

文部科学省



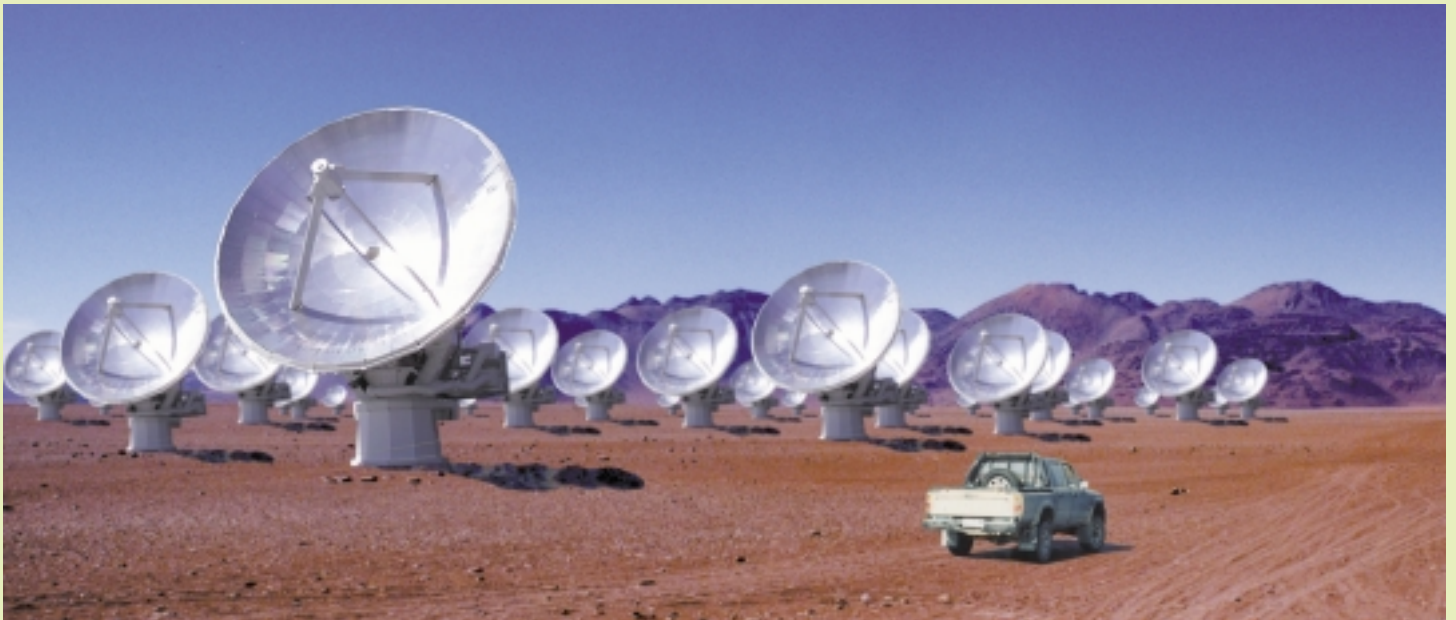
国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory

アルマ

ALMA計画

- 星と銀河の産声を聴く -



8月号

目次

表紙	1
国立天文台カレンダー	2
研究トピックス	3
- ALMA特集 -	
ALMA(アルマ)計画の概要	
電波天文学研究系 教授 石黒 正人	
アタカマ砂漠放浪記	
電波天文学研究系 助手 阪本 成一	
ALMAを支える最先端技術	
電波天文学研究系 助手 井口 聖	
NMAからALMAへの期待	
東京大学大学院理学系研究科 芝塚 要公	
ALMAに期待すること	
総合研究大学院大学 横川 創造	
お知らせ	14
すばる建築 文教施設部長賞受賞	
測地学会坪井賞第一回団体賞に輝く	
人事異動	14
共同利用	15
談話会紹介	16
月の起源	
- 巨大衝突により形成された円盤からの誕生 -	
理論天文学研究系 助手 小久保英一郎	
編集後記	18

国立天文台カレンダー

2001年
<7月>
25日(水) ~ 8月3日(金)
ハワイ観測所会計実地検査
30日(月) 運営協議員会
30日(月) ~ 8月2日(木) 体験学習会
「君が天文学者になる4日間」

<8月>
1日(水) ~ 7日(火) スターウイーク
~ 星空に親しむ週間 ~
5日(日) 岡山天体物理観測所特別公開
9日(木) ~ 10日(金) 電波専門委員会
25日(土) 野辺山地区特別公開
25日(土) 伝統的七夕
27日(月) ~ 29日(水) 光赤外分野ユーザーミーティング

<9月>
2日(日) VERA入来局完成式
3日(月) 鹿児島大学との連絡協議会
14日(金) ~ 17日(月) 国際シンポジウム
「日韓VLBIネットワーク
における国際協力」
17日(月) 理論・計算機専門委員会
20日(木) 総研大数物科学研究科教授会
28日(金) 総研大学位授与式

表紙の説明

国立天文台が米欧と合同で推進しているアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)の完成予想イメージ(合成写真)。ALMAは干渉計方式の巨大な電波望遠鏡をチリ・アタカマ砂漠の標高5000m地域に実現するもので、直径12mの超高精度アンテナ64基を直径14kmの範囲内に展開する壮大なプロジェクトである。星や惑星系の誕生や銀河の誕生、宇宙における物質の進化など、地球上生命のルーツを探ることを主目標に掲げている。ALMAは日本のLMSA計画など日米欧の3計画が融合した国際プロジェクトであり、平成14年度からの共同建設着手、平成23年度の本格運用開始を目指して計画が進められている。

ALMA計画のホームページは
<http://www.nro.nao.ac.jp/alma/>

ALMA(アルマ)計画の概要

電波天文学研究系 教授 石黒 正人



心を一つに

ALMAはスペイン語で「魂」とか「心」という意味の言葉。世界の研究者の心を一つにして進めようというAtacama Large Millimeter / Submillimeter Array (アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計)計画の名前にふさわしい。日米欧3者が協力して、南米チリ・アンデスの5000m高地に口径12mの超高精度パラボラアンテナ64基を主力とする巨大な電波望遠鏡を建設しようとする計画であり、天文学ではもちろんのこと基礎科学分野でも初めてといってよい真のグローバルプロジェクトである。

現在、2002年建設スタートを目指して、概要要求の準備、国際的な枠組みの協議、建設する装置の設計・開発など、きわめて多方面にわたる努力が急ピッチで進められている。ALMAでは大きく分けて、三つのチャレンジがある。それは、新しいサイエンスの開拓、最先端技術の開発、そして未経験の大規模国際協力である。以下にこの三つのチャレンジを中心としてALMA計画の概要について簡単に紹介したい。

世界で一つ、人類最大の電波の目

この4月に東京で開催されたALMA調整会議で、ALMAを3者対等な共同プロジェクトとして進めることに日米欧の関連研究機関(国立天文台、米NSF、欧ESO)が基本合意した。途中でいろいろ紆余曲折があったものの、最終的にはそれぞれが独自に構想してきた日本のLMSA(大型ミリ波サブミリ波干渉計)計画、米国のMMA(ミリ波干渉計)計画、欧州のLSA(大型南天干渉計)をすべて統合し、「世界で一つ、人類最大の電波の目」を実現しようということになった。2002年のスタートを目指し、完成予定は2010年、2006年頃から部分運用を予定している。ALMAは、世界的にすばる望遠鏡やVLTなど大型光学赤外線望遠鏡に続く大型地上計画として位置付けられており、日本国内においてもALMA

への参加は文部省学術審議会、日本学会議天文学研究連絡委員会、そして国立天文台第三者評価委員会で高い評価と支持を得ている。

ここでALMAの装置について簡単に説明しておこう。超高精度アンテナとその中に搭載された冷却低雑音受信機で受けた天体からの微弱な信号は、アンテナの中でデジタル信号に変換、光ファイバを使って伝送され、中央の相関器で相関処理後、最後にコンピュータで天体の画像が合成される。全アンテナを特殊な台車で運搬し、観測目的に応じて最小200mから最大14kmの範囲でアンテナ配列を変更する。いわばカメラのズームレンズの動きをさせようというものである。最大のアンテナ配列では山手線がすっぽり入る(図1)。全アンテナを同じ天体に向け、「地球の自転を利用した開口合成法」の原理により、大量の相関データから天体像を合成する。1枚の鏡で結像ができる光学望遠鏡にくらべ、ALMAでは結像にいたるまで大変複雑な処理が必要となる。

