

隕石の母天体を求めて

菅 野 愛

〈東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: kan-i@sys.eps.s.u-tokyo.ac.jp

小惑星とは、主に火星と木星の間に多数存在する小天体をいう。一般的に、小惑星は大部分の隕石の母天体であると考えられている。隕石の母天体は、隕石落下の目撃情報からわかる隕石の軌道や、反射スペクトルからわかる隕石や小惑星の組成から推測できる。2000年1月にカナダに落下したタギッシュレイク隕石は、その反射スペクトルからD型小惑星に由来する可能性のある初めての隕石であることがわかった。私たちの研究グループは、すばる望遠鏡を用いてD型小惑星を観測することで、過去の観測よりも高い精度の反射スペクトルを得た。これはタギッシュレイク隕石がD型小惑星の組成に近いことを裏付ける新しい結果となった。

1. 隕石の故郷

私たちが手にとって調べることができる隕石には、太陽系が形成された時からの情報がぎっしり詰まっている。私たちは隕石の情報から、太陽系がどのような過程を経て現在の姿に至ったかを知ることができる。では、隕石はどこからやってくるのだろうか。隕石落下の目撃情報をもとに、それぞれの隕石に適した突入速度の推定値をいれて計算すると、落下が目撃されている隕石は火星と木星の間にある小惑星帯から来たことがわかる(図1)。小惑星帯にはひとつの大きな惑星になり損ねた小天体が多く存在し、ほかの惑星同様に太陽の周りを一定の周期で回っている。小惑星帯は木星に近く、そこに存在する小惑星は木星の摂動によって軌道をずらされて円軌道から楕円軌道となり、お互いに衝突しやすくなる。その軌道がさらに歪められ、それが地球の重力圏に紛れ込んだときに、隕石となって落下

してくると考えられている。

小惑星帯の中のいくつかの小惑星は、観測で得られる可視光線や赤外線分光スペクトルから、それらの天体の表面物質が隕石と似たような組成であることがわかっている。小惑星が反射する太陽の光を望遠鏡を用いて分光すると同様に、実験室で隕石に当てた光の反射光を分光して、それらの反射スペクトルのパターンを同定するのである。では、なぜ隕石とその母天体の関係を知ることが重要なのか。

太陽系が形成されてから今もお太陽系に存在し続けている小惑星は、太陽系形成期における環境の重要な情報を現在まで保存している。これらが小惑星帯の環境下で経験した物理化学過程は、私たちが手にした隕石の物質科学的な情報から組み立てられる。たとえば、小惑星ベスタの反射スペクトルには波長1 μm 付近と2 μm 付近に吸収帯が1つずつあるが、それらは反射スペクトルのパターン同定から輝石という鉱物によるものとわかり、

