

Planet Formation Program at ITP, UCSB

中川 義次¹

南北に長いカリフォルニアの海岸線が、ロサンゼルスの方で一部分東西に走り、少し軒のようになっている箇所がある。その軒にあたかもツバメの巣のように取り付いている町がある。人口9万足らずのサンタバーバラ市である。その町の郊外にあるカリフォルニア大学サンタバーバラ校 (University of California at Santa Barbara; 通称 UCSB) の理論物理学研究所 (Institute for Theoretical Physics; 通称 ITP) で、昨年8月から12月までの5ヶ月間にわたって、“Planet Formation Program” と題する研究プログラムが開催された。研究プログラムといっても何のことだか想像しかねるが、内容は惑星形成およびその周辺分野に関連する研究者を世界中から広く集め、この期間集中的にセミナーや討論を行うというものである。そして期間中3つのコンファレンスが開催された。プログラムの全体責任者は、ニューヨーク州立大学ストーニブルック校の Jack Lis-

sauer である。プログラム参加者は、滞在期間中少なくとも一度はセミナーを行う。滞在期間には人によってまちまちで、セミナーを行った翌日に ITP を去る人もいるし、2~3週間あるいは1~2ヶ月と滞在して議論を楽しんでいく人もいる。5ヶ月の全期間通して ITP に滞在したのは7名ほどだが、合計の参加者は数十名に達した。これは勿論コンファレンスの一般参加者を別にしての人数である。この合計参加者数が、プログラム期間中に開かれたセミナーの数にほぼ等しい。コンファレンスの開催される週を除けば、セミナーはほぼ毎週少なくとも3回、多い時は4~5回と毎日のように開かれる週もあった。今にして思えば、相当過密なスケジュールであった。

ITP に滞在するメンバーはその時々によって変わるが、常に15~20名ぐらいの参加者が5ヶ月間にわたって ITP に滞在し、セミナーや討論を行ってプログラムを遂行した。その参加者の顔ぶれは、惑星形成過程の研究者だけでなく、星間空間における星形成の理論的観測的研究者また天体力学の専門家、隕石科学の分野の研究者まで、それぞれの分野の主だった人達はほとんどすべて参加したように思われる。参加しなかった人をあげた方が簡単なぐらいで、その中の一人は A. G. W. Cameron である。日本からは、私が5ヶ月の全期間、東大・教養の井田茂君が40日間、名大・理 (当時、山形大・理) の渡辺誠一郎君が2ヶ月間このプログラムに参加した。その他に期間中の3つのコンファレンスに合わせて約10名の日本からの参加者があった。本プログラムの国別参加者数は、ロシア6名、日本3名、ドイツ2名、フランス2名、カナダ1名、残り米国ということになる。惑

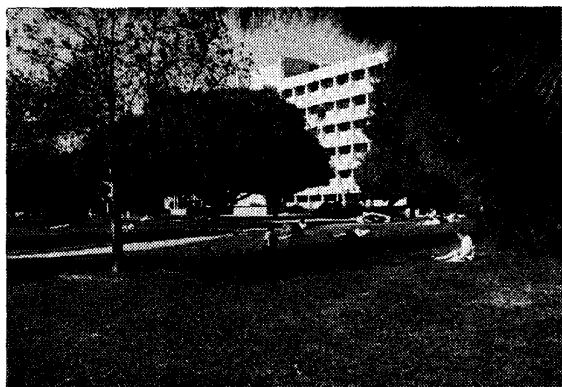


写真1 UCSB キャンパス。奥に見える建物が ITP のある Ellison Hall。

¹東京大学理学部地球惑星物理学教室

星形成に関して、このような規模でこのような長期にわたって催された企画は、恐らくこれが初めてであろう。期間中に行われた研究またコンファレンスで発表された研究は、本年中に発行される *Icarus* 誌の特別号にレフェリー過程を経て掲載されることになっている。

