

教育分野におけるニューロフィードバックの可能性

大村 一史

地域教育文化学部 地域教育学科

(平成21年10月1日受理)

要 旨

従来から認知神経科学研究における様々な疑問に答えるために使用されてきた脳波(electroencephalogram : EEG)を利用した研究が見直され始めている。そのような流れの中で、注意欠陥・多動性障害(attention-deficit/hyper activity disorder : ADHD)を主とした発達障害児のセルフコントロールトレーニングとして、ニューロフィードバック(neurofeedback)または脳波フィードバック(EEG feedback)という手法が注目されている。この技法においては、自身が脳波をモニタリングしながら、脳活動をコントロールすることによって、知的機能や注意行動を改善させることを目的としている。この10年ほどで、批判はあるものの、ニューロフィードバックの利用が劇的に増加してきた。ニューロフィードバックの効果を慎重に検討した研究報告では、ADHDの新しい代替療法としての可能性が支持されている。本論文では、主にADHDを対象としたニューロフィードバックを概観し、教育分野における将来の可能性を展望する。

1 はじめに

機能的磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging : fMRI)に代表されるニューロイメージングを用いた認知神経科学研究が隆盛を極める中、従来脳研究に使用されてきた脳波(electroencephalogram : EEG)を利用した応用研究が見直され始めている。特に、医工学領域を中心として、非侵襲式のBMI(brain-machine interface)またはBCI(brain-computer interface)と呼ばれるヒトと機械をつなぐ新技術が注目を集めている^{1,2)}。脳波は、fMRI、ポジトロン断層撮影法(positron emission tomography : PET)や脳磁図(magnetoencephalography : MEG)に比べ、大がかりな装置を必要とせず、安価で手軽に利用しやすいメリットがある。さらにその応用拡大の背景には、計測技術の進歩に伴い、非常にコンパクトな脳波計が登場し、モバイル計測にも十分耐えうる仕様になってきたことであろう。そのような流れの中で、脳波を用いてセルフコントロールを目指すニューロフィードバック(neurofeedback)または脳波フィードバック(EEG feedback)という手法^{1,3,4,5,6,7)}にも改めて陽の光が当たるようになってきた。

ニューロフィードバックとは、自身の脳活動をリアルタイムでモニタリングしながら、脳活動のセルフコントロールを促進させる行動トレーニングの一形態である⁸⁾。このようなセルフコントロールの考え方は従前より存在し、例えば、自律神経系の活動をコントロールするトレーニング技法はバイオフィードバックと呼ばれ、ストレスによる高血圧等の治

療に利用されてきた経緯がある⁸⁾。生体信号のモニタリングの対象が自律神経活動から中枢神経活動になった、いわば高次機能版がニューロフィードバックとも言えるだろう。ニューロフィードバック自体の概念も1960年代から1970年代頃にかけて提唱されていた^{5, 9)}。近年の装置の小型化といったハードウェアの進歩と視覚や聴覚に働きかけるマルチメディア技術を利用したフィードバック制御が可能なソフトウェアの進歩との相乗効果により、その応用範囲が拡大してきている。

ヒトの精神状態は、頭皮上においた電極から得られる電気信号を記録する脳波によって反映させることができる。脳波にはその周波数により種々の波形が観察されるが、周波数が異なっても基本的には共通の発生機序が働いている。脳波の発生源は、大脳皮質にあり、主として大錐体細胞の後シナプス電位 (postsynaptic potential : PSP) が作るニューロン周辺の電場が同期的に加算されたものである¹⁰⁾。ただし、電位は頭蓋骨を通るため、信号が減衰されて記録されることになる。脳波は、fMRIのように空間的分解能が高くなく、脳のどの部位が活動しているかを抽出することは得意ではない。しかしながら、その時間的分解能の高さから、脳活動のフィードバックをリアルタイムに行えるというメリットがある。閉眼でリラックスした状態では、 α 帯域の周波数 (8-13Hz) パターンが特徴的なものに対して、開眼の活動状態では、 β 帯域の周波数 (13-30Hz) パターンが確認される。このような脳波の周波数成分により精神活動の状態をうかがい知ることが可能となるのである。先行研究を参考にして^{5, 6)}、表1に脳波の代表的な周波数帯域をまとめておく。

現在、ニューロフィードバックの利用は、教育、医学、スポーツや芸術など多岐の領域にわたるが^{11, 12)}、本論文では、発達障害児への適用を中心に、教育分野でのニューロフィードバックに焦点を当てることとする。またトレーニング効果の有効性を巡っても賛否両論が存在し、その利用には慎重を期す必要があることから、ニューロフィードバックを利用したセルフコントロールによる行動変容アプローチが、注意欠陥・多動性障害 (attention-deficit/hyper activity disorder : ADHD) をはじめとする発達障害の生物学的神経基盤にどのように作用することができるのかという将来的展望を含めて、先行研究を包括的に検討する。

表1. 脳波の代表的な周波数帯域と精神状態

脳波	周波数帯域(Hz)	関連する精神状態	ニューロフィードバックでの利用
δ (デルタ)	1-4	睡眠	-
θ (シータ)	3-7	眠気	◎
α (アルファ)	8-12	リラックス	○
SMR(感覚運動リズム)	12-15	精神的警戒&肉体的リラックス	◎
$\beta 1$ (ベータ1)	13-21	活動:集中	◎
$\beta 2$ (ベータ2)	20-32	活動:強度の集中	○
γ (ガンマ)	38-42	学習に重要	-
SCP (slow cortical potential)	-	注意や準備	◎

Friel (2007)⁸⁾およびHeinrich et al. (2007)⁹⁾を参考に作成

2 ニューロフィードバックの実際

本論文ではADHDを中心に、教育分野での利用を見据えたニューロフィードバック研究を取り上げる。まずこれまでニューロフィードバックがADHDに対してどのように利用さ

れてきたのかを概観し、実際のトレーニングパラダイムやその効果の評価方法を明確にする。さらにどのようなシステムが利用されているのかといった実際の運用におけるヒントを抽出し、まとめ上げることを試みる。

(1) ADHDとニューロフィードバック

「年齢に対して著しく不相应な注意散漫、多動、衝動性が見られる場合、注意欠陥・多動性障害 (ADHD) と診断される¹³⁾。ADHDは、脳機能の異常に起因する、不注意、多動性、衝動性という3つの行動を特徴とする障害であり、その行動特徴の程度から、不注意優勢型、多動性-衝動性優勢型およびその両者を併せ持つ混合型の3種類のサブタイプに分類される。これまでの先行研究から、ADHDの生物学的な神経基盤として、前頭葉-線条体 (fronto-striatal) のシステム不全といった脳機能・脳形態の異常や、ドーパミン等の神経伝達物質の異常が指摘されてきた。近年では実行機能という観点から、ADHDの本質的な障害が衝動性 (行動制御の弱さ) にあり、注意散漫や多動は二次的に現れたものとする考え方が提唱されている。ADHD児では、将来の目標遂行のために目の反応を抑制できないセルフコントロールの障害として観察されることが多い。

