

杉本大一郎氏ロングインタビュー 第3回：名古屋～駒場時代



高橋 慶太郎

〈熊本大学大学院先端科学研究部 〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1〉

e-mail: keitaro@kumamoto-u.ac.jp

インタビュー協力：小久保英一郎（国立天文台），編集協力：高橋美和

杉本大一郎氏のインタビューの第3回です。杉本氏は京都大学大学院で設立後間もない林忠四郎研究室に入りました。そこでは林忠四郎だけでなく早川幸男からも薫陶を受け、星の進化の研究に取り組みました。その後、杉本氏は名古屋大学、NASA、東京大学でさらに星の進化の研究を進めますが、プリゴジンの著作と出会うことで天体現象をより物理の基礎原理から捉え直すことを試みます。今回は星の進化を解明する上でキーとなった手法や、天体を非線形システムとして考える見方などをじっくりと聞きます。

●名古屋大学X研の助手となる

高橋：1964年に京都大学大学院を修了して、すぐ名古屋大学の助手ですね。どちらの研究室ですか？

杉本：X研究室。混沌研究室。

高橋：混沌研究室ですか。教授はどなたでしたか？

杉本：教授なんかいないよ。

高橋：え、そうなんですか。

小久保：早川さんじゃないんですか？

杉本：いや、世話になったのは早川さんだけだね、形式的にはいないんだ。というのは、そのとき坂田昌一がまあいわばボスで、あそこはわりと先進的だったんだ。ほいでね、こんな絵を描いた（図参照）。素粒子、宇宙、それから物性、生物と。宇宙は早川さんでね、素粒子は坂田さんと牧二郎さんとか、要するにニュートリノ振動の話を始めにやったとかいう。その頃に益川敏英とか小林誠が僕よりちょっと下で大学院生やってん。ほんで四つの分野を線で結んでね、その交点をX

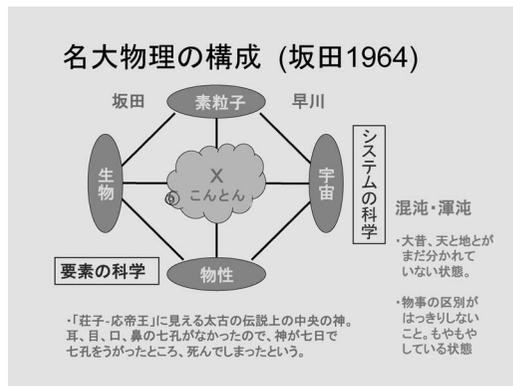
研にした。その頃はドイツ語が幅きかせてたからね、アイゲントリッヒェス・イクス (eigentliches X) だ。そこで人を採ると。

小久保：ホントにX研と称していたんですか？

杉本：X研や。ほんで日本語で混沌ちゅうねん。

小久保：混沌って、カオスの混沌？

杉本：うん。とにかく名古屋に行ったんだ。そのときにさ、東北大から藤本光昭、京都大学から僕が宇宙の関係で助手としてXに行ったんだ。それ



坂田・早川レクチャースライドより（杉本氏提供）。

から安野愈さんという原子核の人と横井敬さんという宇宙線の人が助教授や。X研ってのはそういう研究室だった。まあ宇宙は早川さんが支配していたんだけど、表向きはそういう趣旨だった。その頃にこんな絵描くなんて素晴らしいでしょ。

小久保: そうですね。先見性がありますね。

杉本: 東大なんかと違うんだっちゅうわけ、坂田さんは(笑)。それで僕が名古屋に行ったとき早川さんはバルーン揚げて陽電子の観測してた。僕はまあ遊び半分でハンダ付け手伝ったりね。

高橋: 実験もされてたんですか。

杉本: 僕は物作るの好きなんだ。だってできあがりがあるから。物を作るのと概念を作るのと体系を作るの好きなんだ。天文のことは何にも知らんけど。どれくらい知らんかという、超新星爆発やってた大野陽朗さん。講演でかに星雲の話をしたんだ。そしたら子どもがぱっと手を挙げて、「かに星雲はどこにありますか？ 何座ですか？」ちゅうて。その子ね、帰ってから望遠鏡で見ようと思ったんだね。そしたら大野先生、詰まってる(笑)。「かに星雲はかに座にある」(笑)。そういう笑い話。そのくらい大野さんは知らなかった、僕はもっと知らなかった。

小久保: ま、そんなものですよ。

杉本: そういう意味で僕は天文学は何も知らんわけや。僕が助手の始めの頃ぐらいはね、天文学というのは高尚なもので、技術者に機械作らせて、天文学者がこうやって望遠鏡を覗いているような絵があるでしょ。そういう感じだった。だから技術ってのは一段下だった。それをひっくり返したのが野辺山や。赤羽(賢司)、森本(雅樹)、海部(宣男)あたりがひっくり返して、やっぱり新しいものを観測するためには新しい機械を作らなければいかんということが意識されるようになってきた。それをするのが天文学やと。

高橋: 今は技術はとても大事にされてますよね。

杉本: その前に小田さんがMITに行ってた。ロッシ(B. Rossi)とX線の観測やってて、すだれコ

リメーターを発明してSco X-1とかいうのを発見した。小田さんが日本へ帰ってきて、物理学会でえらい興奮して講演したの覚えているよ。そういうことがあって原子核研究所の宇宙線の連中がX線の方に行った。早川さんもX線やった。それでちょっと遅れて野辺山の電波望遠鏡。そこで、新しい技術を使って新しい事柄をみるといろんなことがわかるんだね、ということになって、それで天文と物理はそれまで壁があったのが取れた。

それで僕は名古屋に6年いたのかな。その6年のうちの最後のほうの2年はNASAのゴダードにいたんですよ。

●NASAに長期滞在

杉本: NASAにはコンピュータ使いに行ったんだ。よく留学なんていうけどね、こっちは留学って気は全然ないわけ。あの頃は国家公務員の端くれだから公用旅券でNASAへ行って、途中で帰ってくることをさえできなかったんだよね。

高橋: そうなんですか。行ったらずっといなきやいけない？

杉本: 行ったら、絶対。その間に親父が死んじゃったけども帰れなくて。帰ったらそれがボイドになっちゃって、その後アメリカに戻れないんだ。飛行機賃だって、僕が行った頃は往復したら助手の給料の半分。だから親父が死んだって帰る金の問題もあったよね。

