

# 狭帯域測光探査によって発見された 金属欠乏星候補の分光追観測

岡田 寛子（甲南大学）

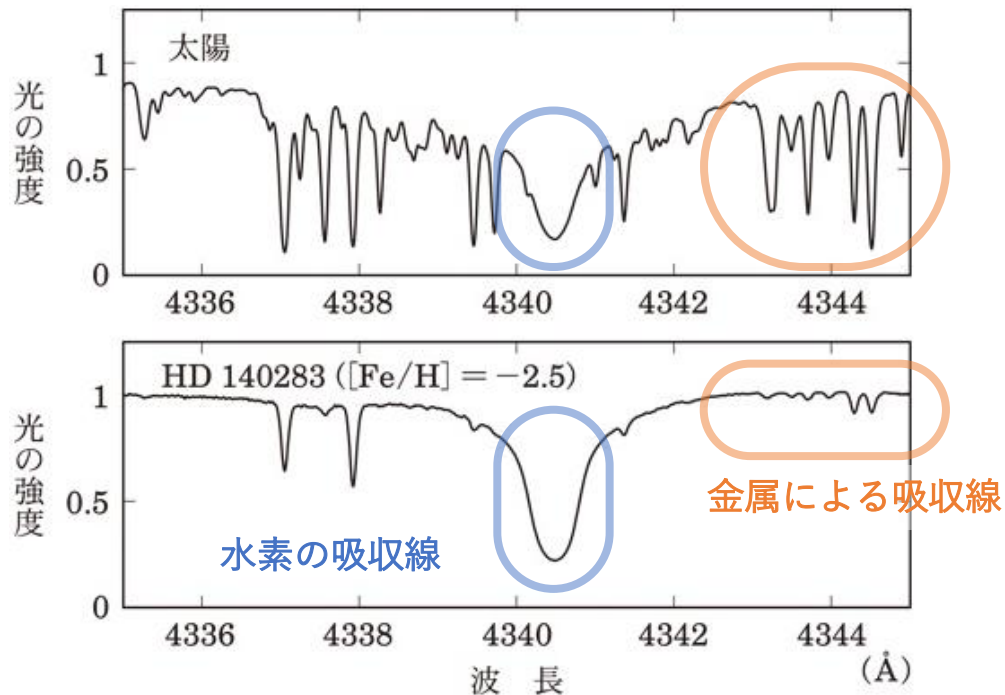
富永 望（国立天文台）、諸隈 智貴（千葉工業大学）

本田 敏志、古塚 来未（兵庫県立大学）

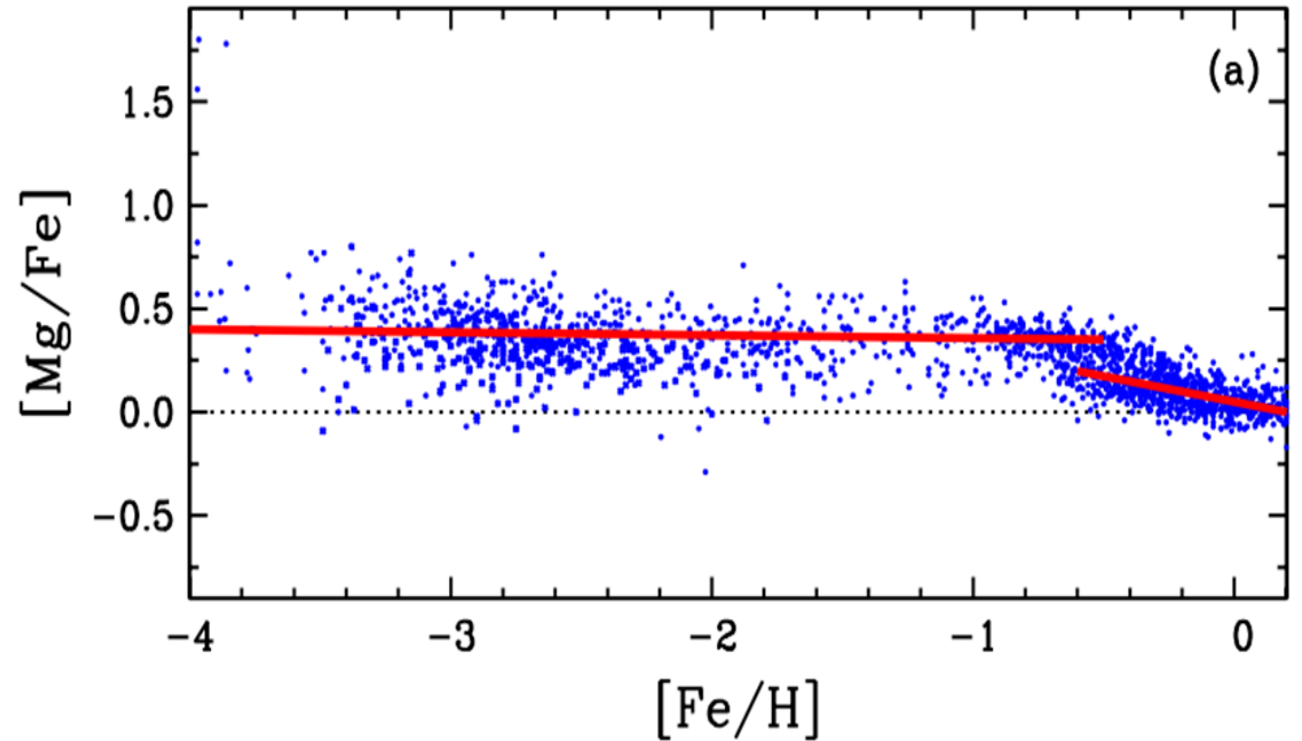
