

# 杉本大一郎氏ロングインタビュー

## 第4回: GRAPEとエントロピー



### 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4回です。杉本氏は星や球状星団の進化について研究してきましたが、細かな枝葉にとらわれず常に本質を捉えようという努力をされてきました。今回のテーマはその延長上にある二つのトピックです。一つは重力多体問題専用計算機のGRAPEで、杉本氏がリーダーとなって開発を進め、これまで天文学のさまざまな研究に利用されてきているものです。もう一つはエントロピーという物理学の基本であるにもかかわらず専門家の間でも誤解の多い概念です。杉本氏はエントロピーを用いて独自性の高い研究をしてきただけでなく、広く社会にその有用性を発信してきました。今回はこの二つに絞ってじっくりとお話を伺います。

### ● GRAPE 事始め

**高橋:** ではまずGRAPEのことを聞きたいと思います。GRAPEは重力多体問題を非常に高速に計算する専用計算機ですが、もともとは球状星団の研究のために作ったということでしたね (第3回参照)。

**杉本:** なんであんなことに手を出したかって、まずは要するに星が何で進化するかっていうと、相互作用を繰り返した比熱が負になるからだ。ランダウ・リフシッツの本に比熱は正になるものだっていうのが書いてあるけどそうじゃないこともあるんだ。ただ、相互作用を繰り返した概念で言うからそうなるだけで、そのこと自身は別におかしなことないんだけど。それで蜂巢 (泉) 君が海野 (和三郎) さんと関わって線形代数でかっこよくやるのが得意だったから、彼がきちんとやったのよ。そんな話をして、そしたら globular cluster でも原理的なことは同じやと。

**高橋:** コアの膨張収縮という非線形振動が起こる

ということでした。

**杉本:** うん。じゃあ globular cluster の学会に行ってその話をしよう。そしたら誰も信用せえへんわけや。その後2, 3年たったら「お前のいうとおり計算してもそうならなかったよ」っていう論文が出てきてね。その当時はガスモデルだよ。どうせガスモデルしか計算でけへん。

**高橋:** 星の集団をガスとして扱うのがガスモデルですね。

**杉本:** そしたら研究会でヘギー (D. C. Heggie) が計算したアウトプットを見せてくれた。あれは非線形振動だからね、問題になるタイムスケールまでタイムステップをずっと細かく縮めていかんといかんわけだけどそれをしてない。それで「これじゃ振動がならされちゃって捕まるはずないよ」って言って。それからヘギーはちゃんとやり直したんだよね。そしたら振動が出たんだ。彼とはその後も一緒に研究したね。でもそのときに「ガスモデルだと振動が出るけども、ディスクリーナ星の集まりだったらそんなもん出るかどうか

わからない」とかいう話になってね。それで「本質は自己重力だからそれは関係ない」と説明したけどわかってもらえないから困ったわけ。それで多体問題で計算するしかないよ。

**高橋:** 多体問題で真正面から。

**杉本:** でも金はない、金があったとしてもマシンタイムがないからそういう大きい計算はできない。それで何とかせにゃならんねとか言ってたら、近田(義広)君が国立天文台で電波天文専用の相關器みたいなのを作ってて、彼が重力の計算も専用のパイプラインでやるといいよって言って、どっかの夏の学校の講演会でしゃべった。そのときの印刷物を送ってくれたんだな。

**小久保:** 近田さんが直接送ってくれたんですか？

**杉本:** うん、近田君が何でか知らんけど僕に知らせてくれた。

**高橋:** 近田さんとはそのときどういう関係でいらっしたんですか？

**杉本:** いや、直接はなんの関係もないけども、その頃は野辺山にちょっとのぞきに行ったりさ、駒場の学生連れて見学に行ったりさ、なんかで知ってたんだよな。その頃はね、まだ自分で実験装置とか設備を作って観測をやるというのは、あんまりやらなかった時代なんだよ。だけど野辺山がそういうことをやりだして、海部(宣男)君なんか随分やった。その頃そんなのは天文学の王道じゃなくてさ。天文学の王道というのは技術者が何か作らせてね、こうして望遠鏡をのぞいているような絵があるでしょ。あれが天文学の王道だよ。というような思想が流行ってた時代にね、やっぱり新しいことを見つけようと思ったら自分で物作ってやらにゃいかんとかいうことでさ。それで僕は応援してたというか、まあみんなが王道でないとか言ってけなすのを、そうでないんだとか言ったこともあって、要するに野辺山の電波天文の連中とも仲良かったのかもね。

**高橋:** その近田さんのパイプラインのアイデアというのはどういうものなんですか？

**杉本:** パイプラインというのはデータをベルトコンベア式に加工するものこと。当時のスーパーコンピュータは線形代数の計算をパイプラインでやってて、近田君は重力の計算もそのようにやれと言った。だけど重力の計算は平方根取らんならんでしょ。

**高橋:** 距離ですか？ 重力に出てくる。

**杉本:** うん、距離を計算するのに。平方根を取るためには、今の人はそういうこと知ってるのかどうか知らんけど、要するに平方根を計算するプログラムを通さんならんわけや。平方根を計算する機械語のプログラムは、こっちからfortranでこれを使いますよって指定するわけだ。だからユーザーにとってはどんな計算やってるか目に見えないんだけども、平方根を近似的に計算するプログラムがそこに入ってるわけね。でもそれでやったら時間かかるからね、その計算をするところをハードウェアで組んでしまえばいいわけね。ここでは何する、そこでは何するっていうパイプラインを。