高橋: 助手の給料って年額ってことですか？

杉本: 年俸。夫婦で往復したら年俸分いる。

高橋: それは相当な額ですね。

杉本: そんな時代だった。NASAはさ、家族も含めて全部、旅費を出してくれる。子どもの分もみんな出してくれてね。途中でホテルに泊まった必要経費もね、ビール飲んでもちゃんと払ってくれた。その頃のNASAは金あったんだよ。そういううまい話はNASAしかなかった。

高橋: 太っ腹ですね。

杉本: 太っ腹というか、ロシアが先に人工衛星打

ち上げて、それに追いつけ追い越せでね。アポロ計画につながる時期だった。それで僕が最初にアメリカに行った1967年なんてのはさ、ボーイング707って天測で飛んでいくんだもん。

小久保: えっ、そうなんですか。でもそうですね。GPSなんてもちろんないし。

杉本: ジャイロってものはあったけどね、そういうところで実用になるものではなかった。ダグラスのDC8に乗ってアメリカから帰ってくるときも天測で飛んでた。

そんなんでNASAにはコンピュータ使いに行っただけで、日本はHITAC5020って外部記憶が磁気ドラムだった時代。NASAにはIBM7094があった。ジョブに全部通し番号つけておいたら、2年間いて1,000番ぐらまでいった。「1,000番までいったら表彰してあげる」とか言ってからかわれて。

高橋: 自由に使えたんですか？

杉本: うん、ほぼ自由だね。地下にあったから階段上がったたり降りたり、それを1,000回やったわけだよ。

高橋: どういう計算をしたんですか？

杉本: 結局、星の進化を計算してたんだけどね、星の進化の計算で、ある意味で難しいの。何でかというとな、星の中心と表面で変数の値が何桁も変わるわけ。中心の方では進化のタイムスケールより熱伝導のタイムスケールのほうが遅い。流体の力学的平衡状態を作るタイムスケールははるかに短いわけ。例えば太陽だったら日ね。red giantの外層は年、中心部は秒の単位ね。それに対して熱伝導は10の6乗年とかかかるわけでしょ。ということはちょっとしか熱は流れないね。主系列星なんかだったら外層と中心との密度の比が大したことないから難しくないんだけど。ところが星が進化すると中心のほうが縮んで外層は膨れるよね。そうすると密度コントラストがなんぼでも大きくなれんねん。すると熱伝導のタイムスケールだけでもべらぼうに違うわけ。今の言葉でいうと

マルチタイムスケールが問題でね。そういう問題を全部一挙に安定に数値計算するにはどうすればよろしいかと。

高橋: 進化すると難しくなると。

杉本: そのころ星の進化の計算にヘニエイ法というのがあったんだけど、まずはヘニエイ法を元にしてそれから変えていくことにした。それでヘニエイ法でやってたら主系列星のときはうまくいくんだけど、red giantになるとうまくいかないんだ。シュバルツシルト (M. Schwarzschild) も困ってたんだよね。

なんでうまくいかないのかということを考えてたら、要するに差分方程式の解は微分方程式の解より多いわけだ。格子点だけ合っていればいいんだから。ギザギザの解だって平均の取り方によっては差分方程式の解になるわけ。だから平均を取って平均で合わすからいかなのだと。平均で合わすのは近似のオーダーが1次上がるけど、そんなのやめてしまえと。それやめて前方差分と後方差分とうまいこと使い分けたらスパッとうまいこといったんだ。つまりある変数は前方差分を取って、別の変数に関しては後方差分。

高橋: 別の変数というのは、たとえば圧力と密度とか、そういうことですか？

杉本: そうそう。そうやると不安定性が抑えられるだろうということがわかって、やってみたらうまく行ってね。もちろんその代わり精度は落ちるのよ。それでApJに論文を書いた¹⁾。そしたらそれから何年か経って、staggered meshとかいう名前が付いてほかの人もそういうことをするようになったんだ。それで持ってコア・ハロー構造を計算することができるようになった。その頃にアメリカの連中はどうしようとしてたかという、いっぱいメッシュを作ってね、星の中に何百というメッシュを作ってやろうとしてたけど、そんなことしなくてもよくなったわけ。

高橋: メッシュが少なくても安定して解けると。

杉本: うん。それはアメリカで書いたからApJに

載っているんだけどね、それから後のやつは日本のプロGRESS. もちろんApJに載せたいいかも知れないけど、日本にはApJに論文を載せるほどページチャージ払う金ないからね。だから日本の雑誌にしか載せられへんわけや。

高橋: アメリカにいたときは、NASAが払ってくれるんですか？

杉本: もちろんNASAが払う。アメリカはわりと厳しくてね、論文は著者を雇ってるところに権利があるわけ。だから当然金も払ってくれる。それでその研究の話をごっか別の大学に行ってる時には許可取らなあかんねん、自分の仕事でも。NASAは特にうるさいけども、僕らのやつは人が聞いて得になるような軍事機密もロケットの機密も何もないからね、許可はすぐくれるんだけどね。形式的には許可取らないといけないの。その許可もいい加減なもので、パチンスキー (B. Paczyński) って男がコロラドにいてね。そこにプレプリント送るのにも許可取れって。でも共産圏はいかん。パチンスキーはポーランド人だから共産国だと。でもアメリカに来てるからいいんだとか、まあそのぐらいのもの。

高橋: もしソ連に行ってしゃべるとかだったら、許可されないということですか？

杉本: たぶんね。だいたいその頃は行けもしないんじゃないかな。マッカーシー旋風が終わってしばらくぐらいのときだからね。

あと、アメリカではelectron captureでsupernovaになるっていう話をApJに投稿したんだよ²⁾。星の内部の核燃焼殻で核変換が進むと、縮退したコアの質量がだんだん大きくなる。それでチャンドラセカールリミットに近くなるとね、コアの中心密度が急に上がって電子捕獲が起こるでしょ。そうすると電子の数が減ってチャンドラセカールリミットの値が下がるわけ。ヘリウムみたいに陽子と中性子が1:1のやつだったらチャンドラセカールリミットは1.44太陽質量だけどね、鉄だったら1.26なんだよ。だから今までチャンドラセカ-

ールリミット以下だったのが、ある時、超えちゃうわけ。そこまでいくとコアプスが起って超新星爆発。それがelectron capture supernova.

