

音楽と言語の接点 プラクティスを中心に

加藤 雅子

1. 音楽と言語の接点¹⁾

Sergent, et al.は、「音楽は、ほかの表現形式と同様に、その産出のために独特の技法を必要とするが、ヒトの脳におけるこれらの機構や表象については、あまり良く理解されていないのが実情である」ことを指摘している。そこで、PETやfMRIによるブレイン・イメージングの手法を用い、彼らは10人のプロの音楽家を被験者として音楽実験を試みた。楽譜の初見時と、キーボード上で演奏したときの機能的・神経解剖学的実験を行った。その音楽活動は、言語活動の基盤となる皮質とは区別されるが、隣接した皮質の活動によるものであることが判明した。音楽と言語は、それぞれの表出形式において、かなりの相違があるものの、両者に共通なことは、表出面ではいずれも複雑な音の組み合わせによる連続的な運動活動であること、しかも、表出技術の獲得には生物学的・認知神経科学的発達の視点から臨界期があり、この時期を過ぎて獲得を試みることは、多大の努力がいり、それでも思うような成果を挙げ難いことを指摘している。したがって、この臨界期のメカニズムをより深く探求するためにも、言語と音楽の両者をその接点から見ていくことは必要であろう。

2. *Musical Practice* と脳の可塑性

ヒトのニューロン間の回路網(ネットワーク)結合に関するPantev, et al.の説明を参照しよう²⁾。
“For many years the prevailing opinion suggested that network connections between neurons are built primarily during cerebral maturation processes in childhood, with the exception of only those structures that were directly involved in memory. It was thought that this network patterns, almost like a connection diagram, would not change later. However, humans respond with considerable flexibility to new challenges throughout their entire life. Since the early 1980's, increasing experimental evidence demonstrated that the connectivity of the adult brain is in fact only partially determined by genetics and early development, and may be substantially modified through sensory experience, even during adulthood.” (301)

「長い間広く行き渡っていた意見とは、ニューロン間のネットワーク結合は、幼児期における

大脳の成長過程で主として形成されるということであった。記憶に直接関与していた構造だけは例外であったが このネットワーク・パターンは、結合図式とほぼ同様に、後に変化することはないだろうと考えられていた。しかしながら、人間は全生涯のあいだ中かなりの柔軟性をもって新しい挑戦に立ち向かう。1980年代初期から、実験上の証拠は増大しつつあり、次のようなことを示してきた。即ち、おとなの脳の神経結合は、実際、遺伝と初期の発達によって部分的にだけ決定付けられ、実質的には、知覚経験を通して、おとなになってからも変異・変更（修飾、変容）を受け続ける可能性を秘めている、ということだ³⁾

Pantev, *et al.*が強調していることは、ヒトの大脳の成長にとって、幼児期は極めて重要な時期であること、しかしながら、それが全てではないということ。つまり、楽器を演奏する場合にも、外国語を獲得（習得）する場合にも確かに臨界期は存在すると考えられる⁴⁾だが、おとなの脳にも集中的な訓練は可塑的变化（plastic changes）をもたらす。その意味では、我々の学習は生涯可能であると言える。だからと言って、楽器にも言語にも始めるのに適した時期というものはある。端的に述べると、（個人差があるのは言うまでもないが）このくらいの年齢を超えないうちに訓練（練習）を開始すれば、労力をあまり無駄遣いすることなく、ある一定の技能を獲得することができるという臨界期（Critical Period）或いは、感受性期（Sensitive Period）と呼ばれる時期がある。この意味で、脳の体性知覚皮質（somatosensory cortex）の組織化に影響をもたらす要因は、必ずしも練習量だけではなく、子どもの発達に根ざした練習開始の時期・年齢の問題も同時に考慮しなければならない。ここで、Pantev, *et al.*の論文に掲載の実験を紹介する。被験者として、9人の弦楽器を演奏する音楽家（内訳は、6人のヴァイオリニスト、2人のチェロ奏者、1人のギタリスト）と6人のコントロール被験者に、左手の指（D1親指）と（D5小指）を刺激した後に、MEGを使って決定された皮質源の力を音楽家とコントロールグループとで比較した。結果は、音楽家のほうがコントロール・グループより、測定した力は大きかった。さらに、音楽家集団のD5の刺激に対する皮質の反応は、早期に楽器を習い始めたグループのほうがそうでないグループより大きかった。さらに、ヴァイオリンやチェロを13歳以降に習い始めた音楽家では、13歳以前に習い始めた音楽家よりも、D5に対する皮質の表象は小さかったが、楽器を演奏しないコントロールグループより、ずっと大きかった。（Pantev, 305）

Pantev, *et al.*と同様に、J.P. Rauscheckerも、運動能力をより良く伸ばすためにも、また聴覚皮質の自己組織化に対する感受性期があることなどの理由から、楽器を幼年期の早い時期に習い始めることの理に適っていることを説明している。楽器演奏を習う場合と同様に第二言語を8歳以降に習い始める場合、マスターすることは可能ではあるが、但し、発音上のアクセント（訛り）が残りやすいことなどを指摘している。（335）⁵⁾ここで言及されている8歳という年齢に関連して、『脳を観る』第1章：言語発達と臨界期（3．言語獲得と年齢）を参照いただきたい。

3．楽器演奏をする脳⁶⁾

要旨：楽器を演奏することは、ヒトの脳の可塑的再編成を促進する、広範な手続き上の運動学習が必須である。このような可塑的变化は、すでに存在する神経結合の実態を速やかに明らかにし、また演奏の学習の蓄積による新しいネットワークの構築をも含む。生体脳の活動を可視化する

る現代のニューロイメージング技術によって、このようなヒトの脳の可塑的变化（柔軟性）が実証されている。見方を変えると、このような脳の可塑的变化が高度に卓越した演奏技術の習得に不可欠であるが、反面、運動統御機能障害をも発症させる危険性を孕んでいる。これは《筋の過度使用症候群⁷⁾や作業課題に固有の局所性筋緊張異常（ジストニア⁸⁾）の原因になりうる。これら脳の可塑的变化を実証付けるものとして、最近のニューロイメージング技術が大変活用されている。

つまり、我々が楽器を演奏するとき、楽器についての知識や如何に演奏されるかというメカニズムに関する知識以上のものが必須である。例えば、手の位置、指の動き、何秒間、どんな力の入れ方で、一連のキーを押すべきなのかということを理屈で仮に知っていたとしても、幼い頃からの弛まぬ練習を積み重ねていなければ、専門のピアニストにとって最も簡単な曲でさえ、素人にとっては、演奏することはむずかしいであろうことは予想がつく。

“The central nervous system has to acquire and implement a “translation mechanism” to convert knowledge into action. These translation capabilities constitute the skill that enables the pianist to act on memory systems, select the relevant facts, choose the proper response goals, activate the necessary sensorimotor structures, and execute the sonata successfully. We generally think of such a skill as being acquired with practice.” (Pascual-Leone 315)

