

自然計算から触覚学, *Tactileology* へ

A Long and Winding Road from Natural Computing to *Tactileology*

鈴木 泰博¹

Yasuhiro Suzuki¹

¹名古屋大学大学院 情報学研究科

¹Graduate School of Informatics, Nagoya University

Abstract: English Abstract (スタイル「アブストラクト」).

緒言

触覚学は自然計算から生まれた。だが、それらはかけ離れた位置にある。本論はまず、「いかにして自然計算から触覚学に至ったのか」について経緯を示す。その経緯を、「触覚学」に至るまで（その1）から（その3）に分け、（その1）では **Computer Science** における「計算」、（その2）では、「計算」の困難、（その3）では、あたらしい計算の枠組み、についてそれぞれ述べる。

あたらしい計算の枠組みの下に、自然・生命系一般の相互作用が「触覚」であることから、その記述言語として触譜を提案し、その触譜による情報学が触覚学である。触譜の詳細については既刊の論文や書籍に譲ることとし、2020年11月現在の触覚学の現状について概説する。

「触覚学」に至るまで（その1）

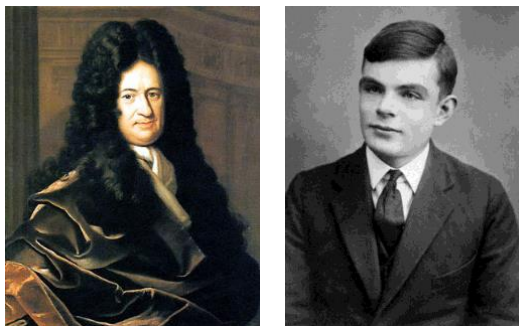


Fig.1 左, Gottfried Wilhelm von Leibniz, 右, Alan Turing (Wikipedia より)

私は「計算」の立場から、おおむね自然や生命にかかわる考察を行ってきた。研究者として駆け出しの頃は、私にとって「計算」とはライプニッツ(G.W. Leibniz)[1]やチューリング(A. Turing)らが開闢した(Fig.1), いわゆる一般的な **Computer Science** での「計

算」だった。この「計算」とは, **Turing Machine**[2]とよばれる理論計算モデルにより定義される「計算」である(そのイメージは Fig.2).

この理論計算モデルは、高度に数学的なものではなく、私たちが計算をするさまを、「紙とペンと頭の相互作用」として抽象化したものである。実際に「計算用紙」(ただし“マス目のある紙テープ”としてモデル化), 「ペン」, そして「頭」(数字の書き換え規則としてモデル化)が定義され、この理論計算モデルでは、計算用紙に計算過程を書き連ねていくことで「計算」が行われる。

とても単純で直感的な計算モデルだが、理論的にはスーパーコンピュータも、一般的な DNA 計算系でも、どんなものでも **Turing Machine, TM** の「計算」と等しいことが数学的に厳密に証明されてきた。



Fig.2. TM のイメージ。「計算用紙」は回転寿司のレーン、数字(状態)は寿司、計算規則は寿司の入れ替え規則とみなすと「寿司の入れ替え」は概ね TM と同じ

この空前絶後の理論計算モデル **Turing Machine** の製作者である A. Turing は, **Turing Machine** を提案した論文のなかで, **Turing Machine** の“能力”の限界までも示している。Turing のこの歴史的論文の数年後に電子計算機が誕生し, **Computer Science & Engineering** の爆発的な発展が始まるのだが, Turing

はいわば、自らの計算モデルで現代文明を支える「計算」の宇宙を開闢し、さらに、その宇宙の限界までも示したことになる。

「触覚学」に至るまで（その2）

Computer Science の学徒は Turing らの開闢した「計算」の“宇宙”について学ぶことになる。その学びを基盤として自然・生命について考察しようとする。とすぐに“難点”とぶつかる。それは、概ね Computer Science での「計算」では、「計算とは停止するもの」が常識とされていることだ。そして興味を中心は「計算結果」であり、「計算の過程」にはほとんど関心が持たれない。

