

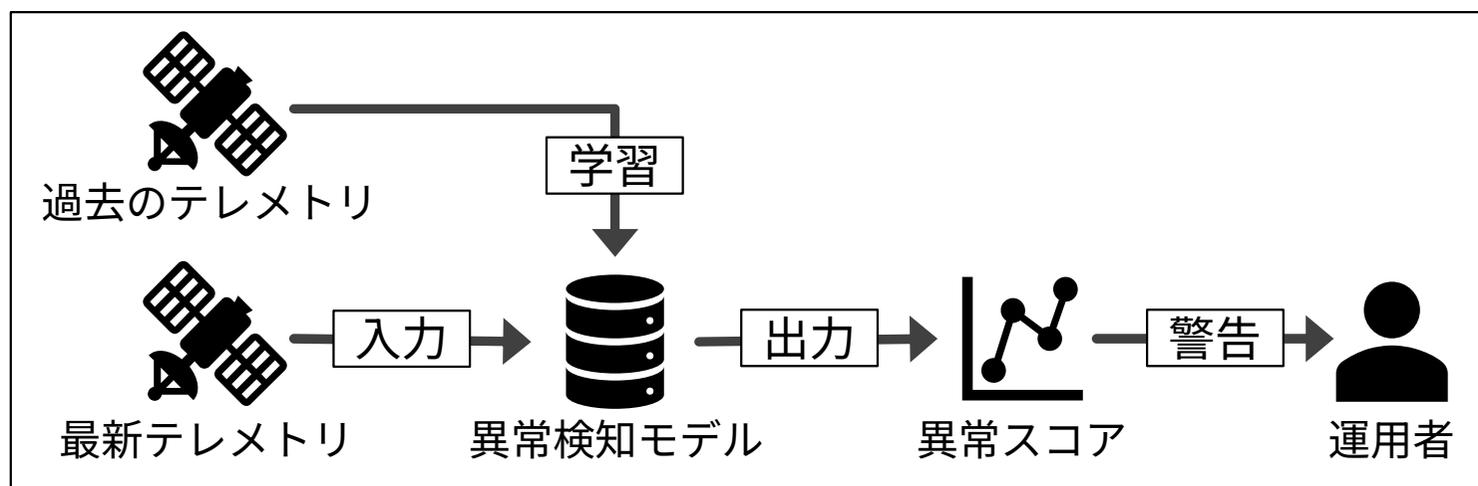
特徴量表現によるテレメトリ異常説明手法の検討

○勝部駿，佐原宏典（東京都立大学）

背景

- データ駆動型の異常検知は多くの場合、異常発生の可能性だけを出力する
- 異常の説明にはドメイン知識が必要だが知識をデータ化する労力が大きい

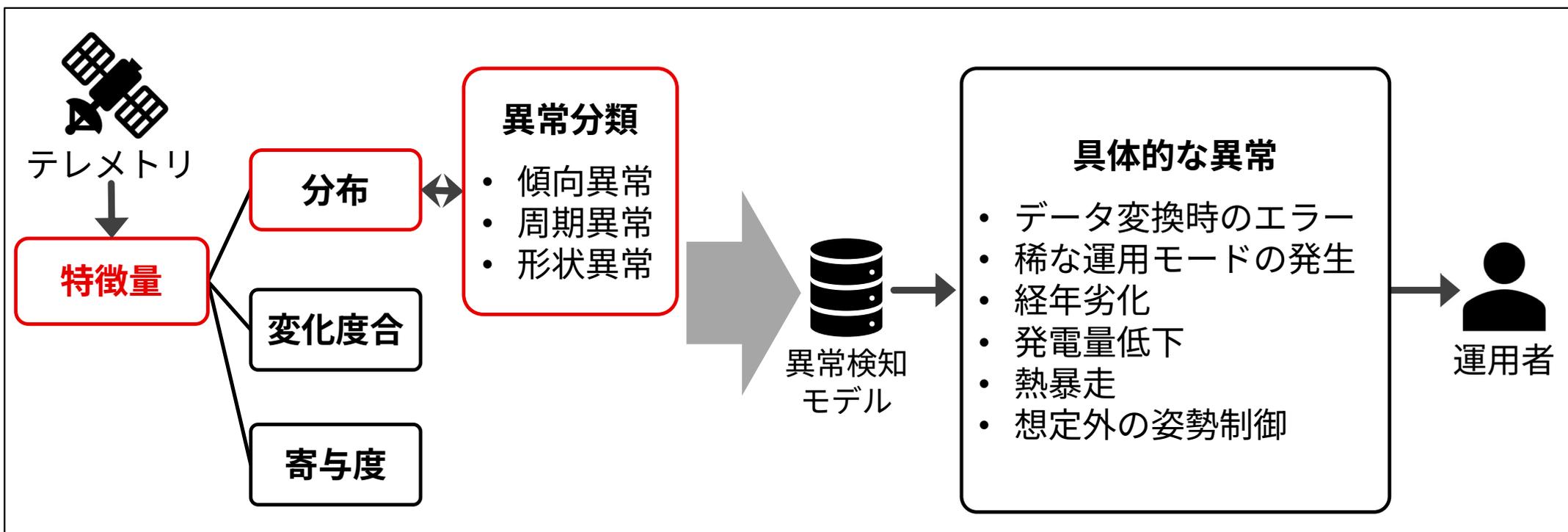
⇒ 運用者が必要とする異常情報をデータから抽出する方法が必要



データ駆動型異常検知

目的

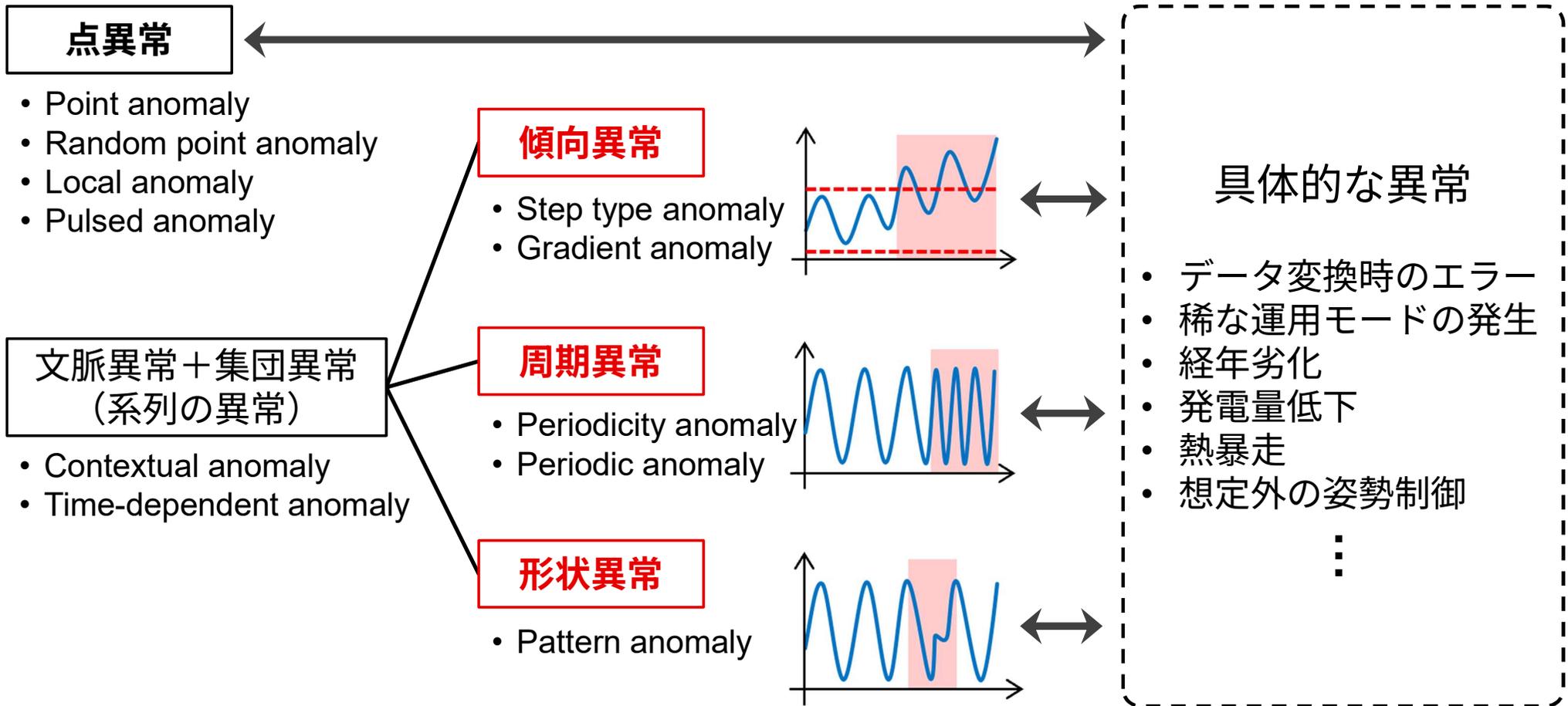
分布，変化度合い，テレメトリの寄与度によって**異常の種類を説明可能な特徴量**の実現を目指す



先行研究における異常分類

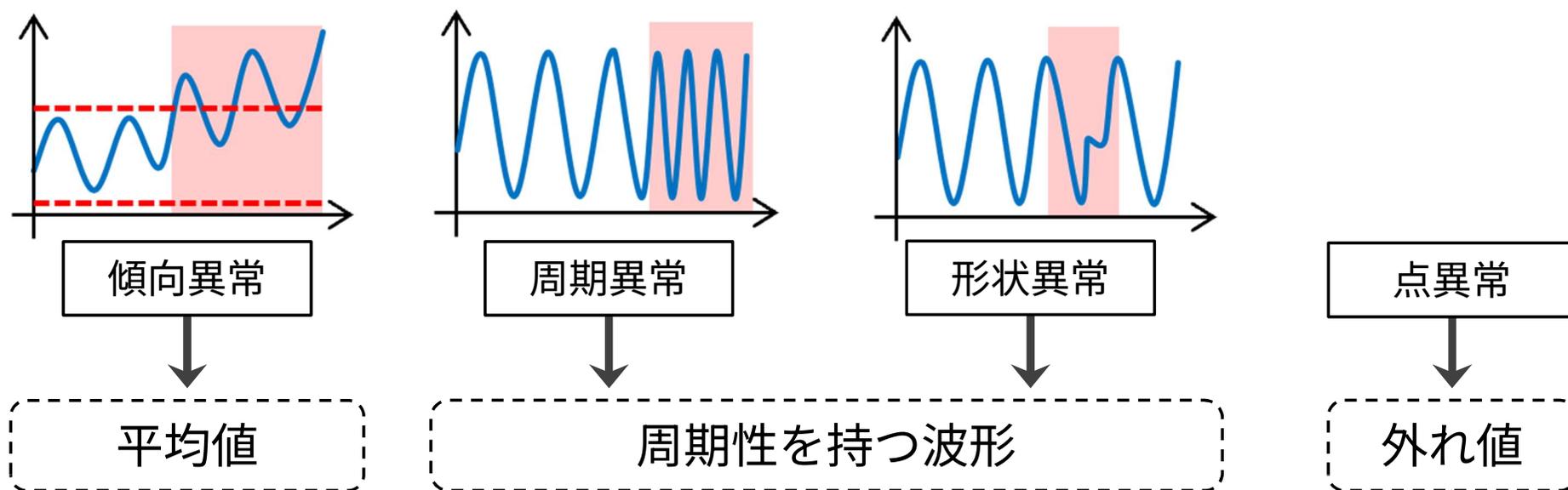
想定した異常や検知した異常	参考文献
Point anomaly, Contextual anomaly	[K. Hundman, et al., 2018] [S. Tariq, et al., 2019]
Random point anomaly, Time-dependent anomaly	[W. Jin, et al., 2022]
Local anomaly, Pattern anomaly, Periodicity anomaly	[C. Barreyre, et al., 2019]
Pulsed anomaly, Step type anomaly, Gradient anomaly, Periodic anomaly	[L. Cui, et al., 2023]
運用中に初めて行われる実験, 姿勢制御の異常	[T. Yairi, et al., 2017]
ベアリングの損傷 (経年劣化), スラストの異常による角度の急変	[T. Yairi, et al., 2004]
SAFEHOLDの発生	[梅津, et al., 2019]