高橋: それはcore collapse型とはまた違う？

杉本: core collapse っていうのは重い星で、始めからチャンドラセカールリミットより大きい場合。electron captureは最初はチャンドラセカールリミットより小さいコアだけでも、途中でチャンドラセカールリミットが下がってコアプスして超新星になるわけや。

そしたらザイディー (Zaidi) ってイスラエルの偉い人がレフェリーで、そんなことしてもしようがないとか言ってきた。それまでそういう論文書いてる人ないからね。普通、論文って早川さんの言葉で言うところにある事柄に塩とコショウを振りかけたらレフェリーをスーッと通って、みんなすぐ理解できるから有名になって、たくさん掲載して表を作ったら偉くなるでしょ。それでレフェリーからいっぱい文句つけられて、大もめにもめてね。しまいにチャンドラセカールが困って僕のところに電話をかけてきた。ApJのエディターだったんだ。で、そのとき僕はまだ若かったから反論して、レフェリーを変えてくれと言ったら掲載されることになった。その延長として、帰国後に中間質量の星のsupernovaを野本(憲一)君とか宮路(茂樹)君と一緒に計算したら、Japanese supernovaって言葉ができたでしょ。

小久保: Japanese supernova っていうのがあるんですか？

杉本: 軽い星のsupernovaは爆発的核燃焼、重い星は重力崩壊、その中間のところがelectron captureでトリガーされる。

高橋: それがJapaneseですか。

杉本: うん、日本人が解明した、太陽質量の8-10倍の範囲をJapanese mass rangeと言っていた。

高橋: エディターのチャンドラセカールから電話が来たということでしたが、そういうことはよく

あったんですか？

杉本: 知らん、それが最初で最後だね。その頃の話だから32歳だっけ。若造のときの話だ。

高橋: チャンドラセカールから電話がきたらちょっとビビりますよね。

杉本: うん。そのときね、やっぱりアメリカ人というのは物事をちゃんとやるねと思ったね。日本だったら偉い人、そこまでしないもの。

●東大駒場に移る

杉本: NASAに行っている間に日本で大学紛争ってのが起こったんだよね。NASAが僕を雇ったのは軍の金が出ているわけじゃなくてナショナルアカデミーの金が出てたんだけど、名古屋の教室会議で「杉本を呼び戻せ」とかいう議論があったんだって。名古屋の教室会議は助手も大学院生も教授と同等の投票権をもって権威があったからね。だけど早川さんが突っ張ねて呼び戻さなかった。僕は2年経って帰ってきて、それからしばらくして小尾さんが名古屋に来て、「杉本寄せせ」とか言う。早川さんが「どうする？」ちゅうからさ。

小久保: 早川さん、止めたんですか？

杉本: いや、そういうもんは大体が一ぺんは止めるもんだ。そのとき早川さんが言ったのは「東京に行くのもいいけど田中靖郎さんが帰ってこないから、俺と一緒に理論やろうか」って。そのころ早川さんは原子核のグループと早川研の松岡(勝)とかあの辺とでX線の実験を始めてた。田中靖郎さんはオランダに長いこと行っててちっとも帰ってこない。そいで杉本は実験はハンダ付けぐらいしかできないけども、何か計算したりするのは役に立つと思ってたんだね。それで名古屋で早川さんと一緒にやるか、それとも東京へ行くかと考えて。僕の返事は、「早川さんと一緒にやったらこき使われるから嫌だ。東京へ行く。」って。この間、誰かに言われたんだけどね、僕はそのとき「早川さんから習うことみんな習うたからね」と

か言ったらしいんだよね(笑)。それで僕が東京に行って、名古屋に田中さんが帰ってきてめでたしめでたし。当時は駒場は本郷のゴミ捨て場だと思われてたけど、今はまともになってきたよね。

小久保: 当時は駒場に小尾さん以外は誰がいたんですか？

杉本: その頃、天文は小尾さんしかいない。そのうちちょっと前の話だけど、寿岳(潤)さんは京都を出てアメリカでずっと分光の観測をやった。その後日本に帰ってきて基礎物理学研究所あたりをウロウロしてた。それで僕が東大へ行くちょっと前かな、天文台が雇うことになった。そのときに天文台の事務が赴任旅費を出すのを忘れたとかいう噂があったくらいだからね、東京以外の人を初めて雇ったんじゃない？ 東大の法学部でも同志社の先生を教授に雇ったというんで新聞沙汰になった。そんな時代、小尾さんが僕みたいな京都出のやつなんか雇って、ある意味じゃ英断だったんだね。彼は地学教室を宇宙地球科学教室に改造して、僕のポストを生み出したんだ。

それで僕が東大に移った頃ね、「杉本さんというのが今度来て、研究費を自分の研究に使ったり、論文のプレプリント作って外国に配ったりしてけしからん。研究は自分の金でするもんや」と。

高橋: 自分のお金というのは？

杉本: ポケットマネー。

小久保: そんな雰囲気だったんですか？

杉本: それで東大の駒場というのは爵位のある人の来るところで、物理には爵位のないやつがいて困ると言った人がいた。

高橋: え、爵位ですか？

杉本: 伯爵とか、子爵とか。

小久保: 当時、そういう先生がいっぱいたいたんですか？

杉本: そういうものらしかった。あっと驚いたよ、僕。小尾さんは有馬(朗人)さんなんか物理の人と関わっていたからもうちょっとわけがわ

かっていたけど、そういう時代だったの。

高橋・小久保: へえー。

杉本: 不思議でしょ。想像もつかないでしょ。それから本郷の物理のセミナーで話をせいか言うので本郷に行った。そしたらちょうどお茶の時間でね、教授ばかり集まってお茶飲んでね。助教授が廊下通ってちらっとのぞいて。

高橋: 教授だけのお茶会なんですか？

杉本: 助教授は数に入れてもらえない。そこへ名古屋から変なやつが来て大学院の講義してね、みんなに優をつけてさ。そういうやつはけしからんとかね。

高橋: 爵位をもってるというのは駒場だけなんですか？ 本郷はそうでもないんですか？

杉本: たぶんね。駒場のほうがそういう意味では上だったんだよね。

小久保: そんな話は初めて聞きましたけど。

杉本: ホント？ だから寿岳さんが天文台へ移ったのも驚天動地だったんだ。寿岳さんは天文台でHD2288701って、X線天体Sco X-1の位置にある星を観測したんだよ。最初の同定だった。そのときのボスが大沢(清輝)さんでね、大沢さんがやったのか寿岳さんがやったのか、いったいどっちなのかで一悶着起こったんだよね。だから昔は教授が偉くて。

