Independent
Verification &
Validation

Japan Manned Space Systems Corporation
JAMSS

FRAM/SpecTRMを使った宇宙ステーションの異常予兆検知

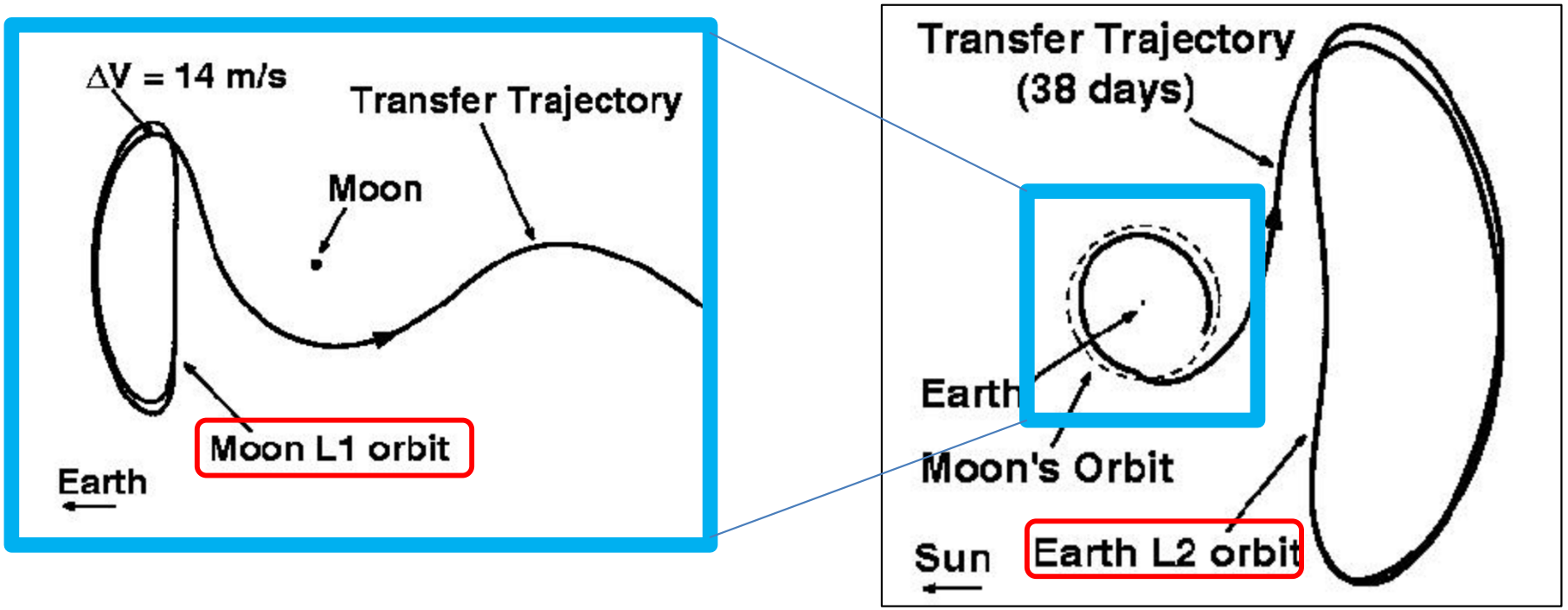
Patent 7007529 (Japan, USA, China and Korea)

