

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目： 基盤研究 (C)  
 研究期間： 2005～2008  
 課題番号： 17540218  
 研究課題名 (和文) 恒星の化学組成解析による銀河系の形成・化学進化の研究  
 研究課題名 (英文) Study of formation and chemical evolution of the Galaxy  
 based on abundance analyses of stars  
 研究代表者  
 比田井 昌英 (HIDAI MASAhide)  
 東海大学・総合教育センター・教授  
 研究者番号： 90173179

## 研究成果の概要：

銀河系の形成・化学進化について、年齢の古い星を中心に、星表面の元素組成解析から調べた。太陽の約 40 万分の 1 しか鉄が含まれていない銀河系初期の恒星が発見され、その元素の起源は極新星などによるものと解釈された。また硫黄や亜鉛などの解析から、銀河系初期には大質量星の極新星や超新星が発生しやすく、これらがいろいろな元素の振る舞いを決めていることが判明した。時間が経過すると、鉄を多く作る超新星が発生することで、銀河系の化学進化が支配されることも分かった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	1,500,000	0	1,500,000
2006年度	600,000	0	600,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,400,000	390,000	3,790,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 天文学・天文学

キーワード： 銀河系、化学進化、金属欠乏星、超新星、ハロー星、円盤星

## 1. 研究開始当初の背景

代表者のそれまでの研究は銀河系初期の金属欠乏星における組成解析に力点が置かれていた。銀河系の化学進化とハロー・円盤部の形成に関する制限を得るには、銀河系の全歴史に関する組成解析を視野に入れる必要があった。当初は $-5 < [Fe/H] < -1$ の領域における金属欠乏星の発見と組成解析に努力が払われていたが、 $-0.5 < [Fe/H] < +0.5$ の金属富裕領域まで取り入れて、化学進化を研究する観点が少し欠けていた。

## 2. 研究の目的

それまでの金属欠乏星の成果を発展させて、超金属欠乏領域 $[Fe/H] = -4$ から金属富裕領域 $+0.5$ にわたる銀河系の構造形成と化学進化に関する新たな知見を得る。このため、ハロー星、円盤星(厚円盤星と薄円盤星)の $\alpha$ 元素と鉄族元素について、3種族の星における各元素組成の振る舞いを明らかにする。また、運動学的性質も関連させて、構造形成と化学進化に対する制限や知見を得る。

## 3. 研究の方法

基本的な方法は、各地の天文台の光学望遠鏡を用いて、光学域の CCD 高分散分光観測を

行い、スペクトルを得る。このスペクトルに観測された元素の吸収線の強度（等価幅）を測定し、各恒星の大気モデルを作り、このモデルを基に測定された等価幅に対する元素組成を求める。もう少し具体的に述べる。使用した望遠鏡は、国立天文台すばる望遠鏡と岡山天体物理観測所 188 cm 望遠鏡、そして、10 m ケック望遠鏡である。対象星としては、 $-4 < [Fe/H] < +0.5$  の範囲の金属欠乏星と、金属富裕星を選んだ。これらの標本星約 100 星を、ハロー星、厚円盤星、薄円盤星の 3 種族に分類し、各種族間の元素の振る舞いの相違などを調べる。観測された CCD データは、アメリカ国立天文台作成の CCD データ解析ソフト（IRAF）により整約し、最終的に等価幅測定用の 1 次元スペクトルにする。このスペクトル上で、 $\alpha$  元素と鉄族元素の吸収線の等価幅を測定する。等価幅から元素組成を求めるために、星の大気モデルを Kurucz の ATLAS9 コードにより作られたモデルグリッドから作った。この際、大気変数の有効温

#### 4. 研究成果

(1) 太陽の約 40 万分の 1 という現時点で最も鉄組成が少なく、銀河系の極初期の第 1 世代かも知れない金属欠乏星 (HE1327-2326) が発見され、組成の起源として、大質量星の極新星で説明できることが示された。この星の発見は、銀河系初期の星形成と超新星に関する理論に強い制限を与えている。今後はこのような超金属欠乏星をより多く発見することが重要である。主な観測的結果を述べる：①この星は矮星あるいは準巨星であるが、距離が不明なために確定できない。② $[C/Fe] \sim 4$  dex という極めて大きな炭素超過を示す (図 1 参照)。これはほかの金属欠乏星とは異なる性質である。③中性子捕獲元素 Sr が検出され、極めて大きな超過を示す。④リチウムは検出されず、上限値 1.5 は Spite plateau よりかなり低い。