**高橋:** 重力を計算するパイプラインを作ると。重力の中でも平方根が一番時間がかかるんですか？

**杉本:** まあ平方根を計算するのって一番時間かかるよね。普通、コンピュータはなんでもできるようになってるんだけども、目的を決めたらそれだけできればいいわけよね。それでよく使う関数は表にしちゃえばいい。

**小久保:** パイプラインは平方根とか割り算でできないんです。

**杉本:** そう、だからそういうのは表を作っておけよ。表を見てやれというのはね、その前に京都の林研の頃にね、電子が縮退したときのFermi-Dirac関数ってあるでしょ。それを積分せんならん。その頃の計算機ではいちいち計算するのたいへんだからFermi-Dirac関数の表を作って、その表を見ながらやったらええよ。林(忠四郎)さん、そう言った。つまりinterpolation formula作ってやれよ。それでメモリが増えたら表をそのまま引けば

いい。だから table lookup というコマンドがあったんだよね。

高橋: 平方根の表をあらかじめ作っておくということですか。

杉本: それでそのとき有効桁数が何桁あるかちゅう問題だよ。コンピュータ屋さんが作るの、これは平方根計算しますちゅうたらちゃんと何桁も正確に計算するわけ。多体問題だったら力を計算するわけだけど、積分のタイムステップがちっちゃいからさ、力の桁数もそんなにいらなわけ。だから桁数を小さくすれば表も小さくなる。それに平方根を計算するのにね、別にそんなあらゆる量の平方根がなくてもいいでしょ？ 1 から 100 までとか、頭の何桁分のやつ平方根だけでいいわけ。

高橋: 小さい表で済ませられるわけですね。

杉本: そういうことは牧野（淳一郎）君が言い出して、僕がそうだそうだって言った。それは昔、僕が M1 だか M2 だかの頃にアンチ log の表を作って桁数減らして星の構造の計算したら随分効率が良くなったって言ったでしょ？ 丸善の 7 桁の対数表って、こんな分厚いものを逆引きしてやってたのを桁数減らして 1 枚の紙にしてやったら、計算速度が何倍にもなって、それでもって星の進化は京都が勝ったんだとかいう。それと似たようなもんだよ。

高橋: だいぶ効率が上がったっておっしゃってましたね（第 2 回参照）。コンピュータにもそうさせると。

杉本: そうなったらもうそういうパイプラインを作るしかしょうがないねってなって。それでどうやって作るかっていうときに伊藤（智義）君が乗ってきたんだよ。なんで伊藤君が乗ってきたか知らんけど、彼もちょっと変わったところがあってね。彼は学部ときは基礎科学科で物理化学をやってたんだけど、基礎科はいろんなこと勉強さすからさ、僕の学部の講義をのぞきにきてたんだよ。

小久保: そうなんですか。

杉本: うん、それで彼に「こんなことやるけどどう？」って言ったら、やるって言うからさ。

高橋: 伊藤さんはそのとき、大学院生ですか？

杉本: 学部の終わりの頃。彼は大学院に入るときに化学やめて僕の研究室に入ったんだよ。彼はそれからエレクトロニクスを勉強してさ、基礎科から化学をやる人たちもそういうことを少しはやってたんだ。

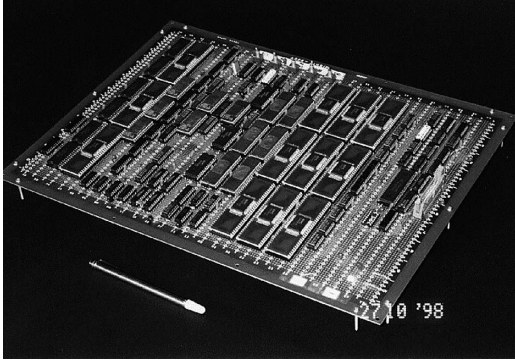
そこへ牧野君みたいな秀才がきてね。牧野君は学部の学生のはじめの頃に地球環境問題のシミュレーションみたいなことやりたいと言ってたんだけど、僕のところに出入りするようになって。彼はコンピュータの天才みたいな男だからね、それで伊藤君と協力して、それから戎崎（俊一）君も乗ってきて。

小久保: 戎崎さんは全体のマネジメントをされてましたよね。

杉本: この頃にね、慶応大学の川合（敏雄）さんが massively parallel computer（超並列計算機）を作るとか言ってはって、それと近田君のアイデアをくっつけて作ろうやということになった。川合さんと僕とは大昔からの友達でね。その頃、将来のコンピュータはこんな風になるという超並列コンピュータの本を書いてたわけ。バケツにいっぱい IC チップを作って、それで massively parallel computer を作ったらどうなるか書いてた。川合さんのところはそういう技術があるから、伊藤君に「行って習ってきてくれや」って言って。伊藤君、そこへ行行ってさ、配線の仕方を習ってきたわけや。くるくるっと線を巻きつけて配線するあれ、小久保君もやったでしょ。

小久保: ワイヤラッピング。

杉本: うん、ワイヤラッピングだ。ボードに手巻き、手巻きって今の人そんなもん知らんよね、LSI のソケットのピンにピストルみたいのもってきたらぐるぐるって線巻きつける。半田付けせんでもくっつけるっていうのがあったんだ。



GRAPE-1 (杉本氏提供).