野本秀樹
nomoto.hideki@jamss.co.jp

有人宇宙システム株式会社
先端技術研究センター長

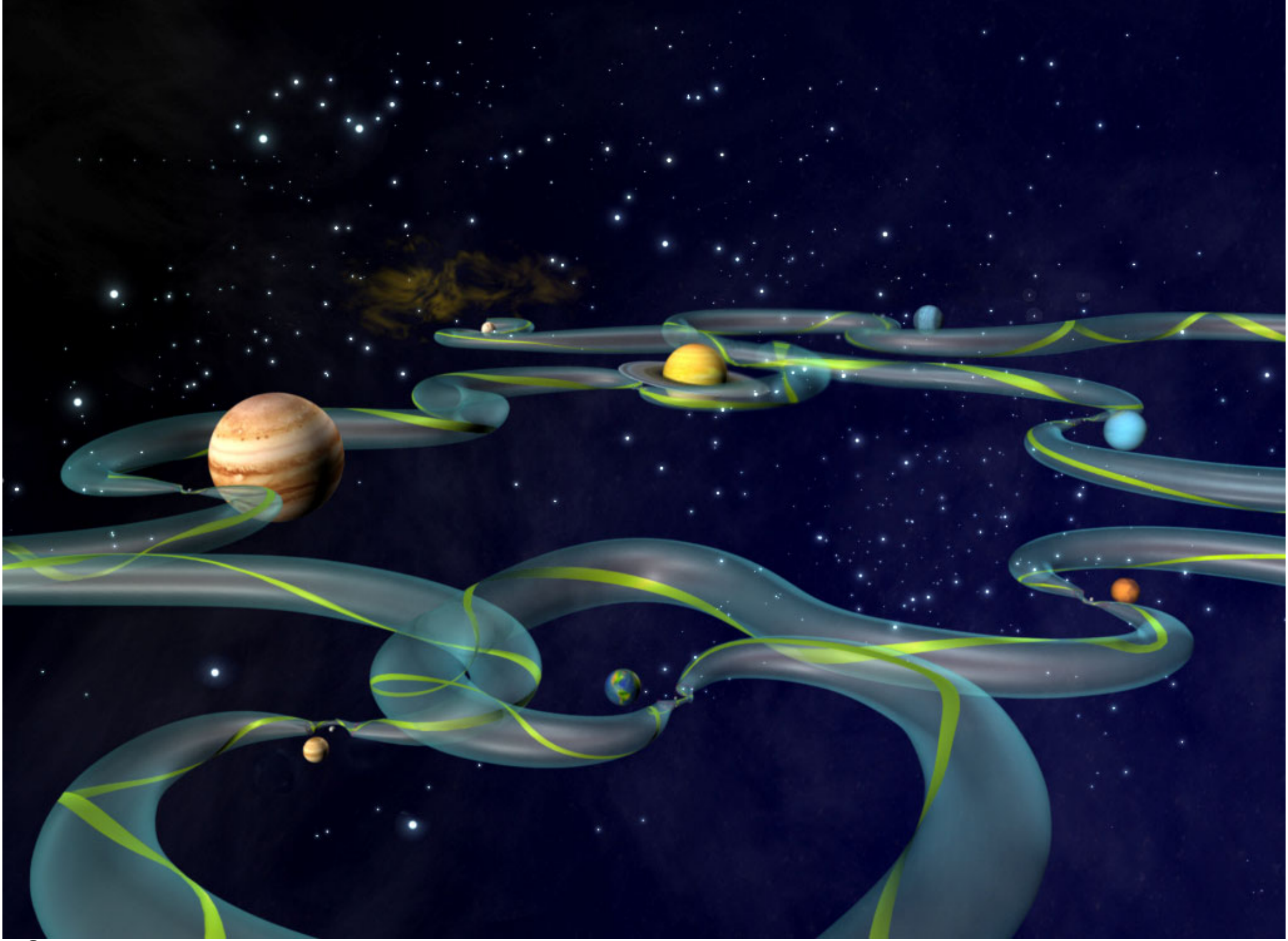
© JAMSS All Rights Reserved.

今世紀初頭の大発見:
Interplanetary Superhighway



"The Lunar L1 Gateway: Portal to the Stars and Beyond",
M.W. Lo and S.D. Ross, 2001, AIAA Space 2001 Conference

© JAMSS All Rights Reserved.



© NASA JPL

© JAMSS All Rights Reserved.

惑星探査の安全

➢ 大きな通信ディレイ

- ➢ 火星：13分
- ➢ 木星：40分
- ➢ 土星：80分

➢ 極めて長いミッション

- ➢ 火星：240日
- ➢ 木星：780日
- ➢ 土星：1560日

© JAMSS All Rights Reserved.

惑星探査の安全

➢ 大きな通信ディレイ

- ➢ 火星：13分
- ➢ 木星：40分
- ➢ 土星：80分

実際に使用不能になる前に、異常の予兆を検知することが必要

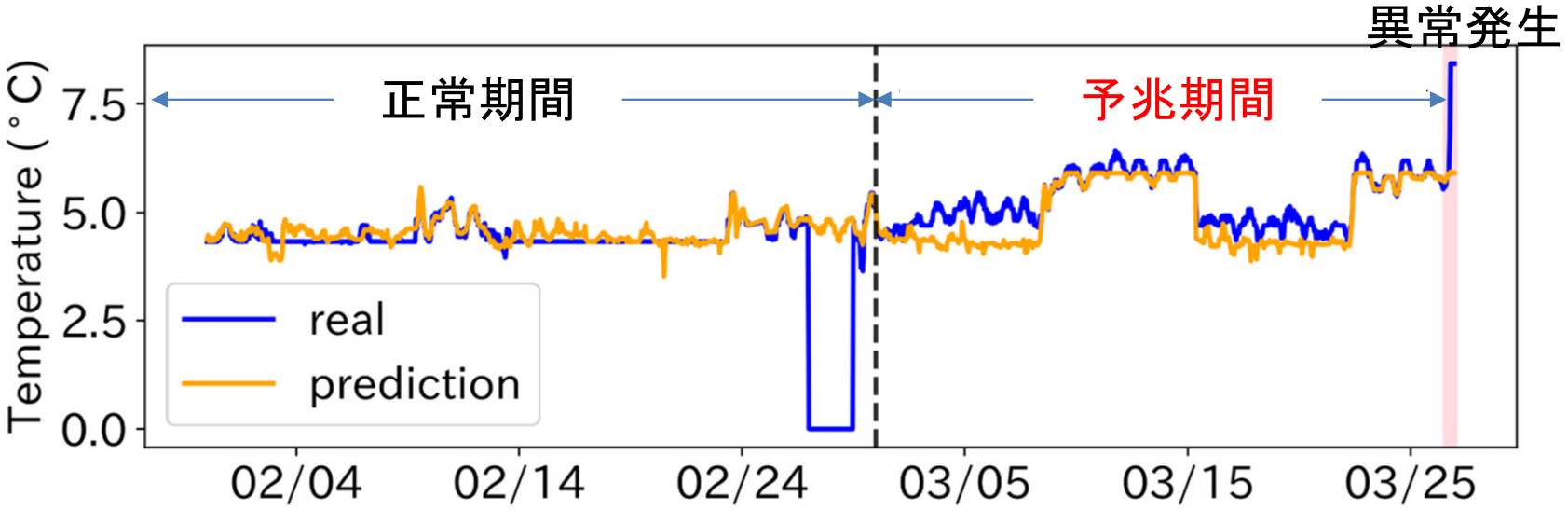
➢ 極めて長いミッション

- ➢ 火星：240日
- ➢ 木星：780日
- ➢ 土星：1560日

機器寿命を長くするため、異常の予兆が出た機器を休ませることが必要

© JAMSS All Rights Reserved.