プログラムの幕開けは、8月3日から7日にかけて開催されたコンファレンス “Dispersal of Protoplanetary Disks” であった。Frank Shu の愛弟子、若き S. Ruden (UC, Irvine) と NASA Ames 研究所の P. Cassen が世話人となって企画されたコンファレンスである。ここ数年、惑星系を生む母体となると思われる原始惑星系円盤 (protoplanetary disks) が若い星 (T Tauri 型星) の周りに存在することが、ようやく観測的に明らかになってきたばかりであるが、このコンファレンスの標題には、早くもその“消失”が挙げられている。参加者はおよそ90名、口頭発表が30余り、そのほかにポスター発表も同数程度あった。ディスク消失に関しては、NASA Ames の D. Hollenbach が、ディスクの10AU より外の、中心星重力の弱い領域は、中心星の UV 放射による Photoevaporation によって消失するという(多分)新しいアイデアを発表して注目を集めた。また UC Berkeley の E. Ostriker が外部重力源(重い星など)との遭遇による潮汐力でディスクが消失していく可能性を吟味した研究を発表した。また、若い時代の太陽の活発な太陽風でディスクを吹き払うという考えは、以前から言われている古典的アイデアであるが、NASA Ames の J. Pollock は、この方法で 10^7 年ぐらいでディスクは消失するという見積を示した。しかし、同じ見積はすでに京都モデルでもなされており、彼の話はどこが新しいのか、今一つよく分からない発表であった。コンファレンスの標題にも拘らず、ディスク消失に関する発表は意外と少なく、私の印象に残ったのは以上のようなものである。やはりディスク消失は依然として太陽系起源論における大問

題で、本格的な取組みはまだこれからという感があった。その他の大部分の発表は、最近ますます盛んになってきたディスクの観測やディスクの力学的進化に関する理論的研究についての発表であった。ディスク観測で注目を集めたのは、Caltech の A. Sargent らのグループによる GG Tau の観測で、彼らは GG Tau をそのすぐそばにある星との二重星とみなし、この二重星の周りを大きく取り囲むディスクが存在することを発見したという発表を行った。そしてそのディスクの外側にもう一つ別の二重星があるというのである。どうして、そのような非軸対称きわまりない系の中にディスクが存在できるのか、いたく刺激的な発表であった。GG Tau の観測は、昨年来わが国の国立天文台野辺山でも精力的に行われ、ガスディスクの存在がとらえられている。本コンファレンスでも勿論、野辺山のグループによる発表があったが Sargent らのグループと同じ対象を観測しながら、結果が大いに異なるところとなった。野辺山グループが得たディスクは、単一星 GG Tau をとり囲む“標準的”大きさのディスクである。そばにあるもう一つの星はディスク面からはずれており、GG Tau とは無関係と考えられる。これに対し、Sargent らの得たディスクは広がり非常に大きく、しかもディスク面が野辺山グループのとらえたディスクとほとんど直交するぐらい違っている。したがって、GG Tau のそばにあるもう一つの星もディスク面に含まれてしまい、二重星の周りのディスクという解釈に至る。両グループの観測とも、T Tauri 型星の周りのディスクのガス成分を直接とらえた貴重な観測であるだけに、どちらの姿がより真実に近いのか、今後の観測の進展を見守りたい。いずれにしても、Sargent らの言う二重星の周りのディスクという非常識とも思える“とり合わせ”は、居合わせた多くの理論家を刺激したことは確かだ。世話人の一人 P. Cassen は、「二重星の周りのディスクという系は、物理的に大変興味深い対象だと思う。できれば自分でもそのような

系の進化を調べてみたい」と後日語っていた。またこのコンファレンスでは、F. Shu, D. Stevenson, G. Wetherill, G. Morfill といったお馴染みの顔ぶれが、それぞれにレビュー・トークを行って相変わらずの健在ぶりを示した。日本人の口頭発表者は、観山正見氏(国立天文台), 渡辺誠一郎君(名大・理), 三宅浩太郎君(東大・理・D1), 菊地信弘君(東大・理・M2), ポスター発表者は、中野武宣氏(国立天文台), 中本泰史君(東大・理・D3), と私であった。それぞれに大変興味深い発表であったが、内容の紹介は省略する。サイエンスが楽しくて仕方がないといった様子の Shu の無邪気な笑顔, 年を感じさせない Wetherill の元気な姿が印象的であった。また日本の若い大学院生が、このような会議に参加して口頭発表を行ったことは大変良かったと思う。私の大学院時代には、ほとんど考えられないことであった。今後も大学院生の諸君は、積極的に機会をとらえて国際会議で発表を行い、国際的な場で日本の若い力の存在を示してほしいと思う。今回のコンファレンスでは、すべての学生参加者に対して期間中宿舎と食事が無料で提供された。次世代の研究者への期待を込めた、主催者の異例の取り計らいであった。

