Dawnが照らす惑星誕生の鍵: ベスタとHED隕石

山下 直之1

(要旨) NASAのDawn ミッションは,惑星誕生の鍵を探るべく小惑星ベスタと準惑星ケレスを周回して元素,鉱物の分布調査や地質学的,地球物理学的観測を行っている.Dawn衛星に搭載されたガンマ線及び中 性子検出器(GRaND)はベスタ赤道域において,炭素質コンドライト起源と考えられる水素が濃集する領域 を発見した.南極域ではダイオジェナイト的な下部地殻が露出していることが確認された.またベスタの平 均元素組成から,HED隕石のベスタ起源説を強く支持する結果が得られた.

1. はじめに

Dawn ミッションは空間と時間を遡る旅である.太 陽から離れた天体は,揮発性物質や有機物の量,温度 が地球近傍とは異なる環境で誕生したと考えられ,よ り始原的な源物質を持つと考えられている.その中で も小天体は集積後,進化の過程が早期に終わっており, 原始惑星に近い,大昔の情報を保持していると期待さ れる[1].この2点から,原型をある程度保持している メインベルト小惑星は惑星誕生の過程を調査するのに 最適である.さらに,凍結線をまたいで複数の小惑星 を調査することで,惑星の形成・進化における水の役 割を探ることが理想的である[2].こうした理由から, 小惑星4ベスタと,現在は準惑星に分類される1ケレ ス(セレス)がDawnミッションの探査対象天体に選ば れた.

またベスタを特徴付ける事実として,ホワルダイト・ ユークライト・ダイオジェナイト(HED)隕石の存在 が挙げられる.HED隕石は現在までに1.5トンを超え る量が地上で見付かっており[3,4],隕石・天体サン プル量としては月,火星のものを大幅に上回る.酸素 同位体比や反射スペクトル観測[5]から,これらHED 隕石は共通の起源を持ち,それは小惑星ベスタである と考えられてきた. これらHED隕石の起源説を検証することができれ ば、わざわざ宇宙空間を往復してサンプル・リターン・ ミッションを行わずとも、膨大な量の小惑星サンプル を手に入れたことになる、ベスタの破片(と思しきも の)は我々の手中に既にあるのである、これを利用し ない手はない.

2. Dawn ミッションについて

Dawn ミッションは2つの天体を周回観測するよう 設計,実行された史上初の計画である.その観測対象 は上記の理由から小惑星ベスタと,太陽から異なる距 離にある準惑星ケレスに決定された.2007年9月27日, Dawn衛星はケープ・カナベラルから打ち上げられた. 日本の月探査衛星,セレーネ打ち上げの13日後である. セレーネは3週間で月に到着したが,Dawnは火星フ ライバイを経て,最初の観測対象天体ベスタに到着し たのは4年後の2011年7月である.DawnはNASA初 のイオン噴射エンジンを用いた人工衛星であり,加減 速に時間がかかるが,優れた燃料効率を持っている. これにより複数の天体について,フライバイだけでは なく,1天体半径程度の高度まで接近した周回観測が 可能となった.

Dawnには3つの観測機器(加えて、衛星自身を用い た電波科学)が搭載されている.1つ目はFraming Camera(FC)であり、ステレオカメラによる撮像を行

^{1.} Planetary Science Institute yamashita@psi.edu

う[6]. 2つ目はVisible-InfraRed spectrometer(VIR) と呼ばれ,分光観測を行っている[7]. 3つ目はガンマ 線及び中性子検出器(Gamma Ray and Neutron Detector, GRaND)である[8, 9].

ベスタ軌道投入後, Dawnは3種類の高度から科学 観測を行った. 測量軌道(3000 km), 高高度軌道(950 km), 低高度軌道(475 km)である. 括弧内の距離は ベスタの重心から軌道までの距離である. それぞれ, FC, VIR, GRaNDによる観測に適した軌道となってい る. ベスタの平均半径は約265 kmと判明したので, 低高度軌道ではベスタ表面から平均210 kmのところ を周回したことになる. 一般的にガンマ線や中性子分 光計の空間分解能はおおよそ高度と同じオーダーであ るので, 天体半径ほどしか近づけなかったことは後の 元素分布地図作成の大きな制限となった.

14ヶ月にわたる周回観測を終え, Dawn衛星はベス タを2012年9月に離脱, 2年半の巡航後, 第2の観測 対象であるケレスの軌道に2015年3月, 投入された. 本稿では主にGRaNDによるベスタ観測について紹介 する.

3. GRaNDについて

GRaNDは天体表面から放出されるガンマ線と中性 子を計測する核分光計である.過去のミッションで使 用実績のある検出器と,新技術実証のため新型の検出 器の両方が織り交ぜられ,21個の検出器から構成さ れており,様々な同時及び反同時計数を行っている. 現在までにGRaNDは惑星間空間,火星及びベスタ近 傍で計測を行っており,ケレスの本格的観測も始まり つつある.

