

インタラクティブ・メトロノーム法の紹介とリハビリテーションへの応用

An Introduction of Interactive Metronome and Its Application to Rehabilitation Training

辻下 守弘

Morihiro Tsujishita

要旨 (Abstract)

インタラクティブ・メトロノーム法 (Interactive Metronome[®]: 以下IMと略す) は、従来の運動・認知機能のリハビリテーションに欠けていた脳内時計と時間情報処理能力を高めるというコンセプトを導入した新しいトレーニング方法である。本稿では、IMの歴史、原理と方法、トレーニングの手順、そして科学的根拠について概説した上で、リハビリテーションへの応用可能性について解説した。IMの利点は、リズム音に手と足の動きを同調させてタイミングをとるといった非常にシンプルなトレーニングであり、2歳程度の幼児から高齢者まで適用範囲が広く、生体への侵襲も全くないため、従来のリハビリテーションへ併用して使用可能なことである。ただし、現在の問題は、科学的根拠を裏付けるIMの臨床研究が国際的にも不足していることやIMシステムが日本における医療機器の薬事承認を得てないことである。

キーワード: (インタラクティブ・メトロノーム) (リハビリテーション) (タイミング) (脳内時計) (時間情報処理)

I. はじめに

人間が生きるために必要な生活行動は、人体各部位における巧みな運動の連鎖によって構成されている。例えば、手を伸ばしてコップの水を飲むという単純な行動でさえ、手をコップまで到達させるための肩、肘、手という各関節の運動、コップを握るという指の運動、そして再び肩、肘、手がコップを口まで正確に運ぶという運動をうまく構成し、順序立てられたスムーズな運動の連鎖が必要となる。

このように精緻な運動の連鎖には、時間の経過を正確に計測し、次に生じる運動のタイミングを予測する脳の働きによって、運動の企画 (motor planning) と運動の順序立て (motor Sequencing) がうまく機能することを必要とする¹⁾。これらの脳機能には、運動制御に関与する脳領域や視覚・聴覚・体性感覚などの感覚情報処理に関与する脳領域だけでなく、注意や記憶などの高次脳機能を担う大脳皮質連合野といった広範な脳領域の連携した活動が前提となっている²⁾。

また、最近の研究では、脳の時間情報処理と精緻なタイミングのコントロール能力は、運動機能に必須というだけでなく、読み書き計算といった基礎学力と学習能力、注意力や集中力、そしてコミュニケーションに必要な言語能力などの認知機能にも重要な役割を果たすことがわかってきた³⁾。

リハビリテーションでは、これまで脳卒中やパーキンソン病などの多様な脳神経疾患による運動・認知機能の障

害を対象としてきたが、最近では自閉症を中心とする広汎性発達障害や行動面の問題を中心とする注意欠陥/多動性障害（AD/HD）といった子どもの発達障害や高齢者の認知症などにも拡大している。つまり、現在のリハビリテーションは、主に運動機能の改善による日常生活への復帰というアプローチから高次脳機能である注意、記憶、学習、行動といった全人間的な生活再建というアプローチへと発展している。

しかし、これまでの運動・認知機能に対するリハビリテーションでは、運動や高次脳機能の前提となる時間情報処理やタイミング能力といった要素のトレーニングが軽視されてきたと思われる。そこで、本稿では、この時間情報処理とタイミング能力を鍛えるという新しいコンセプトのトレーニング方法として約20年前に米国で誕生したインタラクティブ・メトロノーム法（Interactive Metronome[®]：以下IMと略す）について紹介し、リハビリテーションへの応用可能性について解説する。

II. IMの概要

1. IMの歴史

IMは、指揮者であり作曲者でもある James Cassily によって1992年に開発された。IM開発当初の目的は、音楽家の演奏技術を高めることであり、従来のメトロノームでは演奏者がテンポを音で一方的に受け取るだけで、そのテンポと演奏が合っているかどうかを確かめることができなかった。そこで、彼は演奏とテンポのタイミング誤差を演奏者へフィードバックするという双方向（インタラクティブ）なトレーニングを考案した。

