

# 古在由秀氏ロングインタビュー

## 第3回：渡米と古在機構



高橋 慶太郎

〈熊本大学大学院自然科学研究科 〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1〉

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

協力：小久保英一郎（国立天文台）、高橋美和

古在氏は戦後まもなく東大天文教室に入り、アルバイトをして家計を支えながら勉学に励みました。卒業研究では高校時代から憧れていた萩原雄祐先生からテーマをもらって天体力学の研究に着手します。卒業後1年半大学院で研究を続け東京天文台の助手に就任しましたが、配属先は観測の研究室で、掩蔽観測をする合間に天体力学の研究を続けました。シリーズ第3回目の今回はアメリカでの研究生生活と、その最後の時期に発表した古在機構についてです。古在機構とは、天体の軌道傾斜角と離心率が別の摂動天体の影響によって周期的に変化する現象で、現在では太陽系の惑星・衛星のみならず系外惑星やブラックホール連星など幅広い応用がなされています。インタビューでは古在機構について詳しく聞いていますが、あまりなじみのない方は末尾にある解説文を先に読むとより楽しむことができるでしょう。

### ● 渡米

高橋：1958年に渡米されたんですね。その経緯から伺ってもよろしいですか？

古在：そのちょっと前からいくと、スプートニク1号を旧ソ連が打ち上げたのが1957年の10月で、僕らはそういうのに関係するとは思ってなかったんだよね。ところが打ち上がってみると、その頃の台長の宮地(政司)さんって方が人工衛星追跡の責任者になったんだね。それで僕らの天体搜索部ってのがやっぱりやらないといけないようになったらしくて。

高橋：人工衛星を観測するってことですか？

古在：観測するたってね、人工衛星がどう見えるのかなんて全くわかんないしさ、ともかくやってみて。あと1957年の7月から国際地球観測年\*1っていうのがあって、その間にアメリカも人工衛星を打ち上げるという話があった。それで

アメリカのスミソニアン天文台ってところで、ムーンウォッチっていうプロジェクトが組織されて宮地さんなんかの関係していた。結局人工衛星っていうのは見たこともないし予報もかなりずれるんじゃないかということで、進行方向にかなり広い視野をもったペーカー・ナンカメラってのを作って、世界12カ所に配った。それで東京天文台にも一つきたんだ。

それでその責任者がホイップル (Fred Lawrence Whipple) さんって人で、その人がいろいろスタッフを集めたらしいんだけど、人工衛星の追跡なんかは、計算機の達人をそろえればできると思ってたらしい。でもどうもそれじゃあ足りないということで、天体力学をやる人を捜してたん

\*1 1957年7月1日から1958年12月31日まで続いた国際的な科学共同研究プロジェクトで、重力、宇宙線、電離圏、太陽活動などを含む地球物理学の共同観測が行われた。

だね。それでホイップルさんの頭にあったのは、天体力学といえば萩原(雄祐)先生の名前で、あそこ行けば誰かいるだろうと。それで畑中(武夫)さんが僕を推薦したとかいう話で、僕会ったんだ。僕が外国人と英語をしゃべったのはそのときが2回目だったからあんまりよくわからなかったんだけど、ともかく来いっていうんで、それで行ったんですよ。実際に行ったのは1958年の10月の末ですね。

高橋：それは向こうに勤めるということですか？

古在：向こうで雇われて行ったんですね。東京天文台は休職みたいになって。要するに丸抱え。あの頃は丸抱えじゃなきゃ行かれなかったんですよ。

高橋：なかなか外貨も手に入らなかったそうですね。

古在：外貨なんていうのは手に入るって言ったって、僕らの月給がその頃やっど2万円。2万円ってというのは60ドルだよ。それでね、今でも覚えてるけど、羽田-ニューヨークの片道運賃が600ドルだった。20万円、20万円ね(笑)。片道ですよ。

高橋：じゃあ年収分くらいですね。

古在：うん年収分くらい。だからね、もちろんうんとお金持ちの人は行けたかもしれないけど、普通は自分では行けるとこじゃなかったんですよ。

高橋：そのときはご家族で行ったんですか？

古在：僕は先に行って向こうでお金溜めて、飛行機代出した。帰りはね、なんか向こうでいろんな仕事やったんで全部金出してくれたの、向こうが(笑)。

高橋：向こうの給料っていうのはやっぱりいいんですか？

古在：向こうはだいたいこっちの10倍くらいじゃない？ だから、しょっちゅう言うんだけど、僕はアメリカで初めて自分の家に電話が入ったし、テレビが入ったし、それから水道ひねれば熱いお湯が出たし、それから車まで買ったし。

今、きっと若い人たちがアメリカに行っても、そんな生活水準は変わらないと思うんだけど、僕らの頃は生活水準、変わったんですよ。

高橋：アメリカの生活って結構たいへんじゃなかったですか？ 慣れない土地で。

古在：いやいや、なんかね、僕には快適だったですよ(笑)。

高橋：あ、そうですか。

古在：ええ。だって僕は前にも言ったけど父親が早く死んでいなかったし、アルバイト一生懸命して、それからちょうどアメリカ行く前に母親が亡くなったんだよね。それで、もう稼ぐ必要はないんだと思って。向こう行きゃちゃんと食えたり、あと研究してりゃいいんだから、こんな楽なことはないと思ったよ(笑)。

## ●人工衛星の軌道の研究

古在：それで世界の情報って日本にいたんじゃわからなかったんだけど、例えば運動の摂動ってのは、普通の1周期ごとに変動する短周期と、近点や昇交点経度に関連した長周期の変動というのがあるわけね。それで惑星の運動だとその長周期ってのは何万年、月だと10年とかになるわけね。それでスミソニアンに行って驚いたんだけど、結局そういう長周期も入れて成り立つ運動の式っていうのはなかったんですよ、まだね。人工衛星だと近地点が一周するのが2、3カ月なわけよ。昇交点でも同じ。だから2、3カ月で5桁か6桁の精度で成り立つ式ってのがなかったんだよね。なくたってまあ、予報やるには計算機で追えばいいわけだけど、そういう人工衛星の観測から例えば地球の重力パラメーター、扁平率がどうだとかなんとかいうのは計算機では求められないんですよ。それで僕がやりだしたんですよ。日本にいると結構いろんなことやらされてたけど、向こうにいるとそれしかやることないんで。