3.1 検出原理

宇宙空間では、銀河宇宙線と呼ばれる高エネルギー 粒子(主に陽子やアルファ粒子)が等方的に飛び交って いる.大気が薄い、もしくは存在しない天体にはそれ ら粒子が降り注いでいる.そうした天体の表面では、 物質と宇宙線粒子の様々な原子核反応の結果、中性子 及びガンマ線が生成され、宇宙空間に漏れ出している. また、天然放射性元素(K, Th, U)は宇宙線の到達に関 係なく自発的に崩壊し、ガンマ線を常に放出している. これら放射線を精度よく計測することにより、放射 線を発した物質についての情報が得られる. ガンマ線 のエネルギーは放出した原子核固有の値を持っており, 例えば2.223 MeVのエネルギーを持ったガンマ線は水 素(¹H)から, 7.631 MeVのガンマ線は鉄(⁵⁶Fe)から放 出されるということが分かっているので,こうした離 散的エネルギーを持ったガンマ線強度から,天体表面 を構成する元素の組成や分布を決定することができる. また高速中性子(> 0.7 MeV)は主に平均原子量を,熱 外中性子(0.5 eV~0.7 MeV)は水素の存在量を,熱中 性子(< 0.5 eV)は中性子吸収断面積(Fe, Ca, Alなどが 大きく寄与[8])などの情報をもたらす.こうした放射 線は透過性が高いため,惑星核分光法では天体表面か ら数十 cmの深さまでの元素組成を探査することがで きる.

3.2 検出器

メインのガンマ線検出器として、Bismuth Germanate(BGO)シンチレータが採用された.これ はNASAのLunar Prospector(LP)ミッションで用い られた実績を持つ検出媒体[10]で、エネルギー分解能 は10%(@662 keV)である.セレーネ(かぐや)ミッシ ョンで用いられたゲルマニウム検出器(~0.5% @662 keV)[11, 12]と比較して20倍も分解能は劣るが、冷却 の必要がなく、高い検出効率を誇る.0.4 – 9 MeVの 範囲をカバーする.



図1: Dawn衛星搭載のガンマ線及び中性子検出器(GRaND)の模式図. 21個の検出器の出力が独立に記録され、天体から放出されたガンマ線と中性子線の同時・反同時計数を行っている。略語については本文参照のこと.

サブのガンマ線検出器として, Cadmium Zinc Telluride (CZT) 半導体検出器も搭載している. 4×4 個のアレイを構成する. これは技術実証実験であり, 残念ながら今のところ, BGOを上回るほどにはサイ エンスに貢献していない. エネルギー分解能は打ち上 げ前試験において1%以下(@662 keV), 3 MeVまで の範囲をカバーする.

中性子検出器は、ガンマ線検出器を囲むように、そ の上下、左右の4箇所(+Y, -Y, +Z, -Z)に設置されて いる(図1参照).左右のもの(+Y, -Y)はL字型をして おり、ホウ素添加のプラスチック・シンチレータ (boron-loaded plastic, BLP)である.これは多重散乱 を検出して高速中性子を測定する.上下のもの(+Z, -Z)はBLPとlithiated glass(LiG)のphoswich(2つの シンチレータを光学的に接続し、1つの光電子増倍管 で両方の光量を同時に測定する配置)になっており、 LiGにおいて主に熱中性子を、BLPにより熱外中性子 を、BLP多重信号により高速中性子を測定する.BLP はNASAのLP(月探査)、Mars Odyssey(火星探査)、 MESSENGER(水星探査)ミッションで用いられた実 績がある.LiGは惑星探査に初めて採用された.

GRaND内の全ての検出器は連動している.3つ以 上の検出器が同時に信号を検出した場合は、宇宙線高 エネルギー粒子が突き抜けたと判断する.天体からの 放射線は宇宙線により励起されたものがほとんどなの で、宇宙線の強度変動を補正することは元素組成導出 のために不可欠である.また、CZTとBGOの同時計 数を行うことでコンプトン望遠鏡を実現し、人工衛星 起源のバックグランド・ガンマ線を除去するモードも 同時に記録している.

4. これまでの成果

ベスタ表面の元素組成は、月に比べて変化に乏しい. これはベスタの大きさから、月ほど大規模な火成活動 が期待できないこと、HED隕石の組成変動などから 予想はされていた.月とは違って斜長石やかんらん石 に乏しく、ましてや嵐の太洋周辺のような、放射性元 素が濃集した領域は見つかっていない.よって例える ならば、月から高地、西側の海、南極エイトケン盆地 を除いた領域、すなわち東側の海のみを観測している ようなものである(さらに言えばチタンもほとんどな



図2: ガンマ線分光によるベスタの平均元素組成(誤差範囲1σ, 2σ)と, HED隕石との比較^{*}.

