まで求めた。

なお結果の処理に当っては左右の選択性を問題にせずに進行なった。

選択反応、予測一致反応および予測不一致反応のそれぞれの反応時間相を表1に示した。

1. 鍛練度による反応時間相の相違

(1) 選択反応

表2と図2は選択反応の際の反応時間相を鍛練者と非鍛練者の間で比較したものである。

この結果によると、Vの反応時間が鍛練者では非鍛練者に比べて短くなっている。その差を決定している時間をみると、それはI、IIの眼球運動にかかる時間相でもなく、また、IVの筋収縮時間によるものでもなく、それは、IIIの刺激を弁別確認し、反応を決定し、その命令を腓腹筋に伝達するまでの決断時間によることが明白に示されている。

反応の様式については反応の予備動作としての膝まげ動作によって生ずる前脛骨筋の放電の発現時間をみると、鍛練者ではそれが早く生じており、

それは眼球の運動の潜時とはほぼ一致している。このことは、鍛練者では膝をまげながら刺激を見る傾向が非鍛練より著しいことを示すもので反応動作の簡潔化、統合化がここに認められるのである。

(2) 予測一致反応

表3と図3は被験者の予測と刺激呈示位置とが一致した場合の反応時間相を鍛練者と非鍛練者の間で比較したものである。

ここにおいても、Vで示されるように鍛練者の反応時間は全体として非鍛練者のそれより極めて短かいことがわかる。眼球運動の潜時は非鍛練者の方がやや短かいにもかかわらず、反応時間が全体として鍛練者の方が短かいのは、IIの眼球運動時間とIIIの決断時間、IVの筋収縮時間が短かいことによるものであり、数値の上からはIIIの時間相の相違が決定要因になっているとみてよい。

前脛骨筋の放電開始にみられるVIの膝まげの潜時についてみると、鍛練者の方が早くまげ動作を開始して、跳躍の用意を始めており、IVの筋収縮時間を見ても、それが非鍛練者より短かいのは

表4 Comparison of In-correct Prediction Reaction Time between Sportsmen and Non-Sportsmen
(msec) (high jump and low jump)

Phase		I	II	III	IV	IVa	IVb	V	VI	VII
high jump	difference	10	- 1	- 40	- 30	- 12	- 6	- 76	- 1	- 39
	t	1.554	0.456	2.848	3.038	1.538	1.433	3.382	0.052	3.874
low jump	difference	15	- 5	- 62	- 23	- 16	- 8	- 92	7	- 77
	t	1.640	1.287	3.331	2.077	1.269	1.793	3.964	0.295	9.965

表5 Comparison of Reaction Time of Sportsmen between Selective and Correct Prediction
(msec) (high jump and low jump)

Phase		I	II	III	IV	IVa	IVb	V	VI	VII
high jump	difference	- 21	5	96	- 4	- 19	13	78	- 29	- 7
	t	1.934	2.464	5.009	0.429	2.440	3.110	3.756	1.683	0.505
low jump	difference	- 1	6	70	5	9	12	74	3	- 10
	t	0.122	2.287	3.108	0.650	0.829	4.255	1.894	0.215	0.901

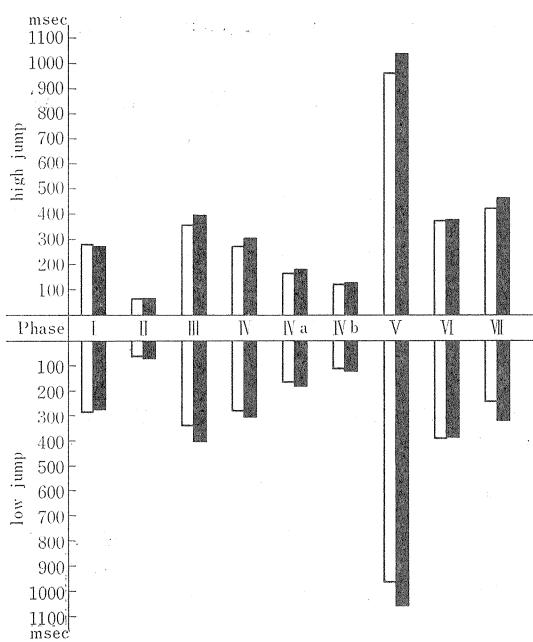


图4 Comparison of Incorrect Prediction Reaction Time between Sportsmen and Non-Sportsmen
(high jump and low jump)

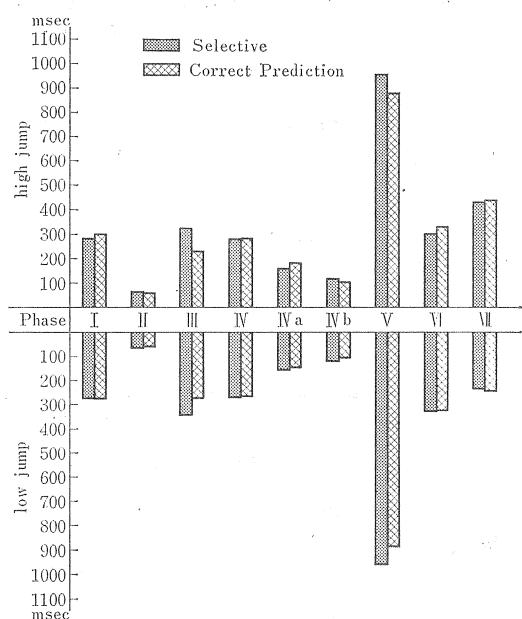


图5 Comparison of Reaction Time of Sportsmen between Selective and Correct Prediction
(high jump and low jump)

IVb の相、つまり蹴りそのものの動作のための時間相が短かいことによるものであることが特に高いジャンプの場合明らかに示されている。つまり、鍛練者で早く膝まげを開始して速かに決断を行ない、強いジャンプで速かに蹴っていることになる。

(3) 予測不一致反応

表4と図4は被験者の予測と刺激の呈示位置が一致しなかった際の反応時間相を比較したものである。

これによると反応時間は全体として鍛練者の方が短かいが、それは、IIIの決断時間とIVの筋収縮の短かいことによるものであり、時間的にはIIIの決断時間の短かいことが主要な原因であると考えて差支えない。

2. 選択反応、予測一致反応、予測不一致反応の間の比較

(1) 選択反応と予測一致反応間の比較

表5と図5および表6と図6は鍛練者および非鍛練者の選択反応と予測一致反応の各反応時間相を比較したものである。

これをみると鍛練者では予測が一致することに

よって反応時間が全体として短縮するが、それは眼球運動の所要時間が短縮し、IIIの決断時間が短かくなり、IVb で示されるように蹴り動作の時間が短縮することによるが、とくに決断時間の短縮がその主要因として重要な役割を演じていることがわかる。

非鍛練者についてみても似た傾向がみられる。予測が一致することによって反応時間も短縮の傾向を示すが、それは決断時間の短縮によるものであることがわかる。また興味あるのは、予測一致反応においてVIの相で示される曲げ動作の潜時が短かくなっている、予備動作としての膝まげが早期に現われている。

このように、刺激の出現位置を予測し、来たるべき反応を修正しようとする構えを作ることはフィード・ファワード (feed-forward) と呼ばれている。このような意識的な構えが大脳皮質を賦活して、反応結果に大きく影響を与えるのであろうと思われるが、それだけでなく、もう一つの経路として、言語による「右！」とか「左！」とかいう発声刺激が聴覚を介し更に大脳への賦活効果

表6 Comparison of Reaction Time of Non-Sportsmen between Selective and Correct Prediction
(msec) (high jump and low jump)

Phase		I	II	III	IV	IVa	IVb	V	VI	VII
high jump	difference	33	1	47	- 29	- 13	- 11	52	95	- 21
	t	4.614	0.262	2.386	* 2.395	1.355	1.762	1.742	4.316	3.231
low jump	difference	12	0	60	- 22	- 6	- 8	62	53	- 15
	t	1.576	0	2.484	* 2.098	0.614	1.853	2.798	2.215	1.118

表7 Comparison of Reaction Time of Sportsmen between Selective and In-correct Prediction
(msec) (high jump and low jump)

Phase		I	II	III	IV	IVa	IVb	V	VI	VII
high jump	difference	0	1	- 27	10	- 5	- 2	- 4	- 74	12
	t	0	0.420	1.791	0.926	0.619	0.531	0.164	2.923	0.915
low jump	difference	- 11	0	4	- 7	- 10	5	- 3	- 65	- 8
	t	1.159	0	0.179	0.609	0.766	1.443	0.070	2.787	0.636

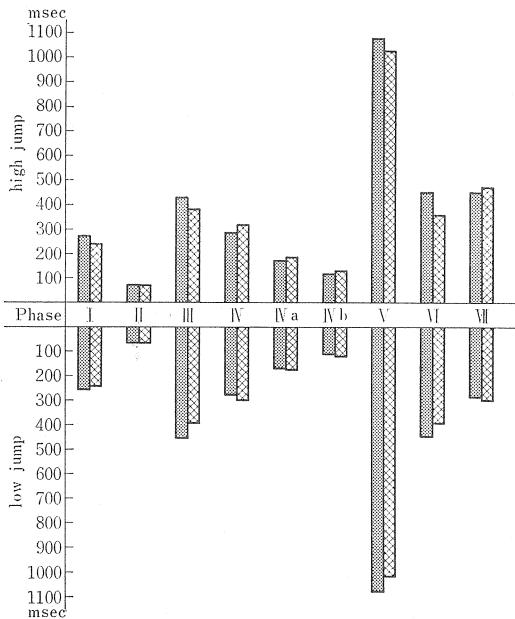


図6 Comparison of Reaction Time of Non-Sportsmen between Selective and Correct Prediction
(high jump and low jump)

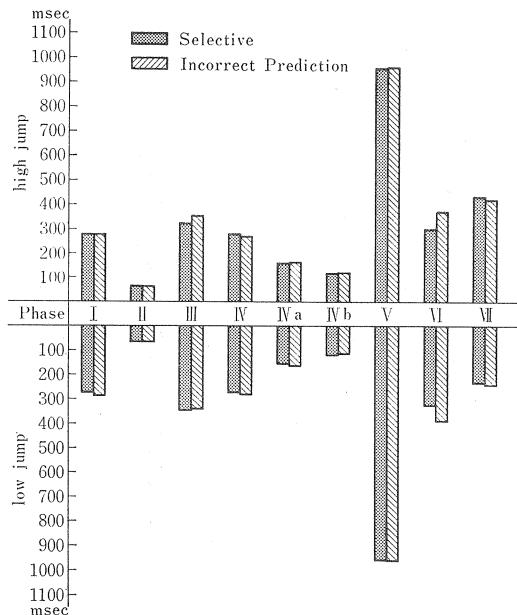


図7 Comparison of Reaction Time of Sportsmen between Selective and In-correct Prediction
(high jump and low jump)

表8 Comparison of Reaction Time of Non-Sportsmen between Selective and In-correct Prediction
(msec) (high jump and low jump)

		Phase	I	II	III	IV	IVa	IVb	V	VI	VII
high jump	difference		6	5	40	- 10	- 3	- 6	44	79	- 5
	t		0.842	1.208	1.994	0.927	0.338	1.060	1.534	4.056	0.659
low jump	difference		- 13	- 3	50	- 25	- 11	- 10	25	62	- 34
	t		1.524	0.721	2.141	2.077	1.044	1.879	0.911	2.334	3.076

をもたらしているものと思われる。

このようなフィード・ファーワードによる影響は巧緻性を決定する重要なものの一つであると考えられるが、このような影響は非鍛練者の方にはるかに顕著に現われているのである。

(2) 選択反応と予測不一致反応間の比較

表7と図7および表8と図8は鍛練者と非鍛練者の選択反応と予測不一致反応とを比較したものである。

これをみると選択反応と予測が一致しなかった際の反応との間に反応時間の差を認めることがで

きない。それは鍛練者についても非鍛練者についても同様である。但し、興味深いのは非鍛練者では予測不一致反応の場合においても、予測一致反応の場合のように、選択反応の場合より決断時間が短縮し、また、まげ動作が早期に現われる傾向があるが、これは、予測するという構えの積極的な現われであろうと思われる。

3. 反応の様式による反応時間相の比較

刺激である矢印が上向きであるか下向きであるかによって決定される高低の反応様式によって反応時間相が異なるかどうかを検討したのが表9であ

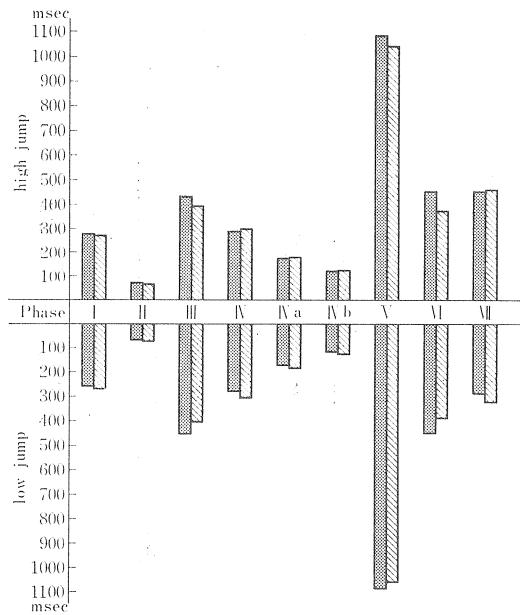


図8 Comparison of Reaction Time of Non-Sportsmen between Selective and In-correct Prediction (high jump and low jump)

る。

この表の値は高い跳躍の値から低い跳躍の値をマイナスしたものである。VIIで示される滞空時間は当然のことながら前者の場合の方が値が大きくなっていること、刺激に対して正しい反応がなされていることを示している。

全体として、跳躍の高さによって反応時間はあまり大きな影響を受けていないが、予測一致反応の場合、鍛練者も非鍛練者も高い跳躍の場合に筋収縮時間が延長している。このことは跳躍の様式からみて当然のことであり、それはとくに反応時間の短かい予測一致反応の際に目立つものとなつたのであろう。

また、鍛練者ではⅢの決断時間が低い跳躍の場合長くなる傾向があるが、その理由として考えられるのは↑によって高く跳ぶのに対して、↓によって低く跳ぶというのは↓の場合には運動と方向が反対であるため↑に比べて信号としては難度が高いこと、また、低い跳躍の場合にはあらかじめ作られた高い跳躍の構えのための心的緊張に抑制的な働きかけをしなければならないためと考えられる。それが反応時間の短縮化を起す予測一致反応の場合に顕著に現われたのであろう。尚このことについては今後詳細な検討が必要と思われる。

〔ま　と　め〕

巧緻性を解明するために、巧緻性の高いスポーツマンと一般学生をそれぞれ鍛練者と非鍛練者としてそれらに多様選択全身反応を行なわせて、反応時間を構成する時間相をいくつかの観点から分析して比較検討してみた。

その結果、巧緻的な動作を示す鍛練者では非鍛

表9 Comparison of Reaction Time between High jump and Low jump (Sportsmen and Non-Sportsmen (msec)

		Phase	I	II	III	IV	IV _a	VI _b	V	VI	VII
Sportsmen	Selective	difference	5	0	-19	8	6	-2	-4	-27	198
		t	0.524	0	0.852	0.705	0.584	0.558	0.089	1.361	12.822
	Correct Prediction	difference	25	1	-45	17	34	-3	-8	5	195
		t	2.695 ^{**}	0.436	2.332 [*]	2.803 ^{**}	3.943 ^{**}	0.886	0.421	0.415	19.488 ^{***}
	In-correct Prediction	difference	-6	-1	12	-9	1	5	-3	-18	178
		t	0.718	0.453	0.760	0.839	0.093	11.399	0.122	0.683	16.805 ^{***}
	Non-Sportsmen	Selective	difference	18	3	-20	13	5	7	0	7
			t	2.077 [*]	0.644	0.741	1.018	0.457	1.144	0	0.223
	Correct Prediction	difference	-3	2	-7	20	12	10	10	35	175
		t	0.476	1.533	0.386	2.018 [*]	1.312	2.160 [*]	0.442	2.140	17.910 ^{***}
	In-correct Prediction	difference	-1	-5	-10	-2	-3	3	-19	-10	140
		t	0.143	1.348	0.602	0.197	0.316	0.601	0.906	0.711	18.719 ^{***}

練者よりも反応時間は短かいが、それは刺激を確認して反応様式を決定し、その命令を筋肉に伝達するまでの決断時間が短かいことが決定的な要因となっている。この他、筋収縮時間それも特に蹴り動作そのものに要する時間、つまり、膝を曲げた後の脚が伸びるための時間が短かいことも要因の一つとなっていることが明らかになった。

さらに、鍛練と非鍛練者の反応様式を比較分析してみると、前者の反応時間が短かいのは、脚を曲げながら刺激を見て、刺激を確認してから蹴るという、いわば、「曲げながら見て蹴る」という反応様式の簡潔化の傾向が非鍛練者より強いことがわかった。

さて、それでは、刺激の呈示位置をあらかじめ予測し意識的な構えを作る、いわば、フィード・フォワード (feed-forward) の影響はどうであろうか。巧緻性を決定するものとして、このフィード・フォワードが如何に行なわれるかは、筋感覚のフィード・バック (feed-back) によって動作を修正することと同様に重要なものであるといわれているが、本実験の結果でもその影響が顕著に認められた。

すなわち、鍛練者でもまた非鍛練者でも予測を行ないそれが合うことによって反応時間が短縮するが、それは主として決断時間が短縮することによる。特に、鍛練者では決断時間の短縮が顕著であり、筋収縮時間についても膝の曲った状態から脚が伸びるまでの時間が短縮する、つまり、蹴りのスピードが速くなるというように、フィード・フォワード (feed-forward) の影響が現われた

が、非鍛練者の場合には、むしろ、その影響は反応のための予備動作を早期に出現させ、決断時間を短縮させるという方向に現われたのは興味深い。

次に反応の様式によって反応時間の相に変化が生ずるかどうか検討してみると、鍛練者では、低い跳躍の場合には高い跳躍の場合よりも決断時間が長くなるが、それは刺激のもつ信号の困難度によるものであるとともに、低い跳躍の場合にはあらかじめ作られた最大の跳躍のための心的緊張に對して抑制的な働きかけをしなければならないためと解釈された。

以上、刺激受容から反応生起に至る時間経過の中に巧緻性を解明する手がかりを求めてみた結果、受容器や効果器における過程よりもむしろ刺激を弁別確認して反応様式を決定し、その命令を効果器に伝える過程、とくに刺激の弁別確認反応決定にかかわる中枢的过程の中でそれを追究する方が今後の方向としては大切なではないかと考えられた。

参考文献

- 1) 猪飼道夫他：全身反応時間の研究とその応用、オリエンピア、7, 1961
- 2) Curton, T. K.: Physical Fitness of Campion Athles, Illinois Press, 1951
- 3) 猪飼道夫：スキルの生理、「身体運動の生理学」杏林書院、1973
- 4) 調枝孝治：タイミングの心理、不昧堂、1972
- 5) H. T. A. ホワイティング著、加藤橋夫他訳：ボール・スキル、ベースボール・マガジン社、1973
- 6) 真島英信、猪飼道夫編：生体の運動機構とその制御、杏林書院、1972

巧緻能の基礎的研究

—手指描写運動の多変量相関分析—

永田 晟（東京都立大学）

1. 緒 言

“巧みさ” “うまさ” “上手な” “達人” 等は、すべてが主観的な表現であり、なんら客観的な科学的な根拠は持たない。こうした表現はスポーツ場面や体育指導に多く使用され、行動のはめ言葉や修辞学上の言語として利用されている。