たとえば、コロナウィルスに感染しているかを PCR (ポリメラーゼ連鎖反応) により検査した場合、PCR で増幅したサンプルの DNA とコロナウィルスの DNA との「一致度の計算」では、計算結果のみが重要で、計算過程には興味がない。DNA の一致度の計算が“止まらない”のは困ったことで、なんとか計算を停止させ、正しい計算結果”を得ようとする。

一方で、コロナウィルスの感染のシミュレーションを行う場合、計算の過程が興味を中心で、1 ステップで計算が止まってしまうのは、困ったことで、今度は、なんとか計算がすぐに“止まらない”ようにして、感染の過程を検討しようとする。

Computer Science で考察、整備されてきた枠組みは「計算が停止することが計算結果」である。2 + 3 + 4 → 5 + 4 → 9より計算結果, 9 を求めることのみに関心もたれる。計算過程に着目すると、

$$9 \leftarrow 5 + 4 \leftarrow 2 + 3 + 4 \rightarrow 2 + 7 \rightarrow 9,$$

のように 2 種類の計算過程があるのだが、そこには全く関心もたれない。

一方で、コロナウィルスのような感染症のシミュレーションを行う場合、たとえば、

- i) 感染していない人が、感染者と出会うと感染する
 - ii) 感染した人は免疫を獲得するか死亡する
- として、感染していない人の数を S, 感染した人の数を I とすると、以下のようにモデル化できる。

$$S + I \rightarrow I + I: r1$$

$$I \rightarrow \phi: r2$$

たとえば、感染者が 1 名、非感染者が 2 名の場合、を {I, S, S,} のように記述すると、r1 を適用するか r2 を適用するかによって、計算過程が変わる。このモデルを確率過程として r1 の生起確率を b, r2 の生起

確率を c とする。b >> c の場合、r1 を適用する確率が大きいため、例えば、計算過程は

$$\{I, S, S, \} \square \{I, I, S\} \square \{I, I, I\}$$

となって全員が感染する可能性が高くなる。全員感染してしまうと r1 が適用できなくなり、r2 により

$$\{I, I, I\} \square \{I, I\} \square \{I\} \square \{\}$$

となり結果として全員が感染して免疫を獲得するか、もしくは、死亡するかとなる。一方で b ≈ c の場合には計算過程はいろいろあり得て、

$$\{I, S, S, \} \square \{S, S, \}: r2 \text{ を適用}$$

$$\{I, S, S, \} \square \{I, I, S, \} \square \{I, S, \} \square \{S, \}: r1, r1, r2 \text{ の順}$$

などがあり得る。感染症のシミュレーションの場合には「計算の停止が計算結果」になるわけではなく、計算の過程、に興味も持たれる。

だが、**Computer Science** では「計算の過程」、つまり、**力学系（時間とともに変化する系）を取り扱う方法が未整備**である。なので「いろいろとシミュレーションをしてみることはできない」。

よって実際には、感染症のシミュレーションや可視化は **Computer Science** の道具を使って行うが、数理モデル化も解析も数理科学の道具を使っておこなわれる。以上の“計算モデル”も、SIR モデル[3]とよばれる古典的な感染症のモデルを離散化したものであり、実際は連立微分方程式で定式化されている。解析学や数理物理に持ち込んでしまえば、力学系の道具が使えるので、モデルの性質が良ければ（線型性が高い）かなりのところまで理解できる。離散化版 SIR モデルでも、連続版の SIR モデルと意味内容は同じなのだが、微分方程式系にすると連続化することなので、S や I は人の数ではなく、人口という連続量になる¹。

このように、自然や生命を考察するのは、やはり伝統と実績のある物理学や数学の世界で行うほうがよく、Computer Science の道具のみで考察することは難しい。

そこでまず、自然や生命を複雑な相互作用、として捉えることし、アナロジーとして化学反応系を使うことにした。そして化学反応を抽象化した理論計算モデルをつくった (Abstract Rewriting System on Multisets, ARMS, Fig.3)。通常は提案した ARMS[4]と

¹ 離散と連続の間には、実は深い闇がある。それに気づく人々もいるが、その闇が深すぎるため、そこには立ち入らないよう

にしているのが実際のところだ

Turing Machine との関係を実験的に解明していくのが常道だが、前述の通り、そこには興味がなく ARMS をつかって生命の起源、非線形化学反応(Belousov-Zhabotinski 反応)、細胞内の情報伝達システム(P53-MDM2 シグナル伝達系)、化学生態系などマルチスケールの自己組織化現象のシミュレーションを行い、計算過程(力学系)を、「計算」の枠組みのなかで特徴づける方法を考察してきた。