Cassily は音楽家として演奏だけでなく、レコーディング機材の製造やスタジオの設計に20年以上携わっていたため、IMのような音楽機器の開発も容易であり、早速試作機を完成させて実際に演奏者のトレーニングに導入した。その結果、従来のメトロノームだけのトレーニングよりもタイミング誤差をフィードバックするほうがより効果的に正確なテンポを習得できることが確認された。それだけでなく、この方法でトレーニングした演奏者は、注意力や記憶力も高まるという恩恵も得ることとなった。

その後、Cassily は知人の医師から交通事故によって外傷性脳損傷を受傷した子供にIMを試してほしいと依頼された。大学で児童心理学を専攻した彼は子供の発達障害にも関心を持っていたため、その依頼を受け入れIMを試したところ予想以上の効果が認められた。これを契機としてIMは、音楽領域だけでなく、教育や医療の中へ導入されて発展することとなった。

1997年からIM研究の責任者となった発達心理学者の Greenspan 博士は、自閉症の子供に対するIMの効果を実証して特許を受け、1999年より国家資格のある医療専門職へも広まることとなり、米国では開業権が認められた理学療法士、作業療法士、言語聴覚士によって医療保険が使える治療手段の一つとなった。現在では、米国とカナダを中心に世界48カ国の教育者、医療者、そしてスポーツトレーナーなど約25,000人の専門家がIMを導入し、各地で治療やトレーニングが行われている。

2. IMの原理と方法

IMは、一定のテンポを振り子とリズム音で提示するメトロノームの原理を使って、リズムとタイミング能力をトレーニングする方法である。音楽演奏の練習で使われる一般的なメトロノームは、一定のテンポに設定すると振り子やリズム音で演奏者にテンポの情報を提示し、その情報に合わせて演奏のタイミングをとるが、うまくタイミングが合っているかどうかの情報は与えられず、本人の主観的な判定に依存している。それに対してIMでは、タイミングの誤差をリアルタイムに音や光でトレーニー（トレーニングを受ける人）にフィードバックし、その客観的な情報に基づいてトレーニー自身がタイミングを調整できるといった双方向（インタラクティブ）なトレーニング

システムである。

IMシステムは、一定のテンポを正確に提示し、トリガー（リズムに合わせて手や足のタイミングをとるスイッチ）からの情報によって1000分の1秒（ミリ秒）単位でタイミング誤差を計測するマスターコントロールユニット（MCU）というハードウェアを中心に、手用のボタントリガー、足用のマットトリガー、歩行用のインモーション・インソールトリガーという3種類のトリガー、リズム音を聞くためのヘッドホンあるいはスピーカー、そしてトレーニング方法の設定やタイミング誤差の