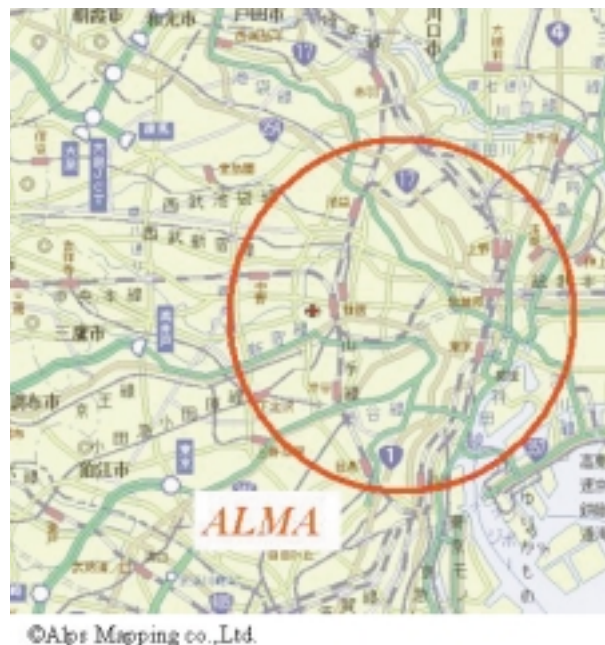


図1：ALMAの14km配列と山手線のサイズの比較

最短で波長0.3mmというサブミリ波は大気中の水蒸気で吸収されるため、望遠鏡を乾燥した高地に設置する必要がある。日本は望遠鏡の設置場所として早くからチリの乾燥高地に着目し、米欧に先駆けて1992年頃から現地調査を続けてきた。現在ALMAの建設を予定しているパンパ・ラ・ボラ～チャントール帯は、巨大なサブミリ波望遠鏡の設置場所としては世界最良の条件に恵まれた場所である。「世界遺産」ともいべき貴重なこの地域を、ALMAを中心として世界が共有し、今後の科学のために確保できることは大変意義深い。1997年に日本チリ修好100周年記念事業のために来日したチリ共和国フレイ大統領と話す機会があった折に、この地域の科学的な重要性と保護の必要性を説いた。私の話がどのくらい伝わったかわからないが、翌1998年にはチリ政府は同地域を「科学保護指定地域」として認定した。

日本は、これまでLMSA計画の推進を通じて、サブミリ波での高い観測性能を目標とした技術開発を行ってきており、超精密アンテナ工学、超伝導電波検出素子技術、フォトニクス技術、超高速デジタル相関処理技術などの分野において、欧米とも日本の参加と貢献に大きな期待を寄せている。

ALMAが切り拓くサイエンス

ALMAは多目的な電波望遠鏡であり、宇宙遠方の天体から身近な太陽系天体まで様々な観測対象において、その高い感度と解像力を活かして21世紀の天文学にブレークスルーをもたらすものと期待されている。光では見えない低温の宇宙物質をミリ波からサブミリ波にかけての波長の電波で観測し、「銀河の誕生と進化」および「星・惑星系の形成過程」にこれまでにない高い観測能力で迫ることができる。これら宇宙史解明における重要課題は、ALMAが取り組むべきサイエンスの中核をなすものである。

星・惑星系誕生の現場を超高解像力で見ると

これまでのミリ波観測から、分子雲中の局所的に密度の高い分子雲コアが進化して星形成が進む様子が明らかになりつつある。しかし、望遠鏡の解像力と感度不足から、原始星のご本尊を拝むことができないでいるのが実状である。

ミリ波干渉計観測から原始星周辺円盤の大局的構造が見えているが、解像力の限界で太陽系以下のサイズについては構造がよく分かっていない。ALMAでは、高い感度とハッブル宇宙望遠鏡を10倍上回る解像力、そして高い分光能力を生かして、周辺ガスが落下してまさに星が誕生する様や、多くの恒星でそうであるような2重星や多重星の形成の研究が大きく進展すると期待される。

ALMAの最大配列では口径14 km相当の巨大な反射鏡の解像力に対応し、波長0.5 mmでは0.01秒角の角度分解能が実現できる。我々にもっとも近い（とはいっても450光年先の）星形成領域のおうし座分子雲では、0.01秒角は1AU（天文単位）程度の距離に対応する。ALMAでは、ダスト（固体微粒子）熱放射のサブミリ波観測から初めて原始惑星系円盤の構造を分解することが可能となり、分子輝線観測からその化学進化や運動状態についても情報を得ることができる。

この分解能をもってしても、誕生した惑星自体の画像を得ることはできないが、惑星系のもとになった円盤の形状や運動を克明に調べることができる。特に、ダスト円盤の半径方向分布や惑星形成に伴ってできると理論的に予想されているリング状間隙を画像化することができ、コンピュータシミュレーションによる理論的研究に精度の高い制限条件をつけることが可能となる（図2）。また、サブミリ波でのダスト熱放射の高解像力偏波観測は原始惑星系円盤における磁場の役割について新しい知見をもたらすであろう。

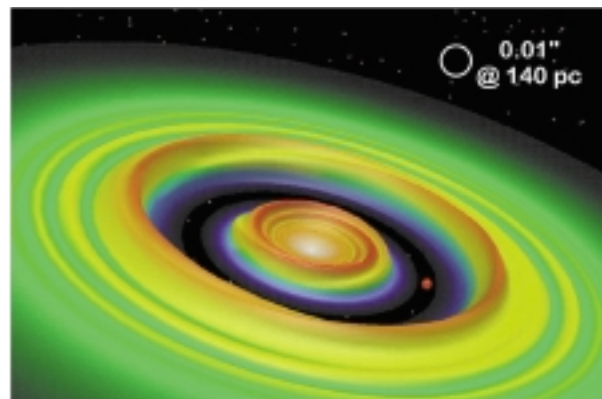


図2：コンピュータシミュレーションによって予想される原始惑星系円盤の構造と、これがおうし座分子雲にあったときに得られるALMAの解像力の比較。（Bryden、1999年）

現在、星の揺れという間接的な観測から、多くの星の周辺に多様な形態で惑星が存在している事実が積みあげられている。ALMAでは、惑星系誕生のプロセス、とりわけ興味深いダストの成長過程や惑星の多様性を生む初期条件などが多くの観測例から統計的に解明することが可能となる。ALMAは電波観測の立場から「比較惑星系学」に貢献し、わが太陽系が特殊な惑星系であるかどうか、地球のような惑星がどのようにして誕生し生命を宿すことができたのかなど、人類のルーツを宇宙的な視点でとらえることを可能にするであろう。

サブミリ波で宇宙の‘暗黒時代’を見る

この分野もALMAによるサイエンスの大きな柱の一つである。ALMAでは宇宙年齢が今の10分の1程度以下（赤方偏移 $z = 5$ より遠方）の‘暗黒の時代’に最初に形成された銀河を検出できる。光学望遠鏡では光がダストにさえぎられるため、ダストに包まれた形成中の銀河を見ることができない。ALMAでは、星によって暖められたダストが放射する遠赤外線にピークを有する電磁波スペクトルがサブミリ波の波長に赤方偏移するため、宇宙年齢で100分の1（赤方偏移 $z = 20$ の距離）あたりまで迫ることが可能となる。ALMAのような視野の狭い望遠鏡は、天空を2次元的に探査するには向いていないが、ALMAの検出感度を生かすと、奥行き方向で大きな空間を探査することが可能となる。ハッブルやすばる望遠鏡で観測された遠方宇宙の画像で真っ暗闇の部分にも多くの未知の天体が発見されるに違いない。

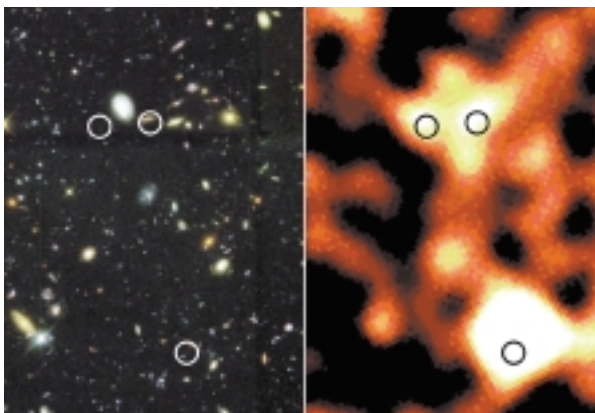


図3：ハッブルディープフィールドの一部(左)と、対応する領域のJCMT望遠鏡によるサブミリ波イメージ(右)。(Hughesら、1998年)

図3はその1例である。ハワイマウナケア山頂にある口径15mのJCMTサブミリ波望遠鏡では、確かにそのような兆候を捉えている。ハッブルディープフィールドは人類が手にした最も深い宇宙の光学イメージであるが、サブミリ波で明るい部分にそれらしき天体が何も写っていないのである。おそらくこのようなサブミリ波天体は、ダストのヴェールに覆われた誕生間もない銀河や銀河団である可能性がある。ただし、世界最大のサブミリ波望遠鏡であるJCMTをもってしても、その解像力、感度の欠如のため、詳しいことはよく分からない状況にある。特に解像力が低いと、分解されない多くの天体の存在が集合的に雑音として作用するため、微弱な天体の検出を大変困難にさせる。ALMAではJCMT望遠鏡が見ている画素1点を少なくとも100～1000に分解可能であり、未知の微弱天体を数多く発見することができるようになる。ALMAはすばるやハッブル宇宙望遠鏡が見る遠方銀河のさらに遠くへと人類の観測可能空間を拡大し、観測的宇宙論を大いに進展させるにちがいない。

建設・運用のイメージ

ALMAでは、特定の国が建設費の大きな部分を負担して主導権をとるプロジェクトとは異なり、費用負担、プロジェクトマネジメント、観測時間等において3者が対等になることを目標としている。日本の天文学コミュニティにとっては、このような大規模な国際協力に参加するのは初めてであるばかりでなく、かつて経験したことのないプロジェクトマネジメントに参画することになる。ALMAの建設においては、大部分3者がそれぞれ全体の三分の一の価値に相当する装置を持ち込む方式（いわゆるインカインド方式）をとり、完成後もESO（ヨーロッパ南天天文台）のような政府間機関を設立することはしないで、3者が共同運営することを想定している。