上記引用文の要点を整理してみると、次の点に気づく。それは、神経系の発達における極めて重要な感覚系と運動系のみごとな調整という部面である。ピアノ演奏という高度に精緻な行為の基礎に入力系と出力系のループの形成があり、フィードバックと運動の是正によって、演奏技術が熟練するに従って、より精緻な無意識的・自動的なものとなっていく。「始めは、手足の動きは遅く、正確さとスピード（速さ）との葛藤で揺れ動く。成功するためには、視覚的、および聴覚的フィードバックが必要だ。終に、単一の動きのおのおのが洗練されたとき、異なる運動のすべてが正しい順序で適切なタイミングで繋がれたとき、理に適った連続（順序）における高い確率の安定性が達成され、すべての動きが一続きの流麗な動作の連続体となった」(Ibid., 316)のであり、この域に達した者（ここではピアニスト）だけが、演奏の機械的・技術的な細部から、自分の注意の焦点を演奏の情緒的内容に振り向けることが可能となる。Pascual-Leoneによると、このような高度な演奏の域に達した、即ち、高度な演奏技能の獲得を“declarative knowledge (facts)”[宣言的知識]から“procedural knowledge (actions, skills)”[手続き的知識]への変換と名付けている。(316)⁹⁾

4. Pascual-Leoneの実験 楽器を演奏したことがない、または、左右10本の指を使ってタイプを打ったことがない被験者

健常者の被験者がMIDI接続端子によってコンピューターに接続されたピアノの鍵盤で、片手5本の指の練習を行う訓練を受けた。被験者になれる条件として、いかなる楽器も演奏した（習った）ことが無いということ、左右全ての指を使ってタイプを打った経験が無いこと、或いは、精緻な手指の動きを要求される職業に就いた経験がないということが必須であった。その訓練では、ピアノのキー（鍵）を親指（C）、人差し指（D）、中指（E）、薬指（F）、小指（G）、薬指

(F), 中指 (E), 人差し指 (D), 親指 (C), 人差し指 (D) . . . の順番に次々に押すことを繰り返すしていくことが要求される。被験者は、この一続きの指の動きを滑らかに遂行することができるように練習することが要求される。指の動きの流れが休止することなく、どの音も抜かすことなく、一つのキーから次のキーへの間隔が一定で、おのおののキー押しの時間が同じに保てるように特に注意を払いながら、この一連の動作を行うことを訓練される。メトロノームが1分間に60拍のテンポを表示し、被験者はこのテンポを目標に、聴覚によるフィードバックを行いながら練習をした。被験者は5日間続けてテストされた。毎日2時間の練習の後にテストを受けた。

テストの内容は、5本指の一連の動きを20回繰り返させ、これをコンピューターによって解析した。キー押しの正確な連続、連続したキー間隔、おのおののキーの持続時間と速度など。各々のテスト後に、被験者は、テストでのパフォーマンスがフィードバックされ、改善への助言が与えられた。文末のAPPENDIXを参照していただきたい。連続した5日間の実験期間に、被験者の演奏技術は大いに改善したことが、この図から明らかになる。

つまり、キー押しの順序に関するエラー数、キー押しの持続時間や隣接のキー押し間隔のバラつきなどが有意に減少した。(Ibid., 317)

5. TMSによる被験者の運動皮質における出力変化と技術の習得

Pascual-Leoneの実験(セクション2)の目的は、技能の獲得と運動皮質領野での出力の変化の相関を観ることであった。実験の初日の最初の練習セッションの前に、focal transcranial magnetic stimulation (TMS)[焦点性超頭蓋磁気刺激法]を使って、脳の運動皮質領野のマッピングを行った。標的は、左右両側の長い指の屈筋と伸筋の運動変化であった。ベースラインとなるマップが5日の間撮られたマップと比較された。その結果、被験者の指の動きが改善されるに当たって、指の屈筋と伸筋に対するTMSの活動の閾値が規則的に減少した。この閾値における変化を考慮に入れたとしても、屈筋・伸筋の両筋群に対する皮質上の表象のサイズが増大した(FIG. 1を参照)。しかしながら、このような変化は、毎日の練習セッションの前にTMS画像が撮られたときには、観察されなかった。つまり、この増大現象は、皮質上のマッピングが、練習(とテスト)のセッション後、20分~30分間休息をとって行ったときだけ出現したと報告している(317)。

6. 1週間毎日、鍵盤上で指運動を練習した後、更に4週間練習を継続するグループと1週だけで練習をやめたグループとを比較

1週間毎日練習を行い、鍵盤上で指の動きがほぼ完璧なレベルにまで到達したとき、被験者は無作為に二つのグループに分けられた。

グループ1は、続く4週間も同じピアノでの指練習を毎日続けた。これに対して、グループ2は、練習を中止した。

4週間の追跡期間中、指の屈筋と伸筋に対する大脳皮質の出力マップがすべての被験者について撮られた。グループ1の被験者は、月曜日の最初の練習セッションの前と、金曜日の最後の

セッションの終わりに追跡実験が行われたが、金曜日のマップは最初の停滞期を示し、指運動の改善にも関わらず、遂に、マップサイズの減少をゆっくりと示した（FIG.2）。反対に、月曜日の練習前と週末の休息後に撮ったものとは、研究が進むにつれ、サイズが増大するという傾向のために、ベースラインから僅かな変更が示された。

グループ2は、1週間で練習を打ち切っており、追跡の第1週後にベースラインに戻り、以後変わらなかったという。

この実験の結果が示していることは、鍵盤上で5本の指を流麗に動かす運動を正確に遂行するために必要な運動技能の獲得とこの作業に関わる全ての筋に対する皮質の運動出力における再組織化（reorganization）の問題である。この問題を説明するには、二つの主要なメカニズムがあるという。下記の部分を参照していただきたい：

“This experiment reveals that acquisition of the necessary motor skills to perform a five-finger movement exercise correctly is associated with reorganization in the cortical motor outputs to the muscles involved in the task. There are two main mechanisms to explain this reorganization: establishment of new connections, or sprouting, and unmasking of previously existing connections. The rapid time course in the initial modulation of the motor outputs, by which a certain region of motor cortex can reversibly increase its influence on a motoneuron pool¹⁰, is most compatible with the unmasking of previously existing connections.”（317）

つまり、二つの主要なメカニズムとは、（1）新しい結合の確立、または新芽の形成・伸展と（2）以前からあるニューロン結合の露出（表出）である。練習による新しいニューロン結合や神経回路網の形成も、始めから堅固なものではありえず、一次運動野での初期段階での変化は、いつでも練習を止めれば、元の状態に戻ってしまうように不安定で微妙な状態である。したがって、Pascual-Leone の言葉を引用すると、

“We suggest that such flexible, short-term modulation represents a first and necessary step, leading to longer-term structural changes in the intracortical and subcortical networks as the skill becomes overlearned and automatic.”（320）

即ち、「柔軟で短期的な変化は初期の必須なステップであり、技能が過剰学習されたり自動化されるにしたがって、皮質内および皮質下のネットワークでのより長期的な（恒常的な）構造上の変化へと移行する」とある。楽器演奏の技術的基礎が自動化するほどまでに弛まぬ鍛錬を積み上げていくことは確かに望ましいが、他面過剰学習した場合には、弊害が現れることも過去の実症例から明らかである。しかも、Pascual-Leone の上述の実験が示しているように、ピアノ演奏で5本指のおのおのを出来るだけ等間隔で途切れることなく流れるように繰り返し行う運動は、1週間の訓練で「ほぼ完璧」なレベルにまで到達した被験者が、その段階で練習を打ち切った場合、指運動の技能は練習を止めた1週間には、ほぼ元の練習前の状態に戻ってしまった。つまり、技能（スキル）の獲得・定着には、或る一定期間、或る一定量の練習を繰り返し行うことが必須であるということ、その練習量に満たない場合には、長期的変化に至らずに、次第に練習