これまでADHDに対する投薬治療法として、ドーパミントランスポータに作用する「メチルフェニデート (リタリン)」が処方される事が多かった。リタリンは約70%のADHD児に対して有効であるとする報告もあるが¹⁴⁾、リタリンの効果が低い児童や、副作用の影響も少なからず存在する¹⁵⁾。また日本では、健常者におけるリタリンの覚せい作用と依存性が指摘され、過剰処方による乱用が社会問題ともなった背景があり、ごく最近ではリタリンに代わる新しい治療薬として「コンサータ」が利用されるようになった。しかしながら、これもリタリンと同様の成分が含まれている。

ADHDに対する薬物療法の限界が指摘される中、近年ニューロフィードバックが注目を集めるようになってきた。この技法は、ADHDの治療として、薬物に頼るのではなく、自分の脳波活動をモニタリングしながら、脳波をコントロールすることを目指している。ADHD児は、健常児に比べて、周波数の高い β 波が少なく、周波数の低い θ 波が多いという報告や頭皮上緩電位 (slow cortical potentials: SCPs) の異常性が認められるとする報告がある¹⁶⁾。 θ 波を減らし、 β 波を増やす、またはSCPsを正や負の方向へ電位をシフトさせるといった脳波のトレーニングを行うことによって、ADHDのセルフコントロール能力を高めようという試みが行われている¹⁷⁾。他の治療法の効果が長期間持続しないことなどを考慮すると、ニューロフィードバックはADHDの治療法として有望であるように思われるが、対照実験の不足、適切な長期フォローアップの欠如、少ないサンプル数などの科学的根拠の乏しさの問題から、ニューロフィードバックの効果を疑問視する声も多い^{3, 4, 9, 18, 19)}。

しかし、科学的根拠を実装したプログラムが開発され、その利用価値が認められれば、ADHD児を持つ保護者や現場で対応に迫られる教師にとっては朗報となる。ADHDに対するニューロフィードバックの効果を科学的に検証し、かつ有効に活用していくためには、何よりもまず信頼のおけるニューロフィードバックシステムの構築と実証に基づくトレーニングプログラムの開発が必要であり、実施するセラピストには十分な知識と経験が要求される。

(2) ニューロフィードバックのトレーニングパラダイム

ニューロフィードバックは対象とする障害や疾患などによって、いくつかのトレーニングパラダイムに細分化される。ある電極部位から記録される一つまたは複数の周波数帯域の脳波をターゲットにして、その脳波の振幅を増大または減少させることで、セルフコントロールのトレーニングを進めていくことになる。ADHDにおいては、Cz部位から記録される脳波を利用し、 θ 帯域の活動を減少させるとともに、 β 帯域の活動を増大させるパラダイム（または、 θ/β 比を減少させると言い換える事もできる）が最もよく利用される⁵⁾。これにより、注意を保持しながらもリラックスした状態を作り出せる⁵⁾。いずれのパラダイムにおいても共通することは、ニューロフィードバックの学習者がすぐにこのような状態を作り出せるわけではなく、トレーニングには数週間から数ヶ月単位の時間を要することである。一般的には、10分程度のトライアルが2分の休みを挟んで複数回繰り返される45～60分の1セッションが25～60回かけて行われる^{3, 4, 5, 6, 7)}。こうして、フィードバックの学習者はオペラント条件付けのように、セルフコントロールのスキルを習得していくことになる。ここではいくつかの典型的なパラダイムを紹介する（表2）。

周波数トレーニング

周波数トレーニングとは、一つあるいはそれ以上のある特定の周波数をターゲットとして、それらの活動を増大させたり、減少させたりするトレーニング法である⁵⁾。ADHDに対しては、国際式10-20法^{20, 21)}におけるCzから測定された脳波を用いて、 θ 波の活動を減少させ、 β 波の活動を増大させるトレーニング（ θ/β トレーニング）をおこなう⁵⁾。トレーニング効果の背景には、覚醒状態を高めることが仮定されている。学習者へのフィードバックは、コンピュータ画面上のグラフの変化やテレビゲームのキャラクターの動きなどと脳活動をリンクさせて行う方式が一般的となっている。個人ごとに安静時の脳波状態が異なるため、安静状態の脳波をベースラインとして測定した後にトレーニングに入っていくことになる。

SMRトレーニング

感覚運動リズム (sensory motor rhythm : SMR) は感覚運動野から記録される、12-15Hzの脳波である^{5, 22)}。このSMRの活動を増大させつつ、 β 波の活動を減少させるとADHDの改善に効果的であるとの報告がされている^{5, 22)}。また θ 波の活動を減少させることと組み合わせた効果も利用されている⁵⁾。SMRトレーニングの背景には、視床-皮質間ネットワークの抑制を促進させることが仮定されており、単独で利用される場合は、てんかんやチックなど、 β 波や θ 波の周波数トレーニングとの組み合わせで利用される場合はADHDなどに適用されている^{5, 22)}。電極は、感覚運動野に相当する部位（Cz、C3、C4など）より導出される。

SCPトレーニング

SCPsはゆっくりとした事象関連電位 (event-related potential : ERP) の直流シフトである。0.3秒から数秒にわたって持続し、波形自体は振幅を示さないが、外因性または内因性の惹起によって電位の極性がシフトする²³⁾。ネガティブ方向へのシフトは皮質細胞の脱分極を反映し、興奮閾値を下げることが知られている²³⁾。従来SCPトレーニングはてんかんへの適用が中心であったが、近年のHeinrichらの研究により、ADHDへの有効性が初めて報告され^{23, 24)}、以降ADHDにおけるニューロフィードバックの代表的なパラダイムとなっ

ている⁵⁾。さらにニューロフィードバックの臨床場面に限らず、Thought Translation Device (TTD) などに代表されるBCI研究においても、ヒトの思考過程を反映させる脳波の指標としてコンピュータとのインターフェースに利用されている²⁵⁾。感覚運動野のCzから測定された脳波に基づき、SCPsをネガティブ方向にシフトさせることで、皮質の興奮の制御を改善させる効果が仮定されている。

θ/α トレーニング

θ 波の活動を増加し、 α 波の活動を減少させる θ/α トレーニングは、エンパワーメント、well-beingや精神的健康の増進などを効果の背景として仮定しており、不安障害に応用されることが多い⁵⁾。脳波はPzより測定される。前述のトレーニングに比べて、ADHDに対する適用は積極的に行われていない。

表2. ニューロフィードバックトレーニングのパラダイム

トレーニングタイプ	脳波のコントロール	電極部位	背景仮説	対象
周波数(θ/β)トレーニング	θ 波の活動↓、 β 波の活動↑	Cz, C3	覚醒状態を高める	ADHD (混合型、不注意優勢型)
SMRトレーニング	SMRの活動↑ (θ 波の活動↓または β 波の活動↓とのコンビネーションで利用する場合もある)	Cz, C4	視床-皮質間ネットワークの抑制を促進	てんかん ADHD (混合型、多動性-衝動性優勢型)
SCPトレーニング	SCPのネガティブ方向へのシフト	Cz	皮質の興奮を抑制すること を改善させる	てんかん ADHD全般
θ/α トレーニング	θ 波の活動↑、 α 波の活動↓	Pz	エンパワーメント、well-beingや精神的健康の増	不安障害