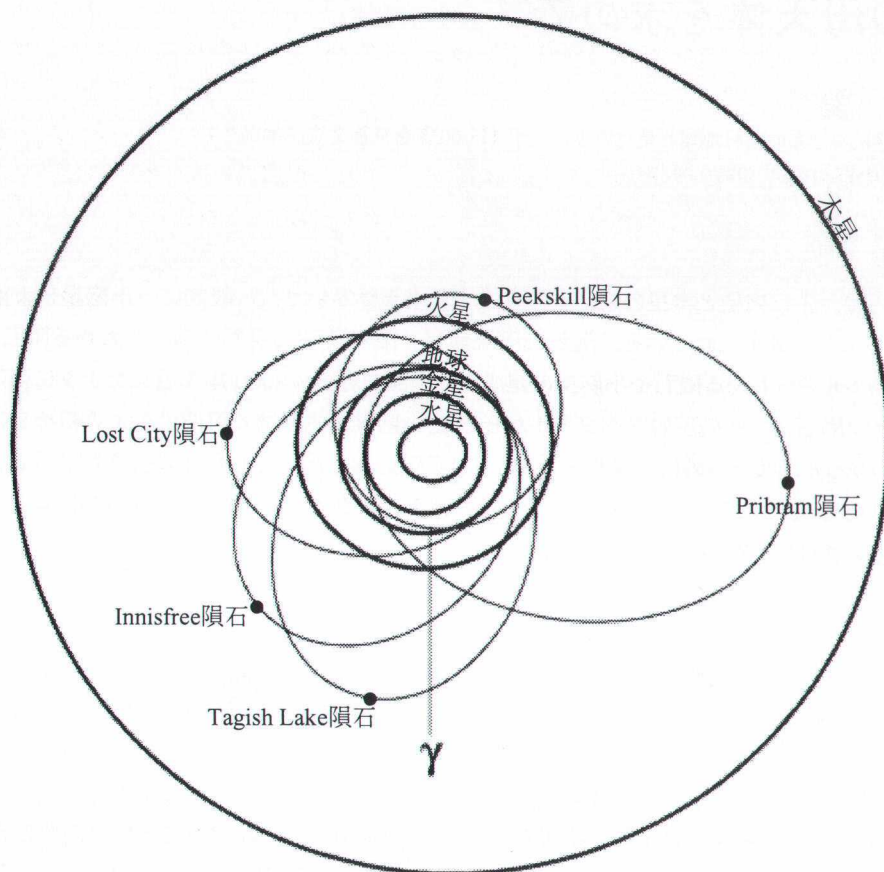


図1 隕石落下の目撃情報から軌道がわかっている隕石の軌道図¹⁾。γは春分点。

その詳しい波長位置から輝石中の鉄・マグネシウム・カルシウムの含有量比の範囲を推定できる。反射スペクトルのパターン同定から、小惑星ベスタに対応する隕石に、ハワルダイト・ユークライト・ダイオジェナイトという隕石があることがわかった。これらの隕石から推測して、ベスタは小惑星の中では最も月に近い熱史を持ったもので、鉱物が高度に分化したために輝石と斜長石が表層にできて、その下にはカンラン石と金属鉄があるだろうと考えられている。この研究は1970年に McCord らが着手したもので、それ以来、隕石の実験的

研究と小惑星の観測的研究の発展とともに、隕石と小惑星の関連付けから太陽系の進化過程を探る研究が発展してきた。私たちが手にした隕石の分析から、直接誰も見たことのない小惑星が経験した太陽系進化のシナリオを描くことができ、そこから太陽系の描像を得ることが可能となるのである。

2. 太陽系の「化石」、タギッシュレイク隕石

隕石のなかでも人々の興味を引きつけてきたものが、炭素質コンドライトとよばれる隕

石である。炭素質コンドライトは、炭素、硫黄、水をはじめとするさまざまな揮発性成分を多量に含んでいる化学的に最も未分化で始原的な物質であり、太陽系形成初期の情報を最もよく保存している物質だと考えられている。炭素質コンドライトはなぜ始原的といえるのか。その答えとなる最も重要な特徴のひとつは、その組成が太陽大気のスเปクトル分析から推定される太陽の組成によく合致していることである。太陽は太陽系全体の質量の大部分を占めており、その化学組成は太陽系全体を代表するものと考えてよい。特に炭素質コンドライトの副分類のCIコンドライトは、極端な揮発性成分を除くと主成分元素から微量成分元素に至るまで太陽の組成に非常によく一致している。従ってCIコンドライトは太陽組成に近い原始太陽系星雲から生成されたあと、母天体に取り込まれた後も熱や圧力による大きな変化を受けていないと推測されている。すなわち、CIコンドライトは46億年前に原始太陽系星雲から析出した物質がそのまま保存されている「化石」といえよう。