前の元の状態に戻ってしまう。即ち、一次運動皮質へ体性知覚入力による刺激が繰り返し与えられることにより、不安定な可塑的变化を運動ニューロンの長期的強化へと導くということが、実験によっても証明されている。¹¹⁾

7. メンタル プラクティス

ここで、Pascual-Leone は、Cajalの‘physical practice’と‘mental practice’の違いを引き合いに出し、実際に身体を動かすことによるフィジカルな訓練と同等に、精神面でのメンタルな訓練の重要性を説いている。運動選手のトレーニングにおいて、「ある運動行為を脳のなかで想像しながら、virtual simulationによって、内的・精神的に鍛錬する」練習法は、すでに広く受け入れられ活用されている。音楽の世界でも、巨匠Rubinsteinなどの名演奏家は、ピアノの前に座って練習する膨大な時間を少しでも減少させるために、メンタル リハーサルを考え出したと言われている。

表には見えない心的（内的）に、ある行為を想像力を駆使して疑似体験することにより鍛錬する、この手の訓練は、実際に身体を使つてのフィジカルな訓練と同様に、脳での可塑的变化が起こるのであろうか、と問いかけている。¹²⁾

身体を実際に動かす練習（physical practice）と身体は動かさず、学習とか技を磨く目的で、心的（内面的）に、ある運動行為を認知的に体現する練習法（mental practice）のどちらも必要である。しかし、ここで注意しなければならないことは、高度のメンタル トレーニングは、十分なフィジカル トレーニングを蓄積した後に、つまり、ほぼ自動回路が形成されるほどのレベルに到達したときに、真の効果を発揮することが可能になる。例えば、プロスポーツ選手にとっても実証されているように、メンタル トレーニングと身体を使つてのフィジカル トレーニングの組み合わせが、身体トレーニングだけの場合より、より大きな技の改善（向上）に繋がるということが実証されている。このことは、楽器演奏家が楽器の演奏技能を獲得する場合にも、子どもが第一言語（一般には母語）を獲得するときにも、第二・第三言語（外国語）を獲得する場合にも真であると思われる。

8. 感覚・運動系ミスマッチ [不適合] の危険性と作業により誘発される筋緊張異常¹³⁾

「どのような種類のものであれ、手足や身体の一部を使う運動と関係のあるスキルを獲得するとき、我々の脳内では可塑的变化が生じる。この可塑的再編成（再組織化）は、遠心性出力と求心性入力とに制御されている。（つまり、出力系は運動性、入力系は感覚性である。）このような柔軟な再組織化を許容するシステムは、同時に望まない変化をも起こす危険を孕んでいる。つまり、感覚系と運動系の統合がそのような危険を持ち出す。したがって、誤った訓練は、望まない皮質上の再編成を生じさせることになり、過剰使用症候群や、作業に固有の局所性筋緊張異常などのような、運動制御上の問題を提出することになる、とPascual-Leone は、警告している。¹⁴⁾ 後者の例として、手の筋緊張異常が音楽家、特に、楽器演奏家に起こった場合、職業上の生命さえ危ぶまれるほどの重大事になりかねない。しかも、その症状は演奏家が過剰練習し、熟練した、

或る特定のエクササイズを弾くときにだけ現れるという．突然，或る指が無意識に（不本意に）動いてしまう．随意的運動制御は失われ，筋は過度に緊張し痛みがひどくなっていく．そのうちに，演奏事体が障害される．長い間，この障害は精神科に属する種類のものと思われてきた．それは，不随意的筋収縮が，或る特定の楽器を演奏するときにだけ，しかも或る特定の楽句を弾くときだけに起こりうるが他の楽句では何ともないといったように，怪奇で予知できないといった理由による．だが，現在では，筋緊張異常（dystonia）は運動プログラムにおける障害に由来する神経の不随意的動きであることが判明した¹⁵⁾

9．ギタリストが筋緊張異常（ジストニア）症状を呈しているときの脳をfMRIで撮る

Pascual-Leone による実験

被験者:

ジストニアを起こしたことのあるギタリスト（5人）

（ジストニアを起こしたことの無い）同数のギタリストのコントロール・グループ

使用機器：

functional magnetic resonance imaging（fMRI）[機能的 [核] 磁気共鳴画像撮影法]

1.5-Tesla system equipped with echo-speed gradients and single-shot echoplanar imaging（EPI）software

方法：

5人のギタリストについて，fMRIを使用して，fMRI用に改造したギターを弾かせて，筋緊張異常の症状を誘発している間に撮影．参考として，同じ被験者について，手を使ったほかの動きをしている間に撮影した活性パターンを使用した．筋緊張異常（ジストニア）のないコントロール・グループのギタリスト（5人）については，同じギター演奏練習を実行している間に撮影された活性パターンを使用した．

データ獲得は，連続した8枚のスライスに包み込まれた皮質の運動領域を集中的に行った¹⁶⁾

結果：

筋緊張異常の音楽家は，対側の一次感覚運動皮質に有意に大きな活性化が見られた．このことは，両側の前運動野の顕著な活動低下と対照的であった¹⁷⁾

Pascual-Leone の結論：

筋緊張異常（ジストニア）の患者では，感覚皮質の同じ領域が一本以上の指に対する触覚刺激に反応するのかもしれないと，実験の結果は示唆している．「感覚表象の混乱が局所性筋緊張異常の病理生理学の一部であり，運動異常の原因となっているかもしれない．

Hence, emphasis needs to be placed in the sensory as well as on the motor aspects of skill acquisition and practice in musicians.¹⁸⁾

Pascual-Leone は，最終結論として，スキル学習 [skill learning] に対する神経生理学的の関連物を研究するための道具，つまり，ニューロイメージングを可能にした機械類を現在では利用できること．これによって，ヒトの脳の運動皮質が，運動性のスキル学習において重要な役割を果

たしているだけでなく、感覚皮質も同時に重要な役割を果たしていることが解ってきたこと。これらの脳の可塑性の問題は、機能、及び構造の部門をも含むであろうし、技能を要する課題の遂行に対して、被験者を極めて有利な立場におくこと。だが、それは同時に、運動制御障害の発症という危険までも宿しているということを指摘している。したがって、スキル学習の生理学だけでなく、熟練の演奏家における（手指などの）運動障害の生理学を理解する際にも役立つであろうと説いている。¹⁹⁾

