

# 身体の主観的分節構造が技能動作に与える影響

## Some effects of subjective body organization on motor skill performance

阪口 豊<sup>\*1</sup>  
Yutaka Sakaguchi

<sup>\*1</sup> 電気通信大学 大学院情報理工学研究科, 技能情報学研究ステーション  
University of Electro-Communications, Graduate School of Informatics and Engineering

When executing/acquiring motor skills, people often try to observe and feel their body parts inwardly so as to obtain some clues to improve their movement. In the present article, the author discusses how such internal observation affects the performance of body movement from the viewpoint of computational motor control. Especially, the author focuses on two concepts “internal attention” and “subjective body organization,” and proposes a hypothetical view that the internal attention alters the subjective body organization which modulates the structure of motor control. This view may give an answer to the question why the internal attention often deteriorates the motor skill performance.

### 1. はじめに

楽器演奏, スポーツ動作, ダンスといった身体技能の遂行や習得の過程では, 多くの人が自分の身体の状態を内的に観察する. すなわち, 特定の身体パーツの位置・姿勢や動き, 関節の角度, 力感, 手応えといった主観的な感覚を, 動作の調整や試行錯誤の手がかりとして利用している. このような主観的な感覚(観察)が動作の遂行にどのような影響をもたらすのか, そのメカニズムを考察するのが本稿の目的である.

この考察を進めるうえで, 本稿では特に「注意」の働きと「身体」の分節」という観点をとりあげる. 「注意」という用語の定義は難しいが, ここでは, 運動中に特定の箇所に意識を向けてその状態を観察する作用であるとする. Wulf [Wulf 2007, 2013]は, 一連の研究を通じて, 「注意」の向け方に依存して身体技能のパフォーマンスが大きく変わることを明らかにしているが, ここでの興味は, それがどのようなメカニズムによって生じるかである.

一方, 「身体」の分節」とは, 個体が運動する際に, ハードウェアとしての身体をどのように構造化して使うかという概念である. ヒトの身体には極めて多くの関節自由度, 筋, 感覚受容器があるため, 同じ目的の動作をしようとしてもそのための「身体の使い方」(どの感覚を手がかりにどのように身体を動かすか)が無数に存在し, その使い方に応じて実行される運動は大きく異なるものになる. そして, このような運動の違いが技能動作の質を左右していると考えられる. なお, 複数の身体部分を協調して機能させるシナジー (motor synergy) も身体分節の一種であるが, ここではより主観的な意味合いでの分節をとりあげる.

本稿では, 「注意の働きが身体」の分節構造を変化させて脳内での運動計画・制御プロセスに影響を及ぼすため生成される身体運動が変化するという仮説を念頭において, そのプロセスを計算理論や計測制御システムの観点から議論する.

### 2. 問題意識

#### 2.1 主観的な感覚に対する計算論的アプローチ

冒頭で述べたように, 技能動作の遂行や習得過程において個体が感じる主観的, 内省的な感覚は本質的である. 何らかの

測定装置で自分の運動の様子を客観的に計測したものを観察する場合でも, 多くの人はその観察内容を主観的な感覚と対応づけて理解しようとするから, 主観的な感覚が果たす役割は大きい. 運動中に個々人が感じる主観的な感覚は他者からはうかがい知れないが, そこにはおそらく大きな個人差があり, それが個々人の運動を特徴づけていると推測される. 技能研究においてあらためて一人称研究 [諏訪 2015a] が注目されているのは, 技能動作がその人ごとの主観的な体験を通じて遂行されているためであろう.

さて, 諏訪ら [諏訪 2015b] は, 技能の上達において, この主観的な体験を感覚・知覚に留めたままにせず言語化することの重要性を指摘している. 確かに, 個体にとって, 主観的な体験を知識として整理・蓄積し, 論理的推論を通じてさらなる試行錯誤を生み出すうえで言語化は必須である. 一方で, 本研究の目的は, そのような主観的な体験が技能の遂行・習熟にどのように関わっているかを脳の計算メカニズムとして理解することである. この目的のためには, 個体が主観的な感覚を得る際は脳内でその感覚に対応した何らかの物理的事象が生起しているという前提の下で, その事象を客観的に表現し, それが運動制御プロセスに与えるメカニズムを定式化しなければならない. ニューラルモデリングの手法では神経活動にその表現の土台を求めるが, 本研究では, 脳情報処理(計算)という機能的側面に注目するため, 表現の土台を計測制御メカニズムに置くことにする. これは, 運動実行中に個体が経験する主観的な体験を脳の計測制御プロセスにグラウンディングするアプローチとよいため.