主観的な表現にせよ、なんらかの評価基準があり比較するデータが存在することは想像に難くない。従来のような運動分析法や評価法では解答はひき出せないし、明確なデータを提供することはできない。巧緻性を機能の総合とし、又身体諸機能が統合・組織された結果の動作表現であれば、運動全体をシステム的に把える必要があり、工学的な手法を使用するのが妥当である。本報告は制御理論的な手法を充分に駆使し、動作表現を周期的な関数として把握し、一見不規則的に見える現象も、無限大に拡張してみれば、そこになんらかの法則性を見出すものである。その手法として「自己相関関数」や「相互相関関数」の解析がある。

スポーツにせよ日常の動作にせよ、われわれは身体と道具（器具）をマッチさせ有効な作用を引き出すように、その選択と工夫に努力している。本報告は道具としての“ペン”を操作部としての手が操る動作、即ちトレース描写運動に注目し、手指とペン、ペン先と紙面との相互作用の測定結果である。図1のように人間と機械とのシステム

的な連結により、一体となった総合的な結果が運動量である。その制御された結果を測定し、目標値としての巧みさや巧緻性を設定することによって、人間内部即ち、機械（道具）との相関が見い出せる。人間即ち身体各部分の運動機能が統合されるためには、フィードバック路やサブ・ループの階層状態を数理的に計算することも可能であり（一種のモデル）、さらに運動量を分析することによって人間と機械とのからみ合いや人間の伝達関数・ゲインを見い出すこともできる。

スポーツや体育では、全身運動の有効性を強調することが多く、研究も大筋群の運動のみを対象とすることが必須のようにいわれているが、巧緻能の研究では神経系の働きが中心となる関係で、上記の条件は必須とはならない。逆に細かな動きを分析することによって、より明確なデータが発見できるし、大筋群への応用度が上昇する可能性がある。大筋群の全身運動にせよ、わずかの小筋群の末梢運動にせよ、運動メカニズムは同等と考えて大差はないであろう。

2. 方 法

運動末梢部分、即ち脊髄レベル以下の、筋肉を中心とした諸感覺受容器と神經・効果器の相互作用によって巧みな運動が表現されると考え、主に運動をフィードバック・システムを中心として調節量（制御量、運動量）が発揮され、その結果の分析をおこなった。

1). 動作と姿勢

巧緻的な動きとしては、手指運動に優るものはない。器用な指の動きとして、ペン字による円や正方形のトレース動作を課した。図2のようにペンを指でもち、ペン先を軽く紙面にあてる。主に手首関節の回転運動によってトレース動作をおこ

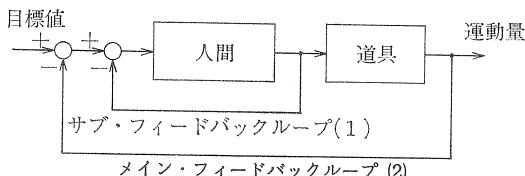


図1 人間と道具のシステム・ブロック線図

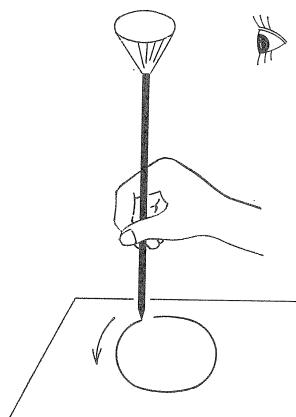


図2 円形(正方形)トレース描写写真

なわせ、手首以外の関節と上体は固定させた。

円形の大きさは直径4cm、方形は一辺が5cmの正方形で、スタート点とゴール点は規定し、連続10~13回繰り返した。

2). 被検者、期日と場所

健常な成人男子3人で前日に練習し、翌日試行した。昭和48年2月、都立大学で実施した。

3). 測定項目

ペン軸にミニ・加速度計(ST研究所製作)を前後、左右方向(被検者の正面に対して)に添付し、ペン軸、即ち手指の動作中の振動曲線を検出した。これを積分して速度を取り出し、紙面とペン先との間の張力波形をストレン・ゲージによって抽出した。紙面上に描かれたトレース軌跡はPCB圧力カーボン紙によってまとめられ、動作変位として検出した。動きと測定との間の較正のために、16%カメラによって記録した。生体の反応として、時間積分筋放電量を短橈側手根伸筋と橈側手根屈筋の両者から取り出し、手指運動の拮抗状態をみた。

4). 評価資料作成方法

図3のように各種測定データをデータ・レコーダーに記録し、相関計に入れて分析した。これにより、自己相関関数、相互相関関数、振幅確率分布関数を取り出した。これらをフーリエ分析器に直結し、周波数ごとのパワー・スペクトル、位相差をとり出した。

5). 実験システム

図3のようにオン・ラインで分析可能であるが、

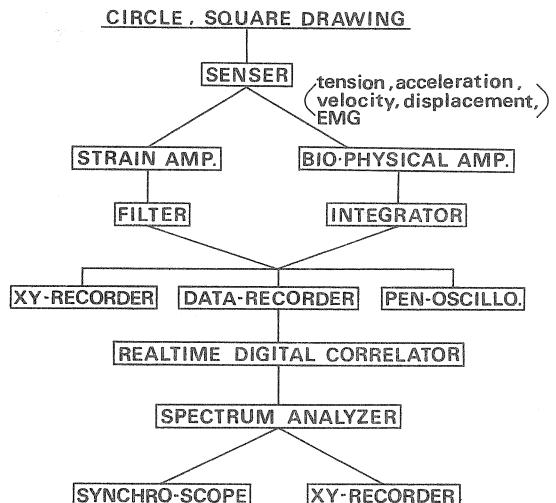


図3 実験システム

今回はすべての現象を同時記録し、後日データ処理した。極座標、ベクトル線図、スペクトル線図はX・Yレコーダーを利用し、他の測定結果はペン・オシログラフを利用した。

6). 各種の外乱状態

図1のシステムの中に外部からの負荷を加えて、外乱の有無による差とその調節状態をみるのが、巧緻ある動作の有効な実験方法と考えた。

(1) 視覚情報の有無を設定するために、開眼と閉眼での実験を実施した。

(2) トレース描写の位置を急激に移動する。一種の変位的(一次的)な外乱とした。

(3) トレース動作中に急激に50g, 100g, 200gの锤りを負荷し、一種の質量的、積分的(三次的)な外乱を作った。

7). 動作目標

図1の目標値は、スムーズにペンを動かすことであり、副条件として一定時間内(1周が0.8sec)に、同じ直径の同心円や正方形を描写することを規定した。

3. 結 果

1). 加速度、張力波形

データ・レコーダーからの再生を各実験条件ごとに配列したのが、図4-1と図4-2である。実線は外乱負荷直後の波形で、外乱なしの状態(点線)との比較が可能である。これらの波形は被検者3

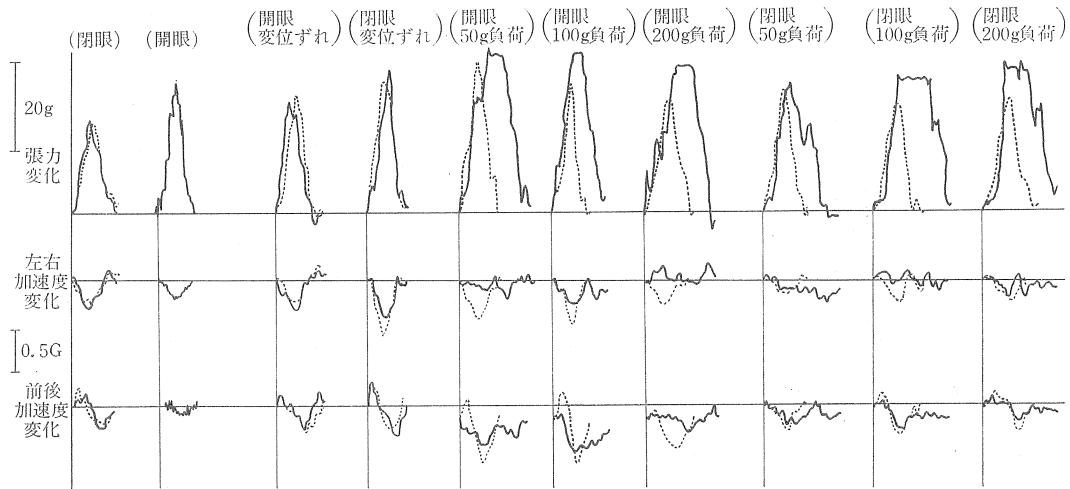


図4-1 加速度・張力曲線（円形描写）被検者：K
(実線：各種の外乱を与えた直後。点線：各種の外乱なしの場合。3人の被検者の代表例)

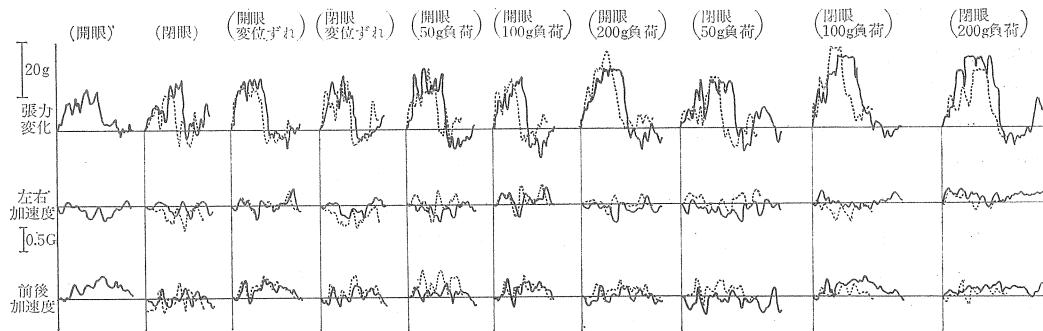


図4-2 加速度・張力曲線（方形描写）被検者：K
(実線：各種の外乱を与えた直後。点線：各種の外乱なしの場合。3人の被検者の代表例)

人の典型的なパターンで個人間の差はなかった。

2). 加速度振幅の変化

10~13回連続動作し、その間の回数ごとの変化（横軸）を図5-1と図5-2にまとめた。途中3~4回目のときに外乱（矢印）を負荷し、その変容状態を記録した（円形描写のみ）。

開眼と閉眼の比較では、外乱を与えない場合以外は、すべて閉眼の加速度振幅は小さく、0.2Gから0.6Gの間を変動した。一方鍾りの負荷によって、平均0.3Gから0.6Gに増大し、約2.0倍になり、手指振動の大きさと不安定性を物語る。

図中の実線と点線は傾向曲線で、試行を加えることによって、どのような値に収束するのかを示している。開眼のみと100g負荷は類似したパタ

ーンで、開眼と閉眼では相い反するパターンを示した。試行が増えるに比例し、大きい値に収束する場合と小さい値に減少する場合があり、それぞれの実験条件によって有意差を示した。

3). 加速度の周波数分析——パワー・スペクトル・アーリアリス

図6-1と図6-2に、円形トレース描寫運動時のスペクトラムをまとめた。正方形も同じような結果を得たので省略する。

開眼と閉眼では、パワー・スペクトルの振幅に有意差があり、約3倍の大きさで、閉眼になると増加した、しかし50g、200gの負荷の場合は、閉眼になるとわずかの減少を示した。

一般に外乱が加わると周波数帯域も広くなると

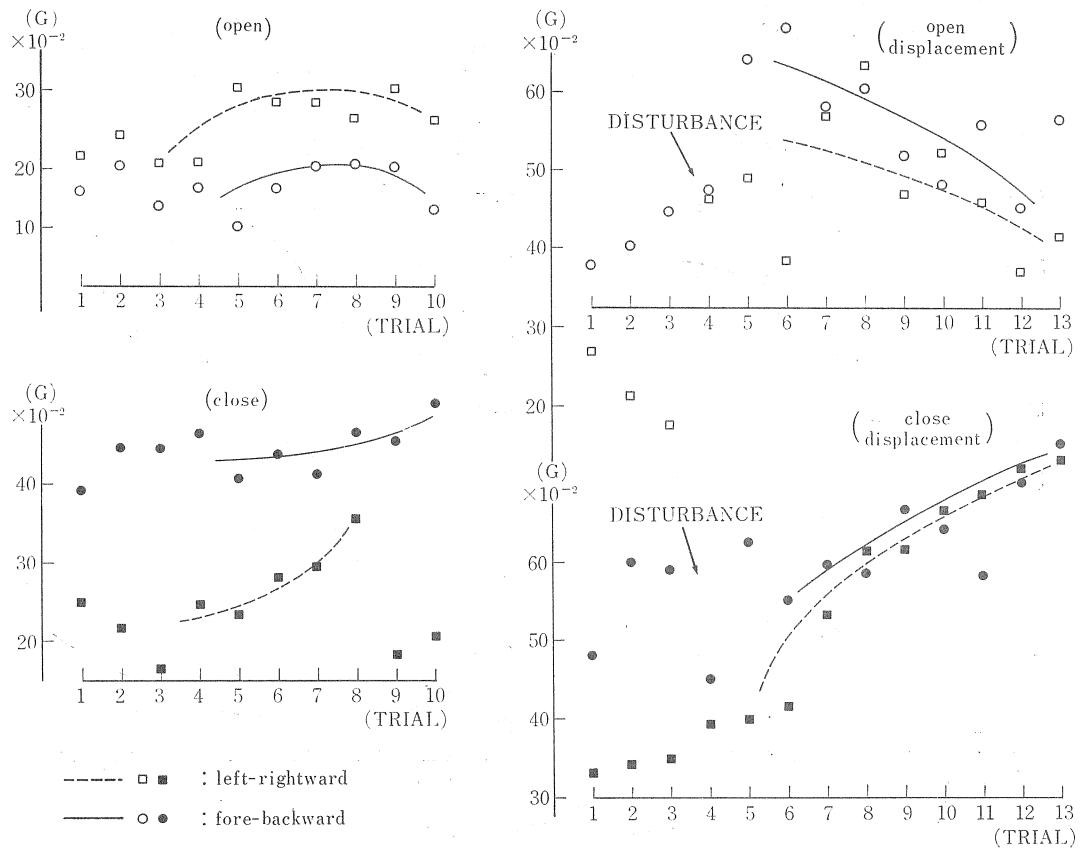


図5-1 加速度変化(その1)

同時にパワー・スペクトルも増大し、 $16 \times 10^{-2} G$ にも達する。さらに外乱の影響は、左・右方向の加速度よりも、前後方向の加速度に大きく響き、動作中の前後方向の弱さを曝露している。

200g錘りよりも50gの方に最大のスペクトルが表出している。

4). 位相と張力の相関

0.8秒に規定されていながら、毎試行ごとに多少の時間おくれと進みが発生する。それを位相(角度)変換し、表示したものが図7である。原点と横軸を中心としてプラス角度は時間進み、マイナス角度は遅れとして表示する。他方ペン先と紙面間の張力は極座標の振幅として示した。図中の丸印は各試行を示す。閉眼の場合が閉眼よりも上下に広がりをみせ、ばらつきが大きい。また50g負荷によって一点にまとまる傾向があるのは興味深い。

5). 時間積分筋放電量

前腕の橈骨手根関節の回転に関する屈筋と伸筋より表面電極法によって筋放電量をとり出し、時間積分値を得た。縦軸に筋名と実験条件を記し、図8にまとめた。

手関節の回転運動では、伸筋が主働的な役割を示し、屈筋はコントロール的な、補助的な役目をしている。負荷が大きくなるに比例して、屈筋の放電量は減少し、伸筋は増大する。位置移動動作が入ると、増加し、動きの範囲と筋放電量は比例している。

4. 検討

1). スムースな動きと変位変化

なめらかな動きの表現は身体諸機能が統合された結果であるが、動きの源、基礎は動きの変位である。また振動のない動きは変位幅の減少として

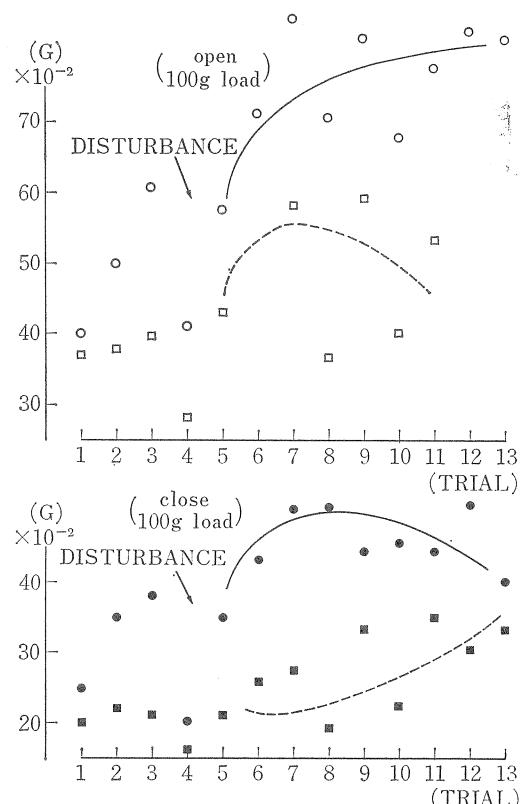
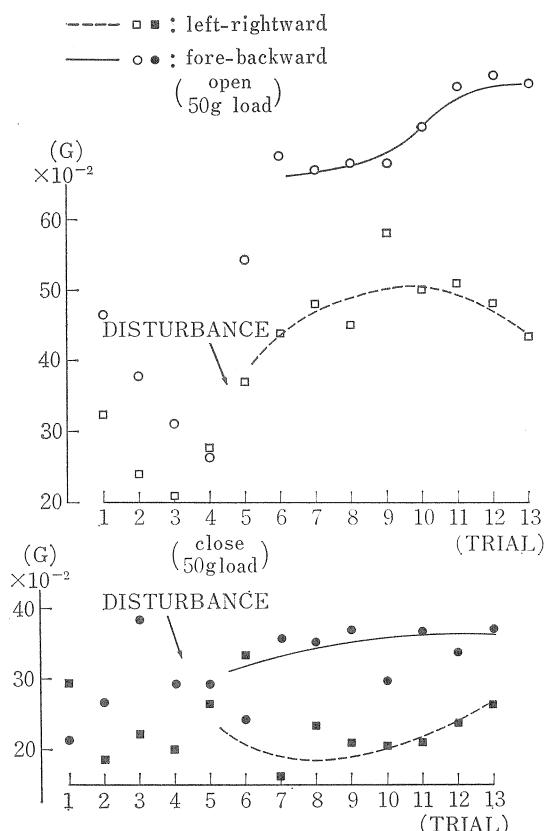


図5-2 加速度変化(その2)

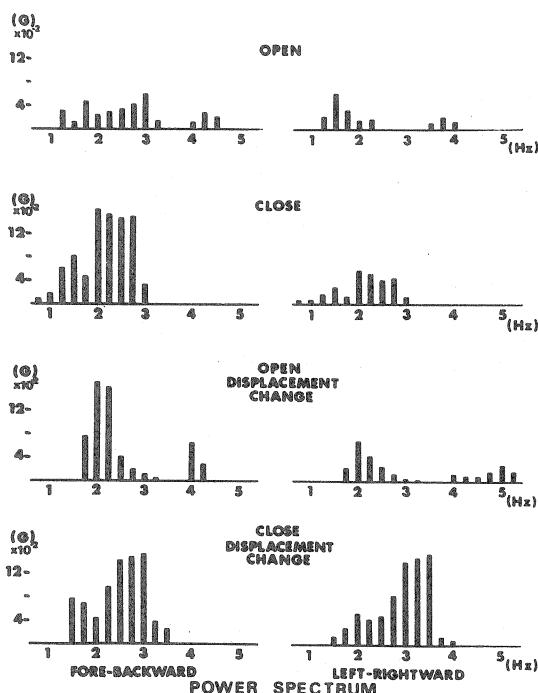


図6-1 パワー・スペクトラム(その1)