いま、最も注目を集めている炭素質コンドライトのひとつがタギッシュレイク隕石である。これは、2000年1月カナダにあるタギッシュレイクの氷原に落下し、数日のうちに凍ったまま直接手を触れることなく回収された、地球上の物質による汚染を免れた隕石だ。この隕石は地球大気への突入前の軌道が詳細に算出され、小惑星帯の地球から遠い側に由来することが突きとめられた(図1)。

実験室での化学分析から、この隕石が炭素質コンドライトであり、組成がCIコンドライトに近いことがわかった。また、炭素含有率が非常に高く、有機物の種類は少ないが量が多いといった点などで、タギッシュレイク隕石はCIコンドライトより始原的であると推測され、非常に珍しい隕石であることが判明した¹⁾。

では、タギッシュレイク隕石の母天体はどの小惑星なのであろうか。実験室で隕石の反射スペクトルの測定をし、小惑星の反射スペクトルのパターンと同定したところ、タギッシュレイク隕石の反射スペクトルがD型に分類される小惑星のスペクトルに近いことが突き止められた²⁾。一般的に、小惑星は反射スペクトルによって14の型に分類され、そのうちD型に分類されるのは主に小惑星メインベルトの外側に存在する非常に暗い小惑星である³⁾。これまでの分光分析からD型小惑星に近い組成の隕石は見つかっていなかったため、タギッシュレイク隕石は人類が初めて手にするD型小惑星のサンプルである可能性が浮上した。

しかし、両者の分光スペクトルはあらゆる波長で完全に一致しているわけではない。可視から近赤外(波長 $0.3\ \mu\text{m} \sim 2.6\ \mu\text{m}$)の反射スペクトルのパターンはかなり良い一致を示すが、 $3.0\ \mu\text{m}$ 付近は調和的とはいえない。タギッシュレイク隕石は、小惑星環境で起こる水質変成で作られた含水鉱物(層状ケイ酸塩)で構成されるので、隕石の反射スペクトルには含水鉱物中のOH基や H_2O 分子によりそれぞれ $2.7\ \mu\text{m}$ 、 $2.9\ \mu\text{m}$ の吸収があり、それらが合わさって $3\ \mu\text{m}$ 付近にひとつの吸収帯を示す(図2)。一方、これまでの観測で得られたD型小惑星の反射スペクトルには、含水鉱物に起因する $3\ \mu\text{m}$ 帯の吸収が確認されていない⁵⁾。従って、D型小惑星の多くは太陽から遠いために、天体内部や天体外部の熱源のエネルギーが小さく、熱によって起こる水質変成を経験することなく、始原的な状態を保っていると考えられてきた⁴⁾。

これまでのD型小惑星の赤外線分光観測には、口径 $3.0\ \text{m}$ の赤外線望遠鏡 IRTF (Infrared Telescope Facility) や、口径 $3.8\ \text{m}$ のイギリス赤外線望遠鏡 UKIRT (United Kingdom Infrared Telescope) などが用いられてきた^{5), 6), 7), 8), 9)}。

