

# 宇宙起源固体微粒子研究断章

## -----山越和雄教授に捧ぐ

田澤 雄二<sup>1</sup>

山越さんの急逝から早半年が経ってしまった。山越さんが研究者の生涯の全てを注いだ宇宙起源固体微粒子（宇宙塵）/宇宙物質の研究は、深海底土（J. マーレー）、（北）極地雪氷（N. ノルデンシエルド）から黒光りする小さな丸い粒（Spherules）が発見されてから1世紀余り、南極雪氷（西堀）からは40年、そして山越さんが白鳳丸上で世紀の対面を果たしてから30年、今まさに大きな転機に差し掛かっていると私は思う。その象徴とも云うべき二つの新しい話題を紹介し、故長谷川博一先生と山越さんが牽引者となって進められてきた我国の宇宙塵研究のこれまで、特にスタートの頃の歩みと今後を展望し、山越さんを偲ぶ一文としたい。長谷川先生を“生みの親”とすれば、山越さんは30年もの間、私のみならず、宇宙物質/ダスト研究グループのメンバーにとって、研究教育上の“長兄”であった。“生みの親”に続き今また“長兄”と、二本の大黒柱を失い、我々宇宙物質研究グループはグループ存亡の一大難局に直面している。如何にして二先生の遺産を継承し、新しい地平を開拓するべきか--- この回答こそが二先生へのレクイエムとなるであろう。死に損ないの“弟”としては、せめて新たな発展を見届けて、その報告をあの世の二先生への手土産にしたいと思う。

象徴的な話題とは、いずれも先日の南極隕石シンポジウムの際に知り得たものである。その一つは既に雑誌等でご存知の方も多と思われるが、太陽系外（星周）塵グレインを隕石から発見したと言う、

ワシントン大学(セントルイス)の Zinner の講演である。もう一つは地層中に微小球粒濃度の変動を探し出し、地質時代に於ける大流星体衝突等全地球的規模での地球外物質降下の変遷の調査を主な目的の一つとする、東欧諸国が中心となった国際プロジェクトの呼掛けである。

### [1]隕石中の星周塵

太陽系内の微粒子は永遠の生命を持っている訳ではない。太陽放射との相互作用によるポインティング-ロバートソン (P-R) 効果のため、ケプラー運動の軌道要素、離心率  $e$  と軌道半径  $r$  が減少し、太陽に向かって螺旋運動をしながら落ち込んで行く。この寿命  $t$  は粒子サイズ  $s$ 、比重  $d$  と、 $r$  の二乗に比例する。即ち、より大きく、より重く、より遠くにある物体ほど太陽系での滞在時間は永い。太陽に向う間に惑星への捕獲や、相互衝突による破壊、太陽風スパッタリング等、スペースエロージョン、風化によるサイズ減少や、消滅で更にその寿命が縮まる。冥王星軌道 ( $r=40$  AU) にある  $s=100 \mu\text{m}$ 、 $d=5$  g/cc、の黒体ダストは約6億年で太陽に落ち込み、木星軌道からでは、約1千万年の寿命でしかない。従って形成後45億年も経過した現在の太陽系に、黄道光観測などから判明している惑星間塵の存在を説明する為には、微惑星体等、太陽系内の比較的大きい物体の衝突破壊/摩耗等や、“塵塗れの雪ダルマ”の彗星が太陽近傍を通過する度毎に氷が蒸発し氷に捕まっていた塵が空間に撒き散らされる事による供

