

身体性の発達のダイナミクス

多賀厳太郎 (東京大学大学院総合文化研究科関連基礎科学系)

1 身体性と発達

身体が存在様式には、自己の運動を決定する主体的な系としての身体と、環境の一部の物理的な系としての身体という二義性がある。これらがどのようなメカニズムで統一されているのかということが、「身体性」の問題である。さらに、「身体性」がどのような過程で獲得されるのかということが「発達」の問題である。例えば、Piaget (1948) は身体性の問題を発達論的に解決しようとしたと言って良いだろう。彼は生まれたばかりの子供は主客未分状態であり、物理的な境界が自己と環境とを分けているにすぎないと考えた。そして、反射回路のように生得的に備わった基本的な要素「シェーマ」を用いて環境と相互作用する過程で、環境を同化して適応的な系としての自己の境界を拡大すると同時に、「シェーマ」の調節を通じて自己の内部の構造を複雑化するというメカニズムを考えた。また、はじめ子供が行う運動には意図は存在しないが、ある運動が、たまたまある目的をうまくかなえることが繰り返されると、運動の結果と目的が逆転し、これが意図の起源となると述べた。近年、新生児の能力の高さが次々と報告され、Piaget の概念には再検討が迫られている。しかし、彼の考えは、ある意味で複雑系における創発の概念と似ている。そして、脳や知性の問題を扱おうとしたら、物理的な系の変化に関する現象論と主体性や意図の起源を避けて通れないことは自明であろう。ここでは、後者の問題をにらみながら、前者の問題に力学系としての記述からアプローチしたい。

運動の発達過程で興味深いのは、系の自由度や複雑さの変化である。Gesell (1945) は子供の発達過程の膨大な観察から、いくつかの法則を導いている。例えば、(1) developmental direction 。運動の発達が頭から尾の方向、体幹から末梢の方向に進んでいく。(2) individuating maturation 。発達はばらばらな要素が次第に統合される方向に進むのではなく、はじめから全体に統合された状態から、個々の部分のはたらきが特殊化するように進む。(3) self-regulating fluctuation 。不安定化と安定化を繰り返しながら、ゆらぎをうまく使って発達が進んでいく。これらの法則は、力学系の観点から見ても非常に興味深いが、小児発達の臨床では古典的な経験則として受け止められ、現在に至るまで科学的な再検討はあまりなされていない。

近年になって試みられている発達理論の流れの一つは、発達の時間スケールの中でダーヴィニズム的選択を行うというものである。脳神経系の発生過程では、はじめニューロンやシナプスがたくさん作られるが、細胞死やシナプス除去が起こるという現象がある。これに基づいて Changeux はニューロン人間 (1983) の中で、Edelman はニューラルダーヴィニズム (1989) の中で、発達過程とはランダムで冗長な自由度を選択によって削るという主旨のことを論じている。しかし、このメカニズムだけでは、なぜ多様な運動が発達するかという点を説明することが難しい。ジェネティックアルゴリズムやニュー

ーラルネットワークの研究もこの意味で同様な限界を持っている。Quartz と Sejnowski (1996) はこれらの欠点をつき、発達とは構成的に系の自由度を増やしていく過程だという主張をしている。そして、神経系の構造が発達過程で複雑になっていくことを示すデータなどをあげているが、実際の運動などの機能のレベルの発達との関連ははっきりしない。一方、Scho"ner と Kelso (1988) は、運動を多自由度力学系における自己組織的なアトラクター生成の結果として捉える理論的枠組みを与えたが、Thelen と Smith (1994) は、これを運動や認知の発達過程に応用しようとしている。ただ、現時点では、現象レベルの変化を力学系のメタファーを使って説明することにとどまっている。

筆者らは運動制御系を、脳神経系の力学系と身体及び環境の力学系との結合系として記述することで、歩行などの運動がリアルタイムで生成される原理を示し (Taga et al. 1991)、脳神経系のダイナミクスと運動制御の現象とをつなぐことを試みてきた (Taga 1997a)。これらの研究では、実験での知見と整合するように力学系の記述が行われるが、最終的には初期条件や拘束条件は外から与えるということになる。しかし、発達の問題を扱うには、自由度の選択を含めて、拘束条件等の生成過程を明らかにしなければならない。ただ、リアルタイムでは一定であった拘束条件について、発達のダイナミクスを新たに考えるという、時間スケールの単純な切り分けは有効でないかもしれない。なぜなら、発達は過去の歴史の履歴をひきずりながらも、リアルタイムで刻々と系を変化させていく現象だからである。そこで、新しい理論的枠組みの構築に向けて、歩行の発達の問題に焦点を絞る。