どのように異常の予兆を検知？



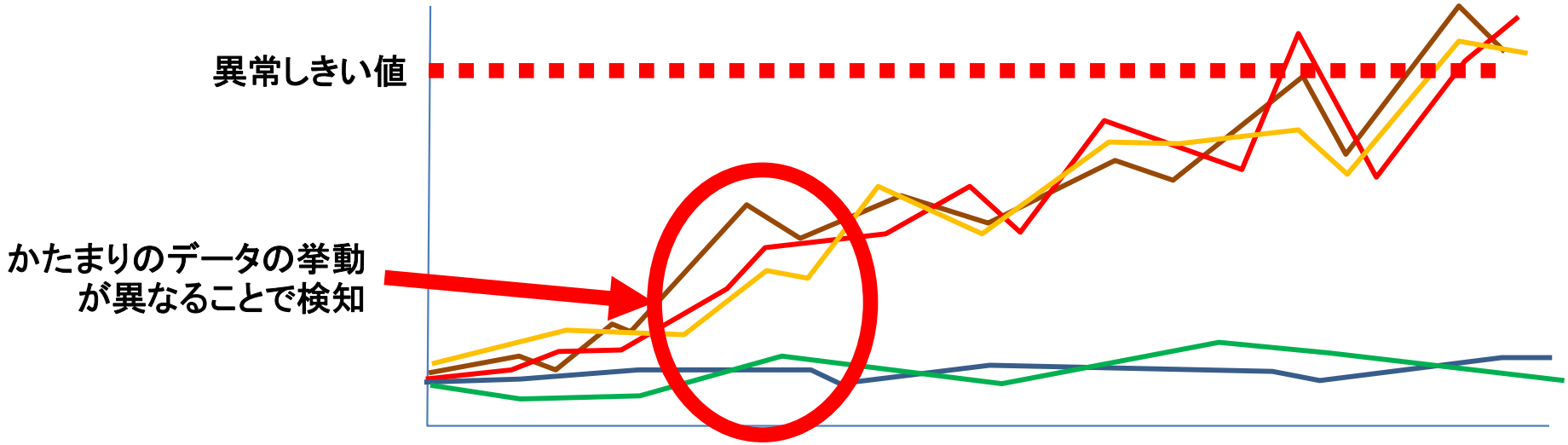
Iino,S., et al., "Explainable symptom detection in telemetry of ISS with Random Forest and SpecTRM", 2021, IEEE Aerospace Conference

① 正常データを学習 (機会学習)
② 最新値を予測
③ 予測値と観測値の差が異常予兆の度合い

© JAMSS All Rights Reserved.