<sup>1</sup> 京都大学理学部物理学第二教室

給,あるいは太陽系外からの塵粒子の流入によるほぼ絶え間ない供給を当然の事として予想させる。

我々もグループ発足の当初から星間塵の探求を目的の一つに掲げて来た。それでは太陽系外からやって来る塵粒子はどのような性質を持っているのであろうか?星間空間塵の供給源としては超新星爆発放出物からの凝縮物,赤色巨星の流出気体からの凝縮物等が考えられるので,化学組成や同位体組成は起源となった星のものを反映しているに違いないし,我々が普段目にする事が出来る普通の太陽系物質とはかなり違った,あるいは少なくとも一つは全く異なる特徴を含んで居なければなるまい。この様な異質なグレインを隕石中に求めるならば,その最有力候補は隕石として集積した後の変成を経験しなかった最も始源的と思われる炭素質隕石中の炭素質塵や高温凝縮物であろう。そしてそれらを太陽系外起源と判断するには,本来微量にしか含まれていない希ガスの同位体組成異常:“Exotic Noble Gas”の有無や,複数の元素についての同位体組成異常の有無が非常に有効である。太陽系外起源が同定された炭素質塵は,ダイヤモンドが Xe-HL, シリコンカーバイドが Ne-E(H), Xe-S, グラファイトが Ne-E(L)等の成分を持ち,更に後二者には Ti, Zr, Mo のカーバイドの微小粒の存在も電顕で確認された。一方酸化物,窒化物には希ガスが全く存在せず,二次イオン質量分析 SIMS による一粒一粒の成分元素 (O, N, Si, Al, 等) の同位体比測定から,単一星の燃焼生成物では説明できない,複数の赤色巨星起源と見做される Si カーバイドやコランダムグレインが同定された。また超新星起源のグレインとしては低密度グラファイトと Si カーバイドが同定された。一見さりげないこの報告は粒毎の同定ができる分析装置や技術もさる事ながら,彼らの推論と実験方法の正しさと,実際に行なった作業の大変さを余す所なく示している。かくして太陽系形成時に近傍から紛れ込んだ星周/星間塵が,正に化石として始源的炭

素質隕石中に残されていた訳である。今後我々に求められるのは現在流入している“生きたまま”の太陽系外起源物質試料の発見,入手であろう。無人探査機による in-situ 観測/計測もさる事ながら総合的調査可能な試料採集と分析同定手段の開発に努力しなければならない。

## [2]地質時代の微小球粒探査プロジェクト

隕石,月岩石,惑星間塵,星間塵等,宇宙物質その物の性質の研究の他に,最近ではアルバレッツ親子の6500万年前の生物絶滅に関する研究に見られるように,時には外観や環境の劇変をもたらしたであろう,地球誕生以来繰り返されて来たそれら微小天体との遭遇の歴史を,全地球規模で様々な地質年代の地層から発見されているマイクロテクタイト/スフェルールを手掛かりに紐解く研究も行なわれてきた。今回の呼掛けは,ハンガリー,エストニア,スロバキア,ルーマニア,中国の5カ国(我国には馴染の薄い)の研究者を中心に提案されたものである。バルト海/スカンジナビア地方,中部ヨーロッパ/地中海地方,中部/南部アフリカ,中部/東部アジア,北アメリカ/カリブ海地方,オーストラリア,南極等など様々な地域,様々な地質年代の地層から発見されるマイクロテクタイト/スフェルール層の全地球規模での同定とその年代決定によって,地球及び太陽系の年代学に新しい道具(時間軸)を提供すると共に,隕石の衝突/爆発のプロセスを明らかにしようと言うプロジェクトである。この為,層位学,地球化学,鉱物学,古地磁気学,放射性年代学,惑星学,隕石学,気象学,氷河/雪氷学,等広い分野に跨る知識の動員を必要とすると共に,得られた知識がそれぞれの分野に新たな影響を拡げて行く事を期待している。我々はこのプロジェクトに組織的に参加するか否かについて検討中なので,関心ある方々の御意見御連絡をお待ちしている。我国

