

ISSN 2186-6945

**Proceedings of Tokai University**  
**Research Institute of Science and Technology**

**東海大学紀要**

**総合科学技術研究所**

**2012 Vol.33**



**RIST**

**Research Institute of Science and Technology**

# 東海大学 紀要 総合科学技術研究所

---

Proceedings of Tokai University  
Research Institute of Science and Technology

**2012 Vol. 33**



## ご挨拶

---

総合科学技術研究所の沿革につきましては前巻において紹介しましたが、組織の再編後、3年目を迎え、小規模ながらも活発な研究活動を続けております。研究対象は、今年度も同様、宇宙、計測技術、自然環境、有機分子までマクロからミクロに至る広範囲にわたり、研究の成果による学術的な貢献は勿論、地域への貢献、産学の連携を視野に入れた研究を展開することを目指しております。ライフサイエンスの分野が脚光を浴び、我が国でもノーベル賞、あるいは、それに匹敵する革新的な発見、発明が、昨今マスコミを賑わせております。

このような時代にあっても創立者松前重義博士の唱えた科学技術立国に関する理念は全く、色あせることなく、むしろその重要性がますます認識されるようになったといっても過言ではないように思います。総合科学技術研究所としては、小規模ながらも創立者の理念を継承した研究を続けていきたいと考えております。

ここに、2012年度「東海大学紀要 総合科学技術研究所」として研究論文を掲載し、研究所の活動の一端をご紹介しますので、ご高覧頂ければ幸いです。

今後の研究所の活動に対しご指導ご鞭撻のほどお願い申し上げます。

東海大学総合科学技術研究所  
所長 渡邊 幹夫

## 目次—CONTENTS—

- 総合科学技術研究所 所長挨拶・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
  
- 紫外放射計測器の斜め入射光特性が発光サイズの大きい光源の  
放射照度計測値に与える影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・4  
竹下 秀（総合科学技術研究所）
  
- 電離層プラズマ中における熱性キャビトンの生成・・・・・・・・・・・・10  
谷川 隆夫（総合科学技術研究所）  
佐藤 杉弥（日本工業大学・共通教育系）
  
- ラクチドとアミン類の開環反応を利用した乳酸アミド類の合成法・・・・・・・・34  
渡邊 幹夫（理学部化学科・総合科学技術研究所）  
島 弓子（理学部化学科）
  
- 物理演示実験の活用と展開・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・42  
～ モンキーハンティングを例として～  
佐藤 杉弥（日本工業大学・共通教育系）  
塚林 功（いろは理科工房）
  
- 高速度ビデオでの運動解析プログラムの開発・・・・・・・・・・・・50  
—画像処理による気泡および粒子を対象とした ROI の自動生成—  
横山 直樹（総合科学技術研究所）
  
- 2012 年度総合科学技術研究所 活動記録・・・・・・・・・・・・・・・・54

# 紫外放射計測器の斜め入射光特性が発光サイズの大きい光源の放射照度計測値に与える影響

竹下 秀（東海大学 総合科学技術研究所）

Effect of directional response of ultraviolet radiometer for ultraviolet irradiance measurement of large source

Shu TAKESHITA (Research Institute of Science and Technology, Tokai University)

キーワード：斜め入射光特性，測定距離，放射照度

Keywords: directional response, distance, irradiance

## Abstract

A directional response of irradiance meter is affective to measurement value especially near field optical radiometry of large source. However, in the industrial process using light source, the optical radiometry has been performed close to source for housekeeping of the product. Therefore, if different irradiance meter will be used, the irradiance measured is difference among irradiance meters. However, there is no data set of the effect of the difference directional response for near field optical radiometry of large source. Objective of this study is carried out to determine this data set. Two ultraviolet irradiance meters are evaluated. The effect of the difference directional response of irradiance meter is clearly shown. If difference irradiance measured among UV irradiance meter in 5 %, the required distance between source and irradiance meter is two times or more of the source size.