高橋：それはホイップルさんがそういうのをやってくれど？

**古在：** いやいや、やってくれて僕頼まれたことないです。自分でやりだした。ただ向こうに行ったらやっぱり人工衛星の予報を一つだけ担当しろって言われて、僕いやな顔したら、その専門家みたいな人が「お前だってできるよ」って言うのでさ（笑）。ともかくやりだしてね、多分1月くらいにはその式を作ったんですよ。それでAJに投稿したんですよ。その当時AJの編集長はイエール大学天文台長のブラウアー（Dirk Brouwer）って人で、僕に言わせればアメリカで天体力学の教授はブラウアーともう一人シンシナティ大学のハーゲット（Paul Herget）って人だけで、ブラウアーはボスだったんだよね。

それである日ある時ブラウアーが現れたの、実際に現れたの。4月くらいだったか、要するに投稿した論文を返すって言うんだよ、僕の論文を。その返す理由がすごいんだよね。「自分も同じような仕事をやってる」って言うんだよ。それで「まだ完成してはおらんんだけど、俺のやり方のほうがいい」と言うわけだよ。僕にそのやり方を説明してくれてさ、でこっちもあんまり英語で戦うほど慣れてなかったから「へい、そうですか」って…。

**高橋：** でもそれはまだできてないわけですよね？

**古在：** 向こうはできてない。

**高橋：** それはおかしいですよ…（笑）。

**古在：** さらに言えば、ちょうどその頃堀源一郎もアメリカに来ることになっていたんだよ。ブラウアーが僕のところにやってきたときに「そのうちにドクター堀がやってくる」って。堀源一郎ってのは知ってたけど、ドクター堀なんてのは知らないと思って、へえなんて顔してたら、あれは堀源一郎だったんだ（笑）。

**高橋：** 堀さんはイエールにいらしたんですか？

**古在：** イエールに来た。ブラウアーのところに。それでちょうどその頃人工衛星の動きに変な周期のものが現れるというのが問題になって、僕の研究で例えば地球の扁平率とか地球のポテンシャル

の南北非対称性、だからJ3とかJ5とかいうのからそういう運動が出てくるというのがわかったんだね。それはちゃんとやったし、さらに言えば僕はその前に土星の衛星やったことあったでしょ。土星の衛星に及ぼす太陽の影響っていうのはちゃんと入れてたんだよね。で要するに、短周期だと小さいんだけど長周期だと重要でそれをぱっとやったんですよ。で、そういうのを完成していろんなパラメーターみたいなのを出す仕事をやってたら、ホイップルさんたちがえらく感心してくれて。日本で論文出したって誉めてくれる人いなかったけど、ホイップルさんは僕の論文見て何かすごい褒め言葉のメモくれてさ。それでこっちも感激してたんだよ（笑）。

そしたらそのうちね、6月か7月になってイエール大学でサマースクールってのがあって、僕は行かなかったけどスミソニアン天文台から行った人がいて、そこでブラウアーが人工衛星の運動の研究の結果を発表したらしくて、それを持ち帰ってきたのね。それで僕が彼の結果をチェックしたら、間違ってるんだよ。間違ってる箇所があったの。それで僕がこれは間違えてるよって彼に手紙書いた。そしたらね、やっど僕の論文ものぞく気になって、それでAJ 1959年の9月号にブラウアーと僕と、後もう一人イエールを出た男で僕よりちょっと上のガーフィンケル（Boris Garfinkel）って男の論文<sup>1)</sup>が出たんです。そのブラウアーの論文で、「堀源一郎にはいろいろ間違いを直してもらった」って謝辞を書いているからさ、それで僕がまた手紙書いてね、「お前は堀のことだけ書いてあるけど、俺が間違い直したのは書いてないじゃないか」って（笑）。その手紙のコピーがさ、だいぶ後にまで残ってて、あー俺こんなこと書いたんだ、って。

ともかく逆に言えば、そのときにブラウアーの式に間違いがなければ僕の論文は出なかった。そういう事情があったんですよ。

**高橋：** なんだか理不尽な話ですね。

**古在：**アメリカは民主主義の国って言うけどね、要するに編集長の権限ってのはすごいんだよね。日本じゃあんな偉い権限をもった編集長なんていないよ（笑）。まあともかくそういう話があって、それから僕は太陽・月の影響も式にして摂動関数だけ書いて、それでこうやれば後は求められる、とだけ書いてもう詳しい結果は書かなかった。あの頃は論文書くのに忙しいからね、書かなかったら「古在は最後まで書いてないから」ってそういう論文が出たりしたことがあるけどね（笑）。

僕が唯一気がつかなかったのがね、太陽の輻射圧。その影響ってのがね、あの頃風船衛星っていうのが上がって測られたんですよ。通信衛星。30メートルの風船を上げて。それはほぼ風船ですからね、輻射圧の影響が効くんだよね、ものすごい効くの。要するに質量が小さい割に表面積がでかいでしょ。僕は後追いでやったりしたんだけど。

あと一つ、多分1959年になって、アメリカが割に扁平な軌道の衛星を上げたんですよ。扁平な軌道って要するに軌道半径が大きいんだよね。そうするとね、太陽の影響ってのが大きいんですよ。そのころNASAはその衛星の寿命は20年だって言ったんだけど、どうもその太陽の影響を入れると離心率が大きくなって、大きくなるということは、近地点、一番近い点が地球に近づくわけよ。より扁平になるから。それで大気の影響を受けて。その大気の計算は数値積分で、僕数値積分できないって言ったけど、それは恒星大気の研究をやっていたチャールズ・ホイットニー（Charles Whitney）という人がやってくれて。だからそれがあの頃の唯一の共著の論文<sup>2)</sup>ですよ。それでやってみたら、近地点が落ちてくるんで寿命が2年ってなったんですよ。それが確か1959年で、NASAに送ったりして結構新聞なんかにも出たりして。結局その後、方々で太陽や月の影響も入れてそういうことをやるようになった。

**高橋：**NASAはまだそこまで考えてなかったんですね。じゃあだいたい計画が狂っちゃったんじゃない

いですか？

**古在：**20年から2年になったからどれだけ狂ったのかわからないけど。だからその頃は得意だったんだよ。それで僕は実はさっき話した土星の衛星の論文が学位論文で、学位の請求を出して、実際に学位が出る前にアメリカに行ったんですよ。だから10月の末に行って、確か12月になって出たんですよ。だから初め行ったときは、学位がなかったんですよ。そしたら僕が論文をたくさん書くので向こうが「おまえはPh.D.と同じような学位をもっているのか」って言うから、なんかこういうときは吹いてやらなきゃいけないと思って、「俺はPh.D.よりいい学位もってる」って言ったから月給上げてくれた（笑）。

