

# 金属過剰星と惑星を持つ星の化学組成 —HIDES データに基づく「わし座 31 番星」 の分光解析—

大久保美智子

〈京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: michiko@kusastro.kyoto-u.ac.jp

HIDES の登場により日本国内の望遠鏡でも恒星の精度の高い化学組成解析が可能になりました。世界中で恒星の化学組成解析が行われていますが、質の高いデータを用いて、いかに、より精密な解析を行うかが重要になっています。現在日本では HIDES を用いて惑星を持つ星の化学組成解析を行うためのプロジェクトが行われていて、太陽型星（スペクトル F, G, K 型）のデータが豊富に得られています。惑星を持つ星には金属量の多い星が統計的に多いということがいわれています。金属が多いことと惑星の存在に関係があるのでしょうか。私は HIDES のデータを用いて金属過剰星の候補の一つである、わし座 31 番星の 27 種の元素の化学組成を詳しく調べました。結果として、わし座 31 番星は太陽より金属量が 2 倍以上多い金属過剰星であることが確認され、その他の元素の量も多いことがわかりました。金属過剰星と惑星を持つ星について最近の研究を紹介しましょう。

## 1. 太陽より金属量が多い星とは？

星のスペクトルから星の表面化学組成を調べることができます。恒星物理の分野においては、さまざまな望遠鏡の高分散分光器 HDS (High Dispersion Spectrograph) は暗い宇宙初期に生まれた天体が観測でき、非常に金属の欠乏した恒星の研究にめざましい成果を上げています。一方、岡山天体物理観測所の高分散分光器 HIDES (High Dispersion Echelle Spectrograph) は、比較的明るい恒星を対象にして、惑星を持つ恒星の探査や化学組成解析が行われており、精度をとことんまで追及するような精密な研究に力を発揮します。

宇宙ができたころの物質の化学組成は主に軽い元素である水素やヘリウムで占められており、その後、銀河中での星形成や超新星爆発などが起

り、重い元素が増えていったと考えられています。つまり古い時代に生まれた星ほど金属量が少なく、新しい若い星ほど金属量が多くなっているということです。ここで金属とは水素とヘリウム以外の元素のことを指します。そして金属量の表し方に触れておきます。宇宙で最も多いのは水素です。そこで金属元素の代表として鉄を考え、水素に対する数の比を  $\text{Fe}/\text{H}$  で表します。太陽の鉄の量は、 $\log(\text{Fe}/\text{H}) = -4.5$  です。金属の過不足を太陽に比べて  $[\text{Fe}/\text{H}] = \log(\text{Fe}/\text{H})_{\text{星}} - \log(\text{Fe}/\text{H})_{\text{太陽}}$  と表します。当然  $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{太陽}} = 0$  です。このように太陽に比べて元素量の過不足を表し、対数スケールであるため dex を付けて表記します。

銀河進化の関係においては恒星の化学組成解析は、金属欠乏星の研究が主流でした。なぜなら銀河系がどのように進化し、その過程で星間物質の

化学組成がどのように変わってきたかを調べることに重きがおかれてきたからです<sup>1)</sup>。

最近生まれた若い星ほど金属量が多いとはいえ、銀河の化学進化を考えるだけでは、太陽より2倍以上金属量が多い星の存在の説明ができません。なぜなら星が生まれ変わり、超新星爆発が起こり、その結果時間とともに金属量が増えても、現在の銀河進化モデルでは金属量が増える割合はだんだん頭打ちになるからです。ところが、太陽近傍には金属量が特に多い星が存在します。そのような星は金属過剰星 [SMR (Super-Metal-Rich) stars] と呼ばれます。かつてヒアデス星団（年齢が約6億年と比較的若く、最近の銀河ガスの金属量を代表していると考えられていました）の金属量が +0.2 dex であるという結果が報告されていた（最近では +0.1 dex となっている）こと、また巨星では金属量が 0.2 dex を超える星がほとんどないことから、金属過剰は太陽より鉄の量が約1.5倍多いこと、つまり、 $[\text{Fe}/\text{H}] > 0.2 \text{ dex}$  であるということが定義となりました。