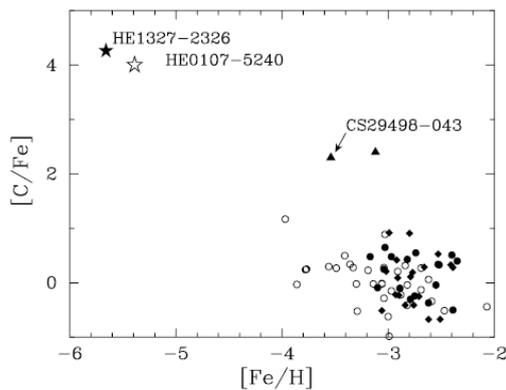


図 1

(2) 鉄が太陽の 1 万分の 1 という少ない星

(HE1300+0157) の元素組成の振る舞いが調べられ、炭素過剰な星であるが、中性子捕獲元素が観測されていない、特異な元素の起源をもつ (図 2 参照)。

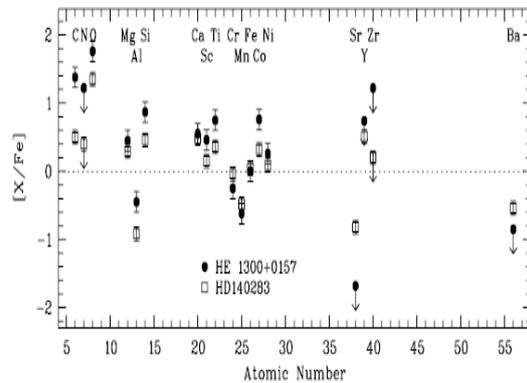


図 2

しかし、他の元素の組成は、多くの金属欠乏星のばあいと類似している。この星の進化段階は、炭素超過 ( $[C/Fe] = +1.4$ ) であるのに、中性子捕獲元素が少ないという、いわゆる CEMP-no という金属欠乏星のグループのなかの、進化が進んでいない準巨星に太陽しているものと判明した。観測された組成の振る舞いを説明するシナリオとしては、中性子捕獲元素が検出されていないことから、炭素超過は連星系における質量移送によるものではないことが示唆された。通常、連星系の質量移送があれば、必ず、中性子捕獲 s 過程により作られた Sr, Ba などが検出されるはずである。また、このシナリオは、リチウムが正常値として検出されたことから、支持されるものである。炭素と酸素の超過を説明するシナリオは、この星が誕生する以前に炭素と酸素が多く作られていて、その星間ガスからこの星が誕生したとするものである。しかし、この場合、一個の超新星により観測される組成パターンが作られたのか、あるいは、第 1 世代 (Pop III) 星と通常の II 型の超新星による混合された組成によるものであるか、ということは決定できない。さらなる、同じような金属欠乏星を観測する必要がある。このような星を調べると、銀河系初期における炭素の化学進化と炭素超過の星の関する重要な制約・知見が得られる。

(3)  $\alpha$  元素の一つである硫黄組成の振る舞いを、岡山天体物理観測所 188 cm 望遠鏡とケック望遠鏡によるスペクトルデータから調べた。主な観測結果は次のとおりである。①中性硫黄 (S I) のマルチプレット 1 の 9212-37A 吸収線とマルチプレット 6 の 8693-94A 吸収線の双方から求めた硫黄組成は、 $[Fe/H] > -2$  の領域ではほとんど一