高橋: そういうのがあったんですか。

杉本: で、伊藤君はパイプラインの詳細設計をして、そのワイヤーラッピングでGRAPE-1を作ったのよ。

高橋: パイプラインのアイデアは近田さんからということでしたが、近田さんはその後、開発にも関わったんですか？

杉本: パイプラインでやれということを行った後は全然関わってない。

高橋: そうなんですか。実際に作ったり動かしたりするときには関わってなかったわけですか。

杉本: うん。だって彼はそんなつまらんことに関わってる暇はないもん。GRAPEを作り始める頃、筑波大学の星野(力)研究室で実際に massively parallel computer を作っていて、筑波大学へ見学に行った。そのときに近田君と一緒に言って行って帰りに近田君に「駒場に移ってやってくれ」って言ったら断られた。もっと大事なことがあるって。彼は電波天文のマルチチャンネルのフーリエ相関器FXを作ってたでしょ。その頃は星間分子の観測が盛んで、チャンネル数をものすごく多くしてね、それで精密観測しようとしてた。

高橋: 野辺山の45 m用のものですね？ 45 m ができてまだそれほど経ってない時期ですね。

杉本: そうそう。それで、近田君はそっちで超有名になっちゃったわけだからね。だから駒場なん

か来なくてよかったんだ。

## ●車輪銀河

高橋: 最初のGRAPE-1は1989年に完成ということですが、GRAPE-1でも天文の研究で使えるレベルの性能になったんですか？

杉本: その頃はね、銀河が衝突して融合するっていうのをみんなやらにゃいかんなどは言ってたけども、計算がたいへんだからできなくて、GRAPE-1でそういうモデルの計算をしたわけ。銀河を置いてね、一つの銀河を4,000個の質点で表して、二つの銀河がぐじゃぐじゃっと衝突して融合する。それを大学院生の船渡(陽子)さんが計算してね、それで「これは面白いじゃない」とか言ったらNHKが乗ってきて、正月番組でそれ出したら小田(稔)さんがえらい喜んだんだよ。

高橋: 銀河の衝突のシミュレーションは僕も中学生か高校生くらいのとき見ましたけど、かなりインパクトがありましたよね。

杉本: 本当？

高橋: 車輪銀河みたいなのができるというものですよね。

杉本: 車輪銀河ができますよとかいうのは初期のGRAPEでもできたからね。

高橋: あれは相当なインパクトでした。

杉本: まあインパクトかどうか知らんけど、あれの面白いのはね、角運動量の大きいものとちっちゃいものに分かれる。

高橋: 中心部分と輪っかの部分ですね。

杉本: つまりね、自然界っていうのは物事が一様化するのが普通なりゆきでしょ？ だから回転の角速度 $\omega$ は一様分布になる。熱平衡で温度分布が一様になるのと同じでね。そういうもんやとみんな思ったわけよね。ところが銀河衝突では角運動量のおっきいものとちっちゃいものでパーっと分けれると。要するに自然に構造ができる。それはなんでやと。

高橋: 確かに不思議ですね。

杉本: その話は宇宙が星と星間空間に分かれるとかさ、星が非常に密度の高いコアと薄いエンベロープに分かれるとかさ。一様から遠ざかる方向に物事が変わっていくという現象の一環なわけや。

高橋: なるほど、一様から遠ざかるという意味では同じですね。

杉本: 重力を繰り込むと見かけ上の比熱が負になるちゅうのは僕がそのとき凝っていた gravo-thermal catastrophe ね。それから物性だったら相互作用を繰り込んだら質量がマイナスになって、押すところに戻ってくるとかいうのがあるよね。negative mass ね。それと同じ発想法で、gravo-thermal catastrophe と同じような理論形式を作って蜂巢君が論文を書いたんだ。ω<sub>j</sub> (jは単位質量あたりの角運動量) が Tds (sは単位質量あたりのエントロピー) に対応する理論形式になって、それで重力を繰り込むと見かけ上の慣性能率が負になると。

高橋: 負の慣性能率ですか。えーと、トルクを受けたのに角運動量が減るとかそういうことでしょうか。

杉本: うん、それを gravo-gyro catastrophe と名付けた。だけどその問題を数値計算で具体的に示すのはね、回転していると球対称じゃないからさ、少なくとも2次元とか3次元の計算せんらんでしょ。その頃の計算機の能力じゃ足りなくてシリンドラーとディスクの場合しか示さなかったんだけど、それでも gravo-gyro catastrophe という言葉はある程度は普及したんだ。そういうことも物事の発展の法則として考えましょうやというのは、思想として gravo-thermal からつながってる。

高橋: gravo-thermal から gravo-gyro ですか。そういう理解の仕方ができるというのはとても面白いですね。それは GRAPE より前の話ですね？