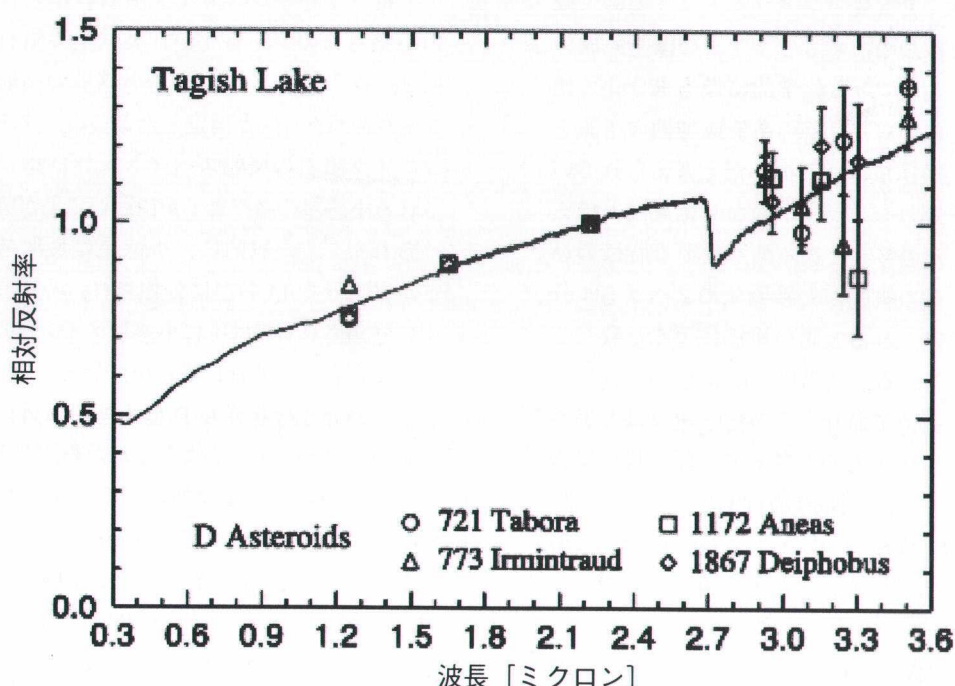


図2 タギッシュレイク隕石²⁾とD型小惑星⁵⁾の反射スペクトルの比較。

D型に分類される小惑星の多くは、小惑星帯の地球から遠い側に存在する暗い天体なので、図2に示されるように過去の観測では精度の高いデータを取得できていなかった。

ここで精度の高い観測を行うために、すばる望遠鏡の出番となる。ご存知の通り、すばる望遠鏡は、主鏡8.2 m、高い鏡面精度を維持できる能動光学と、空気の乱れを抑える新型ドームを実現したマウナケアの新世代望遠鏡である。この高い集光力と高い解像力を誇る最新鋭望遠鏡を使えば、D型小惑星のような暗い小惑星でも高い観測精度を期待できる。私たちは観測対象に小惑星メインベルト（日心距離2.8AU）にあるD型小惑星773 Irmintraudを選び、すばるによって新しいD型小惑星の描像を得ることを期待した。

3. すばる／日本同時観測

すばるで観測を成功させるためには、越えるべきハードルがあった。私たちはD型小惑星の3 μ m付近の反射スペクトルを得るために、すばる望遠鏡の赤外分光撮像装置 IRCS (Infrared Camera and Spectrograph) を用いる予定だった。この装置は、ちょうど地球大気中のH₂Oによって天体の光が吸収される波長を避けたK (1.93–2.48 μ m) バンド、L (2.84–4.16 μ m) バンドの波長を、それぞれ高S/N比、高波長分解能で分光し、高い精度で測光していることが可能である。私たちは、KバンドとLバンドの境界にあたるOH吸収 (2.7 μ m) やH₂O吸収 (2.9 μ m) 付近の反射スペクトルを得るために、その波長を挟んだKバンド、Lバンドの分光/測光観測データから外挿して予

測しようと考えた。この方法は、異なるバンドでも同等の観測条件で精度よく測光することが前提となる。しかし、すばるの観測ではバンド変更にある程度の時間がかかってしまい、その間にいびつな形をした小惑星は自転するために小惑星の明るさ（光度）を刻々と変化させてしまう可能性があった。しかも、小惑星の光度変化を詳細に見積もった観測が過去になかったので、すばるでの観測中にどのくらい光度が変化するか全く見当がつけられなかった。