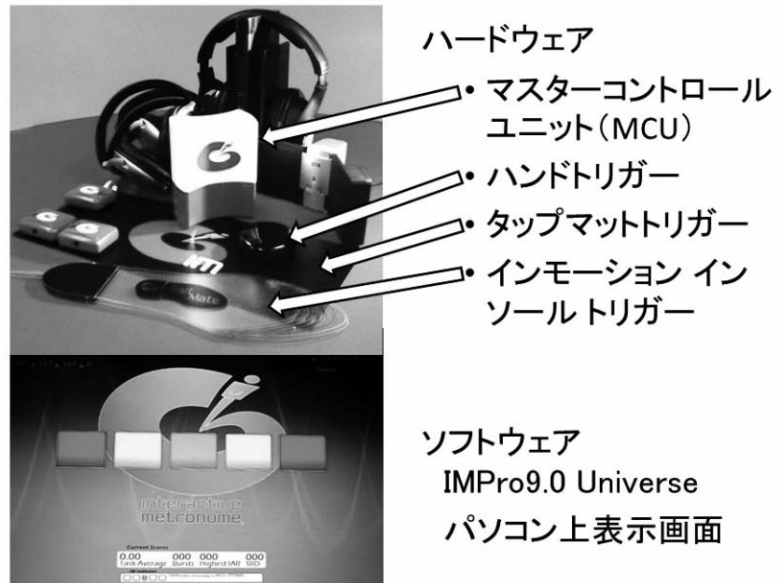


図1 IMシステムの構成

記録などを管理するIMProというソフトウェアとそのソフトウェアをインストールするパソコンで構成されている（図1）。

IMトレーニングは、集中した反復練習を長期間継続することで脳に可塑性の変化を生じさせるため、モチベーションを維持させる仕組みが重要となる。IMProというソフトウェアは、IM機器本体であるMCUとUSB接続されたパソコン上で動き、タイミング誤差のフィードバックを多様なモダリティでトレーニング者へ提示することを可能にしている。そのフィードバック方法には、大きく分けて、何もフィードバックしないモード、音だけで聴覚フィードバックするモード、実際の誤差情報を数字や誤差の大きさを色分けした部分の点灯で視覚フィードバックするモード、そして聴覚と視覚の両者によりフィードバックするモードといった4種類が用意されている。特に、視覚フィードバックでは、ゴルフ、バスケット、野球、釣り、パズル、そして動物や妖精キャラクターのアクションなどゲーム要素を取り入れたアトラクションによりトレーニングに対するモチベーションを高める工夫が施されている（図2）。



図2 IMに用意されているゲーム画面

IMProには、トレーニングの設定だけでなく、タイミング誤差の記録と統計処理の機能が装備され、その記録データはパソコン内のハードディスクなど記録媒体だけでなく、インターネットを介して米国のIM社が管理する専用サーバーに保存するといったクラウドシステムも用意されている。このクラウドシステム

を使えば、クリニックにある特定のパソコンに依存されることがなくなり、インターネット環境さえあれば世界中どこからでもトレーニーを遠隔でトレーニングしデータ管理することが可能となる。このような遠隔トレーニングシステムは、eクリニックと呼ばれ、IMHomeというコンパクトなMCUをトレーニーが導入し、自宅のパソコンとUSB接続することで時間や場所を拘束されことなく自由にトレーニングが可能になることもIMの大きな特徴である。ただし、このeクリニックシステムを使うためには、トレーナー（トレーニングを指導する人）が専門の教育と実習を行い試験に合格してIMプロバイダーという資格を米国IM社から取得する必要がある、その資格取得によりeクリニックシステムの使用権利が与えられる（図3）。



図3 IMのeクリニックシステムの概要

eクリニックを通じて、トレーナーが遠隔でトレーニング計画をトレーニーへ送付し、そのトレーニング結果を再びトレーナーが受信する。その結果に基づいてトレーニング計画をより効果的なものに修正する。

3. IMトレーニングの手順

IMには、アセスメントとトレーニングのメニューが用意されており、基本的にはタイミング誤差を指標としたアセスメントおよび障害や症状に応じた特異的な評価尺度を併用した査定を行った後でトレーニングを実施する。アセスメントには、ショートフォームアセスメント（SFA：聴覚フィードバック有無の両手動作2課題）とロングフォームアセスメント（LFA：SFAに加えて手と足の複合動作の合計14課題）、そしてアテンドオーバータイム（AOT：両手動作を10分間継続して実施する課題）の3モードが用意されている。通常はLFAを実施し、手と足の左右差や協調性、姿勢バランスなどを評価する。

トレーニングは、以下のように4段階に分かれており、1分間に54拍というテンポを基準にしてタイミングを合わせるように練習する。練習時間は、レベル1で10分から開始し、レベル4になると30分から1時間まで長くなる。IMトレーニングの基本は、テンポのリズム音に集中して正確にリズムを認知し、次に生じるリズム音を予測して手足でトリガーを叩くタイミングを調整することであり、これを反復して実施できる注意力と集中力を鍛えることが重要となる。