にはマイクロテクタイト／スフェール層が発見されていない為、地質学関係での関心は従来あまり高いように見えなかったが、今後の高まりを期待したい。

### [3]京都大学宇宙線研究室発足

そもそも山越さんが「この道」に頭为天辺までも浸かってしまったのは、1966年4月に長谷川先生に従って、DC課程に編入した野間氏（現山形大学）と共に新しく宇宙線研究室を開設するため京大理学部助手として着任したのが始まりである。研究室の主要テーマは、「宇宙線生成核種検出による宇宙線強度永年変化の研究」であった。東大核研を中心とする屋久杉年輪中の宇宙線生成核種 C-14 を用いた研究で主に地磁気変動に基く過去数千年の変動がほぼ判明した時期で、核研、理研、早大等のグループも数万年から数百万年にわたる変動を追求し始めていた。京大は Ni-59 (76Ky), Mn-53 (3.7My) という鉄を標的とし、太陽宇宙線  $\alpha$ , p 照射で生成する e-捕獲核種の K-X 線検出を目標とした (Ni-プロジェクト)。これらの核種は、C-14 の場合とは異なって大気中で生成されるのではなく、惑星間空間で惑星間空間物質中の鉄成分を標的として生成されるので、地上に降下した惑星間物質の中に存在しているはずである。そしてその存在量は単に宇宙線強度だけでなく、標的物体の大きさ、組成構造、照射期間、軌道半径等、さらには降下物質そのものに依存する。特に太陽宇宙線は銀河宇宙線に比べ低エネルギーなので標的物体の極く表層にしか突入できない。即ち、これらの核種は大部分塵粒子が担っている。ここから「宇宙塵」とは切っても切れない仲間になったのである。降下した惑星間物質が地球物質で最も薄められずに、時間経過も保存されている場所は、深海底堆積物、極地雪氷であろう。また大気上層（成層圏）では絶えず“新鮮”な惑星間塵が降下して来ているであろう。

--という訳で当初は深海底堆積物から Ni, Mn を抽出してその中に含まれる Ni-59, Mn-53 を検出することになった。ところで鉄質宇宙塵が地球に捕獲されるまでに塵中につくられ、生き残っている Ni-59 の割合は、約 100 万年の間、現在と変わらぬ強度の太陽宇宙線の照射を受けたと仮定すると、Ni 1g 当たりおよそ 100 dpm、堆積物中の全 Ni に占める宇宙起源 Ni の割合は 1 - 0.1 % 程度と考えられるので、Ni 含有率 200 ppm の赤粘土 1 ton 中には 20-200 dpm の Ni-59 が存在する事になり、計数効率 5 %、バックグラウンド計数率 1 cpm の X-線 カウンターで検出する場合には、この赤粘土量 1 ton が必要処理量の下限を与える。また赤粘土 1 Kg から約 1 mg の鉄質スフェール（平均 Ni 含有率は、0.14 %）が回収されたが、この鉄質スフェールのみから Ni-59 を測定するには赤粘土 100 ton からスフェールを抽出しなければならない。鉄質スフェールを海底土から抽出するには、水で薄めた海底土を電磁石で根気良くかき回しながら磁性成分を回収し、実体顕微鏡の下でこの磁性成分から丸い小さな玉“スフェール”をピンセットで摘み上げなければならない。これも又気の遠くなるような作業の連続である。

このように一研究室の化学実験の規模を遥かに越える膨大な量の、しかし化学プラントの規模からは充分に少量の堆積物の処理が我々の前に立ちはだかっていた。バケツケミストリーと我々が呼んだこの化学処理作業は、肉体的にも精神的にも、又環境に対しても実に苛酷なもので、旧館の窓枠に換気扇を設置しただけの簡易ドラフトからの排気をもろに受けた木立ちの木の葉が枯れたと山越さんから聞いた事がある。諸大学で環境基準が議論されるようになったのは、バケツケミストリーをやめたずっと後の事であるが、我々より少し遅れてバケツケミストリーを始めた早大藤本研では、我々の経験を生かして排ガス洗浄装置付きのドラフトを設置したが、

