

## Kelso の dynamic pattern への行程

Kelso's way to dynamic pattern

山本 裕二\*

Yuji Yamamoto \*

This short report aimed to review the research history of Dr. J. A. Scott Kelso who has had an enormous impact on the motor control and learning field, although his contemporary perspective is very much in contrast to the information-processing and motor-programming viewpoint. The process of expansion of the dynamical theory of human movement has been highlighted and divided to five building blocks. Looking back to the process now since a new century comes might be fruitful for the future of the motor control theory. The theory now might be still weak to understand the movement in the point how to consider temporal input-output transformation in the theory.

### 1 Prologue

運動の制御や学習に関する領域では、従来の情報処理的アプローチに対して、生態学的アプローチが提唱され<sup>20)</sup>、この2つの異なるアプローチの論争は 'Motor-Action controversy' と呼ばれ<sup>21)</sup> 現在もなお議論をよんでいる。前者は、有機体を主体として刺激に対する反応の階層的メカニズムを明らかにすることを目指し、運動を制御メカニズムの階層性によって分類する。一方後者は、有機体と環境との関係に着目し、運動は目的に応じて環境との相互作用によって自己組織化され、それは運動の機能によって分類されるべきで行為と呼ばれることを主張する。

J. A. Scott Kelso はこうした情報処理的アプローチから出発して、生態学的アプローチに非線形非平衡力学系理論を適用し、独自にダイナミカルシステムアプローチと呼ばれる数学的理論と心理実験を見事に並行して推進してきた代表的な研究者である。本稿では彼の研究史を概観することによって今後の運動制御や学習に関する研究の将来に向けての新たな出発点とした。ただしここでは、彼が影響を受けた理論的背景や心理実験の結果については省略し、モデルの拡張に焦点を当てる。

### 2 Biography

以下にこれまでの Kelso の略歴を列記する。

- Born in Londonderry, Northern Ireland, in 1947
- Stranmillis College in Belfast
- Taught mathematics and English and coached rugby and cricket at Coleraine Academical Institution in Northern Ireland for 2 years
- emigrated to Northern America
- Bachelor of science degree at the University of Calgary under the tuition of Dr. Barry Kerr
- MSc and PhD degrees from the University of Wisconsin at Madison in 1973 and 1975, under the supervision of Dr. George Stelmach
- 1976-1977 assistant professor at the University of Iowa
- 1978-1986 Haskins Laboratories, New Haven and the University of Connecticut, Storrs
- 1987- the Center for Complex Systems at Florida Atlantic University, Boca Raton (<http://www.ccs.fau.edu>)
- Now
  - Glenwood and Martha Creech Chair in Science
  - Professor of Complex Systems and Brain Sciences
  - Professor of Psychology and Biological Sciences
  - Director, Center for Complex Systems

\* 名古屋大学総合保健体育科学センター

\* Research Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University

### 3 Take off

#### 3.1 Cuff Experiment: Central and Feedforward Control

Kelso, Stelmach and Wanamaker<sup>18)</sup> では、タッピング課題遂行中に血圧測定用の圧迫帯 (cuff) を用い、筋感覚情報 (kinesthetic information) がいない場合の運動制御を調べている。そして、180 mm.Hg で15分圧迫を加えるとパフォーマンスが低下することを見いだしている。さらに Kelso<sup>9)</sup> (January 21, 1977) では、あらかじめ指定された位置に動かす (preselected movement) 人指し指の屈曲動作による位置決め課題 (finger-positioning task) の正確性に及ぼす末梢からのフィードバックの影響を調べている。そのために血圧測定用の圧迫帯 (cuff) を用いている。そして、末梢からのフィードバックをなくしても位置決めの正確性が異ならないこと、さらには終端位置情報の方が動きの大きさの情報よりも重要であることから、preselected movement では、末梢からのフィードバックなしに中枢からのフィードフォワード制御が行われているとした。

#### 3.2 Seedling

Kelso, Southard, and Goodman<sup>16)</sup> (March 15, 1978) の Introduction ではじめて、「腹をさすりながら頭をたたく (rub the stomach and pat the head)」の例まで出して “synergy” あるいは “coordinative structure” に言及している。そして、両手の人指し指による aiming task の結果から、時間的構造の不変性を指摘し、多自由度の運動を実行するときには単一のユニットとして筋を制御すると考えた。この中では、200fps による映像分析の手法も用いられている。