本研究における異常分類



異常分類と変動成分

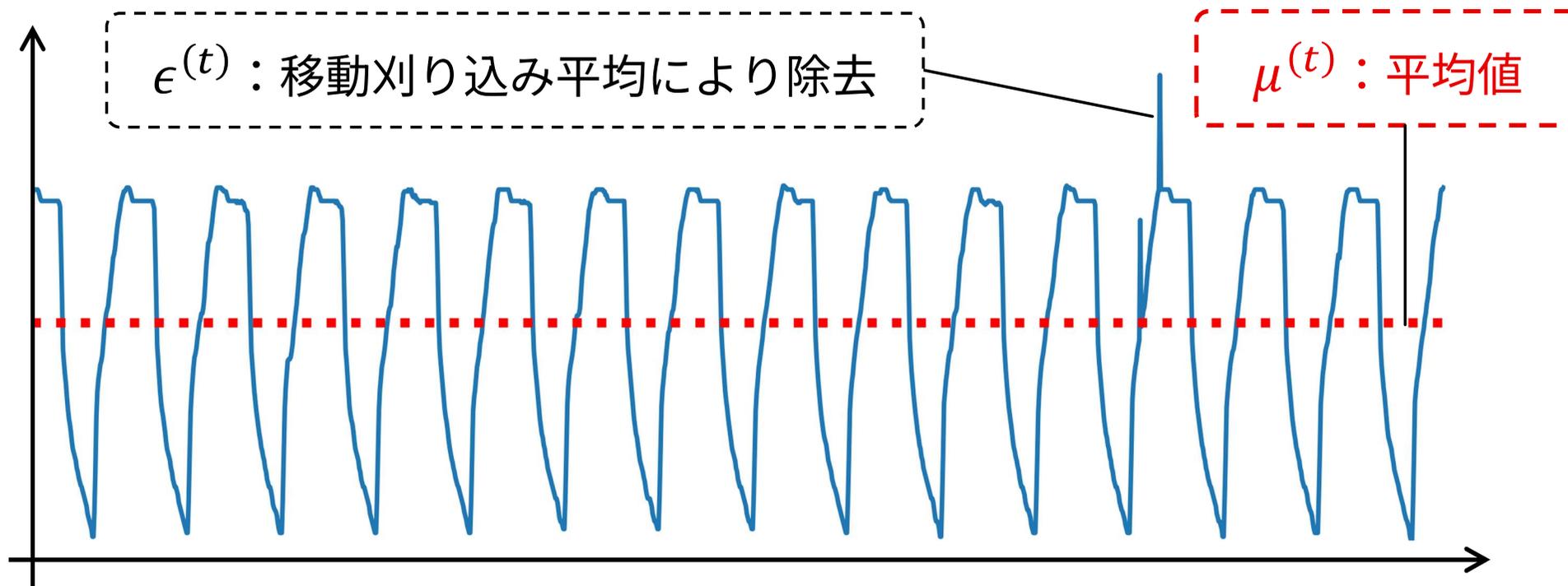
時系列データを異常分類と対応付け可能な成分に分解する



$$\text{時系列データ: } X^{(t)} = \mu^{(t)} + S_T^{(t)} + \epsilon^{(t)}$$

変動成分の算出

時系列データ： $X^{(t)} = \mu^{(t)} + S_T^{(t)} + \epsilon^{(t)}$

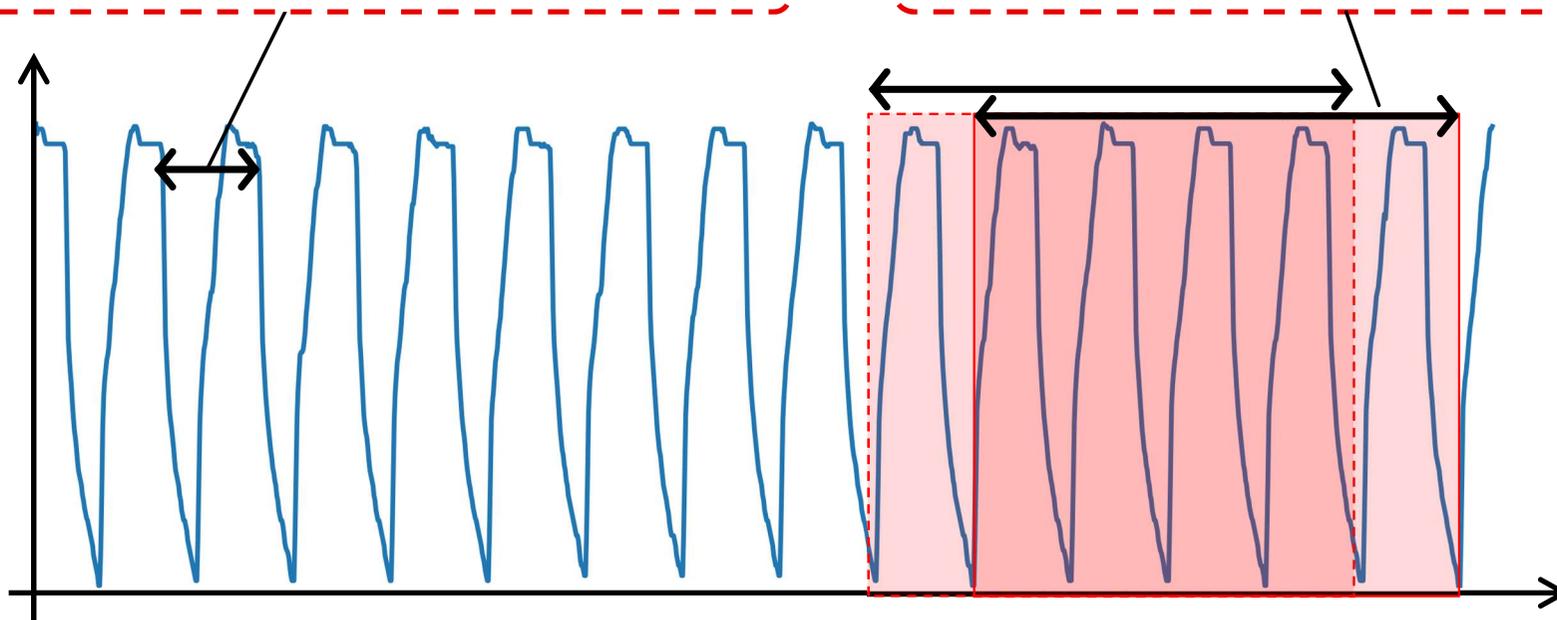


変動成分の算出

$$\text{周期変動成分} : X^{(t)} - \mu^{(t)} - \epsilon^{(t)} = S_T^{(t)}$$

$T^{(t)}$: 自己相関がピークをとる周期

$d^{(t)}$: $S_T^{(t)}$ と $S_T^{(t-T)}$ の差分
(動的時間伸縮法)



特徴量の算出

正常データにおける $\mu^{(t)}$, $T^{(t)}$, $d^{(t)}$ との乖離度を特徴量成分とする

$$y_{\mu}^{(t)} = \sqrt{(\mu^{(t)} - \mathbf{c}_{\mu})^{\top} \boldsymbol{\Sigma}_{\mu}^{-1} (\mu^{(t)} - \mathbf{c}_{\mu})}$$