この第1回コンファレンスは、ちょうど大学の夏休み期間中に開かれた。UCSB では一年を通して外国人のための英語の語学学校を開催しているが、夏休みは校舎が空くので特に大々的に語学学校を開いている。したがって休み中にもかかわらずキャンパスは世界中から英語を学びにやってきた学生で賑わう。やたらと目につくのが、日本から来ている女子学生であった。聞けば語学学校の学生の半数は日本人ということであった。日本の女子学生が UCSB にあこがれて大勢やって来るのも無理からぬことに思える。UCSB はなかなか素晴らしい環境にある。キャンパスから北を望むとサンタ・イネスの山々が連なり、また南はゴレタ・ビーチと呼ばれる美しい浜辺がキャンパスに続いている。ビーチを見おろす丘の上にキャンパ

スが広がっている。ロサンゼルスから車で2時間、ここにはロサンゼルスのような不快なスモッグはなく、夏はロサンゼルスより涼しい。冬は温暖で、ほんのまれに雨の降ることがある程度。一年を通してそのほとんどが、晴天の毎日である。また大学周辺やサンタバーバラの町は治安がきわめて良く、ニューヨークやロサンゼルスを見慣れている人にとっては信じられないぐらい安全な地域である。サンタバーバラは裕福なアメリカ人が多く住む美しい町で、西海岸では指折りの観光保養地になっている。このように UCSB はまことに恵まれた環境にある大学である。

8月の終わりにはコンファレンスに来ていた日本人達も帰国してしまい、日本人としては渡辺誠一郎君と私だけが UCSB に残ることになった。語学学校もこの時期一旦終了するのか、それらしき学生の姿も見えなくなりキャンパスはいっとき静かになった。9月にはいと新学期が始まり、キャンパスは一転して大勢の学生で埋めつくされた。まるで学生が地面から湧き出したのではないかと思えるほどの急変であった。UCSB の現在の学生数は18,500名、数年内には20,000名にしたいというのが大学側の目論見らしい。第2回のコンファレンスに備えて日本から東大・教養の井田茂君が来て、本プログラムの日本人フルメンバー3



写真2 夕暮れのビーチ。

人がそろった。それに第1回コンファレンスに参加して、一旦帰国した東工大・理の大槻圭史君が再びこのコンファレンスにやって来たので、日本人参加者は都合4名となった。

この第2回コンファレンスの標題は、“Planetesimal Dynamics”，世話人はコロラド大学ボルダー校の G. Stewart である。彼は数年前に、微惑星運動論において“viscous stirring”と“dynamical friction”という概念を明確にする大きな貢献をしている。9月14-16日の3日間、学期中であるため学内に場所がとれず、会場をホテルの会議室に設けての開催であった。参加者は約40名、口頭発表は15件、それとほぼ同数のポスター発表があった。コンファレンスの標題にされた分野の最大の関心事は、微惑星が相互の重力散乱を通してどのようなランダム速度を得るのか、またそれが合体成長にどのような影響を与えるのか、逆に微惑星の成長はランダム速度の進化に対しどのような影響を与えるのか、そして惑星の成長時間は最終的にどれぐらいになるのか、という点であろう。現在、微惑星成長の初期段階では dynamical friction が有効に働き、大きな微惑星ほどランダム速度が小さく、したがって大きな衝突確率をもつことになって暴走成長 (runaway growth) が