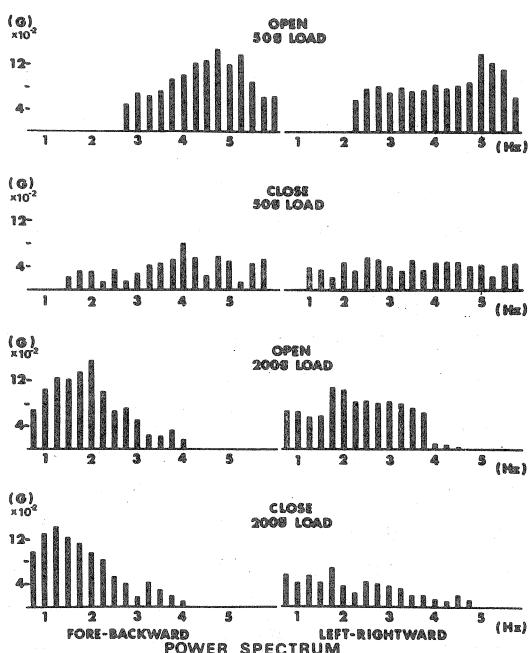


図6-2 パワー・スペクトラム(その2)

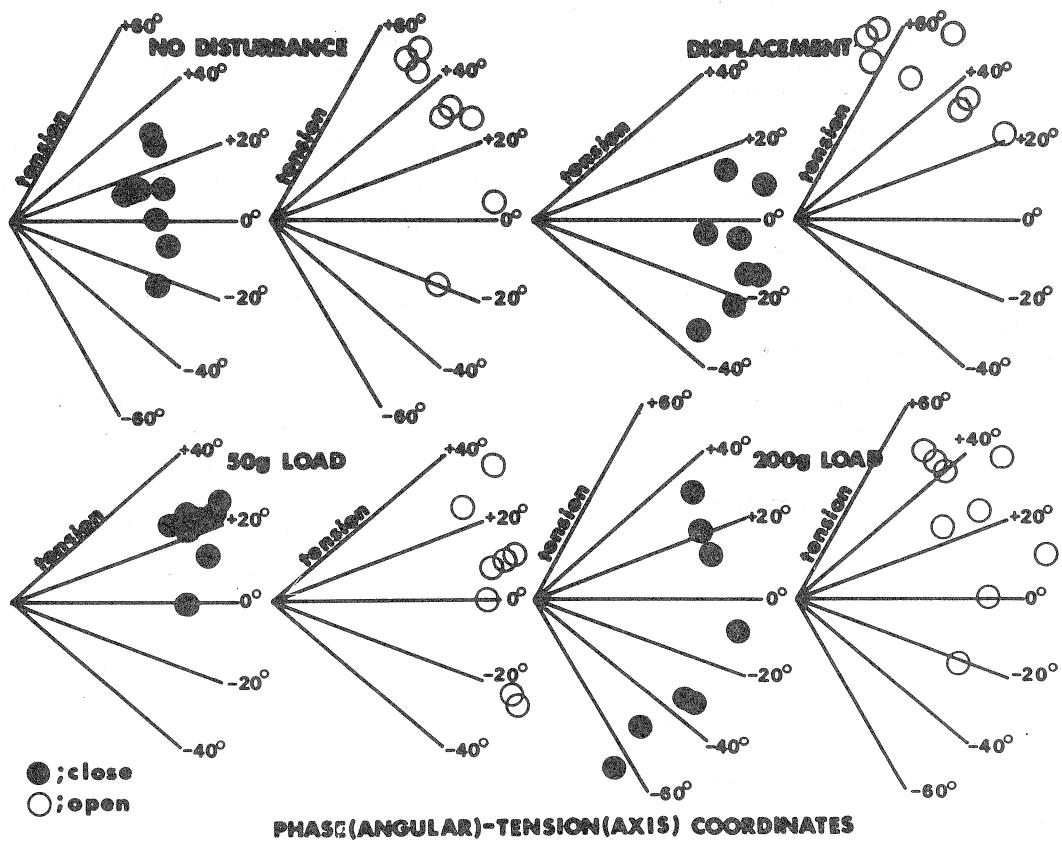


図7 位相と張力の極座標

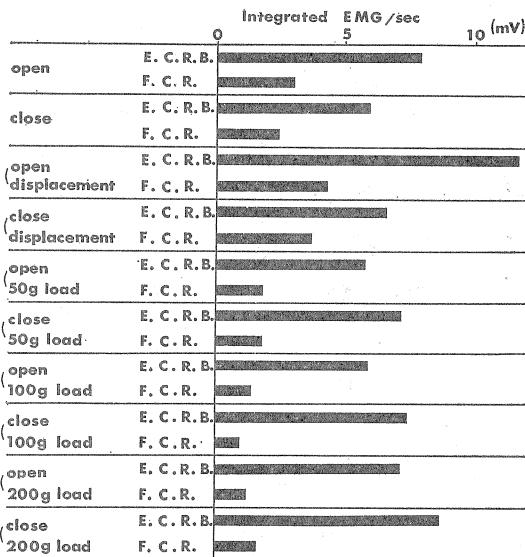
あらわれる、この事実より手指描写運動の評価資料として、変位波形のベクトル線図を作り、目標値としての円軌跡からの偏差をパターンとして作図した。これが図9である。図中の点線は、目標値と調節量が一致した場合で、この線からのズレが描写運動の成績を示す。

開眼におけるパターンはほぼ一致して橢円状を示す。描写軌跡の変位調節は視覚情報ループとの相関が最も高く、時々刻々の誤差（変位ずれ）を修正している、これを裏付るのが閉眼の場合のパターンである。点線からのズレは大きくなり、ベクトルの角度も45°回転をする。閉眼で200g負荷

の場合が最も悪い成績を示し、振動も大きくなつた。これは手首関節の回転運動の臨界ゲイン値を越えるもので、手指の筋肉自身の調節は不可能になる。

2). 非振動な動きと加速度変化

動きの基点として加速度が存在し、身体の微小な動きが抽出できる。正方形のトレース描写時の加速度振幅を、各コーナーごとにプロットして、ベクトル線図状のパターンを作った。図10-1と図10-2にまとめた。直線でかこまれた面積が大きいことは、高振動な動きを示し、平坦な菱形を示すのは、低振動な動きを示す。正方形のコーナー・



E.C.R.B. : Extensor Carpi Radialis Brevis
F.C.R. : Flexor Carpi Radialis

図8 手関節回転運動中の積分筋放電量

ポイントでの方向切換時の操作が難しく、その時に振動が多くあらわれる。特に左右方向の加速度変化が大きく、ペン軸を倒す傾向を示している。

このような単純な動きは、多くの練習によって改善されるだろうが、外乱負荷に対する調節につ

いては最も困難度を示す。これによって巧みさの本質が把握できるかもしれない。

3). パワー・スペクトラムの周波数レンジについて、

図6-1と図6-2をまとめたものが、表1で、周波数帯域の移動がみられる。開眼で50g負荷により高周波数成分があらわれ、200g負荷によって消失するのは、生体内にローパス・フィルターの機能が存在し、200g負荷によって生体の一巡ゲイン

表1 パワー・スペクトラムの周波数帯域
circleの場合 ($10^{-2} G$ 以上)

	foro-backward	left-rightward
open	—	—
close	2.0~2.75	—
open, displacement change	2.0~2.25	—
close, displacement change	2.5~3.0	3.0~3.75
open, 50g load	4.0~5.25	5.0~5.5
close, 50g load	—	—
open, 200g load	1.0~2.25	1.75~2.0
close, 200g load	1.0~1.75	—

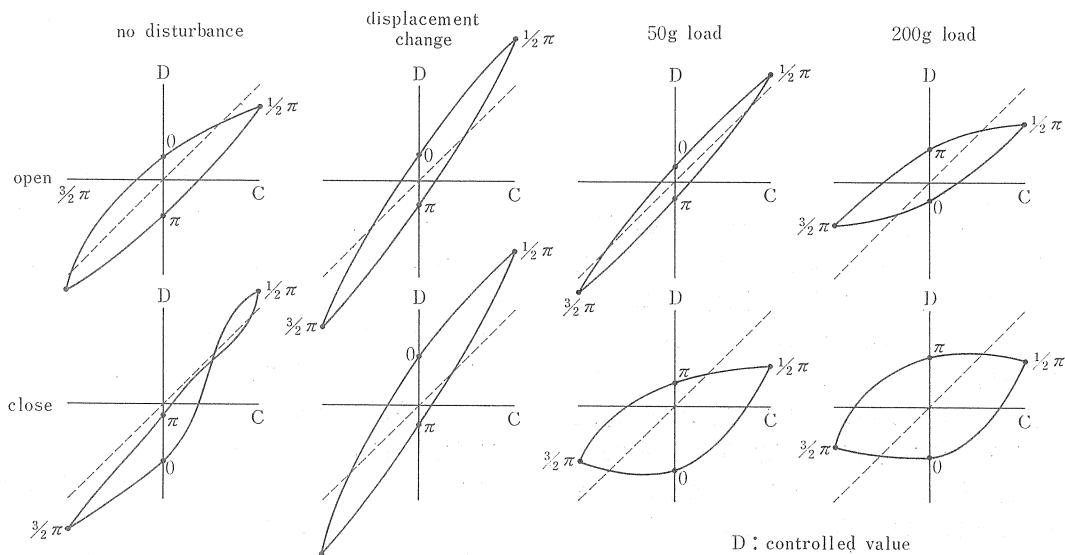


図9 ベクトルの線図

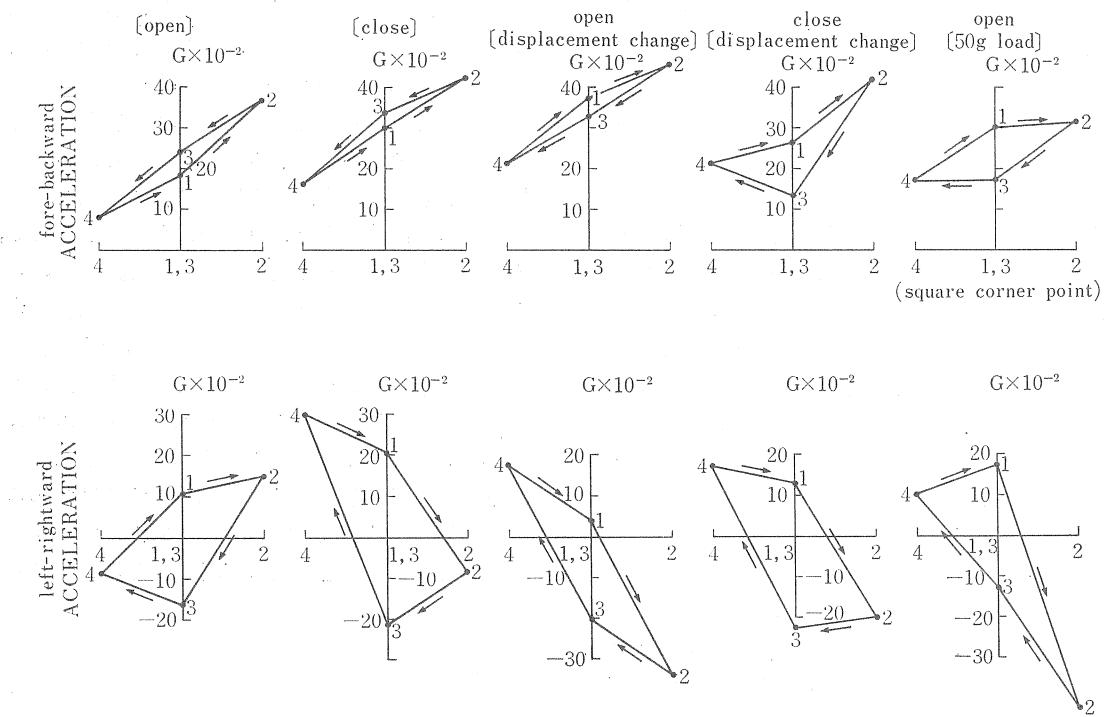


図10-1 正方形描寫中の加速度変化（その1）

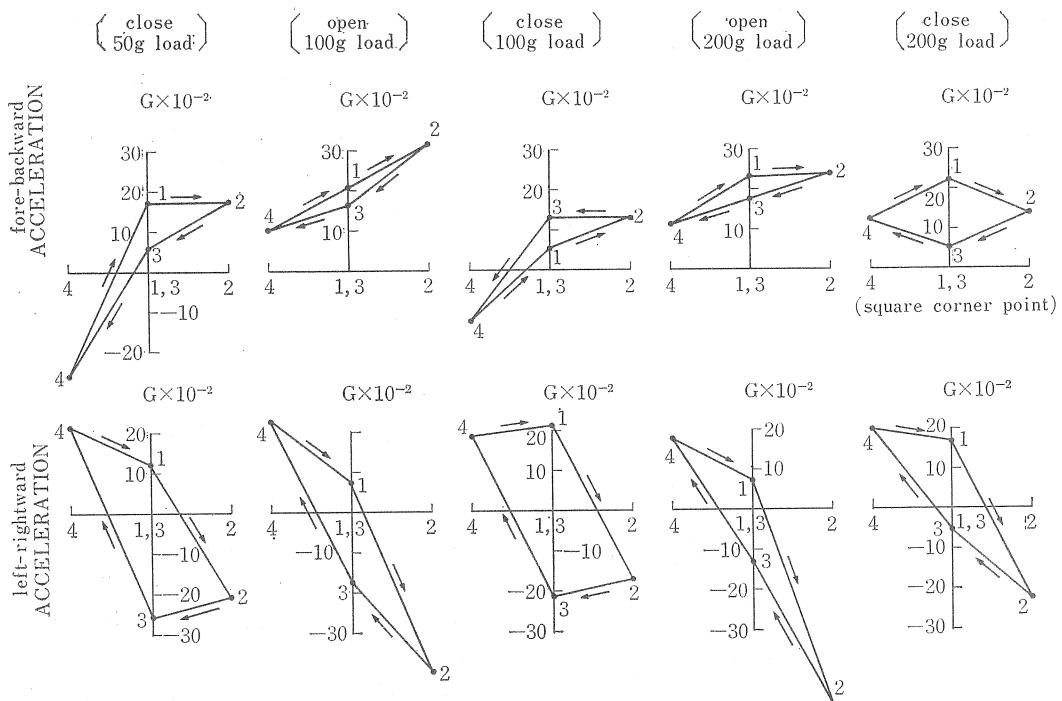


図10-2 正方形描寫中の加速度変化（その2）

が高まり、高周波数成分をカットする機能が働くようである。外乱の調節機能、即ち目標値に合致したなめらかな動きは、低周波数成分の通過と一致する。このためにスペクトル線図によって巧緻能の基礎的な評価資料が得られた。

4). 巧緻能と運動調節について

運動調節機能と巧緻能は最も相関が高く、調節機能の一部分を構成すると考えられる。巧緻能は大脳皮質や中枢レベルの機能を含まず、図11に示したように、脊髄レベルの巧みさ、即ち調節機能を示すと考える。即ち、中枢レベルの作用は、単純なるオン・オフ的な命令しか発しないが、脊髄レベルでは、各種の受容器・感覚器が存在し、それぞれの神経ループが多重ループを作り、階層構造を成している。中枢レベルに巧緻能の本質を探究するよりも、脊髄レベルにその本質を追究した方が、より妥当な結果を生むのではなかろうか。図11の各種の機能が幾重にもからみ合い、目標値に合わせた調節をおこなって、巧緻性を現出しているのは、筋自体の能動素子ではなかろうか。

5). 外乱負荷と調節能

生体の運動システムの中に外乱が入った場合のよい調節適応が、最も巧みな機能の持主とも考えられる。図11をまとめて計算すると、(すべてをラプラス変換して)

偏差 $E(s)$ は

$$E(s) = \frac{1}{1 + \frac{G_1(s) \cdot G_2(s)}{1 + G_2(s)}} V(s) + \frac{\frac{G_2(s)}{1 + G_2(s)}}{1 + \frac{G_1(s) \cdot G_2(s)}{1 + G_2(s)}} D(s)$$

$$= \frac{1 + G_2(s)}{1 + G_2(s) + G_1(s) \cdot G_2(s)} V(s)$$

$$+ \frac{G_2(s)}{1 + G_2(s) + G_1(s) \cdot G_2(s)} D(s)$$

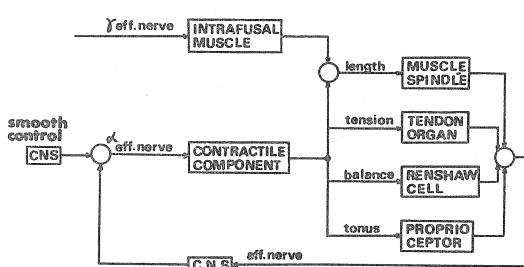


図11 脊髄レベルの運動調節システム

となり、外乱による成分の偏差は、目値による成分よりも1少ない〔分子 $1 + G_2(s)$ と $G_2(s)$ の差〕。分母 $\cdot 1 + G_2(s) + G_1(s) \cdot G_2(s)$ の一巡伝達関数が1となることはあり得ないので、分子の成分によって偏差成分の大小が左右される。すると、第一次調節系よりも第二次調節系即ち筋肉や神経を含めた効果器の部分が大きい役目をはたすことになる、末梢部を中心とする運動システムでは、良い成績を得るために調節部は、すべて末梢と効果器の作用と考えて間違いない。図11に中枢部分より脊髄レベルの末梢部分を中心にまとめたのも上記の根拠による。そして巧みさの総合は図11の length, tension, balance, tonus 等の階層結合であり、 α 神経と γ 神経のからみ合った作用方法ではなかろうか。勿論外乱が入っていく位置によって異なるので、実験条件設定によって異なった結果ができる。

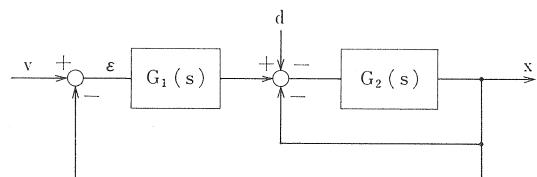


図12 外乱負荷の運動システム線図

5. 結語

巧緻能を知るために、手指描寫運動の多変量分析した結果以下の結果を得た。

- 1). 相関関数分析によって従来みられなかった資料が得られた。
- 2). 手指トレース描寫運動波形をフーリエ分析し、パワー・スクトラム・密度を抽出した。
- 3). 低周波成分の動きが、なめらかな巧緻能と関係する。
- 4). 外乱負荷による影響を最小限に止める能力は、巧みな調節能を示す。
- 5). 位相と張力振幅による極座標パターンによって、動き評価が可能となる。
- 6). 動きのフーリエ分析や制御理論的な考え方から、脊髄レベルの筋肉自体に“能動素子”的な作用を見出だせる。
- 7). 視覚情報を切断すると生体の一巡伝達関数ゲインは高まるが、変位量は減少し、加速度変化