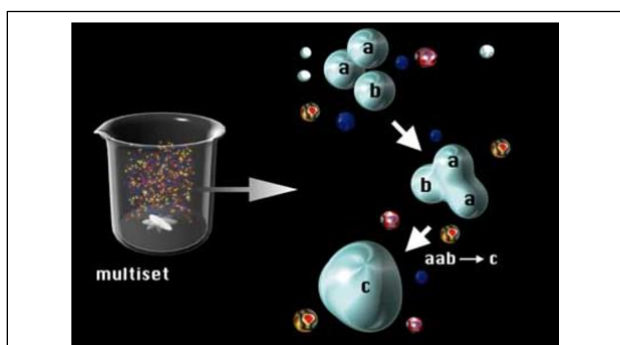


Fig.3 ARMS; マルチ集合(要素の重複を許す集合)の書き換え系. 南方熊楠の科学論(物,心,事)のモデルとみなせる(圏論による解釈を通して).

「触覚学」に至るまで(その3)

自己組織化の計算論的解釈を考察している頃に、ナチュラルコンピューティング(自然計算)と縁をもつことになった。それまでの経験から、従来の Computer Science の枠組みに「はめ込む」ことの困難さと疑問を感じていた。それは DNA、粘菌、量子効果などの自然現象を使って、Turing Machine のシミュレートを行うことへの疑問である。

そこで、いま一度「計算」という概念を再考することにした。当初は Turing から Leibniz、さらにその上流へと辿り、計算の概念を再構築した。

その結果と詳細は人工知能学会編「人工知能学大辞典」の「計算の哲学」[5]などを参考にされたい。これで計算により自然や生命を考察する足場ができたと思っていた矢先に、本辞典の編者で哲学を担当していた戸田山和久氏(科学哲学, 名古屋大学教授)から(大意として)「計算の概念を再構築しておきながら、結局は Turing の計算の世界で考察を続けるのが」と極めて本質的な批判をうけ、考察した計算の概念を携えて、再び Computer Science の世界に戻るのではなく、当初からの自然や生命の世界還っていく方向の模索をはじめた。そのため、一旦は再構築した計算の概念から離れ、Leibniz, Turing らの思想か

らも離れ最終的には南方熊楠(明治期の博物学者)の科学論をもとに再度、計算の概念の再構築をはかった[6]。

触譜

以上のように“本家の”Computer Science からかなり、紆余曲折して、南方熊楠の思想を基に計算を再定義し、いわば「自然を計算系」とする地平に立つことになった。

“自然を計算系にする”とは、自然系にアルゴリズム(処理の順序)を与えることで、振る舞いをコントロール可能にすることである。自然を計算系化するためには自然系の共通言語が必要となる。触覚が物質、分子、細胞、そしてマクロ系までの「共通言語」となっていることを、これまでの経験から、認識してきた。そこで、「触覚」を記述するために「触譜: 楽譜のように触覚を記述するための記譜法」を

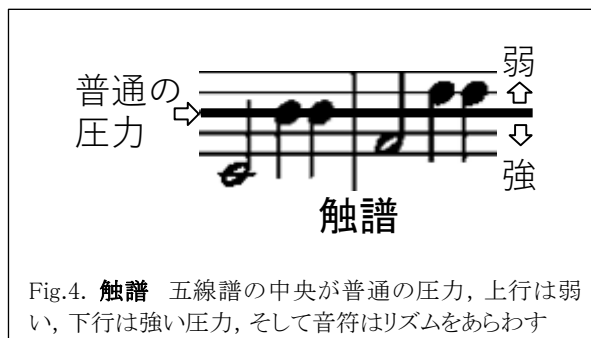


Fig.4. 触譜 五線譜の中央が普通の圧力, 上行は弱い, 下行は強い圧力, そして音符はリズムをあらわす

提案した(Fig.4) [7].