#### 3.3 Experimental Tool

Kelso and Holt<sup>14)</sup> (July 13, 1979) では、これまでの圧迫実験に加え、外乱 (perturbation) を加える装置を用いて、いわゆる平衡位置仮説 (equilibrium point)<sup>4)</sup> の検証を mass-spring model に基づいて行っている。ここで重要なことはこの実験結果よりもそこで用いられた実験装置である。これが後の Kelso<sup>11)</sup> で用いられている。ただしこの mass-spring model が非線形現象への入口となる。これは Science にも掲載されている<sup>17)</sup>。

##### 3.3.1 Mass-spring Model (粘性減衰振動)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

ここで  $k$  はバネ定数 (spring constant) で、 $c$  が粘性

減衰係数 (viscous-damping constant)。速度に比例する正の抵抗 ( $c > 0$ ) の作用する系では、運動は時間とともに振動しながら減少していく (underdamping) か、振動せずに変位が最も急速にゼロに近づく (critical damping) か、変位が次第にゼロに近づく (overdamping)。これが粘性抵抗が系のエネルギーを熱にかえて消費する (散逸する) からである。これに対し  $c < 0$  (負性抵抗) の作用する系を考えると、逆に負の抵抗によって外からエネルギーを取り入れられ、振幅が増大することが考えられる。したがって、

- ・  $c > 0$  ならば、減衰振動
- ・  $c = 0$  ならば、固有振動
- ・  $c < 0$  ならば、発散振動

この負性抵抗による発振は、振動的でないエネルギー源から自らの運動によって振動エネルギーを取り入れ振幅を増す。このような場合を自励振動という。

現実には、振幅がいくらでも大きくなることはなく、ある程度以上の振幅になると正の抵抗が負の抵抗を打ち消す。これがファンデルポール (Van der Pol) の方程式で、式 1 において  $c$  が

$$c = -(c_1 - c_2 x^2) = -c_1 \left(1 - \frac{c_2}{c_1} x^2\right) \quad (2)$$

で与えられる場合の運動方程式は

$$m\ddot{x}(t) + (c_1 - c_2 x^2)\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (3)$$

となる。ここで  $c_1$ ,  $c_2$  は正の定数。この方程式は  $c_2 x^2 \dot{x}$  を含むので非線形方程式である。係数  $c$  と  $x$  の関係は、 $|x|$  が小さい範囲では  $c < 0$  となり、 $x = \pm \sqrt{\frac{c_1}{c_2}}$  で  $c = 0$  となり、 $|x| > \pm \sqrt{\frac{c_1}{c_2}}$  で  $c > 0$  となる。すなわち、 $x(t)$  の大きさに応じて、負の抵抗が作用する系から、正の抵抗が作用する系へと移る。これが非線形自励振動である。

## 4 Fundamental Experiment

Kelso<sup>10), 11)</sup> が原典とされるが、Kelso<sup>10)</sup> は大会プログラムの原稿で10行足らずである。そして Kelso<sup>11)</sup> は Kelso and Holt<sup>14)</sup> の装置を使ったものである。ここでは in-phase と out-of-phase といっている。良く出される指の図は Kelso and Schöner<sup>15)</sup> の方が詳しい。

## 5 1st Building Block

### 5.1 HKB Model

Haken, Kelso, and Bunz<sup>7)</sup> のモデルは、位相差 (relative

phase)、 $\phi$ 、を集合変数 (collective variables)、あるいは秩序パラメータ (order parameter) として、2つのリズムカルに動く四肢の協応パターンを特徴づけるシステムを記述した。

$$\dot{\phi} = -a \sin(\phi) - 2b \sin(2\phi) \quad (4)$$

$$= -\frac{dV}{d\phi} \quad (5)$$

ここで、 $V(\phi) = a \cos(\phi) - b \cos(2\phi)$ である。また  $a$ 、 $b$  はパラメータで、 $0 < a < 4b$  の時には2つの安定状態があり、すなわち  $\phi = 0$  と  $\phi = \pm\pi$  のポイントアトラクタが存在し、 $a > 4b > 0$  になると  $\phi = 0$  の1点だけになる。