加えて、下記の引用文は極めて示唆に富む。楽器演奏の技能を獲得する場合と同様に、言語（母語と外国語）獲得の場合にも、もっとも自然で本来的な言語表現は、自らの身体部分（肺・気道・口腔という生命維持器官）を発声器官として、発声・構音/発音という精緻で複雑な筋運動である。これらの筋運動は、0歳児のかなり早期から喃語期と呼ばれる6～7ヶ月ごろを中心に習得する。発声・発音（構音）やリズム、メロディー、イントネーションなどのプロソディカルな音声による表出である最も本来的な言語表出運動（出力系）は、さまざまな種類の音の連鎖を発し始めたばかりの喃語期前から1歳児前後を観察すればよく解る。²⁰⁾ 音声を発する行為そのものが、身体全体を使つての運動と同期しているのである。精度の高い運動技能の獲得は、楽器演奏の技能を獲得する場合と同様に、言語を習得する過程にある幼児や0歳児にとっても重要である。それだけでなく、あらゆる感覚系（聴覚、視覚、触覚、味覚、嗅覚）の入力からの刺激に対して、運動（出力系）反応を生み出すことは、幼児にとっては、すべての認知活動・学習の基礎であると思われる。故に、幼児期早期において精緻な運動技能の正しい学習や教育ということが必須であろう。

Further work along these lines may lead to helpful insight into the appropriate teaching/learning technique for fine motor skills.²¹⁾

0歳児から1歳児の音声（言語）獲得は、子どもの母語獲得の基礎になるだけでなく、さまざまな認知活動の基礎として極めて重要であると思われる。

この時期に、第一言語（日本語）の音韻構造の基礎となる母音の発音が明瞭となり、発声のエネルギーも格段と強くなり、また、音節構造の基礎である「子音+母音」（CV型）の確かな習得が認められる。このCVCV...型のリズムカルな反復や、ピッチの高い母音（ア）に上昇調の抑揚（イントネーション）をつけたり、最終的には、自在にメロディーをつけ、身体運動（手足や腰など）を伴う練習を同期させていた。プロソディーの獲得は言語によるコミュニケーションにおいて、感情表出のための重要な手段である。同時に、音楽の必要不可欠な部分である。リズム、テンポ、アクセント〔強弱アクセント、高低アクセント〕、抑揚〔イントネーション〕、メロディーなどが出揃うのが一般に喃語期に入る7ヶ月頃から1歳頃と言われているが、子どもの感情表現が格段に豊かになる。

10. ピアノを弾く脳を光トポグラフィーで観る

ピアノを3～5歳の間に習い始め、すでに14～15年間続けている被験者が半数以上であった。これらの被験者について、光トポグラフィーによる音楽関連課題時の脳活動の測定を行った。

被験者は芸大生10名（内訳は、院生2名と学部生8名 男子3名、女子7名で、全員音楽

学部)に所属)²²⁾

実験条件は、()演奏聴取、()読譜、()初見演奏、()自由演奏、()コントロ

被験者	S101	S102	S103	S104	S105	S106	S107	S108	S109	S110
年齢	20	20	22	25	26	19	30	24	29	30
性別	F	F	M	F	M	M	F	F	F	F
利き手	Right	Right	Left	Right	Right	Right	Right	Right	Right	Right
開始 年齢	ヴァイオリン 5ys.8m.	ピアノ 3ys.1m.	ピアノ 3ys	エレクトーン 4ys.11m	エレクトーン 6ys.1m	ピアノ 5ys.9m	声楽 23ys.	ピアノ 4ys.	ピアノ 5ys.	ピアノ 5ys.

(年齢幅：19から30，平均年齢：24.5歳)

ール実験(指運動)[初日のみ]．

材料は、BachのPartita から30パートを選定し、()聴取[Listening]、()読譜[Reading]、()初見演奏[Playing]の各条件で使用した．

装置は、日立メディコ社製・光トポグラフィーETG-100、2台；3X5のプローブ2枚(各22チャンネル、計44チャンネル)、ファイバー30本；Roland社製電子ピアノ；刺激提示用パソコンとモニター．

実験結果：

各被験者の個々の結果については、紙面の都合でここでは言及しないが、10人の結果を総合的に分析した結果、下記の特徴が観察された．

聴取 音楽聴取時に右聴覚野(聴覚連合野)が活動した；右ブローカ野の活動も観られるケースがあった．

読譜 右ブローカ相当野が活動するケースもあったが、聴覚野の顕著な活動は観られない．右半球優位性は目立たなくなる．

演奏 自由演奏時に比べて、初見演奏時の脳活動がより活発であった．右は前寄りの活動がより活発であった．左は全領域で賦活した．

11．おわりに

練習(practice)の効果について、Posner と Raichle²³⁾は、刺激として与えられた名詞から動詞を見つける作業に対する練習の効果を用いて、詳しく検討している．

被験者に名詞の復唱と動詞を見つける作業を、練習した場合と練習しない場合の両方の条件で試行した．名詞または動詞を口頭で言うのに必要な時間を分析すると、どちらの場合の所要時間もほぼ同じで、練習によって影響を受けていなかったという報告をしている．

「反応が開始されるまでの時間とある特定の動詞がそれぞれの名詞に対して選ばれる頻度であった．その結論は、被験者は練習を通して単語を言うこと自体を学んだわけではないということであった．そうではなく、ある特定の刺激に対して特定の単語を選択することを習得していた．」(練習の効果、177)

次に、彼らは新しい実験 口頭で答える型の反応には、経路が二つあるという仮説 をテス

トした。一つは、すでに学習された自動的経路、もう一つは未学習の新しい作業に対する経路である。しかも、ここで重要なことは、「練習によって脳では使われる領野が劇的に変わることを実証した。この結果は、動詞を見つける作業の実行には経路が二つ存在するという私たちの仮説と一致すると考えている。一つの経路には、帯状回前部、左前頭葉（ブローカ野を含む）、左側頭葉（ウェルニッケ野を含む）、右小脳が関係している。もう一つの経路には、両半球の島皮質が関係している。第二の経路に関して、左視覚野の正中付近の領野の反応が練習によって高められる。」(178)

練習の効果について、言語の場合と同様のことが、光トポグラフィーを使った「音楽関連課題時の脳活動」の実験でも観察された²⁴⁾特に、実験の二日目に行った自由演奏について、前日に被験者に「自由演奏のために、自分の好きな曲でよいから、弾きたい曲を予め考えておくように」と依頼しておいた。その結果、演奏会コンクールで聴衆を前に演奏したことのある何百回・何千回と弾き込んだ曲を選定してきた被験者が多く、同じ曲の異なる部分から10ピース、または、10ピースとも異なる曲から弾いた被験者と二通りあった。1ピースについては、15秒間演奏してもらった。

ここで、光トポグラフィーによる計測の結果のなかでも、ピアノの初見演奏時と自由課題曲の演奏時との脳活動の計測の比較は、特に興味深い。初見演奏時は、右半球は前頭寄りが活動し、後頭寄りには活動が目立たなかったが、左半球は、前頭、頭頂、上後頭のあたりが活動していた。これと自由演奏（free play）の場合の脳活動を比較してみると、自由演奏では、初見で弾いたときほど活動が顕著ではないが、活性化した部位に同様の傾向が観られた。

このことは、脳の活動の部位においては、自由演奏も初見演奏も同様の傾向・パターンが観察されるが、脳の使い方に関しては、省エネルギーでもっとも効率良く使っているのは熟練の技、即ち、永年の訓練の結果の賜物であろう。これに対して、初見で弾いているときは、永年の練習を積んだ自由演奏のときのように、メンタルな面でのしっかりした暗譜（音符による視覚刺激と、それが表す音との一体化、および、フィジカルな出力運動との指の流麗な動きによる反応のネットワークがうまく出来ていないとき、読譜したものを、即、演奏できないことになる。これが、おそらく、熟練度の違いである。未熟であればあるほど、脳にそれだけ多くの負担がかかる。