脳が運動遂行中に計算や制御に利用できる感覚信号・変数は多数存在し, さらにそれらを組み合わせて得られる変数は無数にある. 上記のアプローチにおいて, 個体が主観的に感じる感覚量はそのような変数の一つに対応づけられる(感覚量と変数との対応関係は個体ごとに異なるとしてよい). このように個体の主観的な感覚を脳システム内の変数と対応づけることで, 個体の判断や意思決定を脳内の計算プロセスとして記述できるので, それらを運動制御メカニズムと結びつけることにより主観的な体験が運動制御に及ぼす影響を客観的に議論できるようになる.

#### 2.2 身体」の分節: 「対象」となる身体の部分

まず, 「自分の身体の状態を内的に観察する」というプロセスについて考えることから議論を始めたい.

日常生活の大部分において身体の状態が意識に上ることはまずない. 日常的な身体動作は詳細な過程を意識しなくても自

連絡先: 阪口 豊, 電気通信大学大学院 情報理工学研究科  
機械知能システム学専攻, 〒182-8585 東京都調布市  
調布ヶ丘 1-5-1, yutaka.sakaguchi@uec.ac.jp

然に起きるものであり(「自動化(automatization)」),その過程で特定の身体部分が意識されることはない。しかし、例えば、歩いている最中にふと足首の動きが気になってその動きをコントロールしようと思った時点で、足首は観察対象・制御対象として意識に上ってくる。つまり、意識されていなかった身体の一部が意識される「対象」として浮かびあがってくる。この過程は、ハードウェアとしての身体が、意識に上る「対象」とそうでない部分(「対象外」)に分節される過程として捉えることができる。

何が「対象」として分節されるかは、そのときの状況次第である。同じ動作をしていても「対象」となる身体部分の可能性は無数にあり、また、何が「対象」になるかは動作そのものとは独立に決まりうる(それゆえ、ある動作を実行するとき何を手がかりにするかは個体に任されている)。しかし、一般に、外部物体に触れてそれを操作しようとする場面では、その物体あるいは物体に接触してそれを動かす部分(最終効果器)が「対象」となりやすい。例えば、バイオリンを弾くときには弓でこする弦や弓が「対象」となりやすい(この例からわかるように、物理的な意味での自己身体だけでなく自己の拡張としての道具も「対象」となりうる)。一方、「立ち上がる」「歩く」といったように自分自身が動く場面では、一般に分節が生じにくく、特定の身体部分が「対象」として意識されることは少ないようである。

### 2.3 ハードウェアとしての分節, ソフトウェアとしての分節

前節では、身体が意識に上る「対象」とそうでない部分に分節されることを述べたが、これは、ハードウェアとしての自己が二つの部分に分けられることを意味している。その一方で、ハードウェアとしての自己を観察・制御するソフトウェア(情報処理)の側にも意識の上の部分と意識に上らない部分がある(図1)。つまり、ソフトウェアとしての自己の中には、物事を感じたり意思決定したりする部分と、さまざまな計算や処理を担うもののその過程が意識に上らない部分(「自動化」を担う部分)が存在する。このようなソフトウェアとしての二つの自己は、Gallwey [Gallwey 1975]のいう「セルフ 1」「セルフ 2」に対応するものと考えられる。また、アレクサンダーテクニク[小野 2007]でいわれる「プライマリコントロール(primary control)」は、意識の上らない自己に相当すると考えられる。

ここで注意すべきことは、ハードウェア(身体)における意識の上の部分とそうでない部分の区別と、ソフトウェア(脳内情報処理)において意識に上る部分とそうでない部分の区別を別々に捉える必要があることである。