**高橋：**向こうでの身分はどういうものだったんですか？

**古在：**単にastronomerって言って、要するに常勤じゃなくて任期付きでNASAからの研究費で雇われてた。

**高橋：**NASAのお金だったんですか？

**古在：**最近日本でも科研費で雇われるの多いけど、僕も科研費で雇われてた。だからスミソニアンにしてみれば僕がそういう論文出すもんで、NASAからの研究費も増えたんだと思うよ（笑）。

**高橋：**そうですね。だいたい貢献していたわけですよ。

**古在：**だからそんなことやって得意がっていたんですよ。

## ●アメリカの天文学者たち

**高橋：**ホイップルさんって人はどういった方なんですか？

**古在：**ホイップルさんってのはね、いわばアイディアマンなんだよね。有名な「ほうき星は汚れた氷の塊だ」っていうのは彼の言葉だよ。それから流れ星の研究をやって、流れ星の軌道をよく決めようと思って、アメリカの中で何か所かカメラをもって行ってやったりして。それから最後に

彼は望遠鏡を合わせ鏡に、要するにマウナケアのケック望遠鏡のように、あと今のTMTとか、ああいうのをやろうやろうって言って。それでアリゾナにスミソニアン天文台があって、そこで作ったりしてた。アイディアマンなんだよね。

高橋：結構最近まで生きてらっしゃいましたよね？

古在：あの人ねえ、90いくつまで生きててね、だから十何年前に亡くなって、僕追悼会には行きましたよ。

それからさっきのダーク・ブラウアーはオランダ人なんです。オランダで大学出て、ちょうど僕の生まれた年に向こうでディグリー取ってアメリカにやって来たって言ってたね。それでブラウアー氏とはその後いろいろあって。その頃アメリカではですね、ブラウアーってのがボスで、イェールは理論が盛んで、特にホリゲン（堀源）なんて完全に理論の人で、あの人観測と比べるなんてことはやりたくない人だね。

小久保：堀さんは後輩ですか？

古在：後輩だよ。あれはね、僕より三つか四つ下でしょ。僕らから見るとね、彼は新制大学なんです。60年前でも新制っていうのはおかしいけどさ。

高橋：堀さんも萩原さんの弟子ですか？

古在：そうですね。

小久保：僕は学部生の頃、堀さんの天体力学の講義を聴きましたよ。

古在：四元数かなんか出たでしょ（笑）。

小久保：四元数で、何だかよくわからなかったですけど。今もわかるかなあ（笑）？

古在：あの頃、ホリゲン氏も有名だったしね。僕とホリゲンとは全然姿形も違うんだけど、ときどき間違えられて「お前は堀か？」とかさ、「古在か？」とか（笑）。

高橋：アメリカ人からは似て見えたんですかね。スミソニアン天文台では天体力学が盛んだったんですか？

古在：要するに天体力学は、国際地球観測年が始まってアメリカが人工衛星打ち上げるってときに、ホイップルが「人工衛星の光の観測は俺がやってやる」と言って、それで始まった。それからベピ・コロombo（Giuseppe Colombo, Bepiは愛称）っていうのが僕よりちょっと後にイタリアからやってきて、一緒に1年くらいいたことがあるんですよ。面白い男だった。何か僕よく知らないんだけど、いまだにベピ・コロombo計画\*2とかいうのがあるそうだね。

それからね、もう一人イムリ・イジャック（Imre Gyula Izsak）っていう1956年のハンガリー動乱のときに出国した男がいた。僕より一つ下で、うんとできるやつだったよ。ただね、僕が知っている頃彼は難民でアメリカ国籍なくて、アメリカ人と結婚して子どもができてやっとアメリカ国籍になって。パリで会議があったときにね、彼初めてパスポートをもって外国に来たって言ってね。一緒に会って喜んで、それで昼飯食って、あそこにゴーティエエビラーっていう昔からポアンカレやなんかいろんな本を出した本屋があって、一緒に行ってラプラスの本なんか買って来たんだよね。それで会場に戻ったら気持ち悪くなったとかなんかで中座して、その晩死んじゃった。

高橋：え？！

古在：本当に突然死しちゃった。あれかわいそうだったなと思って。それでその男は学位ないんだよね。アメリカでどっかの大学院にまた行くかなんて話をしてたんだけどさ。僕は「日本では俺は大学院なんかでやんなくなつて、論文出ただけで6,000円払って学位取ってきたんだから、お前もアメリカで授業料出すよりも飛行機代払って日本に行ったほうが安いよ。萩原先生に頼んでやる。」って言ってさ（笑）。萩原先生もよく知って

\*2 水星探査に関するJAXAとESAの共同プロジェクトで、2016年に探査機を打ち上げる予定である。スイングバイによって水星に接近できることを提唱したジウゼッペ・コロomboにちなむ。

たんですよ、その男をね。それで萩原先生に僕から頼んだら、えらいまた官僚的なこと言ってね。「本当は日本でも日本語で口頭試問受けなきゃいけないんだよ、君」って言うから、それじゃだめだと思って。結局彼は学位なくてももうんとできたしさ。

それからもう一人学位ないのがいてね、ウィリアム・カウラ (William Kaula) って、あれはね、陸軍士官学校出てる。僕より一つか二つ上なんだよね。それで日本で言えば陸地測量部みたいななのに入って、それでOhio Stateでマスター取ってNASAに入って。それで僕らのところにもよくやって来て、やっぱり彼も天体力学の教科書書いたのかな。

小久保：書いてます。もってます。

古在：それで結局UCLAで教授になって、UCLAの教授でPh.D.もってないの二人だけだっけって言ってたよ (笑)。

高橋：さっきの、学位で6,000円って何なんですか？

古在：あのね、検定料。だってドクター論文っていうのはさ、あなた方はちゃんと大学院でやっただろうけどさ、僕らは後で論文博士を取った。論文博士の検定料が6,000円。

高橋：当時、日本人はだいたい論文博士だったんですか？

古在：戦前、旧制の人はだいたい論文博士。

高橋：新制になると今の大学院ができて？

古在：そうそう。だからホリゲンさんなんかは最初の頃じゃないかな、新制で博士取ったのは、で、これは書かないほうがいいんだけど (笑)、彼はね、博士論文出版してないんだよ。

小久保：そうなんですか？

古在：本当。あれ出版してないよ。だから俺ときどき脅すんだよ (笑)。博士論文は出版しないと取り消されることがあるって言ってね、「お前取り消されるぞ、俺が言ったら」って言って脅すんだよ (笑)。