金属過剰星の議論は1969年にSpinradとTaylorが「しし座 $\mu$ 星（K型巨星）は金属量が特に多い星である」ことを示唆したことからはじまりました<sup>2)</sup>。このときは分光分解能の低いデータで議論されていましたが、その後、高分散データを用いた解析報告が次々発表されました。最初に金属過剰星といわれたしし座 $\mu$ 星自身は0.2 dex 以上という結果を報告している論文もありますが、0.2 dex 以下であるという研究もあり、まだ金属過剰星であるかどうかの決着はついていません。

一方、最近になって惑星を持つ星が多数発見されるに伴い、その親星の金属量が太陽に比べて0.2 dex 以上のものがたくさんあることがはっきりしてきました。Taylorによって文献に挙げられた金属過剰星の候補はたかだか6~7個であるのに、その候補の星のうち半分は惑星を持つ星が含まれます<sup>3)</sup>。例えば、惑星を持つHD38529はTaylorの金属過剰星の候補であり、実際に私たち

がHIDESで観測し解析したところ、確かに金属過剰星であることがわかりました<sup>4)</sup>。

## 2. 惑星を持つ星と金属過剰星

### 2.1 太陽系外惑星の発見

我々の太陽系外の遠方の恒星の周りの惑星を探そうと系外の惑星探査が世界中で行われています。1995年に初めてペガサス座51番星で木星型惑星が発見されました<sup>5)</sup>。惑星の重力によって親星がわずかにふりまわされ、そのふらつきによる視線速度の変化を捕らえて惑星を見つけます<sup>6)</sup>。その他に系外惑星検出の方法としては、親星の前を惑星が通過するとき起こる食によるわずかな減光を捕らえる方法があります。この方法で検出できるものは惑星の軌道面と地球からの視線方向がほぼ一致する場合だけですが、この方法では軌道傾斜角がわかるため、視線速度変化の結果と併せると惑星の質量を求めることができます。直接的な撮像によって、惑星を検出しようという試みもありますが、惑星とその親星を分離して観測するには非常に高度な観測技術を必要とし、現在までには成功していません。しかし、コロナグラフなどの方法を用いて惑星発見のための望遠鏡を宇宙に打ち上げる計画が日本も含めて世界で考えられています。近い将来、直接惑星を見ることができるようかもしれません。惑星の分光観測が直接できたら、どのような化学組成を持つ惑星なのかかわかります。太陽系と同じような組成でできているのか、また我々の想像とは異なる化学組成を持つのか。そういうことがわかれば、太陽系以外にも生命の住むことのできる惑星は存在するのかということにも迫り、また惑星形成論も大きく発展するでしょう。

現在約120個の惑星が発見されています<sup>7)</sup>。これらの惑星は、現在の視線速度測定（数m/s）でも測れる比較的大きい視線速度の変化を親星に与えるものに限られ、恒星のすぐそばを回る巨大ガス惑星や楕円軌道の惑星がほとんどで、地球型惑

星ではありません。このような惑星はどのようにできたのでしょうか。現在発見されている多くの系外惑星系は、今まで考えられていた太陽系の惑星形成の理論では説明できません。わが太陽系の惑星形成に関する考え方は主に二つあります。一つは惑星形成初期の恒星の周囲に大きい質量の円盤の存在を仮定して、円盤自身の重力不安定によって円盤が分裂して多数の微惑星ができ、周りのガスを取り込んで惑星になるというモデルです。もう一つのモデルは小さい質量の円盤の存在を仮定して、その赤道面にガスとチリの円盤の中から重いチリだけが集積し、やがてチリの層から微惑星ができて合体して惑星ができたというものです。しかしこれら二つの説はどちらも現在の太陽系の惑星形成を完全に説明できない部分があり、まだわが太陽系の惑星形成理論ははっきりとは確立していません。現在では巨大ガス惑星の発見に触発されて、原始惑星系円盤の質量によって作られる惑星の質量も異なるというモデルも考えられています<sup>8)</sup>。複数の惑星系を持つ星も発見されていて、思いもかけなかったような多様性を持つ多くの系外惑星が発見されたことによって、惑星形成理論に新たな問題が加わりました。