杉本: GRAPE より10年ほど前だよ。

高橋: 形式としては熱力学みたいにして角運動量の分布を扱うと。

杉本: 熱力学だよ。そんな現象っていくらでもあってね、惑星系ができるときは単位質量あたりの角運動量のちっちゃいものが太陽になる。

高橋: 確かにそうですね。

杉本: それで単位質量あたりの角運動量の大きいやつが外へ行ったら惑星系になると。要するに、内部のほうは角運動量を失うのに角速度が大きくなって一様回転から増々ずれていくわけやけど、これは gravo-thermal で中心部から熱が流れ出ていくのに温度が上がって温度勾配が増々大きくなるというのと同様なわけ。だから中心星と惑星っていうのはそうやってできるんだとかね。

普通、自然現象っていうのはみんなだいたい平衡+摂動という概念で捉えられてるからね、安定な状態からちょっとずれたら一様な方に戻りますと。それが自然界に対する普通の見方でしょ。でもそうでないもんもいっぱいあると。要するに相互作用を繰り入れて、繰り入れられた相互作用のエネルギーが無視できなくなったときに起こる現象だよな。物質の存在形態だって、生命と生命でないものに分かれてんじゃない(笑)。それに世の中に金持ちと貧乏ができるとかね。そんなもんも全部同じやと。だからそういうことを社会現象も全部含めて総合的に考えましょうちゅうて(笑)。その辺はまあ哲学だか思想だかなんだか知らんけど、とにかく物理のそれまでの常識とはだいぶ違うわけよ。そういうことで世の中のいろんなこと、1回ちゃんと見直せと。

## ● GRAPEの進化

高橋: GRAPEの方に話を戻しますが、GRAPEは最初のものからどんどん進化していききましたよね。

杉本: うん、どんどん大きくしようというときにね、駒場は理論の研究室だから誰か来てくれないかとか言ってたら、奥村(幸子)さんが行ってもいいとか言ってくれた。あの人も結構やり手だね、LSIで並列化したのが奥村さんだよな。

小久保: GRAPE-3ですね。

杉本: 奥村さんが作ったのは1本のパイプラインを1個のLSIに入れて、それを24個並べたボードを2枚つないだ。それで銀河団みたいなもんが計算できて、なんかみんな喜んだんだよ。計算量は星の数を何個にするかによって違うけどね。そんじゃあもっと大きくしようって言ってね。

それで僕としてはまずは人に来てもらわんことにはどうしようもないでしょ。僕の所属は基礎科学科第二で、大学院は広域科学専攻だった。基礎科学科第二は天文学とは違いますよ。広域科学も普通のサイエンスとは違って、インテグレートしてやりましょうよ。それならついでにポストも寄こせよとか言ってごまかして。で、なんかポストいっぱいもらってきたよね。

小久保: すごかったですよ。

杉本: それで駒場はやっぱりハードに弱いからね、泰地(真弘人)君に来てもらったんだ。泰地君っていう人は、目に光が当たったときのタンパク質の反応の物性をピコ秒分光でやってた人なんだけど、趣味でイジングマシンを作ってた。そういうことで彼はよくできる人で、彼に来てもらって、牧野君はなんでもやれる人だからハードもソフトもやって。まあその辺がハードやったんだよね。しまいに井田(茂)君とか、それから上野(宗孝)君が入ってきてGRAPEを使ったわけ。

小久保: そうですね、井田さんが杉本さんのところに行ったときに僕は学生でした。

杉本: それで小久保君も乗ってきて、天文台で宣伝して天文台に入れたんだよ。今でも使ってるでしょ?

小久保: 当時の写真がブルーバック스에載っていて、『手作りスーパーコンピューターへの挑戦』<sup>1)</sup>という。

杉本: それでコンピュータを大きくするにはもっとお金がいるとか言ってね。そのためには宣伝せんといかんとなってそのブルーバックスの本を書いた。で、その由来とかも全部書いてあんの。な



1992年東大杉本研究室メンバー(杉本氏提供)。

後列左から、福重俊幸、Patrick Frish、井田茂、泰地真弘人、大野洋介、上野宗孝、矢治健太郎、船渡陽子、小久保英一郎、牧野淳一郎。前列左から戎崎俊一、杉本大一郎、蜂巣泉。

んでGRAPEという名前をつけたか、超並列だからブドウの実がいっぱいついてる(笑)。かたや、appleという会社があったからね、ものは全然違うけどappleというのが流行ったから、じゃあGRAPEにせいとか言って(笑)。

高橋: WikipediaにはGRAvity PipEって書いてありますけど。

杉本: GRAvity PipEだかなんだか、どっちにしたって綴りはゴリ押しに当てはめてるわけだから。それでブルーバックスを書いてお金を取ろうと思ったらブルーバックスの印刷ができる前に科研費の特別推進研究もらっちゃったからさ。

高橋: それは結構大きなお金で?

杉本: 1億6千万円くらいだったかな。

高橋: そんなですか。

杉本: 申請したとき「杉本なんかそんなことできるはずがない」とかいう話だったんだけど、奥村さんが作ったLSIを並列にしたボードを持って学振の審査会に行った。「こんなものができました」って。

小久保: 審査会にもっていったんですか、実物を?