注：

- 1) Sergent, et al(1992) Distributed Neural Network Underlying Musical Sight-Reading and Keyboard Performance, *Science*, 257: 106-109
- 2) C. Pantev, A. Engellien, V. Candia, and T. Elbert(2001) *Representational Cortex in Musicians: Plastic Alterations in Response to Musical Practice*
- 3) 「 」内の日本語訳は筆者による。
- 4) 拙著『脳と言語の諸相』（青山社）2004年。
- 5) ここで言及されている8歳という年齢に関連して、『脳を観る』第1章：言語発達と臨界期（3．言語獲得と年齢）を参照いただきたい。
- 6) Alvaro Pascual-Leone(2001). The brain that plays music and is changed by it. *Annals of New York Academy of Sciences*, 930: 315-329.
- 7) 《筋の》過度使用症候群は、*overuse syndrome*のこと。

- 8) 筋緊張異常は *dystonia* , ここでは *focal, task-specific dystonia* となっているので, 「局所性で作業課題に固有の筋緊張異常」のことを言う .
- 9) 学習と記憶 (memory) についての Pascual-Leone の考えの概要を紹介する :
 「最近の Fuster の説に言及し, 学習と記憶はあらゆる神経回路のすべての働き (機能) の不可欠な部分であると考えられる . つまり, 知覚と行動は記憶の現象である . 逆に, 記憶は知覚と運動処理の不可欠な部分であること . 神経系はダイナミックで弁証法的機構であると観られるようになってきた . 知覚系, 運動系活動の必然的結果として, 新しい記憶や技術の獲得に関わる内在的特性 . それが神経可塑性 (neural plasticity) である . 例えば, 楽器を演奏するために, 神経系が練習の結果として, その能力に必然的变化を生じさせる . このような経験に依存する神経機構の変更・修正が ‘plasticity’ という特性に集約されている . この変化は, 感覚系, 運動系, 更に, それら異なる両系の接触面においても起こりえる . この考えの帰結として生じるものは, 被験者にとって必ずしも有難い恩恵ばかりではなく, 機能的に心身に害を及ぼす危険が起こる可能性もあると警告している」 (315-316) .
- 10) motoneuron pool とは, 「運動ニューロン集団」のこと .
- 11) “Our findings stress the role of the primary motor cortex (M1) in skill acquisition. It is not unreasonable to expect plastic changes in M1 during motor skill learning, because M1 is clearly involved in movement, and its cells have complex patterns of connectivity, including variable influences on multiple muscles within a body part.” (Pascual-Leone, 2001:320) .
- 12) Pascual-Leone (2001: 321) “Cajal talks about rapid and slower plastic changes in the brain in the context of practice. Our results confirm his intuitions. Furthermore, Cajal writes about physical and *mental* practice. Might the latter result in plastic brain changes similar to those by the former?.”
- 13) Pascual-Leone (2001: 323-326) を参照 .
- 14) As we have seen, skill acquisition requires plastic changes in the brain. This plastic reorganization is driven by efferent demand and afferent input. However, a system capable of such flexible reorganization harbors the risk of unwanted change. Increased demand of sensorimotor integration poses such a risk. We can postulate that faulty practice may result in unwanted cortical rearrangement and set the stage for motor control problems such as overuse syndrome and focal, task-specific dystonias (2001: 323) .
- 15) “We now know that dystonias are neurologic involuntary movements due to disturbances in motor programs.” (Pascual-Leone 2001: 323) 筋緊張異常 (dystonia) の神経生理学について Hallett, M. (1998), *The neurophysiology of dystonia*. Arch. Neurol. 55: 601-603 を参照 .
- 16) ここでの fMRI 実験は, 1.5-Tesla システム (with echo-speed gradients and single-shot echoplanar imaging (EPI) software) データ獲得は, 8 枚の隣接のスライスで包囲された皮質運動系を中心に行われた (Pascual-Leone, p.323 参照) .
- 17) Pascual-Leone の実験の結果は, ほかのタイプの筋緊張異常 (ジストニア) の研究結果と「随意的な運動の統御に関わる皮質領野の異常な強化を示した」点において一致していると述べている . しかしながら, 「特発性のジストニアの患者において, 一次感覚運動皮質は活動低下というより, 課題に誘発された運動障害が最大限に表出している間にテストされたとき, 活動過剰になりうる」と解説している .
- 18) Pascual-Leone (2001: 326) . ゆえに「すべての器楽奏者は, ブライユ点字法を学ぶべきである」と主張している . 「個々の指の機能的分離性を高め, ジストニアの危険性を最小限に食い止めるために」と結んでいる .
- 19) Pascual-Leone (2001: 326) ‘Conclusion’ を参照 : “The motor cortex plays an important role in motor skill learning, but so does the sensory cortex. The sensori-motor cortex changes as a consequence of

skill acquisition. These plastic changes, which probably include functional and structural components, place the subjects at great advantage for skillful task performance, but harbor the risk of the development of motor control disorders. The results of our studies may be useful in understanding not only the physiology of skill acquisitions, but also the pathophysiology of movement disorders in skilled performers.

20) 筆者は、生後まもなくから現在2歳2か月の女兒を2～3週に一度家庭訪問をし、行動観察記録をビデオカメラ（映像と音声）とDAT（音声のみ）に収録した。音声分析については、Multi-Speech 3700（Windows対応サウンドカード分析プログラム）[Kay Elemetrics Corp.（USA）]を使用。

21) *Ibid.* 言語の獲得、即ち、「0歳児から始まる子どもの言語学習（多くの場合は母語である第一言語の学習）に対する適切な環境作りや自発的学習を促すサポートとしての教育とは何か？」或いは、「子どもの認知の発達と言語発達をバランスよく伸ばしていくための教育とは何か？」という根本的な問題の基礎にあるのが、身体運動技能の開発と獲得である。言語の、特に表出系・出力系の能力は、身体運動技能の発達と密接な関係がある。特に、音声言語獲得と切っても切り離せないこと。子どもは言語音を認知し、自らも発音・発声することによって感情や意思の表出を行う。肺から気道へ押し出された呼吸を使って、気道、声帯、口腔の発声・発音器官の筋肉を用い、適切な言語音（または、音の連鎖）を表出できるようになるために、繰り返し繰り返し身体運動を伴う発声・発話の練習を積み重ねていく。この点に関して、『脳と言語の諸相』青山社（2004、1月発行）を参照いただきたい。

22) 被験者10名のうち、8名は幼年期早期（3～6歳；平均4.9歳）にピアノを、1名はヴァイオリンを習い始めた（1名の声楽専攻の学生は例外）。ここに紹介する実験は2003年9月18日～19日に東京大学大学院教育学部多賀研究室に於いて行った音楽関連課題時〔聴取（Hear）、読譜（Read）、初見演奏（Play）、自由演奏（Free play）、コントロール条件〕の光トポグラフィーによる脳測定を行った結果である。実験は企画段階から多賀徹太郎博士との共同で行ったが、光トポグラフィーによる解析は多賀研究室によるものである。