Heinrich et al. (2007) ⁹⁾を参考に作成

(3) ADHDに対するニューロフィードバック適用の研究成果

ニューロフィードバックがセルフコントロールを目指す技法であることから、教育現場で応用可能なニューロフィードバックの対象としては、ADHDが最も広く研究されていることは合理的であるといえる。ただし、トレーニングの効果に対する批判も少なからず存在しており^{3, 4, 9, 18, 19)}、果たしてどれほどの効果が望めるのかを厳密に検討する必要がある。これまでもニューロフィードバックの効果を検討した総説論文は複数存在し^{3, 4, 5, 6, 7)}、いずれの論文においてもその有効性が支持されている。神経回路の活動レベルをセルフコントロールによって制御するという革新的な考え方に基づくこの技法を用いることによって、ADHDの示す多動、不注意や衝動性といった行動特徴をどのように改善していけるのかをピックアップした複数の論文をもとに^{17, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31)}、表3に示すとおり、Heinrichらの総説⁵⁾に習いまとめ上げる。表3では、目的、対象、パラダイム、システム(確認されたもののみ)、評価および結果の観点から論文の基本事項を抽出してある。

使用されたパラダイムを見ると、 θ/β トレーニング^{17, 22, 26, 29, 30, 31)}とSCPトレーニング^{17, 23, 24, 27, 28)}を用いた研究がほとんどであり、場合によってSMRが組み合わされることになる^{22, 26, 29)}。基本的には、ニューロフィードバックを実施する群(NF群)と実施しない群(統制群)に分けて、効果を比較する実験計画を中心に展開されているが^{23, 24, 26, 29, 31)}、薬物療法としてメチルフェニデートを服用する群(Methylphenidate : MPH群)²²⁾やグループセラピーを実施する群(Group therapy : GT群)^{27, 28)}を用意して、異なる治療方法を比較検討する実験計画を採用している研究もある。ほとんどの論文において、NF群は統制群に比べ、各種神経心理学検査で評価されるスコアが改善し、行動面においても注意、多動、衝動性の改善が確

認されている。さらに他の治療群（MPH群、GT群）と比較しても、検査スコアや行動面での改善が大きく変わらないことが報告されており、各種療法にかわる代替療法としての点から見てもその適用効果は有望に思われる。特にその効果がトレーニング終了後6ヶ月を経ても持続しているという点は非常に魅力的に思われる^{17,23)}。ニューロフィードバックのトレーニングパラダイムによる差は無いが¹⁷⁾、グループセラピーに代表される行動療法とニューロフィードバックとの比較においては、トレーニング前後で各種神経心理学検査の評価スコアに差は無いものの、脳波やERPによる脳レベルの活動においては差が見られるという結果は興味深い^{27,28)}。さらにfMRIを用いて詳細な脳活動の変化を検討した研究においても脳レベルでの改善が報告されている^{26,29)}。ニューロフィードバックの大きな利点として、行動レベルからではなく、より本質的な神経回路レベルからの改善が可能なことが考えられる。

これまでニューロフィードバックの効果を肯定的にまとめ上げた総説論文や研究を取り上げてきたが、批判が存在することを無視することはできない。ADHD研究で著名なBarkleyによるプラセボ効果を指摘する批判^{9,18,19)}が、ニューロフィードバック研究者やセラピストに与えるインパクトは大きなものがある。ニューロフィードバックに対する批判において、方法論の問題としては、統制群の設定、被験者の割り当て、トレーニング効果の評価方法、同時併用する治療法との交絡、ADHDサブタイプの考慮、眼球運動によるアーチファクトおよび統計処理の問題などが挙げられている³⁾。また、再現性の問題としては、被験者の個人差、ニューロフィードバック装置や効果の評価方法の違い、脳波の評価方法の違い、統計解析の違いなどにより、効果の評価が一貫していないことが上げられている⁴⁾。Rossiterはニューロフィードバックに対する批判をまとめ上げた総説論文の中で、研究者やセラピスト自身が、研究モデルを考え、適切な技術と治療パラダイムを適用し、目的とする効果を見定めることが肝要であると指摘している³⁾。やみくもにトレーニングを適用するのではなく、適切な効果を引き出すためには、研究者やセラピストが、自身が使用しているニューロフィードバックに対して合目的的に説明できることが必要になってくる。

表3. ADHDに対するニューロフィードバックトレーニングの研究成果

Lubar, J. F., Swartwood, M. O., Swartwood, J. N., & O'Donnell, P. H. (1995) ³⁰⁾	
Evaluation of the effectiveness of EEG neurofeedback training for ADHD in a clinical setting as measured by changes in T.O.V.A. scores, behavioral ratings, and WISC-R performance.	
目的	NFによるADHDの行動変容
対象	ADHD23名(8-19歳)
NFパラダイム	周波数トレーニング: θ 波(FCz) \uparrow + β 波(CPz) \downarrow ; 40セッション(1回60分), 期間2-3ヶ月
評価	TOVA, WISC-R, ADDES
結果	不注意, 多動, 衝動性の低減および各種行動評価スコアの改善
Monastra, V. J., Monastra, D. M., & George, S. (2002) ³¹⁾	
The effects of stimulant therapy, EEG biofeedback, and parenting style on the primary symptoms of attention-deficit/hyperactivity disorder.	
目的	NFによるADHDの行動変容を治療群と被治療群で比較
対象	ADHD100名(6-19歳): 統制群49名, NF群51名
NFパラダイム	周波数トレーニング: θ 波(FCz) \uparrow + β 波(CPz) \downarrow ; 35-50セッション(1回30-40分), 期間1年間
評価	TOVA, ADDES, EEG
結果	NF群のみ不注意, 多動, 衝動性の低減および各種行動評価スコアの改善; 自発脳波の変化
Fuchs, T., Birbaumer, N., Lutzenberger, W., Gruzelier, J. H., & Kaiser, J. (2003) ²²⁾	
Neurofeedback treatment for attention-deficit/hyperactivity disorder in children: a comparison with methylphenidate.	
目的	ADHDの行動変容をNFとMPHで比較
対象	ADHD34名(8-12歳): NF群22名, MPH群12名
NFパラダイム	ADHDのサブタイプごとに異なるパラダイムを適用; 36セッション(1回30-60分), 期間12週間 不注意優勢型: 周波数トレーニング(C3); 多動-衝動性優勢型: SMRトレーニング(C4); 混合型: 周波数+SMR
NFシステム	Neurocybernetics EEG Biofeedback system
評価	TOVA, WISC-R, IOWA-Conners Teacher Rating Scale
結果	NF群およびMPH群ともに各種行動評価スコアの改善
Heinrich, H., Gevensleben, H., Freisleder, F. J., Moll, G. H., & Rothenberger, A. (2004) ²⁴⁾	
Training of slow cortical potentials in attention-deficit/hyperactivity disorder: evidence for positive behavioral and neurophysiological effects.	
目的	NFによるADHDの行動変容
対象	ADHD22名(7-13歳): NF群13名, 統制群9名
NFパラダイム	SCPトレーニング: ネガティブ方向へのシフト(Cz)+ポジティブ方向へのシフト(Cz); 25セッション(1回50分), 期間3週間
NFシステム	"GoeFI" neurofeedback system
評価	CPT-OX, ADHD-RS-IV, CNV
結果	NF群のみ各種行動評価スコアの改善
Strehl, U., Leins, U., Goth, G., Klinger, C., Hinterberger, T., & Birbaumer, N. (2006) ²³⁾	
Self-regulation of slow cortical potentials: a new treatment for children with attention-deficit/hyperactivity disorder.	
目的	NFによるADHDの行動変容とフォローアップ後の効果持続の検討
対象	ADHD23名(8-13歳)
NFパラダイム	SCPトレーニング: ネガティブ方向へのシフト(Cz)+ポジティブ方向へのシフト(Cz); 30セッション(1回60分), 期間14-18週間; 6ヶ月後にフォローアップセッション
NFシステム	EEG8 and TTD software
評価	注意力測定テストバッテリー, WISC-R, ECBI, CPRS-R; SCP振幅
結果	両親による評定, 注意力テストおよびIQの改善, 6ヶ月後も効果が持続
Levesque, J., Beauregard, M., & Mensour, B. (2006) ²⁹⁾	
Neurofeedback: an alternative and efficacious treatment for Attention Deficit Hyperactivity Disorder.	
目的	NFによるADHDの行動変容の効果をfMRIで検討
対象	ADHD20名(8-12歳): NF群15名, 統制群5名
NFパラダイム	周波数トレーニング+SMRトレーニング; 40セッション(1回60分), 期間13週間 1stセッション: SMR(Cz) \uparrow + θ 波(Cz) \downarrow ; 2ndセッション: θ (Cz) \downarrow + β 1波(Cz) \uparrow
NFシステム	Lexicor NRS-24 Biolex program/Procomp+Biograph program
評価	Digit Span, IVA, CPRS-R, fMRI(Counting Stroop課題)
結果	NF群のみ各種行動評価スコアの改善; fMRIで計測した帯状回前部の活動が正常化