## 5.2 Stochastic Dynamic Model

HKB モデルがどちらかという、qualitative model であったのに対して、quantitative model として提出されたのが次のモデル<sup>29)</sup> であり、gaussian white noise が加えられた。

$$\dot{\phi} = f_{intr}(\phi) = -a \sin(\phi) - 2b \sin(2\phi) + \sqrt{Q} \xi_t \quad (6)$$

$$= -\frac{dV}{d\phi} + \sqrt{Q} \xi_t \quad (7)$$

ここで、 $\xi_t$  が gaussian white noise で、 $Q$  はノイズの強さを表すパラメータである。

このモデルによって、転移として観察される安定性の喪失 (loss of stability) が、位相差のゆらぎの増大 (enhancement of the realtive phase fluctuation) と小さな外乱 (perturbation) から協応パターンに戻るまでの時間である (局所) 緩和時間 (local relaxtion time)、 $\tau_{rel}$ 、の増大によって理解することができることを示したものである。

## 6 2nd Building Block

### 6.1 Behavioral Informaiton: Intrinsic Dynamics

Schöner and Kelso<sup>32)</sup> は、特定な意味のある情報を行動情報 (behavioral information) と呼び<sup>31)</sup>、環境情報 (environmental information) と記憶情報 (memorized information) の2つについて考察し、新たなモデルを展開した。

ここで、環境情報とは要求される行動パターンを指し、知覚-行為のパターン形成に関連する問題である。また、記憶情報は記憶によって獲得された行動パターンを指し、学習によって意味を持つようになったもの

である。これらの情報によって要求される位相差は、行動パターンを特徴づける集合変数と同じように定義できるのでそれらをそれぞれ、 $\phi_{env}$ 、 $\phi_{mem}$  とするならば、環境情報に関しては、

$$\dot{\phi} = f_{intr}(\phi) + c_{env} f_{info}(\phi, \phi_{env}) \quad (8)$$

また、記憶情報に関しては、

$$\dot{\phi} = f_{intr}(\phi) + c_{mem} f_{info}(\phi, \phi_{mem}) \quad (9)$$

として表すことができる。ここで、記憶情報においては、 $f_{info}(\phi, \phi) = -\sin(\phi - \phi)$  となる。ここで、 $c_{env} > 0$ 、 $c_{mem} > 0$  は定数で、それぞれのタイプの情報による外乱に対するダイナミクスの強さを表す。

行動情報をまとめると、

$$\dot{\phi} = -\frac{dV_{\phi}}{d\phi} + \sqrt{Q} \xi_t \quad (10)$$

ここで、 $V_{\phi} = V(\phi) - c \cos((\phi - \phi)/2)$  で、 $\phi$  は要求される位相差である。

このようにして、行動情報がない状態でのダイナミクスを内的ダイナミクス (intrinsic dynamics) と呼び、外部からの情報 (学習すべきパターンや記憶されたパターン) のダイナミクスと区別した (が同じタイプとして処理)。

### 6.2 Intentional Information

さらに、Schöner and Kelso<sup>31)</sup> は、意図的な切り替え (intentional change) について、行動情報のモデルに基づき、意図的行為の目標となる意図的行動パターンとして意図的の情報 (intentional information) へと拡張した。

$$\dot{\phi} = f_{intr}(\phi) + f_{intent}(\phi) \quad (11)$$

$$= f_{intr}(\phi) + c_{intent} f_{info}(\phi, \phi_{intent}) \quad (12)$$

$$= -a \sin(\phi) - 2b \sin(2\phi) - \theta(t - t_0) c_{intent} \sin(\phi - \phi) + \sqrt{Q} \xi_t \quad (13)$$

ここで、 $c_{intent}$  は定数で、意図の影響の強さを示す。

### 6.3 Learning Model

さらに発展させて、学習モデル<sup>25)</sup> を内的ダイナミクスと行動情報を組み合わせる、さらにいえば、環境情報と記憶情報を結びつけて考えると

$$\dot{\phi} = f_{intr}(\phi) + c_{env}(t)f_{info}(\phi, \phi_{env}) + \hat{c}_{mem}(\phi_{mem})f_{info}(\phi, \phi_{mem}) \quad (14)$$

しかしながら、記憶情報の強さは学習前が  $\hat{c}_{mem} \approx 0$  で、学習後が  $\hat{c}_{mem} = c_{mem} > 0$  に限られるはずである。環境情報の強さ  $c_{env}(t)$  はフィードバックの有無を反映して陽に時間に依存する。

そこで、

$$\dot{\phi} = -\frac{dV_{total}(\phi)}{d\phi} + \sqrt{Q}\xi_t \quad (15)$$

と

$$V_{total} = -a \cos(\phi) - b \cos(2\phi) - c_{env}(t) \cos(\phi - \phi_{env}) - \hat{c}_{mem}(\phi_{mem}) \cos(\phi - \phi_{mem}) \quad (16)$$