先例となった音楽演奏時の脳を計測した実験は、いずれもfMRIやPETなどによるもので、狭い閉塞された空間内で極めて不自然な姿勢で、現実の演奏時とはかなり異なる環境で、しかも特注で改造された楽器を用いての、片手を使って行われた実験が多く、実験本来の目的による脳の変化以外に、多くの心理的ストレスがかかったのではないかと推測される。その点で、非侵襲的な頭皮上から（直径1mmの）光ファイバを通して照射される近赤外光によって大脳表面の血液量の変化を計測する光トポグラフィーは、実際のピアノ演奏時と同じ自然な姿勢で狭い閉塞空間に入る必要もなく、実験を行うことができた。fMRIなどの場合の仰臥位と異なり、豎型電子ピアノ（Roland社製）を使用したため、普通にピアノを弾くときの姿勢で自然に演奏できたように観察された。実験後、被験者に確認のため感想を聞いてみたが、彼ら自身もそう述べていた。

また、被験者の選定に当たっては、実験前に筆者が個別にインタビューとクエスチョネアによる質問調査を行い選定した。被験者は、全員芸術大学音楽学部の学生〔学部生8名と院生2名；学科は、楽理科（6）、作曲科（1）、声楽科（1）；大学院 音楽教育（1）と作曲（1）〕で、1人を除いて、少なくとも14年間、多くて25年間ピアノ（ヴァイオリン）を続けている熟練した演奏の専門家であった。そのためか、モデル演奏を聴取しているだけのときでも、サイレントな状態で読譜していたときにも、右半球のプロローカ相当野が活発に活動しているケースが観察された。

23) M. I. Posner & M. E. Raichle: *Images of Mind*. 1994. Scientific American Library [日本語訳：『脳を観る』養老孟司、加藤雅子、笠井清登共訳、日経サイエンス社、1997、5章「ことばの解釈」参照]

24) 筆者が北里大学大学院医療系研究科に提出した博士論文〔2004年3月〕、論文タイトルは「言語と音楽の脳活動における比較考察 熟練と臨界期説」である。

参考文献

- Albert, M. and Obler, L.(1978) The Bilingual Brain: Neuropsychological and Neurolinguistic Aspects of Bilingualism. New York: Academic Press.
- Altenmuller, E. How Many Music Centers Are in the Brain?(2001) *Annals of New York Academy of Sciences*, 930, 273-280
- Bangert, M., Haeusler, and Altenmuller, E.(2001) On Practice: How the Brain Connects Piano Keys and Piano Sounds. *Annals of New York Academy of Sciences*. Besson, M., and Schon, Daniele. (2001) 930, 232-258.
- Behrens, S.J.(1985) The Perception of Stress and Lateralization of Prosody. *Brain and Language*, 36, 332-348.
- Benson, D.F., and Ardila, A.(1996) *Aphasia: A Clinical Perspective*. Oxford New York: Oxford University Press.
- Bhattacharya, J., Petsche, H.(2001) Universality in the Brain while Listening to Music. The Royal Society., 268, 2423-2433.
- Brown, S.(2001) Are Music and Language Homologues? *Annals of New York Academy of Sciences*. 930, 372-374
- Cohen, M., Pratter, A., Town, P., and Hynd, G.(1990) Neurodevelopmental Differences in Emotional Prosody in Normal Children and Children with Left and Right Temporal Lobe Epilepsy. *Brain and Language*, 38, 122-134.
- Cohen, M., Branch, W., and Hynd, G.(1994) Receptive Prosody in Children with Left or Right Hemisphere Evidence from Transcranial Magnetic Stimulation. *Brain and Language*, 47, 177-181.
- Coslett, H., Branch, W., and Monsul, N.(1994) Reading with the Right Hemisphere: Evidence from Transcranial Magnetic Stimulation. *Brain and Language*, 46, 198-211.
- Curtiss, S.(1977) *Genie: A Psychological Study of a Modern-day "wild child."* New York: Academic Press.
- Geschwind, N., and Galaburda, A.(1987) *Cerebral Lateralization: Biological Mechanisms, Associations, and Pathology*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Gitterman, M.R.(1999) The Critical Period : Some Thoughts on Grimshaw, et al.(1998) *Brain and Language*. 66, 377-381.
- Grimshaw, G.M., Adelstein, A., Bryden, M.P., and MacKinnon, G.E.(1998) First Language Acquisition in Adolescence; Evidence for a Critical Period for Verbal Language Development. *Brain and Language*. 63, 237-255. New York: Academic Press.
- Grossbach, M., Kuck, H., Bangert, M., and Altenmuller, B.(2001) Cortical Representations of Temporal Structures in Music. *Annals of New York Academy of Sciences*, 930, 418-419.
- Hebert, S., Racette, A., Gag, L., and Peretz, I.(2003) Revisiting the Dissociation between Singing and Speaking in Expressive Aphasia. *Brain*, 126, 1838-1850.
- Iwata, M.(岩田誠)(2001) . 『脳と音楽』[Brain & Music] メディカルレビュー社 .
- Johnson, J.S., and Newport, E.L.(1989) Critical Period Effects in Second Language Learning: the Influences of Maturational State on the Acquisition of English as a Second Language. *Cognitive Psychology*, 21, 60-99.
- Johnstrude, I., Penhune, V.B., and Zatorre, R.J.(2000) Functional Specificity in the Right Human Auditory Cortex for Perceiving Pitch Direction. *Brain*, 123, 155-163.
- Katoh, M.(1995) Recent Research on the Functions of the Right Hemisphere in Language Use. *Studies of English and American Literature*., 30. Tokyo: Japan Women's University.