# 金属欠乏星

宇宙初期に誕生した、太陽と比べ金属の含有量が少ない星を**金属欠乏星**という。

恒星の化学組成には形成当時の宇宙の化学情報が記録されているため、金属欠乏星の化学組成を調べることは宇宙初期の化学進化を理解する上で重要である。



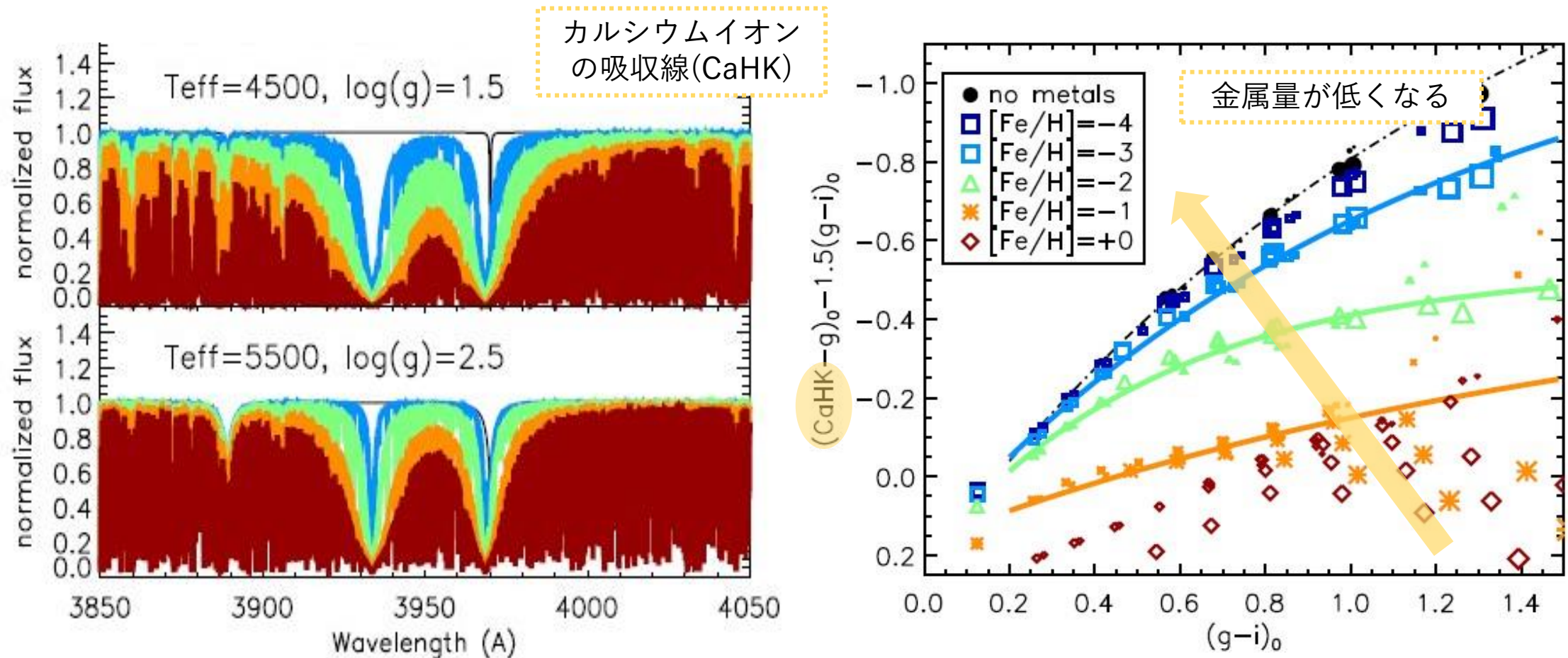
(図1) 太陽と金属欠乏星のスペクトルの比較  
野本・定金・佐藤編「恒星」