レベル1：両手動作だけでリズム音に慣れて、徐々にリズム音とトリガーを叩くタイミングを合わせる。

レベル2：さらにタイミング誤差の聴覚フィードバックを参考にしてタイミングを合わせる。

レベル3：両手動作だけでなく片手や両足動作など全身を使ってタイミングを合わせる。

レベル4：全身のタイミング誤差を小さくし、その状態で長時間維持できるようにする。

このように4段階のトレーニングを通常は1ヶ月から3ヶ月継続して実施し、定期的にアセスメントも実施しながらレベルアップのタイミングやトレーニング時間、フィードバックの方法などを調整する。また、IMにはアセスメントの査定内容、症状や障害の程度に応じたトレーニングのテンプレートが用意されており、IMプロバイダーの資格を得てIMProを導入すると自由に利用することができる。

Ⅲ. IMの科学的根拠

米国IM社の科学顧問である McGrew 博士は、IMの効果に関する3段階の説明モデルを2012年に提案している⁴⁾。第1段階は、IMによって人の脳が持つ脳内時計（internal brain clock）と時間情報処理（temporal processing）の機能を活性化し、その神経効率が高められる。第2段階は、この神経効率が高まった結果、脳内の前頭葉、頭頂葉、前帯状皮質、前部島皮質、大脳基底核、小脳といった重要な脳神経ネットワークにおいてさらに効率的な情報伝達と同期が可能となる。第3段階は、脳神経ネットワークが強化されることによりワーキングメモリー（作業記憶）の活性化が生じることで、注意制御システムの効率が向上し、運動・認知機能全般の働きを高めることが可能となる。

特に、注意制御システムは、内的妨害（今すべきこと事以外の事を考えてしまう）や外的妨害（周囲の騒音や人の動きに気が散る）を避けて、意識を今なすべきことに集中させる能力（マインドフルネス）であり、知識の記憶や学習能力、運動やバランス能力、そしてスポーツ競技のパフォーマンスにも大きな影響を及ぼしている。したがって、この注意制御システムの機能不全は、子どもの発達障害や成人の運動障害あるいは認知症などとも関連することは容易に理解できるであろう。McGrew のモデルが興味深いのは、この注意制御システムが成立するために脳内時計と時間情報処理の機能が重要であることを言及した点にある。この説明モデルを裏付ける科学的根拠は、これまで行われてきた脳科学と神経心理学の研究によって明らかにされた知見に基づいている。

Shaffer は、実際にAD/HDの子どもの対象としてIMを使ったトレーニングの効果を無作為化比較対照試験（RCT）によって検証している⁵⁾。対象者は56人の少年（6歳から12歳）であり、年齢、薬物摂取状況そしてAD/HDの重症度でマッチさせた3群へ無作為に割付けられた。3群は、1回1時間のIMトレーニングを3週から5週にわたり合計15時間受けた19人をIM群、非暴力的なコンピュータ・テレビゲームを行った19人をビデオ群、そして介入を全くおこなっていない18人を対照群と設定した。アウトカム評価は、注意と集中（TOVA）、臨床所見（CBCL）、知覚と運動機能、そして知覚および認知スキルなどについて、合計58のテストを実施し、3群の統計解析は、年齢、薬物摂取状況、ADHDの重症度、家庭の社会経済状況、両親の教育歴などが調整された。その結果、IMでトレーニングした子どもは、テストしたほとんどすべての項目で有意な改善を示した。特にIM群は、ビデオ群と比べてTOVAテストにおける注意課題のエラーや不注意が減少しており、発語や読み書きといった学習スキル、そして攻撃性の抑止などについても有意な改善が認められていた。

一方、ロンドン王立精神医学研究所の認知神経科学者である Rubia は、AD/HDの子どもは脳内時計がゆっくり進むため、時間を長く感じてしまうことが落ち着いて集中できない原因であることを明らかにしている⁶⁾。しかも、脳内時計の機能を時間計測課題によって測定することで、障害を70%の確率で正しく診断できたと報告しており、IMではないが子どもの脳内時計を調整することを中心にした認知行動療法を開発して臨床研究を進めている。ま