$$y_T^{(t)} = \sqrt{\sum_{i=1}^D (T_i^{(t)} - c_{T_i})^2}$$

$$y_d^{(t)} = \sqrt{(d^{(t)} - \mathbf{c}_d)^{\top} \boldsymbol{\Sigma}_d^{-1} (d^{(t)} - \mathbf{c}_d)}$$

特徴量： $\mathbf{y}^{(t)} = \begin{bmatrix} y_{\mu}^{(t)} \\ y_T^{(t)} \\ y_d^{(t)} \end{bmatrix}$

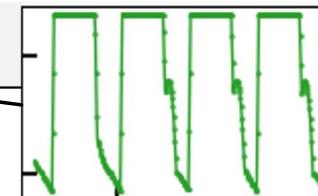
\mathbf{c} ：正常データの平均値， $\boldsymbol{\Sigma}$ ：正常データの共分散行列

検証：データセット

衛星「すざく」¹⁾と超小型衛星「ひろがり」²⁾の電圧/電流/温度データに適用したデータセットを半分に分割し，前半部分を学習データとした

データセット	データ数	サンプル数	サンプル周期[分]	異常の内容
すざく正常	22	28800	1	-
ひろがり正常	14	14400	2	-
傾向異常※	22	28800	1	電圧データ（平均47V）が5日間かけて1V低下
周期異常※	22	28800	1	電圧データ（周期96分）の周期が98分に変化
形状異常※	22	28800	1	電圧データの形状が変化