(図2) 星のマグネシウム・鉄組成比。(Cowan+2021)

# 狭帯域フィルタを用いた金属欠乏星探査

波長3950 Å付近にあるカルシウムイオンの吸収線(CaHK)は星の金属量に感度があり、金属欠乏星探査に有用である。

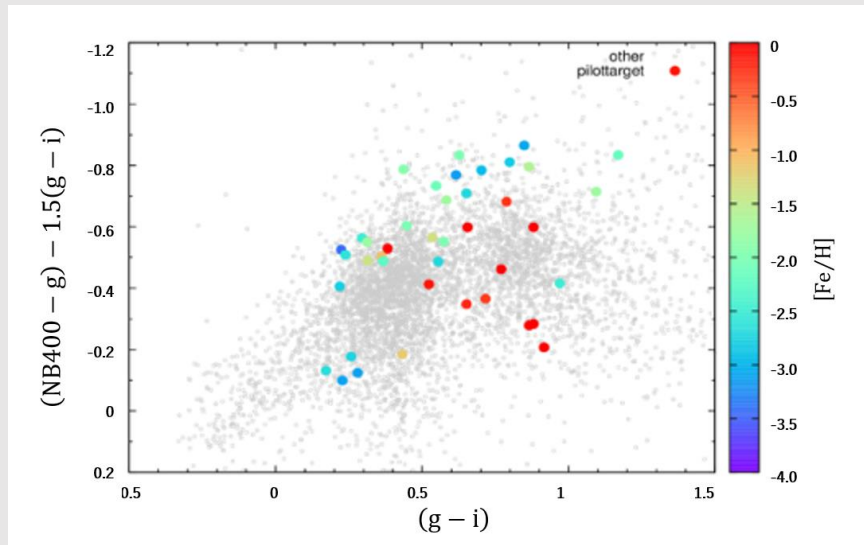


(図3) 金属量ごとのCaHK強度の計算結果(左)と2色図(右)。(Starkenburger+2017)