触覚はあらゆるスケールの相互作用を媒介する相互作用であるが、人類は視聴覚(絵画や音楽など)に比べると、触覚相互作用はあまり発達させてこなかった。古来から現存するほぼ唯一の触覚相互作用は「マッサージ」ぐらいで他には殆ど例がない。

そこで、まずマッサージの分析を行った。その結果、マッサージとは圧力(垂直力)の時間変化で特徴づけることが可能で、触質(硬軟, 粗さ)も垂直力の時間変化での特徴づけが可能であることを生体応答計測の実験から明らかにした。

そして、楽譜の記法を用いて五線譜の第三線(中央)を基準の圧力とし、下行は強い、上行は弱い圧力を記述することとした。また、リズムは音符の記法をその用いる(Fig.4)。

触譜により任意のマッサージを記譜することが可能となり、マッサージの記録、編集ができるようになった。これにより、作曲家のように触譜によりマ

² 人工知能大辞典の「計算の哲学」と本質的な内容は同じ。あの結果に至るまでの足場がかなり変わったということである。

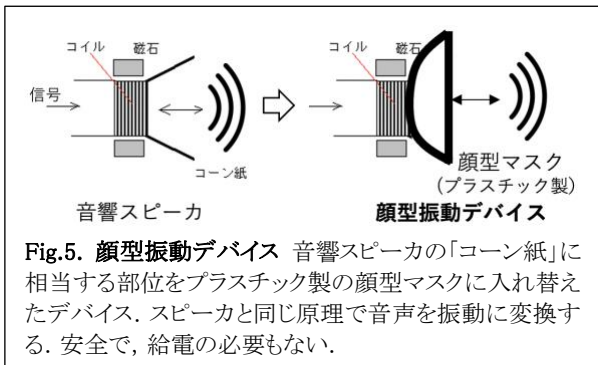
マッサージを制作する“触譜家”とも呼ぶべき人々が現れてきている。

また過去 20 年以上にわたり、数十万人に選ばれてきている「マッサージ」を、採譜しそのパターンの組み合わせの解析から、文法、に相当するものを抽出した。そして、その文法に沿って作成した触譜と、文法に反して作成した触譜によるマッサージに対する生体応答計測（ストレスマーカー(唾液アミラーゼ)、顔貌の形状変化(顔マッサージ前後の顔面写真を平均化し、エッジ抽出後に比較))により、抽出した文法の合理性を検証した。

触覚の電子化

触譜をマッサージとして“再生”するのは人であり、技術の優劣や体調により与える触覚刺激は変化してしまう。触譜は垂直力の時間変化を記述するため、触譜により、振動刺激の強度（振幅）を時間変化させることで、触譜を音声信号(低周波音の振幅変化)に変換することができる。

また、触譜から変換した振動刺激を呈示する装置として、顔型振動呈示装置を作成した(Fig.5) [8]。この装置は一般的な音響スピーカーの「コーン紙」(朝顔型の黒い紙の部分)を、プラスチック製の顔型マスクと入れ替えたものであり、構造的には音響スピーカーと同じである。