高橋: そのとき寿岳さんはどういう身分だったんですか？

杉本: 助教授で行ったんだと思うよ。あそこは講座じゃなくて部門だったと思うけどな。それでその後、寿岳さんはむしろパブリ(PASJ)のほうを一生懸命やるようになったんだよね。

小久保: 寿岳さんは定年後にも天文台のOB会にもよく来られてました。

杉本: そうそう、定年後はエッセ科学や超常現象批判もやったよね。話を戻すと、僕は東大へ行って天文学会の理事になった。やれって言うからなんだ。そして何年かたったら僕が天文学会に入っていないってことがバレたんだよ。こっちもそ

んなこと知らんからね。「天文学会に入っていない人が天文学会の理事とは何事ぞ」って怒られた。

高橋: 入ってなかったんですか。でも頼まれたからなかったんですね。

杉本: だけど僕は東京へ行ってわりと天文べったり、というか天文の大学院を担当してた。その頃、X線や赤外線を観測が発達してきて、X線観測はわりと物理に近い技術だけど、赤外線観測は天文に近いでしょ？ そこで何が起こったかという、国立天文台を作ることを議論する委員会の頃からね、委員会に物理出身の人が半数近くを占めるようになった。それまでは物理の人はみんなよそ者だった。早川さんと林さんだけは別だったけどね。今ではもうあいつ物理出だとか、そんなこと全然言わないでしょ？

それから素粒子物理の人が素粒子論的宇宙論とかいってさ。宇宙論はグローバルな宇宙の話と宇宙の成分の話でしょ。そこに素粒子の人も入ってきた。だから昔は天体物理か、天文学か、宇宙論か、わりとこだわってたけどこの頃そんなこと言わなくなった。とにかく衛星とか観測がどんどん進んで、それから野辺山ができたでしょ？

高橋: 野辺山の完成は82年ですね。

杉本: うん、それで天文の人も実験をするんだという雰囲気を作っちゃったんだ。大きな転機は野辺山だったよね。その頃から天文学はガラリと変わっちゃったよ。X線も電波も、それから赤外も測りますと。宇宙研ができたことも大きいよね。その頃の宇宙研は駒場の教養学部の隣にあった。だから早川さんが僕のところに来てさ、「お前のところの若いやつ、ちょっとX線に寄せ」って。「早川さんのところ行くとき使われるばっかりだから誰も行かないよ」って言った(笑)。

高橋: 先ほどプレプリントを外国に送ってという話がありましたが、そういうことはよくやってたんですか？

杉本: その頃は郵便で送るしかないもの。それにプロGRESSはサーキュレーションが悪くてあんま

り見てくれなかった。その頃、日本にはドルなんてなかったからプロGRESSに出すしかなかったんだよ。というかプロGRESSに出すものに決まっていたわけ。天文屋さんは見ないわな。なんかアメリカ人が日本に来て、「あれはプロGRESSじゃなくてディスGRESSだ」なんて言った人がおるけどね。みんな怒った(笑)。

高橋: じゃあ、欧米の人からはあまりよく知ってもらえなかったと？

杉本: うん。それで京大にいた頃にね、林さんがやっぱりサーキュレーションをちゃんとやらにやいかんと。アメリカとかヨーロッパの人はみんなプレプリント作っているんな国に送ってた。でもあんまり日本人はしなかったんだね。林さんはわりと積極的にやってた。だから僕らはそういうもんだと思ってたわけ。それで駒場に行ってからプレプリント作って送ってたら、そういうことに研究費を無駄使いするのはけしからんと。自分の小遣いであるもんやと。そんなこと言ったって、そんな小遣いもないもん。そんな時代だよ。それから後には日本でもドルが余ったりするようになって、日本人もApJに出したりするようになったけどね。でもやっぱり日本人だからさ、パブリを育てたいというような気もあるよね。

●駒場での研究

高橋: 駒場に行ってから研究はどうでしたか？

杉本: 駒場では小尾さんは隣の部屋にただけで、別になんの関与もしないからね。まあ一人みたいなもんですよ。大学院は天文学専攻だから天文教室に出入りして。

高橋: 研究環境はだいぶ変わりましたか？

杉本: それは随分変わったよ。大学が変わるとまず住むところがたいへんなんだよ。僕は早く結婚して子どもをもってたからね、金もかかるしとにかく差し当りは名古屋から通うって言って名古屋から通ってね。それで毎日どっかに泊まったら金かかるから「天文教室の用務員室で寝てい

い？」とか言って布団借りて寝たりして。そしたらそこに野本君が入ってきて夜遅くまでガチャガチャ議論してたわけ。

高橋: 野本さんは初期の頃の学生ですか？

杉本: 一番初めの大学院生。野本君とは一緒にいろんなこといっぱいしたよね。それで野本君が入った頃、HITAC5020で星の進化の計算やるということで、一人じゃちょっとたいへんだからね、まあ若い人がやってくれるというからもうそれに越したことはないっていうんで一緒にやった。さっきのstaggered meshで鉄のコアができるところまで計算しちゃったんだ。野本君がいっぱい計算したんだ。その方法を拡張してcarbon deflagration supernovaの計算なんか、何万年の時間スケールの進化から爆発の何秒スケールの進化まで一挙にできちゃったんだよね。

高橋: それはstaggered meshの方法がなかったら、ずっと追うのは難しかったんですか？

杉本: できない。

高橋: 世界的にも、ヘリウムが燃えるぐらいまでしかできてなかったんですか？

杉本: ヘリウムが燃えるところ、horizontal branchね、それをちゃんと計算したのはたぶん僕がM1のときにやったのが初めてじゃないかな。それは手計算よ。

高橋: そうなんですか。

杉本: だからそういうものに対する勘はあったわけだ。そいつがコンピュータでできるようになってね。それでオランダの出版社から“Presupernova Models and Supernovae”という表題でレビュー論文を書けて言われて³⁾、僕だけじゃできないものだから野本君にも加わってもらった。そのころ僕は超新星に関しては不安定核燃焼による爆発の話ばかりやってたもんだからね、重力崩壊の超新星のこと知らんわけ。だからどういふふうに書こうって困ってね。それで超新星は核燃焼爆発の話ばかり書いた。今はいっぱい詳しくわかってるらしいけど、その頃はtype I supernova