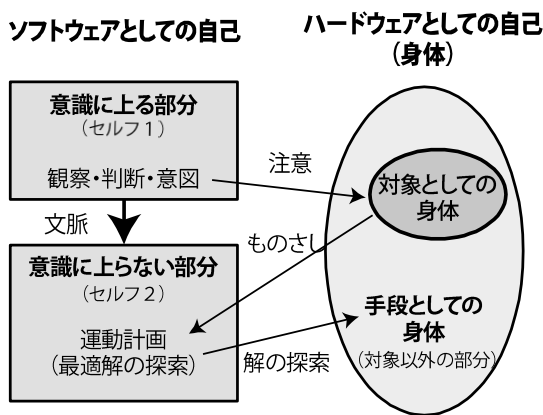


図1 モデルの概念図

### 2.4 身体に分節と運動制御の関係

以上の準備の下で、身体を内的に観察することが随意運動制御に影響を与えるメカニズムに話を進める。

随意運動とは、個体が自分の身体を望むように操作することである。2.2節での「身体に分節」の議論に基づけば、身体の特定期間を望ましい形で動かしたいとき、個体はその部分の動きを意識して観察するので、その部分は「対象」として分節されているはずである。つまり、随意運動中に「対象」となるものは、その状態が運動の成否に直接関係するものである。

運動制御の計算理論では、運動指令決定(運動計画)の問題を「課題内容に表す評価関数を設定しそれを最適化するような運動指令を求める」という考え方に基づいて定式化する。上記の問題をこの観点から考えると、「対象」の状態が運動の成否を決定づけるということは、運動計画のための評価関数が「対象」に関わる変数に基づいて計算されることを意味する。つまり、この評価関数には「対象」の状態を表す変数が陽に登場する。このことは、「対象」を望ましい状態にすることが随意運動の目的であることを考えれば自明であるが、これを逆の視点から見ると、「対象」ではない身体部分に関わる変数は評価関数には陽に表れず、それらの値は最適化計算の結果として陰に決定されることを意味する。例えば、手を目標に運ぶ到達運動の運動計画では、手先位置は課題成績に決定する変数であるから評価関数に陽に現れるが、その実行に参加する肩や肘の位置・関節角は評価関数には陽には現れず、運動計画の結果として決定される。

以上まとめると、運動制御の場面において、「対象」に分節された身体部分は運動成績評価を決定づけるものさしとして働き、それ以外の身体部分は、「対象」を望ましい状態にするための手段として働く(図1)。到達運動の例を考えれば、運動の成績は手の位置で決まるが、手を正しくその位置に運べるかどうかは肩や肘が適切に動くかどうかにかかっている。その意味で、「対象」以外の身体部分こそが運動の実行部隊として重要な役割を担っていることに留意すべきである。

### 2.5 注意の働きによる運動計画の変調

次に、もう一つの観点である「注意の働き」について考える。随意運動の遂行中に「対象」として捉えられるのは、手先のような「最終効果器(end effector)」だけではない。到達運動の際に右肘の動きが気になってその動きを調整しようとするれば右肘もまた「対象」となる。

このように、最終効果器以外の身体部分に注意を向けることは、身体技能を習得したことがある人であればだれでも経験したことがあるであろう。このとき、注意を向けた先は観察や制御の「対象」になっているはずであるから、身体内部の変数に注意を向けるという主観的な操作は、その身体部分を「対象」として分節する効果を生み出す。

前節で述べた運動計画モデルに照らし合わせれば、ある身体部分を「対象」として分節することは、その部分に関わる変数を運動計画の評価関数に陽に組み込むことになるから、身体の特定期間付加的に注意を向けることは、通常の運動時には運動計画の結果として決定されていた変数(つまり、評価関数を最適化するための手段であった変数)を、評価関数を左右する変数に変えることを意味する。その結果、それまで最適化の手段であった変数には制約が加わることになるので、最適化問題を解く際の解空間の自由度が減らす効果が生じる(後述するように、このような自由度の削減は、運動の遂行にとってプラスにもマイナスにも働きうる)。

以上まとめると、運動の本来の目的に直接関係しない身体部分に付加的に注意を向けてそれを「対象化」すると、運動計画の評価関数と解空間が変化し、結果として得られる運動指令の最適解が変容することになる。次節で述べるように、この仮説は、運動実行中に注意を向ける先によって運動パフォーマンスが変化するという現象に対して運動計画・制御メカニズムの観点から一つの解答を与えるものである。