表3(続き). ADHDに対するニューロフィードバックトレーニングの研究成果

Beauregard, M. & Levesque, J. (2006) ²⁶⁾	
Functional magnetic resonance imaging investigation of the effects of neurofeedback training on the neural bases of selective attention and response inhibition in children with attention-deficit/hyperactivity disorder.	
目的	NFによるADHDの行動変容の効果をfMRIで検討
対象	ADHD20名(8-12歳): NF群15名, 統制群5名
NFパラダイム	周波数トレーニング+SMRトレーニング; 40セッション(1回60分), 期間13週間 1stセッション: SMR(Cz) ↑ +θ波(Cz) ↓; 2ndセッション: θ(Cz) ↓ +β1波(Cz) ↑
NFシステム	Lexicor NRS-24 Biolex program/Procomp+Biograph program
評価	Digit Span, IVA, CPRS-R, fMRI(Counting Stroop課題, Go/Nogo課題)
結果	NF群のみ各種行動評価スコアの改善; 帯状回前部や前頭前野の活動が正常化
Drechsler, R., Straub, M., Doehmert, M., Heinrich, H., Steinhausen, H. C., & Brandeis, D. (2007) ²⁸⁾	
Controlled evaluation of a neurofeedback training of slow cortical potentials in children with Attention Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD).	
目的	ADHDの行動変容をNFとグループセラピーで比較
対象	ADHD30名(9-13歳): NF群17名, GT群(グループセラピー)13名
NFパラダイム	SCPトレーニング: ネガティブ方向へのシフト(Cz)+ポジティブ方向へのシフト(Cz); NF群: 30セッション(1回45分), 期間10週間; GT群: 14-15ダブルセッション(1回90分), 期間12-15週間
NFシステム	"GoeFI" neurofeedback system
評価	Alertness, Go/Nogo, D2, TEA-Ch下位テスト(Score, Code transmission), TMT; EEG/ERP
結果	各種神経心理学検査のスコアは両群で改善; 脳波の改善はNF群のみ
Leins, U., Goth, G., Hinterberger, T., Klinger, C., Rumpf, N., & Strehl, U. (2007) ¹⁷⁾	
Neurofeedback for children with ADHD: a comparison of SCP and Theta/Beta protocols.	
目的	SCPトレーニングと周波数トレーニング(θ/β)の比較
対象	ADHD38名(8-13歳): SCP群17名, θ/β群13名
NFパラダイム	SCPトレーニング: ネガティブ方向へのシフト(Cz)+ポジティブ方向へのシフト(Cz); θ/βトレーニング: θ波 ↑ +β波 ↓ (C3f, C4f) 3フェイズ(各フェイズ10セッション, 1セッション60分), 期間14-18週間; 6ヶ月後にフォローアップセッション
NFシステム	EEG8 and TTD software
評価	注意力測定テストバッテリー, WISC-R, ECBI, Conners評価尺度; SCP振幅
結果	両群とも両親による評定、注意力テストおよびIQの改善, 6ヶ月後も効果が持続, 群間の差は無い
Doehmert, M., Brandeis, D., Straub, M., Steinhausen, H. C., & Drechsler, R. (2008) ²⁷⁾	
Slow cortical potential neurofeedback in attention deficit hyperactivity disorder: is there neurophysiological evidence for specific effects?	
目的	ADHDの行動変容, QEEGおよびCNVをNFとグループセラピーで比較
対象	ADHD26名(9-12歳): NF群14名, GT群(グループセラピー)12名
NFパラダイム	SCPトレーニング: ネガティブ方向へのシフト(Cz)+ポジティブ方向へのシフト(Cz); NF群: 15ダブルセッション(1回45分), 期間10週間; GT群: 12セッション(1回90分), 期間12-15週間
NFシステム	"GoeFI" neurofeedback system
評価	Alertness, Go/Nogo, D2, Score, Code transmission, TMT等の各種神経心理学検査; QEEG/CNV(CPT)
結果	NF群ではQEEG改善, CNVは明確な改善が見られない; 注意機能に関するQEEGの改善はNF群のみ

NF: Neurofeedback; TOVA: Test of Variables of Attention; WISC-R: Wechsler Intelligence Scale for Children - Revised; ADDES: Attention Deficit Disorders Evaluation Scale Home Version; MPH: Methylphenidate; GoeFI: Goettinger Feedback; CPT-OX: Continuous Performance Task-OX; ADHD-RS-IV: ADHD Rating Scale-IV; CNV: contingent negative variation; TTD: Thought Translation Device; ECBI: Eyberg Child Behavior Inventory; IVA: Integrated Visual and Auditory Continuous Performance Test; CPRS-R: Conners Parent Rating Scale; TEA-Ch: Test of Everyday Attention for Children; TMT: Trail Making Test.