そこで私たちは、すばるの観測と同時に日本で小惑星の光度変化（ライトカーブ）を観測する計画を立てた。観測対象のD型小惑星773 Irmintraudは可視光で13.3等と比較的明るく、すばるを使わずとも日本で可視光の測光観測を行うことが可能である。よって日本でのライトカーブ観測で小惑星の自転による明るさの時間変化を求めて、それに従ってすばるの測光データを補正しようという計画であった。日本での同時測光観測のために、自らの観測所で精力的に小惑星の観測を行っている宮坂正大氏を中心に、国内の複数の天文台・観測所に関係する多くの人々の協力が寄せられた。こうしてD型小惑星のすばる／日本同時観測を目指す研究チームは、職や世代を問わず、D型小惑星に興味を持った多数のメンバーで編成された。私たちは日頃からメーリングリストで意見交換を行い、定期的に勉強会を開いてD型小惑星観測の科学的意義を確認したり観測計画を立てたりと、すばる／日本同時観測の成功に向けてモチベーションを高めた。また、山梨県・宮坂観測所と福島県・浜野和天文台では複数夜にわたって事前観測が行われた。宮坂観測所での観測は、日本時間2001年12月23日、2002年1月15日、1月23日、2月10日に行い、これらの観測から小惑星の自転周期を 6.748 ± 0.001 時

間と厳密に求めることができた（図3）。事前に得られたこのライトカーブは、すばるでの観測計画を立てる上で最も信頼できる指標となった。

すばる観測当日の2002年2月22日、私たちの研究チームは、ハワイチームと日本チームに分かれて出陣した。ハワイと日本の時差は19時間で、マウナケアで小惑星が南中するハワイ時間2月23日午前0時は、日本時間の2月23日午後7時となる。ハワイのマウナケアは、悪天候続きのその時期には稀に見るほどの快晴だった。一方、日本はいにく全国的にはっきりしない天気であった。ハワイで近赤外分光／測光観測を行うすばる望遠鏡と、日本で可視測光観測に参加した、福島県・浜野和天文台、長野県・小川村天文台、国立天文台三鷹50 cm社会教育用望遠鏡、山梨県・大月観測所、山梨県・宮坂観測所、鳥取県・さじ天文台で、私たちは同じ日の同じ時間に、ひとつの暗く小さいD型小惑星に観測の目を向けたのである。

4. すばるが拓く新しいD型小惑星の描像

すばるでの観測は幸運にも晴天に恵まれ、ほぼ予定通りに観測を終えた。一方、日本は天候に恵まれなかったものの、すばるでの観測を挟むように、日本時間の22日には三鷹と宮坂観測所、23日には浜野和天文台により観測が行われた。

こうして得られたD型小惑星773 Irmintraudの近赤外分光観測データの解析結果を図4に示す。すばるで得たK, Lバンドの分光データを、日本で得た小惑星ライトカーブを参照して補正したK, Lバンド測光値を用いて規格化している。Lバンドの波長では、小惑星が太陽光を反射する光に加え小惑星の熱輻射が含まれるので、小惑星の熱モデル¹⁰⁾を仮定した