2 歩行発達の現象論とメカニズム

McGraw (1940) は 82 人の子供の歩行の発達を誕生直後から 8 才まで詳細に観察し、発達段階を 7 つの時期に分類した。(1) The newborn stepping phase。新生児の脇をかかえて直立姿勢をとらせると、歩行に似た左右交互の足踏みを行う。これは原始歩行と呼ばれる。(2) The static phase。生後数ヵ月以内に、伸筋群の働きが顕著になり、特に首の姿勢を保つことが可能になる。脇を支えて直立姿勢をとらせても、脚を伸ばしたままで、原始歩行がみられなくなる。(3) The transition phase。脇を支えて直立姿勢をとらせると、両脚を屈伸して体を上下に揺らしたり、左右交互に足踏みをしたりする。(4) The deliberate stepping phase。より随意的に運動が行われるようになる。手をつなぐだけでも直立姿勢をとって足踏みできるようになる。(5) The independent stepping phase。独立歩行が可能になる。左右の脚の間隔を広くとり、腕を伸展し前方につきだして歩く。子供によって、直立姿勢を保ちながらゆっくりと歩く場合や、走るように速いテンポで足踏みをして転んで止まる場合がある。歩き始めて 1 週間ぐらいで急激に歩行の能力が高まる。(6) Heel-toe progression。踵から着地して、つま先で蹴る歩行パターンへと変化する。歩幅が広がって、良く前進するようになり、運動が安定化する。(7) The integrated erect locomotion。手を脚と逆位相で振って歩くようになる。これらの結果から、歩行の発達段階は神経系の成熟を反映しているという議論がなされた。特に、原始歩行が消失するという現象は、

大脳皮質の成熟によって皮質下の回路網が抑制を受けるというメカニズムによって説明できると考えられた。

Forssberg (1985) は新生児の原始歩行や独立歩行を開始した直後の子供の歩行について、EMGや関節角の変位の測定を行った。そして、成人の歩行との典型的な違いを見いだした。例えば、EMGのパターンは成人に比べて単純で、伸筋どうしがほとんど同期して活動しており、拮抗筋どうしも同期して活動する傾向が強い。遊脚の関節角度の変位も成人に比べて単純で、ほとんど同位相で変化する。また、脚の着地がつま先あるいは足裏全体でなされ、成人のような踵からの着地が見られないことが特徴である。これらの結果から、原始歩行は他の脊椎動物で確かめられているような脊髄のセントラルパターンジェネレーター (Grillner 1985) で作られるが、大脳皮質等が発達して脊髄の神経回路と結合し、原始歩行パターンから成人型歩行パターンへと変化すると考えている。脳性麻痺の子供では歩行パターンが踵着地に変化しないことも、それを裏付ける根拠として挙げている (Leonard et al. 1991)。

一方、Thelen らも、Forssberg と同様な計測を行い、同様な結果を得ている (Thelen & Cooke 1987)。しかし、Thelen はセントラルパターンジェネレーターの概念を批判し、歩行パターンの変化と神経系の成熟過程とは1対1に対応しないと主張している。例えば、軽い重りを脚につけると容易に原始歩行は抑制されることや、原始歩行が消失している時期の子供を水に入れると、容易に足踏みが起きることを見つけた (Thelen et al. 1984)。また、原始歩行消失期の子供を流れベルトの上にのせると、協調した足踏みを容易に誘発できることや、流れベルトの速度変化への対応ができることなどを示した (Thelen et al. 1987)。さらに、仰向けでの脚の周期的な蹴り動作は、足踏みと似た運動であるが消失しないことに着目し、蹴り動作と原始歩行の関連について調べた (Jensen et al. 1994)。