何故このようなややこしい事をするのかと、よく聞かれる。これは前に述べたように、ALMAが最初から単一の計画として構想されたのではなく、日米欧の3計画を統合した計画であることに由来する。財布を一つにして強力なトップダウンマネジメントで計画を進めると

いうよりは、むしろ3者の協議によって物事を進める形態をとっている。ALMA評議会やサイエンスおよびマネジメントに関する諮問委員会の委員だけでも総勢60名にもなり、意思決定に大変時間がかかる。建設は、ALMA合同プロジェクト室チーム(10名程度)と、アンテナや受信機など6つの作業チーム(メンバーは日米欧に分散)が中心となって進める予定である。運用フェーズでは現地雇用も含め200名以上のスタッフが働くことを想定している。

標高5000mの望遠鏡サイトは人間にとって大変過酷な環境である。また、ハワイマウナケア山頂に建設したすばる望遠鏡と異なり、ALMAではすべてのインフラを自ら構築しなければならない。運用を標高の低い所から遠隔制御で行うため、標高3000mに山麓運用施設を建設し、約40km離れたサイトまで専用道路と信号伝送用光ファイバを敷設する。アンテナの建設や受信機の最終組み立て・調整等は運用施設で行い、完成したアンテナは移動台車でサイトまで

運搬する。信頼性のある運用を確保するため、装置は交換しやすいモジュール構成をとり、基本的に修理等はアンテナを含め装置を運用本部まで運んで実施する予定である。12mアンテナは全体予算の大きな部分を占めるので、2003年に米国ニューメキシコ州ソコロ(米国国立電波天文台VLAサイト)で日米欧3者のプロトタイプアンテナの比較評価試験を行い、その結果選択されたベストな単一デザインにもとづいて量産体制に入る。

おわりに

すばる望遠鏡を通じて日本は巨大科学装置を海外に建設するという大事業を成し遂げた。ALMAでは、それに対等な国際協力で世界的な装置を建設するという新しい挑戦が加わる。特に、日本と米欧との間の予算や人のシステムについての違いをどう調整していくかは大きな課題である。今後の日本の科学プロジェクトの試金石ともなるこの計画を、各方面のご協力により是非とも実現に導き、そして成功させたいと願っている。

アタカマ砂漠放浪記

電波天文学研究系 助手 阪本 成一



【標高5000m地点にて】

ALMAの建設候補地は、ボリビア・アルゼンチンとの国境にほど近い、チリ・アンデスの標高およそ5000mの高原にある。年間降水量わずか数mmというアタカマ砂漠と6000m級の山々を連ねるアンデス山脈との交点にあたるこの地域は大気が非常に乾燥しており、ALMAがねらうサブミリ波の観測のためにはもってこいなのである。我々は1996年からここに海上輸送用のコンテナや太陽電池パネルを持ち込み、大気の透明度やゆらぎなどの観測条件を測定している。現在ではデータはラップトップコンピュータに蓄えられ、数か月に一度データを回収すればよいようになっている。このコンテナの内壁には、これまでにここを訪れた人たちの名前がびっしりと書き連ねてある。数えたことがないので正確な数字は分からないが、多分50名は超えているだろう。この中には当時の会計係長

の「備品確認済」というサインもある。



写真1：パンパ・ラ・ボラ(標高4800m)でのサイト調査の様子。ここから約7km離れたリャノ・デ・チャナントール(標高5050m)にも米欧のチームの同様の調査装置が置かれている。

あいにくチリは日本から見て地球のほぼ裏側に位置する「辺境」である。最近サンチャゴ

までは米国ダラスでの1回の乗り継ぎでたどり着けるようになったが、それでも最寄りのカラマ空港に到着するのは日本を出発してから36時間後で(実際に飛んでいる時間は約24時間)、到着する頃にはおしりが「床ずれ」のような状態になる。それでもカラマ空港からホテルまではハイウェイを車で一直線に約1時間、ホテルから候補地までがやはり舗装路で1時間弱なので、天文学観測の地上究極のサイトとしては許せるレベルのアクセスだといえるだろう。それにしても、これまでの私のチリ渡航回数を15回とすると、往復だけで約1か月を機中で過ごしたことになる。複雑な心境だ。



写真2：ALMA建設候補地から持ち帰ったペットボトル。左側が標高5000mでの元の姿で、右側がサンチャゴ(標高500m)での姿。

ところで標高5000mといえは気圧は平地のおよそ半分。すばる望遠鏡のあるマウナ・ケア(標高4202m)はおろか、ヨーロッパ最高峰のモンブラン(標高4808m)の山頂よりもさらに高い。候補地で飲んだミネラルウォーターのペットボトルも平地に戻ると原形をとどめない。ちなみに水の沸点は87だそう。それでも数日山頂で作業するうちには体が次第に慣れてきて、サッカーをできるようになったりする。人間の適応力は本当にすばらしい。

極度の乾燥と薄い空気のため、建設候補地では天文学者以外の生き物はあまり見かけない。ときおり見かけるのはビクーニャという小型のリヤマヤトカゲなどである。小鳥が飛んでいるのも時々見かける。特に羽根の面積が大きいようにも見えないから、きっと羽ばたきの回数で稼いでいるのだろう。がんばれ。

【麓にて】

ALMAの山麓施設を置くことになるサンペドロ・デ・アタカマは、アタカマ塩湖の端に位置する人口わずか2000人のオアシスの村である。標高は約2500mで、高地順応するためにも理想的な高さにある。このあたりはイースター島やパタゴニアと並ぶチリの3大秘境となっており、チリ国内やヨーロッパなどから普通の観光地に飽きた金持ちなどが押し寄せるそうである。実際、現地のレストランは、2月頃の現地の夏休みシーズンになると、そういった金持ちの団体客やバックパッカーでごった返す。最近では日本人観光客もたまに見かけるようになってきた。観光客はここを拠点に砂漠や間欠泉などを見に行くのだが、将来ALMAが完成した暁にはきっとALMA見学ツアーも新たな観光コースとして加わり、砂漠の村の観光ビジネスに貢献することだろう。

ところで日本人の多くは砂漠というとサハラ砂漠や砂丘のような場所を想像するかもしれない。しかし、アタカマ砂漠はいわゆる岩砂漠で、風景としてはむしろグランドキャニオンあたりに似ている。ここでは夏の短い雨季を除いて雨がほとんど降らないため、道には排水溝もない。民家やホテルはアドビとよばれる日干しレンガでできている。レストランには屋根がない。だから30年ぶりとかいう大雨に遭うと大騒ぎで、道はみるみるうちに川になり、民家の壁は溶け出し、レストランは水浸しとなる。

このオアシスの水はアンデスの雪解け水が伏流水として延々と運ばれてきたものである。何とおいしそうに響きだろう。しかしそれを口に含んではいけない。その実体は単なる濁った塩水で、ミネラルが多すぎて全く飲めない。仕方なく我々はビールやワインを飲むのはめになるのだ。

その代わりといっは何だが、チリのビール(チリビールというのがあるが、これはアメリカ産の別物で、辛い)やワインは安くてとてもおいしい。最近の赤ワインブームではチリワインが大ブレイクしたが、砂漠で飲むビールもなかなかのものである。チリのお酒でもうひとつ無視できないのはピスコである。ブドウから作った透明な蒸留酒で、ホワイトブランデー(イタリアでいえばグラッパ)の一種で、30%から46%まで何種類もあり、度数の高いものほど高

級だとされている。残念ながら日本で売っているのを見かけたことはないが、現地では日本の焼酎に似た扱いで庶民向けに売られていて、日本円にして数百円程度で750ml入りのピスコが買える。現地ではこのピスコをレモンジュースで割って砂糖を加えたピスコサワーというのが飲み方の主流だが、個人的にはストレートの方がおいしいと思う。こうしてチリの夜は更ける。

【南へ広がる望遠鏡群】

晴天率の高いチリ北部は、今や南半球の天文観測のメッカである。口径8mの光学望遠鏡4基からなるVLTを擁するヨーロッパ南天天文台(ESO)のパラナル観測所、3.6m望遠鏡2台などを中心とするESOのラ・シヤ観測所、ジェミニ観測所、マゼラン観測所、アメリカ国立光学天文台のセロ・トロコ観測所、アメリカ・カーネギー財団のラス・カンパナス観測所など、世界屈指の観測施設がチリ北部の限られたエリアに集中している。

日本の大学グループも健闘している。東京大学天文学教育研究センターが1994年から世界最小のミリ波望遠鏡"VST"をラ・シヤ観測所構内で運用しており、1996年からは名古屋大学がラス・カンパナス観測所構内で口径4mのミリ

波望遠鏡"NANTEN"を定常運用し、マゼラン雲の観測などで世界的な成果を挙げている。また、東京大学の物理学教室では口径わずか18cmのサブミリ波望遠鏡を製作し、サーベイ観測をするべく調整中である。

言葉の問題は深刻になりつつある。チリの公用語はスペイン語で、英語の通じなさは日本並みである。すぐに通じなくてもこちらが辞書を引くのを気長に待っていてくれるので辛うじてコミュニケーションは可能だが、標高5000mのところでは現地の業者の人たちと身振り手振りで仕事の話をするのはかなりきつい。もはやスペイン語会話は観測天文学者にとっては必須なのである。