小久保：今でも天文教室では同じルールで、学位論文を取ったら出版しないといけなくて、出版していない人のリストってのがあるんですよ。最初は堀さんだった… (笑)。

古在：あれはアイディアマンだからさ、論文を出版する頃には何か他のことを考えてたんだよ、あいつはね。

高橋：当時は学位があるとなしではだいぶ違ったんですか？

古在：アメリカ行くときにね、僕は萩原先生から呼ばれて「学位取って行け」って言われた。だけど僕がアメリカ行ってから、旧制の人で論文博士がいつまでだとか言われて随分バタバタと取ったんじゃない。

それからもう一人面白かったのがね、ヴィンチ (John P. Vinti) っていう人がアメリカの度量衡研究所ってところにいてね。彼が言うには、要するに解析力学でちゃんと解ける問題っていくつかしかないわけだね。そのうちの一つにね、2固定中心問題っていうのがあるんですよ。3体問題なんだけど、2点は動かない。で3体目の動きを出せて。これは解けるんですよ、何とかの条件で。

それで彼はね、xyz座標でz軸の方向に同じ虚数値だけ離れた2点に同じ質量の固定点を置くんだったさ。そうするとね、虚数だから扁平な回転楕円体と同じような重力場になるんですよ。そうすると地球のポテンシャル、J2とかJ4までね、かなり同じような値になる。それを解いて人工衛星の運動の論文を書いたんですよ。ところがね、有名なブラウアー・クレメンスの本にはね、「あの論文は元々は2固定中心問題、固定点問題だからオリジナルじゃない」って書いてあってね。彼、カンカンに怒っててね (笑)。それからさっき言ったイムリ・イジャックも何か長い論文を出したら、「俺の教科書とノーテーションが違う。書き換えろ。」って言われてカンカンに怒ってた。3人で1回会談をやってね、「もうブラウアーの名

前を出さないで教科書を書こう。エイエイオー。」ってやってんだけど、ついに実現していないね(笑)。

僕も high eccentricity, high inclination の論文(いわゆる古在機構の論文)<sup>3)</sup>を書いてアメリカの天文学会で発表したらね、ブラウアーがすぐに立ち上がってね、「俺も同じような論文を書いたことがある」って言うんだよね。それで僕驚いてね、帰って調べたらね、まあかなり全く違う論文だけどね、やっぱりその論文をちゃんと引用しないとAJは通してくれないと思ってね(笑)。その後僕が日本に帰るっていうので「じゃあ1回イェールに来て話をしろ」って言われてね、行ったことがあるんですよ。そしたら学生がたくさんいたんで驚いた。

高橋：ブラウアーさんは結構攻撃的な感じの人だったんですか？

古在：いやーだけど最後は友好的だった。最後に「オランダで天体力学のサマースクールやるからお前来て」って言われてね。そうしたらその前に雪かきしてる最中に心臓マヒで死んじゃったんだよ。60ぐらいで死んじゃった。

小久保：古在さんが古在機構の論文で引用したっていうのはブラウアーの1947年の論文<sup>4)</sup>ですね？

古在：うん、かなり違うんだよ。だけど彼がそう言うんだからさ(笑)。

## ●古在機構

高橋：それでその古在機構ですが、スミソニアンの最後の頃にやった研究ですね？

古在：それは最後になって、結局日本に帰ることに決めたわけよ。そのときにね、やっぱり日本にはまだ計算機なんてないだろうから、計算機を使わなくてもいいような仕事をやんなきゃいけない、それで練習しようと思ってね。

それからあの頃の天体力学の教科書では、今でもそうかもしれないけど、小惑星の永年摂動のと

ころで、離心率は小さい、軌道傾斜角は小さいって書いてあるんだよね。ところが現実に見たらそんなことないでしょ。それであれば1回やらなきゃいけないって思ってたんだよ。そしてさかのぼればアメリカに行くと、人工衛星の理論式を出すときも、まあ軌道傾斜角は任意だということはわかるけど、離心率もかなり大きいのが出るって話があったんで、それも任意でできるってことがわかって、だからそういう手法を使って。ただまあ結局摂動を及ぼす木星や土星やなんかはみんな円軌道で同じ平面を動くという仮定を入れた。どうもああいう理論を作るときに、いろんな仮定においてそれが全体を壊すものと壊さないものがあるんだよね(笑)。で、あれはあんまり壊さなかったんだなあ。あれは結局軸対称のポテンシャルの中のテスト粒子の運動なんですよ、突き詰めれば。だからほかにも応用ができて。

それからNASAの人が教えてくれたんだけど、NASAでは計算機でエンケ彗星の軌道を長い間計算してて、それが確かにあの式みたいになってるって。人工衛星と違って小惑星の永年摂動っていうのは千年とか1万年とかの周期だから、観測では見つけられないですよ。ところがその頃から数値積分する人がいて、その数値積分では見つかったし、それから恒星系力学のアーセス(Sverre Johannes Aarseth)って人が、やっぱり何体問題かでやると、あの種の結果が出たって言って、それからフィンランドのバルトネン(Mauri Valtonen)なんてのが、お前の結果と合うような数値積分が出てくるよって教えてくれて。

小久保：当時は、カウラが月の運動理論, lunar theory っていうのをもう作っていたんですが、それを知らずにやっていたんですか？

古在：ああそうですか。それは僕知らなかった。

小久保：摂動関数を計算するとき古在機構でやっているのは、 $e$ とか $i$ では展開しないで、摂動天体までの軌道長半径の比が1より小さいとして展開しますよね。もともとそういうやり方をしたの

は、月の運動論の時に太陽ポテンシャルをそうやって展開して影響を見るっていうのがあって、今になると解説では、古在さんはカウラとかがやっていた月の理論を応用したというか、そういう方向でやったっていうふうに言われたりしてるんですけど。

**古在:** いや、それよりもね、さっき言ったように人工衛星では離心率とか軌道傾斜角っていうのは任意なわけね。あれはだから人工衛星でやったのを、まあそのまま使ってる。

**小久保:** そうか、もともとは人工衛星。

**高橋:** じゃあ普通小惑星では $e$ とか $i$ とかで展開してたのを展開せずにということなんですね。その計算は順調に行ったんですか？

**古在:** まあだから、僕が大学院時代とか天文台で雇われてるときには、一つの論文書くのに1年以上かかってたのがさ、あれは2カ月くらいでできてこないいいことないと思ったですよ（笑）。

**小久保:** 今だと僕はMathematicaとか計算機を使って摂動関数の積分とかしたりするんですけど、全部手計算でするんですよ。

**古在:** だって僕、ほかのことでできないんだもん（笑）。

**小久保:** でもあの複雑な三角関数とか…。

**古在:** ああ、あの楕円関数の教科書はさ、萩原先生の論文に出てた教科書を、さっき言ったパリに行ったとき見つけてさ、買って来たんだよ。それで木下宙さんに言わせると「古在さん何とか関数とか変なの使うけど、本当は何とか関数使ったほうがいいんですよ」なんて言われたけどさ（笑）。単にあの教科書をもったというだけです。