致していることが判明したが、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$  領域では有意な差がみられた。SI(6)の組成のほうが系統的に超過傾向を示す。② $[\text{S}/\text{Fe}]$ の振る舞いは、 $-3 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1$  では+0.4 から+0.6程度にわたり、 $[\text{Fe}/\text{H}]$ の減少に対して平坦な傾向を示すことが判明した。しかし、 $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$  では、 $[\text{Fe}/\text{H}]$ が増加するとともに、減少し、 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim 0$ で太陽値になるような減少傾向をしめすことが判明した。ここまでの結果については図3を参照のこと。③ケック望遠鏡により極めて金属度の低い標本星 ( $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -4$ ) を含めてSI(1)のみを観測し、解析した。この結果を岡山天体物理観測所による観測の結果と合わせて、 $-4 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1$ の領域で $[\text{S}/\text{Fe}]$ は、分散が大きい、 $[\text{Fe}/\text{H}]$ に対して、平均値+0.5程度の平坦な傾向を示すことが判明した。

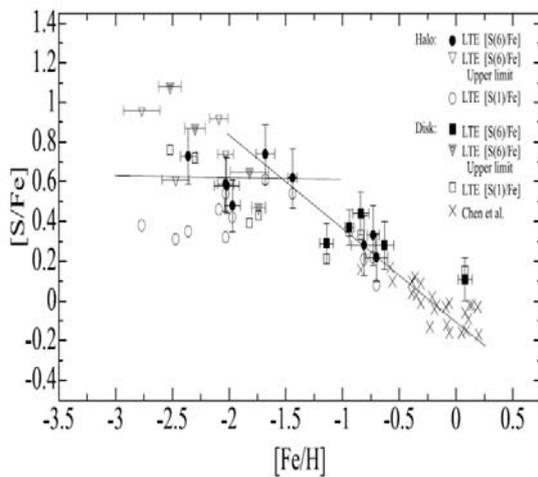


図3

この傾向は、他の $\alpha$ 元素のマグネシウム、シリコン、カルシウムなどの示す傾向と定性的によく一致している。しかし、超過の程度は硫黄が依然として、0.2-0.3dex 大きいことは、説明できていない。今回明らかになった硫黄の振る舞いは、QSO スペクトル中の硫黄吸収線から求められた硫黄組成の振る舞いを、宇宙初期の硫黄の振る舞いとみなせるかどうかということに強い影響を与える。理由は、硫黄は原始銀河では、ダスト吸着が少ないため、原始銀河における金属度の指標となっており、硫黄の振る舞いで金属元素の化学進化が推論されるためである。今後は、次に述べる亜鉛の場合と比較する観点から、より金属度の低い領域の観測を行うべきである。

(4) 鉄族元素の一つである亜鉛の振る舞いが $-4.2 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.5$ で調べられ、その化学進化と起源について新たな知見が得られた。主な結果は次のとおりである。①我々の35星の標本では、ハロー、厚円盤、薄円盤の各

種族間において、 $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ の振る舞いに相違がみられなかった。以下の結論は図4を参照しながら説明する。② $-4.2 < [\text{Fe}/\text{H}] < -2.0$ の金属度領域で、 $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ は $[\text{Fe}/\text{H}]$ が増加するとともに、減少する傾向を示すことが確認された。③この減少傾向は、II型 core-collapse supernovae (SNe) あるいは種族IIIの極新星モデルを基にした化学進化モデルで説明できることが判明した。④ $-2.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.5$ の領域の振る舞いについては、 $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ は $[\text{Fe}/\text{H}] = -1$ まで約0.07dexの超過を持つ平坦な傾向を示し、 $-1.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.5$ でより大きな超過を示した後、 $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.5$ では徐々に減少して太陽値になる傾向をしめすことが判明した。⑤ $-2$ より大きな金属度領域の振る舞いは、通常のII型SNe、極新星、Ia型SNeのモデルに金属度効果とIa型SNeの単一縮退シナリオを考慮して作った化学進化モデルにより、よく説明されることが判明した。