- Katoh, M.(加藤雅子)(2004年1月)『脳と言語の諸相』[Aspects of the Theory of the Brain and Language]. 青山社 (*Seizannsha*).
- Katoh, M. (加藤雅子)(2004年3月)北里大学博士論文《言語と音楽の脳活動における比較考察 熟練と臨界期説》[A doctoral dissertation submitted to the Graduate School of Medicine, Kitasato University].
- Kim, K.H., Relkin, S., Norman, R., Kyoung-Min, L., Hirsch, J.(1997) Distinct Cortical Areas Associated with Native and Second Languages, *Nature*, 388, 171-174.
- Langheim, F. J. P., Callicott, J. H., Mattay, V. S., Duyn, J. H., and Weinberger, R. Cortical Systems Associated with Covert Musical Rehearsal(2002) *Neuroimage*, 16, 901-908.
- Lassonde, M., Bryden, M.P., and Meners, P.(1990) The Corpus Callosum and Cerebral Speech Lateralization. *Brain and Language*, 38, 195-206.
- Lenneberg, E.H.(1967) *Biological Foundations of Language*. John Wiley & Sons, Inc.
- Masataka, N.(正高信男).(2001)『子どもはことばをからだで覚える メロディーから意味の世界へ』 [Children learn language through bodily actions] 中央公論新社.
- Maess, B., Koelsch, S., Gunter, T.C., and Friederici, A.(2001) Musical Syntax is Processed in Broca's Area: an MEG study. *Nature neuroscience*, 4, no. 5, 540-545.
- Munte, F.C., Altenmuller, E., and Jancke, L.(2002) The Musician's Brain as a Model of Neuroplasticity. *Nature Reviews*, 3, 473-474.
- Nakada, T.(中田力).(2002).『脳の方程式』[The Brain formula+] 紀伊国屋書店.
- Nakada, T., Fujii, Y., Suzuki, k., and Kwee I. L.(1998) 'Musical Brain' revealed by High-field (3 Tesla) Functional MRI. *Neuroreport*, 9, 3853-3856.
- Newport, E.L.(1990) Maturational Constraints on Language Learning. *Cognitive Science*, 14, 11-28.
- Oascul-Leone.(2001) A. The Brain That Plays Music and Is Changed by It. *Annals of New York Academy of Sciences*, 930, 315-329.
- Olson, L.L.and Samuels, S.J.(1973) The Relationship between Age and Accuracy of Foreign Language Pronunciation. *The Journal of Educational Research*, 66, 263-268.
- Oyama, S.(1976) A Sensitive Period for the Acquisition of a Nonnative Phonological System. *Journal of Psychological Research*, 5, 261-283.
- Penfield, W., and Roberts, L.(1959) *Speech and Brain Mechanisms*. Princeton: MA, Princeton Univ. Press.
- Peretz, I. Brain Specialization for Music: New Evidence from Congenital Amusia. *Annals of New York Academy of Sciences*, 930, 153-165.
- Posner, M., and Raichle, M.(1994) *Images of Mind*. New York: Scientific American Library. [『脳を観る』 養老孟司・加藤雅子・笠井清登訳; 日経サイエンス社, 1997年]
- Rauschecker, J. P.(2001) Cortical Plasticity and Music. *Annals of New York Academy of Sciences*, (2001) 930, 330-336.
- Riecker, A., Ackermann, H., Wildgruber, D., Dogil, G., and Grodd, W.(2000) Opposite Hemispheric Lateralization Effects during Speaking and Singing at Motor Cortex, Insula and Cerebellum *NeuroReport* 11, No. 9, 1997
- Saffran, J., Loman, M., and Robertson, R.(2001) Infant Long-Term Memory for Music. *Annals of New York Academy of Sciences*, 930, 397-400.
- Sandberg, E.H.(1999) Cognitive Constraints on the Development of Hierarchical Spatial Organization Skills. *Cognitive Development*, 14, 597-619.
- Schlaug, G.(2001) The Brain of Musicians: A Model for Functional and Structural Adaptation. *Annals of New York Academy of Sciences*. 930, 281-299.

- Schneider, P., Scherg, M., Dosch, G., Spencht, H. J., Gutschalk, A(2002) Morphology of Hesch's Gyrus Reflects Enhanced Activation in the Auditory Cortex of Musicians. *Nature neuroscience*, 5, no. 7, 688-694.
- Sergent, J., Zuck, E., Terriah, S., MacDonald, B(1992) Distributed Neural Network Underlying Musical Sight-Reading and Keyboard Performance. *Science*, 257, 106-109.
- Snow, C.E., Hoefnagel-Hohle, M(1977) Age Differences in the Pronunciation of Foreign Sounds. *Language and Speech*, 20, Part 4, 357-365.
- Snow, C.E., Hoefnagel-Hohle, M(1978) The Critical Period for Language Acquisition: Evidence from Second Language Learning. *Child Development*. 49, 1114-1128.
- Spitzer, M(1996) Geist im Netz. Heidelberg/ Berlin/Oxford: Spektrum Akademischer Verlag [M. シュピッツァー著：脳 回路網のなかの精神 (2001) 村井・山岸訳，新曜社]
- Taga, G., Konishi, Y., Maki, A., Tachibana, T., Fujisawa, M., Koizumi, H(2000) Spontaneous Oscillation of Oxy- and Deoxy- Hemoglobin Changes with a Phase Difference throughout the Occipital Cortex of Newborn Infants Observed Using Non-invasive Optical Topography. *Neuroscience Letters*, 282, 101-104.
- Tervaniemi, M., Medvedev, S.V., Alho, K., Pakhomov, S.V., Roudas, M.S., Zuijen, T.L., and Naatanen, R. (2000) Lateralized Automatic Auditory Processing of Phonetic Versus Musical Information: A PET Study. *Human Brain Mapping*, 10, 74-79.
- Tervaniemi, M., Kujala, A., Alho, K., Virtanen, J., Ilmoniemi, R.J., and Naatanen, R(1999) Functional Specialization of the Human Auditory Cortex in Processing Phonetic and Musical Sounds; A Magnetoencephalographic (MEG) Study. *NeuroImage*, 9, 330-336.
- Tervaniemi, M(2001) Musical Sound Processing in the Human Brain. *Annals of New York Academy of Sciences*, 930, 259-272.
- Trehub, S(2001) Musical Predispositions in Infancy. *Annals of New York Academy of Sciences*, 930, 1-16.
- Vargha-Khadem, F., O'Gorman, A.M., and Watters, G.V(1985) Aphasia and Handedness in relation to Hemispheric Side, Age at Injury and Severity of Cerebral Lesion during Childhood. *Brain*, 108, 677-696.
- Yoro, T. (養老孟司). (1989). *Yuinohron* [唯脳論：Theory of Monism on the Human Brain] 青土社 .

APPENDIX : Pascual-Leoneの実験

図 1 (A) 5本指による1週間のピアノ練習の結果。(B) 訓練を受けた手と受けない手指の屈筋に対する皮質出力マップ。(C) 全被験者の皮質出力の平均値のグラフによる表示。

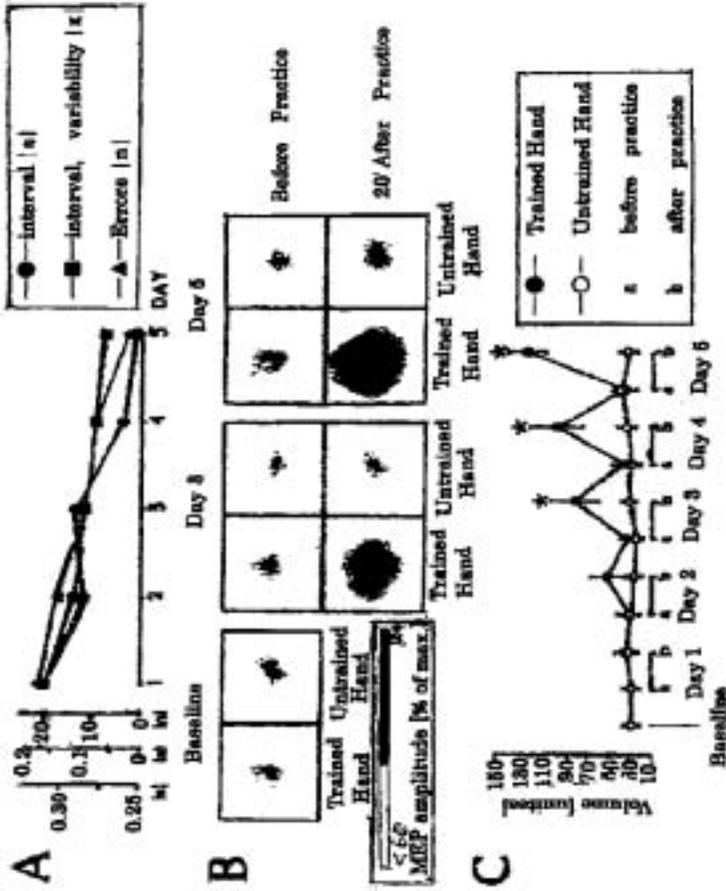


FIGURE 1. (A) Behavioral results of the week-long practice of the five-finger exercise on the piano. Interval between key presses, variability of these intervals, and number of errors in 20 repetitions of the exercise all show a highly significant decrease. This documents learning for all subjects studied. (B) Cortical output maps for the finger flexors of the trained and untrained hands of a representative subject. (See text arkl Pascual-Leone et al.5 for details on mapping unethod.) Note the marked changes of the output maps for the trained hand the lack of changes for the untrained hand and the maps obtained for either hand before the daily practice sessions. (C) Graphic display of mean (\pm SD) volumes of the cortical output maps for all subjects studied, Note the significant (star) changes in cortical output maps for the trained hands after practice sessions on days 3 to 5.