## 1. はじめに

光放射は現代社会の基盤技術として様々な分野で活用されている。特に、波長 200 nm から 400 nm の紫外放射は、工業製品の製造には必要不可欠である。工業製品の製造現場では、製造される製品の品質をある面での光の量である放射照度として計測して管理している。この場合、使用する紫外放射照度計は、常に同じ製造会社の同じ型式の紫外放射照度計を使用するため、紫外放射照度の絶対値は要求しない。この様に 20 世紀は光放射の絶対値の測定が要求される分野は太陽紫外放射計測など極一部に限られ、大部分が相対測定を要求していた。

しかし、21 世紀になり、光放射を利用する工業製品の性能試験の国内外規格の制定や法令の施行に伴い、紫外放射照度の絶対値を試験条件として要求する事例が登場した。例えば、上水の滅菌は塩素耐性菌対策のため紫外放射の使用が認められるようになった<sup>1)</sup>。しかし、上水装置を通過する処理水に対して一定量以上の紫外放射の照射が要求されている。また、紫外放射を利用した光触媒製品の性能試験では、光触媒性能を指定された紫外放射照度で評価することが要求されている<sup>2)</sup>。さらに、昨今話題となっている光放射の安全性評価規格<sup>3)4)</sup>では、光放射の絶対量の分光計測による評価が要求されている。

光放射の絶対量の計測は、光放射が波長的、空間的、時間的な広がりをもつため、様々な因子に左右される。放射照度計測の場合、この空間的因子の一つは光放射計測器の斜め入射光特性（余弦特性）である。光放射計測器に対して光放射が斜めに入射した場合、光放射計測器の見掛けの受光面の面積は、入射角度の増加に伴って余弦関数に従って減少する。すなわち、光放射計測器による計測値もこの見掛けの面積の減少に伴って減少しなければならない。これが光放射計測器の斜め入射光特性（余弦特性）と呼ばれるものである。この特性を実現するために様々な工夫が光放射計測

器の製造会社によってなされており、改善のための系統的な実験結果が報告されている<sup>5)6)</sup>。しかし、この特性が完全な製品は実現されていない。このため、光放射の放射照度の絶対量を測定する場合、使用する光放射計測器の斜め入射光特性等の影響を避けるために、原則として光源や受光部の大きさの10倍以上、計測距離を設けることが推奨されている<sup>7)</sup>。これに従った場合、電球など発光部が小さなものは比較的近距离で測定可能であるが、発光部が大きな直管形蛍光ランプなどの場合は、測定距離を極めて大きく取る必要がある。しかし、実際の工業製品の製造現場では測定距離を極めて大きくとるようなことはせず、近接した条件で測定している。本研究では、紫外放射照度計を使って放射照度計測をした際、斜め入射光特性の違いによって、どの程度計測値が異なるのか測定・評価した。

## 2. 実験方法

本研究で使用した紫外放射照度計は、日本国内で市販されている国内外会社の製品2機種（LP471UVA : DeltaOhm と C9641NT: Hamamatsu）である。使用した紫外放射照度計の受光部を図1に示す。両計測器の受光部の形状は全く異なっており、斜め入射光特性は異なることが期待される。また、これらの機種は全て波長315 nmから400 nmのUV-A紫外放射を測定するように分光感度が設計されている。分光感度の測定結果を図2に示す。

本研究で使用した光源は、20Wの直管形ブラックライトブルー紫外蛍光ランプ（FL20S-BLB : 三共電気、ランプ長58.0 cm）1本である。市販されている紫外蛍光ランプは使用する蛍光体の種類によって発光ピーク波長が異なり、主に2種類に分類される。本研究では日本国内での使用頻度が低い国際的に使用されている波長368 nmに発光ピーク波長をもつ製品を使用した。使用したブラックライトブルー蛍光ランプの分光分布を図3に示す。



Figure 1 Detector heads of UV irradiance meters evaluated  
(left LP471UVA, right: C9641NT)

評価した紫外放射照度計の受光部とブラックライトブルー紫外蛍光ランプは共に光学レール上に設置し、滑らかに両者間の距離を変更可能とした。評価した紫外放射照度計の受光部は、光学実験用のスライド式レンズホルダーを使って保持した。このホルダーにはXY回転ステージが取り付けられており、受光部の位置と入射角度の微調整が可能となっている。ブラックライトブルー紫外蛍光ランプは光学テーブルに対して水平方向に常に同じ位置に固定して設置し、紫外放射照度計のみ位置を変更した。ランプバルブと紫外放射照度計の受光部までの距離は、紫外放射計受光部とブ