Forssberg は歩行の獲得やパターンの変化を神経回路網の変化から捉えようとしているのに対して、Thelen は系全体の自己組織性に着目して環境の拘束条件を操作する実験を行っている。つまり、同じ問題を別のアプローチから見ており、どちらが正しいと結論することはできない。こうした論争を解決して歩行の発達の理解に至るには、脳神経系と筋骨格系の構造やダイナミクス、環境との相互作用などを包括的に扱う枠組みが必要である。多賀らは、歩行の生成と制御が、神経振動子から構成される神経系と筋骨格系や環境との間のリズムのグローバルな引き込みによって行われることを提案した (Taga et al. 1991)。そして、成人の歩行の様々な特徴が、この原理をもとに構成したモデルで再現されることを示した (Taga 1995a)。また、様々な環境やタスクの拘束条件の変化に応じた歩行が生成されることを示した (Taga 1995b)。さらに、神経系の拘束条件の一過的な変化による随意的な歩行制御のメカニズムを提案した (Taga 1997b)。ここでは、歩行の発達過程の変化がどのようなメカニズムで再現できるかについて、神経系と筋骨格系との相互作用に着目した仮説をたてて、モデルの構築と計算機実験を行う。

3 歩行発達に関する仮説

McGraw (1940) は歩行の発達を 7 段階に分けたが、過渡状態などに関する分類の方法のいくつかには必然性はないと考えられる。ここでは、図 1 に示すように、原始歩行・姿勢制御の獲得・独立歩行の獲得・成人型歩行への移行という 4 段階の発達過程を再現する神経筋骨格系の変化に関する仮説をたてる (Taga 1997c)。(1) 原始歩行期における動的自由度の凍結。脚の各関節を制御する神経振動子から構成されるリズム生成系 (Rhythm Generator; RG) が原始歩行を生成する。ただし、同側の神経振動子は同期して活動する。これを、動的自由度の凍結と呼ぶ。姿勢制御系は未発達のため、ほとんどリズム生成系に影響を及ぼさない。(2) 姿勢制御発達期における静的自由度の凍結。姿勢制御系 (Posture Controller; PC) の発達にともなって、直立姿勢を保持することが可能になる。左右の脚それぞれを制御する姿勢中枢の興奮の大きさに応じて、姿勢の釣合位置での粘弾性の大きさが変化する。姿勢制御系が筋骨格系の関節角の自由度を凍結することで、立位姿勢の安定性が獲得される。これを静的自由度の凍結と呼ぶ。この段階では安定な直立姿勢の維持が可能であるが、姿勢制御系が優勢であるため、リズム生成系は足踏み動作を作れない。(3) 静的自由度凍結の解除による独立歩行の開始。立位姿勢獲得後、リズム生成系と姿勢制御系との相互作用の調節が始まる。姿勢制御系によって姿勢の保持を確保しながら、徐々にリズム生成系が姿勢制御系へ抑制性的作用を及ぼすことで、筋骨格系の関節角の静的自由度が凍結された状態が解除され、独立歩行が現われる。(4) 動的自由度凍結の解除による成人型歩行への移行。独立歩行獲得直後では、リズム生成系の同側の神経振動子は同期活動をしている。特定のタイミングで蹴って推進力を得られないため、歩幅は小刻みである。しかし、神経振動子が次第に独立した位相で活動するようになり、複雑な筋活動パターンを持つ成人型の歩行運動へと移行する。これを動的自由度の分化と呼ぶ。

4 計算機実験

神経回路網はニューロンの基本特性をあらわす 2 変数の微分方程式で記述される神経ユニットから構成する。2 個の神経ユニットが抑制性的結合を作ると、神経振動子となり、基本的には屈筋と伸筋の交互の周期的活動を作る。各関節に 1 個ずつの神経振動子を仮定し、これら神経振動子の集団をリズム生成系と定義す

