

論 説

メカトロニクス・技術者の心眼

田 中 豊*



1. はじめに

「心眼」とは辞書によれば「物事の真実の姿を見抜く鋭い心の働き・心目の目」とある¹⁾。とかく我々は、技術によって生み出された製品（人工物）は科学がもたらしたものであると思いがちである。これは一面、間違いではないが、多くの製品の最初は、言葉では表せない技術者の感覚的な心眼から生まれていることを忘れてはならない。技術者の最初の発想は視覚的で非言語的なプロセスによるところが大きいと言われている。デザイナー（設計者）とは、まだ存在しない新しい装置を心の中で組み立てて、操作できる人である²⁾。大切なのは新しいものや概念を思いついた人々の心の中のイメージなのである。

「メカトロニクス (Mechatronics)」という言葉は日本の技術者が創造した造語であることをご存じの読者も多いかと思う。しかしこの単語の成り立ちについては誤解も多い。本稿では最初に、当時、全く新しい概念であったメカトロニクスがどのような経緯で今日に至るかを概観する。次に、このメカトロニクスのシステムの中で重要なパーツである「アクチュエータ」について、電磁式とフルードパワー式の比較を行い、それぞれの特徴を明らかにする。また最新のEV用電磁モータの性能について紹介する。

2. メカトロニクスの単語の起源

メカトロニクス (Mechatronics) という単語は1969年に安川電機の技術者・森徹郎氏が発想した造語である^{3) 4)}。図1に当時の発明届出書の写しを示す。発明の動機の欄には以下のような表記がある。

「Mecha-tronicsとはMechanismのMechaとElectronicsのtronicsを合成したものである。すなわち、これからの技術または開発製品にはMechanismにどんどんElectronicsを盛り込み、前者と後者とをより密接かつ有機的に結びつけてゆかなければならないとの意図のもとに考案したものである。」

図1 当時の発明届出書

ここで注目したいのはMechatronicsのMechaはメカニズム (Mechanism) のメカであるという点である。ちまたの情報では、Mechatronics (メカトロニクス) という言葉はMechanics (機械工学) とElectronics (電子工学) を組み合わせて作られた造語であると解説した書籍が多い⁵⁾。生成AI (ChatGPT 4o) にたずねても同じ回答であった。

確かに今日では、メカトロニクスの概念は機械工学、電気電子工学、制御工学、コンピュータ工学などを統合した学際的な学問分野であるとの認識が強い。しかし、その起源はメカニズムとエレクトロニクスの融合なのである。当時、存在しなかったメカニズムとエレクトロニクスの融合の概念を「メカトロニクス (Mechatronics)」という言葉に言語化した技術者・森徹郎氏の発想とその功績を私たちは忘れてはならない。

安川電機は1972年に「メカトロニクス (Mechatronics)」の単語を商標登録した。図2は特許庁の商標公報の抜粋である⁶⁾。ここでもう一つ重要な点は、その後、安川電機がこの言葉の市場への広がり重視し1978年に商標を返上し、権利を自由化したことである。これにより1980年代から日本発のMechatronicsという和製英語が世界で認知され、その概念が言葉と共に広く使われるようになった。1996年には米国電

*法政大学 デザイン工学部 教授

子情報通信工学分野の研究者組織IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) と米国機械工学分野の研究者組織ASME (American Society of Mechanical Engineers) が共同で論文誌IEEE/ASME Transaction on Mechatronicsを発刊し⁷⁾, Mechatronicsという和製英語が正式に国際認知されたと言える。同じ1996年には第1回メカトロニクスに関する国際会議 (International Conference on Mechatronics Technology: ICMT1996) が米国で開催されている。余談であるが、この会議はその後、アジアや環太平洋の各国を中心に持ち回りで毎年開催され、2024年11月には第27回が日本の金沢、2025年はベトナムのハノイでの開催が予定されており、日本の技術者や研究者も多数参加している。