これは実に先見的なことであった。

一方カウンターシステムの開発と整備も多くの困難を抱えていた。68年4月に私が化学処理を分担するため京都に呼ばれ、山越さんはNi測定と全システムの統括を、野間さんはD論としてMn測定を分担する事になった。京都の低バックシステムは製作者山越さんの個性が色濃く出たユニークなもので、実験室の真中に電波シールドのため天井、壁を銅張りにした10平米程の測定室（これは余り有効では無かった？--ラジオが聞けた）があり、この中に石油缶入り水、ホウ酸、固形/流動パラフィン、鉛ブロック、戦艦陸奥の鉄とで5重にシールドされた空間にX線カウンターとプラスチックアンチカウンターが収まっている異様な建造物だった。またご存知の方も多と思われる独特の書体で書かれた、壁のそこかしこに貼られた“ACHTUNG!”の注意書も忘れては成るまい。野間さんのMn用カウンターはメインのガスカウンターの周囲を多くのGMカウンターが取り巻く“蓮根型カウンター”と呼ばれた。私が処理した海底土は全部合わせてもバケツ2,3杯分、40-60 Kg程に過ぎなかったろう。それも山越さんの、あの強大なバイタリティーの後押し？に負うところ大であった。当時、細切れで得られた充分とは言えないサンプル量では、肯定的な測定結果を得るには到らず、後に山越さんが東大核研に移られてから、鋸山に建設した低バックグラウンド施設のX-線測定系を用いて赤粘土 3.14 Kg から抽出した 430 mg の Ni について Ni-59 が最終的に測定された。

68年10月の物理学会に“Ni-59 Project (IV)”なる講演題目があるが、この題名以後物理学会から“Ni-59 Project”の講演題目は見当たらない。「コスミックスフェールの化学分析」や、「Ni 降下率」等といった副産物的話題に移って、事実上 Ni-59 の検出未完の状態が続いていた。我々が“貴重”なスフェールの化学分析に手を初めたのは学会講演の

キャンセルを避ける為だった。私と野間さんが数10mgもの石質試料を遣って重量法、滴定法、比色法によって得た定量値を学会発表したが、当然にも我々の腕を信用出来なかった山越さんは論文にするに当たって、100 mg以上の試料の分析を民間研究所に依頼した。結果はサンプル量/プロアマの腕の差にも拘らず（我々としては、なかなか）良い一致を得たので内心ほっとし、又一方では信用されない事が不満でもあった。我々はこの時初めて宇宙起源の判定条件に元素、特に親鉄元素の濃縮度と存在度パターンが有効である事を実感した。勿論、確証は宇宙線生成核種の検出に尽きるが、70年には野間さんが山形大に転出し、この頃になると院生の研究テーマも、海底土柱状試料の年代測定→太陽系初期に於ける軽元素の生成（小池：現京都薬大）、Ni-59、Mn-53の反応断面積の測定→赤外線/荷電粒子検出器開発（川久保：現KEK）、ダスト検出器/ダスト加速器の開発（藤原：現ISAS）等、宇宙線強度永年変化からの発展/分化が見られる。またダストの運動学から始まった自主ゼミでP-R効果、微粒子帯電の電磁気的影響、微粒子の光学特性、等の理論/観測勉強会（京大宇宙塵グループ）が持たれるようになった。後にこの勉強会は長谷川先生の参加により「ダストニュークリエーション理論グループ」（向井：現神戸大、山本：現北大、等）へと発展する。

#### [4]早大グループとの共同研究の開始と核研C部発足

早大理工研藤本陽一教授の研究室でもフォールアウト/宇宙線生成核種の検出、大気/雨水からの集塵等の研究が65-6年頃から進められていた。早大グループは実験室で手にする事が出来る宇宙物質としての宇宙塵に当初から焦点を当てていた。それは、隕石や可能となったばかりの月試料の入手には、外国からの提供に頼らざるを得ない（自立的研究が阻害されかねない）不自由さ/困難さを伴うからで、