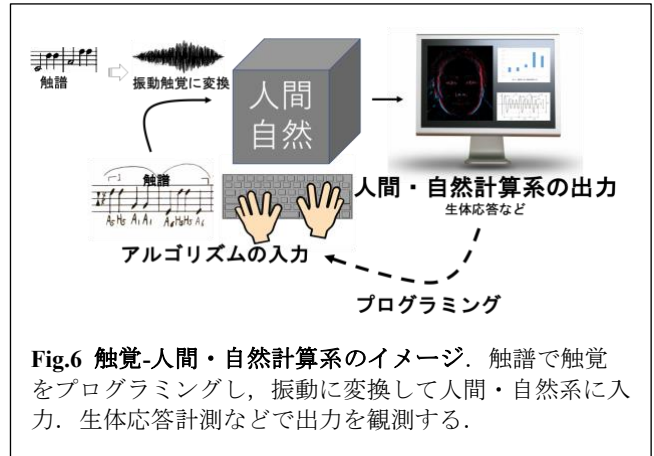
触覚-人間・自然計算系

以上の準備により、

- ・高級プログラミング言語：触譜
- ・機械語：振動刺激
- ・計算系：人間・自然
- ・計算結果の呈示：生体応答など自然系の応答

とする、触覚による自然計算系（触覚-人間・自然計算系）を構築することができた。一般的な触覚自然計算系では、まず高級プログラミング言語に相当す

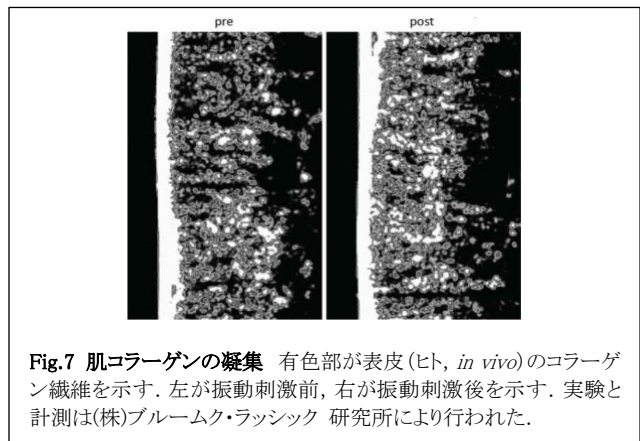
る触譜で触覚をプログラミングして、それを振動刺激に変換し（“機械語”に相当）、人間・自然系に入力する。入力の結果は、生体応答などとして出力され、その観測から計算結果を得る(Fig.6) [8]。



触覚-人間・自然計算系

先述した“触覚の文法”に基づき作成した触譜を振動触覚に変換し、顔型振動デバイスを用いてヒトに入力した(70歳以上の女性、22名)。その出力を肌コラーゲン、体表温（サーモグラフィ）、人工知能による年齢推定(Face API, Amazon 社)、一過性ストレステスト(Perceived Stress Scale, PSS)等の計測により観測した。

その結果、肌コラーゲンの凝集、体表温(手指と顔)の上昇、マイナス 3.6 歳の抗加齢化、自律神経失調の改善などが確認された (Fig.7) [8]。



この枠組みは、触譜によりデザインされた振動刺激による認知症への介入に関する臨床研究（秋田大学高齢者医療先端研究センターなど）を行なっている。これまでに、認知機能の改善が確認されている。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金（基盤 C No.15K00268）による。

参考文献

- [1] G.W. Leibniz, *Dissertatio de arte combinatoria*, 1666, *Sämtliche Schriften und Briefe* (Berlin: Akademie Verlag, 1923), A VI 1, p. 163; *Philosophische Schriften* (edited by Carl Immanuel Gerhardt), Bd. IV, p. 30;
- [2] Turing, A.M. (1936), "On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem", *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2 (published 1937), **42** (1), pp. 230–65, [doi:10.1112/plms/s2-42.1.230](https://doi.org/10.1112/plms/s2-42.1.230) (and Turing, A.M. (1938),
- [3] W. O. Kermack and A. G. McKendrick (1927). "A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics". *Proc. Roy. Soc. of London. Series A* **115** (772): 700-721. [doi:10.1098/rspa.1927.0118](https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118). [JFM 53.0517.01](https://doi.org/10.1093/jfm/53.0517.01)
- [4] Suzuki, Y., Tanaka, H. Symbolic chemical system based on abstract rewriting system and its behavior pattern. *Artificial Life and Robotics* 1, 211–219 (1997). <https://doi.org/10.1007/BF02471142>
- [5] 鈴木泰博, 計算の哲学, 人工知能大辞典, 90-92, 人工知能学会編, 共立出版, (2017)
- [6] Yasuhiro Suzuki, Mathematical Expression of Minakata Kumagusu's Philosophy of Natural Science , ICAROB 2018: PROCEEDINGS OF THE 2017 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL LIFE AND ROBOTICS, 342-344 , (2018).
- [7] Yasuhiro Suzuki and Rieko Suzuki: Tactile Score A Knowledge Media for Tactile Sense, Springer Verlag, (2014)
- [8] Yasuhiro Suzuki: Method of Extracting Sensibility from Time Series Data and Converting it to Vibrotactile, *J. of Robotics, Networking and Artificial Life*, Vol. 7, No. 2, pp. 142-145, (2020)