(4) トレーニング効果の評価

ニューロフィードバックに対する批判を払拭するためにも、その効果をどのように客観的に評価するかは非常に重要な問題となってくる。表3にまとめ上げたように、神経心理学検査、両親や教師からの評定をもとにした行動評価と脳波やfMRIを利用した脳活動をもとにした評価の二つに大別される。ここでは、それぞれ代表的な評価方法を取り上げて検討する。

神経心理学検査

ニューロフィードバックの効果を評価する基本は、トレーニングの前後で各種神経心理学検査、第三者からの評定などをもとに行動評価を行い、比較することにある。場合によって、トレーニング期間をいくつかのフェイズに分けて、フェイズごとの評価スコアの推移を検討することも行われている¹⁷⁾。よく利用される検査は、CPT (Continuous Performance Task)³²⁾をもとにして作成されたコンピュータ上で注意や衝動性を測定するTOVA (Test of Variables of Attention)³³⁾、代表的な知能検査であるWISC-IV³⁴⁾ (WISC-R³⁵⁾ およびWISC-III³⁶⁾を含む) またはその下位検査の一部 (数唱など)、衝動性測定Go/Nogo課題³⁷⁾が学習者に対して行われ、ADDES (Attention Deficit Disorders Evaluation Scale Home Version)³⁸⁾、CPRS-R (Conners Parent Rating Scale)³⁹⁾ やIOWA-Conners Teacher Rating Scale⁴⁰⁾などが両親や教師など第三者の評定を求めめるために行われる。このほかにも質問紙系として、ECBI (Eyberg Child Behavior Inventory)⁴¹⁾、ADHD-RS-IV (ADHD Rating Scale-IV)⁴²⁾などが、実験課題系として、CPTのモダリティを工夫したコンピュータ上のテストであるIVA (Integrated Visual and Auditory Continuous Performance Test)⁴³⁾ や警告刺激の後に提示される標的刺激のみ反応させるCPT-OXまたはCPT-AX^{32,44)}などが用いられることもある。取り上げた論文の中では、TEA-Ch (Test of Everyday Attention for Children)⁴⁵⁾ やTMT (Trail Making Test)⁴⁶⁾ などを利用した研究報告もある²⁸⁾。

基本的には、自己記入式の質問紙などを通して行う行動評価と、実験課題による成績や反応時間等を用いた行動評価とを組み合わせ、トレーニング効果の行動的側面から見た評価の指標として複合的に利用している。

脳活動計測 (QEEG、ERP、fMRI)

行動評価に基づく効果の検討だけでは、客観性に欠けるため、近年では脳活動計測を利用した評価方法が利用されることが多い^{17,26,27,28,29)}。ニューロフィードバックが脳波の変化をもとにセルフコントロールを目指す手法だけに、脳波そのものを評価ターゲットにすることはごく自然なことである。近年、多チャンネルの脳波計が利用可能となってきた技術革新の背景も手伝って、Quantitative EEG (QEEG) というデジタル脳波計の特徴を活かして、コンピュータ内に取り込んだ波形データに対して数学的処理を駆使した分析を行う手法が利用されている¹²⁾。

QEEGによる背景脳波の改善を指標とするだけでなく、ある課題を遂行中のERPを利用した評価も有効である。神経心理学検査の項で述べたCPTやGo/Nogo課題遂行時のERPを評価指標として用いることが多い^{17,23,27,28,29)}。その際に記録されたSCPs、後期陽性成分P300や随伴陰性変動 (contingent negative variation : CNV) の振幅や潜時がトレーニング前後でどのように変化したかを検討して評価することになる⁵⁾。

さらに近年は、認知神経科学における脳活動計測として最も利用されているfMRIを用い

て、トレーニング前後での脳機能の詳細な変化を検討する研究も報告されている^{26,29)}。ニューロフィードバックにより注意機能に関連した前部帯状回の活動が正常化したり²⁹⁾、前部帯状回に加え、前頭前野、視床、尾状核といったADHDに関連する脳部位の活動正常化も確認されている²⁶⁾。将来的には、Johnstonらの研究⁴⁷⁾のようにfMRIそのものを使用したニューロフィードバックが適用されるようになるかもしれない。

脳活動計測を利用した客観的評価により、行動療法等の他の治療法を行った場合との比較において、行動評価ではその違いが見られなくとも、脳活動レベルでの違いが確認されるようになってきた^{27,28)}。これらの新技術の活用により、行動改善の本質に迫る脳内メカニズムの変容をベースとしたニューロフィードバックの効果を検討することが可能となるであろう。

(5) ニューロフィードバックシステム（ハードウェア&ソフトウェア）

ニューロフィードバックを実施するための装置には、脳波計と学習者へのフィードバックを与えるソフトウェアを基本としたシステムが要求される。基本的にはハードウェアとソフトウェアが一体化しており、統合的な環境で行われている(表3)。実用場面でのニューロフィードバック利用に際してのシステム要件に関する情報はDemosの著書に詳しく記載されている¹¹⁾。

ニューロフィードバックで使用される主な電極部位はCzやPzであり、アーチファクト除去のための眼球運動計測を含めても4～8ch程度の脳波計で十分対応が可能である。ただし、脳波計からの生体信号をリアルタイムで計測するための制御システムを整えておく必要がある。そのため、ハードウェアとソフトウェアが統合されて提供されていることが多いのである。これにより、メーカー側はハードウェアとソフトウェアの相性による不具合などのトラブルを回避することができ、マーケティングやサポートが行いやすくなるのだと思われる。取り上げた論文で使用されているシステムは以下の通りである：Neurocybernetics EEG Biofeedback system(EEG Spectrum, Encino, CA, USA)²⁹⁾、"GoeFF" neurofeedback system (Goettinger Feedback)^{24,27,28)}、EEG8 (Contact Precision Instruments, Cambridge, MA) and TTD²⁵⁾ software^{17,23)}、Lexicor NSR-24 Biolex program (Lexicor, Boulder, CO)^{26,29)}、Procomp + Biograph program (Thought Technology Ltd, Montreal, Canada)^{26,29)}。いずれも本邦においてはなじみの薄いシステムであるが、欧米を中心としたニューロフィードバックのセラピストの間では一定のシェアを確保しているようである。これ以外にも、無線やBluetoothを利用した様々なシステムが考案・販売されており、セラピストが使用目的に合ったシステムを選択できるほどの状況となっている。セラピストや研究者自身がC/C++、MATLAB/Simulink (The MathWorks, Inc., Natick, MA) やLabVIEW (National Instruments Corporation, Austin, TX) 等で制御プログラムを組むことができるのであれば、既に有している脳波計を用いて、自由度の高いシステムを構築することも可能である。

多チャンネル計測が可能な時代であるにもかかわらず、数チャンネルの脳波情報しか扱っていないことに対する批判もあり⁹⁾、将来的には、64chや128chといった高密度脳波計を利用したシステムが登場するかもしれない。しかしながら、実際場面での運用可能性や制御プログラムのソフトウェア開発に課題が残されているように見受けられる。