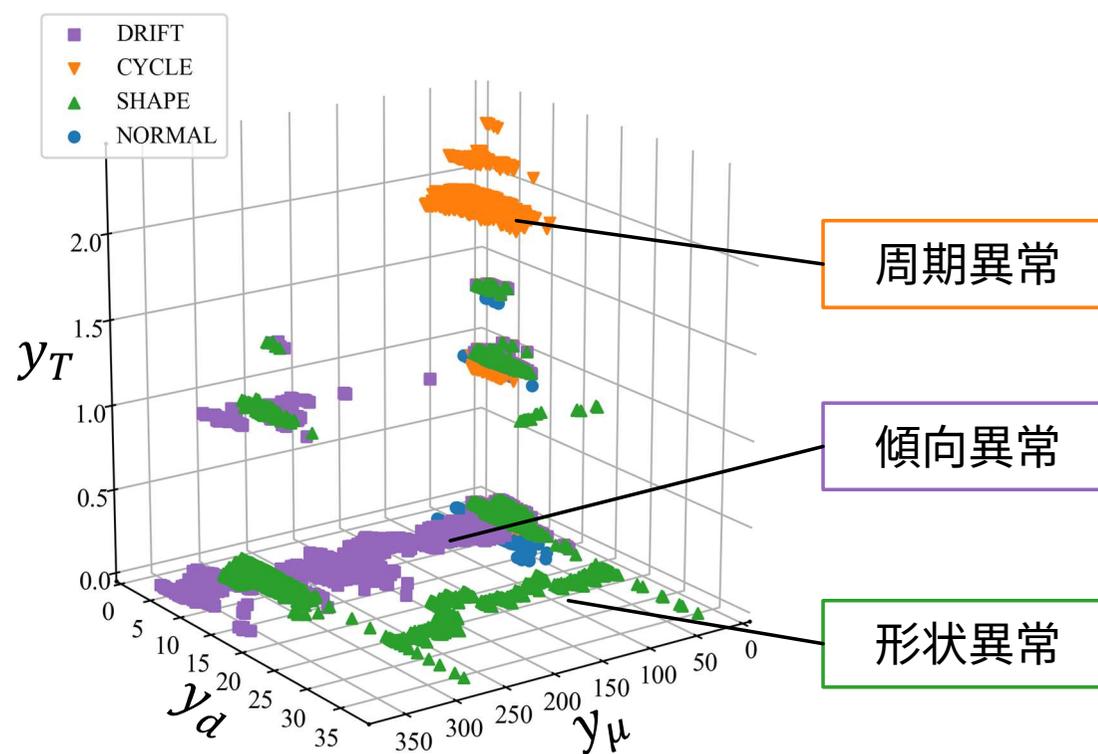
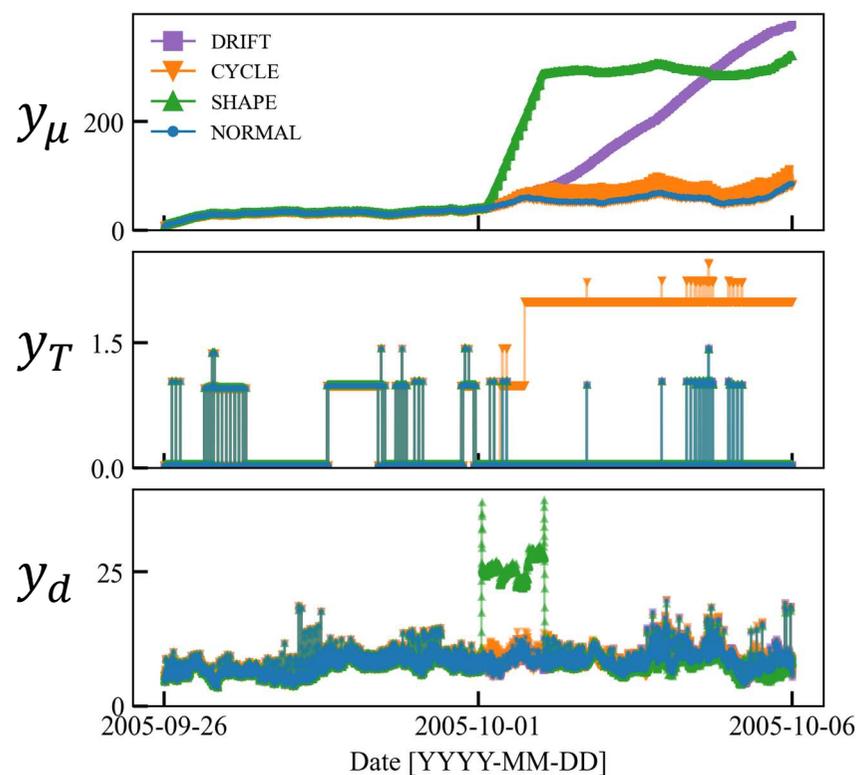
※すざく正常データに基づいて人為的に作成



1) <https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/past/suzaku.html>, 2) <https://www.omu.ac.jp/eng/sssrc/satellite/hirogari/hirogari-project/>

検証：異常分類と特徴量分布の対応

特徴量は異常分類に応じて変動した



検証： y_μ に対するテレメトリの寄与度

- 特徴量が異常な挙動を示した期間のSN比の平均値を計算した
- 異常が発生したデータは”DIST_PCU_BUS_VOL_CAL”

$$\text{SN比} : \text{SN} = 10 \log_{10} (x - \mu)^2 / \sigma^2$$

μ : 平均値, σ^2 : 分散, y_μ では $\sigma^2 = 1$ とした

順位	正常期間	傾向異常	形状異常
1	DIST_BATB_V_CAL	DIST_PCU_BUS_VOL_CAL	DIST_BATB_V_CAL
2	DIST_SHNT_DRV_V_CAL	DIST_BATB_V_CAL	DIST_PCU_BUS_VOL_CAL
3	DIST_PCU_BUS_VOL_CAL	DIST_SHNT_DRV_V_CAL	DIST_SHNT_DRV_V_CAL
4	DIST_BATA_V_CAL	DIST_XRS_I_CAL	DIST_XRS_I_CAL
5	DIST_XRS_I_CAL	DIST_BATA_V_CAL	DIST_BATA_V_CAL