杉本: ちっちゃなボード1枚だから。そしたらちょっとぐらい信用してもらえたと見えるね。田中

(靖郎) さんとかが「まあできんこともないだろうね」とか言ってくれたね(笑)。それでなんでか知らんけど、アテにならんようなところに特別推進研究のお金を出したんだよ。お金が出たから本格的に作った。

高橋: それで大型化していったんですね。

杉本: それでアホな話だけども、それまで僕もいろいろ忙しかって、昼飯食いに行くのも時間の無駄だと思って、毎日弁当もってきて食いながら何かやってた。その頃にね、学術会議で新潟大学行ったとき新潟の豪農の家を見学に行った。そのときの話で、豪農になったのはなぜかっていったら、「その辺の農民をみんな集めて飯を食わして、みんなで会議をしてやったからあんなふうになったんだ」と。それを見て帰ってね、やっぱり昼飯はみんなと一緒に食いに行かんといかんと思って(笑)。それで結婚してから延々と毎日ずっともってきてた弁当をやめたんだ。毎日昼になったらみんな昼飯食いに行ってたよ(笑)。

小久保: そうなんです。あるときから杉本さんが一緒に。

杉本: あのとときから一緒に行くことになった。それで情報交換してたんだか雑談してたんだか知らんけど、それで皆さんやってくれたわけ。

高橋: GRAPEは重力多体問題だけじゃなくてほかにも応用されてますよね。

杉本: うん、力の関数の表さえ変えればね、molecular dynamics (分子動力学) でも同じやと。泰地君がやってたタンパク質の話なんてのも時々出てたわけや。そして式を見てたらね、ああ同じじゃんって。要するに多体問題の運動方程式を解くわけだからさ。タンパク質がグジャグジャやって丸まっていってプロセスとかね。そういう意味ではある程度の汎用性はあるわけよ。汎用性はあるけど、そのカテゴリーは決まってるわけだよ。それでmolecular dynamics machineもやれとかいうことになって、泰地君がやった。

高橋: それがMD-GRAPEですか。

杉本: うん。それからその後、僕が定年の年度にね、1996年かな、GRAPEはテラフロップスになったんだよ。その頃、テラフロップスマシンというのはなかったんだよね。だけど「テラフロップスって言ったって、特別なことしかできんからダメじゃん」とか言われた。だから「特定要素のコンピュータを作って科学をやるという方法も、それはそれで一つの方法や」というのを宣伝しようとしたわけだよ。だけどやっぱり世の中はみんな仲良く使う汎用のマシンのほうがええに決まっているから「京」ができたんだよ。

高橋: でもGRAPEはちゃんと評価されて賞をたくさんもらってますよね。ゴードン・ベル賞とか。

杉本: ゴードン・ベル賞っていうのは要するに速さと速さ当たりの電力消費量ね。GRAPEは電力消費量が10分の1くらいで済むんだ。普通のコンピュータってなんでもできるようにするために90%くらいはアイドルしてるからね。

高橋: 無駄が多いわけですね。

杉本: うん。それをしないから電力だって10分の1でできるわけ。だから電力当たりのパフォーマンスとか速さとかでゴードン・ベル賞、何べんももらったんじゃない?

高橋: そうみたいです。

杉本: 別に僕はもうてないよ。だってハードウェア直接やんないしさ。主に牧野とか泰地とかね、だと思ふよ。

結局、僕は別に計算機をやりたくてやり始めたんでなくて、globular clusterの連中にわかってもらうために計算するしかしょうがないからやった。それを後から若い人がわあっと広げたんだよ。そのテラフロップスマシンで牧野君がglobular clusterを計算して、粒子系でも非線形振動がホンマやっていうことになった。僕は初めから自己重力系ということが本質で、粒子かガスかは副次的だと言っていたんだけどね。

高橋: 当初の目的が果たされたんですね。

杉本: うん。それはもう僕が定年になるちょっと

前ぐらいの話だね。その後は若い仲間がさらに広げて活躍してるよね。最近、GRAPEは電気通信情報学会の100個のマイルストーンの一つに選ばれたんだ。

## ●エントロピー

**高橋:** では次にエントロピーのお話を伺いたいと思います。前回のお話にもありましたが、杉本先生はエントロピーの概念を積極的に使って星や宇宙の進化の本質を捉えようと言われてきましたよね。それに『エントロピー入門』<sup>2)</sup>や『いまさらエントロピー?』<sup>3)</sup>などエントロピーに関する一般書も書かれています。そのあたりについてお話いただけますでしょうか。

**杉本:** エントロピーの話はGRAPEのもっと前なんだけど、事の始まりは対流の話でね。星の中で対流が起こってコアからエンベロープにオーバーシュートするとかせんとか、林さんとその議論をいっぱいしたんだよ。ほんでね、対流は流体力学の方では乱流のセルとかそんなものを全部計算するとかいうのをやってはるわけね。でもそんなこととしてたら全然進まないわけや。全然進まないけども天文では対流の話って要るわけ。原始星とか林トラックとかそういうこととも関係するし、それから太陽の表面とかも関係するし。じゃあ天文ではどうやってたか。

まずね、下から熱を入れて上から熱を逃がすから対流が起こるわけ。それでレイノルズ数が大きかったら流れがめちゃくちゃになって小さいスケールの乱流がいっぱい起こる。でね、天文の問題がいわゆる物理の問題とどこが違うかっていったらね、mean fieldが一様でないわけや。つまり星の内部では密度が高いところから密度の低いところに対流が起こるでしょ。だからさらに難しいわけ。で、どうやってたかってちゅったらね、mixing length theory<sup>4)</sup>ってあって、ある熱いところに対流の塊ができたとする。それがあがる程度浮き上がっていくと周囲とぐちゃぐちゃと混ざると。で、浮