3. ニューロフィードバックの可能性

(1) ニューロフィードバックがもたらす行動変容の背景メカニズム

ADHDの各症状は、この行動抑制やワーキングメモリ等の主要な実行機能の弱さによる結果として引き起こされるという考え方が提唱されている^{48,49,50}。実行機能を司るとされる前頭葉－線条体 (fronto-striatal) のシステム不全により、ADHDの行動的特徴が引き起こされると考えられるようになってきた⁵¹。この実行機能とは、将来の目標を達成するために、適切に問題処理をこなしていく処理過程のこと言う⁵²。ワーキングメモリと文脈情報の統合によって、現在の状況に対処して最適な行動を導き出し、遂行するための選択肢に関する情報を維持しながら意思決定を促進するトップダウン処理である^{37,53}。この実行機能を実現する脳内の神経ネットワークは、視床、大脳基底核および前頭皮質含む広範な領域に広く分布しているとされている⁵²。ニューロフィードバックによるセルフコントロールによって、ADHDの行動変容が見られるということは、当然ながら、この前頭葉－線条体システムになんらかの改善が促されている可能性が考えられる。

ERP研究においては、ADHD児は健常児より認知処理を反映するとされる後期陽性成分P300の振幅が低下しており、潜時の延長が見られることが報告されている⁵⁴。同様にこのP300の障害が、ADHDにおける障害の指標として利用できうることも指摘されている^{54,55}。またCNVの振幅低下^{5,56} やミスマッチ陰性電位 (mismatch negativity : MMN) の振幅低下⁵⁷ もADHDにおける認知課題遂行中に観察されることも報告されている。このようにERP波形に違いが見られるように、前頭葉－線条体システム異常に代表されるADHDにおける脳機能の障害がERPに反映されていることが有力視される。ニューロフィードバックを通じて脳機能正常化が促進されうるのは、ERP波形の改善と共にADHD行動の改善が報告されている研究からもうかがわれる^{5,17,23,27,28}。例えば、SCPトレーニングは、P300の改善には影響せず、CNVの改善のみに作用することが示されている^{5,24}。トレーニングの結果として起こる脳機能の改善が、ターゲットとした波形に関連して特異的に影響するという事は非常に興味深い。ADHDのサブタイプによって適用するパラダイムが異なる可能性があることから⁵¹、このようなパラダイムの使い分けによって、ニューロフィードバックの適用が細分化され、その応用の多様性が広がっていくように思われる。

fMRIを用いた研究では、ADHDにおいて、前頭前野、前部帯状回、大脳基底核 (特に線条体)、および小脳に機能異常が見られることが一貫して報告されている⁵³。本論文内で取り上げたfMRIを利用してニューロフィードバックの効果を検討した論文においても、トレーニング前後を比較すると前頭前野および前部帯状回の活動が亢進することが示されている^{26,29}。脳波のセルフコントロールがどのような作用機序でfMRIで測定される脳活動を正常化させるのかは現時点では明確に断定することはできないが、ニューロフィードバックが持つ脳の可塑性へ影響を及ぼす可能性を推察することはできる。Heinrichらもニューロフィードバックが持つ中枢神経系への作用機序に関して明言はしていないものの、fMRI等を用いた評価研究のさらなる進展によって、解き明かされうる希望的な展望を示唆している⁵¹。

(2) 教育分野における新しい可能性

現在、ADHDの背景にある生物学的な神経基盤に対する理解が科学的な知見の積み重ね

によって徐々に明らかにされてきているが、未だ完全に解明されてはいない。さらにニューロフィードバックが本当にADHDに対して効果があるのかに対する答えも、十分な科学的な実証をもとには示されているとは言えない。現段階では、トレーニングを行うことによって、結果としてADHDが示す行動が改善すること、その背景にEEG/ERPやfMRIで測定される脳活動の正常化の関与が考えられうることにとどまっているに過ぎない。これらの脳内メカニズムの完全な解明に向けては今後の研究の進展を期待したい。

本論文ではADHDを中心に取上げたが、教育分野における研究としては、LD (learning disorder) や自閉症といった他の発達障害を対象にした研究も必要になってくる。これらに関する研究は少数であるが報告されており、当該分野におけるニューロフィードバックの有効性が示唆されている^{58,59)}。またスポーツ技能、音楽や芸術等のパフォーマンスやセルフコントロール能力を高める目的で、健常児者に対するニューロフィードバックの適用も数多く試みられている^{60,61)}。音楽のパフォーマンス向上に有効であったり^{62,63)}、単語の認知処理⁶⁴⁾やメンタルローテーション⁶⁵⁾といった認知能力を向上させたり、パーソナリティや気分の変容を促したり⁶⁶⁾と、その応用範囲は非常に多岐にわたっている。教育分野では、従来はADHDのセルフコントロール法として注目されてきたニューロフィードバックが、LDや自閉症への適用に波及し、今後は人間の認知能力の向上をも目指して新しい展開を見せるようになるのかもしれない。さらに近年発展がめざましいBCI研究との関係から、肢体不自由のリハビリテーションや将来のサイボーグ技術と融合して、より精度の高い技法に変化していくことも十分考えられる。この技法自体が議論の余地が多く残されており、なおかつ教育領域の活用においては、これらの領域自体がまだまだ発展途上であるだけに、将来の可能性とそれに付随する問題点を慎重に見極めていく必要がある。特に、誰に対しても様に同じトレーニングが有効であるとは限らず、個人差の問題をどう扱っていくのが非常に大切になってくるだろう。この点に関しては、個人差を考慮した方法として、脳波の標準的なデータベースを作成して、標準波形からの偏差を検討することができる取り組みも行われている¹²⁾。今後はQEEGによりどのようなパラダイムを適用すべきか検討した後で、個人個人ごとのオーダーメイド型のニューロフィードバックが提供されるようになっていくことが予想される。ADHDの個人ごとの特徴を心理的および神経科学的な側面から統合的に捉えるという意味で、FassbenderとShweitzerは”psycho-neuro profile (心理-脳神経プロファイル)”⁶⁷⁾という言葉を使っているが、ニューロフィードバックにも同様の考え方が援用できるように思われる。より効果的なトレーニングを提供できるレベルまで到達できるような研究を進めていく上で個人差を考慮したプログラム作成は重要な課題と言えるだろう。ニューロフィードバックの望ましい側面ばかりのみに気をとらわれるのではなく、しっかりとニューロフィードバックが持つ危険性についても目も向ける必要がある。BCI研究で倫理的配慮を指摘されているように⁵⁶⁾、脳波のコントロールという脳神経倫理的に重要な問題を含んでいることを十分に留意して研究を進めていくことが、研究者やセラピストに切に求められる。もちろん、このような倫理観の遵守はトレーニングを受ける学習者自身にも例外なく当てはまるのである。