ラックライトブルー紫外蛍光ランプを設置した光学レールと平行に設置した光学レール上に、方眼マットスクリーンを取り付けた一眼レフカメラを光学レールと垂直に設置し、この光学レール上のものさしを使って測定した。この光学レールのもものさしの最小目盛りは 1 mm のため、距離の設置最小間隔は 1 mm である。さらに、ブラックライトブルー紫外蛍光ランプの直前には、直径 300 mm  $\phi$  の有孔遮光板を取り付けた。測定距離は 21.4 cm から 100.0 cm まで変化させた。すなわち、光源サイズより近接した条件から光源サイズの 3.3 倍まで距離を取った場合まで条件を変化させたことになる。なお、評価した紫外放射照度計には測定基準点が明示されていなかった。このため光源に最も近い面を測定基準面とした。全体の測定風景を図 4 に示す。測定時の室温は  $25.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  である。

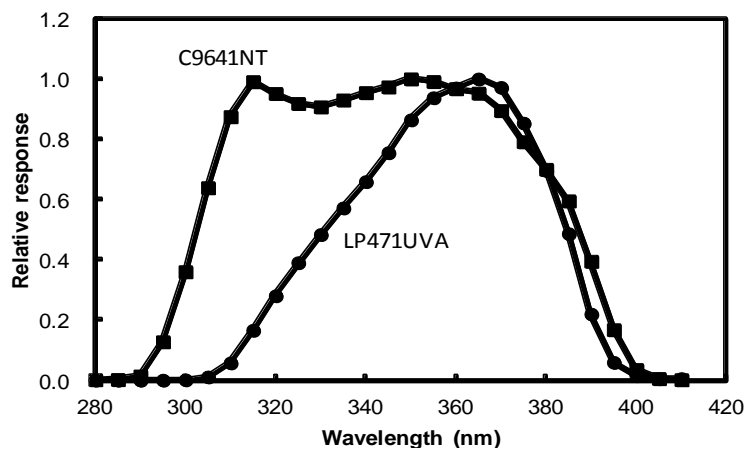


Figure 2 Spectral response of UV radiometers evaluated

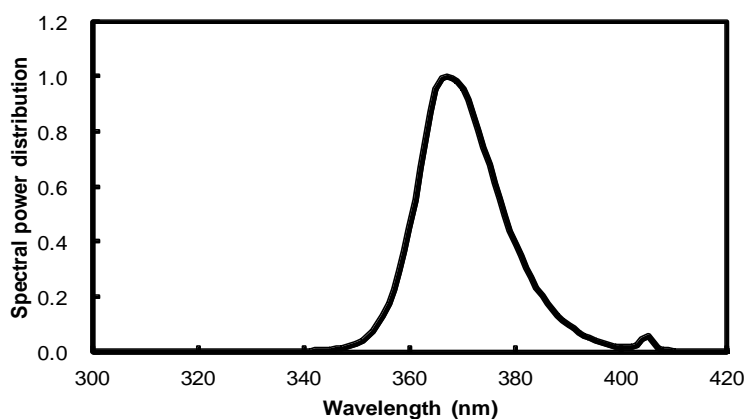


Figure 3 Spectral power distribution of UV Fluorescent lamp used



Figure 4 Measurement scenery of this evaluation

### 3. 結果と考察

測定距離を変化させた際の測定値の違いを図 5 に示す。この図 5 では、C9641NT の計測値に対する LP471UVA の計測値を比率として示している。2 機種計測値は、測定距離が離れるとほぼ同じ測定値が得られた。しかし、測定距離が短くなるに従って両者の計測値の乖離が認められた。LP471UVA の計測値は、発光サイズの 2 倍の条件（測定距離 60.0 cm）では約 4 %、等倍の条件（測定距離 30.0 cm）では約 16 %、最も光源に近接した 21.4 cm の条件では約 23 % も C9641NT の計測値よりも小さくなることが明らかになった。なお、この図 5 の横軸のカッコ内の数値は、受光面中心から光源を見込んだ時の最大角度（最大入射見込み角）を示しており、今回の実験では 35.0 度となる。