## 2.2 惑星を持つ星の金属量と元素パターン

現在それらの惑星を持つ親星の化学組成の解析が進んでいます。太陽にも惑星はあり、金属量は銀河の円盤にあるスペクトル型 **F-G** 型の星の平均の金属量より多いということがいわれています。現在見つかっている惑星を持つ恒星はほとんどがスペクトル型 **F-K** 型の主系列星であり、多くは太陽よりもさらに金属量が多いということがわかっています。その解釈の一つとして、原始惑星系円盤の金属量が多いほどダストが多量に生成され、結果として効率よく惑星が形成されるとする考え（原因説）があります。ただ金属量がたかだか十分の数 **dex** 異なるだけで惑星ができやすくなったりできにくくなったりするのでしょうか。ちょっと直感的にはしっくりしないところがあり

ます。一方それとは別に、観測される金属量の過剰の原因はいつまで来た惑星や微惑星などの降着による親星の表面層のみの「汚染」と関係するのではないかという考え（結果説）があります。つまり微惑星のような固体物質では（水素のような軽元素は蒸発して欠乏していますから）相対的にいうと金属過剰になっているわけで、これが降り積もったがために星の表面の金属が増えてしまったとする考え方です。この両者を比べると最近では前者の原因説のほうがやや優勢の傾向がありますが、「なぜ惑星を持つ星の金属量が多いのか」についてのこの論争はまだ決着には至っていません。

今、仮に後者の「汚染」説の観点に立って考えましょう。もし惑星が母天体に飲み込まれて、結果として見かけ上、金属量が多くなったとする結果説に立てば、その証拠はあるのでしょうか。例えば太陽に地球型惑星 20 個分の物質が落ちてきたら太陽の金属量が、見かけ上  $+0.11$  dex 増加するという計算があります。早期 **G** 型主系列の星はその星の質量の約 3% が対流層であり、**F** 型の星ではさらに対流層は浅くなるから金属量が増える影響はより顕著になります。水素が欠乏した物質（微惑星や地球型惑星など）が親星に降着すると、その親星の表面の化学組成に大きな影響を与えることが予想されるわけです。しかし、今のところ星のスペクトル型によって金属過剰の程度が異なるというはっきりした傾向は見出されてはいません。一方、元素の凝縮温度に対してそれぞれの元素の量の違いの有無を調べることで惑星の降着による痕跡を発見しようとする研究も行われています。凝縮温度とは元素が気相から固相になる温度のことです。もし微惑星などが落ちてきて親星の金属量が多くなったとするならば、落ちてきた微惑星に多く含まれる物質が恒星の表面の化学組成で多く見られるはずという考え方です。元素には低い温度で凝縮する揮発性元素（炭素、酸素、窒素など）と、高い温度で凝縮する難揮発性元素

（ケイ素，鉄，チタンなど）があります。もし，高温の条件下で形成された微惑星などが落ちてきたとするならば，炭素，酸素，窒素などの揮発性元素は微惑星にあまり含まれないために恒星の表面の金属量への影響はあまりなく，一方，微惑星に多く含まれる鉄などの高温で凝縮する元素が相対的に増加するので，恒星の表面の揮発性元素の量と難揮発性元素の量との間に違いが見られると考えられます。実際に Smith たちは，HD209458 などいくつかの星では，揮発性元素と難揮発性元素の元素量に違いが見られるということを示唆しています<sup>9)</sup>。しかしその後，より高品質な観測データを使って追試が行われましたが彼らの結果を追認することは出来なかったのです。まず我々は HD209458 では元素量の凝縮温度による違いは見られないという結果を発表しました<sup>10)</sup>。また岡山の HIDES で観測した惑星を持つ星 14 個の解析結果からは揮発性元素と難揮発性元素の元素量に違いが見られる星はないと報告したのです<sup>11)</sup>。このように人によって異なる結論が出されているので状況はやや混乱していますが，この問題を決着するにはまだしばらく時間が必要だと我々は考えています。凝縮温度に対して揮発性元素と難揮発性元素の元素量の違いを調べるためには，元素量を定める際に必要な恒星の大気パラメーター（有効温度，表面重力加速度など）を精密に決めなければなりません。また揮発性元素である炭素や酸素は鉄の増加とともに減少する傾向があることが銀河の化学進化の研究からわかっています。この効果についても考慮しなくてはなりません。これらの効果をちゃんと取り入れるには惑星を持つ星のみならず多くの比較星のデータが必要ですが，我々は HIDES でこの目的のための十分なデータを得ることができましたので（本特集の竹田氏の記事を参照）これを用いて私たちはさらに研究を進めているところです。