検証： y_T に対するテレメトリの寄与度

- 特徴量が異常な挙動を示した期間のSN比の平均値を計算した
- 異常が発生したデータは”DIST_PCU_BUS_VOL_CAL”

順位	正常期間	周期異常
1	DIST_HCE_I_CAL	DIST_PCU_BUS_VOL_CAL
2	DIST_DRV_I_CAL	DIST_HCE_I_CAL
3	DIST_MWD_I_CAL	DIST_DRV_I_CAL
4	DIST_MWA_I_CAL	DIST_MWD_I_CAL
5	DIST_MWC_I_CAL	DIST_MWA_I_CAL

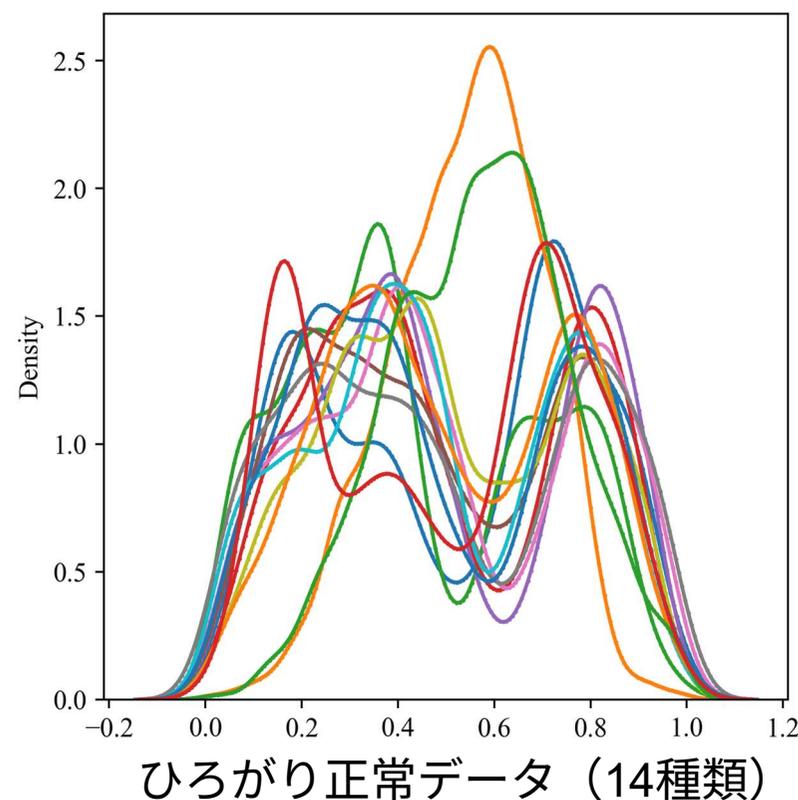
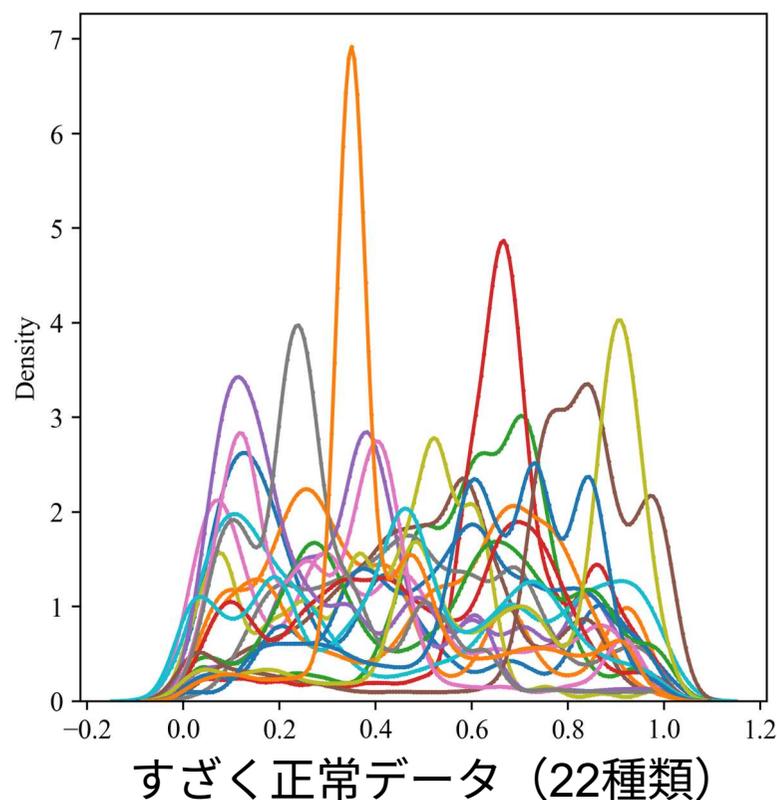
検証： y_d に対するテレメトリの寄与度

- 特徴量が異常な挙動を示した期間のSN比の平均値を計算した
- 異常が発生したデータは”DIST_PCU_BUS_VOL_CAL”