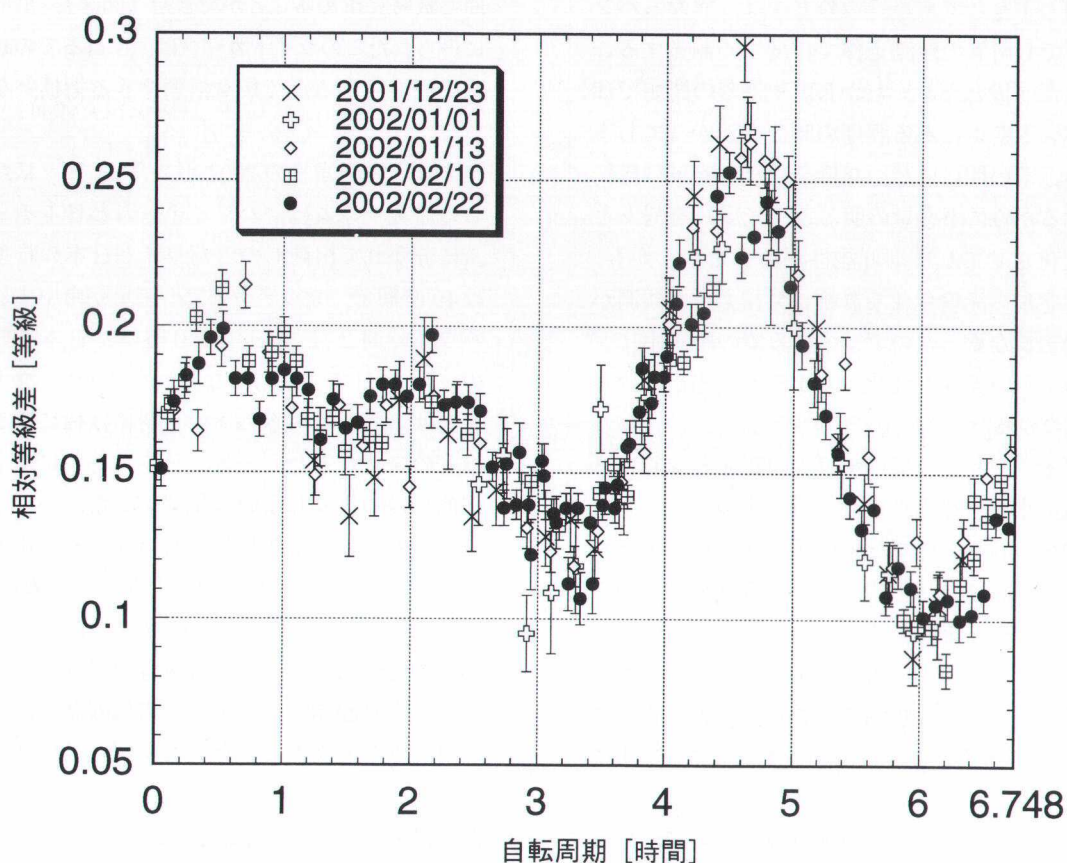


図3 山梨県・宮坂観測所で得られたD型小惑星 773 Irmintraud の光度変化 (ライトカーブ)。

のち熱成分を差し引いている。3 μm 帯の水の吸収の深さを 2.2 μm と 2.9 μm の反射率の差で定義する⁴⁾と、今回の観測結果は $14.5 \pm 4.3\%$ となった。ここでの誤差には、解析過程で発生する誤差、ライトカーブによる補正の誤差、適用する小惑星熱モデルの違いによる誤差などが含まれるが、すばるでの観測に用いた標準星の明るさの誤差が卓越している。1985 年、IRTF で同じ小惑星 773 Irmintraud を分光観測した時の 3 μm 帯の深さは $0 \pm 6\%$ であった⁴⁾ことから、すばるでの観測は IRTF よりも高い精度を達成し、IRTF の誤差以上の有意な吸収を検出したといえる。

ここで、この 3 μm 付近のスペクトルを、タギッシュレイク隕石や他の炭素質コンドライトと比べる (図4)。比較に用いた炭素質コンドライトはそれぞれ水質変成の度合いが異なり、炭素質コンドライトの副分類 CI, CM, CV, CO の順に含水鉱物の量が多い、つまり水による吸収が深い。この比較から、観測で得た 773 Irmintraud の反射スペクトルから予測される K バンドと L バンドの境界部分は、炭素質コンドライト中にあるものと同様の含水鉱物で説明できるように見える。K バンドと L バンドの明るさの差から見積もられる 3 μm 帯の吸収の深さからは、この小惑星