っていうわけや。観測的に水素の線が見えるとか見えないとかで、type Iとかtype IIとか決めてたんだから。

高橋: スペクトルの特徴で分類したんですね。

杉本: それで、type I supernovaは白色矮星に連星の相手からガスがaccretionしてきて起こるんだと考えた。そうするとどれも起こったときの条件は同じやと。条件は同じだからtype I supernovaはみんな同じ明るさのはずやと。

高橋: そうなんですか、明るさが同じっていうことをそこに書いたんですね。

杉本: うん、書いてただけだけどね。大雑把な話でそういうふうになるはずやと。その後、観測から細かいことまで全部おさえられてね、宇宙はだんだん膨張速度が速くなっているというところまでつながってるわけ。

その頃に駆け出しの野本君と一緒にシカゴに行ったとき、その話をセミナーで講演したらチャンドラセカールが聞きに来ていてね。わりとまじめに聞いてくれたな。彼はその頃けっこう歳食っていて、おだてるためにチャンドラセカールリミットって言葉を何べんも使った。

高橋: 喜んでいました?

杉本: いや、そんなことぐらいで喜ばないよ。大御所だから。

高橋: “Presupernova Models and Supernovae”の論文が1980年ですから、20年経って加速膨張につながったんですね。

●連星への応用

杉本: その頃にシュバルツシルトが発見したとかいうのが、星内部のhelium burning shellでは核反応がオーバーシュートして熱的に不安定になるということ。非線型振動みたいになってね。でもこれを数値計算してもなかなかうまくいかん。ところがその問題も今の話の延長みたいなことで考えるとどうなるかと。一つはね、ヘリウムシェルが燃えていてその周りに水素があるでしょ。ヘリ

ウムが燃えるとシェルのヘリウムが少なくなる。少なくなったらシェルはラグランジュ座標では場所が変わるわけや。ヘリウムシェルと中心では何万倍も圧力が違うから、ラグランジュメッシュでやると何桁も変わる。それでこれを10,000ステップとかで計算すると全然進まないわけね。

ところが、そんなことせんでもええじゃん。オイラーメッシュみたいにして、つまりmass fractionの座標で考えて、ヘリウムが燃えているところを1にすると。そうするとmassが変わる。massは変わるけどもシェルのすぐ内側でmass fractionは変わらない。そうするとmass fractionの座標で見たらホモロジー、つまり密度構造は徐々にしか変わらない。だからオイラーでやると流体力学で $(v \cdot \text{grad}) v$ にあたるやつ、オイラーとラグランジュの差の分や、そこにcore massの時間変化がポンとかかるだけだね。そうやっちゃうとこれまで何千ステップだったのが10ステップほどでスパッと計算できるようになっちゃってね。

高橋: 物理量があまり時間変化しないような座標の取り方がいいと。

杉本: その話はその後、何につながるかという、massの変わる問題。バイナリーのmass exchangeね。mass fractionを独立変数にしたらmassの値だけが変わる。そういうformulationにしちゃうとスパッと簡単に計算できるようになった。それじゃ連星系の進化をやろうと。それで連星をやったらさ、中性子星にaccretionしてきてX-ray burstが起こるってのも同じ問題でしょう。

高橋: そうですね、降着も質量の変化で扱える。

杉本: その辺の問題、全部一緒に考える。そうするとね、コアのJapanese supernovaへの進化も、shell burningの核反応の非線型振動も、accretionも全部一つの枠でポーンとやれる。

そこでね、staggered meshをさらに使えないかと思って、ダイナミクスもやったらできるかも知らんと。根尾(定幸)君というのがいてね、ドク

ター論文書くのに困ってたからさ、じゃあいっしょに計算やろうやっていって。

高橋: 駒場の学生ですか？

杉本: 京都の学生なんだけど駒場に居座ってた。その頃、林さんは太陽系やってたね。それでね、同じ手法で加速度項を入れたやつもできるようになって、それ全部合わせたら何ができたかっていうとね、さっきちょっと話した carbon deflagration supernova. ヘリウムの殻燃焼でカーボンコアがだんだん大きくなっていくと、中心に火がついて核反応がオーバーシュートする。縮退してるから、ヘリウムバーニングが起こってカーボンコアが徐々に増えていくところからね、deflagration が起こってバーンと爆発するところまで全部一挙にスーッと計算できちゃった。

高橋: へえ、ダイナミクスもできると。

杉本: こういうことをやれば何でも計算できる。そしたら西洋の連中はね、「おまえの計算はエンベロープの具体的な事に入ってないから、観測と合わせられない」って。でも red giant は林トラックに沿ってるに決まってるから、luminosity さえ決まればいいんだと。そっちはサボってね。だから何でも計算できるようになったんだよな。その後、そういうことはいっさい野本君がやることになって、僕はもう逃げちゃった。

高橋: 超新星の方は野本さんに任せると。

杉本: 何もオレがやらなくてもいいだろうって。

●自己重力系の熱力学

杉本: その頃に同時にわかってきたことはね、一つの星の中で熱伝導に比べて進化の速さが遅い領域と速い領域とあるわけね。熱伝導に比べて進化の速い領域では第ゼロ近似は断熱なわけや。断熱ということは準静的ならエントロピーは一定。ところが星全体としては熱が流れていて熱平衡じゃないし、核反応のエントロピー生成もある。コアが収縮すると星の中心部では単位質量あたりのエントロピー下がるでしょ。一方、外側はエントロ

ピーが増える。じゃあこの辺のことがエントロピー増大の法則とどういう関係にあるかと。それを考えてみた。エントロピー増大の法則はトータルの話でね、一様なシステムだったらそれで終いだよね。ボルツマンの熱的な死ね。ところが非線型相互作用があって重力は底がないでしょ。重力は底がなくて遠距離力だから、どんなに大きくてもミクロなシステムで、自己エネルギーが効くわけ。で、自己エネルギーが効くときには熱力学的な常識が破綻すると。破綻した結果、何が起こるかということ、その中にサブシステムができる。星だったらコアとエンベロープ。その話は宇宙全体的話でも同じでね、宇宙だったら星とガス。