### 2.3 惑星を持つ星と金属過剰星の関係

最初に惑星が発見されたペガサス座 51 番星，

同様に惑星が見つかった，かに座 55 番星，ヘルクス座 14 番星などは金属過剰星の候補として挙げられていました。その後の研究の結果，惑星を持つ星の金属過剰星の出現頻度はそのうち約 40% にのぼることがわかっています。一方，太陽近傍の（惑星を持たない普通の）星の中での金属過剰星の出現頻度は 1% に満たないということがいわれています。ですから金属量が多い原因は惑星を持つことと何か関係しているのではないかということが考えられます。

しかし，主系列星だけでなく主系列星が進化した巨星の段階にある星でも最近惑星が発見されています。HIDES で惑星が発見された星 HD104985 は G 型巨星であり， $[Fe/H]$  は  $-0.35$  dex つまり金属欠乏という結果が報告されています（本特集の佐藤氏の記事を参照）。そのほか 2003 年冬に HIDES を使って惑星を持つ K 型巨星 4 個の観測を行いました。我々のグループの定金氏がこれらの星を解析した結果，これら 4 個の星はいずれも金属過剰星ではないことがわかりました。つまりこれまでの惑星を持つ主系列星（明らかな金属過剰の傾向）の場合と相容れない結果となったのです。これらはどういうことなのでしょう？一つの考え方は，惑星を持つ主系列星の金属過剰は前節で触れた「汚染説」で起こっているのだとする解釈です。つまり主系列星が巨星に進化すると対流層が深くなることから，もともと表面部分だけ金属量が多くても，進化が進むと内部との混合が起きて薄められるので結局過剰が消えてしまったかもしれません。まだサンプルが少ないためはっきりしたことはいえませんが，惑星を持つ巨星の金属量の詳しい解析から新しいことが見えてきそうです。

今回私は金属過剰星の候補であるわし座 31 番星の詳細な元素組成解析を行いました。わし座 31 番星では現在のところ惑星が見つかっていません。惑星が発見されていない金属過剰星の化学組成解析をすることで，金属過剰星と惑星を持つ星



の関係を見だしたいと思い、そのはじめの一步としてわし座 31 番星に注目してみました。

### 3. 金属量が多いにもかかわらず 古い星わし座 31 番星

わし座 31 番星は我々のかなり近くの 48 光年の距離にあり、スペクトル型は **G8IV** で太陽と似た星で、金属過剰星の候補として以前から知られています。この星のパラメーターを決定してみました。図 1 は金属量が太陽の 2 倍を仮定したいろいろな質量を持つ星の進化のトラックの上に、わし座 31 番星 ( $[Fe/H] = +0.35$ ; 後述) の観測データをのせたものです。この図からわし座 31 番星の質量は太陽とほぼ同じということがわかります。一方、図 2 の等年齢線との比較から年齢が約 70~90 億年の間であることがわかり、少なくとも太陽(約 45 億年)よりはずっと年齢が古いことがわかります。最初に述べたように銀河の化学進化から若い星ほど金属量が多いことが一般的にいえま。しかしわし座 31 番星は太陽より年齢が古いにもかかわらず、金属過剰星の候補となっていま