日本国特許庁 商 標 公 報		第 9 類
商標出願 公 告 昭 46-32713	商標出願 公 告 昭 46-32714	
公 告 昭 46. 6.10	公 告 昭 46. 6.10	
商 願 昭 44-75336	商 願 昭 44-75337	
出 願 昭 44. 8.26	出 願 昭 44. 8.26	
出願人 株式会社安川電機製作所	出願人 株式会社安川電機製作所	
北九州市八幡区大字藤田2346	北九州市八幡区大字藤田2346	
代理人 弁理士 今井義博	代理人 弁理士 今井義博	
指定商品 9 産業機械器具、動力機械器具（電 動機を除く）風水力機械器具、事務用機械器具 （電子応用機械器具に属するものを除く）その 他の機械器具で他の類に属しないもの、これら の部品及び附属品（他の類に属するものを除く） 機械要素	指定商品 9 産業機械器具、動力機械器具（電 動機を除く）風水力機械器具、事務用機械器具 （電子応用機械器具に属するものを除く）その 他の機械器具で他の類に属しないもの、これら の部品及び附属品（他の類に属するものを除く） 機械要素	

Mecha-tronics

メカトロニクス

図2 商標登録公報

2000年代に入り、メカトロニクスの考え方は工学分野や工業製品分野に広く拡大し、一般的な概念として昇華していくにつれ、わざわざメカトロニクスという言葉を用いることは少なくなっていった。

以上のように、日本人技術者が初めて提唱したメカトロニクス (Mechatronics) という言葉とその概念は、今や広く世界に浸透している。日本の技術者・森徹郎氏の心眼にあらためて敬意を表したい。

3. メカトロニクスのシステム構成

著者は講義の中でメカトロニクスの概念を図3に示す構成図で説明している。すなわち、メカトロニクスのシステムは5つのサブシステム（コンピュータ、アクチュエータ、メカニズム、センサ、エネルギー源）で構成されており、各サブシステムを人間が持つ器官や機能に置き換えて説明している。

このシステム構成を具体的な油圧シリンダによるバネ・マス・ダンパー自由度負荷系の位置決めサーボシステムに適用すると図4のようになる。ここではアクチュエータは油圧サーボ弁と油圧シリンダから成る。このサーボシステムでは、センサからの位

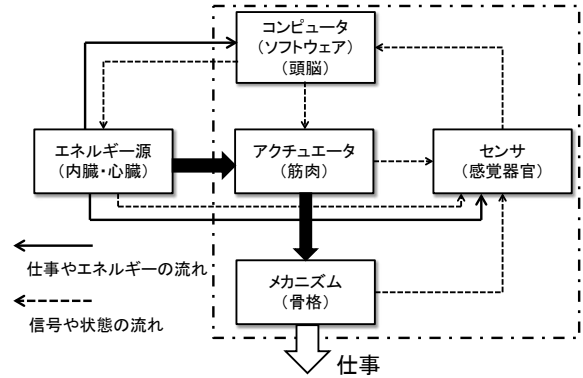


図3 メカトロニクスのシステム構成

置や力の状態はコンピュータにフィードバックされ、コンピュータ内でソフトウェアとして構成された制御器が目標値に応じてサーボアンプに指令を送り、電源から供給された電気エネルギーを変換増幅して油圧サーボ弁の一段目の電磁モータを駆動する。さらに油圧源から供給される油圧エネルギーを変換増幅して二段目のスプール弁を駆動し、油圧シリンダが目標値に応じた所望の位置決めを行う。メカトロニクスのシステムはアクチュエータとメカニズムが所望の仕事をつかさどる重要な構成要素であることがこの2つの構成図からもわかる。

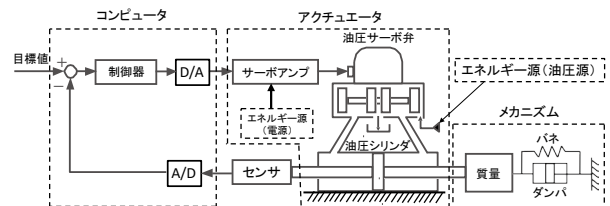


図4 油圧アクチュエータによる慣性負荷位置決めサーボシステム

4. アクチュエータの性能比較

図3に示したメカトロニクスのシステム構成においてアクチュエータの役割は極めて重要である。システムの性能はほぼアクチュエータの性能で決まる。高出力で高応答のアクチュエータを持つメカトロニクスのシステムは高性能である。