高橋: 一様じゃなくてサブシステムができると。

杉本: それと大事なのは宇宙空間にある放射。これもサブシステム。今の宇宙ではね、放射とガスとは熱平衡じゃないわけ。サブシステムのうちで構造を作ったほうはエントロピーが下がって周りにはエントロピーが増える。トータルとしてはエントロピーが増える。だからエントロピー増大の法則というのはトータルシステムについていえば正しいんだけど、サブシステムが形成されるときにはそういう簡単な話ではいかんと。その頃、非線型で形態形成とかさ、自然に構造ができる話は化学なんかでも流行ってたじゃん。そういうことで構造ができる問題は物理の常識とは違うと。

高橋: 確かに普通の物理では一様なものしか考えないですよな。

杉本: できたサブシステムでは非平衡のプロセスが起こっているから、そこからエントロピーが生成してるわけ。だからそのサブシステムのエントロピーが減るためには生成したエントロピーを捨てんならんわけ。捨てられるスペースがいるわけね。それがそのサブシステムの外のシステム、オープンシステムで、その外のシステムはどうやってできたかといったら、宇宙が膨張したらなんぼでもできるわけや。宇宙膨張はゴミ箱を作っているというわけ。

高橋: なるほど、宇宙膨張でエントロピーを捨てる場所を作ると。

杉本: その極限はガモフ的な高温の宇宙の始め、自己重力が効いて、それから宇宙が膨張しているからゴミ捨て場ができて、そのためにサブシステムができて、その結果、宇宙は放射と、簡単な近似だったらブラックホールがドンとできると。だから大学で習う宇宙の熱的死とかエントロピー増大の話とかね、そういうのはちゃんと考えないといかんと。そういう構造まできちんと考えるといろんなことがあるというのは普通の物理ではあんまりやらないよね。だけどこの話はシュレーディンガーの「生命とは何か」でいう、ネゲントロピーを食って生きているという話と同じ。物理はその後、物性で強相関システムっていうのをやるようになったんだけど、普通は物理では素過程があってシステムは一様でって考えるよね。

高橋: 重力でなくてもそういうことが起こると。

杉本: 重力でなくても自己エネルギーが効く、つまり非線形性があるとそうで、エネルギーがextensiveじゃなくなる。extensiveっていうのは質量に比例するってこと。熱力学の大前提はね、エネルギーがextensiveだということだ。それと違うことに気がついてたのは表面張力だけだ。あれは表面積に比例するでしょ。一様で考えたらやさしいからさ、まずは一様。そこへ構造があってその構造の中で何が起こるか。放射とガスだって非平衡だしね、星の中だって非平衡だしね。温度の高いとこと低いとことあるでしょ。非平衡だと構造ができてくる。そういう問題は天文特有とは言わないけど、天文の典型的な問題だよ。ただ皆さん、あんまりそういう興味のある持ち方しないけどね。

高橋: そうですね、あんまりそういう考え方しないですね。

杉本: その頃リンデンベル(D. Lynden-Bell)がglobular clusterで、gravothermal catastropheとかいう話をしてね。要するに熱力学と重力を混

ぜたやつがgravothermo-dynamics.

高橋: 重力の自己エネルギーが絡むような熱力学ということですか。

杉本: うん。レニングラードのアントノフ(V. A. Antonov)がそういう論文を初めて書いた。ロシア語で書いてあるからあんまり人は知らないんだけど、そこから先には発展してなかった。それは星の進化の話と関係あるから、星の進化のテクニクを使ってもう少しちゃんと調べたらと言って。その頃は海野(和三郎)さんが線形代数でいろいろやるの大好きだったでしょ。そしたら蜂巢(泉)君が線形不安定性理論から有限振幅の非線形振動まで計算して、重力熱力学的振動と名付けた⁴⁾。それでgravothermal catastropheという話がいわば確立したわけ。で、星の進化はそんなふうに理解したらいいと。

そしたらそのことはglobular clusterでも同じだということに気がついてね。コアが縮むとかさ、それをglobular clusterの話にする。そこで最初にやったのはglobular clusterのガスモデルだよ。星をガス粒子だと思ってね、星の内部構造の理論でもってその手の話するわけ⁵⁾。

高橋: 星の内部構造とglobular clusterは同じ扱いができるということですか？

杉本: うん、それで何が起こるかかっていうとね、コアが縮んで周りが広がって、しまいには中心がブラックホールになるとこまでいくだとかいかないだとかね。非線形振動ってあるでしょ、要するに行きと返りで違うパスをとる振動。いくときの原理と戻って来るときの原理が違うときに非線型振動は起こるよね。

高橋: globular clusterの非線型振動というのは、どういうものなんですか？

杉本: まずコアが収縮する。そうするとね、密度が高くなって連星ができる。二体衝突ではもちろんできなくて、三体衝突なんかでできる。連星っていったらバウンドシステムでしょ。バウンドシステムを作るためにエネルギーを周りのフィール

ドスターにやるわけ。そうするとその影響でもって縮んできたコアの外側が広がるわけ。

高橋: ああ、そういう振動ですか。

杉本: うん、それでその話はね、星が縮んで核融合反応が起こって外側が広がるという話とまるで同じだ。

高橋: それは面白いですね。星のコアの話と globular cluster のコアの話がリンクする。

杉本: そういう話をプリンストンの研究会でしたら、みんな半信半疑。その後、僕はある意味じゃそれにのめり込んで論文を書いた。その次にそういう連中が集まったときに、ヘギー (D. C. Hogg) とそれからイスラエルのラカビー (G. Rakavy) とかその辺の人が「お前の言うとおりに計算してもそうならなかった」って言うんだ。でもそんなはずはない。

高橋: コアの非線形振動を再現できなかったと。

杉本: うん、ならなかったっていう。「杉本はいい加減なこと言う」とかいってもめてたんだ。ヘギーっていうのはまじめな人でね、その後かなり仲良くなって駒場に随分と出入りしてた。自分の計算のアウトプットもってきてね、その頃は紙にアウトプットして、こんな分厚いプリントアウト。それを見ろって言って、しょうがないから昼飯もろくに食わずにその表を見た。そういう非線形振動を計算しようと思ったら、行きと返りでパスが違うから、タイムステップも行きと返りで変えて計算せんといかんわけや。ところがそうしてないわけ。それにタイムステップを長くとりすぎて、振動を飛び越してた。