一方塵は地球上に普遍に（富める国，富めない国にかかわらず）降り注いでいる，また隕石は過去の太陽系の出来事の記録保存者であり宇宙塵は現在の太陽系及びその周辺での出来事をも知らせてくれる-- と言う，藤本先生の考えからだと言う．当時の人と研究の内容は，菊池(現早大：低バックグラウンド測定系)，崎村(気球集塵)，大矢根(高山集塵，短寿命宇宙線生成核種:Co-56 等の検出／宇宙塵の放射線損傷実験)，島村／岡本(現北里大／故人：消滅核種による星間塵流入の確認；Sm-146 の $\alpha$ -線検出等)，小林(現東大：質量分析による同位体比異常測定)，少し遅れて野上(現独協医大：気球／高山集塵と分析)の各氏らである．京大と早大の二つのグループが具体的作業で協力したり共同研究を始めたのは，東大海洋研白鳳丸航海での海底土採集(67年以降)や，72年10月のジャコビニ-チンナー彗星に伴う流星塵採集のために北九州で行なったゴム気球飛翔実験等であったが，情報／意見交換等はかなり早くから頻繁に行なわれていた．それは丁度，70年安保を頂点とする大学闘争たけなわの時でもあり，院生や助手といった“若手”が大きな発言力をもって素粒子／原子核／宇宙線研究の将来計画の議論に参加していた時期だったからである．京大では長らく教養部が「解放区」となり，物理教室に度々黄色のヘルメットの部隊が駐屯するという状況の中で，山越さんは海底土の入ったバケツ，電磁石，実体顕微鏡を自宅に持ち込み，奥さんと共に膨大な数のスフェールを拾い上げた逸話とその山越コレクションが山越さんの数々の研究成果をもたらした事を言って置かねばなるまい．

山越さんが着任する事になった核研宇宙線C部の発足は，宇宙線という[素]粒子だけでなく宇宙塵という[微]粒子の物質科学をも含めた宇宙物理学の推進を主張した我々(京大早大若手)“塵グループ”の輝かしい門出となる筈であった．当時私は，そもそも共同利用研は各大学／研究室／研究者という最前

線間の共同／個別研究の立案／調整／保護／育成あるいは情報収集／伝達等，後方支援／作戦参謀的立場にあるべきで，金と物と人を独占し研究成果を独占してはならない，院生(後継者)の供給が可能な大学こそが大切(インターユニバーシティ構想)という考えであり，中央集権的共同利用研ポスト=プロジェクト責任者=教授／助教授という構図には反対だったが，新しい分野を切り開くには，金と物と人を集中し目覚ましい研究成果を上げなければならぬ，人的構成もまたその責任を十分に果たし得るものでなければならぬという業績至上主義的主張に負けた．かくして若手グループが推進する新しい研究部門「宇宙物質」の統括責任者として山越さんが乗り込む事になったのである．宇宙線C部で我々が推進したのは，1) 極低バックグラウンド放射線測定施設の建設とこれを用いた宇宙線生成核種の測定，2) 極高感度質量分析計による同位体比異常の検出，の2本柱であった．しかし宇宙線C部に於ける「宇宙物質」研究は宇宙線研究の主流たり得ないという自他共に認めた規制のもとで出発した事が，その後，現在に至るまでの塵グループの立場を決定したと言えるであろう．

## [5]核研／宇宙線研 1 次線宇宙物質共同研究

山越助教授と新たに核化学の分野から塵グループに加わった柳田助手(現茨城大)，それに旧早大グループ(大矢根，小林，島村，野上)が共同利用研での新プロジェクト推進の本隊だった．山越，大矢根，野上が上記1)を，柳田，小林，島村が2)を分担した．京都グループは中核の山越さんを失い，藤原(ダスト加速器による高速衝突実験)，田澤(超高真空イオン照射装置による宇宙空間固体表面物性実験／南極雪氷中塵の分析)，長谷川グループ(小池，向井，山本ら：核形成理論，ダスト光学特性測定等)と分化／発散し，新たな領域を開拓し始めた．野間氏の