は増大する。

- 8). 加速度振幅や目標値からの偏差量、位相差の連続的な記録とベクトル表示によって、巧緻能の輪郭が把握できる。
- 9). 巧みな調節は、中枢部分ではなく、第二次調節系、すなわち筋肉を中心とした効果器、神経によって左右されるようだ。

6. 参考文献

- 1) 磯部孝編：相関函数およびスペクトルーその測定と応用一，東京大学出版会（1966）
- 2) 伊沢計介：自動制御入門，OHM文庫，オーム社（1962）
- 3) 医学のあゆみ編：生体の制御機構，医歯薬出版（1965）
- 4) 高橋安人：システムと制御，岩波書店（1968）
- 5) 藤森聞一編：運動の生理学（生理学大系VII），医学書院（1966）

動作の制御理論的研究(II)

増山英太郎(東京都立大学)

I. 前置き

人間の巧緻性研究の一環として、昭和48年度は、筆者が実験のみを行い、充分な解析を試みていなかった論文^{*1}の徹底的な解析を試みてみた。本論文はその解析結果の未発表の報告であるが、紙数の節約を考えて、上述の論文の詳細な内容紹介は省略したので、必要な読者はそちらをも合わせて読まれたい。

II. 実験のあらまし

一名の被験者に、次式の制御対象 $Y_c(s)$ のある場合について、階段波応答を行わせている：

$$Y_c(s) = 1/(s^2 + 2\zeta s + 1) \quad \dots\dots(1)$$

実験変数はこの式の ζ の大きさであって、それを $2, 1, 0.5, 0.1, -0.1$ に変化させ、その各々を条件 1, 2, 3, 4, 5 と呼ぶことにした。そのように(1)式で表わされる制御対象の 1 つの定数たる減衰比 damping ratio ζ が変化する時に、次式の PID 要素とムダ時間要素の直列結合型伝達関数 $Y_P(s)$ の各定数がどのような値をとるかをシミュレーション実験によって調べた：

$$Y_P(s) = h (\tau_D s + 1 + \frac{1}{\tau_I s}) e^{-\tau_s} \quad \dots\dots(2)$$

シミュレーション実験には NEAC-P10 アナログ電子計算機を用い、先ず制御対象を表わす(1)式の伝達関数の回路を組み、その ζ 設定用の分圧器の値を変化させることによって条件 1 から 5 の条件設定のもとでパーシュート・トラッキングの実験を行う。その後に、人間の相似回路を、丁度、(2)式の伝達関数で表わせるように組み、その 4 つの定数たるゲイン定数 h 、レイト・タイム τ_D 、リセット・タイム τ_I 、ムダ時間 τ のうち前三者^{*2} 設定用の分圧器の値を種々と変化させながら、相似回路に人間に与えたと同じ、上述の制御対象をトラッキングさせる。そのようにして得た相似回

路の応答のうち、各条件下で最も人間の応答と形が似たものを探し、その時の相似回路の伝達関数がその条件における人間の伝達関数であると見做した。以上の結果を伝達関数表示したものが表 1 である。

表 1 制御対象の伝達関数 $Y_c(s)$ とシミュレーションの結果得た人間の伝達関数 $Y_p(s)$

条件	制御対象の伝達関数	人間の伝達関数
1	$\frac{1}{s^2 + 4s + 1}$	1.0 (0.4s + 1 + 0.3/s)
2	$\frac{1}{s^2 + 2s + 1}$	1.0 (0.5s + 1 + 0.3/s)
3	$\frac{1}{s^2 + s + 1}$	2.26 (0.3s + 1 + 0.3/s)
4	$\frac{1}{s^2 + 0.2s + 1}$	2.26 (1 + 0.3/s)
5	$\frac{1}{s^2 - 0.2s + 1}$	_____

増山英太郎(1963)の内容紹介はこのぐらいにして次に、表 1 の伝達関数をもとにして行った解析の手順とその結果について述べよう。

III. 解析の手順

解析の手順を 10 の手順に分けて順に記す：

- 1) 制御対象たる 2 次遅れの要素の伝達関数 $Y_{C(j\omega)} = 1 / \{(j\omega)^2 + 2\zeta(j\omega) + 1\} \quad \dots\dots(3)$ のボード線図を描く。
- 2) 人間を表わす PID 動作の伝達関数 $Y_{P(j\omega)} = h \{\tau_D(j\omega) + 1 + 1/\tau_I(j\omega)\}$ のボード線図を描く。但し $Y_{C(j\omega)}$ が $\zeta = 0.1$ 条件においては $\tau_D = 0$
- 3) 二つの伝達関数を合成した伝達関数

$$Y_{P(j\omega)} \cdot Y_{C(j\omega)} = \frac{h \{\tau_D(j\omega) + 1 + 1/\tau_I(j\omega)\}}{\{(j\omega)^2 + 2\zeta(j\omega) + 1\}} \quad \dots\dots(4)$$

のボード線図を先の 2 つの線図の和によって

求める。

手順 4) 定位置偏差定数 position error constant ϵ_p と定速度偏差定数 velocity error constant ϵ_v とを調べる^{*3}。

手順 5) 手順 1 と 3 で求めた開ループ周波数伝達関数 $Y_{C(j\omega)}$ と $Y_{P(j\omega)} \cdot Y_{C(j\omega)}$ のボード線図より以下の諸定数を求める：

5-1) クロスオーバー周波数 ω_c :

ゲインの実測値を滑らかな曲線で結んだものをゲインの実測曲線と呼ぶとすると、それと Odb 直線との交点の角周波数のことである。

5-2) 位相余裕 φ_m :

位相の実測値を滑らかな曲線で結んだものを位相の実測曲線と呼ぶとすると、その曲線が ω_c r/s のところでの位相が、 -180° からどれだけ余裕があるかを度単位で表わした値である。

5-3) 勾配-n :

クロスオーバー周波数 ω_c r/s における db/dec 単位の勾配

5-4) 減衰比 damping ratio ζ :

市川邦彦 (1962) によると

$$\zeta = \varphi_m / (3n) \quad \dots\dots(5)$$

によって減衰比が推定可能なので、5-2及び 5-3 で測定した二定数を右辺に代入して、それを推定する。

手順 6) $Y_{C(j\omega)}$ と $Y_{P(j\omega)} \cdot Y_{C(j\omega)}$ のボード線図のゲインと位相を $0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10$ r/s の周波数及び、実測曲線の変化の激しい二～三の周波数のところで読み、表示する。次にその表の数値をもとにして、ニコルズ線図中^{*4}に打点し、それ等の点を滑らかな曲線で周波数の増大方向へと結び、その方向を矢印で描く。

手順 7) 上の手順の結果得られる 2 種類のニコルズ線図上で、以下の諸定数を求める：

7-1) バンド巾 bandwidth 或は遮断周波数 cut-off frequency ω_b :

閉ループのゲインの実測曲線が周波数の増大につれてゲイン減少の傾向を示す時に、 -3db になる角周波数を rad/sec 単位で表わし

た値。

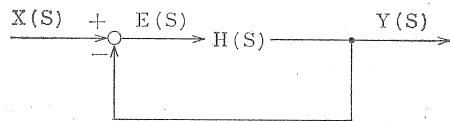


図 1 システムを表わすブロック図

7-2) φ_b :

閉ループの位相曲線が丁度バンド巾 ω_b の角周波数の時に示す位相をラジアン単位で表わした値。

7-3) 共振のピーク値 M_p :

開ループの特性を示す曲線が接する閉ループゲイン曲線のうち、最大のゲインを db 単位で表わしたもの。

7-4) 共振周波数 ω_r :

Resonance frequency と呼ぶが、閉ループゲインが M_p db の時の周波数の値を表わす。

手順 8) ここまで求めた諸定数を用いて以下の定数を計算によって求める：

8-1) 図ではなく、加藤一郎 (1962) に従い計算によって共振周波数 M_p を求める：

$$M_p = 1/2 \zeta \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \dots\dots(6)$$

上式によって M_p が割合で算出されるが、それを数表を用いて db 値に直す。

8-2) 加藤一郎 (前述) に従い次式によって減衰度 ρ を求める：

$$\rho = \zeta / \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \dots\dots(7)$$

8-3) 加藤に従い、インディシャル応答における行き過ぎ量 V を次式によって求める：

$$V = e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \pi} = e^{-\rho \pi} \quad \dots\dots(8)$$

算出される値は割合を表わす。

8-4) 市川邦彦 (1962) に従って、インディシャル応答が振動する場合に、1 振動毎にどの位の割で減衰するかを意味する減衰比 n は^{*5} 次式によって表わされるが、それを求める：

$$n = e^{-\frac{2\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \pi} = V^2 \quad \dots\dots(9)$$

8-5) 加藤に従って、インディシャル応答の 5

%整定^{*6}にいたるまでの振動数Nを次式によ
って求める：

$$N = 3\sqrt{1-\zeta^2}/(2\pi\zeta) \\ = 3/(2\pi\rho) \quad \dots\dots(10)$$

8-6) 加藤に従って、インディシャル応答が目標値である階段波の10%に達してから90%にいたるまでの時間たる、立ち上り時間 rise time T_r を求める：

$$T_r = \pi/\omega_b \quad \dots\dots(11)$$

8-7) 市川に従って、インディシャル応答が開始されてから目標値の50%にいたるまでの時間たる、遅れ時間 delay time T_d を求める：

$$T_d = \varphi_b/\omega_b \quad \dots\dots(12)$$

8-8) Mc Ruer 等は、人間のみからなる系に對してあれ、人間機械系に對してあれ、クロスオーバーモデルが成立するすれば、その系のムダ時間 τ_e は次式によって表わさ
れると言う：

$$\tau_e = (1.5708 - \varphi_M)/\omega_c \quad \dots\dots(13)$$

本研究における制御対象 $Y_{c(j\omega)}$ のみから成る系についてこれを求ることはあまり意味がないように思えるが、人間機械系との比較のために求めてみる。

手順 9) 制御対象のみならず、人間の近似的伝達関数もシミュレーションによって求められているので、それ等伝達関数の情報を用いて系の特性について検討を加える。

即ち、制御対象 $Y_{c(j\omega)}$ 及び人間機械系 $Y_p(j\omega)$ $Y_{c(j\omega)}$ の安定性を調べるために、次の如く特性方程式 characteristic equation をたててみる必要がある^{*7}。

$$Y_{c(j\omega)} + 1 = 0 \quad \dots\dots(14)$$

$$Y_p(j\omega) \cdot Y_{c(j\omega)} + 1 = 0 \quad \dots\dots(15)$$

さて、零点を求めるためには(14)と(15)式を(17)式のような有理多項式の比の形に書きかえなければならない。(14)式に関してそれを行うことは容易である。 $j\omega$ を S と置き換えて、それを行ってみると：

$$1 + Y_{c(S)} = \\ \frac{(S+\zeta+\sqrt{\zeta^2-2})(S+\zeta-\sqrt{\zeta^2-2})}{(S+\zeta+\sqrt{\zeta^2-1})(S+\zeta-\sqrt{\zeta^2-1})} \quad \dots\dots(20)$$

零点は次の通りである

$$S = -\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 2} \quad \dots\dots(21)$$

ところで、代表根は次の如く表わされる^{*8}：

$$S_0 = -\sigma_0 \pm j\omega_0 \quad \dots\dots(22)$$

これを図示すると図2の通りであり、(21)と(22)を比較することによって次の如き諸定数を求めることができるものである：

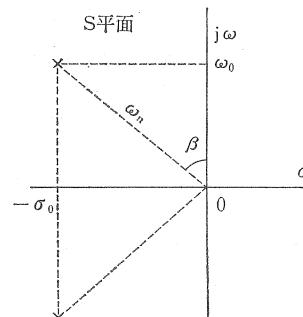


図2 代表根の図

9-1) 対数減衰率 damping factor σ_0 :

これが小さいほど振動的なインディシャル応答の減衰速度が小さい、虚軸に近いという意味から安定度が低いと言える。図3参照。

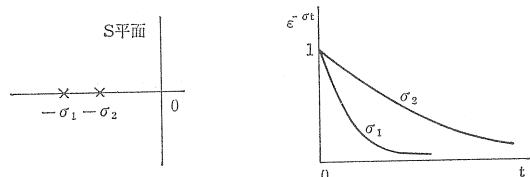


図3 根の位置（対数減衰率）と減衰速度との関係

また減衰速度が小さければ、インディシャル応答が目標値たる階段波の振幅と±5%と違わない振幅におちつくまでの時間、整定時間 T_s と言う、が長くなる。一方、 T_s は速応度を反映するものと言われているので、間接的であるが、 σ_0 は安定度のみならず、速応度を反映するものと言える。

この σ_0 は実験条件として設定した ζ に等しい：

$$\sigma_0 = \zeta \quad \dots\dots(23)$$

9-2) 代表振動成分 principal mode ω_0 :

図4の如く σ_0 が同じでもこの ω_0 の違った代表根を持つ系のインディシャル応答 $y(t)$

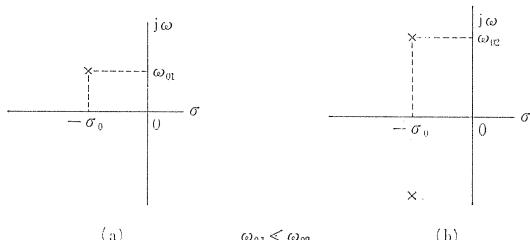


図4 代表根

は加藤によれば次式の如くである：

$$y(t) = e^{-\sigma_0 t} \sin(\omega_0 t + \phi) \quad \dots \dots (24)$$

図示すると図5の通りであり、対数減衰率 σ_0 が同じでも、 ω_0 が大きい b 曲線ではより振動的になっている様子がわかる。

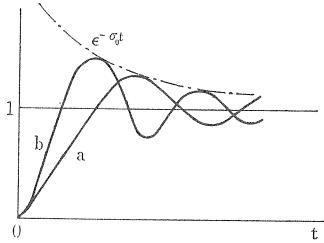


図5 代表振動成分
a, b 曲線は図4の(a), (b)に対応する

この ω_0 をどうから次式によって求める：

$$\omega_0 = \sqrt{2 - \zeta^2} \quad \dots \dots (25)$$

9-3) 減衰度 ρ

手順 8-2においても ρ を求めたが、そこでは先ず ζ を(5)式によって推定し、それを用いて(7)式によって推定したのだった。そこでは、制御対象 $Y_{c(j\omega)}$ のみか、或は人間機械系 $Y_p(j\omega) \cdot Y_{c(j\omega)}$ かを要素とする直結フィードバックの全体としての閉ループ特性が2次遅れ要素で近似出来るということを暗黙の仮定として、 ρ を求めた。ここでは、直前に求めた(23)と(25)式の定数の比として、加藤に従って ρ を求める*9：

$$\rho = \sigma_0 / \omega_0 \quad \dots \dots (26)$$

減衰度は、この式から意味を考えると、インディシャル応答の振動の単位角速度当りの減衰速度を表わすものと言えよう。これもま

た安定度を測る一つの目安になると言われている。

(26)式の比を図2のS平面上の角度 β との関連で見ると次式で表わせるので、 β を求めよ。

$$\beta = \tan^{-1}(\sigma_0 / \omega_0) \quad \dots \dots (27)$$

9-4) 固有角周波数 undamped natural angular frequency, ω_n

これは速応度を表わすものと言われているが、先の注の如く閉ループ特性 $G(S)$ が2次遅れ要素であるとして、Sの1次の係数を B 、定数項を C とすると、加藤によれば次式の通りなので、これを求める：

$$\omega_n = \sqrt{-C} \quad \dots \dots (28)$$

手順10) 2次遅れ要素の制御対象 $Y_{c(j\omega)}$ の特性方程式から安定性を調べることは、前の9)で述べたようにそれほど難しいものではない。それに対して(15)式の人間機械系の特性方程式から安定性を調べることは、その式がSについての3次方程式になり、その近似根を求めることが2次方程式の場合ほど容易ではない。

10-1) そこで、ここでは先ず、Hurwitz条件と言われるものを、伊沢計介(1964)によって調べることによって人間機械系の安定性を検討する。

伊沢に従って人間機械系の特性方程式を表わすと

$$S^3 + a_1 S^2 + a_2 S + a_3 = 0 \quad \dots \dots (31)$$

この根が負の実数部を持てば系は安定であるが、そのための必要十分条件は

(i) 総ての係数 a_1, a_2, a_3 が正であること。

(ii) 次の Hurwitz 行列式 H_2 が正であること：

$$H_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ 1 & a_2 \end{vmatrix} \quad \dots \dots (32)$$

10-2) 次に、特性方程式たる(32)式の近似根を求めるために Shih-Nge Lin の方法を用いる。伊沢によれば次数 n が3と奇数なので、 $S + a_3/a_2$ を作り、これで(31)式を割る：

$$\begin{aligned}
 & S^2 + (a_1 - a_3/a_2)S + \left(a_2 - \frac{a_1 a_3}{a_2} + \frac{a_3^2}{a_2}\right) \\
 & S + \frac{a_3}{a_2} \left(\frac{S^3 + a_1 S^2 + a_2 S + a_3}{S^3 + \frac{a_3}{a_2} S^2} \right) \\
 & \frac{(a_1 - a_3/a_2)S^2 + a_2 S}{(a_1 - a_3/a_2)S^2 + \frac{(a_1 a_2 - a_3)}{a_2^2} a_3 S} \\
 & \frac{\{a_2 - \frac{(a_1 a_2 - a_3)}{a_2^2} a_3\} S + a_3}{\{a_2 - \frac{(a_1 a_2 - a_3)}{a_2^2} a_3\} S + (a_2 - \frac{a_1 a_3}{a_2} + \frac{a_3^2}{a_2}) \frac{a_3}{a_2}} \\
 & \left(a_1 - \frac{a_3}{a_2}\right) \frac{a_3^2}{a_2^2} \dots \text{余り}
 \end{aligned}$$

この余りが小さくなければ $S + a_3 / \left(a_2 - \frac{a_1 a_3}{a_2} + \frac{a_3^2}{a_2}\right)$ で(31)式を割り、この操作を余りが小さくなるまで行なう。余りが充分小さくなつた時に、その余りから 2 行上の 1 次式をゼロに置いて得られる S の値が(31)式の特性方程式の 1 つの根の近似値である。その 1 次式で(31)式を割った商をゼロに等しいと置いた式は 2 次方程式なので、それから更に二つの根を求めるることは容易なことである*10。後の二つの根が実数でなければ、必ず共役複素根であるから、そのような場合には代表根と呼べる。要するに、(31)式の特性方程式の三つの根を以上のような手続で求め、その二つが代表根であるか否かを調べる。

10-3) 10-2) の三次方程式の根を求める計算には誤まりはないと思われるが、吟味のために本節の計算を行う。

(31)式を $f(s)$ と置き、10-2) の Lin の方法によって求めた近似根を s_1 とする。

(i) $f(s_1)$ を求めて、ほぼゼロに等しいか否か調べる。

(ii) $f'(s)$ を計算し、極大値と極小値を求める。

(iii) $f''(s)$ を計算し変曲点を求める。

(iv) 以上の知識を総合して、 $f(s)$ のグラフを描く。

(v) 以上の吟味で不都合が生じなければ

(vii) の処理に進むが、不都合が生じたならば、遠山啓・長妻克亘 (1964) に従ってカルダノの公式 Cardano's formula によっても、3 次方程式の根を求めてみる*11。