高橋: そういう工夫があるわけですか。

杉本: じゃあその話は何かって言ったら、red giant のときにコアの端っこを細かく刻まないで計算ができないのと同じ話なんで、そこをちゃんとやってみろって言った。そしたら振動が出てくるようになったんだ。それでもみんな、計算で出てきたかどうかだけを問題にして、なんでそういうことが起こるかという理屈を僕がこねてもみ

んな大体わかってくれないんだよね。

高橋: もともと理屈があって、それを数値計算で検証しようということだったんですよね？

杉本: だから僕だけが理屈言ってた。それでしょうがないから多体問題で計算すると、その話が GRAPE に繋がった。そういういきさつですよ。

高橋: ガスモデルではなくてやっぱり多体問題でやらなきゃいけないと。それで GRAPE という話になるんですね。GRAPE についてはまた後ほどじっくり伺います。

杉本: じゃあついでにちょっと話は戻るけどね、X線天文学の X-ray burst は中性子星に降着してということだから新星爆発の話と同じやと、まあそんな話をした。そしたら X線天文学とちょっとは関わるわけ。そうするとね、shell burning の不安定性の話も、新星の話も、それから中性子星のバーストもね、全部一括してパラレルにできるわけだ。要するに相手が違うだけで理屈としてはやさしい。

でも違いもあって、その違いは平面か球かにある。平面のときはね、核反応で熱のインプットがあったら不安定なの。なぜかというね、熱が出たら温度が上がる、平面だと膨れても圧力が下がらないから核反応がますます進む。ところが球だとね、膨張したら圧力が下がっちゃうわけ。エネルギーを入れたら圧力が下がってエネルギーの発生が減る、つまり安定化するわけ。星というのは普通はそういう状態。

高橋: 平面と球で安定性が変わると。

杉本: X-ray burst というのは安定と不安定を繰り返すわけだけど、同じ質量がコアの外に乗ってもそれを平面とみなせるか、球とみなすべきか、その間を歩き来してるんだ。その話は思い出してみたら実は昔、ドクター論文書いてた頃にヘリウムフラッシュの計算してる。平面と球とで性質が全く違う。その間を不安定でもってつなぐ。そういう現象が起こっているんだよね。

高橋: いろいろ話がつながってくるんですね。

杉本: だからそういうふうに見直して、いろいろ書き直したんだよ。書き直したんだけど、皆さんあんまり興味もってくれないんだよ。観測と合わす話と違うから。

高橋: そういうものですかね。

杉本: 典型はね、昔さ、HHSとかいった頃にね、コアが収縮してエンベロープが広がるとなぜ星が明るくなるかという問題があった。horizontal branchを上がっていくでしょ。その屁理屈をぐちゃぐちゃ書いたわけ。それは非線形問題だから完全にはカッコ良くできないわけだけど、なんとか誤魔化して。そしたらなんで明るくなるかという理由ははっきりしたと僕は思ったんだけど、人は誰も理解してくれない。

それからしばらくしてね、パチンスキーがcore massが大きくなると明るくなるよって言って、core mass-luminosity relationっていう経験式を出したんだ。そしたらそれはいっぺんに有名になってね、僕は負けちゃったんだ。そういうところがあるんだよ。だからぼくが理屈作っても役に立たない。経験式を作ったら役に立つ。

高橋: でもやっぱり本当に理解するには、そういう物理的な解釈をしないと理解したことにならないですよ。

杉本: とするのはさ、天文の素人なんだよ。

高橋: そうなんですか、天文と物理の違いなんですかね。

杉本: 天文と物理の違い。だから僕は物理の洗礼は受けてるわけや。天文現象の好きな人はそういう興味の持ち方しないでしょ。ところがね、だんだんその後、観測が進むようになって物理出身の人も天文に入ってきた。僕が東京へ来た頃、物理と天文は別だとまだ言ってたんだけど、そのうちにだんだん仲良くなってきてね。物理学科出身が天文台の委員会の半数を超えるようになった。もう一つの理由は天文学科が増えなかったからや。だから物理と天文の区別はあんまり言わなくなった。それでなんか現象を見て、理屈はどうでもい

いからモデルを作ってっていう、物理の人が天文的になってきたんだよ。僕に言わしたら。

高橋: そうかもしれませんね。

杉本: コンピュータが進歩して何でも計算できるようになったから、余計にそうなんだよね。昔はさ、計算できなかったから理屈でも考えるしかしょうがなかった。

●プリゴジンと非平衡システム

杉本: その頃ブルーボックスにそそのかされて「宇宙の終焉」(1978)という本を書いたんだよ。そこにそういう話を入れた。つまり重力を繰り込むと常識とは話が違うということ。要するにクラウジウスの「宇宙の熱力学的死」、あれは違うんだ。一方、ランダウ・リフシッツの統計物理学の本にはね、「宇宙は熱力学的に死ぬというけれど、ちっとも死んでないではないか」と。「それはなぜかと言うと相対論が効くからだ。相対論が効いたらどうなるか、そんなもんわかったもんじゃない」と書いてあるんだよ。

でも死なずに多様性が発現してくるのは、実は相対論の問題じゃないんだよ。そうじゃなくて相互作用の問題。さっきも言ったけど、重力では到達距離が無敵大でしょ。宇宙の中の十分に大きい部分を取り出したら星ももはやマイクロなシステムなんだ。普通の物理ではね、例えば原子核では中間子の質量のコンプトン波長ぐらいのスケールに原子核があって、その集まりのシステムを考えてるでしょ。考えてるシステムは相互作用の到達距離より大きい。特に熱力学はそういうものを扱っているから、物事がextensiveになる。それでextensiveな量とintensiveな量との組み合わせでもって、熱力学の体系ができています。

高橋: 重力が絡むとそうでなくなると。

杉本: システム全体になるとね、そこが崩れるので話が違う。そういうところが面白い。なんでそんなことに興味をもったかという、元は駒場にいたときに助手だった近藤正明に教えてもらった本

だった。非平衡熱力学とか散逸構造の理論でノーベル賞もらったプリゴジンのね，“Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes”という本を近藤君が見つけて。僕は真面目に勉強しないから本を一生懸命読んだ覚えはないけど、プリゴジンの本だけは一晩で全部読んで、う～んと思っ、て、なんか今まで考えたことがなかったことがあるんだと思ったね。