**小久保:** 当時は計算機もないし、そういう関数を解析的な表現をそのまま積分するとか微分するっていうのはできなかったの、手で計算するわけですよ。何ページにもわたってずうっとこう計算して。

**古在:** だけどあれはね、そんなたくさん式を計算しなくて済んだんですよ。だからもう2カ月くら

いでできたんです。

**高橋:** 誰かと議論しながら進めたんですか？

**古在:** いや、やんなかったです。スミソニアンにいたのはさっき言ったイムリ・イジャックだけど、イムリ・イジャックは少し違うことやってたしね。だいたいそれまでも人工衛星なんかの摂動作るときも誰にも相談しないで勝手にやって。ただね、ホイップルさんだけはときどき、「お前今何やってるのか」って聞きにくるわけよ。それで「何々やってます」って言うときまた「あれどうなった」って聞きにくるからさ。ほかはなかったよ。

その頃多少議論したのが、さっき言ったコロンボだよ。コロンボもちょっと違う人だったけど、割にああいう仕事には興味もってくれたよ。あれは誇り高き北部イタリア人だね。パドバ大学。「俺はイタリアでピッツァなんて見たことない」って言ってたよ（笑）。あの人早く死んじゃったんだよ、がんで。

**小久保:** そもそも古在機構の仕事をする動機になったのは、やっぱり小惑星の…。

**古在:** 僕小惑星のあのことはね、ずうっとやりたいと思ってたんですよ。

**小久保:** いつぐらいからですか？

**古在:** 初めっから、大学院生の頃からやりたいと思ってて、実はその頃論文書いたことあるんですよ。でもそれはうんと間違いで（笑）。それでアメリカ行って人工衛星やったんで、離心率やなんかああやって入れればいいんだってわかったんでね。それでできたんですよ。

**小久保:** そのころは、小惑星は何個くらい観測されてたんですか？

**古在:** あの頃はねえ、まだ2,000かな。

**小久保:** 2,000ぐらいですか。その中に $e$ と $i$ が大きいものはもうあったんですか？

**古在:** 二つくらいあった。まあいくつもなかったですね。それで僕の古在って名前のついた小惑星は3,040番。あれはね、近点引数もひょう動<sup>\*3</sup>し



てるんですよ。

**小久保:** 古在サイクルに入ってるんですよ、はい。そうか、じゃあ当時もう大学院生の頃から小惑星の観測で $e$ と $i$ が大きいのはわかっている、それに適応できる摂動論がなかったっていう状況だったんですか？

**古在:** そうですね。あれ水星だって離心率って結構でかいんだよね。冥王星よりでかい時代もあったんだよ。それで僕は冥王星が惑星から外されたIAUの会議に、前半だけ行ったんだよ。それであのときにね、渡部潤一さんが委員かなにかで、冥王星だけが離心率がでかいから外すとか書いてあってね、「あなたがたね、水星の離心率がでかいの知らないのか」って言ったことがある(笑)。要するに離心率がでかいから相対論による近日点の移動がすぐわかったんで、あれ円に近かったらなかなかわからない。

**小久保:** 古在さんの論文が発表された後、歴史的な天体力学の発展という観点で見ると、カウラさんの時代に…。

**古在:** カウラはね、ああいう一般論の式を出すのが得意だったからね。

**小久保:** カウラさんとかブラウアー・クレメンスの本にも書いてあるんですけど、そういう軌道長半径の比だけで展開する理論を月理論、カウラ型の展開って言っていて。古在さんの1962年の論文でやってることもそういう意味では「古在さんはカウラ型の展開をして古在機構を発見した」という風に今だと言われるんですよ。

**古在:** 僕の考えの中ではあんまりそうじゃなくて、人工衛星でやったから、これでできるだろうと思った。

**小久保:** 実際に計算してみて、軌道要素のひょう動を見つけたときはどんな気持ちだったんですか？

**古在:** いやいや、あれは結構面白かったし、それ

からあの頃時々萩原先生がやって来てて、萩原先生は生き字引だからね、「先生、天体力学は古いからこんな論文書いたことある人いるんじゃないんですかね」って言ったら「いないよ」って言うからさ。それが金科玉条なんだ、俺の。

**小久保:** そうなんですか。萩原先生には見てもらったんですか。

**古在:** 見てもらった。萩原先生はきっとね、ああいう問題だったら自分にでもできたはずだと思ったんだよ、きっと(笑)。

それであのときはまだね、実際に近点引数がひょう動してるのはまだ見つかってなかったんじゃないかな。だけどそれに近いものはなんか割にあって…。

**小久保:** 小惑星の観測としてですか？

**古在:** 観測。それからそもそも小惑星の2番のパスってというのがちょうどバウンダリーの外にあるんだよ。

**小久保:** あー。パス自体はサーキュレーション\*4してる？

**古在:** サーキュレーションしてるけど、ひょう動する領域のちょうど外側にあるの。

**小久保:** そうか、まだ理論ができたときは、実際にひょう動してる小惑星はなかったわけですね？

**古在:** なかったと思う。

**小久保:** 最初に理論ができたんですね。

**古在:** うん。それからね、その後に実はカウラの教え子で、今カリフォルニアのJPLに行ったウィリアムス (James Gerard Williams) っていうのが論文を書いてるね。だからね、中には彼が1番最初にそういうのを見つけたと思ってる人がいて、それでひょう動してる小惑星が見つかったときに、ウィリアムスって名前を付けたんだ。ところがウィリアムスが「それはおかしい、やっぱり古在のほうが先だ」って言うんで、それで3,040番がひょう動しているのを見つけたときに、「これは

\*3 近点引数などの軌道要素がある値の周りを振動すること。詳しくは末尾の解説を参照。

\*4 近点引数が回転すること。詳しくは末尾の解説を参照。

コザイって名前つけろ」って言って、彼のプロポーザルなんですよ。

高橋：でも結局最初のは「ウィリアムス」という名前になってしまったんですね（笑）？

古在：はい、それ何番だか覚えてないけど\*5。

小久保：古在機構の導出ではハミルトニアンを展開して、角運動量のz成分が保存することから振動を理解するという風に今だと言うんですけど当時古在さんもそういうような解釈をしてらしたんですか？