人間の異常予兆検知方法

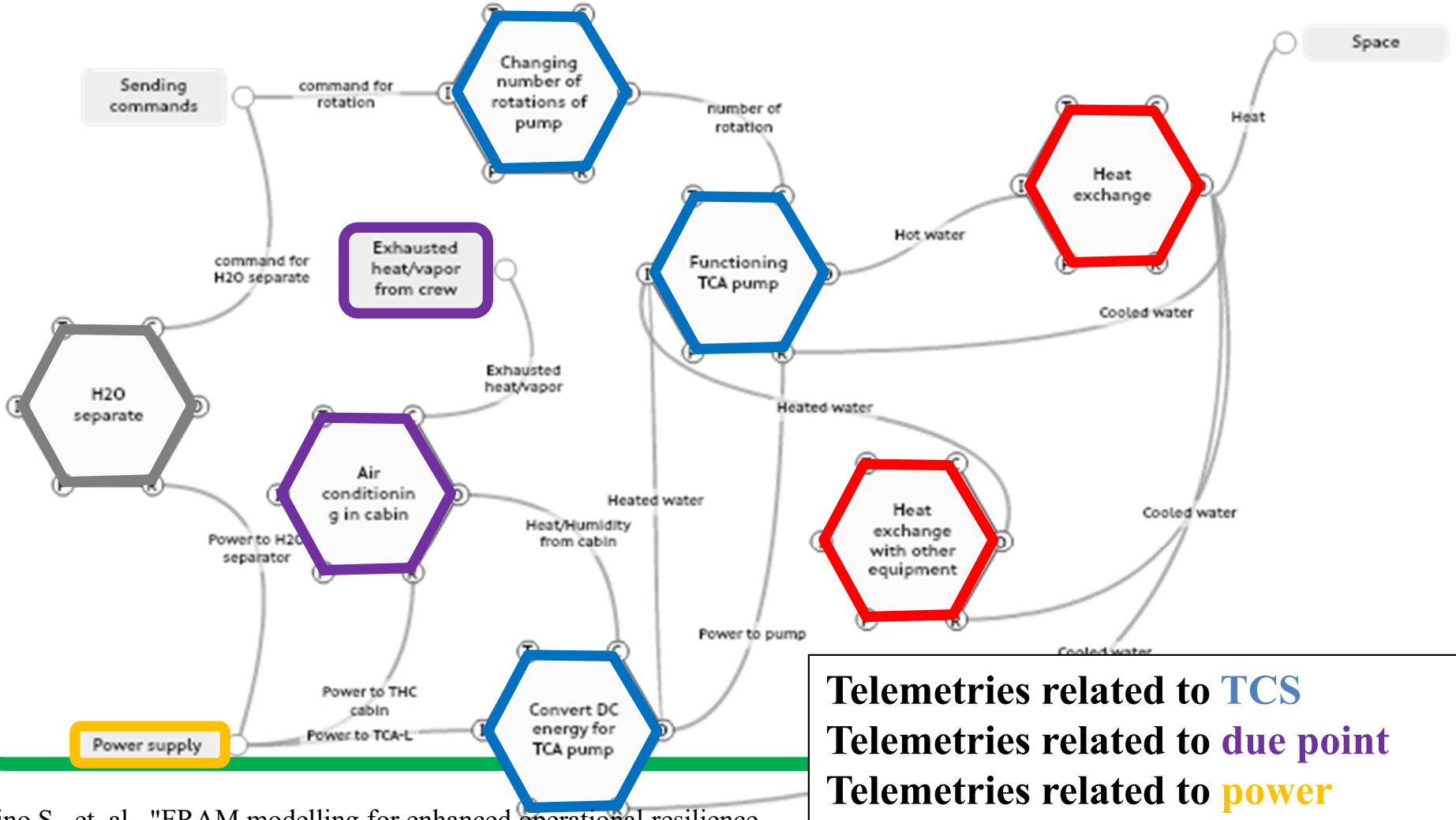
- **人間は、複数データの組み合わせから検知**
  - 宇宙ステーションでは、サブシステム毎に数百のデータ有り
  - 管制官は、**複数データのかたまり**の挙動が崩れることで検知



© JAMSS All Rights Reserved.