高橋: プリゴジンで非平衡の熱力学に興味をもったんですね。

杉本: そんなこといったら星だってそうだと。じゃあ星で非平衡の話をしよう。普通は要素があって相互作用があって、マクロなシステムを考えて熱力学は成り立っている。ところがそうでないものを考えると全体のシステムの中でサブシステムが自発的に発生する。で、サブシステムは全体のシステムの中でオープンシステムになる。オープンシステムの話はプリゴジンの本にも書いてある本質で、星というのは宇宙の中にできたオープンシステムであると捉え直して、エントロピーの話をする。星は重力相互作用の到達距離より小さいからマイクロである。そういうことを根本から考え直さなきゃいけない。その上で、じゃあなぜ宇宙は進化するの、星はなぜ進化しなければならないの。そっちのほうがよっぽど面白いじゃんっていつ。

高橋: 宇宙や星がなぜ進化するか、ですか。根源的な問いですね。

杉本: gravothermo-dynamics, そんなヤクザなことばかりやっていた。それこそ駒場の素粒子の連中はね、「そんなのホンマカウソかどうか分からない」とか言って。だから学問の常識の枠はなかなか堅いんだよね。

ほいでそれを宇宙論に応用した。ビッグバン後の熱平衡の状態から、どうして情報量が発生し、現在の宇宙の多様性が発現しえたのかと。そして最後はホーキング (S. Hawking) のブラックホールの蒸発の話まで含めて。そういう話をヨー

ロッパのあっちこっちでしたら、喜んでくれたのは年寄りばかりや。年寄りはわりと喜んでくれたけど若い人は全然喜ばない。若い人は目先に関係するHR図の細かいことばかり言っていて。案外喜んでくれたのは宇宙論のシルク (J. Silk) っていう男だ。そのときは宇宙での話は遊びのつもりだったから論文には書かなかっただけけど、こんなこともあるよとかいうブループリントを作ってみんに配った。後でキッチンとやり直して、1981年にProgressのSupplementで出版したんだけどね⁶⁾。

高橋: 具体的にはどういう内容なんですか？

杉本: 宇宙の始めは放射ばかりの熱平衡。宇宙が膨張すると平衡から非平衡が生成され、星などはブラックホールになり、さらに時間が経つとブラックホールも蒸発して再び放射ばかりの熱平衡になる。でもその熱平衡は最初のものとは違って低温の熱平衡。というのを宇宙膨張によって境界条件が変化し、エントロピーの極値が変わること、そこへ向かってエントロピーを生成しながら進化するという議論で示したの。なんでそうなるかっていうと、宇宙の始めは緩和時間が宇宙膨張の時間スケールよりも短い。だから宇宙の始めは熱平衡。その後は宇宙膨張で密度が下がるから緩和時間が長くなって、熱平衡からこぼれ落ちてくる。つまり宇宙膨張によって変化する境界条件に順応して熱平衡を回復する反応からこぼれ落ちる。そこで状態が固まって、熱平衡から非平衡、つまり情報が生成されて多様性が生まれる。それは林さんの宇宙初期におけるproton/neutron比とか、それからヘリウムが途中までしか合成されなかったとか、みんなそうでしょ。そういうものはみんな緩和時間とシステムのcharacteristic timeとの関係で物事が決まる。そう考えるとヘリウムの問題から星のことまでみんなわかると。

高橋: なるほど、共通の原理で理解できる。

杉本: では今はどうなっているか。今は宇宙膨張が緩和時間に比べれば、ものすごく速いんだ。星

の内部は別として、宇宙全体としての緩和時間はずいぶん長い。だから熱平衡にならないわけ。そうすると非平衡が常識やと。

高橋: そうですね、宇宙膨張自体は遅くなっても、緩和時間との相対的な速さで言ったら、今の宇宙膨張は宇宙初期より速い。

杉本: だから僕は別にお星さん好きなわけじゃないけど、宇宙はそういう変なもの、今までの概念体系になかったものの例を提供する場であると。そういうものを非線形も計算してちゃんと理解しようよ。一般的に言って、そういう非線形非平衡開放系の場合、分化というか segregation が起こる。星だと密度の高いコアと周りの外層とか星間空間、温度の高いとこと低いとこ。segregation と形態形成とはまさにそういうものやと。

社会現象だってほっておいたら金持ちと貧乏ができる。あれだって同じやと。だから物理の人が好きな線形安定性理論だけではなくてね、21世紀の物理はもうちょっとそういうとこに広げないといかんと。そんなアホなことを言ったわけよ。でも誰もあんまり乗ってこないよね(笑)。天文の人も乗ってこないよね。

小久保: 乗ってこないけど計算はやっていますね。

杉本: 具体的な例としては計算やっているけど、どんな風に理解しているのかね。非線形の状態は全部計算機でやっているわけ。でもなんでそうなのといったら、計算機が言うからしょうがない。そうだったんだと。だから世の中は非平衡が常識でね、天文学では放射と物質は平衡でないという常識は存在する。だけどそういう意識の仕方はあまりしない。だから個々の現象もいけども、全体を捉える論理とか発想法があまりないよね。

(第4回に続く)

謝辞

本活動は天文学振興財団からの助成を受けています。

参考文献

- 1) Sugimoto, D., 1970, ApJ, 159, 619
- 2) Sugimoto, D., 1970, ApJ, 161, 1069
- 3) Sugimoto, D., & Nomoto, K., 1980, Space Science Reviews, 25, 155
- 4) Hachisu, I., & Sugimoto, D., 1978, Prog. Theor. Phys., 60, 123
- 5) Sugimoto, D., & Bettwieser, E., 1983, MNRAS, 204, 19
- 6) Sugimoto, D., et al., 1981, Prog. Theor. Phys. Suppl., 70, 154

A Long Interview with Prof. Daiichiro Sugimoto [3]

Keitaro TAKAHASHI

*Faculty of Advanced Science and Technology,
Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami,
Kumamoto 860-8555, Japan*

Abstract: This is the third article of the series of a long interview with Prof. Daiichiro Sugimoto. He proceeded his research on stellar evolution at Nagoya University, NASA and University of Tokyo. He invented a new method to calculate stellar structure without numerical instability and try to understand astrophysical phenomena as non-equilibrium systems.