これらの光放射計測器の校正光源は、LP471UVA : 365 nm の水銀輝線、C9641NT : キセノン光源に帯域フィルタを組み合わせたものである。すなわち、校正光源が異なり、さらに図 2 に示すように分光感度特性が異なるため、同じ光源を同一の条件で計測しても、その計測値は光放射計測器によって異なる。しかし、光放射計測器間の計測値の違いは光源の分光分布と光放射計測器の分光感度によって決定されるものであり、測定距離によってその計測値の比率が変化することはない。よって測定距離によって計測値の比率が変化した主な原因は、両光放射計測器の斜め入射角度特性の違いによると考察される。さらに、LP471UVA の計測値が低下していることから C9641NT と比較すると斜め入射光特性が悪い、すなわち測定視野が狭いと考察される。光源との距離が離れている場合は、全発光部が光放射計測器の計測値となる。しかし、測定距離が近く、かつ、光放射計測器の測定視野が狭い場合は、光放射計測器の計測値となる光放射は発光部の一部に限定される。そこで、テレセントリックレンズを取り付けたファイバー出力形キセノン光源（MAX301、朝日分光）を用いて、両光放射計測器の斜め入射光特性を入射角度 0 度から 80 度にかけて 10 度間隔で測定した。斜め入射光特性は、本来ならば受光部の全周 360 度に渡って測定しなければならない<sup>8)</sup>。しかし、今回は、紫外蛍光ランプの長手方向から入射する光放射に対する特性が影響していると考えられる。このため長手方向の特性のみ測定した。さらに、斜め入射光特性の測定には、本来それぞれの光放射計測器の専用治具が必要である。しかし、今回は専用治具が準備できなかった。このため、LP471UVA はスライド式レンズホルダーへの取り付け位置を調整し、斜め入射光特性測定時の回転中心と受光基準面が常に一致するようにした。一方、C9641NT はその受光部形状から回転中心と受光基準面を一致させることが不可能であった。このため、C9641NT 受光面の位置は入射角度に



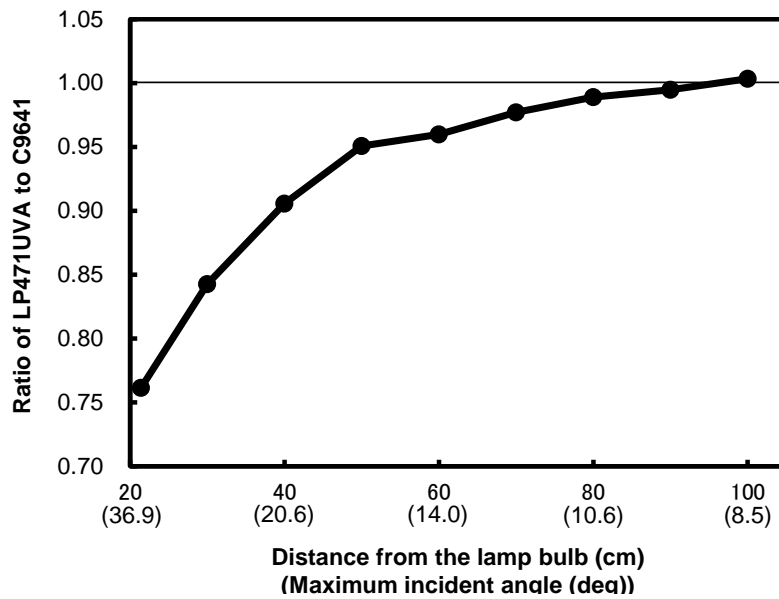


Figure 5 Distance dependency of the irradiance measured (the ratio of LP471UVA to C9641NT)