従来からのアクチュエータの駆動方式には、ACモータやDCモータに代表される電磁アクチュエータ方式と油圧モータに代表されるフルードパワー方式とがある。ここでは回転形アクチュエータとして、市販されている電気サーボモータと油圧ピストンモータの性能を比較してみる。

アクチュエータ自身の質量を m [kg]、定格出力を P_r [W] とすれば、単位質量あたりの出力としてのパワー密度 P_d [W/kg] は以下の式で定義される。

$$P_d = \frac{P_r}{m}$$

パワー密度は小形・軽量・大出力化の評価指標であり、技術者は質量が小さくパワー密度の大きいアクチュエータの開発を一つの目標に掲げるだろう。

図5にSakamaら⁸⁾が調査した市販のアクチュエータのパワー密度の結果を示す。赤△のプロットがACサーボモータ、橙△がブラシレスDCモータ、黄△がブラシ付きDCモータ、緑○が斜板と斜軸式油圧ピストンモータ、緑□が油圧ラジアルピストンモータである。

ACサーボモータ、DCサーボモータ、油圧式ピストンモータの三者は、図の赤枠を除きその領域がほとんど重なることなく棲み分けができていていることがわかる。また同じ質量の範囲ではACサーボモータに比べ油圧式ピストンモータは大きなパワー密度を持っていることもわかる。さらに一部の油圧式ピストンモータには1kg以下の小形のものもあるが、ほとんどが10kg以上の大きなものが主流である。用途あるいは構造上の制約から1kg以下の小形油圧モータの市場はあまり大きくないと考えられるが、今後、この領域での油圧アクチュエータの開発が新たな市場を開拓する可能性もある。

最近、自動車の駆動方式が内燃機関から電気にシフトしている。自動車のアクチュエータが内燃機関（エンジン）から電気モータへと移行するにつれ、回転形の電磁アクチュエータに革新的動きがある⁹⁾。

その一例として、YASA社¹⁰⁾¹¹⁾はこれまでと異なる原理のアキシアルフラックスモータを開発し、メルセデス・ベンツのスポーツタイプEVやランボルギーニのスーパーEVカーに搭載している。このモータは手元の資料で計算すると24kgの自重に対して6.67 kW/kgという電磁式モータとしては驚異的なパワー密度を持つ。サーボモータではないが、この性能を図5中にプロットすると赤○で示した性能を持ち、油圧モータの領域に大きく食い込んでいることがわかる。従来の原理にとらわれない革新的な技術がこうした性能を生んだと考えられる。ちなみに数々の困難を克服してこの電磁モータを開発・製品化したのは、英国オックスフォード大学をスピンアウトしてYASA社を創業したDr. Tim Woolmer氏で、彼もまた心眼の持ち主なのである。

5. おわりに

本稿では、メカトロニクスという概念がどのような経緯で今日に至るかを概観し、メカトロニクスのシステム構成の中でアクチュエータが重要なことを指摘した。また油圧式と電磁式のアクチュエータの性能をパワー密度の観点から比較評価した。

日本は少子高齢化やエネルギー問題、環境問題、自然災害など人類が共有する課題をすでに世界に先駆けて経験しつつある。56年前、日本の技術者がメカニズムとエレクトロニクスが融合したメカトロニクスという概念と言葉を世界に発信したように、グローバル化の荒波の中で最先端メカトロニクス技術