## 2.6 外的注意と内的注意の働き

Wulf は一連の研究において、注意を自分の身体に向ける(内的注意)よりも外部の対象に向ける(外的注意)方が運動課題の遂行・習得の成績が向上することを示している[Wulf 2007, 2013]。彼女の主張を端的にまとめれば、①注意を身体内の変数よりも外部変数に向けた方が、パフォーマンスがよく学習も速く進む。②外部変数は運動の結果を反映した変数であるのがよく、手近にあるものより離れたところにあるものがよい。③身体内部の変数に注意を向けると筋活動の増大(同時活性度の増加や収縮する筋範囲の拡大)が生じ、それが運動精度や速度を低下させている可能性がある、となる。彼女は広範囲のスポーツ動作において注意の効果を実証しているが、一方で、それらの多くは注意条件の違いによるパフォーマンスの相対的変化を示したもので、注意がパフォーマンスに影響するメカニズムについては十分に議論されていない。

前節で議論した仮説に基づけば、Wulf の結果は次のように説明される。すなわち、身体外部の変数に注意を向ければ、身体内の変数はすべて運動を実行するための手段として自由に働けるのに対し、身体内部の変数に注意を向ければ、その変数が評価関数に組み込まれて制約を受けるため、結果としてパフォーマンスが低下するということである(2.7節も参照)。

ところで、外的注意の最たる例は楽器演奏における音に対する注意である。楽器演奏において奏者が求めるものはあくまで「望ましい音色、音楽」であって、望ましい身体運動ではない。例えば、バイオリン奏者が注意を向ける先は「楽器の奏でる音」であり、弓をもつ右手の姿勢でも弦の擦る手応えでもない。弓を操る右手や弦を押さえる左手指は「欲しい音」を出す手段にすぎず、それらは「対象」ではない。この意味で、演奏に集中している楽器奏者は自然に外的注意を実践していることになる。そのような奏者が何らかのきっかけで内的注意の状態(指の動きが気になるなど)に陥ってしまうと、上述した理由から身体の使い方に変調をきたすことになる。Wulf のいう内的注意の弊害はこのような場面でもっとも顕著に表れると考えられる。

ただし、Peh [Peh, 2011] の指摘するように、内的注意は常に悪い作用をするわけではない。上述したように、身体変数を「対象」として感じることは、運動計画の問題を解く際の自由度を限定する効果を生むが、この効果が運動の実行や学習に対してプラスに働く場面はいろいろと考えられる。そもそもバイオリン演奏のような複雑な技能動作は、制約条件が全くない状況で最適化問題を解いて適切な運動指令が得られるような単純な問題ではない。バイオリン奏者が外的注意で演奏できるのは、長い経験の中でさまざまな要素動作やシナジー、内部モデルを獲得し、自由度を縮約した空間で運動計画できる体制を獲得しているためと推測される。逆にいえば、このような複雑な技能動作を習得する途中の過程では、身体内部のさまざまな変数に注意を向け観察しそれに関わる内部モデルの学習を促進したり、その部分の動作を制約することで部分問題を解決して要素動作を習得したりすることが必要である。内的注意は、そのような身体技能の土台を築くうえで重要であるにちがいない。

本稿の範囲を超えるが、このような注意の働きは、学習の進行に応じて制約条件を動的に変化させて学習内容を変えつつ逐次的に能力を拡張する学習モデルと組み合わせることによって、計算モデルとして議論することができる。

## 2.7 「対象」として感じることの運動コスト

以上 2 節では、自分の身体部分を「対象」として分節することが運動計画問題の構造を変化させ、結果として運動パフォーマンスを変化させることについて述べてきた。本節の最後に、運動課題の遂行とは別に、身体部分を「対象」として感じることで自体の影響について述べておきたい。

ヒトが自分の身体を内的に観測する(知覚する)には、少なくとも二つのモードがあると考えられる。一つは、焦点的な注意を向けてその部分の状態を積極的に感じようとするモードであり、もう一つは、そのような注意を向けることなく身体感覚をそのまま受け入れるモードである。本稿で議論してきた「対象」としての観察は前者のモードであるが、最近注目を集めている「マインドフルネス(mindfulness)」[Kabat-Zinn, 1990] の状態や、アレクサンダーテクニク [小野 2007] における「ミーンズウェアバイ(means whereby)」は後者のモードに相当すると考えられる。