この冬には野辺山での評価試験を終えた口径10mの技術試験アンテナがいよいよチリに旅立つ。この望遠鏡は現地での性能評価試験のために用いられるが、それと同時に南天では初、世界でもまだ4番目の大口径のサブミリ波望遠鏡となる。「アタカマサブミリ波望遠鏡実験(ASTE)」と呼ばれるこの計画は、ALMAの実現に向けた装置面・研究面での大きなマイルストーンとなる。大小のマゼラン雲が妖しい光芒を放ち、銀河系の中心が天頂を通るこの南の空に、いったい何が潜んでいるのか、今から観測が待ち遠しい。

ALMAを支える最先端技術

電波天文学研究系 助手 井口 聖



【ALMA 観測装置概要】

ALMA 本装置の基本仕様は、30GHz から950GHzの周波数領域をカバーし、口径12mのアンテナ64台からなる可動型干渉計である。最大基線長を約14kmとし、光学域やミリ波サブミリ波帯で未だ達成されていない0.1秒角さらには0.01秒角の高空間分解能を目指す。このような究極の性能を持った地上電波望遠鏡の建設にあたり、様々な新しい技術を開発する必要がある。特に、高い面精度が要求されるサブミリ波アンテナや超低雑音の高性能サブミリ波受信機、テラビット高分散相関器の開発など、いくつかの技術的ブレイクスルーなしには本計画

は達成し得ない。現在、64台のサブミリ波アンテナ、サブミリ波受信機にサブミリ波を発振するフォトリック局部発振器、そして、64の受信信号を干渉させるテラビット高分散相関器の技術開発検討が進められている(図1)。

【サブミリ波アンテナ】

波長300 μ mまでのサブミリ波帯では大気の透過率が70%を超える観測の「窓」がいくつも存在し、そこには重要なサブミリ波の原子・分子の輝線が数多くある。効率の良い観測・高精度の観測のためには主鏡面全体としての鏡面誤差が観測波長の約1/20以下であることが要求さ

れると一般的にいわれており、また、良好なアンテナのビームパターンを得るためには開口能率が50%以上であることが必要である。900 GHz帯(観測波長330 μm)までのサブミリ波観測のためには鏡面精度20 μmを上回る高精度アンテナが必要となる。例えば900 GHzでは、鏡面精度25 μmのアンテナの開口能率は35%に満たないが精度20 μmならば約50%であることがこの図から分かる。

ALMAでは、軽量・高精度金属鏡面加工技術によって軽量(15kgm⁻²)で高精度(誤差5 μm)の主鏡面パネルを製作し、電波ホログラフィ法を用いた主鏡面パネル調整などによって20 μm以下の鏡面精度を達成し、高精度サーボ・メカトロニクス技術によって0.6秒角以下の指向精度を実現することを目指している。

ALMA素子アンテナを念頭に置きつつ、超高精度アンテナを設計・製作し、完成させた(図3)。

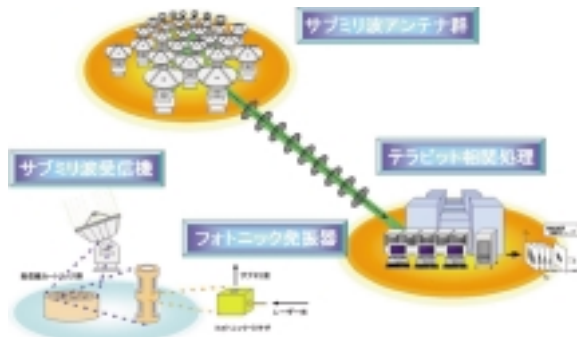


図1：ALMA観測装置イメージ。サブミリ波アンテナ、サブミリ波受信機、フォトニック発振器、テラビット高分散相関器といった最先端技術によってALMA観測装置は実現される。

パネル表面は、夜間の放射冷却による熱変形を避けるために白色塗装をせず、薄い保護膜コーティングのみとした。機械加工面はなめらかで、可視光でもほとんど散乱がないため、昼間は太陽光の集光による問題が発生する。ALMAサブミリ波アンテナ用パネルでは、特殊表面処理を行い、太陽光を十分散乱させる方式を採用する。

【サブミリ波受信機】

受信機は、アンテナで集光された天体からのミリ波・サブミリ波帯の微弱な信号を伝送し、増幅可能な中間周波数に変換し、出力する役割を担う。重要となる要素は、アンテナ光学系と

Surface Accuracy and Wavelength

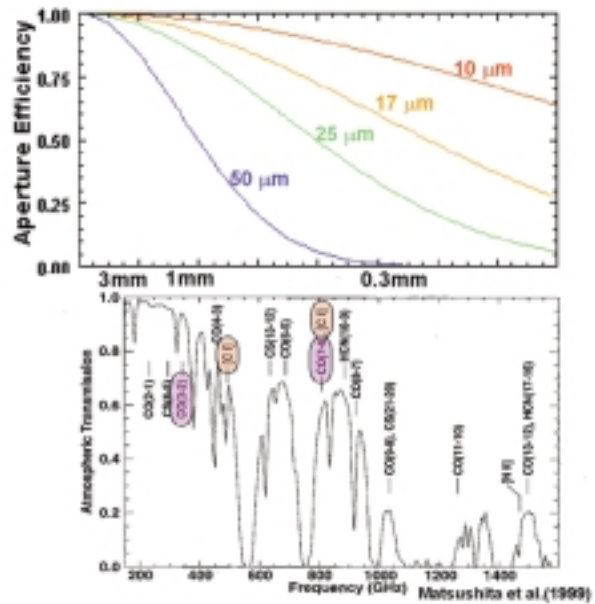


図2：鏡面精度とアンテナ開口能率の関係(上図)と、ALMA建設候補地であるチリ共和国アタカマ高原Pampa la Bola(標高4800m)における大気の透過率(下図)。



図3：野辺山宇宙電波観測所の構内に完成した超高精度アンテナ。

の高効率での結合する光学系、低雑音のミキサ、広い周波数帯の増幅器などである。受信機フロントエンド系は光学系、ミキサ素子、冷却低雑音アンプなどの複数のコンポーネントで構成される。100GHz帯より高周波では、超伝導トンネル素子であるSIS(Superconductor-Insulator-Superconductor)をミキサとして用いた受信機が主流となっている。ニオブ(Nb)をベースにしたSIS素子技術で650GHz帯までの超低雑音受信機は実現可能であり、地上から観測可能な700GHzまでの周波数帯ならば比較的雑音の受信機を開発することができるのである

う。しかし700GHzより高い周波数では電極のNbの吸収による信号損失が予想されるため、ギャップ電圧の大きい窒化ニオブチタン(NbTiN)等を電極に用いた超伝導ミキサの開発も行っている。

ALMAでは、30GHzから950GHzの周波数領域を10個の観測周波数帯域に振り分けた。ALMAの受信機は周波数バンド毎のカートリッジ・受信機光学系・常温IF系・温度構成部から成り立っている。70GHz以下の低周波のバンドにはHEMT (High Electron Mobility Transistor) を用い、短ミリ波からサブミリ波に対応するバンドにはSIS受信機を用いる。バンド毎に受信機内カートリッジを製作する。

【フォトリック局部発振器】

ALMAでの波受信機では、上記に示したようにヘテロダイン法が使われている。ミリ波・サブミリ波帯での局部発振器として最も標準的な方法は、ガン発振器などの半導体発振器と逡倍器を組み合わせたものである。しかし、この方法では、機械的チューニング機構なしで広帯域での信号発生は困難である。そこで、NTTフォトリック研究所で開発された超高速フォトダイオードを用いて、NTTと国立天文台との間で、フォトダイオードを波長3mm帯の導波管に組み込んだフォトリックミキサ(図4)を開発し、世界における同様な方式での出力に比べ20倍以上高い出力(約1ミリワット)を発生されることに成功した。しかも、2波長のレーザー光の波長間隔を調整することにより、波長3mm帯で75GHz~110GHzという極めて広帯域で平坦な出力特性を実現した。レーザー光の波長は通信分野で標準の1.55ミク

ロンを使用しているため、将来の技術発展への即応性という面でも大変有利である。

14kmの範囲に配置された64台のアンテナを結合する上でも、高純度の基準信号を分配するには光ファイバ伝送が唯一可能な方法であり、約1000台近い受信機カートリッジの安定な運用にとって可動部分のないフォトリック局部発振器は大変有利な方法である。

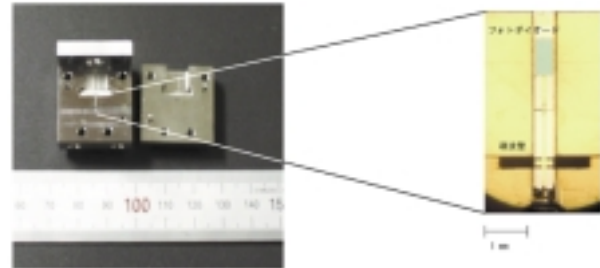


図4：導波管フォトリックミキサの構造。本フォトリックミキサには大掛かりな光学系を介さないで光ファイバから直接レーザー光を注入できるため、装置は超小型で手のひらにのるサイズである。

【テラビット相関器】

天体からの微弱な信号を検出するためには、広帯域の信号処理技術が必要である。ALMAでは、アンテナ1台当たり約100Gbps総情報量6Tbpsの超高速データ伝送と2016基線4偏波成分の広帯域相関器を実現する。そのために、超高速で動作する高度な集積回路技術や、64台のアンテナと相関器を結合する超高速光ネットワーク技術の開発を行う。両偏波、両側帯域を観測すると、最大1秒間に約800テラビットの相関処理を行うことになる。このテラビット相関器は、空気の薄い2000m以上の高度で運用するので、低電力化やゆとりのある基盤設計を十分に押し進めて行く。