AIによる予兆検知

➢ 人間のように、データの組み合わせで検知したい

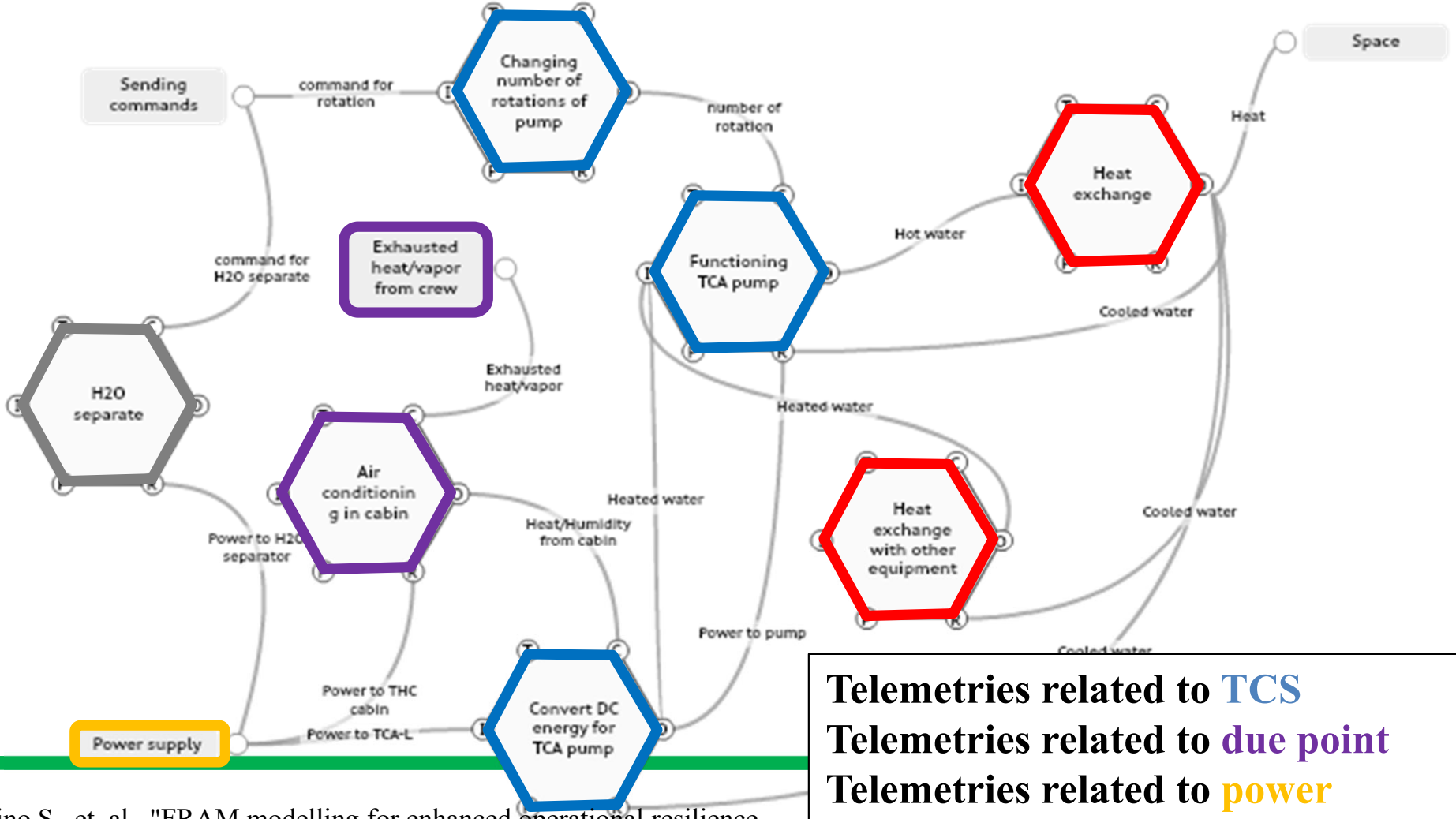


Telemetries related to TCS
Telemetries related to due point
Telemetries related to power
Telemetries related to cabin heat exchange

Iino,S., et. al., "FRAM modelling for enhanced operational resilience in space mission toward autonomous operations", 2024, FRAMily

AIによる予兆検知

➢ FRAMを使い、学習データを決定し、漏れを防ぐ



Telemetries related to TCS
Telemetries related to due point
Telemetries related to power
Telemetries related to cabin heat exchange

Iino,S., et. al., "FRAM modelling for enhanced operational resilience in space mission toward autonomous operations", 2024, FRAMily

AIによる予兆検知

- 人間のように、データの組み合わせで検知したい
  - 各サブシステム毎に数百のデータ

© JAMSS All Rights Reserved.

AIによる予兆検知

- **人間のように、データの組み合わせで検知したい**
  - 各サブシステム毎に数百のデータ

- **しかし、数百個のデータの組み合わせでの検知は決定論的ロジックでは不可能**
  - 決定論的総当たりロジックにより300個のデータの組み合わせを監視しようとすると、2.03e+90 行のコードが必要
    （宇宙全体の原子の数は、たかだかe80個しかない）

© JAMSS All Rights Reserved.

AIによる予兆検知

- **人間のように、データの組み合わせで検知したい**
  - 各サブシステム毎に数百のデータ

- **しかし、数百個のデータの組み合わせでの検知は決定論的ロジックでは不可能**
  - 決定論的総当たりロジックにより300個のデータの組み合わせを監視しようとすると、2.03e+90 個の状態の組み合わせの記述が必要
  - （宇宙全体の原子の数は、たかだかe80個しかない）

- **AIを使う必要がある**

© JAMSS All Rights Reserved.