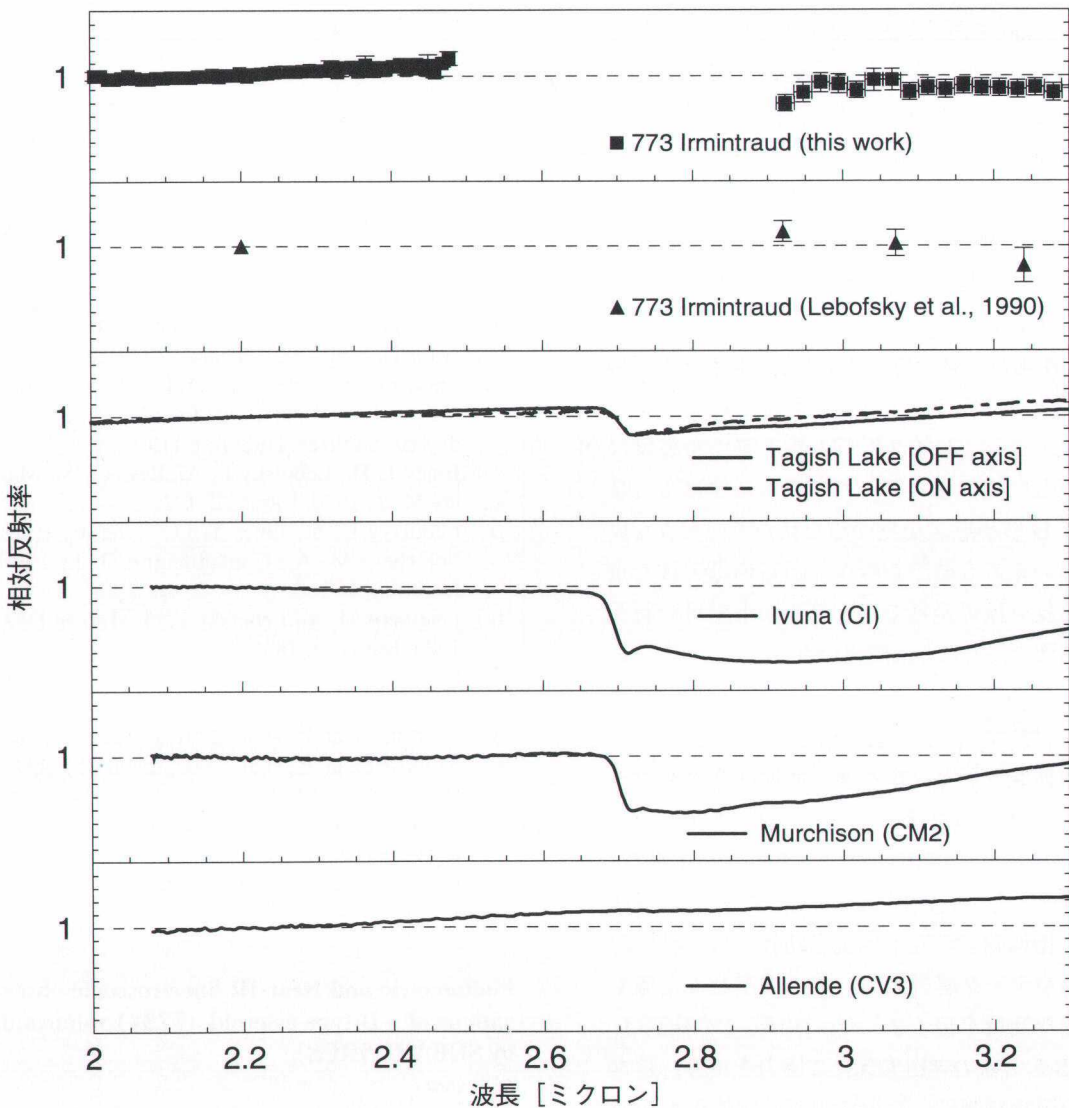


図4 773 Irmintraud の観測結果とタギッシュレイク隕石のスペクトル²⁾，他の炭素質コンドライトのスペクトル¹¹⁾との比較。

にはこれまで発見された炭素質コンドライトと、新しく発見されたタギッシュレイク隕石を含む連続的な物質変化の系列上に乗るような、様々な物質があると予想できる。加えて、可視から近赤外の波長（ $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ ）でも、773 Irmintraud の反射スペクトルはタギッシュレイク隕石のそれに似ていることから、この小

