

MT 法の特質と大規模 機器監視への適用

イプシロンロケット自律診断を例として

手島 昌一 *Shoichi Teshima*

アングルトライ(株)／QRG 幹事

1 はじめに

宇宙開発事業は、信頼性を損なうことなくロケット打ち上げの低コスト化を目指す時代になっている。JAXA（宇宙航空研究開発機構）では打上げ前の点検作業を AI で置き換えることなどで低コスト化を目指している。2013 年に初号機が打ち上げられたイプシロンロケットでは、AI として MT 法が採用された¹⁾。



図1 イプシロンロケット
写真提供 JAXA（宇宙航空研究開発機構）

AI の適用が高度に実現すると、自律診断すなわちロケット自らが検査を行うことができるようになる。それは省人化だけではなく、打ち上げ管制の場所が射場の近くになくても済むという効果ももたらす。JAXA ではこれをモバイル管制と呼んでいるが、工場や機器の遠隔監視とも共通する IoT の典型的な例といえる。

本稿では、ロケットを含めてなぜ MT 法が機器の検査や監視に適しているかという背景と、宇宙開発における MT 法の役割について記載する。

2 MT 法を機器監視に 利用するメリット

ロケットも含めて、一般に大型の機器や設備は一品料理のような性格をもっている。従来設計を踏襲する場合であっても、改良設計箇所が多数あり、設置場所の環境や稼働条件も大きく異なる。そのため、一つひとつが初めて製造さ

れるシステムとして扱う必要がある。異常には千差万別の原因があり、ときには未知の異常も発生するため、あらかじめ異常を分類しておくことも困難である。すなわち“全方位の異常”に検出感度をもたせなければならないのである。

MT 法は「正常状態がもつ個々の計測データやデータ間のバランスからのズレを検出する技術」であり高速で処理できることから、大型機器やプラント監視には特に有効といえる。MT 法では単位空間と呼ぶ情報空間を利用するが、それは正常状態だけから求めた計測データで作成され、以下の性質をもつ。

- ① データの値が正常時から逸脱した場合、大きなマハラノビス距離（MD）が出力される。
- ② データ間の相関が正常時から逸脱した場合、大きな MD が出力される。

これらの様子を描いたのが図 2

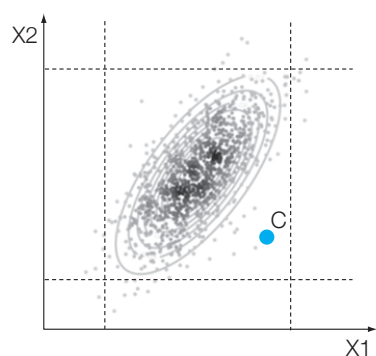


図2 管理限界値と相関がある場合の異常値

である。

従来の監視システムでは、各計測データそれぞれに管理限界が設定され、限界を超えたときにはじめて警報が出されることが多いが、盲点も多くなる。例えば二つの計測値の関係に、弁の開度と流量のような強い相関がある場合には、たとえ管理限界内であっても異常として検知されなければならない状況が発生する。

管理限界を用いた方法ではこうした場合の異常検知ができない。図2に示すように、計測値 X_1 と計測値 X_2 とが点線を上下の管理限界としたとする。正常時に示す分布に相関がある場合、点Cはそれぞれの管理限界内にあるため異常と判断することができない。MT法は相関を利用した数理なので、計測データが正常時のバランスから逸脱すると、感度よく検知することができるのである。そして、それは全ての計測データについてあてはまる。

MT法の単位空間は正常時のデータだけで作成するので、MDが大きいのことは、それまでに集めた正常状態とは異なることを

意味する。そのため、未知の異常に対する検知能力が高いのである。

重要なことは、正常状態は検査員や設計者などの人間が決めるということである。すなわち、単位空間はそれまでに培われた人間の経験値を置き換える技術ともいえる。MT法の源流研究となった兼高達貳博士の「特殊健康診断の事例」では、8名の専門医が200名の健康人を定義した。兼高博士によると、それらは「非常に精度の高い健康人データ」ということである。その結果、受診者の病気を効果的に発見することができただけでなく、指定された時間以降に食事や飲酒をした人々も検出することができた。

設備やプラントにおいても、経験者や専門家の知見を活かすことが大切である。しかし、知見は非明示情報であることも多い。つまり、理由をつぶさに説明することはできないが、何らかの判断が下される。ある程度非明示情報をかかえざるを得ない課題について、専門家が下すのと同様の判定結果を再現する手段がMT法などAIの役割である。

3 イプシロンロケットとMT法の採用

日本のロケット打ち上げ技術には液体燃料と固体燃料があり、いずれも技術レベルは最先端だがコスト高という課題があった。イプシロンロケットは固体燃料ロケットであり、糸川英夫博士から始ま