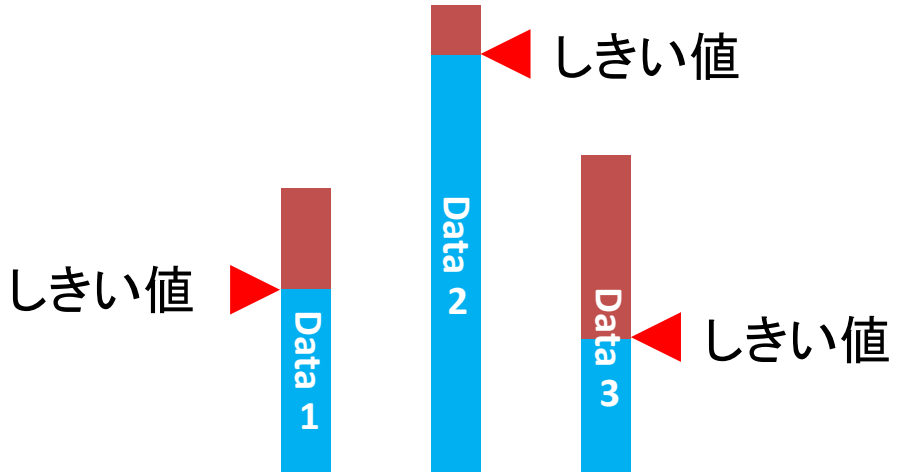
AIによる予兆検知

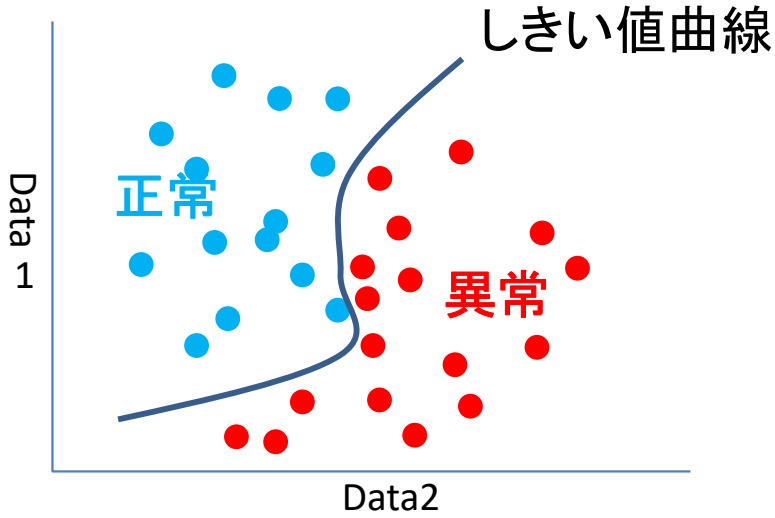
➢ AIは、データを組み合わせで評価する

（しかし、総当たりロジックではない）

従来の異常検出方法:
各データ毎に異なるしきい値

AIによる検知:
複数データの組み合わせ

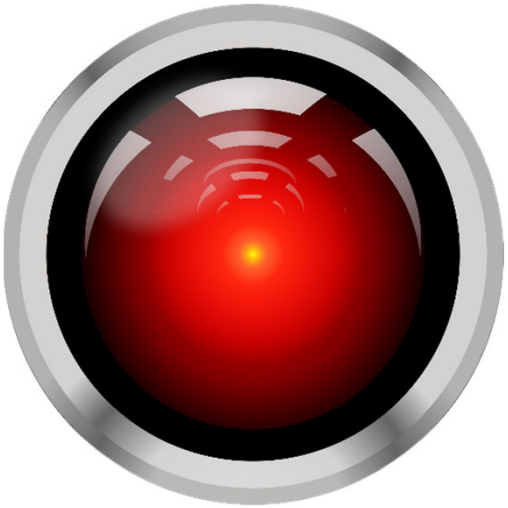




© JAMSS All Rights Reserved.

AIによる予兆検知

➢ 我々に必要なのは、信頼できるAI



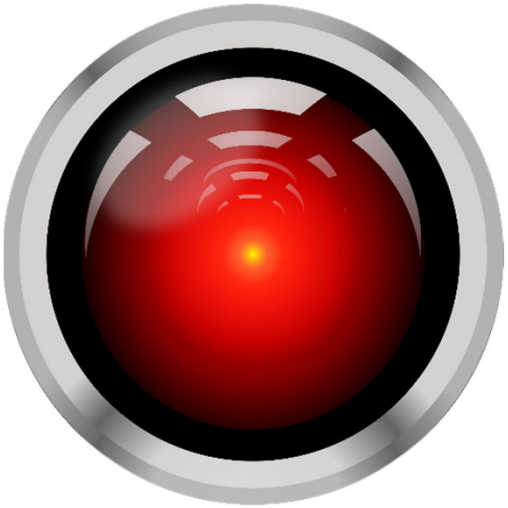
“ちょっと待ってください。ユニットAE-35が72時間以内に
100%の確立で故障します。”

- 2001年宇宙の旅 AIマシンHALの異常予兆検知

© JAMSS All Rights Reserved.

AIによる予兆検知

- 我々に必要なのは、**信頼できるAI**



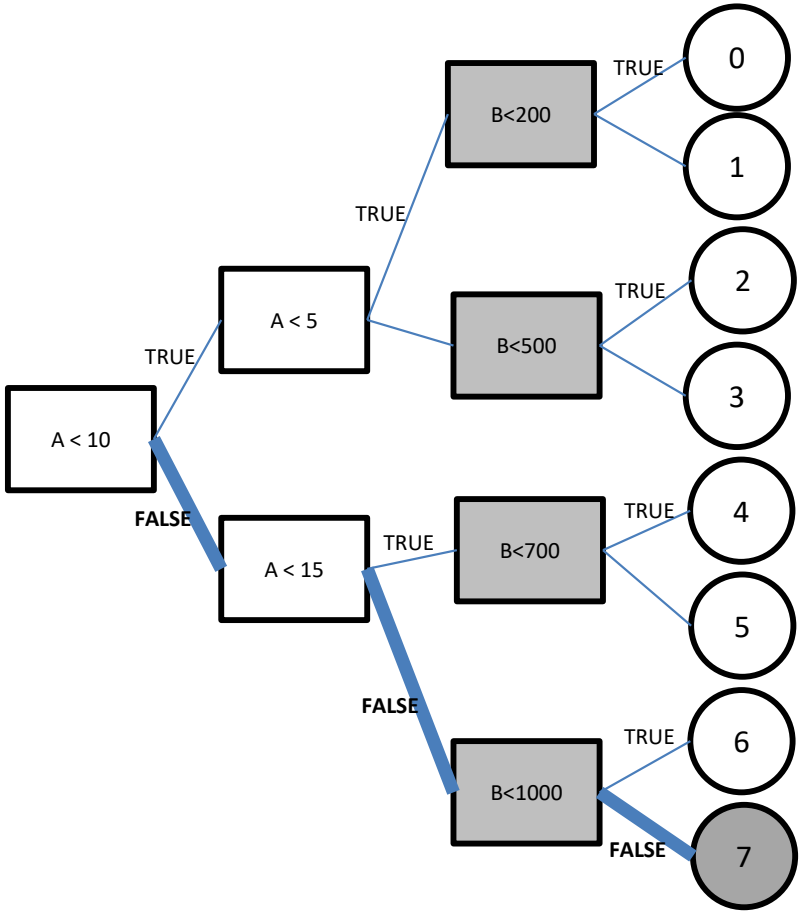
何故そう予測したのか
根拠がわからない

“ちょっと待ってください。ユニットAE-35が72時間以内に
100%の確立で故障します。”

- 2001年宇宙の旅 AIマシンHALの異常予兆検知

© JAMSS All Rights Reserved.