古在：いいえ、1番最初にこの論文に注目したのがブライアン・マースデン (Brian Geoffrey Marsden) で、マースデンはあの機構で小惑星は木星に近づきにくいというのを見つけたわけね。要するに、軌道面傾斜角がでかいやつだと長軸がぐるぐる回って木星の軌道面上に来るときもあるし、軌道面が木星の軌道面から離れるときもある。軌道面上に来ると割と離心率が小さくて、木星に近づかない。離心率が大きくなる時は軌道長半径が傾いていて木星から遠ざかる。そういうのはブライアン・マースデンが言い出した。

小久保：それは古在さんの論文を見てから？

古在：いや、もっと正確に言うと、ブライアン・マースデンは「小惑星は木星に近づかないと思っている」ということを言い出して、それで僕の論文を見て、これでもそれを証明できると言った。だからアメリカ的天文学会が創立100年を迎えて、影響力の強い50くらいの論文を選ぶとき<sup>5)</sup>、僕の論文を推薦したのはブライアン・マースデン。

小久保：そうなんですか。はあ〜。日本人の論文で唯一ですよ？

古在：そうなんだよね。アメリカ人以外のはほとんどないんだよね。

小久保：その後木下さんとかが軌道要素変化の解析解を出しますよね。その当時古在さんはそこまでは考えなかったんですか？



図1 インタビュー風景 (2014年8月。撮影：吉田二美氏)。

古在：考えない。何かあれはともかく2カ月くらいでできて、喜んで投稿してブラウアーに文句つけられてレファレンスをつけて、掲載された。

高橋：その当時は、これは大きな研究だと思いましたが？

古在：いや、自分ではさ、早く済んで良かったと思って。さっき言ったように1回だめだと思ったのができたんで喜んで。それからああいう図を書くのはさ、前に言った浦さんとポアンカレの本を一緒に読んで、ポアンカレの本にああいう図がときどき出てくるじゃない？ 僕も1回ああいう図を書きたいな、と思って（笑）。

小久保：ポアンカレマップ的な？

古在：まあ全く違うけどさ（笑）。それで、アメリカ天文学会の100年記念のに載ってるっていうのは寿岳（潤）さんが教えてくれた。

小久保：え、本人には連絡なかったんですか？

古在：ないよ。

高橋：あ、そうなんですか？ 何かもらえるわけでもないんですか？

古在：もらえるわけではない（笑）。あれはApJSか何かに出て、その中に載って。

小久保：この古在さんの論文は、発表当時よりも近年になってどんどん注目されるようになって。こういう citation history で、系外惑星とかが発見

\*5 James (2,335番)。

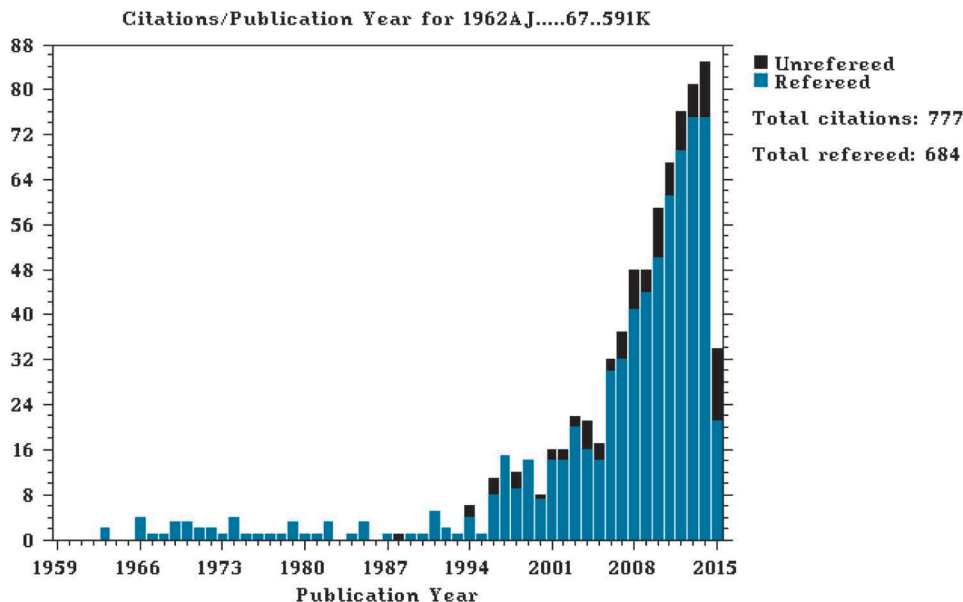


図2 古在機構論文<sup>5)</sup>のcitation history (SAO/NASA Astrophysics Data Systemより)。

されて以降がこの伸びなんですよ (図2)。

高橋: すごいですね。

小久保: 90年代後半くらいに入ってずっと引用が増えて、今ADSで750を超えているような感じなんです。ブラックホール系の3体問題とか、系外惑星とか、そういうのでたくさん使われて、すごく引用もされてるんですね。一方、太陽系では彗星、オールの雲の軌道進化で摂動源が銀河系ポテンシャルっていうので…。

古在: それは僕やったことないね。

小久保: でも全く同じになるんですよ。

古在: カイパーベルトの天体みたいに摂動源が内側だと効果は弱いんだよね。外側だと効くんですよ。

小久保: そのオールの雲の研究をしてる人が古在さんと全く同じ摂動関数を出すんですよ。スコット・トレメイン (Scott Tremaine) さんとか、彼も大秀才ですけど。でもその論文を読んだときに、全然引用されていないんですよ。知らないんですよ。今では知らないって言うけど、もう潜力だと思ってるんですけど、それはまだ80年代の論

文なんです。そこでまた再発見されてるっていう。やっぱりオールの雲とか太陽系の外側のほうの天体の軌道の進化は、銀河系の潮汐ポテンシャルが効くので、今ではもうちゃんと古在さんの論文が引用されています。だから本当にいろいろなところに応用ができるって話です。

## ●帰国

高橋: 日本に帰ろうと思ったのはどういう経緯ですか？

古在: いやあ、なんか日本から結構帰って来いという話があって、萩原先生なんかはさ、「だいたいアメリカに住み着きたいなんて思うやつは非国民だ」みたいなこと言うし (笑)。それから畑中さんなんかも「1回帰ったら？」なんて言うから。それでホイップルは、「お前またアメリカに帰って来たいんだったら、いつでも働けるようにしてやる」とか何とか言ってくれて。それで帰って来た。