(vi) カルダーノの公式によって求めた根を 1 つ 1 つの(31)式の右辺に代入して、結果がゼロに充分近ければ良いが、近くない時には、その根を s_2 、代入して得た値を $f(s_2)$ とすると、先の(i)で求めた s_1 と $f(s_1)$ との関係で、図 6 の如く直線補間にによって $f(s_0) = 0$ となる $S = S_0$ を求める。

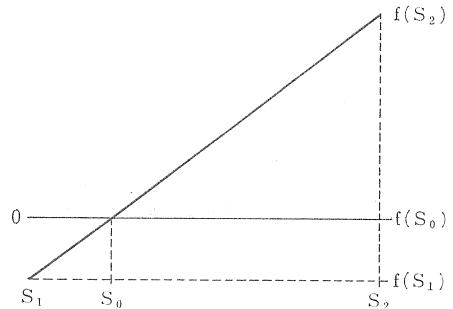


図 6 例えば $S_1, f(S_1), S_2, f(S_2)$ が図の如き位置をとったとすると $f(S_0) = 0$ となる $S = S_0$ は図の如き位置となろう。

それが求まつたら、(31)式の 3 次式を $S - S_0$ で割るという 10-2) で述べたと同様の割算を行うことによって 2 次式を求め、更にその根をも求める。

(vii) 以上のようにして三つの根が求まるが、制御対象 $Y_{e(j\omega)}$ が 2 次遅れ要素で、振動的なものであるため、人間機械系全体としても幾らかでも振動を含むであろうと予想される。従って、三つの根の内二つは共役複素根、ここでは代表根と呼ばれるが、になる可能性が大きい。つまり、三根のうち一つは実根で、他の二根は共役複素根になる可能性が大きい。もし、そなれば、代表根は(22)式の如く書けるから、それをもとに次の諸定数を求める：

10-4) 対数減衰率 σ_0 :

代表根の実数部がそのままを対数減衰率として求める。

10-5) 代表振動成分 ω_0 :

代表根の虚数部を代表振動成分として求め る。

10-6) 減衰度 ρ

(26式) に従って ρ を、(27) に従って角度 β を求 める。

10-7) 減衰比 ζ

加藤によればこれと角度 β 間には次式の関 係があるので、 β より ζ を求める :

$$\zeta = \sin \beta \quad \dots \dots (42)$$

10-8) 固有角周波数 ω_n

加藤によれば次式の関係があるので、それ により ω_n を求める :

$$\omega_n = \sigma_0 / \zeta \quad \dots \dots (43)$$

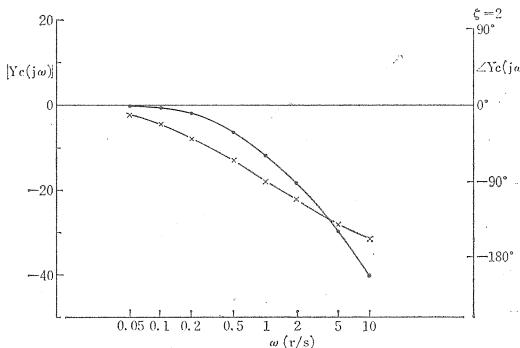


図7-1 $Y_c(j\omega) = 1/((j\omega)^2 + 4(j\omega) + 1)$ のボード線図。黒丸はゲイン、バツは位相を表わす。

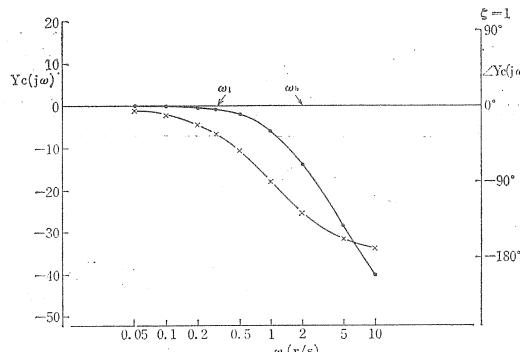


図7-2 $Y_c(j\omega) = 1/((j\omega)^2 + 2(j\omega) + 1)$ のボード線図。黒丸はゲイン、バツは位相を表わす。

IV. 解析の結果

次に以上の手順に従って行った解析の結果を、やはり手順番号別に示そう :

手順 1) 条件 1 たる減衰比 $\zeta=2$ における 2 次遅れ要素のボード線図を描く基となる各角周波 数 ω でのゲインたる $|Y_c(j\omega)|_{db}$ と位相たる度単位での $\angle Y_c(j\omega)$ との計算過程とその結果を示したのが表 2 である。(3)式に $\zeta=2$ を代入す ると次式の通りとなる :

$$Y_c(j\omega) = \frac{1}{(1-\omega^2) + 4\omega \cdot j} \quad \dots \dots (44)$$

$$= \frac{1-\omega^2}{(1-\omega^2)^2 + (4\omega)^2} - \frac{4\omega \cdot j}{(1-\omega^2)^2 + (4\omega)^2} \quad \dots \dots (45)$$

$$\therefore |Y_c(j\omega)| = 1/\sqrt{(1-\omega^2)^2 + (4\omega)^2} \quad \dots \dots (46)$$

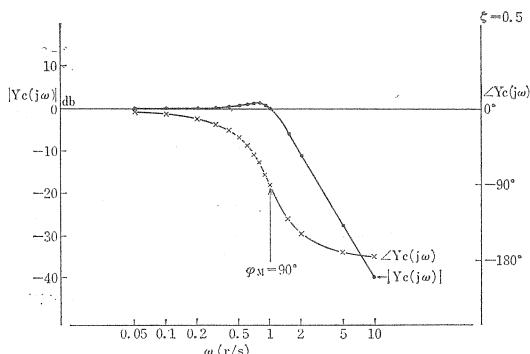


図7-3 $Y_c(j\omega) = 1/((j\omega)^2 + (j\omega) + 1)$ のボード線図。黒丸はゲイン、バツは位相を表わす。

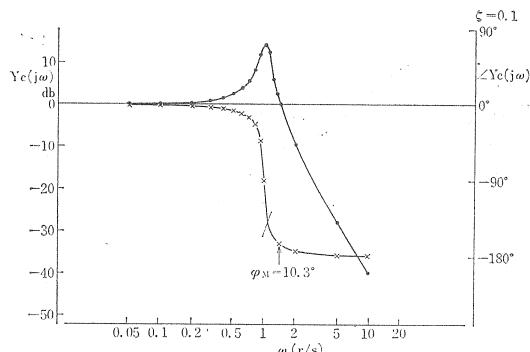


図7-4 $Y_c(j\omega) = 1/((j\omega)^2 + 0.2(j\omega) + 1)$ のボード線図。黒丸はゲイン、バツは位相を表わす。

従って ω に rad/sec 単位の角周波数を代入して、(45)式を db 単位により、また(46)式を度単位によって計算すると表 2 が出来上る。

これをボード線図に描いたものが図7-1である。図は 5mm を 2^{db} 及び 10° として描かれている。

以上は $\zeta=2$ 即ち、条件 1 での 2 次遅れ要素のボード線図の書き方であるが、 $\zeta=1$ たる条件 2, $\zeta=0.5$ たる条件 3, $\zeta=0.1$ たる条件 4 に対する角周波数とその振幅の db 表示とその位相の度単位による表示とは、伊沢計介、久村富持 (1963) に数値で与えられているので、それを用いてボード線図図7-2から図7-4を描いた。 $\zeta=-0.1$ たる条件 5 は制御不能であったので描かなかった。

図7-1から図7-4までを相互に見比べてみると、減衰比たる ζ の減少につれて普通に言わ

れている如く、黒丸を曲線で結んだ方であるゲイン曲線が 1r/s 付近でもり上りを示してくれることがわかる。

手順 2) 条件 4 のみが PI 動作だが、他の 3 条件

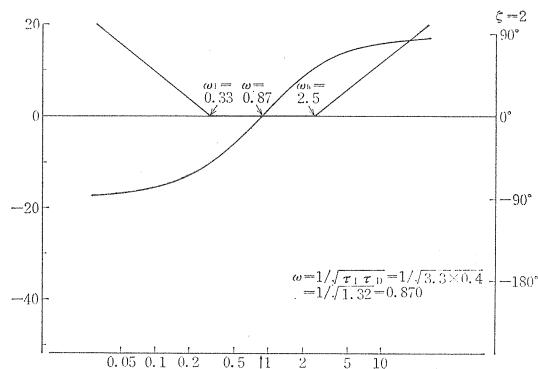


図 8 $Y_p(j\omega) = 0.4j\omega + 1 + 0.3(j\omega)$ のボード線図

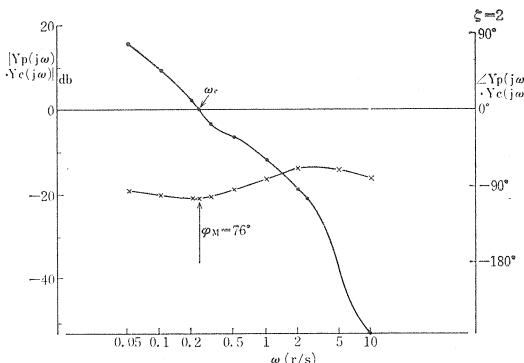


図 9-1 条件 1 の人間機械系の開ループ周波数特性

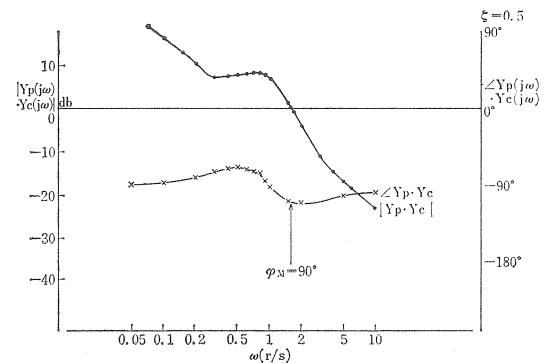


図 9-3 条件 3 の人間機械系の開ループ周波数特性

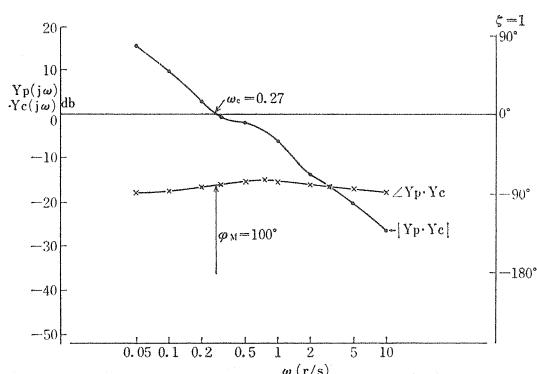


図 9-2 条件 2 の人間機械系の開ループ周波数特性

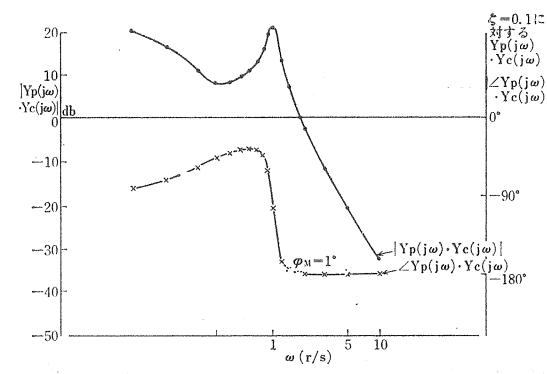


図 9-4 条件 4 の人間機械系の開ループ周波数特性

は PID 動作であり, $\tau_I > \tau_D$ であるから, いずれもゲインは $\omega \leq 1/\tau_I$ では $-20\text{db}/\text{dec}$ 勾配の直線が漸近線であり, $1/\tau_I < \omega \leq 1/\tau_D$ では $(20 \log_{10} h)_{\text{db}}$ 直線が漸近線であり, $\omega > 1/\tau_D$ では $20\text{db}/\text{dec}$ 勾配の直線が漸近線である^{*12}。位相は $\omega = 1/\sqrt{\tau_I \cdot \tau_D}$ で 0° であり, ω を少しくすると -90° に近づいてゆき, ω を大きくすると 90° に近づいていく。

$\zeta = 2$ たる条件 1 では $1/\tau_I = 0.33\text{r/s}$, $1/\tau_D = 2.5\text{r/s}$ であり, $1/\sqrt{\tau_I \cdot \tau_D} = 0.87\text{r/s}$ であり, ボード線図は図 8 の通りである。

一方 PI 動作たる条件 4 においては, ゲインは $\omega \leq 1/\tau_I = 0.3\text{r/s}$ では $-20\text{db}/\text{dec}$ 勾配の直線が漸近線であり, $\omega > 0.3\text{r/s}$ では $(20 \log_{10} h)_{\text{db}} = 7.1\text{db}$ 直線が漸近線である。

一方位相は ω が小くなるにつれて -90° に近づき, 大になるにつれて 0° に近づくような曲線となる。

手順 3) 各条件内で, $Y_{p(j\omega)}$ と $Y_{c(j\omega)}$ のボード線図の和を求めて得られたのが, 図 9-1 から図 9-4 のボード線図である。ゲインの図は ζ が小さくなり条件番号が後になるにつれて始めは角周波数 ω 増大につれて単調減少的であったものが, 1 度増大してから減少するという 1 山を持つようになってくる。一方, 位相の図は, ζ の減少につれてほぼ 90° 遅れ一定の形からほぼ $\omega = 1\text{r/s}$ を境として, それ未満での比較的小さい一定の遅れと, それ以上での比較的大きい一定の遅れという形になってくる。

手順 4) 制御対象 $Y_{c(j\omega)}$ のみから成る系は, 図 1 において $H(S) = Y_{c(j\omega)}$, $S = j\omega$ と置いたものであることは明らかであろう。その系の関係から偏差 $E_{(j\omega)}$ を目標値 $X_{(j\omega)}$ と制御対象 $Y_{c(j\omega)}$ とによって表わす式を誘導してみると次の如くになる:

$$X_{(j\omega)} - Y_{(j\omega)} = E_{(j\omega)} \quad \dots \dots (47)$$

$$Y_{(j\omega)} = Y_{c(j\omega)} E_{(j\omega)} \quad \dots \dots (48)$$

$$(47) + (48) \quad X_{(j\omega)} = E_{(j\omega)} \{1 + Y_{c(j\omega)}\}$$

$$\therefore E_{(j\omega)} = X_{(j\omega)} / \{1 + Y_{c(j\omega)}\} \quad \dots \dots (49)$$

一方, 定位置偏差 ε_p とは, 系に目標値として階段波, その周波数領域における表示が

$1/(j\omega)$ であることに注意せねばならぬが, を与えた場合の時間 t が充分大きくなつた時に未だ存在する偏差 $e(t)$ のことであるから, 市川邦彦 (1962) に従つて「最終値の定理」 final value theorem を用い, 更に上述の(49)式を用いると

$$\begin{aligned} \varepsilon_p &= \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \\ &= \lim_{\omega \rightarrow 0} (j\omega) \cdot E_{(j\omega)} \\ &= \lim_{\omega \rightarrow 0} (j\omega) \cdot \frac{1}{(j\omega)} \cdot \frac{1}{1 + Y_{c(j\omega)}} \\ &= \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{1}{1 + \frac{1}{(j\omega)^2 + 2\zeta(j\omega) + 1}} \\ &= \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{(j\omega)^2 + 2\zeta(j\omega) + 1}{(j\omega)^2 + 2\zeta(j\omega) + 2} \\ &= 1/2 \end{aligned} \quad \dots \dots (50)$$

次に定速度偏差 ε_v であるが, これは系に目標値として階段波ではなくランプ入力 ramp input を与えた場合の $t \rightarrow \infty$ における偏差 $e(t)$ のことであるが, ランプ入力の周波数領域における表示は $1/(j\omega)^2$ であるから,

$$\begin{aligned} \varepsilon_v &= \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \\ &= \lim_{\omega \rightarrow \infty} (j\omega) \frac{1}{(j\omega)^2} \cdot \frac{1}{1 + Y_{c(j\omega)}} \\ &= \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{1}{j\omega} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{(j\omega)^2 + 2\zeta(j\omega) + 1}} \\ &= \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{(j\omega)^2 + 2\zeta(j\omega) + 1}{(j\omega)^3 + 2\zeta(j\omega)^2 + 2(j\omega)} \\ &= \infty \end{aligned} \quad \dots \dots (51)$$

以上で制御対象のみからなる系の偏差定数 ε_p と ε_v は求まったが, 人間機械系の偏差定数はどのような値になるであろうか。

人間機械系 $Y_{p(j\omega)}$ $Y_{c(j\omega)}$ のプロック図は先の $Y_{c(j\omega)}$ だけから成る系の $Y_{c(j\omega)}$ の代りに $Y_{p(j\omega)} \cdot Y_{c(j\omega)}$ を入れただけのものであるから, 二つの偏差定数を求める際にも, (50)式及び(51)式において, $Y_{c(j\omega)}$ の代りに(4)式で表わされる $Y_{p(j\omega)} \cdot Y_{c(j\omega)}$ を代入すればよい:

$$\varepsilon_p = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{1}{1 + h \left\{ \tau_D(j\omega) + 1 + \frac{1}{\tau_I(j\omega)} \right\} (j\omega)^2 + 2\zeta(j\omega) + 1}$$

$$= \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{(\text{j}\omega)^3 + 2\zeta(\text{j}\omega)^2 + (\text{j}\omega)}{(\text{j}\omega)^3 + (2\zeta + h\tau_D)(\text{j}\omega)^2 + (1+h)} = 0 \quad \dots \dots (52)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_v &= \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{1}{\text{j}\omega} \cdot \frac{1}{1 + h \{ \tau_D(\text{j}\omega) \} \frac{1 + 1/\tau_I(\text{j}\omega)}{(\text{j}\omega)^2 + 2\zeta(\text{j}\omega) + 1}} \\ &= \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{(\text{j}\omega)^3 + 2\zeta(\text{j}\omega) + 1}{(\text{j}\omega)^3 + (2\zeta + h\tau_D)(\text{j}\omega)^2 + (1+h)} \\ &= \tau_I/h \end{aligned} \quad \dots \dots (53)$$

なお、 $\zeta=0.1$ 条件のみでは人間の伝達関数がPIDではなくPI動作の伝達関数となつたが、(52)及び(53)式に $T_D=0$ を代入するとわかる通り、同様に $\varepsilon_p=0$ 、 $\varepsilon_v=\tau_I/h$ となった。

さて、(50)と(51)式の如く ε_p が定数、 ε_v が無限大になる系を0型の系と言い、(52)と(53)式の如く ε_v が0、 ε_v が定数になる系を1型の系と言うが^{*13}、偏差 $e(t)$ が小さいほど良いと言える制御成績については、1型である人間機械系の方が0型である機械のみからなる系よりも優れていると言える。

また、人間機械系の中では、定速度偏差に関しては、(53)式より明らかな通り条件1と2が0.300、条件3と4が0.678であるため、条件1と2の方が小さいと言える。

手順5) $Y_{c(j\omega)}$ と $Y_{p(j\omega)} \cdot Y_{c(j\omega)}$ の開ループボード線図たる図7-1から7-4までと図9-1から9-4までとから4つの定数を求めてみると表3の