NMAからALMAへの期待

東京大学大学院 理学系研究科 芝塚 要公



高密度分子ガスと星形成

激しい星形成を起こすstarburst銀河には、星の材料となる豊富な分子ガスの存在が不可欠です。しかし豊富なガスが存在しているにもかかわらず、starburstを起こさない銀河も報告さ

れています。この事は激しい星形成には、分子ガスの「量」の他にもうひとつ、「質」が大きな役割を果たしている事を示唆しています。私達、野辺山ミリ波干渉計(NMA)の銀河グループは、その観点から、系外銀河の分子ガスの「質」

物理状態を調べる観測を行ってきました。

分子ガスの物理状態を知るためには、異なる励起条件の輝線の比をとるのが有効な手段です。例えばCO(J=1-0)はミリ波の分子輝線中では最も励起しやすく、全分子ガスの量をトレースしていると考えられています。一方HCN(J=1-0)は臨界密度が高いため、高密度分子ガスの量をトレースすると考えられています。この両者の比をとる事で、「全分子ガス中の高密度分子ガスの割合」を知る事が出来ます。図1は、河野らによるHCN/CO輝線強度比と星形成効率の関係図です。この図は銀河中心の星形成と分子ガスの物理状態の間に関係がある事を示唆しており、非常に興味深い結果です。

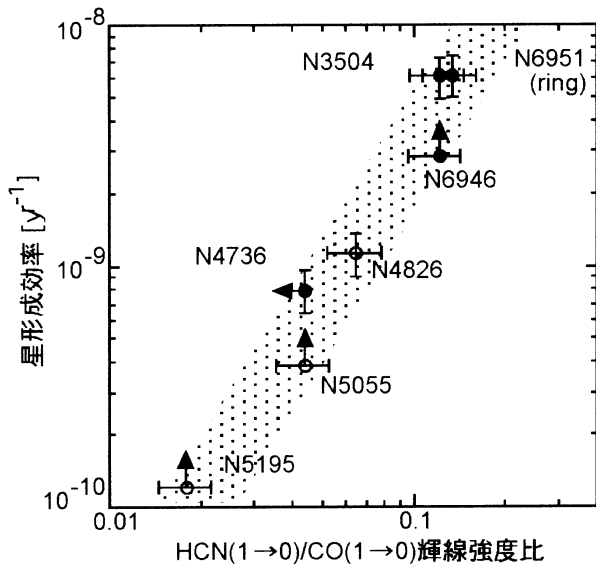


図1：HCN/CO輝線強度比(分子ガス中に含まれる、高密度分子ガスの割合の指標)と、星形成効率との相関。

星形成領域における分子ガスの物理状態

HCN/CO比が示した結果は、最初の前提「質より量」が正しい事を示唆していました。そこで私達はこの結果を受けて、星形成領域における分子ガスの物理状態を幅広く把握する為に、近傍銀河の多輝線撮像サーベイをはじめました。図2はその中の一つNGC 3628の結果の一部ですが、中心領域でHCNとHCO⁺の分布が大きく違っている事が分かります。HCNとHCO⁺はほぼ同じ臨界密度で励起する事から、この両者の分布の差は主に存在比によるものだと考えられ、ひいては分子ガスの電離度を反映していると考えられます。この他にも私達はC¹⁸Oや¹³CO、CS等の輝線の観測を実行中であ

り、近傍銀河における分子ガスの物理状態を研究しています。

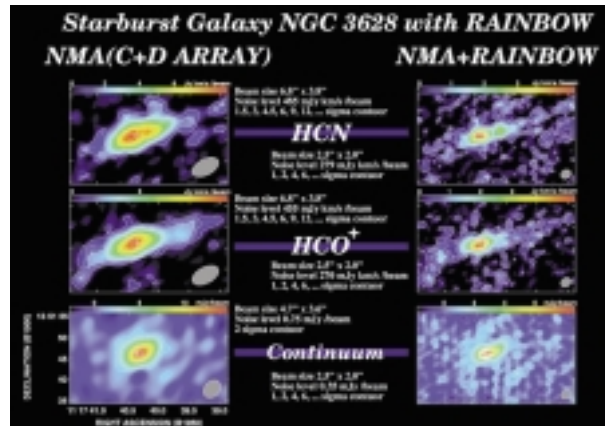


図2：NMAとRAINBOW干渉計によるNGC 3628の高密度分子ガスの観測。HCNとHCO⁺の間で分布が異なっているのが興味深い。

そしてALMAへ

しかしこの観測には技術的な大きな問題が存在します。それは感度と分解能という壁です。CO以外の輝線は、明るさが一桁以上暗いため、長い積分時間を必要とします。さらに、星形成領域を選択的に観測する為には、高空間分解能も必要になります。これらの制限のため、現在の多輝線観測は近傍の明るい銀河のみに限られます。現在のNMAでは、多数のサンプルからなる統計的な研究には残念ながら非力であると言えます。しかしALMAが完成すれば、その驚異的な性能でこの問題をクリアする事が可能になります。さらにそれどころか遠方の原始銀河の分子ガスの物理状態まで光をあてる事が可能となるでしょう。それは、分子ガスの物理状態が銀河の進化においてどのような役割を担ったかという非常に重要な観測が可能である事を意味しています。

ALMAが持つ驚異的な性能は、これらの観測の実現に大きな期待を私達に抱かせます。ALMAの建設が具体的になりつつある現在、私達はその期待を糧に計画の推進に参加して行きたいと考えています。

ALMAに期待すること

総合研究大学院大学 横川 創造



1. スーパーミリ波・サブミリ波干渉計ALMA

ALMAは画期的なミリ波サブミリ波干渉計である。干渉計のイメージング感度は、同時に得られる相関数の平方根に比例して向上する。ALMAのアンテナ総数は64台であるので、その相関数は2016になる。この相関数は、野辺山ミリ波干渉計(6台)の15相関と比べて2桁、世界最高のセンチ波干渉計であるVLA(27台)の351相関と比べても1桁上に行く。更にサブミリ波でも高い開口能率を維持できる超高精度な鏡面や、高いアンテナ指向精度、低雑音の受信機、広帯域相関器、そして地球上で最もミリ波・サブミリ波観測に適した高度4800mのサイトなど、全ての項目において既存のミリ波干渉計を凌駕するのである。その性能は凄まじく、例えば連続波に対するイメージング感度は、既存のミリ波干渉計(例えばNMA)の数100倍以上になると見積られている(表1)。またアンテナを最大10kmの基線長で配置することで、ミリ波では $0''.1$ 以下、そしてサブミリ波では $0''.01$ に迫る空間分解能を実現できる。これはHSTやスバル望遠鏡といった可視・赤外線望遠鏡をも上回る空間分解能である。既存のミリ波干渉計を大きく上回る性能、それもファクターで上回るのではなく、2桁上も上の性能を実現しようと言うのである。

そりゃ、ALMAに期待するでしょう。

2. ALMAで原始惑星系円盤を観測する

小質量星形成およびその周囲に形成される原始惑星系円盤の研究は、太陽系の起源と密接に関連したテーマであるため、天文学のみならず惑星科学分野においても重要な研究テーマである。1980年代、赤外線天文衛星IRASは、原始星・Tタウリ型星の多くが赤外線超過放射を伴っている事を明らかにした。その後1990年代後半になると、ミリ波干渉計を用いた観測によって、原始星に落ち込むガスの様子やTタウリ型星に付随するケプラー回転ガス円盤などが相次いで発見されるようになった^[3,4]。

またミリ波連続波でも、半径100AU程度の広がりを持つダスト円盤の存在が直接的なイメージとして捉えられるようになり^[5,6]、星形成・惑星系形成の理論モデルに対して観測的制限を提供できるようになってきた。しかしながら、既存のミリ波干渉計で達成できる空間分解能は、原始惑星系円盤の観測には、まだまだ不十分である。例えば、近傍星形成領域であるおうし座分子雲までの距離は $\sim 140\text{pc}$ であり、 $1''$ (NMAにおける最高空間分解能)は同領域で140AUに相当する。このサイズはダスト円盤とほぼ同じサイズであるため、既存のミリ波干渉計では原始惑星系円盤の詳細な構造をイメージから直接導き出すことは困難である。内部構造を議論するには、適当な温度分布や面密度分布を仮定したモデルに頼るほかないのである。し

	有効面積[m ²]	T_{sys} [K]	開口能率	帯域幅[GHz]	Total
ALMA	7235	50	0.79	8	
NMA	471	650	0.60	2	
ALMAの優位性	$\times 15.4$	$\times 13$	$\times 1.31$	$\times 2$	$\times 524$

表1: NMAとALMAでのイメージング感度に関わるパラメータの比較。 T_{sys} は110GHzでの値である。帯域幅はその平方根が感度の比として現れる。なお、NMAでの値は現行システムでの典型的な値であり、ALMAでは達成目標の値である。ALMAについてはALMA Memo No.276から引用^[1]、NMAについてはNMAステータスレポートから引用してある^[2]。