謝 辞

本論文は科研費（挑戦的萌芽研究）および中島記念国際交流財団日本人若手研究者研究助成金の援助を受けたものである。

引用文献

1. Birbaumer, N., Ramos Murguialday, A., Weber, C., & Montoya, P. (2009). Neurofeedback and brain-computer interface clinical applications. *Int Rev Neurobiol*, *86*, 107-117.
2. Allison, B. Z., Wolpaw, E. W., & Wolpaw, J. R. (2007). Brain-computer interface systems: progress and prospects. *Expert Rev Med Devices*, *4*(4), 463-474.
3. Rossiter, T. (2004). The effectiveness of neurofeedback and stimulant drugs in treating AD/HD: Part I. Review of methodological issues. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, *29*(2), 95-112.
4. Rossiter, T. (2004). The effectiveness of neurofeedback and stimulant drugs in treating AD/HD: part II. Replication. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, *29*(4), 233-243.
5. Heinrich, H., Gevensleben, H., & Strehl, U. (2007). Annotation: neurofeedback - train your brain to train behaviour. *J Child Psychol Psychiatry*, *48*(1), 3-16.
6. Friel, P. N. (2007). EEG biofeedback in the treatment of attention deficit hyperactivity disorder. *Altern Med Rev*, *12*(2), 146-151.
7. Butnik, S. M. (2005). Neurofeedback in adolescents and adults with attention deficit hyperactivity disorder. *J Clin Psychol*, *61*(5), 621-625.
8. Moravec, C. S. (2008). Biofeedback therapy in cardiovascular disease: rationale and research overview. *Cleve Clin J Med*, *75 Suppl 2*, S35-38.
9. ジム・ロビンス 著, 竹内伸 監訳, & 竹内泰之 訳. (2005). ニューロフィードバック シンフォニー イン ザ ブレイン. 東京: 星和書店.
10. 鶴紀子. (2000). 臨床脳波と脳波解析. 東京: 新興医学出版社.
11. Demos, J. (2005). *Getting Starged with Neurofeedback*. New York: W. W. Norton & Company.
12. Budzynski, T., Budzynski, H., Evans, J., & Abarbanel, A. (2009). *Introduction to Quantitative EEG and Neurofeedback* (Second edition ed.). Amsterdam: Academic Press.
13. 小池敏英, & 北島善夫. (2001). 知的障害の心理学 発達支援からの理解. 京都: 北大路書房.
14. Conners, C. K. (2002). Forty years of methylphenidate treatment in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *J Atten Disord*, *6 Suppl 1*, S17-30.
15. Group, M. C. (2004). National institute of mental health multimodal treatment study of ADHD follow-up: Changes in effectiveness and growth after the end of treatment. *Pediatrics*, *113*, 762-769.
16. Fox, D. J., Tharp, D. F., & Fox, L. C. (2005). Neurofeedback: an alternative and efficacious treatment for Attention Deficit Hyperactivity Disorder. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, *30*(4), 365-373.
17. Leins, U., Goth, G., Hinterberger, T., Klinger, C., Rumpf, N., & Strehl, U. (2007). Neurofeedback for children with ADHD: a comparison of SCP and Theta/Beta protocols. *Appl*

- Psychophysiol Biofeedback*, 32(2), 73-88.
18. Barkley, R. (1992). Is EEG biofeedback treatment effective for ADHD children? *Ch.A.D.D.er Box*, 5-11.
 19. Barkley, R. (1993). Continuing concerns about EEG biofeedback/neurofeedback. *ADHD Report*, 1(3), 1-3.
 20. Klem, G. H., Luders, H. O., Jasper, H. H., & Elger, C. (1999). The ten-twenty electrode system of the International Federation. The International Federation of Clinical Neurophysiology. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl*, 52, 3-6.
 21. Jasper, H. H. (1958). The ten twenty electrode system of the international federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 10, 371-375.
 22. Fuchs, T., Birbaumer, N., Lutzenberger, W., Gruzelier, J. H., & Kaiser, J. (2003). Neurofeedback treatment for attention-deficit/hyperactivity disorder in children: a comparison with methylphenidate. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 28(1), 1-12.
 23. Strehl, U., Leins, U., Goth, G., Klinger, C., Hinterberger, T., & Birbaumer, N. (2006). Self-regulation of slow cortical potentials: a new treatment for children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Pediatrics*, 118(5), e1530-1540.
 24. Heinrich, H., Gevensleben, H., Freisleder, F. J., Moll, G. H., & Rothenberger, A. (2004). Training of slow cortical potentials in attention-deficit/hyperactivity disorder: evidence for positive behavioral and neurophysiological effects. *Biol Psychiatry*, 55(7), 772-775.
 25. Hinterberger, T., Melinger, J., & Birbaumer, N. (2003). The Thought Translation Device: Structure of a multimodal brain-computer communication system. *Proceedings of the 1st International IEEE EMBS*, 603-606.
 26. Beauregard, M., & Levesque, J. (2006). Functional magnetic resonance imaging investigation of the effects of neurofeedback training on the neural bases of selective attention and response inhibition in children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 31(1), 3-20.
 27. Doehnert, M., Brandeis, D., Straub, M., Steinhausen, H. C., & Drechsler, R. (2008). Slow cortical potential neurofeedback in attention deficit hyperactivity disorder: is there neurophysiological evidence for specific effects? *J Neural Transm*, 115(10), 1445-1456.
 28. Drechsler, R., Straub, M., Doehnert, M., Heinrich, H., Steinhausen, H. C., & Brandeis, D. (2007). Controlled evaluation of a neurofeedback training of slow cortical potentials in children with Attention Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD). *Behav Brain Funct*, 3, 35.
 29. Levesque, J., Beauregard, M., & Mensour, B. (2006). Effect of neurofeedback training on the neural substrates of selective attention in children with attention-deficit/hyperactivity disorder: a functional magnetic resonance imaging study. *Neurosci Lett*, 394(3), 216-221.
 30. Lubar, J. F., Swartwood, M. O., Swartwood, J. N., & O'Donnell, P. H. (1995). Evaluation of the effectiveness of EEG neurofeedback training for ADHD in a clinical setting as measured by changes in T.O.V.A. scores, behavioral ratings, and WISC-R performance. *Biofeedback Self Regul*, 20(1), 83-99.
 31. Monastra, V. J., Monastra, D. M., & George, S. (2002). The effects of stimulant therapy, EEG