き上がっていく間はまあいわば断熱的にいきますよと。

**高橋:** そのスケールがmixing lengthですか。

**杉本:** うん、そうそう。そのスケールを圧力のscale heightの何倍とかかってパラメータにしてね、それでやってたわけ。そしたら、そこで温度勾配がどれだけsuper-adiabaticになるかということから、どんだけエネルギーの輸送があるか計算できるわけ。mixing lengthがちっちゃかったら、ちょっと行って混ざり、ちょっと行って混ざりだから、あまり輸送しないわけね。だからそういうパラメータに置き換えてた。

で、そういう熱の輸送を議論するとき、天文の人は温度と密度を使う。それでもものごとがどう変わるかちゅうのは、 $dQ=dU+pdV$ <sup>5)</sup>だけど、これは完全微分じゃないでしょ？ 完全微分でないもので議論したら、どういうパスを通るかによって答えが違う。だからエントロピー使ったほうがいいと。エントロピーって状態量だからちゃんと議論ができる。だから星の対流の話をするときに、星の中でエントロピーが流れるという話にした方がすっきりするねっていう風に考えたわけ。

**高橋:** 熱よりもエントロピーのほうが議論しやすいわけですね。

**杉本:** でね、学部の時だったかなあ。エントロピーの話をもっと読んでたときに、要するに $dQ$ を完全微分にするために $T$ で割ると。偏微分方程式論のintegration factor<sup>6)</sup>ってあるでしょ？ 完全微分でないときに偏微分方程式を解くためにはまずintegration factorを見つけなさいと。その話と全く同じやということが書いてあったんだよね。僕はそういう理解してたから、エントロピーってのはわりと使い道があると思ってたわけ。

例えば太陽の光をね、完全な凹面鏡を作ったら焦点に集めることができるでしょ。それで一点にエネルギーつぎ込んだら1億度でもできると思うじゃん。でもできないのはなぜ？

**小久保:** その問題は僕は講義でやられたんですよ



(笑).

高橋: うーん, 熱力学的には6,000度のものから1億度のものではできないはずですよ.

杉本: 熱力学でいうたらね, 黙って座ればピタリと当たるで, できるはずないっていっぺんに言える. じゃあ熱力学を使わずに普通の物理学でそれを言えるか. できるはずでしょ? できなかったら困るよね. 真面目に考えたらね, 太陽は点光源じゃない. だから有限の角度広がって, 太陽光線のエントロピーはやや増えている. その広がりをちゃんと考慮したら凹面鏡で集めても有限の大きさの像しかできないわけ. 有限の大きさのところに集めたら無限に高い温度作れないでしょ. そのオーダーまで計算したらちゃんとできるわけ.

高橋: へえ, なるほど. そこまで考えたことはありませんでした.

杉本: そのときに思うのは, じゃあ太陽からくるビームを完全に平行だと思ったらいいじゃん. 平行光線のエントロピーってゼロだよ. 完全な平行光線で有限なエネルギーが来るためにはね, 点光源でないといかん. でも点光源でここへ有限のエネルギーが来るためにはね, シュテファン・ボルツマンの法則で光源の温度は無有限大でないといけない. 表面積がゼロだから. 温度無限大ってエントロピーゼロだよ. だからそういうことでエントロピーの話は上手いことできてるんだよ.

高橋: 幾何学的な要素もあるんですね.

杉本: 熱力学はそういうことをぐちゃぐちゃ言わなくても黙って座ればピタリと当たる学問だからね, 全部ちゃんと上手いこと入ってるんだよ. だからエントロピーは役に立つ. だからもうちょっと世の中にエントロピーの話をせにゃいかんねとかいって, それで『エントロピー入門』を書いたんだよ.

高橋: ご自身の研究に使うだけじゃなくて一般の方にも知ってもらおうと.

杉本: それでなんか知らんけどその本ものすごい

売れたのよ. 僕の書いた本で売れたのはそれだけ.

## ●エントロピー騒動

杉本: 社会的な話との関係ではね, ジョージエスク・レーゲンって経済学者, 知ってる?

小久保: ちょっとわかんないですね.

杉本: それがね, まず古典経済学ってのは, 20世紀の初めごろにニュートン力学を見本にして formulate された. 人間は経済の損得だけで行動すると理想的な仮定をしてね, それでニュートン力学みたいに全部びっしりした体系で formulate しましょう. 例えばね, 何かを生産するときにくいつ作るのがいいのかと. たくさん作るとはじめはスケールメリットで1個あたりの製造費が下がって儲かるけども, あんまりたくさん作りすぎると売れなくなって損をする. そうするとね, 価値を計算するとき微分値を計算しなさいと. だけど普通の経済学者はそんなことわからへんわけよ. だから限界効用理論とか言った. 今はずいぶん変わったよね. 経済学部で数学の講義してたりしてっからね.

高橋: 経済ではたくさん数学をやっているイメージがあります.