AIの中身 (Random Forest)



- 予測は、ディシジョンツリーのパスに沿って行う
- **葉の順序（A→B）が重要**
- 最適な葉の順序を学習

© JAMSS All Rights Reserved.

予測根拠

Formal Model SpecTRMによる予測根拠の可視化

= normal	A < 10	T	T	T	T	F	F
	B < 200	T	T	F	F	T	F
	C > 50	T	F	T	F	F	T
= abnormal	A < 10	F	F				
	B < 200	F	F				
	C > 50	F	T				

学習データを
フォーマルメソッド言語
（SpecTRM）に翻訳する

© JAMSS All Rights Reserved.

予測根拠

Formal Model

= normal	A < 10	T	T	T	T	F	F
	B < 200	T	T	F	F	T	F
	C > 50	T	F	T	F	F	T
= abnormal	A < 10	F	F				
	B < 200	F	F				
	C > 50	F	T				

Model Checking Result

= Not learned	A < 10	F
	B < 200	T
	C > 50	T
= symptom (normal or abnormal)	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	T
= Abnormal only	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	F

© JAMSS All Rights Reserved.

予測根拠

Formal Model

= normal	A < 10	T	T
	B < 200	T	T
	C > 50	T	T
= abnormal	A < 10	F	F
	B < 200	F	F
	C > 50	F	T

このデータは未学習

Model Checking Result

= Not learned	A < 10	F
	B < 200	T
	C > 50	T
= symptom (normal or abnormal)	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	T
= Abnormal only	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	F

© JAMSS All Rights Reserved.

予測根拠

Formal Model

= normal	A < 10	T	T	T	T	F	F
	B < 200	T	T	F	F	T	F
	C > 50	T	F	T	F	F	T
= abno							

このデータは正常と異常のはざま

Model Checking Result

= Not learned	A < 10	F
	B < 200	T
	C > 50	T
= symptom (normal or abnormal)	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	T
= Abnormal only	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	F

© JAMSS All Rights Reserved.

予測根拠

Formal Model

= normal	A < 10	T	T	T	T	F	F
	B < 200	T	T	F	F	T	F
	C > 50	T	F	T	F	F	T
= abnormal	A < 10	F	F				
	B < 200	F	F				
	C > 50	F	T				