しかしALMAであれば、原始惑星系円盤内部領域の直接的な観測が可能となる。ALMAで達成される $0.1'' \sim 0.01''$ という空間分解能は、おうし座分子雲などの近傍星形成領域では $1.4 \sim 14\text{AU}$ に相当する。この分解能とALMAの高いイメージング能力を持ってすれば、円盤内部のダストの不均一性や円盤を取り巻くガスの化学進化を、高空間分解能かつ高品質で得る事が出来るであろう。さらに近傍星形成領域だけではなく、比較的離れた分子雲においても個々の天体を分解して観測出来るようになる。そのため、おうし座分子雲やオリオン座分子雲に存在する天体だけではなく、数多くの星形成領域における星形成現場を統計的にサンプリングし、形成場所による多様性や個々の特性などの幅広い統計的な議論が可能となるであろう。また既存の干渉計では感度不足で観測が困難な弱輝線Tタウリ型星やベガ型星などの'ネクラ'な天体についても、ALMAであれば十分に観測可能であり、ダスト円盤内部において惑星が形成される現場を捉えられる可能性がある。空間分解能が上がることにより、光赤外線望遠鏡と対等な分解能で比較できるメリットもある。スバル望遠鏡やHSTなどで観測した原始惑星系円盤のイメージ、中間赤外線観測によって得られるダスト粒子のシリケート特性などの情報と、ALMAで得

られるイメージとを比較することも出来る。例えばダストオパシティの周波数ベキ係数である(ダスト粒子の成長の指標となると考えられている。星間空間に存在するダストだと ~ 2 であるのに対し、原始惑星系円盤内では ~ 1 を示す事が観測的に知られている。)の空間分布と $10 \mu\text{m}$ のシリケートフィーチャーとの比較は、ダストサイズの違いの他に、鉱物組成の違いについても何らかの情報を提供してくれるに違いない。少し考えただけでもアイデアは沢山湧いてくる。比類なきミリ波サブミリ波干渉計であるALMAは、ALMAでしか観測できない世界を見せてくれるであろう。私は小質量星形成に感心をもって研究をしているが、ALMAが太陽系起源論や惑星系起源論に対して多大なインパクトを与える装置である事は断言できる。

参考文献

- [1] Bryan Butler and Al Wootten, 1999, ALMA Memo No.276
- [2] NMA status report, <http://www.nro.nao.ac.jp/status/status-j.html>
- [3] Dutrey et al., 1998, A&A, 338, L63
- [4] Momose et al., 1998, ApJ, 504, 314
- [5] Looney et al., 2000, ApJ, 529, 477
- [6] Yokogawa et al., 2001, ApJ, 552, L59

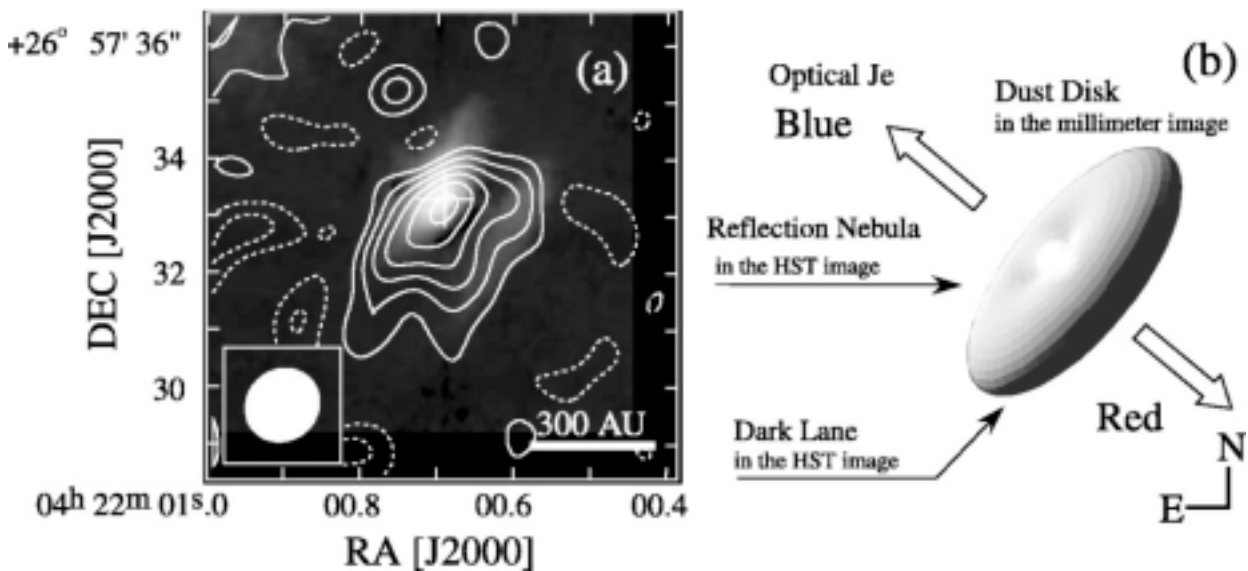


図1：野辺山ミリ波干渉計で観測した、原始星 Haro 6-5Bの星周ダスト円盤イメージ(グレイスケール：HSTでの近赤外線イメージ、コントア；2mm連続波イメージ)。Haro 6-5Bはおうし座分子雲(距離 $\sim 140\text{pc}$)にあり、円盤の半径は $\sim 300\text{AU}$ である。このイメージの角度分解能は $1''.3 \times 1''.2$ であり、これはNMAで達成できる最高の角度分解能とほぼ等しい。既存のミリ波干渉計では角度分解能が不十分なため、原始惑星系円盤を辛うじて空間的に分解するのが精一杯である。しかしALMAでは最高で $0''.01$ の空間分解能を達成できる。ALMAで見る原始惑星系円盤はどのような姿であろうか。

お知らせ

すばる建築 文教施設部長賞受賞

すばる望遠鏡の建物は、世界最大級の光学赤外線望遠鏡である「すばる望遠鏡」の最良の観測環境を作り出すため、望遠鏡の一体施設として設計され、1992年6月から1995年10月にかけてハワイ島マウナケア山頂に建設されました。

望遠鏡下部となる「ドーム下部」と、望遠鏡の熱対策のため、ドームと距離を置いて建てられた、観測やメンテナンス施設となる「制御棟」の2つの建物からなり、ドーム地階と制御棟3階を連絡通路で接続し、両建物で発生した熱は、排熱トンネルを通して建物から離れた場所に排熱しています。

2000年3月までに観測装置等も完成し、2000年12月から共同利用を開始したことに合わせて、今回「平成12年度文教施設部長賞：国立学校優秀施設（技術部門）」を受賞し、同表彰式が5月31日に開かれた国立大学等施設担当部課長会議の席上行われ、小田島文教施設部長から表彰状と楯が贈られました。



BAYTAP-G 開発グループ、 測地学会坪井賞第一回団体賞に輝く

平成5年にスタートした測地学会賞の坪井賞に今年から「団体賞」が設けられ、その第一回がBAYTAP-G開発グループ[田村良明(代表)、大江昌嗣、佐藤忠弘、中井新二(以上 国立天文台水沢)、石黒真木夫、赤池弘次(以上 統計数理研究所)]に贈られました(個人賞は国土地理院の飛田幹男氏が受賞)。6月7日の測地学会総会(国立オリンピック記念青少年総合センター)の

席で受賞者に賞状と副賞が手渡され、代表者の田村良明氏(地球回転研究系)から受賞講演が行われました。

受賞対象研究は「潮汐解析プログラム BAYTAP-G の開発研究」で、そもそもは1980年代はじめに当時の緯度観測所と統計数理研究所が共同で始めた基礎研究に端を発しています。情報量基準(information criterion)の概念を取り入れて、潮汐観測データから潮汐と地殻変動という原因も変動の様子も大きく異なる成分を同時に解析でき、極めて広範に利用できる画期的な潮汐解析プログラムが開発され、BAYTAP-Gの名前で知られるこのプログラムは国内外の多くの研究者に広く使われています。

プログラムの利用者は地殻変動研究者にとどまらず、海洋物理学、海洋底地球科学、気象学、地震学、地球電磁気学、水文学など、潮汐そのものを研究対象としていなくても、観測データに潮汐のシグナルが影響する様々な分野の研究者に重宝されています。水沢の研究グループでも地球潮汐の流体核共鳴効果の解析や、超伝導重力計データの長周期潮汐項の解析にBAYTAP-Gを使用して成果を挙げています。比較的地味な存在のソフトウェアですが、地球科学を支える基礎技術の重要なコンポーネントとしての価値が認められ今回の栄えある坪井賞第一回団体賞の受賞となりました。受賞グループの健闘をたたえるとともに、今後のさらなる発展を願いたいと思います。

日置幸介(地球回転研究系)

人事異動

平成13年7月1日付け

昇任

柴崎 清登	電波天文学研究系教授 (電波天文学研究系助教授)
真鍋 盛二	地球回転研究系教授 (地球回転研究系助教授)
吉田 道利	光学赤外線天文学・観測システム研究系助教授 (岡山天体物理観測所助手)

共同利用案内

国立天文台岡山天体物理観測所 観測日程表

(2001年7月～12月)