た、AD/HDの治療薬であるリタリンは、時間知覚とミリ秒単位の判断を向上させることも実証している⁷⁾。

これらの臨床研究による知見は、ごく一部ではあるが注意制御システムの機能不全が主な病態であるAD/HDの診断と治療に脳内時計や時間情報処理が大きく関与することを裏付けている。また、ワーキングメモリと注意制御システムの深い関連性から考えると、認知症や外傷性脳損傷によるワーキングメモリの機能不全が脳内時計や時間情報処理に関与するといった知見も重要となるため以下に紹介しておきたい。

東京女子医科大学の大塚らは、75歳以上の地域住民141名を対象として、脳内時計の実験を行った⁸⁾。この実験では、仰臥位で頭の中に「時計の秒針」を思い浮かべてもらい、10秒が経過したと思ったら合図を出すという課題を7回実施して、その脳内時計の正確性が評価された。同時にMMSE (mini mental state examination) の評価も実施し、3年間の追跡調査を行ったところ、脳内時計つまり10秒間を正確に計数できる高齢者ほど認知機能が維持され、3秒以上大きいと認知症リスクの高まることが明らかにされた。

また、筆者は、健常高齢者20名を対象として、IMのタイミング誤差を測定するSFA、認知機能の簡易評価であるMMSE、ワーキングメモリ能力の指標としてよく使われるN-back課題⁹⁾、そして大塚らが実施した脳内時計の誤差測定によるアウトカム評価を行った¹⁰⁾。MMSEの得点とIMのSFA、N-back課題の所要時間と脳内時計の誤差には関連が認められ、IMのタイミング誤差はワーキングメモリ能力や脳内時計の誤差などを反映する可能性が示唆された。

米国コロラド州にある国防総省立脳損傷センターのNelsonらは、爆風による脳損傷（軽度～中等度の頭部外傷）を受けた50人の傷病兵をIM群と対照群の2群に無作為割付したRCTを実施し、26項目の神経心理学検査と64チャンネル脳波検査によりアウトカム評価を行った¹¹⁾。IM群は、1回1時間のIMトレーニングを合計15回実施し、対照群はその期間一般的なりハビリテーションケアを受けた。その結果、認知的作業能力やワーキングメモリの能力などが対照群と比較して有意に改善し、脳波検査でも前頭前野から頭頂皮質の活動が有意に高まっていた。

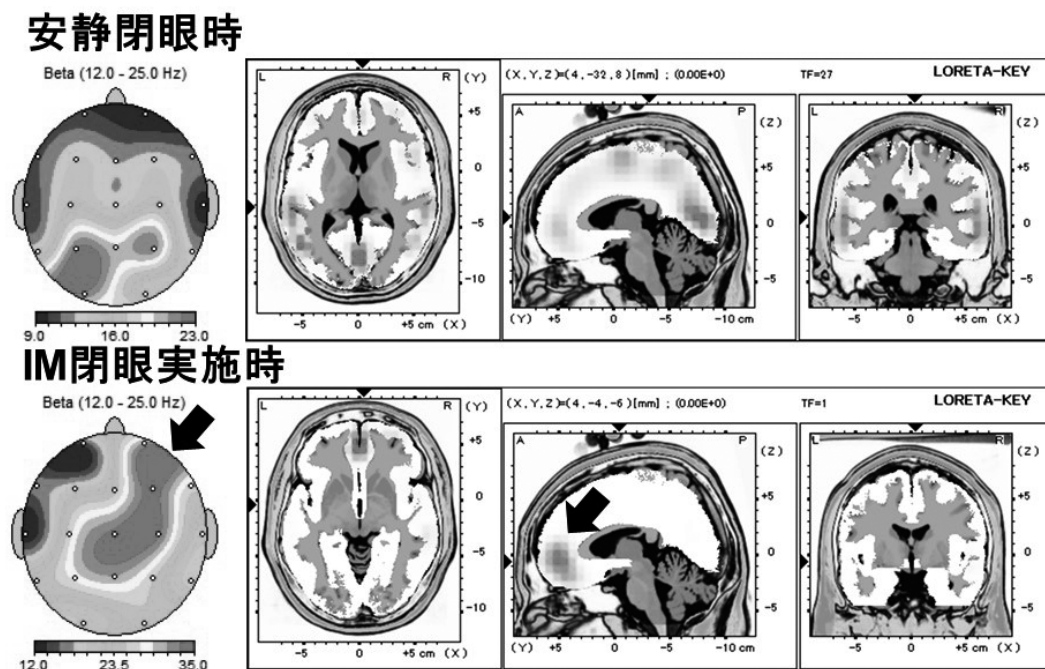


図4 IM実施中における脳波の分析結果

IMを閉眼で実施している際に測定した19ch脳波データの5秒間を周波数分析し、 β 波トポグラフィー（左図）とLORETA（右図）を行い、前頭葉に活動（ \leftarrow ）を認めた。