移った山形大では新関先生(故人)らが真室川高校校庭の積雪中からの鉄質スフェルール回収の共同実験を開始しだした。

共同利用研における拠点の獲得は、単に個別研究課題の実現だけでなく、所外の共同利用者への諸便宜の提供という役割を担っているが、その任に当たった山越さんの、キリスト者的?とも言うべき献身によって、物理、天文、化学、地球物理等、従来以上に(これまでまとまったことがないような)広範囲な研究者を巻き込んだ研究組織が形成され、各種研究会、ワークショップが頻繁に催され、やがていくつかの科研費班の実現となった。このような時、常に師である長谷川さんを頭に担ぎ、山越さんは裏方での根回しに力を注いでいたが、長谷川先生の表に現れた指導性/組織力と並んで、山越さんの影の努力こそ山越さんの最も輝かしい業績として讃えられて良い。

素粒子研究所計画が破産し、高、低エネルギー、宇宙線はそれぞれ分離した研究所に成ることになり、76年に東大核研宇宙線部は東大宇宙線研究所として再出発した。この間、68年に約20機関、80名前後の物理、化学出身ほぼ等しい構成の「核反応生成物による宇宙物質の研究」グループが発足して科研費総合研究を中心とする研究会等、古手若手を問わない交流を続けて来たが、核研C部発足は研究集会の開催、大型設備要求等でこのグループにとっても重要な拠点となった。また68年からは東大宇宙航空研で第1回月惑星シンポジウムが、76年からは国立極地研で南極隕石シンポジウムが、また79年7月には日本惑星科学連合第1回総会/学術講演会が開催され宇宙物質研究の輪は確実に広がって来た。79年8月に京都で第16回宇宙線国際会議が開かれたが、この時のOG-12 Session「起源:宇宙線永年変化/宇宙線生成核種/宇宙物質」への提出論文31編中、日本側15編の発表内容が京都グループ発足以来の我国の宇宙線生成核種/宇宙物質研究者の

第一期研究総括となっている。誌面の関係でプログラム題目を掲げるのは控えるが、宇宙線国際会議ではプローブとしての宇宙線が、日本惑星科学連合講演会は“物そのもの”が強調されていてその対比が面白い。

我々が手にすることが出来る宇宙物質も、69年の「アレンデ隕石」落下、アポロ11号による「月の石」帰還、同じく69年第10次南極観測隊による「やまと隕石」群発見に続く多量の南極隕石等、新しい顔ぶれが揃う一方、74年以降のNASA飛行機集塵試料での地球外起源微粒子「Brownlee Particles(IDP)」確認調査等に見られるINAA, SEM/EDX, EPMA, STEM, SIMS, AMS等、多様な極微分析技術/装置の適用/確立で、宇宙物質に関する知識も研究者数も飛躍的に増加した。そしてこれまで各種研究会、学会等で、我々“塵族”がともすると意識した「肩身の狭さ」も過去のものとなった。

80年代は地上で手にする事が出来る従来の宇宙物質の研究と共に、米国、ECには遅れをとったが飛翔体搭載機器による惑星間塵の直接探査に第一歩を踏み出し、実験室でのシュミレーション等、観測/理論との対応性、精密化の追求へと進んだ時代である。向井氏はじめ次代を担う“若きニューリーダー”たちも続々と国際的にも活躍を始めた。まさに“黄金の第二期”とも言うべき時代であった。90年8月にはその総括と言うべきIAUコロキウム“惑星間塵の起源と進化”が京都で開かれ、我国の研究が国際的に(主に天文分野での)高い評価を得た。翌91年10月長谷川先生が永眠されたので、このコロキウムが長谷川-山越 師弟コンビの最期のイベントとなってしまったが、この時の山越さんの公私を超えた献身なくしてはコロキウムの成功はなかったと言えよう。纏りのないものとなったが、最後にもう一度、山越さんの安らかならん事を祈って、追悼の文を終える。

平成7年7月