# Tomo-e Gozen+MALLSによる金属欠乏星探査

木曾シュミット望遠鏡/Tomo-e Gozenによる  
狭帯域測光探査

CaHKをカバーする狭帯域フィルタを含む  
4種類の狭帯域フィルタを用いた測光観測。



(図4) Tomo-e Gozenの観測で得られた恒星の2色図。  
© Iwasaki

なゆた望遠鏡/可視光中低分散分光器(MALLS)  
による追観測

Tomo-e Gozenで発見された  
金属欠乏星候補について、  
中分散分光観測を行い金属量を見積もる。

さらに、発見された金属欠乏星については  
高分散分光による多数の元素の測定

# 研究目的

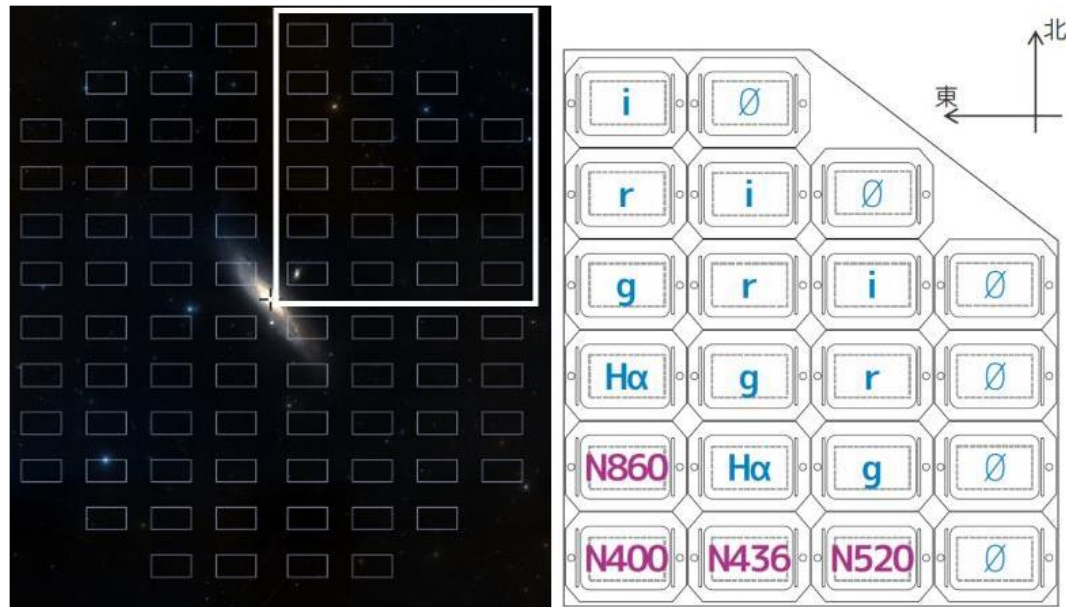
本研究では、Tomo-e Gozen+MALLSによる金属欠乏星探査手法を確立することを目的とした。

そのために、

- ① MALLSで恒星の金属量を見積もることができるかを検証した。
- ② Tomo-e Gozenの試験観測で取得したデータから選択した金属欠乏星候補についてMALLSで追観測することで、金属欠乏星候補の金属量を測定した。
- ③ 追観測の結果から、金属欠乏星候補の選択手法の改善・選択に用いるデータの拡充を行った。

# Tomo-e Gozenの試験観測

2019年3月, 8月, 2020年8月, 2021年8月に、Tomo-e Gozenに4種類の狭帯域フィルタを1チップずつ搭載して、約30平方度の領域で測光観測を実施した。



(図5) Tomo-e Gozen。©東京大学木曾観測所

(表1) 試験観測で用いた狭帯域フィルタと対応する吸収線。

狭帯域フィルタ	対応する吸収線
NB400	CaHK
NB436	CH
NB520	Mgb
NB860	CaIR triplet

- ・ 探査領域

  - 4 NB : 31平方度

  - 1 NB : 46平方度

- ・ 12等以下の星

  - 4 NB : ~1100天体

  - 1 NB : ~20000天体

- ・ ターゲット

  - 12等より明るい金属欠乏星 ( $[Fe/H] < -2$ )