杉本: で, ジョージエスク・レーゲンはそういう議論を社会的な事柄についてまで広げると. そのときに彼はエントロピーという言葉に目をつけたわけ. 要するに社会・経済活動によってエントロピーが増大すると. ほんで, 地球の未来のためにあんまりエントロピー増大させちゃだめだよ. なんかそういうことを経済学に持ち込んだ.

高橋: エントロピーを増やさないような社会を作ろうということですか.

杉本: でもほかの人はね, エントロピーってのわからんわけ. それは別に経済学者だけでなく, 自然科学者にもわからん人がいっぱいいる. 理由は簡単でね, 2次元の論理だから. 独立変数がある一つの現象では  $x$  が大きかったら  $y$  も大きくなるのか, ちっちゃくなるとかね. 1対1対応でわかる

でしょ。だけど独立変数が二つ以上になったときの論理学ってのはなかなかわかんないわけだよ。一つを止めといて1次元の論理にして、その線の上で議論するんだったら誰でもわかるけど、でもそしたら途中で別の線に移ったらどうなのと。そこまでの論理が使える人ってあんまりいないよね。2次元の論理になったら経路によって違う。だからエンジンってものが可能になるわけでしょ？ 逆回りしたら冷凍サイクルだ。そういうことはあんまりわかんないわけ。ほんでなんかみんなええ加減なことばかり言ってたわけ。

でね、僕の話にすると、前に言ったプリゴジンの“Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes”を読んで、それがものすごい面白かったわけ。何が面白かったかつたらね、大学で普通習うのは熱平衡状態のエントロピーなわけ。化学で教えているのは、平衡状態をずっとたどって行ってこの状態のエントロピーを計算しなさいとかいう、そんなことやっているの。物理じゃさ、難しいことばっかしってそういう実際問題のところに使うようなことはやらないでしょ。それで、いつでも化学と物理とでエントロピーをどう教えるかで喧嘩してるよね。

**小久保:** そうですね。

**杉本:** で、プリゴジンの本にはね、非平衡状態のところではエントロピー生成が起こると、irreversible processが起こってるということは非平衡でしょ？ そこで僕自身としてはエントロピーという概念がばっと急に広がったわけ。これ使いもんになるというんでね。

**高橋:** 大学では確かにほとんど熱平衡状態しか習わないですね。現実では非平衡がたくさんあるのに。

**杉本:** だから化学も物理もどっちもピンぼけなんだよ。そしたらね、ジョージエスク・レーゲンの尻馬に乗った人というと怒られるかもしらんけどさ、そのエントロピーの話を使ってね、公害にならないようにするため、地球を保護するためにエン

トロピー生成はいけませんと。地球のエントロピーがどうなってるかとか、光合成のときのエントロピーはどうなってるかとか、そんなことをいっぱい書いた人があるわけ。でもその人が言うことはメチャクチャなんだ。どのくらいメチャクチャだったか言うたらね、光合成では水が蒸発するからエントロピーが減少するとかね。一方、放射能はエントロピーが高いとかいうわけ。

**高橋:** 放射能のエントロピーですか？ どういうものなんですか？

**杉本:** 放射のエントロピーと同じだよ。黒体放射のエネルギーあたりのエントロピーは温度の逆数でしょ。別の言い方をするなら、同じエネルギーがより少ない数の光子に集中していると、エントロピーが低いわけ。放射線のエントロピーも同じで、だからものすごくエントロピーが低い。エントロピーが低いからそれはいろんなこと起こせるわけよ。

**高橋:** そういうことなんですね。

**杉本:** それで連中が原子力はいかんとかいう話をするんだけど、そのときに「放射性物質はエントロピーが高いから」とかめちゃくちゃ言うわけよ。普通の人にはわからへんからね。

もう一つ彼らに欠けていたのは要するにオープンシステムという考え方。オープンシステムではエントロピーが外に出ていたり入ってきたりするわけよ。エントロピーフラックスてのがあるわけ。例えば光合成なんてのは水を取り入れたりするからオープンシステムでしょ？ ところがさ、そういうシステムは物理屋さんとか化学屋さんとかでもあんま考えないんだよね。箱の中に入ったシステムしか考えない。

ほんでやっぱりこんなの直さにゃねと思ってね、ホントのこと書いたんだ。『科学』とかに書いたんだけどね、それをまとめたのが『エントロピー入門』なんだよ。

**小久保:** 持ってますよ、読みました。

**杉本:** それから何年か経ってからパリティに連

載したのが『いまさらエントロピー?』や、あれは大槻義彦っていう僕と同じ学年で東京教育大を出たやつだけど、昔から友達でね、連載で書けて、それで『エントロピー入門』ではこんな話も書いた。その頃、台所に瞬間湯沸かし器があったでしょ。湯沸かし器の水はね、上から水を入れて下からお湯を出すよ。

**小久保:** ポットですか?

**杉本:** ポットじゃなくて給湯器のようなもの。ガスの炎が下で燃えているでしょ、上に行ったら燃えかすの温度がだんだん低くなるじゃない。エントロピー生成は温度差によるからね、冷たい水るときはね、冷たくなった空気のところに接するようにする。だんだんお湯になったら下のどこであっためる。それは湯を沸かすときのエントロピー生成を低くする方法だとか書いたわけ(笑)。そしたら有馬(朗人)さんがえらい喜んだ。そういうアホな話なんだけど、そういう当たり前ことがね、エントロピーに関してはみんなわかってないの。理由は二つあって、一つはさっき言ったように2次元の論理だということ。もう一つはまあ教育も悪いんだけど、エントロピーメーターというものがないから。それで何当たりで言ってるかということをはっきりさせないから。