順位	正常期間	形状異常
1	DIST_XRS_COOL_I_CAL	DIST_PCU_BUS_VOL_CAL
2	DIST_PCU_OUT_I_CAL	DIST_BATB_V_CAL
3	DIST_HXD_I_CAL	DIST_BATA_I_CAL
4	DIST_MWB_I_CAL	DIST_XRS_COOL_I_CAL
5	DIST_BATB_V_CAL	DIST_BATB_I_CAL

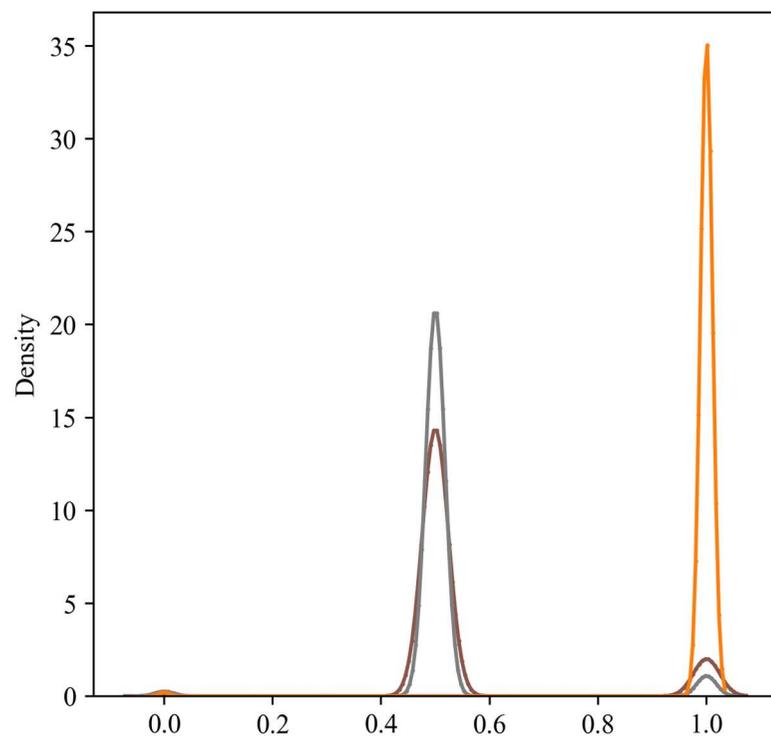
検証：正常データにおける μ の分布

運用モードや長期変動に応じて変動し，多峰性を持つ傾向がある

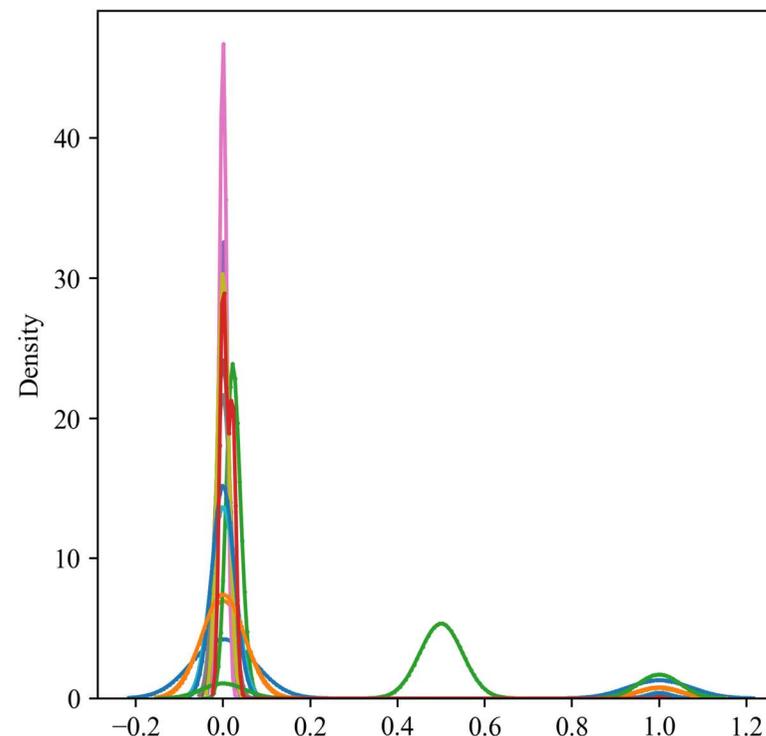


検証：正常データにおける T の分布

離散的に変動し、正常な値に集中する傾向がある



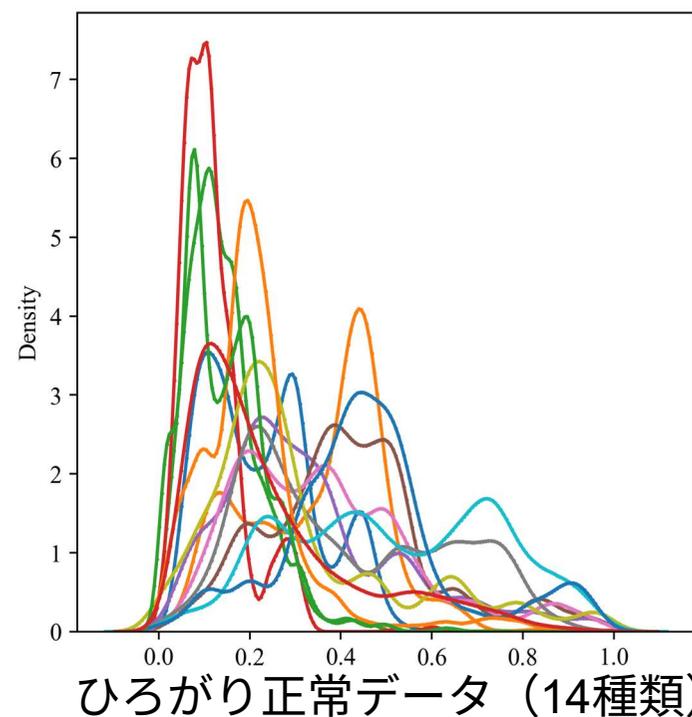
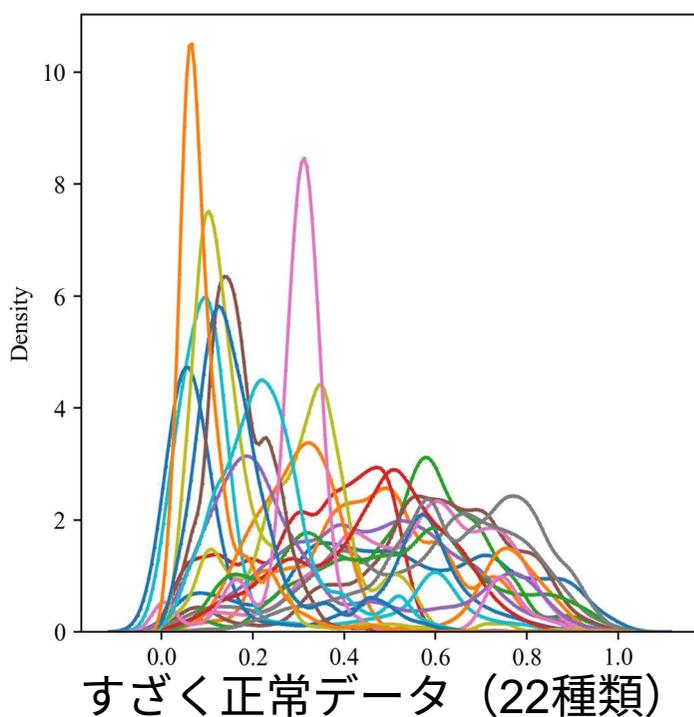
すざく正常データ (22種類)



ひろがり正常データ (14種類)

検証：正常データにおける d の分布

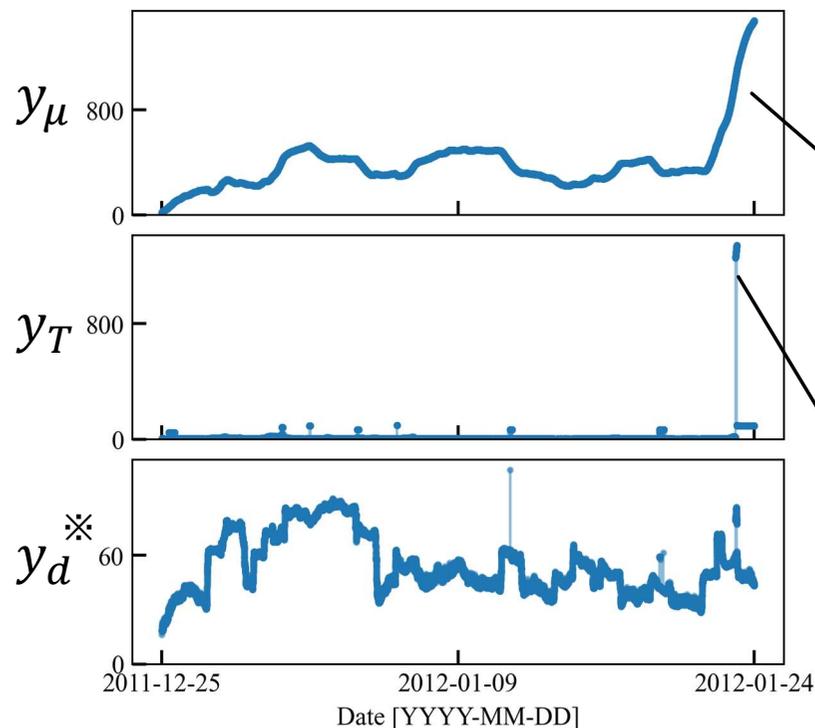
正の値を取り，片側の裾野が広くなる傾向がある