- biofeedback, and parenting style on the primary symptoms of attention-deficit/hyperactivity disorder. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 27(4), 231-249.
32. Corkum, P. V., & Siegel, L. S. (1993). Is the Continuous Performance Task a valuable research tool for use with children with Attention-Deficit-Hyperactivity Disorder? *J Child Psychol Psychiatry*, 34(7), 1217-1239.
33. Greenberg, L. M. (1987). An objective measure of methylphenidate response: clinical use of the MCA. *Psychopharmacol Bull*, 23(2), 279-282.
34. Wechsler, D. (2003). *Wechsler Intelligence Scale for Children - Fourth Edition*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
35. Wechsler, D. (1981). *Wechsler Intelligence Scale for Children - Revised*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
36. Wechsler, D. (1991). *Wechsler Intelligence Scale for Children - Third Edition*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
37. 大村一史. (2006). ADHDにおける衝動性への行動-遺伝的アプローチ. *山形大学紀要 (教育科学)*, 14(2), 113-122.
38. McCarney, S. (1989). *Attention Deficit Disorders Evaluation Scale Home Version*. Missouri: Hawthorne Educational Service.
39. Conners, C. K., Wells, K. C., Parker, J. D., Sitarenios, G., Diamond, J. M., & Powell, J. W. (1997). A new self-report scale for assessment of adolescent psychopathology: factor structure, reliability, validity, and diagnostic sensitivity. *J Abnorm Child Psychol*, 25(6), 487-497.
40. Atkins, M., & Milich, R. (1987). IOWA-Conners Teacher Rating Scale. In M. Hersen & A. Bellack (Eds.), *Dictionary of behavioral assesment techniques* (pp. 273-275). New York: Pergamon.
41. Eyberg, S. M., & Pincus, D. (1999). *Eyberg Child Behavior Inventory & Sutter-Eyberg Student Behavior Inventory - Revised*. Odessa, FL: Psychological Assessment Resources.
42. DuPaul, G. J., Power, T. J., Anastopoulos, A. D., & Reid, R. (1998). *ADHD Rating Scale-IV: Checklists, Norms, and Clinical Interpretation*: Guilford Press.
43. Tinius, T. P. (2003). The Integrated Visual and Auditory Continuous Performance Test as a neuropsychological measure. *Arch Clin Neuropsychol*, 18(5), 439-454.
44. Beck, L. H., Bransome, E. D., Jr., Mirsky, A. F., Rosvold, H. E., & Sarason, I. (1956). A continuous performance test of brain damage. *J Consult Psychol*, 20(5), 343-350.
45. Manly, T., Robertson, I. H., Anderson, V., & Nimmo-Smith, I. (1999). *TEA-Ch: The Test of Everyday Attention for Children Manual*. Bury St. Edmunds, UK: Thames Valley Test Company Limited.
46. Reitan, R. M. (1992). *Trail Making Test for Children*. Tucson, Arizona: Reitan Laboratory.
47. Johnston, S. J., Boehm, S. G., Healy, D., Goebel, R., & Linden, D. E. (2010). Neurofeedback: A promising tool for the self-regulation of emotion networks. *Neuroimage*, 49(1), 1066-1072.
48. Barkley, R. A. (1997). Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions: constructing a unifying theory of ADHD. *Psychol Bull*, 121(1), 65-94.

49. Castellanos, F. X., & Tannock, R. (2002). Neuroscience of attention-deficit/hyperactivity disorder: the search for endophenotypes. *Nat Rev Neurosci*, 3(8), 617-628.
50. Schachar, R., Mota, V. L., Logan, G. D., Tannock, R., & Klim, P. (2000). Confirmation of an inhibitory control deficit in attention-deficit/hyperactivity disorder. *J Abnorm Child Psychol*, 28(3), 227-235.
51. Bush, G., Valera, E. M., & Seidman, L. J. (2005). Functional neuroimaging of attention-deficit/hyperactivity disorder: a review and suggested future directions. *Biol Psychiatry*, 57(11), 1273-1284.
52. Willcutt, E. G., Doyle, A. E., Nigg, J. T., Faraone, S. V., & Pennington, B. F. (2005). Validity of the executive function theory of attention-deficit/hyperactivity disorder: a meta-analytic review. *Biol Psychiatry*, 57(11), 1336-1346.
53. 大村一史. (2007). ニューロイメージングを中間表現型としたADHDへのアプローチ. *山形大学紀要 (教育科学)*, 14(3), 37-53.
54. Strandburg, R. J., Marsh, J. T., Brown, W. S., Asarnow, R. F., Higa, J., Harper, R., & Guthrie, D. (1996). Continuous-processing-related event-related potentials in children with attention deficit hyperactivity disorder. *Biol Psychiatry*, 40(10), 964-980.
55. Jonkman, L. M., Kemner, C., Verbaten, M. N., Koelega, H. S., Camfferman, G., vd Gaag, R. J., Buitelaar, J. K., & van Engeland, H. (1997). Event-related potentials and performance of attention-deficit hyperactivity disorder: children and normal controls in auditory and visual selective attention tasks. *Biol Psychiatry*, 41(5), 595-611.
56. Banaschewski, T., Brandeis, D., Heinrich, H., Albrecht, B., Brunner, E., & Rothenberger, A. (2003). Association of ADHD and conduct disorder--brain electrical evidence for the existence of a distinct subtype. *J Child Psychol Psychiatry*, 44(3), 356-376.
57. 根来秀樹, & 飯田順三. (2007). *Journal of Nara Medical Association*, 58(4), 103-114.
58. Fernandez, T., Harmony, T., Fernandez-Bouzas, A., Diaz-Comas, L., Prado-Alcala, R. A., Valdes-Sosa, P., Otero, G., Bosch, J., Galan, L., Santiago-Rodriguez, E., Aubert, E., & Garcia-Martinez, F. (2007). Changes in EEG current sources induced by neurofeedback in learning disabled children. An exploratory study. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 32(3-4), 169-183.
59. Scolnick, B. (2005). Effects of electroencephalogram biofeedback with Asperger's syndrome. *Int J Rehabil Res*, 28(2), 159-163.
60. Gruzelier, J. (2009). A theory of alpha/theta neurofeedback, creative performance enhancement, long distance functional connectivity and psychological integration. *Cogn Process*, 10 Suppl 1, S101-109.
61. Vernon, D. J. (2005). Can neurofeedback training enhance performance? An evaluation of the evidence with implications for future research. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 30(4), 347-364.
62. Egner, T., & Gruzelier, J. H. (2004). EEG biofeedback of low beta band components: frequency-specific effects on variables of attention and event-related brain potentials. *Clin Neurophysiol*, 115(1), 131-139.
63. Egner, T., Zech, T. F., & Gruzelier, J. H. (2004). The effects of neurofeedback training on

- the spectral topography of the electroencephalogram. *Clin Neurophysiol*, 115(11), 2452-2460.
64. Barnea, A., Rassis, A., & Zaidel, E. (2005). Effect of neurofeedback on hemispheric word recognition. *Brain Cogn*, 59(3), 314-321.
65. Hanslmayr, S., Sauseng, P., Doppelmayr, M., Schabus, M., & Klimesch, W. (2005). Increasing individual upper alpha power by neurofeedback improves cognitive performance in human subjects. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 30(1), 1-10.
66. Raymond, J., Varney, C., Parkinson, L. A., & Gruzelier, J. H. (2005). The effects of alpha/theta neurofeedback on personality and mood. *Brain Res Cogn Brain Res*, 23(2-3), 287-292.
67. Fassbender, C., & Schweitzer, J. B. (2006). Is there evidence for neural compensation in attention deficit hyperactivity disorder? A review of the functional neuroimaging literature. *Clin Psychol Rev*, 26(4), 445-465.

Summary

Kazufumi Omura : Prospect of neurofeedback in the field of education

Using electroencephalogram (EEG) is one technique that may be used to study important questions within the field of cognitive neuroscience. Against this background, neurofeedback or EEG biofeedback has been suggested to be a potential tool to improve self-regulation processes in attention-deficit/hyper activity disorder (ADHD). Neurofeedback aims to improve intellectual functioning and attentive behaviors through regulating the brain waves by monitoring the ongoing brain activity. Within the past decade, the use of neurofeedback has increased dramatically although there are several limitations. Recently a few studies have investigated the effectiveness of neurofeedback carefully and supported the possibility as an alternative new treatment for ADHD. This paper reviews neurofeedback literature of ADHD and expands its perspectives in order to shed light on the prospect of neurofeedback in the field of education.