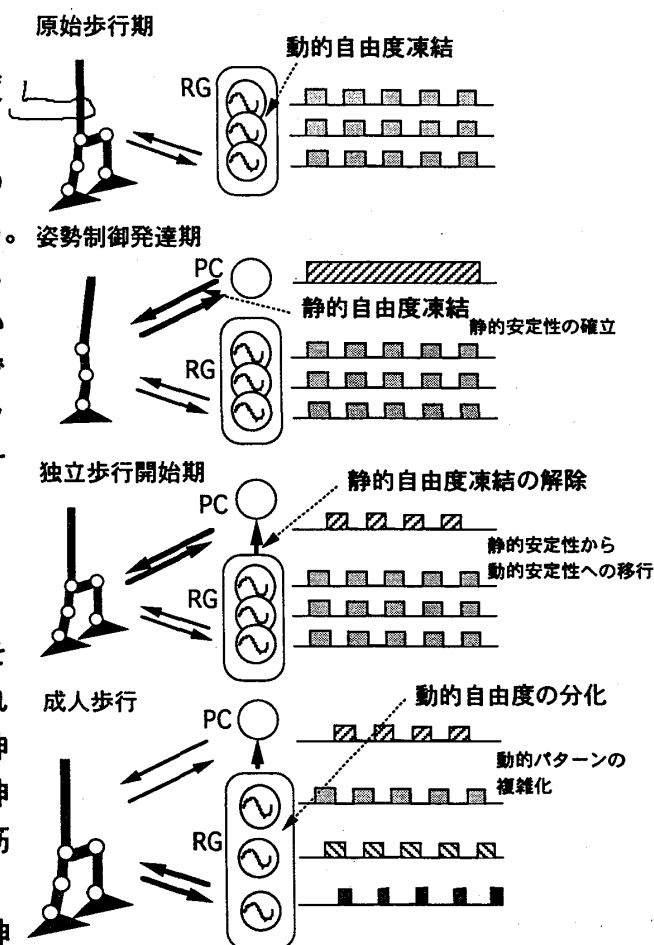


図 1 歩行発達の仮説

る(Taga 1995a)。姿勢制御に関しては、各セグメントの絶対空間での静止角度をある値に設定し、それを維持するスティッフネスを与えることで平衡を保つメカニズムを仮定する。スティッフネスの大きさは1個の神経ユニットの出力に応じて決まる。一方、筋骨格系に関しては、矢状面の8セグメントモデルとする。パラメーターについては、発達段階に応じた標準的な値とする。そして、神経系の微分方程式と筋骨格系の運動方程式を連立して解く。

仮説の(1)期と(2)期の段階では、リズム生成系と姿勢制御系が、それぞれ基本的な足踏み運動と直立姿勢を生成できるようにパラメーターを調節すればよいので、現象を再現するには特に問題なかった。例えば、(1)期では、胴体を力学的に固定して、流れベルトの上を歩かせるシミュレーションを行うと、原始歩行様の足踏み動作が生成された。(2)期では、適当なスティッフネスの値を与えると、直立した状態で小さな力学的外乱を加えても、安定性が保たれた。ただし、起きあがってから直立姿勢になるような運動がどうやって獲得されるかは、ここでは扱わなかった。

(2)期から(3)期への変化の再現が、このモデルの最も重要な点の一つである。姿勢制御系が作用して直立した状態で、定常入力を与えてリズム生成系の活動を生じさせた。姿勢制御系とリズム生成系に相互作用がないときは、両者が同時に出力するが、遊脚期に必要な関節トルクは立脚期の体重維持に必要な関節トルクに比べてはるかに小さいので、姿勢制御系の作用が勝り足踏みは起こらなかった。そこで、リズム生成系の伸筋ユニットから姿勢制御系への抑制性の結合を与えた。このパラメーターを次第に大きくしていくと、足踏みが起きるが不安定で転倒する場合が多くなった。さらにその値を大きくすると、非常に安定な足踏みが生成された。小さい歩幅で小刻みに前進する様子は、独立歩行獲得直後の乳幼児の歩行パターンに極めて類似している。このときの歩行パターンやリズム生成系の活動を図2Aに示した。このように、リズム生成系と姿勢制御系とが発達の(1)及び(2)期で機能していれば、それらの間の協調によって、比較的容易に独立歩行の獲得が可能になることがわかった。

乳幼児型から成人型の歩行パターンへの変化では、動的自由度の分化が起きるという仮説を述べたが、そのメカニズムについては、まだ検討中である。それを引き起こす一つの要因としては、神経振動子への歩行周期の位相に応じた感覚入力のパラメーターを大きくしていくことが挙げられる。実際に、そのパラメータ