脳は、筋の長さを捉える筋内センサや皮膚変形をとらえる機械受容器からの信号に基づいて常に身体の状態を推定していると考えられるが、上述したように、ふだんこれらの感覚情報が意識に上ることはない。このように特定の感覚に意識を向けない(「対象」として扱わない)状況では、脳は、感覚器が送ってくる情報を受動的に受け取っていると推測される。一方、特定の身体部分の状態を積極的に感じようとするとき、脳は、運動系を使ってその情報を収集するのに適した形に自分の身体を組織化すると考えられる。例えば、身体のある部分で力を感じようするとき、脳は、拮抗筋対を同時活性化して関連する関節の粘弾性を調整し(バネとして働くようにして)、その関節を力センサ(バネばかり)として機能させるといった具合である。

このように、意識上の自己が身体変数を積極的に感じようすると、意識下の自己はその変数の観測・推定に適した形に身体構造を変化させるものと推測できる。これは能動的認識(active perception)の一種とみなせるが、運動制御の観点からみれば、この過程は「身体変数推定のための運動計画」として捉えられる。つまり、通常の運動計画が「運動課題の成績を最適化するような運動指令を求める」ことであるのに対し、ここでの運動計画は「知りたい身体変数に関わる情報量を最大化するような体制を作る運動指令を求める」といえる。

知りたい情報に応じて自身の身体を最適なセンサ系として組織化できることはヒトの優れた機能の一つである。しかし、運動中に身体の一部をセンサ系として運用しようすると、その身体部分は運動実行の手段としては最適な形では参加しえなくなるため、結果的に運動のパフォーマンスを低下させる可能性が生じる。つまり、身体に関する情報を積極的に得ようすると、それに伴って運動コストが生じるのである。このように考えると、Wulf が見出した「内的注意を向けることで筋活動が増大する」という現象の少なくとも一部は、運動遂行自体に対する影響としてではなく、観測のためのコストとして解釈することが可能である。

## 3. 計算モデルとしての定式化

本章では、前節での議論を運動計画の計算モデルとして定式化する。なお、このモデルの本質は前節での議論で尽きており、ここでの議論は、その内容を運動制御の計算理論の言葉として書き下しただけのものである。

### 3.1 モデルシステムの設定と構造

注意の働きが運動に影響を与えること的前提にはヒトの身体が膨大な自由度を有していることがあるので、身体構造を表現する場としては、冗長自由度をもつ筋骨格モデルを想定することが必要である。なお、効果器のモデルに実際の筋特性を模したモデルを用いることは必須ではないが、筋の粘弾性特性が重要な問題設定ではそのようなモデルの導入が有効であろう。

次に、運動計画・制御の基本構造としては、フィードフォワード制御(前向き制御)を用いる。これには、神経系での時間遅れを補償するという制御上の意味もあるが、むしろ、認知的過程を運動制御モデルに組み込むうえで、その時々々の運動計画を明示的に行うフィードフォワード制御の枠組みを用いるのが定式化しやすいという意味合いの方が大きい。身体や物体の状態に関わる変数は感覚受容器からの情報に基づいて計算・推定されるとする。また、システムは、異種感覚情報間の関係性やその時間変化、因果関係に関する内部モデルをもち、それらを利用して運動指令を計画するものとする。楽器演奏のような問題を取り扱う場合は、運動内容と演奏音との関係を表す内部モデルも必要であろう。運動習得の問題を扱う場合には、これらの内部モデルを学習させるメカニズムも組み込む必要がある。

### 3.2 運動計画のアルゴリズム

簡単のため、ここでは所与の運動課題を遂行するのに必要な運動指令は一度の運動計画で決定できる状況を考える(連続的な運動に対する運動計画は、運動計画を継時的に行なうことで実現できる)。このとき、運動指令  $u(t)$  は次の評価関数  $E$  を最小化する運動指令  $u(t)$  を求めることで決定される。

$$E(u(t)) = (\text{課題成績項}) + \Sigma (\text{荷重係数}) (\text{他の評価項})$$

第1項(課題成績項)については後述する。第2項は生態学的な要請に基づく項であり、解を一意に定める正則化項としても働く。具体的には、トルク変化量、エネルギー消費量、情報表現単純性などの運動指令生成原理を表す項があった。

注意による運動変化を扱う上で重要なのは第1項である。通常の計算理論では、第1項には客観的な評価量(例えば、到達運動では手先位置と目標位置の物理的誤差)が用いられるが、ここでは、運動成績は個体が主観的に評価するものであるという考えから、この項には「何をもちて課題がうまくできたと評価するか」を表す主観的な量を用いる。特に、本稿の議論では「対象」として分節されたものが課題評価を左右すると考えるので、「対象」となった身体変数に基づいて第1項を計算する。複数の身体部位に注意を向けてそれらの動きを同時に制御しようとするときには、それら複数の身体部位に関わる変数を第1項に組み込めばよい。