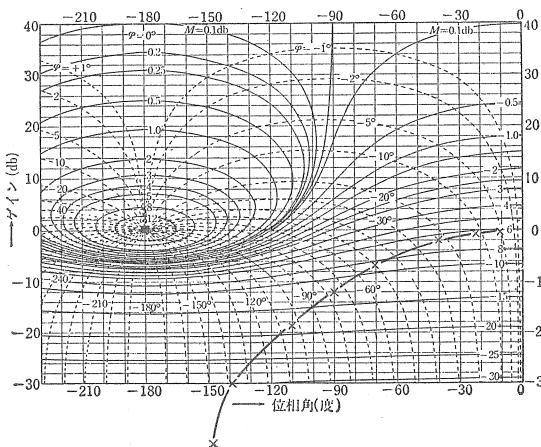


図10-1 条件1の制御対象の閉ループ周波数特性

通りである。最初の定数であるクロス・オード一周波数 ω_c は速応度を表わすものと言わっているが、 $Y_{c(j\omega)}$ の図から求めたものより $Y_{p(j\omega)} \cdot Y_{c(j\omega)}$ の図から求めたものの方が、また条件番号が小さいものよりは大きいものの方が速応度が大きい。位相余裕 φ_M は安定度を表わすものであるが、 $Y_{c(j\omega)}$ よりは $Y_{p(j\omega)} \cdot Y_{c(j\omega)}$ の方が、また、条件番号が小さいものよりは大きいものの方が安定度が小さい傾向が見られる^{*14}。Mc Ruer et al (1959)においては、 φ_M は 60° から 110° の範囲内であるが、本結果の6例中の4例がその範囲内であることがわかる。

またMc Ruer et al (1967)は、制御対象 $Y_{c(j\omega)}$ として $K_c / \{(j\omega) \cdot (j\omega - 1/T)\}$ なる伝達関数のものを人間にトラッキングさせ、その $1/T$ の値を増大、即ち発散的にしていった時に、本実験と似ているが ω_c と φ_M をどのように変化させて $Y_{p(j\omega)} \cdot Y_{c(j\omega)}$ が応ずるかを調べた。その結果 $1/T$ の増大につれて単調に ω_c は増大、 φ_M は減少することを見出しており、これは本結果と傾向を同じくするものであり、興味深い。

4番目の定数である減衰比 ζ は、安定度を表わすものと言われるが、 $Y_{c(j\omega)}$ よりは $Y_{p(j\omega)} \cdot Y_{c(j\omega)}$ において小さく、また条件番号が大きいものの方が小さい傾向が見られる。

以上要するに、 $Y_{c(j\omega)}$ より $Y_{p(j\omega)} \cdot Y_{c(j\omega)}$

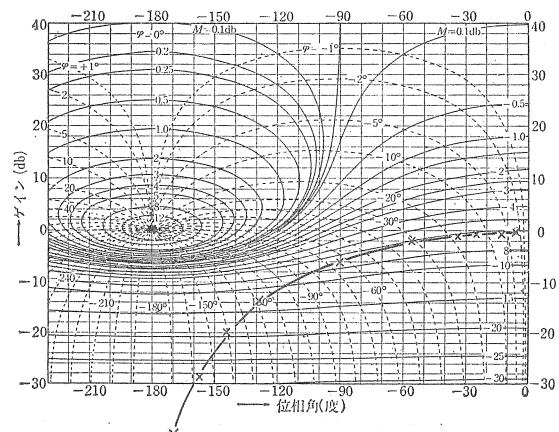


図10-2 条件2の制御対象の閉ループ周波特性

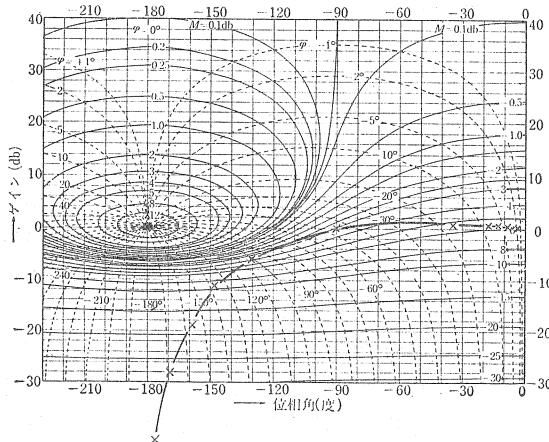


図10-3 条件3の制御対象の閉ループ周波数特性

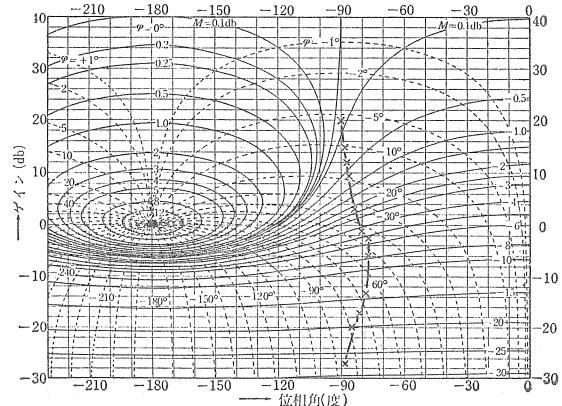


図10-6 条件2の人間機械系の閉ループ周波数特性

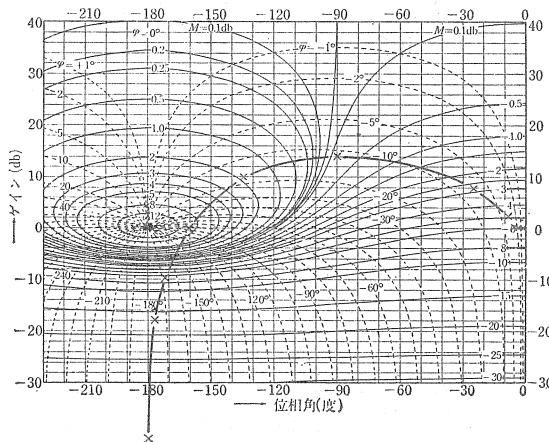


図10-4 条件4の制御対象の閉ループ周波数特性

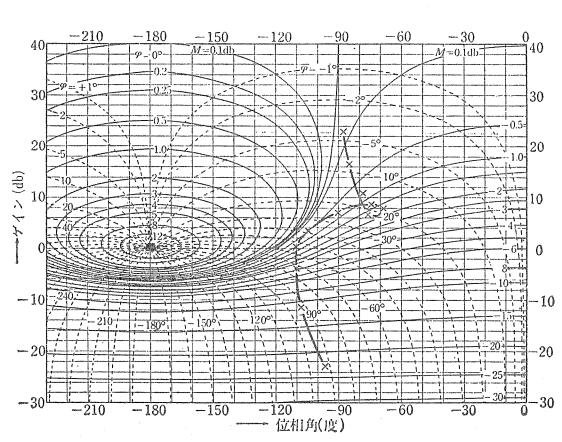


図10-7 条件3の人間機械系の閉ループ周波数特性

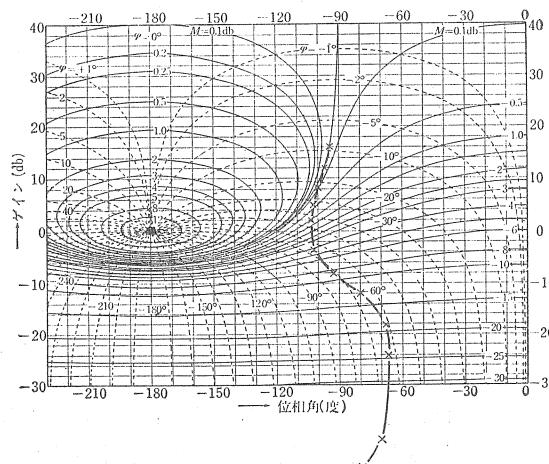


図10-5 条件1の人間機械系の閉ループ周波数特性

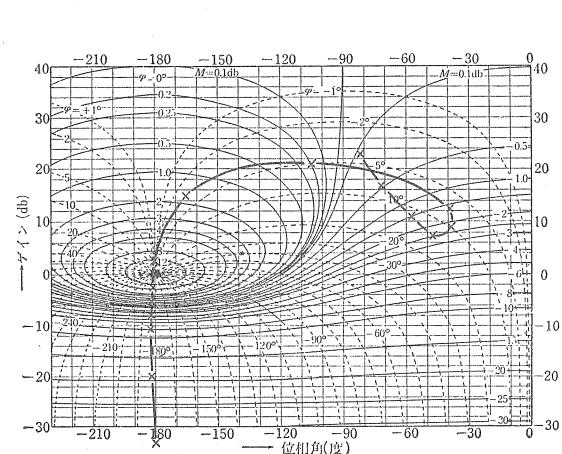


図10-8 条件4の人間機械系の閉ループ周波数特性

の方が、また条件番号が小さいものより大きいものの方が速応度が増すが安定度は減少していることがわかる。

手順 6) 表 4 には、 $Y_{p(j\omega)} \cdot Y_{e(j\omega)}$ のボード線図の位相とゲインを 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10 r/s の角周波数及び括弧がついている実測曲線の変化の激しい二～三の角周波数のところで読み表示してある。 $Y_{e(j\omega)}$ の特性とこの表の数値をもとに描いたニコルズ線図が図10-1～10-8である。 $Y_{e(j\omega)}$ から描いた図10-1～10-4 は、大略図の右下¹⁵を中心とする四分円弧 quadrant を成し、角周波数増大につれて反時計まわりに座標を変えていくことがわかる。そして、条件番号増大につれて四分円弧の半径を増大させていくこともわかる。

次に $Y_{p(j\omega)} Y_{e(j\omega)}$ から描いた図10-5～10-8を見ると、条件 1 と 2 とでは、開ループの高ゲインで始まって低ゲインへとほぼ開ループの -90° の線に沿って単調に減少していくが、条件 3 と 4 とでは開ループの高ゲインで始まるが、途中で半時計まわりに 1 回転しつつ 90° をはるかに上まわる遅れをともなった低ゲインへと減少していくことがわかる。

手順 7) 4つの定数をニコルズ線図より求めると表 5 の通りである。これ等定数のうち、測定結果より傾向と言えるものが導出出来たのは、前の二つ、即ち周波数領域における速応度を表わすバンド巾 ω_b とその時の位相 φ_b とであり、 ω_b は条件番号の増大につれて値を増大する傾向、言い換えると速応度を増す傾向にある。この傾向は、手順 5 で得た結果と一致している。

手順 8) 8つの定数を計算によって求め、まとめたものが表 6 である。これ等定数のうち、一定の傾向を示している定数に関してのみ述べると、減衰度 ρ 、インディシャル応答の行き過ぎ量 V 、減衰比 n 、5 % 整定にいるまでの振動回数 N 、はいずれも安定度を表わす測定値であると言われているが、条件番号が大きくなるにつれて不安定の度合を増す傾向が見られる。一方、立ち上り時間 T_r と遅れ時間

T_d はインディシャル応答の速応度を表わすものであるが、条件番号の増大につれて速応度を増す傾向が見られる。以上の傾向は、手順 5 と 7 で得た結果と完全に一致するものである。

手順 9) (14)式の制御対象 $Y_e(s)$ の特性方程式から代表根を求めるこことによって、得られる諸定数及び安定判別結果を示すと表 7 の通りである。零点を求めてみると、条件 1 のみが負の実根で他は全て複素根であり、その実数部はいずれも負であるから、どの系も安定であると言える。対数減衰率の σ_0 は安定度と速応度を反映する測定値と言われているが、条件番号が後なものほど不安定で、速応度が小さくなっている。安定度に関してはここ迄に述べた傾向と一致しているが、速応度に関しては逆の傾向であるので、その原因を考えてみよう。先の解析手順の 9-1) をもう 1 度見ると、そこには、 σ_0 は減衰速度を表わすものであり、それが小さくなるとインディシャル応答の 5 % 整定時間が長びき、その意味での速応度が減少する旨の記述があった。つまり、ここでいう速応度は目標値に直ちに応ずるという意味での即応ではなく、インディシャル応答の振幅が目標値の振幅と ± 5 % と違わない値に落ち着く速さという意味であり、これ迄の記述と傾向が違っても、現象的には何等矛盾するものではないことがわかる。次の定数たる、代表振動成分 ω_0 は内容としては図 5 及び(24)式から明らかな通り、減衰振動の角周波数を表わすものであり、条件番号が後になるほどこれが大きくなる傾向があるので、系はより振動的となり、従って不安定になる傾向があると言えよう。

次に(26)式から計算した減衰度 ρ を見ると、条件番号が後になるにつれて減少、即ち不安定になる傾向が認められる。定数 β は、減衰振動の際の単位角周波数当たりの対数減衰率を角度に変換して表わしたものであり、これが大きいほど安定していると言われる。このように見ると β は、条件番号が後ほど小さくなる、即ち不安定となる傾向が認められる。減衰比

ζ について見ても同様に番号が後ほど不安定となる傾向が認められる。要するに、代表根を求ることによって得た諸定数から見ると、制御対象 $Y_c(s)$ のみから成る閉ループは、条件番号が後ほど不安定となる傾向があることがわかる。

手順10-1) 次に人間機械系即ち、 $Y_p(j\omega) \cdot Y_c(j\omega)$ の安定性を Hurwitz 条件によって調べた結果を記そう。人間機械系の特性方程式は次の通りである：

$$1 + Y_p(s) \cdot Y_c(s) = 1 + \frac{h \{\tau_D S + 1 + 1/(\tau_I \cdot s)\}}{S^2 + 2\zeta S + 1} = \frac{S^3 + (2\zeta + h\tau_D)S^2 + (1+h)S + h/\tau_I}{S^3 + 2\zeta S^2 + S} = \dots \quad (54)$$

この式の分子は先の(31)式で表わした S に関する 3 次方程式となっているので、その係数が総て正であるかということと(32)式の H_2 が正であるかという Hurwitz 条件によって検討する：

先ず $\zeta = 2$ たる条件 1 では(54)の分子 = 0 と置いた式は：

$$S^3 + (4+0.4)S^2 + (1+1)S + 0.3 = \dots \quad (55)$$

$$= S^3 + 4.4S^2 + 2S + 0.3 = 0$$

となり、いずれの係数も正であり、 H_2 は：

$$H_2 = \begin{vmatrix} 4.4 & 0.3 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} = 8.5 \quad \dots \quad (56)$$

となり正であるから、この場合の人間機械系は安定と言える。同様に $\zeta = 1$ たる条件 2 では：

$$S^3 + 2.5S^2 + 2S + 0.3 = 0 \quad \dots \quad (57)$$

$$H_2 = \begin{vmatrix} 2.5 & 0.3 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} = 4.7 \quad \dots \quad (58)$$

となり、安定と言える。

$\zeta = 0.5$ たる条件 3 では：

$$S^3 + 1.678S^2 + 3.26S + 0.6848 = 0 \quad \dots \quad (59)$$

$$H_2 = \begin{vmatrix} 1.678 & 0.6848 \\ 1 & 3.26 \end{vmatrix} = 4.7855 \quad \dots \quad (60)$$

故、安定。

$\zeta = 0.1$ たる条件 4 では：

$$S^3 + 0.2S^2 + 3.26S + 0.678 = 0 \quad \dots \quad (61)$$

$$H_2 = \begin{vmatrix} 0.2 & 0.678 \\ 1 & 3.26 \end{vmatrix}$$

$$= -0.026 \quad \dots \quad (62)$$

(61)式の係数は総て正だが、(62)式の H_2 は値は小さいが負なので、この条件のみに関しては、人間は制御対象を安定に制御しているとは言い難い。

手順10-2) 次に Lin の方法により特性方程式の根を求める：

$$\text{先ず条件 1 では : } 2S + 0.3 \rightarrow S + 0.3/2 = S + 0.15$$

$$\begin{array}{r} S^2 + 4.25S + 1.3625 \\ S + 0.15) S^3 + 4.4S^2 + 2S + 0.3 \\ \hline S^3 + .15S^2 \\ 4.25S^2 + 2S \\ 4.25S^2 + .6375S \quad 1.3625S + 0.3 \\ 1.3625S + 0.3 \quad \rightarrow S + .2202 \\ 1.3625S + .2044 \\ \hline .0956 \quad \dots \text{余り} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} S^2 + 4.1798S + 1.0796 \\ S + .2202) S^3 + 4.4S^2 + 2S + 0.3 \\ \hline S^3 + .2202S^2 \\ 4.1798S^2 + 2S \\ 4.1798S^2 + .9204S \quad 1.0796S + 0.3 \\ 1.0796S + 0.3 \quad \rightarrow S + .2779 \\ 1.0796S + .2377 \\ \hline .0623 \quad \dots \text{余り} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} S^2 + 4.1221S + .8545 \\ S + .2779) S^3 + 4.4S^2 + 2S + .3 \\ \hline S^3 + .2779S^2 \\ 4.1221S^2 + 2S \\ 4.1221S^2 + 1.1455S \\ \hline .8545S + .3 \\ .8545S + .2375 \\ \hline .0625 \quad \dots \text{余り} \end{array}$$

余りが単調に減少していかないが、それが極小値 0.0623 となる際の割る方の 1 次式をゼロに等しいと置いた時の根が 3 次式の近似根であると見做して、商たる 2 次方程式の根を根の公式によって求めることによって、(55)式

の3次方程式の因数分解を行ってみると：

$$\begin{aligned} & S^3 + 4.4S^2 + 2S + 0.3 \\ & = (S+0.2202)(S+0.277)(S+3.903) \\ & = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots(63)$$

条件2では： $2S+0.3 \rightarrow S+0.15$

$$\begin{array}{r} S^3 + 2.35S + 1.6475 \\ S+0.15) \overline{S^3 + 2.5S^2 + 2S + 0.3} \\ S^3 + .15S^2 \\ \hline 2.35S^2 + 2S \\ 2.35S^2 + .3525S \quad 1.6475S + 0.3 \\ \hline 1.6475S + 0.3 \rightarrow S+0.1821 \\ 1.6475S + .2471 \\ \hline .0529 \dots\dots \text{余り} \\ S^3 + 2.3179S + 1.5779 \\ S+.1821) \overline{S^3 + 2.5S^2 + 2S + 0.3} \\ S^3 + .1821S^2 \\ \hline 2.3179S^2 + 2S \\ 2.3179S^2 + .4221S \quad 1.5779S + .3 \\ \hline 1.5779S + 0.3 \rightarrow S+0.1901 \\ 1.5779S + .2873 \\ \hline .0127 \dots\dots \text{余り} \\ S^3 + 2.3099S + 1.5609 \\ S+.1901) \overline{S^3 + 2.5S^2 + 2S + 0.3} \\ S^3 + .1901S^2 \\ \hline 2.3099S^2 + 2S \\ 2.3099S^2 + .4391S \quad 1.5609S + 0.3 \\ \hline 1.5609S + 0.3 \rightarrow S+0.1922 \\ 1.5609S + .2967 \\ \hline .0033 \dots\dots \text{余り} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} S^3 + 2.3078S \\ S+.1922) \overline{S^3 + 2.5S^2 + 2S + 0.3} \\ S^3 + .1922S \\ \hline 2.3078S^2 + 2S \\ 2.3078S^2 + .4436S \\ \hline 1.5564S + 0.3 \\ 1.5564S + .2991 \\ \hline .0009 \dots\dots \text{余り} \end{array}$$

余りが単調に減少しているので、最後の割算の割る方の1次式をゼロに等しいと置いた時の根を3次方程式の近似根であると見做して、商たる2次方程式の根も求めることによ

って、⁵⁷式の3次方程式の因数分解を行ってみると：

$$\begin{aligned} & S^3 + 2.5S^2 + 2S + 0.3 \\ & = (S+1.1922)(S+1.1539+0.4742j) \\ & \quad (S+1.1539-0.4742j) = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots(64)$$