図2 (A) ピアノでの5本指練習を1週間行った後に継続して行った場合と1週間で練習を打ち切った場合。(B) 訓練を受けた被験者の手指の屈筋に対する皮質出力マップ。

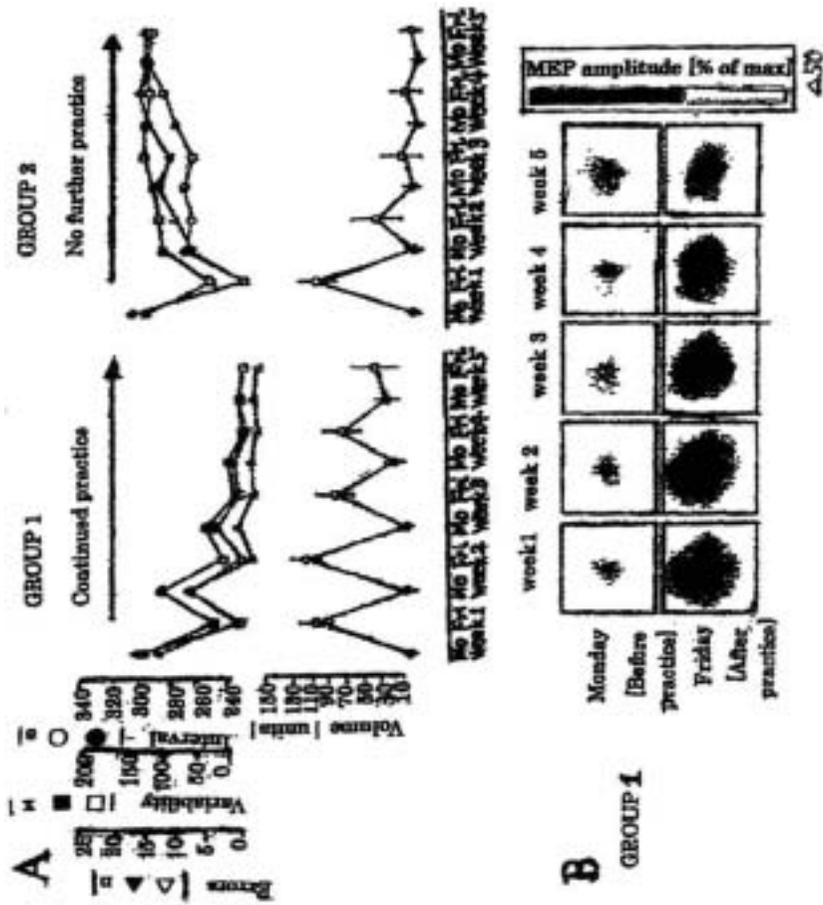


FIGURE 2. (A) Behavioral results for subjects in groups. 1 (continued practice after 1 week) and 2 (practice limited to 1 week) learning the five-finger exercise on the piano. Inter-lingual intervals, and number of errors in 20 repetitions of the exercise are shown. Date from Monday and Friday of each week are shown. (B) Cortical output maps for the finger flexors of the trained hand of a representative subject. (See text and Pascual-Leone et al.5 for details on mapping method.) Note the marked changes in the output maps. There appear to be two parallel presses in action, one accounting for the rapid modulation of the maps from Monday to Friday and the other responsible for the slow and more discrete changes in Monday maps over time.

図3 (上) 訓練を受けた手指の屈筋に対する皮質出力マップ；実際の指運動を伴う練習の場合と指運動を伴わないメンタルな練習の場合。(下) コントロール・グループ(練習なし)のデータとメンタル・ブラクテイスを行った被験者() と実際の指運動を行った被験者()。

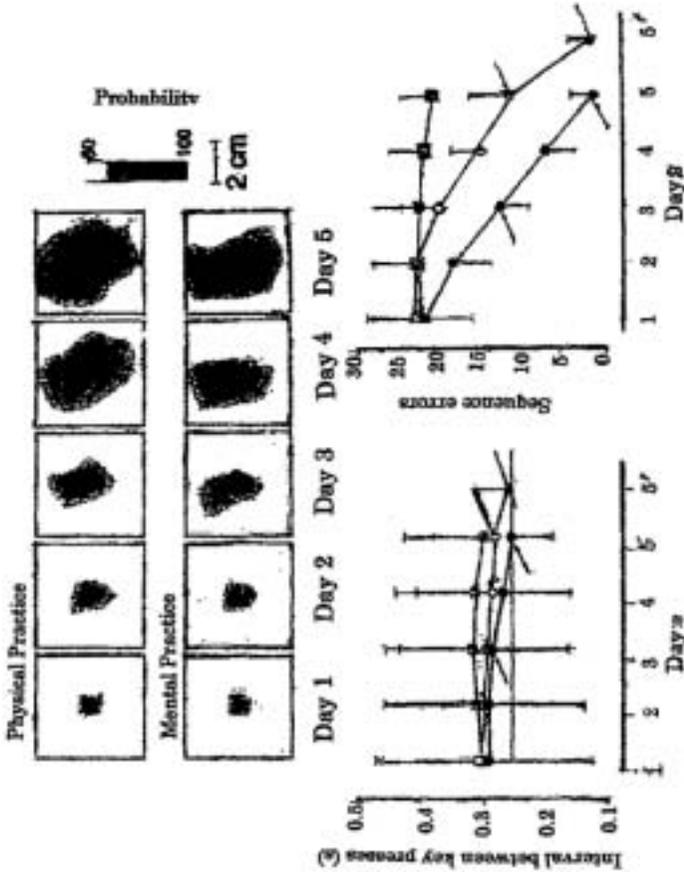


FIGURE 3. (Top) Cortical output maps for the finger flexors of the trained hand in a representative subject with physical versus mental practice alone. Modified from Pascual-Leone et al., see also text for details. Note the parity of changes with either form of practice. (Bottom) Graphical representation of behavioral data in a group of control subjects (no practice, squares) and a group of test subjects performing mental practice (open circles) versus physical practice (filled circles). Note the behavioral advantage of the physical practice group, but the significant improvement of the mental practice group as compared with controls. The last data point (5) represents the performance achieved by the mental practice group after 5 minutes of physical practice at the end of day 5. Note the apparent advantage of mental practice, because subjects go from a performance equivalent to day 3 of the physical practice group to matching their day 5 performance with only 5 minutes of practice. Modified from Pascual-Leone et al.