188cm 望遠鏡		91cm 望遠鏡	
7.23 - 7.29	Cs3DS(T) 河合、菅井、服部、石垣 NGC6543の輝線撮像	7.23 - 8.6	所長預かり
7.30	観測所時間		
7.31 - 8.2	Cd HIDES 神戸、佐藤、安藤、竹田、柳澤他 EN Lacの微小振動検出		
8.3 - 8.6	観測所時間		
8.7 - 8.10	Cd HIDES 平田、増田、木全 B型輝線星の偏光変動の活動現象	8.7 - 8.10	HBS 川端、平田、岡崎、関、秋田谷他 HBSの較正観測
8.11 - 8.12	Cd HIDES 佐藤、安藤、神戸、竹田、泉浦他 G型巨星の視線速度精密測定	8.11 - 8.16	" 平田、岩松、川端 B型輝線星の偏光変動
8.13 - 8.15	Cd HIDES 神戸、佐藤、安藤、竹田、柳澤他 EN Lacの微小振動検出		
8.16 - 8.23	Cs Sp 長尾、村山、西浦、谷口 Narrow-Line Seyfert1の許容線	8.17 - 8.26	" 秋田谷、関、川端、松田 Vega-like星の星周ディスク
8.24 - 8.30	Cd HIDES 木全、泉浦、増田、平田、柳澤 赤色巨星の質量放出IV		
8.31 - 9.6	Cd HIDES(P) 竹田、神戸、佐藤、青木、定金他 惑星系を持つ恒星系	8.27 - 9.3	" 松村、濱坂、関、平田、川端他 単一星間雲の星間偏光
9.7 - 9.9	Cd HIDES 神戸、佐藤、安藤、竹田、柳澤他 EN Lacの微小振動検出	9.4 - 9.7	" 川端、関、池田、秋田谷、松田他 塵形成領域
		9.8 - 9.9	" 川端、平田、岡崎、関、秋田谷他 HBSの較正観測
9月10日～9月23日		整備期間	
9.24 - 9.30	観測所時間	9.24 - 9.26	HBS 川端、平田、岡崎、関、秋田谷他 HBSの較正観測
10.1 - 10.2	Cd HIDES 佐藤、安藤、神戸、竹田、泉浦他 G型巨星の視線速度精密測定	9.27 - 10.4	" 関、平田、松村、濱坂、川端他 星間偏光方位角の波長依存性
10.3 - 10.7	観測所時間	10.5 - 10.11	" 松村、濱坂、関、平田、川端他 単一星間雲の星間偏光
10.8 - 10.14	Cd HIDES 平田、増田、木全 B型輝線星の偏光変動の活動現象	10.12 - 10.21	" 磯貝、池田、川端、関 post-outburst時のBX Mon
10.15 - 10.17	観測所時間	10.22 - 10.28	" 平田、岩松、川端 B型輝線星の偏光変動
10.18 - 10.24	Cd HIDES 比田井、長田、本田、竹田、定金 F-K型ハロ－矮星と巨星の硫黄	10.29 - 11.1	" 川端、関、池田、秋田谷、松田他 塵形成領域
10.25 - 10.31	Cd HIDES(P) 竹田、神戸、佐藤、青木、定金他 惑星系を持つ恒星系		
11.1 - 11.2	Cd HIDES 佐藤、安藤、神戸、竹田、泉浦他 G型巨星の視線速度精密測定	11.2 - 11.25	所長預かり
11.3 - 11.7	観測所時間		
11.8 - 11.18	Cs HBS 秋田谷、関、川端、池田、松田 T Tau型星のHa輝線偏光	11.26 - 11.28	HBS 川端、平田、岡崎、関、秋田谷他 HBSの較正観測
11.19 - 11.21	観測所時間	11.29 - 12.3	" 川端、関、池田、秋田谷、松田他 塵形成領域
11.22 - 12.2	Cs OASIS 石井、佐藤、長田、姚、江、柳澤 中質量YSOの進化系統分類	12.4 - 12.11	" 松村、濱坂、関、平田、川端他 単一星間雲の星間偏光
12.3 - 12.9	Cs OASIS 田口、藤田、伊藤 褐色矮星形成	12.12 - 12.19	" 篠川、高橋、吉田、小川、伊藤 小惑星表面微細構造
12.10 - 12.12	観測所時間	12.20 - 12.25	" 関、平田、松村、濱坂、川端他 星間偏光方位角の波長依存性
12.13 - 12.19	Cs Sp 富田、竹内、吉川、岩田、石川他 矮小不規則銀河の星生成史	12.26 - 12.27	" 川端、平田、岡崎、関、秋田谷他 HBSの較正観測
12.20 - 12.26	Cd HIDES(P) 竹田、神戸、佐藤、青木、定金他 惑星系を持つ恒星系		
12.27	観測所時間		

: 新月 Cd HIDES : クーデ焦点エシエル分光器
 : 満月 Cs Sp : カセグレン焦点分光器
 Cs OASIS : カセグレン焦点近赤外カメラ
 Cs 3DS(T) : カセグレン焦点3次元分光器(持込み)

OOPS : 偏光撮像装置
 HBS : 偏光分光測光器

月の起源

- 巨大衝突により形成された円盤からの誕生 -

理論天文学研究系 助手 小久保英一郎



はじめに

私たちにもっとも身近な天体、月は、なぜそこにあるのでしょうか。月は地球の1/80もの質量をもつ衛星としては大きな天体です。その起源のシナリオとして近年有力視されているのは巨大衝突説です。巨大衝突説では、(1)火星くらいの大きさの原始惑星が原始地球に衝突し、(2)衝突により地球の周りに破片からできた原始月円盤が形成され、(3)この原始月円盤から粒子の集積により月が形成されます。このシナリオは地球-月系の大きな角運動量や地球と月の化学組成の違いを説明できると考えられています。

私は巨大衝突説にそって、原始月円盤からどのように月が集積されるのかを大規模N体シミュレーションを行なって調べました。今日は、その結果明らかになった月形成過程の運動学的なフレームワークを紹介したいと思います。

月集積のN体シミュレーション

月集積のN体シミュレーションは固体粒子でできた原始月円盤から始めます。粒子の運動は地球の重力、粒子間の相互重力、粒子どうしの衝突によって決まります。N体シミュレーションでは粒子間の相互重力を計算し、粒子の運動方程式を数値的に積分することによって粒子の位置と速度の時間進化を計算します。そして粒子どうしが衝突して、合体の条件を満たせば合体させます。

月集積のN体シミュレーションは文字通り、コンピュータの中に原始月円盤を作ってその進化を物理法則に従って計算する、という模擬実験です。シミュレーションの経過をモニターしているときに、目前で粒子が集まって月になっていく光景を見たときは興奮したものです。

原始月円盤の進化と月の力学的特徴

図1に典型的な原始月円盤からの月集積の例を示します。これはシミュレーションの結果をCGにしたものです。

(詳しくは <http://th.nao.ac.jp/kokubo/moon/kit/> を御覧下さい。アニメーションもあります)この計算の円盤の初期質量は月質量の4倍で、その半径はロッシュ限界の半径です。ロッシュ限界とは軌道運動している天体の自己重力と中心天体による潮汐力が釣り合う場所です。ロッシュ限界の内側では潮汐力が自己重力より強く、粒子は重力的に束縛されませんが、外側ではその逆で、粒子が重力的に束縛されることが可能になります。

1つの大きな月が地球から約1.3ロッシュ限界半径のところに質量0.9月質量で形成されています。この月の軌道はほぼ初期円盤の赤道面上でほぼ円軌道です。この月集積の特徴、すなわち「ほぼ円盤の赤道面上で、ほぼ円軌道上の1つの大きな月がロッシュ限界のすぐ外側に形成される」は巨大衝突説で考えている範囲の原始月円盤の初期条件には、ほとんどよりません。

原始月円盤の進化は次のようにまとめられます。(0)初期円盤の粒子のランダム運動は大きいので円盤は重力的に安定です(図1)。(1)円盤は粒子どうしの衝突によってランダム運動が小さくなり、動径方向・垂直方向に収縮し始めます。(2)円盤が収縮すると円盤の面密度が上がり、円盤は重力的に不安定になり、面密度のむらが成長します。(3)むらむらはロッシュ限界の中にあるので潮汐力によりのばされてしまい渦巻状になります(図2)。(4)渦状腕の及ぼす重力トルクによって月材料物質がロッシュ限界外に運ばれます。(5)ロッシュ限界の外側に運ばれた粒子は重力的に束縛し、アグリゲイト(重力的に束縛した粒子のかたまり)を形成します。(6)同じような地球からの距離にできるアグリゲイトは次々と合体し、1つの大きなアグリゲイト、月の「種」がロッシュ限界の外側に形成されます(図3)。(7)月の種は形成後、ロッシュ限界のすぐ外側に居座り続け、内側から運ばれてくる粒子を独占的に集積しながら成長します(図4)。

なぜいつも1つの月が形成されるのかは円盤の進化から明らかになりました。巨大衝突により形

成されると考えられる質量が月質量の数倍程度でロッシュ限界内にほとんどの質量があるような原始月円盤は上記のように進化するので必然的に1つの大きな月が形成されるのです。

シミュレーションの結果によると月形成の時間スケールは約1ヶ月です。月は主にロッシュ限界外に運ばれた粒子によって形成されます。ロッシュ限界外に運ばれた粒子はすぐに大きなアグリゲイトに吸収されるので、月形成の時間スケールは物質輸送の時間スケールで決まっていると言えます。物質輸送に伴い、円盤内で粒子の角運動量も輸送されます。つまり、物質輸送の時間スケールは円盤内の角運動量輸送の時間スケールと同じと考えられます。渦状腕の重力トルクを解析的に評価し、それによる角運動量輸送の時間スケールを見積もると、ちょうど約1ヶ月になっています。つまり1ヶ月という月集積の時間スケールは原始月円盤の角運動量輸送の時間スケールだったのです。