で表される。ここで新しいパラメータ  $\phi_{mem}$  は記憶変数  $\phi_{mem}(t)$  となり、 $\phi_{env}$  は学習すべき位相差となる。学習に内在的な制約（どういったパターンが学習されやすいかという）は含まれておらず、このモデルでは、学習すべき位相差が単一アトラクタである  $2\pi$  周期の形式になっている。

## 7 3rd Building Block

### 7.1 Four Component Model

Schöner, Jiang, and Kelso<sup>30)</sup> は、四肢の運動にまでモデルを拡張した。

### 7.2 Discrete Movement

Schöner<sup>26)</sup> は、従来の周期運動のモデルを離散的な運動 (discrete movement) への拡張を試みている。さらに、DeGuzman, Kelso, and Buchanan<sup>31)</sup> などでも、軌道生成に関するモデルを提出している。この間には多関節協応 (multijoint limb) の実験からヒステリシス (履歴現象: hysteresis) を見たものなどがあげられる<sup>1)</sup>。

### 7.3 Multifrequency Coordination

DeGuzman and Kelso<sup>21)</sup> は、周波数比の問題をモデル化している。ここでは circle map を用いて、周波数間の引き込み現象を示している。

### 7.4 Action-perception Patterns

Schöner<sup>27)</sup> では、“moving room” パラダイム<sup>20)</sup> で光学的流動を、また同様に Schöner<sup>28)</sup> では、“time-before-

contact” パラダイム<sup>19)</sup> で視覚性運動制御についてモデル化している。どちらも視覚情報 (光学的流動) を意図的情報などのように扱い、臨界値に達すると相転移が起こるとしている。

## 8 4th Building Block

### 8.1 Behavior and Brain

Kelso, Bressler, de Guzman, Ding, Fuchs, and Holroyd<sup>12)</sup> をもとに、Jirsa, Friedrich, Haken, and Kelso<sup>81)</sup> は脳における相転移のモデルを提示している。さらに Kelso, Fuchs, Lancaster, Holroyd, Cheyne, and Weinberg<sup>13)</sup> のデータは <http://www.ccs.fau.edu> から見れる<sup>1)</sup>。

## 9 Epilogue

以上、Kelso の研究史を振り返ってみると、見事に理論的な拡張が見られ、それを証明する実験的証拠が積み重ねられてきた。現在は、脳における dynamic pattern の検証が主な興味を中心となっているようであるが、運動の制御や学習が脳によるものであることからすれば当然の研究の方向性であろう。本稿ではモデルの拡張に着目したため、実際の実験結果の詳細については触れなかった。

彼の研究は Prigogine<sup>22, 23)</sup> によって方向転換をはじめ、Haken との出会いによって急激に進展した。そして Haken の synergetics の考え<sup>5, 6)</sup> を運動系に適用したことに価値があると言える。しかしながら、この非線形力学系や非平衡熱力学、あるいは複雑系の科学は発展途上の学問領域であり、まさにこれからどういった創発 (emergence) があるか分からない。我々運動の制御や学習の研究に携わっているものとしては、何か物足りなさも感じる。それは何か。理論の中での時間的な入出力をどのように考慮するかという点において、今の理論は運動を理解するにはまだまだ脆弱であろう。

## 文 献

- 1) Buchanan, J. J., & Kelso, J. A. S. (1993). Posturally induced transitions in rhythmic multijoint limb movements. *Experimental Brain Research*, 94 (1), 131-142.
- 2) de Guzman, G. C., & Kelso, J. A. S. (1991). Multifrequency behavioral patterns and the phase attractive circle map. *Biological Cybernetics*, 64 (6), 485-495.
- 3) de Guzman, G. C., Kelso, J. A. S., & Buchanan, J. J. (1997). Self-organization of trajectory formation II. Theoretical