起こる、というのが定説になりつつある。本コンファレンスでも、G. Wetherill や S. Weidenschilling はこれを裏付ける数値計算結果を発表した。しかし問題はその先で、暴走成長した惑星の卵(原始惑星と呼ぶ)があちこちに出現すると、それらが強い重力で周りの微惑星に大きな摂動を与える。その結果、微惑星のランダム速度は増大し、原始惑星と衝突する確率が減少して原始惑星の成長が減速する可能性が出てくることになる。井田茂君は、まさにこの問題に関する発表を行った。彼は、東大・教養・杉本研究室の重力専用並列計算機 (Gravity Pipe; 通称 GRAPE) を駆使し、原始惑星の周りに多数の微惑星を配した初期条件で、原始惑星による微惑星散乱の様子を N 体問題として数値シミュレーションを行った。その結果は予想通り、原始惑星は近くの微惑星を大きく散乱する。しかもその散乱は、制限3体問題の描像がよく成立する散乱となる。(専門用語を用いて言うと)ヤコビ・エネルギーが保存されるような形で大きな散乱が生じる。大きく散乱された微惑星は、他の微惑星と遭遇を繰り返し、それらにランダム運動のエネルギーを分配していく。こうして微惑星のランダム速度は、全体として徐々に増大していく。その様子がよくわかる N 体シミュレーションの発表に、一同釘付けになった観があった。微惑星のランダム速度の増加は、先にも述べた通り、原始惑星の成長速度の鈍化につながる。初期の暴走成長の時代を成長の“第1段階”，そしてこの原始惑星の成長が鈍化する段階を“第2段階”と呼ぶことにすると、井田君の見積りによれば、第1段階から第2段階への移行は、原始惑星の質量が初期暴走によって周囲の微惑星の平均質量の100倍を超えるぐらいになったとき起こるということである。ただし、原始惑星の成長が遅くなるといっても、他の微惑星の成長よりは十分速く、他の追従を許さないという意味では第2段階も暴走成長に変わりはないということである。惑星成長は2段階の暴走成長によって進行するというのが、

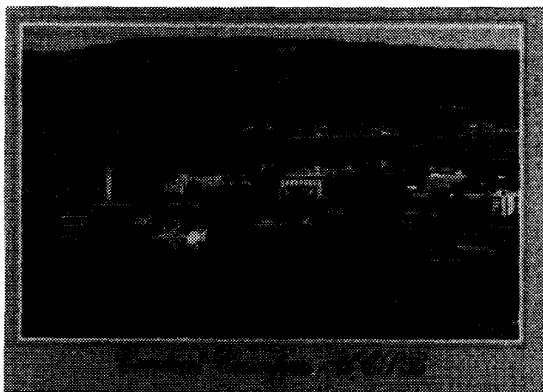


写真3 カリフォルニア大学サンタバーバラ校(UCSB) 全景。

井田君がN体シミュレーションを通して得た理論的予想である。また原始惑星による微惑星の空隙形成の可能性を否定したことも、彼の数値シミュレーションのおもしろい結果であった。発表後、G. Stewartが私のところに来て「Idaの発表は実に良かった」と告げた時は、私も嬉しくなった。微惑星運動論はここ数年、Stewartや井田君らの研究で着実に進展してきたが、今後はそれらの結果をどの様にうまく惑星集積の計算に取入れ、信頼に足る正確な惑星形成時間をいかに導出するか、という点が課題になって行くであろう。私自身大いに興味を感じるところである。

この第2回コンファレンスでは、惑星集積に直接関わる問題の他に、惑星の自転や彗星の軌道進化についての発表もあった。V. Safronovは、ロシアにおける太陽系起源研究のレビューを行った。彼は、本プログラム参加者中、最年長であるが、鋭い眼光は衰えていない。また、大槻、渡辺、井田の3名はポスター発表を行った。

第3回コンファレンスは、本プログラムの最終月となる12月の3日4日の2日間、ITPのメイン・セミナールームで開催された。標題は“Planetesimal Formation”，世話人は Planetary