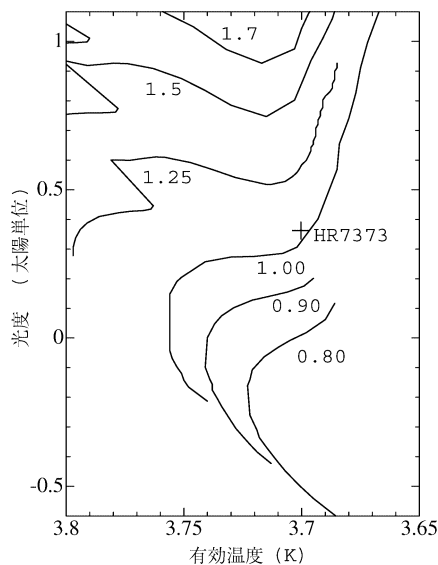


図 1 わし座 31 番星 (HR7373) の質量を進化のトラックと比べて推定する。図中の数字は太陽質量単位、横軸、縦軸は対数スケール。

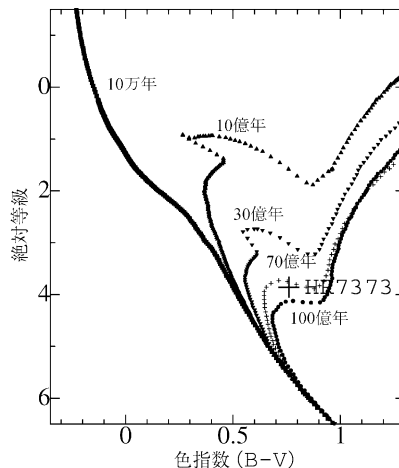


図 2 わし座 31 番星 (HR7373) の年齢を等年齢線図から推定する

す。なぜわし座 31 番星は金属量が多いのでしょうか？ 惑星が見つかっていない星で金属量が過剰の傾向を示す星の化学組成は惑星を持つ星の化学組成のパターンと似ているのでしょうか。惑星が見つかっていない星と惑星を持つ星との化学組成の比較をすることは化学組成の面から惑星形成を考えるうえで重要です。また金属過剰星の存在が惑星を持つことに関係があるのか、またその起源は別にあるのか、銀河の化学進化を考えるうえでも重要です。

私は **HIDES** を用いてわし座 31 番星のスペクトルデータ (4,000~8,800 Å の波長域で、波長分解能 65,000, S/N 比は 200~300) を取得し、化学組成を詳しく解析しました。鉄のスペクトル線から大気パラメーターを決めたところ、温度は  $5,400 \pm 50$  K、表面重力加速度 (cgs 単位) は対数で  $4.32 \pm 0.15$ 、鉄の金属量は  $[Fe/H] = +0.35 \pm 0.05$  dex という結果を得て、太陽より 2 倍以上鉄の量が多いということがわかりました。金属過剰星であることは明らかです。わし座 31 番星のように太陽よりはるかに古い時代にできたのに太陽より 2 倍も鉄の量が多いということは普通の銀河系の化学進化ではとても説明することができません。他の元素も太陽と比較して約 2 倍以上多いと

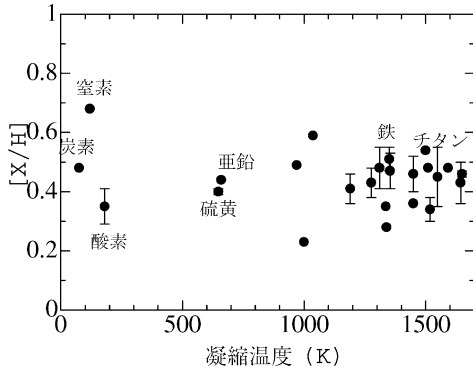


図3 凝縮温度と測定した元素量の関係

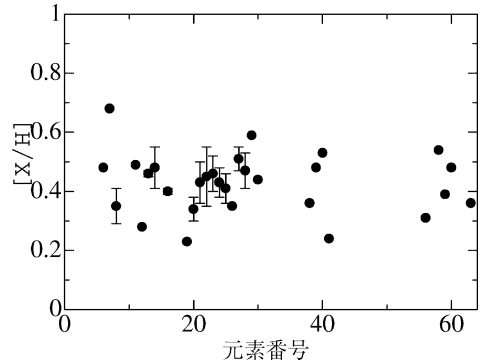


図4 元素番号と測定した元素量の関係

ということがわかりました。

まず一つの作業仮説として「金属過剰星＝惑星を持つ星」と考える立場をとってみましょう。原因説にせよ結果説にせよ金属過剰は惑星を持つということに密接に関連する現象なのだとする考え方は、ひとつの可能性はこの星には、かつて微惑星や惑星が存在し、これらが恒星表面に落下して表面だけ太陽より金属量が多くなったのかもしれない。わし座31番星は今のところ惑星の存在を示す視線速度の周期的な変化は確認できていませんが、だからといって惑星がないとも限りません。惑星の軌道面が観測者からの視線に対して直交していたら、視線速度の変化は検出できないからです。さらに想像をふくらませると、わし座31番星は昔どこかで別の星との近接遭遇を経験したことがあり、そのときに惑星が吹き飛ばされて失われてしまったのかもしれない。凝縮温度に対して揮発性元素と難揮発性元素の金属量の違いを調べてみました。もし、揮発性元素が難揮発性元素より少ない場合、水素が欠乏したような難揮発性の物質が恒星表面に落ちて、見かけ上多くなったということが考えられます。図3に結果を示します。わし座31番星の元素量にはばらつきがあり、凝縮温度が高くなるにつれて元素量([X/H])が増加するという傾向は見られませんでした。ですから、もし仮にこの星が惑星を持っている(いた)としても金属過剰の原因が惑星物