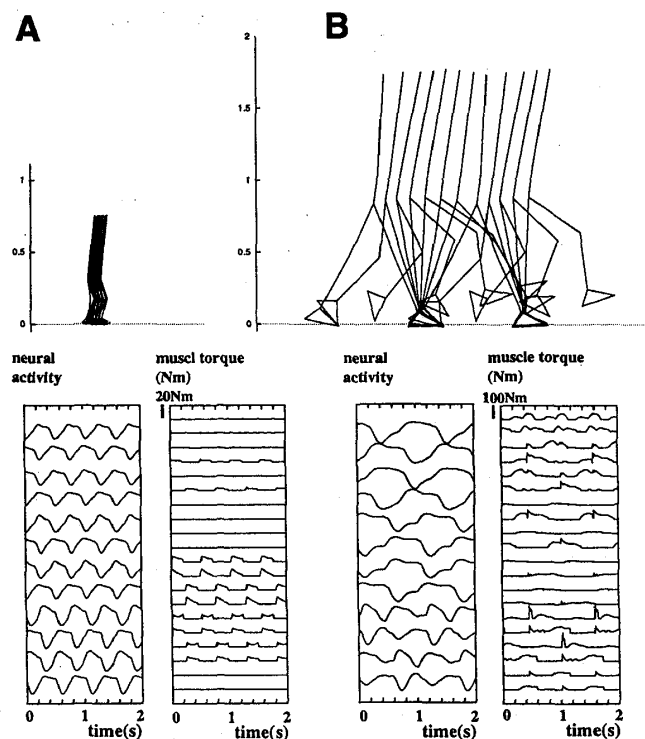


図2 乳幼児型および成人型歩行

一の変化によって、それぞれの神経振動子が独立して活動するようになり、歩行の歩幅も大きくなり、前進速度も上昇する結果が得られた。しかし、それだけでは、成人型の歩行パターンと異なる。比較のために、図 2 B に成人の歩行パターンを再現するモデルの結果を示した。明らかに、成人型歩行では動的自由度が大きいことがわかる。いずれにせよ、動的自由度の分化を起こすメカニズムの検討が必要である。

5 運動発達のダイナミクス

人間の歩行に焦点を当て、その発達過程のメカニズムについて考えてきたが、これにはどの程度一般性があるだろうか。動物実験レベルでも、自由度の動的凍結とその解除を示唆する例がある。例えば、ニワトリの筋電位の多点測定を発生過程で行ったところ、始め同期して作られた活動のリズムが、だんだんと複雑になっていくことが見つかった (Bekoff 1992)。また、人間の随意運動学習過程でも、似たようなメカニズムの存在が示唆されている。例えば、右利きの人に左で字を書かせると、始め関節の静的自由度を固定して行うが、熟練すると特異的な位相関係で各関節を動かすようになる (Newell & van Emmerik 1989)。したがって、発達の初期には自由度を凍結させて、系全体としての機能を比較的単純な方法で獲得し、その後、次第に自由度を増やして複雑で特異的なパターンを作るとというのが、発達する系の一般的な傾向のようである。ただ、運動の軌跡だけを見ると、軌跡が一定しない不安定な状態から、だんだんと安定な運動に変化するため、系の自由度が減っていくように見える。

ところで、新生児を支えて直立状態にすると原始歩行が生成されるが、仰向けに寝た状態では、General Movement (GM) と呼ばれる全く異なるタイプの自発運動が起きる (Hadders-Algra & Prechtl 1992)。この運動は、四肢や体幹を含めた全身に数秒から数分続くもので、滑らかでかつ複雑な動きが特徴である。興味深いことに、脳障害がある場合には、かえって単純で周期的な運動パターンになることが報告されている。正常な発達過程では、GM のパターンは次第に変化するが、随意的な運動が可能になると新生児期のような GM はほとんど見られなくなる。この運動の発達は、一見非常に複雑な状態から次第に秩序だった状態へ変化するという意味で、自由度が減少する方向へ変化しているように見える。しかし、筋活動は同期した状態から始まり、だんだんと複雑になっていく傾向は、歩行の発達と同様である。ただ、始めの時点であまりにも運動が単純な場合は異常であるというのが、特徴である。

そこで、歩行などの発達や GM の変化から示唆されるのは、新生児期の神経回路網は刺激やおかれた状況に応じて、特定の自由度を選んで凍結させ、様々なパターンの運動を作り出す能力を持っているということである。これは、一種の図地分離の能力が系に備わっているということになる。そして、個々の運動については、より多い自由度を持ったパターンの運動へと複雑化することで、運動の安定性が増加するという一般的傾向があると考えられる。このメカニズムは、Gesell (1945) の提案した *individuating maturation* の法則と整合する。ただ、系が作るゆらぎや試行錯誤の役割については、さらに検討が必要である。