Science Inst. の S. Weidenschilling である。参加者は30数名、口頭発表が14件でポスターセッションは無かった。3つのコンファレンスの中でも最もこぢんまりとしたコンファレンスであった。日本からの参加者は私の他に、東大・理の佐々木晶君が出席した。これまでの第1回、第2回のコンファレンスとは異なり、この第3回コンファレンスには、J. Wasson, J. Larimer, J. Kerridge, T. Lee といった隕石の専門家も多く参加した。コンファレンスの中心課題はその標題通り微惑星の形成で、果して微惑星はダスト層の重力分裂で生まれたのか、それとも重力分裂を経ずにダスト粒子の付着成長のみで大きくなったものなのか、どちらなのかという点である。私は、太陽系星雲中でのダストの沈澱成長についてのレビュー・トークを行い、この問題を整理してみた。まず最初に問題になるのが、星雲が降着円盤であった時代の初期の乱流がいつおさまったのかという点である。この問題に関しては、その乱流が熱対流で駆動されている乱流である場合には、中心星の輻射が星雲表面を有効に暖めだすと、星雲内の鉛直方向の温度勾配がなだらかになり対流はやんでしまう。したがって乱流もやむことになる (Watanabe,



写真4 第2回コンファレンス“Planetesimal Dynamics”の参加者達。
会場 South Coast Inn 前庭にて。

Nakagawa, and Nakazawa [1]). 中心星が星雲表面を照らし出すのに応じて乱流がやむというのは、大変魅力的かつ現実的な道筋のように私には思える。乱流がやめば、あとは京都モデル[2]に代表される“標準モデル”の筋書き通り、ダストは沈澱し、ダスト層ができ、重力分裂によって微惑星が生まれることになる。では熱対流以外の乱流の場合はどうなのか。熱対流以外の乱流の可能性もいろいろ指摘されている。指摘されているが、その乱流がいつやむのか、あるいは存在し続けるのかという点についてまでは全く研究が無いので、この場合は今のところお手上げになってしまう。では乱流状態にある太陽系星雲を考えると、その中でダストは沈澱できるのかというのが次の設問になる。これまでのいくつかの研究またこのコンファレンスや前々回のコンファレンスで発表された Weidenschilling, Cuzzi, 渡辺の研究によれば、答えは甚だ否定的である。星雲の中心面付近は中心星の鉛直重力が非常に弱く、ガス成分の小さな速度ゆらぎがダストを舞いあげ、重力不安定を引き起こすに足るダストの集中は達成されない。そうすると次の問いは、乱流星雲中でダストの付着成長のみで微惑星を作ることとは可能かという問いになる。これがやはり困難のように思われる。ダストはサイズが小さな間はガス抵抗によってガスに強く結び付けられて運動しているが、付着成長して10cm~1mの大きさになるとこの結び付きが弱くなり、公転周期の数百倍ぐらいの短い時間で中心星に落ち込んでしまう。このことが深刻な問題となる。しかも星雲ガス自体、乱流粘性のために徐々にではあるが、中心星に向かって落下している状況であることを忘れてはならない。このサイズを超えると粒子はほぼガスに無関係にケプラー運動をするようになるので、落下は急速に遅くなるが、果してこの“危険サイズ”をクリアして惑星を作る“抜け道”があるのかどうか、注目すべき問題である。非乱流の“標準モデル”では、“危険サイズ”の困難は簡単にクリ

アーされている。ダストが沈澱して中心面に集中することにより、ダストに働くガス抵抗は大変弱くなり、中心星への落下はほとんどない。しかもダストが“危険サイズ”に成長する頃には、ちょうど重力不安定が生じて一気に微惑星が生まれることになるからである。乱流星雲中で“危険サイズ”の困難を回避する“抜け道”がもしあれば、それは従来の“標準モデル”に対して、もう一つ別の新しい惑星形成論を打ち立てることになる。またもし“抜け道”の無いことが示されれば、それは乱流の停止時期に一つの制約を与えることになる。すなわち、ダストが“危険サイズ”に成長するまでに、乱流はおさまるべしという制約である。そして、その後はやはり“標準モデル”の道筋をたどることになるので、このことはまた“標準モデル”が惑星形成のユニーク解であることを示したことになる。“標準モデル”はユニーク解であるのか、それともまた別の解が存在するのか、乱流星雲中でダストの振舞いが、そのキャスティング・ボードを握っている。私自身は、乱流中での惑星形成は、やはり非常に難しいと思っている。