質の降着によるものとは言えないでしょう。

次に、わし座31番星の金属過剰の特徴は惑星とは全く無関係の現象であるという立場に立って考えてみましょう。わし座31番星は運動学的に見て、銀河中心から高速で外に向かって動いていることがわかります。銀河中心付近の金属量の多い星間物質からこの星が生まれたという可能性もあります。超新星爆発の影響を受けて超新星爆発で作られる特定の元素量が多いかもしれません。それを調べるために図4に元素番号に対して元素量をプロットしました。これもばらつきが大きく、これといった明らかな特徴は見られませんでした。したがって超新星から放出された物質のような特別に異常な組成のガスから生まれた星ということでもないようです。

ですから、要するに、わし座31番星の正体は謎であるとしか言えないのが現状です。今回の解析結果だけでは惑星との関係や金属過剰星の起源を論ずるには不十分であることは明らかですので、もっと多くの金属過剰星の化学組成解析を行い、金属過剰星の起源や惑星を持つことと関係があるかどうかについて、研究を進める必要があります。

## おわりに

今回のわし座31番星の解析結果からは残念ながら惑星との関係や金属過剰星の起源につながる

鍵をつかむことはできませんでした。しかし、年齢が古い星でも金属過剰な星があるということを自分の手ではっきり確認しただけでも意義があったと思います。今後もっと金属過剰星のサンプルを増やしてその中で共通の特徴を見つけたいと思います。年齢が古い星でも金属過剰な星があるということは事実であり、そのような星の起源を探ることは銀河の化学進化を考えるうえでも重要だと私は考えます。私は今後もさらに研究を進めていき、この興味ある星の謎の解明に向けて努力したいと思っています。

## 謝 辞

HIDES のデータの提供および解析方法などについて私をご指導してくださった国立天文台の竹田洋一氏、大阪教育大学の定金晃三氏に深く感謝いたします。京都大学の平田龍幸氏には元素のスペクトル線の波長やその遷移確率などの物理データを集めていただき、また解析ならびにサイエンスのご指導をいただきました。またいつも観測でお世話になる岡山天体物理観測所の皆様にもこの場をお借りして深くお礼を申し上げたいと思います。

## 参考文献

- 1) 比田井昌英, 2003, 天文月報 96, 315
- 2) Spinrad H., Taylor B.J., 1969, ApJ 157, 1279
- 3) Taylor B. J., 2002, MNRS 329, 839
- 4) Sadakane K., et al., 2001, PASJ 53, 315
- 5) Mayor M., Queloz D., 1995, Nature 378, 355

- 6) 佐藤文衛, 2003, 天文月報 96, 190
- 7) <http://www.obspm.fr/encycl/encycl.html>
- 8) 小久保英一郎, 2003, 天文月報 96, 215
- 9) Smith V. V., et al., 2001, AJ 121, 3207
- 10) Sadakane K., et al., 2003, PASJ 55, 1005
- 11) Takeda Y., et al., 2001, PASJ 53, 1211

## Super-Metal-Rich Stars and Planet-Harboring Stars

Michiko OHKUBO

*Department of Astronomy, Faculty of Science,  
Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502*

Abstract: It is known that many planet-harboring stars are metal-rich, and thus these stars can be regarded as being closely related with the traditionally known group of super-metal-rich (SMR) stars. To examine their mutual relation and their origin, I started to explore the chemical abundance analysis of the SMR stars which are not known to have planets. A SMR star candidate, 31 Aql (HR 7373, G8IV) is examined as a first step. The chemical abundances of 27 elements (C through Eu) in 31 Aql are derived, using HIDES at Okayama. Iron is definitely overabundant with respect to the Sun,  $[Fe/H] = +0.35 \pm 0.05$ , and all other elements are found to be also enhanced, but without particular abundance pattern against the atomic number and the condensation temperature.