る日本のロケット技術を受け継いでいる。しかし打ち上げコストが高額なため、前身のM型ロケットは2006年に打ち上げ計画が停止された。

JAXAでは打ち上げコストを半減するため、ハード面及びソフト面での対応策が検討された。ソフト面では、打ち上げ前の点検作業を人工知能(AI)に置き換えるという方針となったのである。

ロケットは打ち上げ前に、非常に厳密な検査が行われる。失敗は、積載する衛星だけではなく国際的な信用を失い膨大な損失を意味するからである。「カウントがゼロになっても止めてくれと思っている。打たない限り失敗はないから」と、ロケット開発に携わる責任者が述べたことさえある(日経産業新聞2013.8.27)。各部の駆動電流や複数機能の連動性など膨大な項目が打ち上げ直前にテストされるが、これらは熟練を要する作業でもある。

このような難易度の高い作業をAIに預けるため、詳細な検討がなされ、最終的にMT法が採用された。表1に他のAI技術との対比を示すが、MT法採用の主要なポイントは、正常データをもとに検査のための情報を獲得するという点と計算リソースの少なさである。前述のように、ロケットのような1回ごとに類例がほとんどない機器を軽快な処理速度で検査するためにはMT法の利点が活きるのである。

表1 各手法のメリットとデメリット

手 法	概 要	メ リ ッ ト	デ メ リ ッ ト	適 用 場 面
MT 法	正常データをもとに“ものさし”をつくり、正常からの距離により故障検知する	○ “ものさし”により正常・異常を明確に区別する ○ 計算リソースが比較的少なくよい ○ シンプルな導出手法	● 特徴量選択が重要 ○ 均質な正常データが多数必要	○ 品質検査 ○ 簡易健康診断（○ イプシロンロケット）
ニューラルネットワーク	正常データを学習させて、正常・異常を判別することで故障検知する	○ 同一のアルゴリズムを様々な問題に適用可能 ○ 未知データに対する判断の汎用性が高い ○ 非線形問題を容易に扱える	○ 事前に学習が必要 ● 中間層（学習結果）が不明瞭 ○ 計算リソースが必要	○ パターン認識 ○ 各種プラントの制御・異常検知 ○ 人工衛星
ベイジアンネットワーク	確率による状態推移で、信号の変移から異常状態への遷移を検知する	○ 確率を用いた状態推移により、不確実な情報を扱うことができる ○ グラフモデルにより、可読性が高い	○ 時間遷移による故障検知が主 ● 事前に遷移確率を求める	○ 各種プラントの異常検知 ○ 工場のライン ○ 人工衛星（○ GX ロケット）

参考文献 2) より

4 AI の段階的運用

イプシロンロケット第1号機打ち上げ時点では、MT法は“試験運用”と位置付けられている²⁾。最初から検査員作業の全てをAIで置き換えるのではなく、2号機以降の打ち上げを重ねるごとに段階を追ってその役割比率を高めていく。前述のように、ロケットは1回たりとも打ち上げ失敗は許されない。それまで人間に任されていた作業を、号機を重ねるにつれて徐々にAIで置き換えていくことが望ましい。

他方で設備診断の場合は、稼働しながら次第にAIの役割比率を高めることができる。MT法の場合は正常と異常との境界、すなわち“しきい値”を2段階に設定することが多い。完全なOKと完全なNGとの間にグレーゾーンを設け、グレーの場合は人に判断を委ねる。次第にグレーゾーンを狭めていくことで、人の関与比

率を低減させることができる。

さらに、MT法の単位空間のメモリ使用量は小さくて済むので、複数の単位空間を用意する方法もよく採用される。複数AIの多数決処理とする場合や、部位ごとの担当AIと総合判定のAIを割り当てる場合などがある。

5 おわりに

世界の中小型ロケットの打ち上げコスト（推定）は、欧州が42億円、インドが25億円、ロシアが12億円である（日経新聞2013.9.23）。米国のスペースXは打ち上げた後でロケットを回収して再利用が可能な技術を目指している。ロケットの使命にはGPSや災害監視のための衛星打ち上げもあり、開発途上国を含めて打ち上げの需要は増え続けている。

コストはロケットに求められる最大要件の一つであり、商業衛星

打ち上げでは第一に注目されることでもある。人間に依存していた検査作業を置き換える技術には、高度な信頼性と想定外の異常に対する検出能力などが求められる。こうした条件を満たすためのAIとその運用方法の開発は、これからますます重要になるだろう。完全な自律点検実現には今後も多くの蓄積を要するだろうが、MT法は様々な宇宙技術への応用が期待されている。

MT法を含めたAI技術の総合的な発展が、宇宙技術開発を含めた日本のものづくりの信頼性向上と低コスト化に役立つことは間違いないことである。

参考文献

- 1) 米田良隆, 森田泰弘(2011): MT法を用いた打ち上げシステムの故障診断, 第55回宇宙科学技術連合講演会講演集
- 2) 森田泰弘(2015): イプシロンロケットの初飛行と今後の展望, 天文月報, 第108巻, 第4号, pp.204-216, 日本天文学会