原始月円盤から集積される月の質量は円盤の角運動量保存から決まります。初期の原始月円盤の角運動量は月集積過程で主に2種類の粒子、すなわち、集積される月と地球に落ちる粒子に分配されます。集積される月と地球に落ちる粒子の軌道要素すなわち単位質量当たりの角運動量はほぼ決まっているため、角運動量保存によりそれぞれに分配される質量が決まるのです。シミュレーションの結果、月の質量は初期円盤の質量の10-60%くらいで、この割合は初期円盤の単位質量当たりの角運動量に比例することがわかりました。

おわりに

月の起源のシナリオとして現在有力視されている巨大衝突説にもとづき、巨大衝突により形成される原始月円盤からの月の集積の大規模N体シミュレーションを行ないました。その結果、原始月円盤からの月集積では、円盤の赤道面上で円軌道をもつ1個の大きな月が約1ヶ月かけてロッシュ限界のすぐ外側に形成されることがわかりました。つまり「1月(時間)で1月(個数)ができる」というわけです。また、月の質量は初期円盤の単位質量当たりの角運動量によって決まることもわかりました。

月集積の基本的なダイナミクスは明らかになりました。今回得られた月集積のフレームワークは衛星集積一般に拡張することができます。例えば、今回得られた円盤から1個の衛星が集積する、と

いう結果は円盤の半径がロッシュ限界くらいである限り、円盤の質量が今回の原始月円盤より大きな場合も成り立つことがわかっています。惑星と衛星の質量比が約1/7という冥王星-カロン系のような巨大衛星の起源も巨大衝突とそれによって形成される周惑星円盤からの集積で説明できそうです。また、軽くてロッシュ限界の外側にまで十分広がった円盤の場合は、ロッシュ限界の外側にいくつかの衛星が形成されて、ロッシュ限界の内側に円盤が残ることになります。これは土星のリング-衛星系に対応するものでしょう。このように、周惑星円盤から集積される衛星系の力学的特徴は基本的には円盤の質量と単位質量当たりの角運動量(サイズに対応する)によって決まると考えられます。現在の太陽系の多様なリング-衛星系は周惑星円盤の多様性と進化から統一的に説明できると考えています。

次に月を見るときに、約45億年前に起きたと考えられる巨大衝突とその後の月形成を思い出してみてください。月がいつもと違って見えるかもしれません。

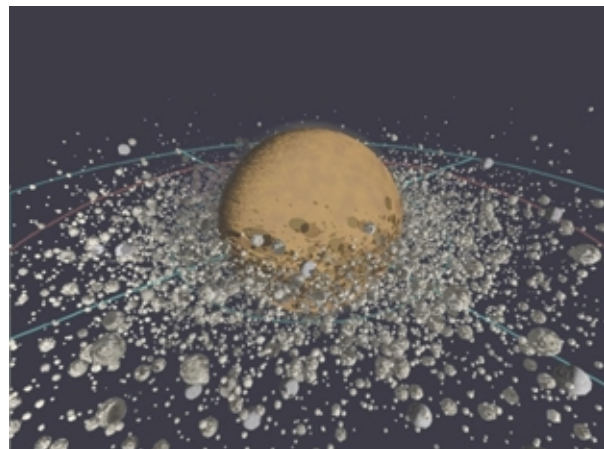


図1

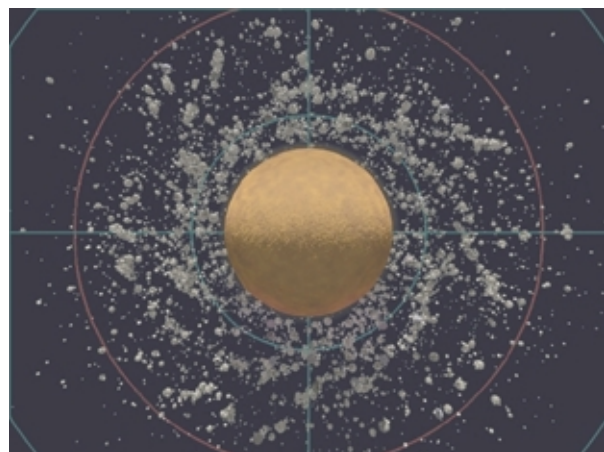


図2

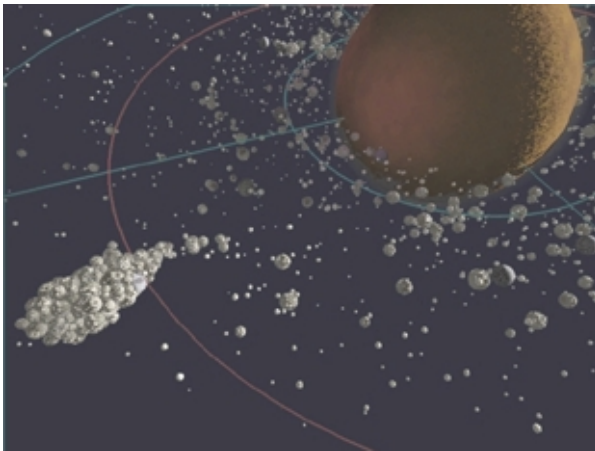


図3

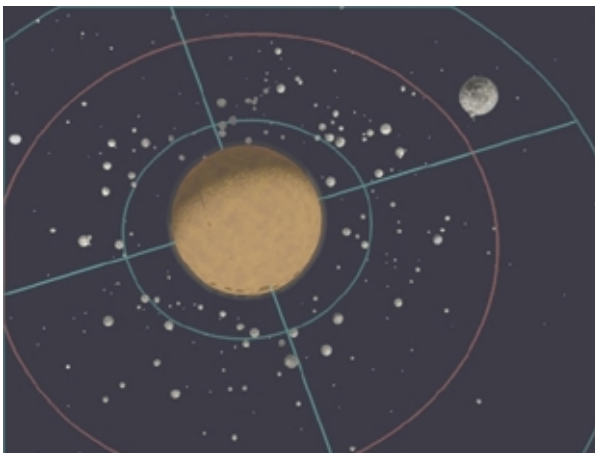


図4

図の説明

CGによる月集積のN体シミュレーションの例。中央の茶色の天体は地球を表す。赤い円はロッシュ限界の位置。各フレームはそれぞれ初期状態(図1)、約1日後(図2)、約1週間後(図3)、約1月後(図4)の状態を示す。

ALMA (アルマ) の推進に向けた署名のお願い

国立天文台では、すばる望遠鏡の成功につづいて、日本の天文学コミュニティの支持のもと、南米チリのアンデス山中に日米欧で共同建設する「アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計：ALMA (アルマ)」の準備を進めてきました。来年から建設を開始し10年後には完成して、光では見えない未知の宇宙を開拓し、宇宙における惑星・生命の起源にもせまる、世界でただ一つの夢の電波望遠鏡の建設です。

ALMAは各方面から広いご支持をいただいているものの、ご存じの厳しい財政状況のなかで計画を推進するには、国民の皆様の一っそうのご支援が必要です。そこで皆様のご支持を形にして示すため、ALMA建設推進を要望する署名を広くお願いしております。科学の推進には、幅広い市民の皆様が支持が基本です。ぜひご賛同いただき、ご署名ください。

なお、署名はインターネット上で行うことができます。
http://www.nao.ac.jp/index_J.html 不明の点はALMA計画準備室(0422-34-3843, alma-info@nro.nao.ac.jp)にお問い合わせください。

編集後記

今年6月に国際会議に出席するためにパリに行きました。昔使った残りのフランス・フランを持って行って使おうとしたら、お札が古いのでダメ。ホテルの近くの普通の銀行でも両替してくれませんか。換えるには、わざわざ国立銀行(日本でいう日銀)まで行くのだといわれました。がーん。新円への切り替えは大変だったと、爺さまに聞いた記憶はありますが、よもや自分が似たような経験をしようとは。(F)

6月中旬に2泊3日で、今までの最短日程で、ロンドンへ海外出張をした。ロンドンに到着早々から目のかゆみ、くしゃみに悩まされた。きっと日本にはない、変わった花粉が犯人に違いない。そういえば、5年前に1年滞在した米国コロラドでも今季節同様の症状に悩まされた。でも花粉でぶつぶつ言っている人は誰もいなかった。私だけが変?(シ)

施設公開で太陽の黒点を投影するのに使った望遠鏡の倍率が高すぎたので、適当な接眼レンズを物色しに望遠鏡ショップに出かけたら、MH20mmは受注生産になっていると言われてしまった。もっとも安いレンズのはずなのに、アマチュアの高級指向が進んで、かえって品不足になっているらしい。(Y.T.)

プロジェクト推進もいよいよ胸突き八丁になってきました。とはいえこれからが真のスタートラインとは...(成)

7月号を7月にらせて、ひとまずほっとしています。今月も追いかけられつつ、なんとか月のうちに発行出来、前任者の努力を無駄にせぬよう、日々心する暑い夏です。(Y)

なんでも先進国での人ひとりが1日に消費するエネルギー量は、アフリカ象一頭が1日に摂取するエネルギー量と同等だそうです。すると日本には一億頭ものアフリカ象がパオ・パオと歩き回っていることになります。今の浪費文明、早く見直さないと・・・(Agt)