高橋: 研究環境としてはアメリカは非常に良かったんですよね？

古在：そうですね。

高橋：じゃあまあ、帰って来いっているんな人から言われて、帰ると。

古在：うん。休職が切れるときだったんだね、だから1回帰れって言われて。

高橋：そのままアメリカにしようという気はなかったんですか？

古在：うん、なんかね、ホイップル氏に「お前、アメリカにいたいんだったら、天文台でバックアップしたら市民権はすぐ取れるようになるから」って言われて、でも僕はアメリカ人になるってことはちょっと違うことだと思ってね、考えてもみなかったんだけど。アメリカ人はさあ、アメリカ人にしてやるってのをありがたいと思えっていうのがあって(笑)。

高橋：まあいたいんだったらいくらでもいってしまうことですか。あの辺は住む環境としてもいいわけですか？

古在：まあ良かったよね。うちの家内は多少ピアノなんか弾いてたから、月給が上がったときにピアノを買ったりしてさ。まあ今から考えれば良かったよな。

高橋：アメリカでは旅行とか行かれたんですか？

古在：いやあ、あんまり行かなかった。日本ではアルバイトとかしてたけど、アメリカに行くって研究さえやってればいいし、研究は面白いからと思ってほとんど行かなかった。あの萩原先生から「君少しね、奥さんどっかに連れて行ったりしないといけないよ」なんてこと言われたこともあった(笑)。

高橋：食事はどうでしたか？ お米なんかは手に入ったんですか？

古在：手に入りましたよ。カリフォルニア米とか手に入るんですね。まあ僕は割にローカルな食べ物で済む人なんだけど。ホリゲンさんなんかは味噌汁がないとダメだとかなんとか言うけど、僕はそんなことはないんですよ。むしろ僕はアメリカに行く前はあんまり肉なんか食べなかったけ

ど、肉好きになっちゃったし。

高橋：ハンバーガーとか？

古在：ハンバーガーとかね。美味しいっていうんで、僕はあそこのハーバード・スクエアに昼飯によく行ったね。そこでハンバーガー焼いてるんですよ。それをパンに入れて、野菜は好きだけ。「お前は何が欲しいか」って言って、入れてくれるの。あれは日本にはないんじゃないかな？

高橋：じゃあ向こうの食事を結構楽しんでらしたんですね。言葉の壁はどうでしたか？

古在：言葉の壁はありましたね。実はね、僕の英語と一緒に働いている人には通用するんですよ。ところがね、どっかで会議があって誰かとしやべってるとね、一緒に来た男が僕の英語を英語で通訳して(笑)。同じこと言ってんじゃないかと思うんだけどもさ(笑)。

## 参考文献

- 1) Garfinkel B., 1959, *Astron. J.* 64, 353; Kozai Y., 1959, *Astron. J.* 64, 367; Brouwer D., 1959, *Astron. J.* 64, 378
- 2) Kozai Y., Whitney C., 1959, *SAO Special Report* 30, 1
- 3) Kozai Y., 1962, *Astron. J.* 67, 591
- 4) Brouwer D., 1947, *Astron. J.* 52, 190
- 5) 木下宙, 2000, *天文月報* 93, 451.

## A Long Interview with Prof. Yoshihide KOZAI [3]

Keitaro TAKAHASHI

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

Abstract: Prof. Kozai entered the department of astronomy in the University of Tokyo several years after the second World War. He chose celestial mechanics as his major and received guidance from Prof. Yusuke Hagihara. This is the third article of a long interview with Prof. Kozai and this time he talked on his stay in the USA and the Kozai mechanism.

## 「古在機構」解説

小久保英一郎  
(国立天文台)

### 1. はじめに—大きな軌道離心率と傾斜角—

太陽-木星-小惑星のような3体問題を考える。このとき軌道離心率と軌道傾斜角の大きな小惑星の近点引数（軌道面での近点の方向）は、ある条件下で $\pi/2$ もしくは $3\pi/2$ の周りをひょう動（振動）することが古在由秀氏によって発見され、永年摂動論を用いて理論的に説明された<sup>1)</sup>。このひょう動はしばしば古在機構や古在サイクルと呼ばれる。古在共鳴と呼ばれることもあるが、外力の振動数と系の固有振動数が整数比になるという意味での共鳴ではないので注意したい。ここでは簡単に古在機構の概念について解説しよう。

### 2. 運動方程式と摂動関数

例として、太陽（中心天体）-惑星（摂動天体）-小惑星（試験粒子）の制限3体問題（小惑星の重力によって太陽と惑星の軌道は変化しない）を考えよう（図3）。太陽（質量 $m$ ）の周りに小惑星（質量 $0$ 、位置 $\mathbf{r}$ ）がある。惑星（質量 $m'$ 、位置 $\mathbf{r}'$ ）は小惑星から十分に遠い（ $r' \gg r$ ）とする。小惑星の軌道長半径、軌道離心率、軌道傾斜角、昇交点経度（ $x$ 軸から昇交点までの角度）、近点引数（昇交点から近点までの角度）を $a, e, i, \Omega, \omega$ とする。惑星の軌道面を $x$ - $y$ 平面とし、座標原点を太陽にとる。小惑星の運動方程式は

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = -Gm \frac{\mathbf{r}}{r^3} + \frac{\partial R}{\partial \mathbf{r}}$$

となる。ここで $G$ は重力定数である。惑星の重力（摂動）を表す摂動関数 $R$ は

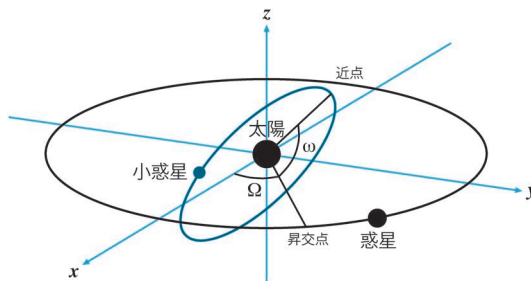


図3 モデルの概念図。

$$R = Gm' \left( \frac{1}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|} - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}'}{r'^3} \right)$$