ワーキングメモリは、前頭前野背外側部と前部帯状回が相互作用して機能していることがわかっており、成人であっても脳内時計や時間情報処理能力を維持・向上させることがワーキングメモリ能力にとって重要であるといえるであろう¹²⁾。そこで、実際にIMトレーニングが脳の前頭部を活性化させるかどうかを確かめる実験を行った。この実験では、51歳の女性1名を対象としてIMトレーニングを2分間実施している際の脳波を測定した。安静時と比較すると脳波の周波数分析マッピングでは、脳の活性化を示す β 波が前頭部に多く認められ、3次元脳内電流源密度分析（LORETA：low resolution brain electromagnetic tomography analysis）を行ったところ前頭部に脳波の活動源が確認することができた（図4）。なお、この実験は筆者の前任校である甲南女子大学にて研究倫理委員会の承認を得ており、現在も進行中の研究である。

IV. IMのリハビリテーションへの応用

IMは、従来の運動・認知機能のリハビリテーションに欠けていた脳内時計と時間情報処理能力を高めるというコンセプトを導入した新しいトレーニング方法である。なぜIMが運動・認知機能の改善に効果を認めるのかといった科学的根拠の裏付けは十分ではないが、この分野の基礎研究が最近増加傾向にあり、それらの蓄積によってそのメカニズムが徐々に明らかにされるであろう。

基礎研究による解明は今後の進歩を待たねばならないが、すでに1つ以上のRCTによる臨床研究で効果が実証された疾患には、AD/HD、発達性協調運動障害（DCD）、外傷性脳損傷（TBI）があり、RCTではないが単一あるいは複数症例で効果が検証された疾患には、自閉症、脳卒中片麻痺、脳性まひ、パーキンソン病、言語学習障害（LLD）がある。また、疾患ではないが、高齢者の認知機能や姿勢バランス能力、子どもの基礎学力、ゴルフのショットの正確性などに対してもIMの効果が確認された研究報告があり、これらはすべてリハビリテーションとの関連が高いため、IMのリハビリテーションへの応用可能性は非常に高いと考えている¹³⁾。

特に、子どもの発達障害や高齢者の認知症、脳卒中片麻痺や脳性まひの運動障害やパーキンソン病など、近代リハビリテーションの技術を集めても改善が困難な障害に対して、多少であっても効果が期待できるのであればIMを積極的に導入すべきであろう。IMの利点は、リズム音に手と足の動きを同調させてタイミングをとるといった非常にシンプルなトレーニングであり、2歳程度の幼児から高齢者まで適用範囲が広く、生体への侵襲も全くないため、従来のリハビリテーションへ併用して使用可能なことである。

ただし、現在の問題点は、リハビリテーションの主な対象疾患である脳卒中やパーキンソン病、そして発達障害や認知症に対してRCTによる臨床研究が国際的にも不足していることやIMシステムが日本における医療機器の薬事承認を得てないことであり、今後はIMの臨床研究を進めて科学的根拠を確立し、医療機器の薬事承認が得られればリハビリテーションの医療現場へも導入が進むものと考えている。

V. おわりに

本稿では、IMの歴史や概要からトレーニング方法、そしてIMの科学的根拠とリハビリテーションへの応用可能性について解説した。IMのコンセプトとなっている時間という問題は、古くから哲学や物理の問題として思索されてきた。近年脳科学の発展によって時間認知は人間の脳機能の働きとして重要な研究課題となり、日本でも平成26年度から「こころの時間学」という文科省科学研究費補助金の新学術領域研究が設置され国家レベルで戦略的研究も行われるようになった¹⁴⁾。また、神経病学の専門雑誌である「BRAIN and NERVE－神経研究の進歩」においても、2013年に「特集こころの時間学－現在・過去・未来の起源を求めて」という特集記事が発表されており、医学