**高橋:** 粒子1個あたりとか、質量あたりとか、そういうことですか。

**杉本:** うん、それでそういうこと書いたらその人怒っちゃってね。「杉本はけしからん」と言うわけ。「杉本というやつはええ加減なことばかり言う」って駒場に来てピラまいて。

**高橋・小久保:** ええっ! そうなんですか。

**杉本:** 杉本をやっつけに来たわけや。

**小久保:** ご本人がですか?

**杉本:** うん。で、またその取り巻きもいるわな。

**小久保:** ははあ。

**杉本:** そんな調子で僕をやっつけようと思って、一生懸命に潰そうとしはったわけ。そしたらほっ

とけばよかったのかも知らんけどね、僕もそんなことでええ加減にするわけにもいかんからね、いくつか書いたわけ。岩波の『科学』とか、『朝日ジャーナル』とか。

**小久保:** 『科学朝日』?

**杉本:** 『朝日ジャーナル』っていう一般的な週刊誌だよ。『週刊朝日』のもうちょっとインテリ向きのやつ。インテリ向きだからつぶれちゃったけどね。

**高橋:** それに原稿を書いたんですか?

**杉本:** 書いたり、向こうが取材に来たりね。そんなとこまでいったわけ。

**高橋:** 間違いを広めないように努力されたんですね。じゃあエントロピーをそういう社会問題に応用するのはいいけど、誤解されて応用されてたっていうことなんですか。

**杉本:** 誤解というか、ええ加減なこと言ってたわけや。当時流行ったポストモダンの人たちが、科学用語を散りばめていい加減なことを言っているのに似てた。だけどその人たちはそれで正しいと思っているんだもん。ポストモダン批判も相当やったよ。したらね、「そんなことで喧嘩してるより星の計算でもやったほうが学問のためになるよ」とか言って、小尾(信彌)さんとか牧野君だとか僕の周りの人がサジェストしてくれてね。それはGRAPEのときでもそうだよ。「そんなアホなことに手を出さんでも、もうちょっとお前の学問やったほうが世の中のためになる」って、だいたい言われたもんな。

**小久保:** わからないですよ、実際どっちが世の中のためになったかというのは、意外とこっちだったかもしれない、広い意味では。

**高橋:** そういう間違った議論が世間的には広まりつつあったということですか?

**杉本:** 普通の人は科学用語を散りばめてあるとホントかウソかは判定できないけど信じるわけや。だから向こうは余計に勢いづいて杉本をやっつけようよ。やめといたほうがいいよって言われたけ

ど、今さら引き下がるわけにはいかんからって言って、世の中ややこしかったわけ。それがエントロピー騒動。それで途中で馬鹿馬鹿しくなって僕はやめちゃった。向こうももうやめちゃったのかと思ってたら、まだ今でも言ってるんだ(笑)。  
**高橋:** どちらが正しいかというのは、専門家が見たらわかるんですよね?

**杉本:** 専門家が見たらわかるって言うけどね、その専門家ってどのくらいの人が専門家かって、さっき言ったように物理でも化学でもまともにやってない。

**高橋:** ちょっと耳が痛いですね(笑)。

**杉本:** まず何をやってないかと言ったらね、非平衡というものをちゃんとやってない。普通の非平衡の話は平衡から無限小離れたときの非平衡ね。無限小離れたやつだったら、線形代数的な発想ができるわけでしょ。オンサーガーの相反定理とかそんなのがいろいろあるじゃない。それ以上のことは物理では習わんわけ。線形の範囲内で物事を言っていればカッコよく formulate できるけど、ホントに有限の非線型になっちゃったら数値計算で議論するしかなくなるでしょ。そしたら数値計算というのは理論のできない頭の悪い奴がするもんだと、昔の素粒子の連中がみんな言ってたわけ。だから僕なんかは頭の悪い典型。

**小久保:** やっぱり、またなんか本を書いたほうがいいんじゃないですか?

**杉本:** もう1回、本に?

**小久保:** 2次元の変数の論理学とか。

**杉本:** それはね、ほんまに感じるよ。でももうそんな体力ないから

**小久保:** でも是非書いてください!  
 (第5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) 杉本大一郎, 1993, 手作りスーパーコンピュータへの挑戦(講談社)
- 2) 杉本大一郎, 1985, エントロピー入門—地球・情報・社会への応用(中央公論社)
- 3) 杉本大一郎, 1990, いまさらエントロピー?(丸善), 復刻版2017

## A Long Interview with Prof. Daiichiro Sugimoto [4]

**Keitaro TAKAHASHI**

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

**Abstract:** This is the fourth article of the series of a long interview with Prof. Daiichiro Sugimoto. He has been studying the evolution of stars and globular clusters, making efforts to capture the physical essence. In this article, we focus on two topics related to his research. One is GRAPE, a computer dedicated to gravitational multi-body problem. He has been a leader for the development and it has been used for various astronomical studies so far. The other is entropy, which he utilized for astronomical research and also communicated its usefulness to social issues.