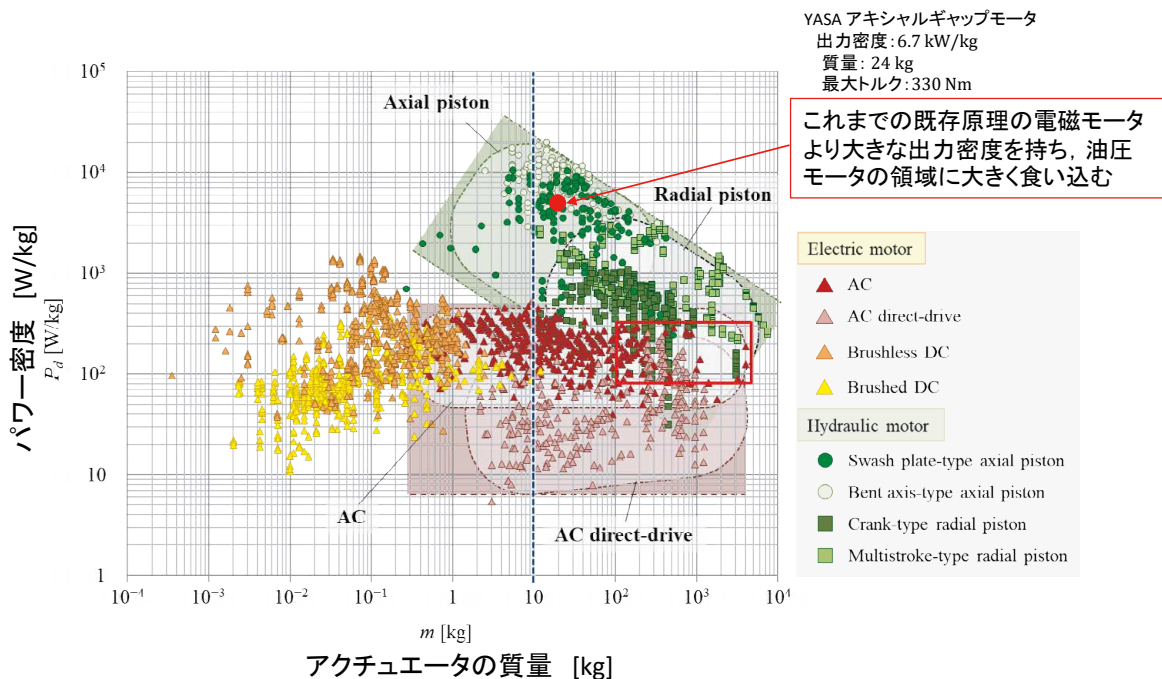


図5 電磁式と油圧式アクチュエータ性能比較

により，こうした人類に共通の課題に対する新たな解決策を日本から提案発信できる心眼を持つ技術者となることを本稿の読者諸氏に大いに期待したい。

参 考 文 献

- 1) 小学館・デジタル大辞泉
- 2) E.S. Ferguson著 (藤原, 砂田訳), 技術者の心眼, 平凡社, 1995.
- 3) YASKAWA安川電機ホームページ, URL <https://www.yaskawa.co.jp/milestones/1960s#01> (2025年1月6日参照)
- 4) T. Mori, Mecha-tronics, Yaskawa Internal Trademark Application Memo, 21.131.01. July 12, 1969.
- 5) 例えば, 渋谷恒司, メカトロニクスの基礎 (第2版), 森北出版, 2023年6月30日.
- 6) 商標公告昭46-032713および46-32714, 商標登録0946593および0946594 (特許情報プラットフォーム2024.01.06参照).
- 7) N. Kyura, H. Oho, Mechatronics –An Industrial Perspective, Trans. Mechatronics, Vol. 1, No. 1, pp. 10–15, March 1996.
- 8) S. Sakama, Y. Tanaka; A. Kamimura, Characteristics of Hydraulic and Electric Servo Motor, Actuators, 11, 11, 2022.
- 9) K. Deepak, M.A. Frikha, Y. Benômar, M. El Baghdadi, O. Hegazy, In-Wheel Motor Drive Systems for Electric Vehicles: State of the Art, Challenges, and Future Trends, Energies, 16, 3121, 2023.
- 10) D. Zhu, B. Peng and C. Wang, “Comparison of Performance of YASA Axial Flux Permanent Magnet Motor with Interior Tangential Rotor and Sticker Rotor,” 2023 3rd Asia-Pacific Conference on Communications Technology and Computer Science (ACCTCS), Shenyang, China, pp. 433–437, 2023.
- 11) YASA社ホームページ, <https://yasa.com/> (2025年1月6日参照)