# MALLSによる追観測・解析

Tomo-e Gozenの試験観測データから  
選択された金属欠乏星候補について、  
MALLSを用いて中分散分光追観測を行った。

取得した分光データについて、  
解析ソフトIRAFを用いて一次処理を行った。

解析ソフトiSpec (Blanco-Cuaresma+2014)を  
用いて自動解析スクリプトを作成し、  
観測スペクトルとモデルスペクトルとの  
フィッティングを行うことで、星の**金属量**  
[M/H],  $\alpha$ 元素・鉄組成比[ $\alpha$ /Fe]を決定した。

(表2) 追観測の概要。

観測所	兵庫県立大学西はりま天文台
望遠鏡	なゆた望遠鏡
観測装置	可視光中低分散分光器(MALLS) ロングスリットモード
観測波長域	~4900-5300 Å
波長分解能	~7500

(表3) 恒星の大気パラメータの決定方法。

有効温度 $T_{\text{eff}}$	測光値とGaiaで得られた 天体の距離から推計
表面重力 $\log g$	
微視的乱流速度 $V_{\text{mic}}$	経験則
金属量 [M/H]	モデルスペクトルとの フィッティング
$\alpha$ 元素・鉄組成比 [ $\alpha$ /Fe]	

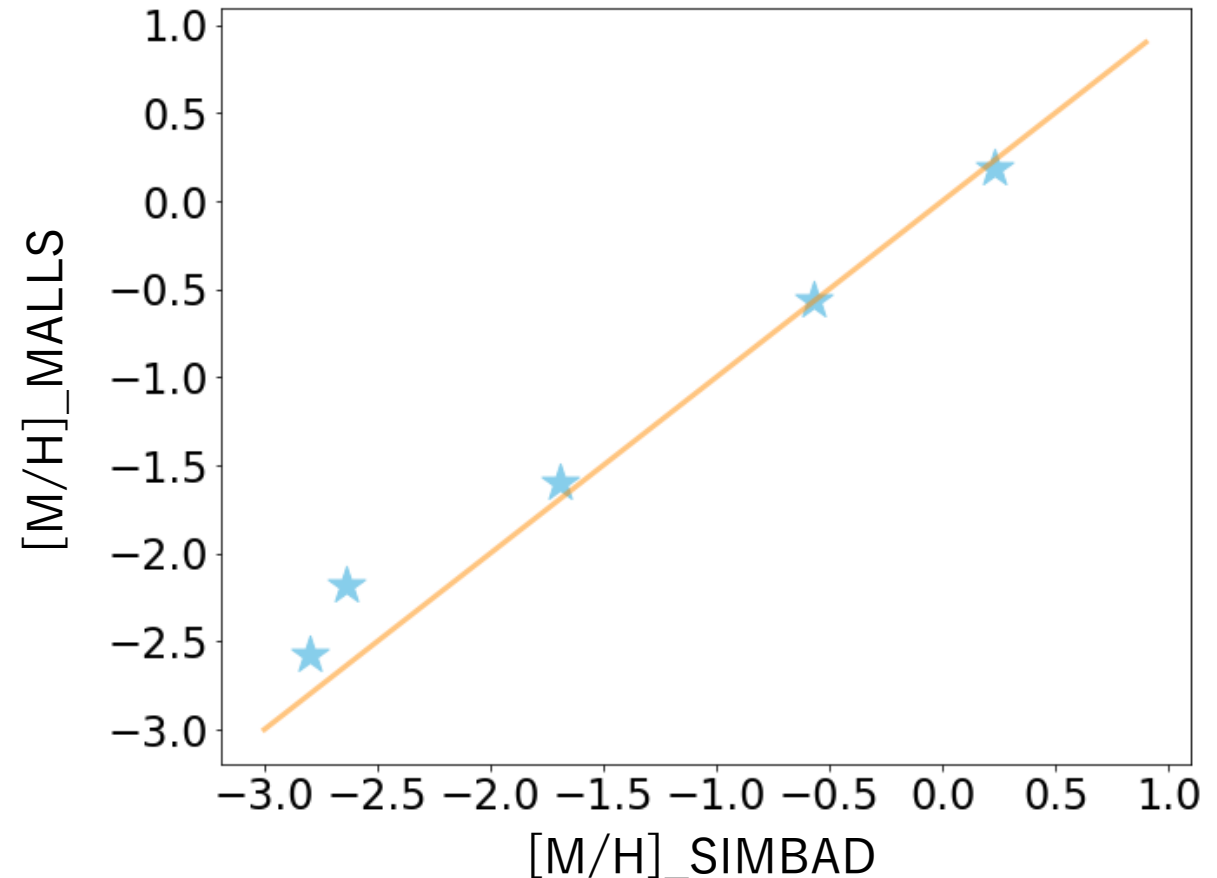
# 中分散分光による金属量の見積もり

MALLS (R~7500)を用いて恒星の金属量を見積もることができるかを調べるために、金属量が既知である星について、本研究と同様の設定で観測・解析を行った。

(表4) 観測天体の金属量。

天体名	高分散分光で取得された金属量	今回の結果
Mu Leo	0.23	0.19
Alp Boo	-0.57	-0.56
HD64090	-1.69	-1.60
HD122563	-2.64	-2.18
HD88609	-2.80	-2.58

- $[M/H] < -2$ では過大評価してしまっているが、 $[M/H] > -2$ ではよく一致している。
- スペクトル全体をフィットすることでR~7500でも金属量を見積もれる。