このようにモデル化することで、個体が自ら定めた評価基準に基づいてそれを最適化する運動指令が計算されることになる。注意を向ける先が変われば第1項の内容が変化し、それに伴って計画される運動指令が変化するため、その結果として実行される身体運動も変わることになる。2.7節で論じた「能動的認識」の作用を考慮する際には、知りたい変数に関わる情報量を第2項の中に組み込むことで、欲しい情報を得つつ目的の運動を実行する運動計画を得ることができる。

### 3.3 例題を用いた検証

提案したモデルの妥当性を、現実の技能動作をリアリスティックな身体モデルを使って模擬するといった複雑な問題設定で検

証することは難しい。まずは、問題の本質的部分を抽出し、単純化した例題を用いた例証が行うのが合理的である。

具体例として、「指先でレールをなぞりながらレール上の2点A、Bのあいだを往復する」といった課題は一つの例題として考えられる。この課題は、例えば、①指先とレールとの関係を気にせず二点間の到達運動として実行する、②目で見てレールから指が離れないように注意しながら運動する、③レールとの摩擦感を手がかりに運動する、といったようにさまざまな主観の手がかりに基づいて実行できる。これらの規範の下で実行される運動は、いずれも「二点間を往復運動する」という点では同じだが、注意を向ける「対象」がそれぞれ異なり、それに応じて実行される運動の性質が変化すると予想される。このような単純な例題を題材として、数値実験で観察される計測制御モデルの振舞いを、同じ運動課題を実行する際のヒトの振舞いと比較することで、提案したモデルの妥当性を検証できると考えている。

## 4. むすび

本稿では、技能動作を実行する個体が自身の身体変数を内的に観察することが動作のパフォーマンスを変質させるプロセスについて運動制御の計算モデルの視点から考察した。

運動制御の計算理論は神経科学やロボット制御にルーツをもつため、計算理論モデルに個体の主観的体験などの認知過程を取りこむ試みはあまり行なわれなかった。一方、ヒトの認知過程を主に議論する人工知能・認知科学の分野では、技能の研究といえども身体の運動制御過程まで踏み込んだ議論はあまりないようである。身体技能の問題は、運動する主体から見た主観的側面とその物理メカニズムという客観的側面の双方から検討する必要があるが、これらはいずれも「計算」という観点で論じられるはずである。本稿での考察はそのような試みの一つとして受け取っていただければ幸いである。

本研究の一部は文部科学省科学研究費基盤研究(B)「自己他者感覚に着目した技能遂行・習得メカニズムの探求」(課題番号 26280101)の下で行なわれた。本稿での考察は、楽器演奏、舞踊、武術等の実践家の方々、アレクサンダーテクニク等の指導者の方々の議論に基づくものである。また、本稿をまとめるにあたり、電気通信大学研究員の中嶋豊氏から貴重なコメントをいただいた。この場を借りて謝意を表す。

## 参考文献

- [諏訪 2015] 諏訪, 堀(編): 一人称研究のすすめ, 近代科学社, 2015.
- [諏訪 2015] 諏訪, 藤井: 知のデザイン, 近代科学社, 2015.
- [Wulf 2007] Wulf, G.: Attention and motor learning, Human Kinetics, 2007.
- [Wulf 2013] Wulf, G.: Attentional focus and motor learning: a review of 15 years, International Review of Sport and Exercise Psychology, 6(1), 77-104, 2013.
- [Peh 2011] Peh, S.Y., Chow, J.Y. and Davids, K.: Focus of attention and its impact on movement behaviour. Journal of science and medicine in sport. 14, 70-8, 2011.
- [小野 2007] 小野: アレクサンダーテクニク, 春秋社, 2007.
- [Gallwey 1975] Gallwey, W.T.: The inner game of tennis, Jonathan Cape, 1975 (後藤訳: インナーテニス, 日刊スポーツ新聞社, 1978).
- [Kabat-Zinn 1990] Kabat-Zinn, J.: Catastrophe living, Bantam Dell, 1990 (春木訳: マインドフルネスストレス低減法, 北大路書房, 2007)