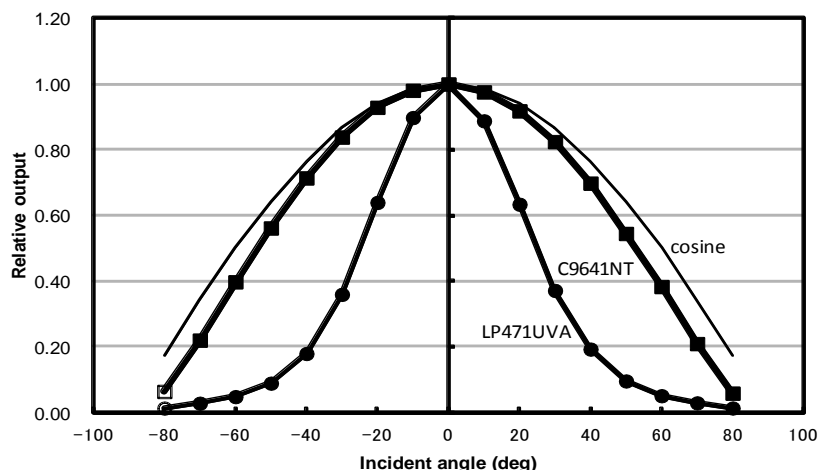


Figure 6 Directional response of UV radiometers evaluated

よって光軸に対して左右に変化している。しかし、テレセントリックレンズからの光放射の開き角は半角で  $2.7 \times 10^{-4}$  度とほぼ平行光である。さらに、C9641NT の受光部の直径は 15.00 mm であり、テレセントリックレンズからの光放射の直径 107.00 mm の 15 % 以下のため十分小さく、かつ、この領域内で光放射照度はほぼ均一であることを確認している。以上の理由により、専用の治具は使用していないが、両者の斜め入射光特性は共に正確に測定されていると考える。斜め入射光特性の測定結果を図 6 に示す。

LP471UVA の斜め入射光特性は、入射角度 30 度で理想的な斜め入射光特性からの偏差は約-58 % である。一方、C9641NT は約-4 % である。よって、LP471UVA は斜め入射光特性が悪いことが判明し、考察が裏付けられた。さらに、最近接条件である最大入射見込み角 (35 度) での理想的な斜め入射光特性からの偏差は、LP471UVA : 約-66 %、C9641NT : 約-6 % となり、両計測器間には 60 %

も特性に違いがあることになる。しかし、実際の出力差は、この斜め入射光特性の違いよりも小さく約 23 % である。これは、光源からの光放射の線積分効果が出たためと考察される。なお、C9641NT の特性は、製造会社が公表している特性とほぼ一致した。また、LP471UVA は、その受光部の形状とこれまでの研究報告<sup>5)6)</sup>から判断すると、比較的特性がよいと考えていた。しかし、結果は考察を裏切るものであった。この原因は、使用している拡散板の拡散特性の不足が原因と考える。

#### 4. 結論

本研究では、紫外放射照度計を使って発光サイズが大きな光源の放射照度計測をした場合、製品によってどの程度、距離によって計測値が異なるのかを、実際に 2 機種 of 紫外放射照度計を用いて計測・評価した。発光サイズに対して距離が 3.3 倍程度離れている場合（測定距離 100.0 cm）は、今回評価した 2 機種 of 計測値はほぼ一致した。しかし、計測距離が近づくに従って両者の計測値の乖離が発生した。発光サイズの 2 倍の条件（測定距離 60.0 cm）では約 4 %、等倍の条件（測定距離 30.0 cm）では約 16 % も計測値が異なった。この原因は、両者の斜め入射光特性の違いであることが明らかになった。

以上の結果から、発光サイズが大きな光源を、光源と近接した条件で測定する場合には、これまで言われてきたように斜め入射光の特性の違いの影響を大きく受ける。このため、異なる光放射計測器を使用する場合には、斜め入射光特性の違いが少ない光放射計測器を使用する必要がある。光放射計測器の斜め入射光特性の違いを少なく出来ない場合は、要求される測定精度にもよるが、最低でも発光サイズの 2 倍程度は距離を離して測定する必要があることが判明した。

最後に、本研究で使用した DeltaOhm 製の紫外放射照度計は光触媒工業会より貸与して頂いた。また、テレセントリックレンズは朝日分光株式会社のご厚意で評価のため借用させて頂いたものである。両団体の関係者にこの場を借りて謝意を表します。