である。右辺第1項が摂動の直接項、第2項が間接項（惑星によって太陽が動く効果）である。小惑星の単位質量あたりのハミルトニアンは

$$H = -\frac{Gm}{2a} - R(\mathbf{r}, t)$$

と書ける。ここで $H$ は保存量ではないことに注意する。

小惑星の永年（長期）軌道進化を調べるために摂動関数 $R$ を永年摂動論を用いて評価する。ここでは詳しい導出は示さず、計算の考え方を述べる<sup>2)</sup>。まず、 $R$ を $r/r'$ で展開して2次の項（四重極子）までを取る。ここで重要なのは小惑星の軌道を基準面円軌道に近い（ $e$ と $i$ が小さい）として $e$ と $i$ で展開しないことだ。そして、公転周期での小惑星の軌道変化は無視できるとし、 $R$ を惑星と小惑星の公転周期で時間平均（軌道平均という）し、軌道要素の関数として表す。これらの操作によって $R$ は時間に陽に依存しない軸対称環ポテンシャル $\langle R \rangle$ になる。この摂動関数では小惑星の軌道長半径は変化しない。また、角運動量の $z$ 成分

$$l_z = \sqrt{Gma(1-e^2)} \cos i$$

が保存する。

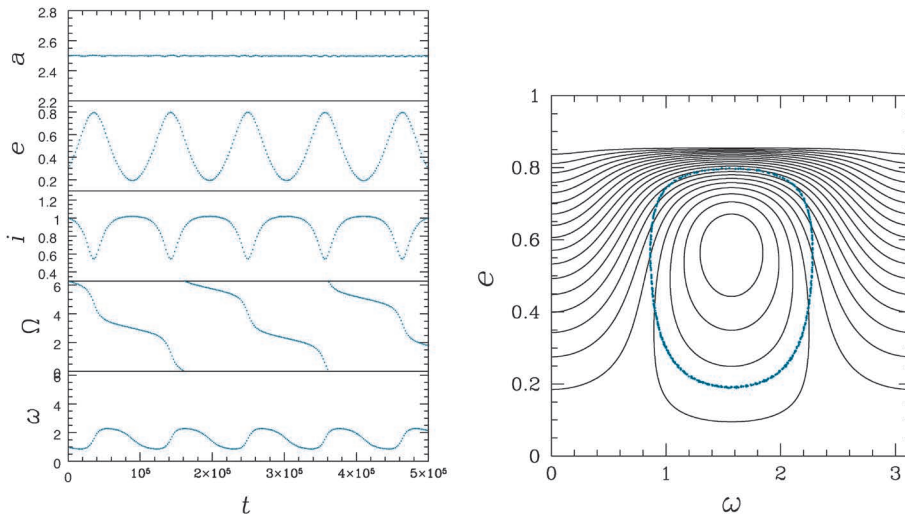


図4 数値積分による小惑星の軌道進化 (左) とハミルトニアンマップ (右). ハミルトニアンマップ上の点は数値積分の結果.

### 3. ハミルトニアンマップ

小惑星のハミルトニアンを軌道平均すると

$$\langle H \rangle = -\frac{Gm}{2\langle a \rangle} - \langle R \rangle$$

となる. これは時間に陽に依存しないので保存量となる. よって  $\langle R \rangle$  が保存することになる. 定数を除いて  $\langle R \rangle$  と  $l_z$  を簡単にした  $R^*$  と  $l_z^*$  を

$$R^* = (2 + 3e^2)(3 \cos^2 i - 1) + 15e^2 \cos 2\omega \sin^2 i$$

$$l_z^* = \sqrt{1 - e^2} \cos i$$

と定義する.  $R^*$  と  $l_z^*$  の保存から,  $i$  を消去して  $\omega$ - $e$  関係を得ることができる.

角運動量  $l_z^*$  を与え,  $\omega$ - $e$  面でエネルギー  $R^*$  の等値線 (等ハミルトニアン線) を描いたものをハミルトニアンマップと呼ぶ. 等ハミルトニアン線から, 小惑星の運動を解かなくても  $\omega$  と  $e$  の大局的な振る舞いを知ることができる. ハミルトニアンマップと軌道の数値積分の例を図4に示す. 太陽のパラメータは  $m=1.0$ , 惑星のパラメータは  $m'=0.001$ ,  $a'=5$ ,  $e'=0$  である. また, 小惑星の初期軌道要素は  $a_0=2.5$ ,  $e_0=0.3$ ,  $i_0=1.0$ ,

$\Omega_0=0$ ,  $\omega_0=1.0$  である. この場合,  $\omega$  は  $\pi/2$  近傍でひょう動する. このひょう動が古在機構である. このとき  $a, e, i$  にも永年変化はない (図4左). これは長周期ではエネルギーが保存し, かつ角運動量の  $z$  成分が保存しているためである (角運動量の保存によって  $e$  と  $i$  の振動は逆位相になっている). 数値積分による小惑星の  $\omega$ - $e$  面の進化がほぼ等ハミルトニアン線にそっているのがわかる (図4右). ずれは摂動関数の導出で無視した高次の項の影響である. エネルギーの値によってはひょう動せず,  $0$  から  $2\pi$  まで変化する. この場合は  $\omega$  は回転するという. ひょう動領域が存在するための条件は, 初期軌道傾斜角  $i_0 > 0.68$  ( $39^\circ$ ) である.

ひょう動と回転の境界付近の等ハミルトニアン線を見てわかるように, 初期軌道によっては  $e$  の変化の振幅がとても大きくなる. このような軌道は応用上重要で,  $e$  が大きくなり近点距離が小さくなることで, 潮汐相互作用 (恒星-伴星-惑星系) や重力波放射 (三連ブラックホール系) が効くようになり, 系がさらに進化する.

#### 4. まとめ—どこでも古在！—

制限3体問題における永年摂動論で、 $r/r'$ が2次（四重極子）までの軌道平均した惑星の摂動関数は保存量であり軸対称である。よって、エネルギーと角運動量の $z$ 成分が保存する。この摂動関数のもとで小惑星の軌道要素の永年変化を計算し、近点引数がひょう動する場合が古在機構である。

近年、古在機構は、摂動天体が被摂動天体の内側にある場合、平均運動共鳴と同時に起きる場合、摂動天体と被摂動天体の軌道が交差している場合にも拡張されている。さらに制限問題ではない一般的な階層的3体問題にまで拡張され、そこ

では八重極子までの展開も行われている。そして様々な系に応用されている。例えば太陽系では上記の小惑星の場合だけでなく、太陽-惑星-太陽系外縁天体、太陽-惑星-彗星、惑星-太陽-衛星、さらには太陽-銀河系円盤-彗星（オールト雲）などの系である。また、近年発見されている太陽系以外の惑星系では、中心星-惑星-惑星、主星-伴星-惑星などの系に、さらには三連星系や三連ブラックホール系にまで応用されている。

#### 参考文献

- 1) Kozai Y., 1962, *Astron. J.* 67, 591
- 2) Kokubo E., 2003, "Over the Resonance" (Proceedings of the 35th Symposium on Celestial Mechanics), 52