最後に、どうしても困難な問題が残ってしまう。それは、最初にも言及した意図の発

達の問題である。確かに我々の常識では、原始歩行は意図なしに行われ、乳幼児の歩行は、意図のもとに行われていると考える。それならば、その途中の段階で意図が生じたのだろうか。また、自由度の凍結が起きるとき、何がそれを引き起こしているのだろうか。新生児がおかれた姿勢に応じて原始歩行が起きたりGMが起きたりするの、遺伝的に「意図」が埋め込まれているのだろうか。現段階では、系の主体を陽に定義できるかどうか分からないが、自由度の凍結は情動系と深い関係にあるということは、言えるかもしれない。Wallon (1938) は、情動と姿勢との間の関係を深く考察した。例えば、恐れは緊張を引き起こしこわばった姿勢をとらせる。また、快感は緊張した姿勢からの解放によって引き起こされる。情動の問題は自由度の凍結や解放の主体として定義できるかもしれない。岡本 (1995) は、原始歩行や乳幼児の歩行の筋電位を調べ、特定の筋活動のパターンが不安定性を感じていることの指標となり得るという興味深い指摘を行っている。小西 (私信) は、GMのパターンの複雑さが、覚醒時・睡眠時・泣いている時などの違いによって変化する可能性を指摘している。Wallon はさらに、情動は他者の存在を前提としており、コミュニケーションの根幹をなしていると述べている。この意味で、情動系の考察は、運動の発達ではあまり取り上げられなかった、他者との相互作用が発達に及ぼす影響についての手がかりを与えるかもしれない。

参考文献

- Bekoff A (1992) Neuroethological approaches to the study of motor development in chicks: Achievements and challenges. *J Neurobiol* 23: 1486-1505
- Changeux JP (1983) *L'homme neuronal* (シャンジュール JP, ニューロン人間, みすず書房)
- Edelman GM (1989) *Neural darwinism*, Oxford Univ. Press
- Forssberg H (1985) Ontogeny of human locomotor control I. Infant stepping, supported locomotion and transition to independent locomotion. *Exp Brain Res*, 57: 480-493
- Gesell A (1945) *The embryology of behavior*. New York. Harper.
- Grillner S (1985) Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates. *Science* 228: 143-149
- Hadders-Algra M, Prechtl HFR (1992) Developmental course of general movements in early infancy. I. Descriptive analysis of change in form. *Early Hum Dev* 28: 201-213
- Jensen JJ, Ulrich BD, Thelen E, Schneider K, Zernicke RF (1994) Adaptive dynamics of the leg movement patterns of human infants: I The effects of posture on spontaneous kicking. *J Motor Behav* 26-4: 303-312
- Leonard CT, Hirschfeld H, Forssberg H (1991) The development of independent walking in children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol* 33: 567-577

- McGraw MB (1940) Neuromuscular development of the human infant as exemplified in the achievement of erect locomotion. *J Pediat* 17, 747-771 (10)
- Newell KM, van Emmerik REA (1989) The acquisition of coordination: Preliminary analysis of learning to write. *Hum Mov Sci* 8:17-32
- 岡本勉 (1995) 新生児原始歩行と歩行能力の発達. *Jpn J Sports Sci* 14-4: 415-425
- Piaget J (1948) *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. 2nd ed. (ピアジェ J, 知能の誕生, ミネルヴァ書房)
- Quartz SR, Sejnowski TJ (1996) The neural basis of cognitive development: A constructivist manifesto. *Behav. Brain Sci.* in press
- Scho"ner G, Kelso JAS (1988) Dynamic pattern generation in behavioral and neural systems. *Science* 239: 1513-1520
- Taga G, Yamaguchi Y, Shimizu H (1991) Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment. *Biol Cybern* 65: 147-159
- Taga G (1995a) A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. I. Emergence of basic gait. *Biol Cybern* 73: 97-111
- Taga G (1995b) A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. II. Real-time adaptability under various constraints. *Biol Cybern* 73: 113-121
- Taga G (1997a) Does the neural system control human bipedal locomotion by preprogramming or by self-organization? *Comments Theor Biol*, in press
- Taga G (1997b) A model of the neuro-musculo-skeletal system for anticipatory adjustments of human locomotion during obstacle avoidance. *Biol Cybern*, in press
- Taga G (1997c) Freezing and freeing degrees of freedom in a model neuro-musculo-skeletal system for development of locomotion. *Proc XVlth Int Soc Biomechanics Congress*, submitted
- Thelen E, Fisher DM, Ridley-Johnson R (1984) The relationship between physical growth and a newborn reflex. *Infant behav Dev* 7: 479-493
- Thelen E, Ulrich BD, Niles D (1987) Bilateral coordination in human infants: stepping on a split-belt treadmill. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 13-3: 405-410
- Thelen E, Smith LB (1994) *A dynamic systems approaches to the development of cognition and action*, MIT Press
- Wallon H (1938) *Rapports affectifs: les emotions*. (ワロン H, 身体・自我・社会, ミネルヴァ書房)