条件3では：

$$\begin{array}{r} 3.26S + 0.678 \rightarrow S+0.678/3.26 \\ = S+0.2080 \\ S+0.2080) \overline{S^3 + 1.4700S + 2.9542} \\ S^3 + 1.678S^2 + 3.26S + .678 \\ S^3 + .2080S^2 \\ \hline 1.4700S^2 + 3.26S \\ 1.4700S^2 + .3058S \quad 2.9542S + .678 \\ \hline 2.9542S + .678 \rightarrow S+0.2295 \\ 2.9542S + .6145 \\ \hline .0635 \dots\dots \text{余り} \\ S+0.2295) \overline{S^3 + 1.4505S + 2.9271} \\ S^3 + 1.68S^2 + 3.26S + .678 \\ S^3 + .2295S^2 \\ \hline 1.4505S^2 + 3.26S \\ 1.4505S^2 + .3329S \quad 2.9271S + .678 \\ \hline 2.9271S + .678 \rightarrow S+0.2316 \\ 2.9271S + .6718 \\ \hline .0062 \dots\dots \text{余り} \\ S+0.2316) \overline{S^3 + 1.449S + 2.9244} \\ S^3 + 1.68S^2 + 3.26S + .678 \\ S^3 + .231S^2 \\ \hline 1.449S^2 + 3.26S \\ 1.449S^2 + .3356S \\ \hline 2.9244S + .678 \\ 2.9244S + .6773 \\ \hline .0007 \dots\dots \text{余り} \end{array}$$

余りが単調に減少しているので、最後の割算の割る方の1次式をゼロに等しいと置いた時の根を3次方程式の近似根であると見做して、商たる2次方程式の根を求めるこことによって⁵⁹式の3次方程式の因数分解を行ってみると：

$$\begin{aligned} & S^3 + 1.68S^2 + 3.26S + .678 \\ & = (S+0.2316)(S+0.7245+1.5491j) \\ & \quad (S+0.7245-1.5491j) = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots(65)$$

条件4では：

$$\begin{array}{r}
 3.26S + .678 \rightarrow S + .2080 \\
 S^2 - .008S + 3.2617 \\
 \hline
 S + .2080) S^3 + .2S^2 + 3.26S + .678 \\
 S^3 + .208S^2 \\
 \hline
 -.008S^2 + 3.26S \\
 -.008S^2 - .0017S \\
 \hline
 3.2617S + .678 \\
 3.2617S + .6784 \\
 \hline
 -.0004 \dots\text{余り}
 \end{array}$$

1度の割算であるにもかかわらず余りが充分に小さいので、割る方の1次式をゼロに等しいと置いた時の根を3次方程式の近似根であると見做して、商たる2次方程式の根を求めることによって(41)式の3次方程式の因数分解を行ってみると：

$$\begin{aligned}
 & S^3 + 0.2S^2 + 3.26S + 0.678 \\
 & = (S + 0.2080)(S + 0.004 + 1.806j) \\
 & (S + 0.004 - 1.806j) = 0 \quad \dots\text{(66)}
 \end{aligned}$$

手順10-3)

条件1について：Linの方法によって求めた近似根はほぼ-0.22であるが、これを(55)式に代入すると、

$$\begin{aligned}
 (i) \quad f(-0.22) &= (-0.22)^3 + 4.4 \times (-0.22)^2 \\
 &+ 2 \times (-0.22) + 0.3 = 0.0624
 \end{aligned}$$

となり、ゼロよりかなり大きいので、(V)

以下の検討が必要に思える。

$$\begin{aligned}
 (ii) \quad f'(s) &= 3S^2 + 8.8S + 2 \\
 &= 3(S + 0.25)(S + 2.68) \quad \dots\text{(67)} \\
 f(-2.68) &= 7.2937 \dots\text{極大値} \\
 f(-0.25) &= 0.0594 \dots\text{極小値}
 \end{aligned}$$

極小値ですら負にならぬので、(63)式の実根が3つあるとの結論は検討し直す必要がある。

$$\begin{aligned}
 (iii) \quad f''(s) &= 6(S + 1.47) \\
 f(-1.47) &= 3.6915 \dots\text{変曲点}
 \end{aligned}$$

(iv) 実根が3つあるとの結論にLinの方法による解析結果たる(41)式においてはなっており、もしもそれが事実ならば当然のことだが、曲線は3度横軸と交わらねばならず、(i)はほぼゼロで(ii)の極小値は負にならねばならぬはずが、そうはならない。従って以上の情報のみではf(s)のグラフは描

けず次のCardanoの公式による根の求め直しに進むこととする。

(v) 根を求むべき3次方程式は(55)式であるが、再び記すと：

$$S^3 + 4.4S^2 + 2S + 0.3 = 0$$

これから(33)式に相当する式を作ると：

$$S = y - 1.47 \quad \dots\text{(68)}$$

これを上式に代入して整理すると：

$$(y - 1.47)^3 + 4.4(y - 1.47)^2 + 2.0(y - 1.47) + 0.3$$

$$= y^3 - 4.46y + 3.69 = 0 \quad \dots\text{(69)}$$

この式は(34)式に相当するものが先の(35)式の環元三次方程式に等しいと見做す：

$$y^3 + 3py + q = 0 \quad \dots\text{(70)}$$

以上二式の対応関係より、pとqを求める

と

$$p = -1.49$$

$$q = 3.69$$

これ等の値から(41)式の補助方程式を求める

と：

$$t^2 + 3.69t + 3.308 = 0 \quad \dots\text{(71)}$$

この2次方程式より根の公式によって根を求める

$$\alpha = -1.54$$

$$\beta = -2.16$$

従って、(69)式の第1の根は

$$y_1 = \sqrt[3]{-1.54} + \sqrt[3]{-2.16}$$

$$= -2.448$$

これを(68)式に代入して(55)式の根の値に直す

と

$$S_1 = -3.918$$

さて、ここで近似根が1つ求まったはずであるが、念のためこれを(55)式に代入してみると：

$$f(-3.918) = -0.136$$

今度は負となったが、やはりゼロと見做せないほどに絶対値が大きい。一方、Linの方法及び2次方程式の根を求める方法によって求めた根のうち、-3.918に最も近い根の値は(63)式より明らかな通り-3.903である。これを(55)式に代入すると：

$$f(-3.903) = 0.065$$

今度は正となつたが、やはりゼロと見做せないほどに大きい。いたしかたがないので、
 $f(S_1) = 0.00$

に近い値となる S_1 を 4 桁の有効数字で図 6 に示したように直線補間によって求めたところ
 $S_1 = -3.908$

となり、これを 5 次式に代入すると

$$f(-3.908) = -0.002$$

となり、ほぼゼロと見做してもよいほどの値となつた。 $(S+3.908)$ によって、5 次式の 3 次方程式を割ると次の通りとなる：

$$\begin{array}{r} S^2 + .492S + .077 \\ \hline S+3.908 \quad | \quad S^3 + 4.4S^2 + 2S + 0.3 \\ \quad \quad \quad | \quad S^3 + 3.908S^2 \\ \hline \quad \quad \quad .492S^2 + 2S \\ \quad \quad \quad .492S^2 + 1.923S \\ \hline \quad \quad \quad .077S + .3 \\ \quad \quad \quad .077S + .3009 \\ \hline \quad \quad \quad -.0009 \quad \cdots \text{余り} \end{array}$$

余りが充分に小さいので、割る方の 1 次式をゼロに等しいと置いた時の根を 3 次方程式

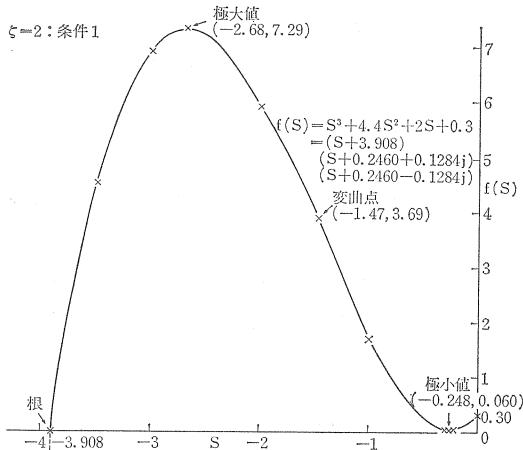


図11-1 条件 1 のもとに得られた人間機械系の特性方程式

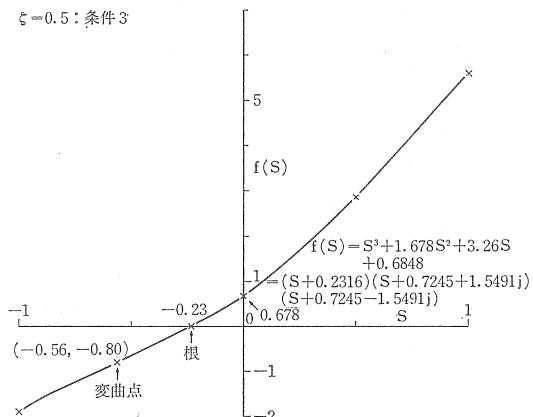


図11-3 条件 3 のもとに得られた人間機械系の特性方程式

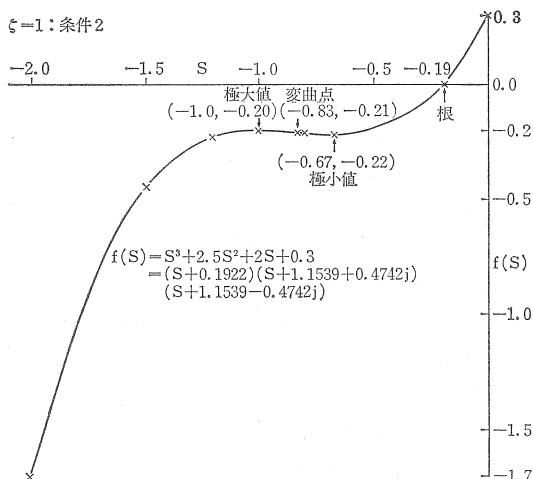


図11-2 条件 2 のもとに得られ人間機械系の特性方程式

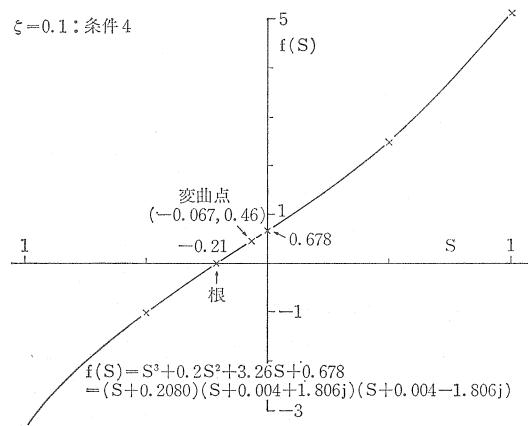


図11-4 条件 4 のもとに得られた人間機械系の特性方程式

の近似根であると見做して、商たる 2 次方程式の根を求ることによって、(55)式の 3 次方程式の因数分解を行ってみると：

$$\begin{aligned} S^3 + 4.4S^2 + 2S + 0.3 \\ = (S+3.908)(S+0.2460+0.1284j) \\ (S+0.2460-0.1284j) = 0 \quad \dots\dots(72) \end{aligned}$$

(vii) 予想通り 3 根のうち 1 根は実根で、他の 2 根は共役複素根となり、代表根と呼べるものとなった。(22)式の形式で書くと：

$$S = -0.2460 \pm 0.1284j \quad \dots\dots(73)$$

また(iv)で描けなかった(55)式のグラフを以上の知識を総合して描くと図11-1の通りとなる。

条件 2について：Lin の方法によって求めた近似根はほぼ -0.19 であるが、これを(57)式に代入すると

$$\begin{aligned} (i) \quad f(-0.19) &= (-0.19)^3 + 2.5 \times (-0.19)^2 \\ &+ 2 \times (-0.19) + 0.3 \\ &= 0.0034 \end{aligned}$$

となり、ほぼゼロと見做せるので(vi)と(vii)の処理は不要となる。

$$(i i) \quad f'(s) = 3S^2 + 5S + 2 \\ = 3(S+1.00)(S+0.67) \quad \dots\dots(74)$$

$$\begin{aligned} f(-1.00) &= -0.2000 \dots\text{極大値} \\ f(-0.67) &= -0.2185 \dots\text{極小値} \end{aligned}$$

$$(i i i) \quad f''(s) = 6(S+0.83) \\ f(-0.83) = -0.2095 \dots\text{変曲点}$$

(iv) 以上の知識を総合してグラフを描くと図 11-2 の通りとなる。

(vii) 1 つが実根、他の 2 つが共役複素根となり、代表根と呼べるものとなった。(22)式の形式でそれを書くと：

$$S = -0.004 \pm 1.806j \quad \dots\dots(75)$$

条件 3について：Lin の方法によって求めた近似根はほぼ -0.23 だが、これを(59)式に代入すると、

$$(i) \quad f(-0.23) = .0048 \\ \text{となり、ほぼゼロと見做せるので、(vi)と(vii)の処理は不要。}$$

$$(i i) \quad f'(s) = 3S^2 + 3.356S + 3.26 \quad \dots\dots(76)$$

この式の根は共役複素根となるので、極大値も極小値もない。

$$(i i i) \quad f''(s) = 6(S+0.56)$$

$$f(-0.56) = -0.7970 \dots\text{変曲点}$$

(iv) 以上の知識を総合してグラフを描くと図 11-3 の通りとなる。

(vii) 1 つが実根、他の 2 つが代表根となった。

(22)式の形式で書くと

$$S = -0.7245 \pm 1.5491j \quad \dots\dots(77)$$

条件 4について：Lin の方法によって求めた近似根はほぼ -0.21 だが、これを(61)式に代入すると

$$(i) \quad f(-0.21) = -0.005$$

となり、ほぼゼロと見做せるので、(vi)と(vii)の処理は不要。

$$(i i) \quad f'(s) = 3S^2 + 0.4S + 3.26 \quad \dots\dots(78)$$

この式の根は共役複素根となるので、極大値も極小値もない。

$$(i i i) \quad f''(s) = 6(S+0.067)$$

$$f(-0.067) = 0.4602 \dots\text{変曲点}$$

(iv) 以上の知識をもとにグラフを描くと図 11-4 の通りとなる。

(vii) 1 つが実根、他の 2 つが代表根となった。

(22)式の形式で書くと

$$S = -0.004 \pm 1.806j \quad \dots\dots(79)$$

10-4~10-8)

4 つの実験条件下で得た人間機械系の特性方程式より求められる代表根から、 σ_0 , ω_0 , ρ , β , ζ , ω_n を求めて、代表根及び安定判別とともに示したのが表 8 である。

零点を求めてみると、総て複素根であり、その実数部はいずれも負であるが、条件 4 は非常に小さい。そのためかハーピッツ条件によって条件 4 を調べると、これのみが不安定となっている。

条件番号が後ほど、 σ_0 の減少傾向、 ω_0 の増大、 ρ の減少傾向が見られるが、これ等はいずれも不安定度の増大の傾向を示すものである。一方 ω_n は、条件番号が後ほど、増大の傾向が見られるが、これは速応度の増大の傾向を示している。要するに、表 6 において得た結論と同様、条件番号が後ほど、安定度は減少し、条件 4 においては遂に不安定とさえなるが、速応度は増大する傾向を示してい

ることがわかる。

最後に、制御対象のみから成る系と人間機械系との制御を条件毎に比較てみたい。制御対象だけより人間機械系の方が制御が向上しているだろうか。表3から表8までに示された結果を通して見ると、そこに示されている測定値は、精度か速応度か安定度かのいずれかを反映していると言われているものが殆んどである。それ等の中で、精度を反映するものは、偏差定数 ε_p と ε_v だけであり、それ等を $Y_c(s)$ と $Y_p(s) \cdot Y_c(s)$ との系で直接比較することは可能で、手順4)に示した通り、どの条件においても制御対象のみの系よりも、人間機械系の方が優れていた。

次に、速応度を反映する測定値に関してだが、各測定値は速応度を反映するという点では同じだが、単位やディメンジョンは様々であり、得られた値をそのまま同一の規準で扱って良いかというかに疑問がある。そこで、 $Y_c(s)$ から成る系と $Y_p(s) \cdot Y_c(s)$ から成る系の速応度は等しいという帰無仮説：

$$H_0 : P = \frac{1}{2}$$

のもとに、ノンパラメトリック検定の1つである2点比較法 pair test^{*16}によって、各条件毎に $Y_c(s)$ の系と $Y_p(s) \cdot Y_c(s)$ の系のいずれに速応度があるかを調べた。表9は速応度を表わすと言われている測定値を先の5つの表から抜き出してきて、2つの系でいずれが速いかを調べ、速い方に丸印をつけたものである。表の最上欄には、各測定値が大きい方が速いのか、小さい方が速いのかの別が記されており、最右列には検定の結果5%危険率で有意であるものには*印、有意ではないがかなり速さに差のあるものにはNS印、いずれが速いか全くわからぬものには「わからず」と書かれている。例えば、条件3で5%危険率で $Y_p(s) \cdot Y_c(s)$ の系の方が $Y_c(s)$ の系よりも速応度があるとの結論は、 $Y_c(s)$ で1つ丸印、 $Y_p(s) \cdot Y_c(s)$ で6つ丸印を得ており、これを図11の二項確率紙での誤答数 $n-k$ が1、正答数 k が6、即ち座標(1,6)と解釈する。2点比較法によれば、実測三角形は(n-k, k)だ

けではなく、(n-k+1, k)と(n-k, k+1)とをも頂点とするので、それ等の点(2, 6)と(1, 7)をも(1, 6)とともに図11に目盛り、三角形を描く。この三角形は片側5%按分線の上側に完全に出ているので、 $Y_p(s) \cdot Y_c(s)$ の系は $Y_c(s)$ の系よりも速いと言ってよいだろう。結局、条件1と4は $Y_c(s)$ の系の方が速く、条件3は $Y_p(s) \cdot Y_c(s)$ の方が速い傾向があると言えよう。一方、以上8つの速応度を表わすと言われている測定値を列毎に比べると大体において似た振舞をしているが、 φ_b のみは他と全く逆の振舞なので、今後検討が必要であろう。

次は、安定度を反映する測定値に関してだが、これについても速応度の場合と同様の考えに基づいて、2点比較法によって、各条件毎に $Y_c(s)$ の系と $Y_p(s) \cdot Y_c(s)$ の系のいずれに安定度があるかを調べた。表10は安定度を表わすと言われている測定値を先の4つの表から抜き出してきて、2つの系でいずれが安定かを調べ、安定している方に丸印をつけたものである。表の最上欄には、各測定値が大きい方が安定しているのか、小さい方が安定しているのかの別が記されており、最右列の*印、NS印については前述の通りだが、**印は1%危険率で安定度に違いがあることを示している。結局、条件1と4は $Y_c(s)$ の系の方が安定しており、条件2と3は $Y_p(s) \cdot Y_c(s)$