➡ 衛星に依らず似た分布を示すのであれば，学習データの共有が期待できる

検証：実際に発生した異常（参考）

「すぎく」の電源系の異常が原因と見られるSAFEHOLD発生直前30日間のテレメトリ149種類に適用した（学習データは60日前～30日前）



y_μ に対する寄与度

1	DIST_BATA_I_CAL
2	DIST_BATB_I_CA
3	DIST_BATA_V_CAL
4	DIST_BATB_V_CAL
5	HCE_BAT_BL_PRI_TMP_CAL

y_T に対する寄与度

1	DIST_SHNT_DRV_V_CAL
---	---------------------

※ d をユークリッド距離を用いて算出した結果

まとめ

- 異常分類と対応して変動する特徴量を定義し，衛星テレメトリに適用した
- 特徴量が異常分類に応じた振る舞いを見せることを確認した
- 寄与度を用いて異常が発生したテレメトリを特定できることを確認した
- 異なる衛星間でテレメトリの平均値，周期，差分の分布傾向を比較した

今後の課題

- 特徴量の変化度合やテレメトリの寄与度と実際の異常との対応付け
- 特徴量の分布に応じた正常データとの乖離度の算出方法
- 非周期データや離散データなど適用可能なテレメトリの拡大
- 運用モードによるテレメトリの振る舞いの違いの考慮