惑星の組成は、私たちが手にした隕石のなかでもタギッシュレイク隕石の組成に一番近いといえる。

さて、この小惑星はタギッシュレイク隕石の母天体なのだろうか。実際、私たちは773 Irmintraud の反射スペクトルがタギッシュレイク隕石に似ていることを確認したが、現段階

ではタギッシュレイク隕石の母天体は 773 Irmintraud であると断定はできない。私たちが今のところできることは、観測で得られた情報から隕石飛来のシナリオを書くことであり、そのシナリオを基に、小惑星の環境を探ることなのである。シナリオが事実に近いものであるかを証明するためには、今後、隕石と小惑星の環境で起こりうる様々な場合を検証する必要がある。

ともあれ、私たちはタギッシュレイク隕石の母天体を求めて、すばるを用いて D 型小惑星とタギッシュレイク隕石の親子関係を裏付ける新しい証拠を獲得した。これはすばると日本で D 型小惑星を見つめた私たちの大きな成果といえるものであろう。隕石の母天体を求める長い旅の過程で、すばるが小惑星の新しい描像を得たことは間違いない。

5. 謝辞

本研究を行うにあたり、共同研究者のブラウン大学・廣井孝弘氏、宇宙開発事業団・中村良介氏、宇宙科学研究所・安部正真氏、石黒正晃氏、長谷川直氏、国立天文台・関口朋彦氏、指導教官の五十嵐丈二助教授に、科学的な面やデータ解析についての丁寧なご指導や貴重な助言を頂きました。すばるでの観測は、IRCS チームの寺田宏氏にご協力を頂き、日本での同時観測は、宮坂観測所・宮坂正大氏のご支援により、福島県・浜野和天文台、長野県・小川村天文台、国立天文台三鷹 50 cm 社会教育用望遠鏡、山梨県・大月観測所、山梨県・宮坂観測所、鳥取県・さじ天文台で観測に参加された皆様のご協力で実現して、観測成功が達成されました。皆様に心から感謝致します。

参考文献

- 1) Brown P. G., et al., 2001, Science 290, 320
- 2) Hiroi T., et al., 2001, Science 290, 2234
- 3) Tholen D. J., 1989, in Asteroids II, eds. Binzel R.P., Gehrels T., and Matthews M.S.(University of Arizona Press, Tucson) p.1139
- 4) Jones T. D., Lebofsky L. A., Lewis J. S., Marley M. S., 1990, Icarus 88, 172
- 5) Lebofsky L. A., Jones T. D., Owensby P. D., Feierberg M. A., Consolmagno G. J., 1990, Icarus 83, 16
- 6) Feierberg M. A., Lebofsky L. A., Tholen D. J., 1985, Icarus 63, 183
- 7) Luu J., Jewitt D., Clouts E., 1994, Icarus 109, 133
- 8) Cruikshank D. P., et al., 2001, Icarus 153, 348
- 9) Cruikshank D. P., et al., 2002, Icarus 156, 434
- 10) Hasegawa S., Abe M., 2001, in Proc. 34th ISAS Lunar Planet. Sci., eds. Mizutani H., Kato M., (ISAS, Kanagawa) p.91
- 11) Salisbury et al., 1991, Icarus 92, 280

Photometric and Near-IR Spectroscopic observations of a D-type asteroid, (773) Irmintraud, by SUBARU/IRCS

Ai KANNO

Department of Earth & Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033

Abstract: We have performed near-IR photometric and spectroscopic observations of a D-type asteroid, 773 Irmintraud, by SUBARU/IRCS. We also conducted the visible photometry to obtain the accurate lightcurve in Japan. In contrast to the previous observations of D-type asteroids, we found a gap between K- and L- band spectra, possibly due to 3- μ m absorptions of hydrous silicates. Our results support the idea that Tagish Lake meteorite has a link with D-type asteroids.