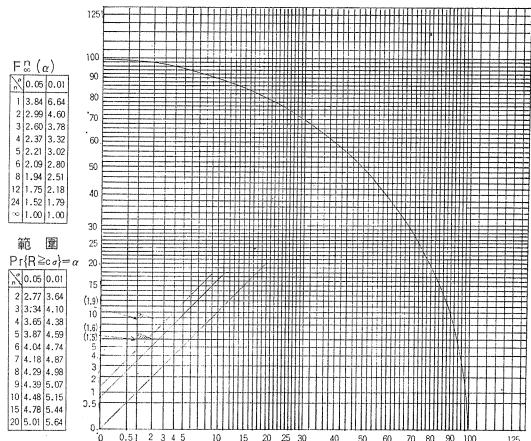


図12 2点cc較法 neirtest のための二項確率紙

の系の方が安定している傾向があると言えよう。

V. まとめ

以上で、表1の伝達関数をもとにした解説結果の記述を終り、実験全体に対して可能な解説を簡単に行ってみよう：

2次遅れ要素たる制御対象の減衰比 ζ を実験変数として、それを条件1では2、条件2では1、条件3では0.5、条件4では0.1、条件5では-0.1と変えていくと、条件5では制御が不可能なので全くデータが得られなかったが、他の条件ではいずれも人間が入ることによって全体としての系の偏差を少くすることが出来た。実験変数としての ζ を1未満で小さくしてゆくと、系は振動的になるが、 ζ を1以上で大きくしてゆくと振動が少くなっていることはないため^{*17}、条件1たる $\zeta=2$ の制御対象を人間に制御させると目的が $\zeta=1$ 未満ほどはっきりせぬためか、速応度においても安定度においても制御対象のみの場合よりは低い。つまり、この条件下では、充分安定してはいるが、安定度と速応度を犠牲にして精度を高めており、定速度偏差 ε_v に関してはこの条件と次の条件が最低である。 ζ が小さくなれば、条件2たる $\zeta=1$ の制御対象に対しては、人間が制御することによって先の条件同様に精度を最高に高め得るのみならず、安定度をも高め得ており、この安定度も条件間ではほぼ最高である。更に ζ が減って、条件3たる $\zeta=0.5$ の制御対象に対しては、人間が制御することによって、精度、速応度、安定度の総ての面で全体としての系の制御が改良される。ところが、条件4たる $\zeta=0.1$ の制御対象になると、人間は精度だけは何か高め得るもの、速応度は低下し、安定度に関しては低下するのみならず、遂にわずかではあるが不安定の徵候を示すようになる。このように、何とか不安定ながら制御を行っていたものが、 ζ が最も小さい条件5たる $\zeta=-0.1$ の制御対象に対しては、制御が全く不可能となってしまう。

以上の推論は総て、表1の伝達関数をもとにして行ったのであるが、それ等のうち人間の伝達関数は人間はPID要素とムダ時間要素の直列結合

型で表わせるとの仮定のもとに、シミュレーションという近似的な方法によって求めたものである。今後はインディシャル応答の平均曲線を求め、それから表6のV, n, N, Tr, Td, τ_e などの値を実測し、場合によっては過渡応答から周波数応答への数値変換を行い、ボード線図からその他の測定値や人間或は人間機械系の伝達関数を求め、前述のような検討を行うべきであろう。

VI. 参考文献

- 1) 伊沢計介・久村富持 (1963) 「自動制御計算演習」 オーム社
- 2) 伊沢計介 (1964) 「自動制御入門」 オーム社
- 3) 市川邦彦 (1962) 「自動制御の理論と演習」 産業図書株式会社
- 4) 加藤一郎 (1962) 「図解・自動制御の理論と実際」 電気書院
- 5) 遠山 啓・長妻克亘 (1964) 「市民の数学II 方程式と行列」 共立出版
- 6) 仁田工吉・沖津 泰 (1965) 「例解自動制御教程」 実業図書株式会社
- 7) 日科技連官能検査委員会編著 (1962) 「工業における官能検査ハンドブック」 日本科学技術連盟
- 8) 増山英太郎 (1963) 「トラッキング動作に於ける人間の伝達関数の測定の試み」 日本科学技術連盟、官能検査部会資料 S. T. Div. B-128.
- 9) Mc Ruer, D. T. and Krendel, E. S. (1959) : "The Human Operator as a Servo System Element." J. of Franklin Inst., June, 22-49.
- 10) Mc Ruer, D. T. and Graham, D. and Klendel, E. (1967) : "Manual Control of Single Loop Systems : Part II." J. of Franklin Inst., Feb., 145-168.

*1: 増山英太郎 (1963) 「トラッキング動作に於ける人間の伝達関数の測定の試み」、日本科学技術連盟官能検査部会資料 S. T. Div. B-128.

*2: ムダ時間 τ のみは、偏差と制御量の時間的ずれから求め、シミュレーション実験にはよらなかった。

*3: ε_p は階段波入力に対する定常状態に達した時の偏差であり、 ε_v はランプ入力に対する定常状態に達した時の偏差である。

*4: ニコルス線図においては、直角座標の縦・横軸が各々開ループのゲインと位相を表わし、図中に値が示されているのが閉ループのゲインと位相とである。つまり、直結フィードバックの系の開ループ周波数特性から閉ループ周波数特性を得るために用いられる。

*5: 5-3 で述べた勾配を表わすnとは違う。

*6: インディシャル応答の値が目標値たる階段波と5%以内の違いしかない範囲に入ること。

*7：特性方程式を調べるとどうして系の安定性がわかるかを開ループ伝達関数 $H(s)$ を持つ直結フィードバック unity feedback の系について、仁田工吉・沖津泰 (1965) に従って一般的に考えてみよう。ブロック図は、図1の通りである。

この閉ループの伝達関数は図から明らかな通り次の如くである：

$$\frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{H(S)}{1+H(S)} \quad \dots \dots \dots (16)$$

この右辺の分母をゼロと置いたものが特性方程式であるが、それが以下のように有理多項式の比によって表わせるものと仮定する：

$$1+H(S) = \frac{(S-Z_1)(S-Z_2)\cdots(S-Z_m)}{(S-P_1)(S-P_2)\cdots(S-P_n)} \quad \dots \dots \dots (17)$$

但し、 Z_1, Z_2, \dots, Z_m のことを特性方程式の根、または零点 zero とよび P_1, P_2, \dots, P_n のことを極 pole とよぶ。零点に重根がないとすると、(16)式は次式のように部分分数に分けることが出来る：

$$\frac{Y(S)}{X(S)} = \sum_{k=1}^m \frac{C_k}{S-Z_k} \quad \dots \dots \dots (18)$$

これを逆ラプラス変換すると時間領域における制御量が得られる：

$$L^{-1}[Y(S)] = y(t) = \sum_{k=1}^m C_k e^{Z_k t} \quad \dots \dots \dots (19)$$

ここで Z_1, Z_2, \dots, Z_m の何れか1つでも正であるとすると、制御量 $y(t)$ は時間 t の増大とともに大きくなり遂には無限大となってしまう。言い換えると特性方程式の根に1つでも正の実根があると不安定になるわけであり、逆に系が安定であることを言うためには、零点が負かゼロであることを言えばよいことになる。

*8：制御量は(19)式の如く、各成分応答の算術和として表わされるが、加藤によれば、この成分合成に当って一番強い影響を持っているのは虚軸に最も近い根からの成分である。虚軸に近い振動根（共役複根）を代表根 dominant root とよぶ。

*9：(26)式に(23)と(25)式を代入して ρ を ζ で表わすと

$$\rho = \zeta / \sqrt{2 - \zeta^2} \quad \dots \dots \dots (28)$$

という(7)式とやや違った式になり具合が良くなない。一方2次遅れ要素の制御対象 $Y_c(j\omega)$ のみを要素とする閉ループ特性 $G_1(s)$ は(20)式からも容易に導けるが：

$$G_1(s) = 1 / (S^2 + 2\zeta S + 2) \quad \dots \dots \dots (29)$$

である。加藤に従うと、 S の1次の係数を B 、定数項を C とすると減衰比は $B/2\sqrt{C}$ に等しく、これを(29)について計算すると $\zeta / \sqrt{2}$ になり、これを(7)式の ζ に代入すると(28)式に等しくなる。要するに、条件として用いた ζ は制御対象 $Y_c(s)$ の開ループ特性において見た場合には確かに減衰比を表わすが、閉ループ特性において見た場合には、その $1/\sqrt{2}$ 倍にしないと減衰比を表わさないということである。

*10：この方法を続けていくと必ずしも単調に余りが減少する例ばかりではないようなので、「余りが小

さくなった時に用いた1次式をゼロに置いて得られる S の値が……1つの根の近似値である。」とした方が近似度が良いように考えられるので、実際にはこちらの方法によって解析した。

*11：その方法を以下に述べる。問題は(31)式の根を求ることにあるのだが、先ずそれより $\frac{a_1}{3}$ だけ大きい根を持つ方程式を作る。そのため

$$S = y - \frac{a_1}{3} \quad \dots \dots \dots (33)$$

を(31)式に代入し、結果を y についての降べきとなるように整理する：

$$\begin{aligned} & \left(y - \frac{a_1}{3} \right)^3 + a_1 \left(y - \frac{a_1}{3} \right)^2 + a_2 \left(y - \frac{a_1}{3} \right) + a_3 \\ & = y^3 + \left(-\frac{a^2}{3} + a_2 \right) y + \left(\frac{2}{27} a_1^3 - \frac{a_1 a_2}{3} + a_3 \right) = 0 \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (34)$$

この式の y の係数を $3p$ 、定数項を q と書き換えた式を還元三次方程式と言う：

$$y^3 + 3py + q = 0 \quad \dots \dots \dots (35)$$

これを解くために $y = u + v$ $\dots \dots \dots (36)$

を(35)式に代入： $(u+v)^3 + 3p(u+v) + q$

$$= u^3 + v^3 + 3(uv+p)(u+v) + q = 0 \quad \dots \dots \dots (37)$$

要するに， $u^3 + v^3 = -q$ $\dots \dots \dots (38)$

$$uv = -p \quad \dots \dots \dots (39)$$

を満足するように決めれば、(36)式は(35)式を満足する。(39)式より $u^3 v^3 = -p^3$ $\dots \dots \dots (40)$

なので、 u^3 と v^3 はその積が $-p^3$ で和が $-q$ となる。従って、それ等は補助方程式と言われる次の t についての2次方程式の根である：

$$t^2 + qt - p^3 = 0 \quad \dots \dots \dots (41)$$

この二根は直ぐ求まるがそれ等を α, β とするとき、(35)式の三つの根は、 ω を1の3乗根（虚数）

とすると：

$$\begin{aligned} y_1 &= \sqrt[3]{\alpha} + \sqrt[3]{\beta}, \quad y_2 = \sqrt[3]{\alpha} \omega + \sqrt[3]{\beta} \omega^2, \\ y_3 &= \sqrt[3]{\alpha} \omega^2 + \sqrt[3]{\beta} \omega \end{aligned}$$

(33)式の関係があるので、結局(31)根の根は

$$S_1 = y_1 - \frac{a_1}{3}, \quad S_2 = y_2 - \frac{a_1}{3}, \quad S_3 = y_3 - \frac{a_1}{3}$$

の3ヶである。

*12：PID動作とPI動作の位相には殆んど誤差が含まれぬが、ゲインには漸近線を真の値と見做したことによる誤差が漸近線の交点部分にいくらか含まれている。

*13：0とか1とか言うのは、その閉ループの伝達関数に存在する種類の数のことである。例えば $k/(j\omega + A)$ は0、 $k/j\omega(j\omega + A)$ は1である。

*14：「傾向が見られる」と書く場合、%以上の場合であるということを意図した。

*15：閉ループ目盛で $(0^\circ, -30^\circ)$ 点のこと。

*16：日科技連官能検査委員会編著 (1962) 「工業における官能検査ハンドブック」日本科学技術連盟 201～203頁による。

*17: 2次遅れ要素のインディシャル応答 $f(t)$ が $\zeta < 1$ の時にのみ振動的であることを、加藤一郎 (1962) からの引用で示すと：

$$\zeta < 1 \quad f(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}) \quad \dots\dots(30)$$

$$\zeta = 1 \quad f(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t) \quad \dots\dots(31)$$

$$\zeta > 1 \quad f(t) = 1 - \frac{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t} + \frac{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t} \quad \dots\dots(32)$$

表2 $Y_c(j\omega) = 1/\{(j\omega)^2 + 4(j\omega) + 1\}$ の周波数特性

ω	-4ω $(1-\omega^2)$	$\angle Y_c(j\omega)$ $= \tan^{-1} \left(\frac{-4\omega}{1-\omega^2} \right)$	$ Y_c(j\omega) _{\text{db}}$
0.05	-0.2005	-11° 20'	-0.2 db
0.1	-0.4040	-22° 0'	-0.6 db
0.2	-0.8333	39° 48'	-1.9 db
0.5	-2.6667	-69° 27'	-6.6 db
1.0	-∞	-90° 0'	-12.04 db
2.0	2.6667	-110° 33'	-18.63 db
5.0	0.8333	-140° 12'	-29.89 db
10.0	0.4040	-158° 0'	-40.57 db

表3 二種類の開ループ・ポールド線図より求めた4つの定数値

	条件番号	$Y_c(j\omega)$ に設定した ζ の値	手順(5-1) よりの ω_c	手順(5-2) よりの φ_M	手順(5-3) よりの n	手順(5-4) の(5)式よりの ζ
$Y_c(j\omega)$	1	2	求まらず	求まらず	求まらず	求まらず
	2	1	〃	〃	〃	〃
	3	0.5	1.0	90	23.1	1.299
	4	0.1	1.4	16.3	70.0	0.07762
$Y_p(j\omega) \cdot Y_c(j\omega)$	1	2	0.23	76	29.9	0.8473
	2	1	0.28	100	22.0	1.515
	3	0.5	1.6	70	42.0	0.556
	4	0.1	1.8	1	57.7	0.005777

表4 $Y_p(jw)$, $Y_c(jw)$ のボード線図より読みとった位相利得の値

条件 角周波数(r/s)	1		2		3		4	
	phase (°)	gain (db)	phase (°)	gain (db)	phase (°)	gain (db)	phase (°)	gain (db)
(0.03)			-90	20.0				
0.05	-95	15.3	-89	15.6	-88	22.4	-81	22.8
(0.07)	-97	12.4						
0.1	-100	8.9	-87	9.6	-85	16.4	-71	16.6
(0.15)	-102	5.2						
0.2	-103	2.0	-83	3.0	-79	10.6	-57	10.8
0.3	-102	-3.6	-80	-0.8	-76	7.4	-46	7.8
0.5	-93	-6.5	-76	-2.0	-67	8.0	-37	9.4
(0.7)					-72	8.4	-37	12.4
1	-81	-12.0	-76	-6.0	-90	7.2	-105	20.8
(1.2)							-166	13.0
(1.3)					-102	3.6		
(1.6)					-110	0.1		
(1.9)								
2	-68	-18.7	-80	-13.9	-110	-4.0	-180	-2.6
3	-68	-23.6	-82	-16.4	-108	-11.0	-182	-10.8
5	-70	-37.4	-85	-20.4	-102	-17.0	-181	-20.8
10	-80	-42.6	-89	-26.4	-98	-23.2	-180	-32.8

表5 ニコルズ線図より求めた4つの定数の値

	条件番号	ω_b (r/s)	φ_b (r)	ニコルズ線図 よりの M_p	ω_{rp} (r/s)
$Y_c(s)$	1	求まらず	求まらず	求まらず	求まらず
	2	〃	〃	〃	〃
	3	1.3	-2.132	〃	〃
	4	2.8 :	-2.901	3.55 11db	2.0
$Y_p(s)$ $Y_c(s)$	1	0.27	-1.048	0.01db	0.07
	2	0.24	-0.6465	求まらず	求まらず
	3	1.9	-1.171	〃	〃
	4	2.7	-3.110	〃	〃

表6 計算によって求めた8つの定数の値

条件番号	計算による M_p	ρ	V	減衰比 n	N	T_r	T_d	τ_e
$Y_c(S)$	1	求まらず	求まらず	求まらず	求まらず	求まらず	求まらず	求まらず
	2	"	"	"	"	"	"	"
	3	"	"	"	"	"	2.417秒	1.640秒
	4	6.460	.007785	.787	.619	6.134	1.122秒	1.036秒
$Y_p(S) \cdot Y_c(S)$	1	1.111 0.9db	1.595	.0067	.000045	.2994	11.64秒	3.881秒
	2	求まらず	求まらず	求まらず	求まらず	求まらず	13.09秒	2.694秒
	3	1.082 0.7db	.6689	.122	.0149	.7139	1.653秒	.6163秒
	4	86.55 38.746db	.005777	.98	.96	82.64	1.1635秒	1.152秒

表7 制御対象 $Y_c(S)$ の特性方程式から代表根を求ることによって得た諸定数

条件番号	代 表 根	(23)式より σ_o	(25)式より ω_o	(26)式より ρ	(27)式より β	(30)式より ω_n	安定判別	(42)式より ζ
1	$(-2 \pm \sqrt{2})$	2	求まらず	求まらず	求まらず	1.41	安 定	求まらず
2	$-1 \pm j$	1	1	1	$45^\circ 0'$	"	"	.7071
3	$-0.5 \pm \sqrt{1.75} j$	0.5	1.32	.379	$20^\circ 45'$	"	"	.3543
4	$-0.1 \pm \sqrt{1.99} j$	0.1	1.41	.0709	$4^\circ 3'$	"	"	.0706

表8 人間機械系の特性方程式の代表根より求めた諸定数

条件番号	代 表 根	σ_o	ω_o	(26)式より ρ	(27)式より β	(42)式より ζ	(43)式より ω_n	安定 判別
1	$-0.2460 \pm 0.1284 j$	0.2460	0.1284	1.9155	$62^\circ 26'$	0.8865	0.2775	ハービッツ 法により 安定
2	$-1.1539 \pm 0.4742 j$	1.1539	0.4742	2.4334	$67^\circ 40'$	0.9250	1.247	"
3	$-0.7245 \pm 1.5491 j$	0.7245	1.5491	0.4677	$25^\circ 4'$	0.4237	1.710	"
4	$-0.004 \pm 1.806 j$	0.004	1.806	0.0022	$1^\circ 16'$	0.0221	0.181	不安定

表9 速応度を表わすと言われている8つの測定値

条件 表番号	違い	大ほど	大ほど	絶対値 大ほど	大ほど	小ほど	小ほど	大ほど	大ほど	有意水準
		ω_c	ω_b	φ_b	ω_r	T_{r_s}	T_d	σ_o	ω_n	
1	Y_c	3	5	5	5	6	6	7	7	
	$Y_p Y_c$	〃	〃	〃	〃	〃	〃	8	8	
2	Y_c							○	○	NS
	$Y_p Y_c$							○		わからず
3	Y_c			○						
	$Y_p Y_c$	○	○			○	○	○	○	*
4	Y_c		○			○	○	○	○	NS
	$Y_p Y_c$	○		○						

表10 安定度を表わすと言われている10の測定値

条件 表番号	安定	小ほど	大ほど	小ほど	大ほど	小ほど	小ほど	小ほど	大ほど	小ほど	大ほど	有意水準
		φ_M	ζ	M_p	ρ	V	減衰比 n	N	σ_o	ω_o	β	
1	Y_c	3	7	6	7	6	6	6	7	7	7	
	$Y_p Y_c$	〃	8	〃	8	〃	〃	〃	8	8	8	
2	Y_c								○			NS
	$Y_p Y_c$		○		○				○	○	○	*
3	Y_c								○			
	$Y_p Y_c$	○	○		○				○		○	NS
4	Y_c		○	○	○	○	○	○	○	○	○	**
	$Y_p Y_c$	○										