い). したがって分布図を作成できるほどの十分な統 計精度をもって変動が確認できた観測量は現在のとこ ろ,水素[9],鉄[13],中性子吸収量[14],平均原子量 [15],高エネルギーガンマ線[16]のみである.鉄・酸 素比,ケイ素・酸素比,カリウム,トリウム存在量に ついては,全球平均値を導出した[9,17].しかしながら, 今後の解析で新たな元素情報が導出される可能性も十 分に残されている.

ベスタ表層の鉄・酸素比,ケイ素・酸素比は,幅広 い隕石の値の中でもHED隕石のものとよく一致した が,ややダイオジェナイトとキュムレイト・ユークラ イトよりの結果となった(図2). 観測結果はHED隕 石のベスタ起源説を強く示唆している[9].

図3にベスタ地形図[18, 19],及び水素[9],鉄[13]分 布図を示す.地形図より,赤道付近が盛り上がり,北 極,南極域が低い,南北に潰れた歪な形をしているこ とが分かる.南半球にはベネネイアと,それよりも新 しいレアシルビアと呼ばれる2つの巨大なベースン [19]が折り重なって存在する(図3a).水素は赤道領域 に濃集しており,逆に南極域,特にレアシルビア・ベ ースン内は極端に欠乏していることが分かった(図 3b).この巨大ベースン内での熱外中性子量最低点を 水素量ゼロとすると,赤道域には約400 µg/g,全球

※ カラー図は電子版を参照のこと.



図3: Dawnミッションにより得られたベスタの a)地形図[18, 19] 及び b)水素[9], c)鉄[13]の分布図. ベネネイア, レ アシルビア・ベースンのおおよその境界を白の破線で示した. Claudia座標系. 地形図はベスタ重心からの距離を 示す.



図4: 主な太陽系天体のK/Th比の観測結果[17, 21-26]. 太陽から の距離の関数として示した.

平均で約200 μg/g程度の水素が存在することになる. 赤道域には極域と違い,水や氷を日照から守って極低 温に保てるような永続的な陰はないので,水素原子は 水和物の形で保持されていると解釈されている.水素 分布はクレータ密度,及びアルベドとよい相関をもっ ており,炭素質コンドライトよって運ばれてきた水素 が表層に降り積もり,レアシルビア・ベースンを形成 した衝突イベントによって撒き散らされた物質によっ て覆い隠された結果,作られた分布と考えられている [9].

鉄存在量はレアシルビア内で低く,逆に北極域で高 いことが明らかになった(図3c).このベースン内で は鉄量と中性子吸収量[14]の両方が非常に低い.よっ て、レアシルビア・ベースン内はHED隕石の中でも ダイオジェナイト成分が比較的多く含まれると考えら れる[13,14].このベースンの深さと地殻厚を考えた 場合、下部地殻が露出していると考えられるが、組成 的にもこの説と矛盾しない.またこの成分は東側(北 を上としたとき、子午線の右側.東経0°から90°あた り)において葉状に北に伸びており、北半球まで達し ていることが分かった.これは巨大衝突で地殻が深く 掘り下げられダイオジェナイトが露出したこと、その 時の噴出物が降り積もったと考えられている.

また西側(子午線の左側)には鉄量が少なく,中性子 吸収量が中程度の低地(北緯30°,東経240°付近)があ る. これはHED隕石の組成のうち,キュムレイト・ ユークライトに相当する[13]. 同様に鉄量と平均原子 量の分布から,北極域の広範囲にわたってYamato Type-Bダイオジェナイトに対応すると考えられる領 域が報告されている[4].

比較的揮発性の高いカリウムと, 難揮発性のトリウ ムの存在量からも, HED隕石のベスタ起源説がさら に支持された. Wasson(2013)はGRaNDの初期観測 結果(カリウムの上限値1000 µg/g [9])から, ベスタ 起源説を否定的にとらえていたが[20], 解析が進んだ 結果, カリウムの全球平均値が595 ± 35 µg/g, トリ ウムが657 ± 59 ng/gと導出されたことにより[17], こ の主張は論駁された. 図4にベスタを含む太陽系の主 な天体のK/Th比[17, 21-26]を示した. ベスタのK/ Th比は900 ± 400となり, カリウムが若干欠乏してい ることから, ベスタの形成時期は早く, 熱くて完全に は凝結していない太陽系星雲から集積したか, 衝突等 によりカリウムが取り除かれたと結論付けられた[17].