(図6) MALLSを用いた中分散分光で得た金属量とSIMBADに記載されている高分散分光による金属量の比較。



# 2020年2月の追観測結果

(表5) 2020年2月の候補選択手法

測光較正	・ 線形補間
機械学習手法	・ Random Forest (RF) ・ Neural Network (NN)
学習データ	・ Tomo-eで観測した、 金属量既知~50天体

- ・ 10等より明るい天体から優先して観測したが、悪天候により10天体しかデータを取得できなかった。
- ・  $[M/H] \leq -2$ を満足する金属欠乏星は見つからなかった。

# 2020年9月の追観測結果

(表6) 2020年9月の候補選択

測光較正	・ 線形補間
機械学習手法	・ RF           ・ NN ・ XGBoost (XGB) ・ LightGBM (LGBM)
学習データ	・ iSpecで計算した、 恒星モデル~16万個

- ・ 機械学習手法やフィルターセットの組み合わせを拡充し、多数の恒星モデルを用いることで選択の改善を試みた。
- ・ 10等より明るい約120天体について観測した。
- ・ 解析の結果、1天体を  $[M/H] \sim -1.92$  と同定した。

# 2020年12月の追観測結果

(表7) 2020年12月の候補選択

測光較正	・ 線形補間
機械学習手法	・ RF           ・ NN ・ XGB        ・ LGBM
学習データ	・ Tomo-eで観測した、 金属量既知~6000天体

- ・ 多数の恒星モデルによる選択では精度が向上しなかったため、Tomo-eの試験観測で取得した測光データを用いて選択した。
- ・ 10-12等の約60天体について観測を行った。
- ・  $[M/H] \sim -1.85$ で特異な $\alpha$ 組成（通常 $[M/H] < -1$ の星は $[\alpha/Fe] = +0.4$ 程度であるが、太陽と同程度の $\alpha$ 組成 $[\alpha/Fe] \sim 0$ ）を持つ星を同定した。