このコンファレンスではまた、先にあげた隕石科学の人達の発表の他、微粒子の付着成長実験に関する発表もあった。また Safronov が、回転流体における重力不安定性についてのレビュー・トークを行った。全てのプログラムが終了した後、世話人の Weidenschilling は次のような感慨を述べた「私が10年以上前にこの研究を始めた頃は、ダストの付着成長など、惑星集積の前段階の些細な問題のように見なされていたが、今日このように、惑星形成論の根幹に係わる問題として注目され、また隕石科学との結び付きも深まり、学際的研究対象になろうとは、想像もしていなかった。よい研究対象を持って、私は幸せであると思う」。

3つのコンファレンスの部分的な紹介だけで予定紙面が尽きてきたが、今、惑星系形成過程のどのあたりに研究者の関心が集まっているのか、そ

の一端は伝え得たと思う。先にも述べたが、コンファレンス以外の期間は、ITP では常時セミナーが開かれていた。その紹介をここでする余裕はもう無いが、一つだけ、木星型惑星の外層形成過程について行われた論争を書いておく。木星型惑星の中心核の質量が、微惑星の集積によりある限界質量を超えると、それを取り囲んでいた原始大気の力学平衡解がなくなり、大気は中心核の上に収縮して木星型惑星の外層を形成するという過程は、つとに“水野メカニズム” [3] として知られている。その大気の収縮が、準静的に起こるのか動的に起こるのかということについて、UC Santa Cruz の P. Bodenheimer と Univ. Heidelberg の G. Wuchterl との間でセミナーを通して論争が行われた。Bodenheimer は準静的に収縮する過程を数値計算で求めているのに対し、Wuchterl は動的数値コードで計算すると動的収縮が得られたと主張する。両者の間で、数値コード、opacity データその他かなり細かな比較検討が行われたが、現在でもこの食い違いの原因は明らかになっていない。

コンファレンスの紹介文の中でいろいろな人の名前を挙げたが、それらの人々は大部分 ITP でもセミナーを行った人達である。これまでに名前が挙がらなかった人で、セミナーを行った人は勿論大勢いるが、その中で主だった人を挙げると、まず P. Goldreich。彼は、数年来取り組んでいる太陽の表面震動の問題に関して、“Solar phonon” と題するセミナーを行った。また J. Wood は、ほとんど物理しか知らない大多数のプログラム・メンバー向けに、隕石に関する入門セミナーを3回シリーズで行った。評判のよいセミナーであった。

最後になったが、この“Planet Formation Program” の公式主催者である ITP を簡単に紹介しておく。ここは、大変ユニークな形態の研究所である。ITP 固有の研究者は所長の J. Langer 氏 (非平衡物理) を含めてたったの4名。そして研究所を支えるスタッフが13名もいる。ITP の主体は、外部からの招待研究者である。常時世界各国から数十名の研究者がここに滞在している。この惑星形成プログラムのような研究プログラムを5~6ヶ月単位で年間4組、2組ずつ平行して走らせている。因に1プログラム当たりの経費は1千万円のオーダーということである。これらはすべて NSF と NASA の Grants でまかなわれている。研究所の一つのあり方として、日本も大いに参考にしたいのではないかと思う。

参考文献

- [1] Watanabe, S., Y. Nakagawa, and K. Nakazawa, 1990: Cooling and Quasi-Static Contraction of the Primitive Solar Nebula After Gas Accretion, *Astrophys. J.* **358**, 282-292.
- [2] Hayashi, C., K. Nakazawa, and Y. Nakagawa, 1985: Formation of the Solar System, in *Protostar and Planets II*, ed. D. C. Black and M. S. Matthews (Tucson: University of Arizona), 1100-1153.
- [3] Mizuno, H., K. Nakazawa, and C. Hayashi, 1978: Instability of Gaseous Envelope Surrounding Planetary Core and Formation of Giant Planets. *Prog. Theor. Phys.* **60**, 699-710.