分野においても基礎研究から臨床研究まで時間に関する関心の高まりがうかがえる¹⁵⁾。

時間が興味深いのは、それが確実に存在するものの実態が時計でしか認識できないことにある。これは意識と同じ認識であり、時間の解明は意識の解明であるといえるだろう。そして時間は、それを知覚する感覚器官がなく、脳の主観的な体験であり、脳科学の研究成果は時間知覚に脳の広汎な部位が関与していることを明らかにしている。人間以外の動物も生体リズムとして時間知覚をしているが、時間を意識することはなく、これは人間だけに与えられた主観的な体験である。したがって、時間をコンセプトにしているIMトレーニングにはまだまだ秘められた可能性が多くあると考えており、今後もIMの基礎研究と臨床研究を進めていきたい。

文献

- 1) Kudo, K., Miyazaki, M., et al.: Selective activation and deactivation of the human brain structures between speeded and precisely timed tapping responses to identical visual stimulus: an fMRI study. *NeuroImage*, 22, 2004, 1291-1301.
- 2) Matsumoto R, Nair DR, Lapresto E, et al.: Functional connectivity in human cortical motor system: a cortico-cortical evoked potential study. *Brain*, 130, 2007, 181-197.
- 3) Allman, MJ and Meck, WH. : Pathophysiological distortions in time perception and timed performance. *Brain*, 135, 2012, 656-677.
- 4) McGrew, KS: The Science Behind Interactive Metronome: An Integration of Brain Clock, Temporal Processing, Brain Network and Neurocognitive Research and Theory. USA: This MindHub™ publication is a non-peer reviewed working paper, 2012.
- 5) Shaffer, RJ, Greenspan, SI, et al.: Effect of Interactive Metronome Rhythmicity Training on Children with ADHD. *Journal of Occupational Therapy*, 55, 2001, 155-162.
- 6) Rubia K, Alegria AA, Brinson H.: Brain abnormalities in attention-deficit hyperactivity disorder: a review. *Rev Neurol*, 58, 2014, S3-S18.
- 7) Rubia K, Halari R, et al.: Impulsiveness as a timing disturbance: neurocognitive abnormalities in attention-deficit hyperactivity disorder during temporal processes and normalization with methylphenidate. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 364, 2009, 1919-1931.
- 8) 大塚邦明, Tsering Norboo, 川崎孝広, 他: 高所地域 Ladakh 住民に観察された認知機能の低下と動脈硬化度の亢進: 平地 (日本) 住民 (25,211例) と高所地域 Ladakh 住民 (1,376例) の比較. *ヒマラヤ学誌* No.10, 2009, 25-38.
- 9) Owen AM, McMillan KM, et al.: N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, 25(1), 2005, 46-59.
- 10) 辻下守弘: 高齢者における時間認知とワーキングメモリーの関連性. 第2回認知症の早期発見、予防・治療研究会抄録集, 2, 2015, 6.
- 11) Nelson A, MacDonald M, et al.: Effects of Interactive Metronome® Therapy on Cognitive Functioning After Blast-Related Brain Injury: A Randomized Controlled Pilot Trial. *Neurophysiology*, 2013, doi: 10.1037/a0034117.
- 12) 荳阪 直行: ワーキングメモリ研究の動向: 高齢者を中心に (特集 ワーキングメモリ研究の最前線). *老年精*

神医学雑誌 25(5), 2014, 491-497.

13) <https://www.interactivemetronome.com/index.php/science/im-specific-research.html>

14) http://mental_time.umin.jp/

15) 北澤 茂, 他: 特集 こころの時間学－現在・過去・未来の起源を求めて. BRAIN and NERVE－神経研究の進歩 65(8), 2013, 911-955.