# 2021年9月の追観測結果

(表8) 2021年9月の候補選択

測光較正	<ul style="list-style-type: none"> <li>線形補間</li> <li>UV, uバンドのカタログデータを追加</li> </ul>
機械学習手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>RF           • NN</li> <li>XGB          • LGBM</li> </ul>
学習データ	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tomo-eで観測した、金属量既知~6000天体</li> </ul>

- 測光較正に用いた線形補間に外挿が含まれていたため、紫外線などのカタログデータを追加して測光較正を改善した。
- 10-12等の約50天体について観測を行った。
- 本研究で最も低金属量となる[M/H]~-1.95の星を同定した。

# 2021年12月の追観測結果

(表10) 2021年12月の候補選択

測光較正	・ 色補正項
機械学習手法	・ RF           ・ NN ・ XGB        ・ LGBM
学習データ	・ Tomo-eで観測した、 金属量既知~6000天体

- ・ 既知の星のスペクトルを用いて広帯域測光値と狭帯域測光値の関係を定める色補正項を導入。
- ・ 約50天体のデータを取得したが、新CCDに起因するノイズがひどいため解析方法を検討している。

# 今後の観測計画

(表11) 2022年9月 (実施予定) の候補選択

測光較正	・色補正項 ・大気吸収補正
機械学習手法	・RF           ・NN ・XGB          ・LGBM
学習データ	・Tomo-eで観測した、 金属量既知~6000天体 ・iSpecで計算した、 恒星モデル~100万個

- ・9月に予定されている追観測では大気吸収補正を導入し、多数の恒星モデルを用いた機械学習によって候補選択を行う予定である。
- ・もし新たに製作した狭帯域フィルタを用いたテスト観測が9月頭に行えればそのデータも含めて候補選択を行う予定である。



# まとめ

- **金属欠乏星**は宇宙初期の化学進化を理解する上で重要である。
- Tomo-e Gozen+MALLSという一連の**探査手法を確立する**ため、
  - ①なゆた望遠鏡/MALLSを用いて恒星の金属量を見積もることができるか検証した。
    - モデルスペクトルとのフィッティングにより、**中分散分光で金属量を見積もることができた。**
  - ②Tomo-e Gozenの試験観測データから選択した金属欠乏星候補について、MALLSによる追観測を行い金属量を測定した。
    - 金属欠乏星候補のうち4天体を $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -2$ 、そのうち2天体を特異な $\alpha$ 組成であると同定した。
  - ③機械学習手法や用いるデータの拡充、測光較正などにより候補選択の手法を改善してきたが、金属欠乏星候補の選択手法はまだ確立されていない。

# 今後の展望

- 2022年9月27-30日、12月(提案予定)に、MALLSを用いて金属欠乏星候補の追観測を行う予定である。
  - 測光較正に色補正項・大気吸収補正を導入することで、モデルスペクトルを用いた機械学習による**高精度の候補選択を実現**する。
  - 2022年秋に実施予定のTomo-e Gozenの4分の1(21チップ)を用いたテスト観測で新たに追加されるデータを含めて候補を選択する。
  - 金属量既知~30天体を本研究と同様の設定で観測・解析し、観測エラーやフィッティングのエラーを含む**測定エラーを見積もる**。
- $[M/H] \sim -2$ の特異な $\alpha$ 組成を持つ星と同定した天体や金属量が高くても特異な組成を持つ星と同定した天体について、**高分散分光の観測を提案し詳細な組成を決定する予定**である。
- 修士論文では以下についてまとめる予定。
  - これまでの試験観測に加えて新しく製作した狭帯域フィルタを用いたテスト観測
  - これまでのTomo-e GozenおよびMALLSの観測結果を用いた、測光較正の改善・機械学習による候補選択の改善
  - 開発したモデルスペクトルとの自動フィッティングツールを用いて、これまでの追観測に加えて2022年9月および2022年後期に提案予定の追観測で測定した金属欠乏星候補の金属量と $\alpha$ 元素と鉄の組成比