#### 5. 参考文献

- [1] 水道施設の技術的基準を定める省令の一部を改正する省令，平成 19 年厚生労働省令第 54 号
- [2] JIS R1701-1, -2, -3, -4, -5, R1702, R1703-1, R1703-2 など光触媒材料の性能試験方法
- [3] IEC62471:2006/CIE S009:2002 Photobiological safety of lamps and lamp systems
- [4] JIS C7550:2011 ランプ及びランプシステムの光生物学的安全性
- [5] 白石啓文: 紫外線放射計用角補正受光器, 照明学会誌, **57**(2), 20 – 24 (1973)
- [6] 竹下秀: 生体の紫外線防御に関する研究-生体 UVB 損傷作用スペクトル応答を示す線量計の開発-, 昭和 63 年度東海大学工学部光学工学科卒業研究論文
- [7] 照明学会編: 光の計測マニュアル, 日本理工出版会, p. 188 (1990)
- [8] JIS C1609-1: 2006 照度計 第 1 部: 一般計量器

# 電離層プラズマ中における熱性キャビトンの生成

谷川隆夫（東海大学・総合科学技術研究所）

佐藤杉弥（日本工業大学・共通教育系）

## Generation of Thermal Cavitons in the Ionosphere

Takao TANIKAWA (Research Institute of Science and Technology, Tokai University)

Sugiya SATO (Department of Human Science and Common Education,

Nippon Institute of Technology)

キーワード：電離層，能動電離圏実験，キャビトン，熱性キャビトン

Keywords: ionosphere, ionospheric modification experiments, cavitons, thermal cavitons

### Abstract

Thermal cavitons are large-scale density depletions (typically, over 10 km in extent and  $|\delta n/n_0| \geq 25\%$ ) that can be generated in the ionosphere due to the local temperature increase that is caused by the absorption of a high-power, high-frequency (HF) wave of effective radiated power (ERP)  $\sim 100$  MW near its reflection layer. In this article, the observations of thermal cavitons generated by high-power HF waves under various experimental conditions are reported. The experimental results shown in this article were obtained during active ionospheric modification experimental campaigns held at the Arecibo Observatory, Puerto Rico, in 1987 and 1997.

### 1. はじめに

電離層は、1) 境界（即ち“壁”）の影響を無視できる、2) 極めて閉じ込め性能の高い、自然が用意してくれた巨大なプラズマの実験室である。これを“能動”的に利用すべく考案された“能動”実験には、電子ビームなどの粒子線を用いるもの、バリウムなどの反応性の高い化学物質を電離層中に放出させるものなど様々あるが[1]、本論文では特に電波（電磁波）を電離層プラズマに作用させる実験を取り上げる。従って、本論文で“能動電離圏実験”と言う場合、地上のステーションより大電力の短波域の電磁波を電離層に注入する実験である[13–18]。我々の研究では、電離層のプラズマ密度がピーク値を取る辺りのF層域を研究対象とするが、その領域で大電力電磁波の照射により人為的に引き起こされる現象の例を Fig. 1 に示す。入射電磁波（High-Frequency, HF 波）は、その反射層以下の領域では入射波と反射波の相乗効果により振幅が増大しておりプラズマ粒子間の衝突によるプラズマ加熱（オーム加熱）が生じる。また、この領域では各種のプラズマ不安定性が生じることも知られている。反射層では、入射電磁波の周波数がローカルな電子プラズマ周波数と一致するため、プラズマ共鳴現象による電磁波から静電波へのモード変換が生じ、入射 HF 波の強い吸収が起こる。共鳴現象故に励起された静電波は大振幅になり易く高速電子の発生も伴う。この高速電子は中性大気原子・分子を励起しエア・グローと呼ばれる発光現象が生じる。大振幅静電波はプラズマ加熱にも大きく寄与し得る。

電離層プラズマは小さな刺激に対して大きな応答を生じ易く、現象は容易に非線形化する。その結果、バックグラウンドの密度プロファイルに大きな変調がかかるというのが一つの特徴である。プラズマ中に生じる局所的な低密度部位を一般に“キャビトン (caviton)”と呼ぶが、そのスケール長、生成時間の長短に応じて主に3種類に分類可能である (Figs. 2 and 3 を参照)。