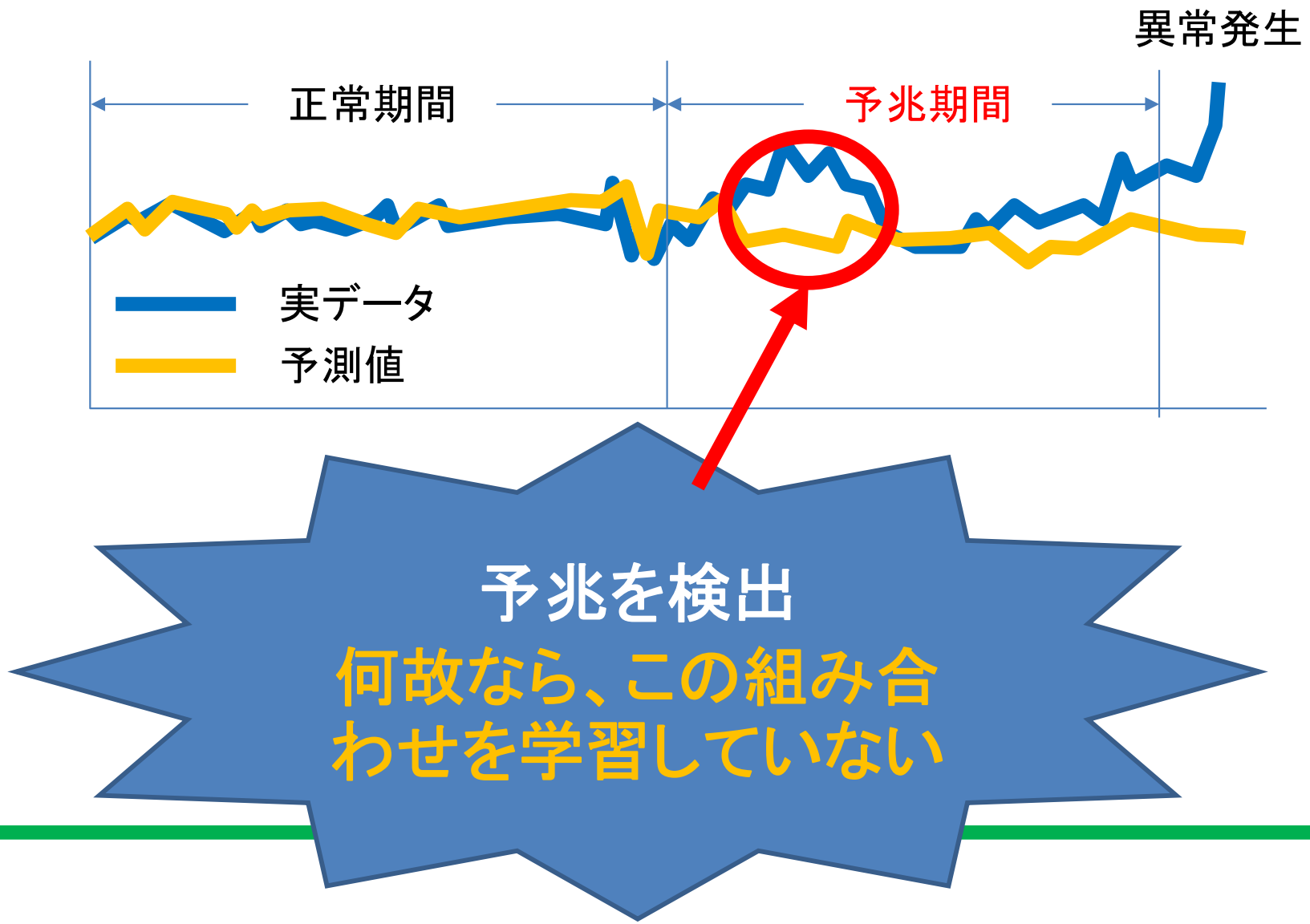
このデータは異常特有

Model Checking Result

= Not learned	A < 10	F
	B < 200	T
	C > 50	T
= symptom (normal or abnormal)	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	T
= Abnormal only	A < 10	F
	B < 200	F
	C > 50	F

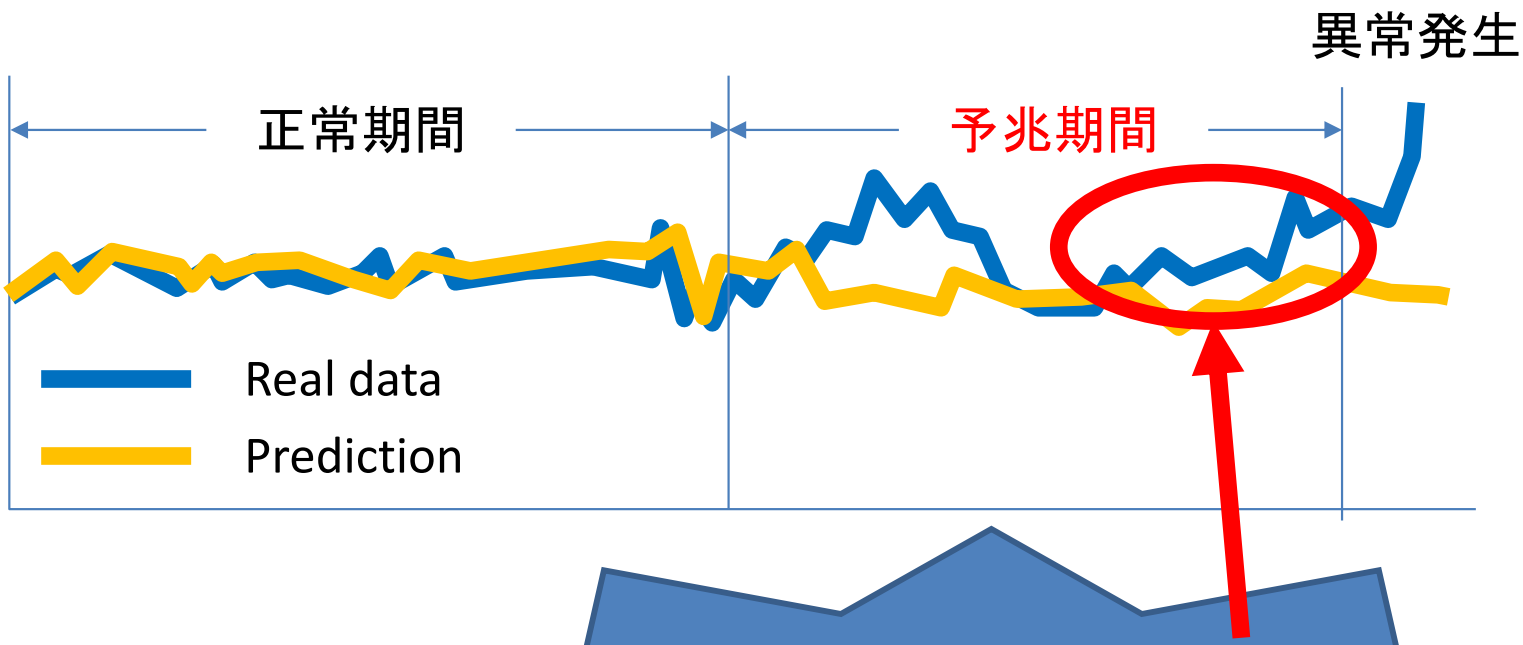
© JAMSS All Rights Reserved.

予測根拠



© JAMSS All Rights Reserved.

予測根拠



予兆を検出
なぜなら、この組み合わせは異常時特有

© JAMSS All Rights Reserved.

まとめ

- 惑星探査には**異常予兆**検知が必要
- AIを使わないと大量のデータの組み合わせによる予兆検知はできない
  - 決定論的ロジックでは天文学的行数と実行時間が必要
  - AIによって、実用可能な大きさと速度が得られる
- AIは予測根拠を示してくれない
  - そのまま信じると危険
  - フォーマルメソッドにより**予測根拠を示し、説明責任を果たす**

© JAMSS All Rights Reserved.