<sup>1)</sup>Science の注ではアドレスが間違っているから注意が必要

- model. *Biological Cybernetics*, 76, 275-284.
- 4) Fel'dman, A. G. Functional tuning of the nervous system with control of movement or maintenance of a steady posture. III. Mechanographic analysis of the execution by man of the simplest motor tasks. *Biofizika*, 11 (4), 766-775.
  - 5) Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51 (5), 347-356.
  - 6) Haken, H. (1983a). *Advanced synergetics: Instability hierarchies of self-organizing systems and devices*. Berlin: Springer. (斎藤 信彦・小森 尚志・長島 知正 共訳 (1986). シナジェティクスの基礎—不安定性の階層システムとデバイスの自己組織化. 東京: 東海大学出版会.)
  - 7) Haken, H. (1983b). *Synergetics: An introduction, non-equilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry and biology*. Berlin Springer. (牧島 邦夫・小森 尚志 共訳 (1980). 協同現象の数理—物理、生物、化学系における自律形成. 東京: 東海大学出版会.)
  - 8) Jirsa, V. K., Friedrich, R., Haken, H., & Kelso, J. A. S. (1994). A theoretical model of phase transitions in the human brain. *Biological Cybernetics*, 71, 27-35.
  - 9) Kelso, J. A. S. (1977). Motor control mechanisms underlying human movement reproduction. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3 (4), 529-543.
  - 10) Kelso, J. A. S. (1981). On the oscillatory basis of movement. *Bulletin of the Psychonomic Society*, VOL 18, p. 63.
  - 11) Kelso, J. A. S., Bressler, S. L., Buchanan, S., DeGuzman, G. C., Ding, M., Fuchs, A., & Holroyd, T. (1992). A phase transition in human brain and behavior. *Physics Letters A*, 169, 134-144.
  - 12) Kelso, J. A. S., Fuchs, A., Lancaster, R., Holroyd, T., Cheyne, D., & Weinberg, H. (1998). Dynamic cortical activity in the human brain reveals motor equivalence. *Nature*, 392, 814-818.
  - 13) Kelso, J. A. S., & Schöner, G. (1988). Self-organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*, 7, 27-46.
  - 14) Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology*, 246, R1000-R1004.
  - 15) Kelso, J. A. S., & Holt, K. G. (1980). Exploring a vibratory systems analysis of human movement production. *Journal of Neurophysiology*, 43 (5), 1183-1196.
  - 16) Kelso, J. A. S., Southard, D. L., & Goodman, D. (1979a). On the coordination of two-handed movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 5 (2), 229-238.
  - 17) Kelso, J. A. S., Southard, D. L., & Goodman, D. (1979b). On the nature of human interlimb coordination. *Science*, 203 (9), 1029-1031.
  - 18) Kelso, J. A. S., Stelmach, G. E., & Wanamaker, W. M. (1974). Behavioral and neurological parameters of the nerve compression block. *Journal of Motor Behavior*, 6 (3), 179-190.
  - 19) Lee, D. N., & Lishman, J. R. (1975). Visual proprioceptive control of stance. *Journal of Human Movement Studies*, 1, 87-95.
  - 20) Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5, 437-459.
  - 21) Meijer, O. G., & Roth, K. (Eds.) (1988). *Complex Movement Behaviour: 'The' motor-action controversy*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.
  - 22) Prigogine, I., & Nicolis, G. (1971). Biological order, structure and stabilities. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 4 (2 & 3), 107-148.
  - 23) Prigogine, I. (1997). *The end of certainty: Time, chaos, and the new laws of nature*. New York: The Free Press. (安孫子 誠也・谷口 佳津宏 共訳 (1997). 確実性の終焉—時間と量子論、二つのパラドクスの解決. 東京: みすず書房.)
  - 24) Reed, E. S. (1982). An outline of a theory of action systems. *Journal of Motor Behavior*, 14 (2), 98-134.
  - 25) Schöner, G. (1990). A dynamical theory of coordination of discrete movement. *Biological Cybernetics*, 63, 257-270.
  - 26) Schöner, G. (1991). Dynamic theory of action-perception patterns: The "moving room" paradigm. *Biological Cybernetics*, 64, 455-462.
  - 27) Schöner, G., Jiang, W. Y., & Kelso, J. A. S. (1990). A synergetic theory of quadrupedal gaits and gait transitions. *Journal of Theoretical Biology*, 142, 359-391.
  - 28) Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988a). A dynamic pattern theory of behavioral change. *Journal of Theoretical Biology*, 135, 501-524.
  - 29) Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988b). A synergetic theory of environmentally-specified and learned patterns of movement coordination. *Biological Cybernetics*, 58, 71-80.
  - 30) Schöner, G. (1989). Learning and recall in a dynamic theory of coordination patterns. *Biological Cybernetics*, 62, 39-54.
  - 31) Schöner, G. (1994). Dynamic theory of action-perception patterns: The time-before-contact paradigm. *Human Movement Science*, 13, 415-439.
  - 32) Schöner, G., Haken, H., & Kelso, J. A. S. (1986). A stochastic theory of phase transitions in human hand movement. *Biological Cybernetics*, 53, 247-257.

(1999年12月5日受付)