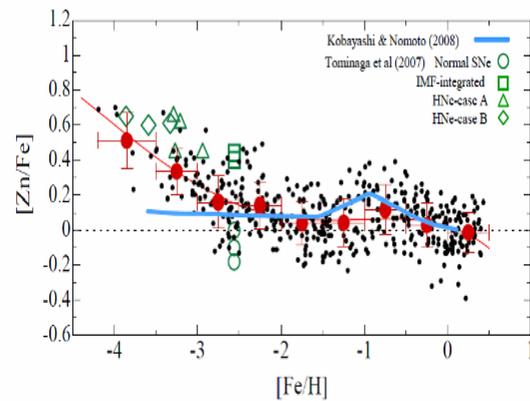


図4

さらに、⑥ 亜鉛の起源は、非常に低金属度領域では超新星のシリコン燃焼によること、また、より大きな金属度領域では、大質量星のヘリウム、炭素燃焼におけるs過程によること、などが判明した。

亜鉛も宇宙初期の原始銀河における金属度指標として利用されているので、硫黄と同じく、今回判明し、確認された銀河系における振る舞いは宇宙初期の金属元素の化学進化に対して重要な情報を与える。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

- ① M. Omiya, H. Izumiura, +11 authors (13番目), "A massive substellar companion to the massive giant HD 119445", 査読有、2009, PASJ, 61, 印刷中。
- ② Y.-j. Saito, M. Takada-Hidai, S.

- Honda, Y. Takeda, ” Chemical evolution of zinc in the Galaxy”, 査読有、2009, PASJ, 61、印刷中。
- ③ H. Izumiura, K. Noguchi, W. Aoki, S. Honda, H. Ando, M. Takada-Hidai, + 9 authors, “Evidence for a Companion to BM Gem, a Silicate Carbon Star”, 査読有、2008, ApJ, 682, 499-508.
- ④ W. Aoki, S. Honda, T.C. Beers, M. Takada-Hidai, + 6 authors, “Spectroscopic Studies of Extremely Metal-poor Stars with the Subaru High-Dispersion Spectrograph. IV. The  $\alpha$ -Element-Enhanced Metal-poor Star BS 16934-002”, 査読有、2007, ApJ, 660, 747-761.
- ⑤ A. Frebel, J.N. Norris, W. Aoki, S. Honda, M. S. Bessell, M. Takada-Hidai, + 2 authors, “Chemical Abundance Analysis of the Extremely Metal-poor Star HE1300+0157”, 査読有、2006, ApJ, 658, 534-552
- ⑥ W. Aoki, A. Frebel, N.C. + 18 authors (9 番目)、” HE 1327-2326, An Unevolved Star with  $[Fe/H] = -5.0$ . I. A Comprehensive Abundance Analysis”, 査読有、2005, ApJ, 639, 897-917.
- ⑦ A. Frebel, W. Aoki, + 17 authors (17 番目)、“Nucleosynthetic signatures of the first stars” 査読有、2005, Nature, 434, 871-873.
- ⑧ M. Takada-Hidai, Y.-j. Saito, + 5 authors, “Sulfur Abundances in Metal-Poor Stars Based on OAO-1.88m/HIDES Spectra” 査読有、2005, PASJ, 57, 347-363.
- [学会発表] (計 19 件)
- ① 比田井昌英、“銀河系における亜鉛の化学進化”、日本天文学会、2008年9月11日、岡山理科大学
- ② 本田敏志、“亜鉛過剰な超金属欠乏星は極超新星によるものか?”、日本天文学会、2007年9月28日、岐阜大学
- ③ 比田井昌英 “惑星を持つ星の軽元素の振る舞い: C, O, Na, Al の解析”、日本天文学会、2007年9月26日、岐阜大学
- ④ 比田井昌英、“惑星を持つ星のアルファ元素と鉄族元素の振る舞い(II): Si, Ca, Ti, Ni, Cu の解析”、日本天文学会、2007年3月30日、東海大学
- ⑤ 比田井昌英、“銀河系の硫黄と亜鉛の化学進化 (IV):  $-4 < [Fe/H] < +0.5$  の領域における硫黄の化学進化”、日本天文学会、2005年10月7日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

比田井 昌英 (HIDAI MASAHIDE)  
東海大学・総合教育センター・教授  
研究者番号: 90173179

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者

大宮 正士 (OMIYA MASASHI)  
東海大学連合大学院・博士課程後期3年生  
小杉 泰生 (KOSUGI TAISEI)  
東海大学大学院・博士課程前期(修士)  
2年生