5. 観測データについて

GRaNDの観測データはすべてNASAのPlanetary Data System (PDS) 内の. Small Bodies Node で公開 されている[27].処理レベルによって複数の種類があ り、Level-1Aは工学値変換を終えた(ほぼ)生データ であり、可逆な校正のみが適用されている、これは時 系列データで、取得された全てのイベントを含む. Level-1Bは不可逆な校正が適用されており、ゲイン補 正を中心とした様々な校正、補正、データ選別を行い、 惑星科学の研究に適した形で提供されている[28]. Level-1Bデータも時系列スペクトルである. Level-2 データはマップ・データであり、様々な観測量が緯度、 経度ごとにまとめられている. これらデータは一般公 開されており、誰でも自由に利用できる. またベスタ の地形データはDawn Public Dataサイトで公開され ている[18]. 両サイト共, ケレス観測結果も順次追加 されている、さらなるデータ利用が進み、サイエンス が促進されることを願う.

6. まとめ

GRaNDを用いた中性子, ガンマ線観測によって,

ベスタの元素組成が明らかになりつつある.赤道域の クレータ密度が高く、アルベドの低い領域に水素が濃 集していることから、炭素質コンドライトが長期間に わたり降り注いだことによってベスタ表面に水素がも たらされたと考えられる、南極域にあるリアシルビア・ ベースンは上部地殻を剥ぎ取っており、ダイオジェナ イト的物質を露出、拡散させている、主要元素、天然 放射性元素の組成比は、HED 隕石のベスタ起源説を 強く示唆している. GRaNDの空間分解能は限定的で あるが、一部の地域は特定のHED隕石の組成と一致 するような特徴を示している. ベスタ上でかんらん石 がほとんど見付からないなど、謎はまだ多く残されて いるが、原始惑星に近いと考えられる天体の理解が進 むことで,惑星の誕生・進化の過程に光が照らされつ つある. 観測データは逐一公開されている. FC, VIR による観測データも含めて、惑星科学コミュニティ全 体による更なる解析にも期待したい。また、ケレスの 本格的な元素組成観測は2015年12月から始まる. 謎 の白点や高さ約5 kmのピラミッド型地形など、話題 の多いこの準惑星の観測結果にも注目である.

謝 辞

本稿で利用したデータは、NASAのDawn ミッショ ンにより取得,解析されたものです.Dawn PI(Prof. C. T. Russell),ステレオ写真傾斜測定チーム(Drs. R. Gaskell and N. Mastrodemos), FC PI(Dr. A. Nathues), GRaND PI(Dr. T. H. Prettyman),及び Dawn ミッション関係者各位に深く感謝いたします. さらに、本稿に対し有益なコメントをいただいた唐牛 譲氏にこの場を借りてお礼申し上げます.

参考文献

- [1] Keil, K., 2002, in Asteroids III, 573.
- [2] Russell, C. T. et al., 2012, Science 336, 684.
- [3] The Meteoritical Bulletin Database, http://www.lpi. usra.edu/meteor/.
- [4] Beck, A. W. et al., 2015, MAPS 50, 1311.
- [5] McCord, T. B. et al., 1970, Science 168, 1445.
- [6] Sierks, H. et al., 2011, SSR 163, 263.
- [7] De Sanctis, M. C. et al., 2012, Science 336, 697.

- [8] Prettyman, T. H. et al., 2011, SSR 163, 371.
- [9] Prettyman, T. H. et al., 2012, Science 338, 242.
- [10] Feldman, W. C. et al., 2014, JGR 109, E07S06.
- [11] Yamashita, N. et al., 2010, GRL 37, L10201.
- [12] Yamashita, N. et al., 2012, EPSL 353-354, 93.
- [13] Yamashita, N. et al., 2013, MAPS 48, 2237.
- [14] Prettyman, P. H. et al., 2013, MAPS 48, 2211.
- [15] Lawrence, D. J. et al., 2013, MAPS 48, 2271.
- [16] Peplowski, P. N. et al., 2013, MAPS 48, 2254.
- [17] Prettyman, T. H. et al., 2015, Icarus 259, 39.
- [18] Dawn Public Data, http://dawndata.igpp.ucla.edu.
- [19] Jaumann, R. et al., 2012, Science 336, 687.
- [20] Wasson, J. T., 2013, EPSL 381, 138.
- [21] Peplowski, P. N. et al. 2011, Science 333, 1850.
- [22] Surkov, Y. A. et al., 1986, JGR 91, E215.
- [23] Lodders, K. and Fegely, Jr., B., 1998, The Planetary Scientist's Companion (Oxford: Oxford University Press).
- [24] Prettyman, T. H. et al., 2006, JGR 111, E12007.
- [25] Taylor, G. J. et al., 2006, JGR 111, E03S06.
- [26] Barrat, J. A. et al., 2009, MAPS 44, 359.
- [27] Prettyman, T. H. et al., 2014, NASA Planet. Data Sys., Dawn at Vesta Reduced Data Records.
- [28] Yamashita, N. and Prettyman, T. H., 2014, NASA Planet. Data Sys., Dawn at Vesta Reduced Data Records.