HF 波が共鳴的に吸収され励起された静電電子プラズマ波 (electron plasma wave or EPW) が変調

不安定性などを通して局在化した大振幅静電波に成長すると、非線形力（ポンドロモーティブ力）により大振幅波がプラズマ粒子を排除し“静電（ES）キャビトン”が生じる。プラズマ物理で通常“キャビトン”と呼ぶ場合、Fig. 2 の上図に示した局在化した大振幅波と低密度部位がペアになった非線形波動（即ち、ES キャビトン）を指するのが慣例である。電離層 F 層の条件下では、ES キャビトンのサイズはメートルのオーダー、生成時間はミリ秒のオーダーであり、密度キャビティの深さ ( $|\delta n/n_0|$ ) は通常 1% から 10% 程度である。後に述べる熱輸送現象（熱性キャビトン）の影響を排除する目的で、非常に短い HF 波パルスを用いる実験を実施することにより ES キャビトンがランダムに生成・消滅を繰り返す“強いラングミュア乱流（strong Langmuir turbulence）”が電離層プラズマ中に発見された[2]。この現象は能動電離圏実験の分野で現在でもアクティブな研究課題の一つである。

“電磁（EM）キャビトン”（Fig. 2 下図）は、反射点より下部の領域で定在波化した HF 波の振幅変化に伴うポンドロモーティブ力で作られるもので、サイズは入射 HF 波の波長程度（数十メートル）、生成時間はやはりミリ秒のオーダーである。通常この効果は余り顕著でなく、 $|\delta n/n_0|$  は 1% 以下が普通である。しかしながら、EM キャビトンは次に述べる熱性キャビトンの“種”となる可能性がある。

Fig. 3 に模式的に示してあるのが本論文の主題である“熱性キャビトン”の生成過程である。これからも分かるように、熱性キャビトンはプラズマの熱・粒子輸送現象に帰因する（従ってこの名前が付いた）。熱性キャビトンのサイズは通常 10 – 50 km、生成時間は 1 分以上であり、キャビティの深さ ( $|\delta n/n_0|$ ) は数% から 100% 近くに達するものまで観測されている。通常の地上の実験室プラズマでは、完全な熱平衡に達するまで充分長時間にわたりプラズマを容器内に閉じ込めておくことは核融合装置ででもない限り殆ど不可能である。従って、熱・粒子輸送現象の実験研究は極めて限定された条件下でしか実行できない。それが電離層プラズマを用いることで比較的容易にできることになるのである。能動電離圏実験の面目躍如である。熱性キャビトンは最初 Duncan, Sheerin, and Behnke [3] により夜間の静かなプラズマ生成が無い条件下で発見された。その後、Wong, Tanikawa, and Kuthi [4] により昼間の実験においても観測された。熱性キャビトンが時々刻々と変化してゆく様子はレーダーのコンピュータ・モニター上に直ちに目で確認することができ、この意味で熱性キャビトンの生成・消滅はプラズマ物理の中でも比類なきドラマティックな現象である。

Duncan, Sheerin, and Behnke [3] による熱性キャビトンの発見は 1985 年の太陽活動が比較的弱い時期になされたが、その後太陽活動が活発になり電離層の密度が全体として上昇するにつれ熱性キャビトンは観測されなくなった。それから 10 年強が経った 1997 年、米国領プエルトリコのアレシボ電波天文台で実施された能動電離圏実験キャンペーンにおいて、我々は再び熱性キャビトンを観測することに成功した。1998 年にプエルトリコを襲った巨大ハリケーンによりアレシボ電波天文台付属の能動電離圏実験用 HF 施設は壊滅的な被害を被りその後再建されることはなかった。従って、それ以後アレシボ電波天文台でこの種の実験は実施することが出来なくなってしまった。我々の熱性キャビトンの観測結果は、科学研究費補助金の成果報告書 [5] としてはまとめられたが、正式な論文として発表されていないデータも多い。データ取得からかなりの時間が経過しているが、この機会に論文としてまとめ直すことにしたのが本論文である。

第 2 節で実験方法の説明をし、第 3 節では 1987 年 及び 1997 年の実験データを再解析した結果を紹介する。第 4 節で、検討した輸送モデルについて簡単に解説する。第 5 節は実験結果に対する考察であり、第 6 節は本論文のまとめである。

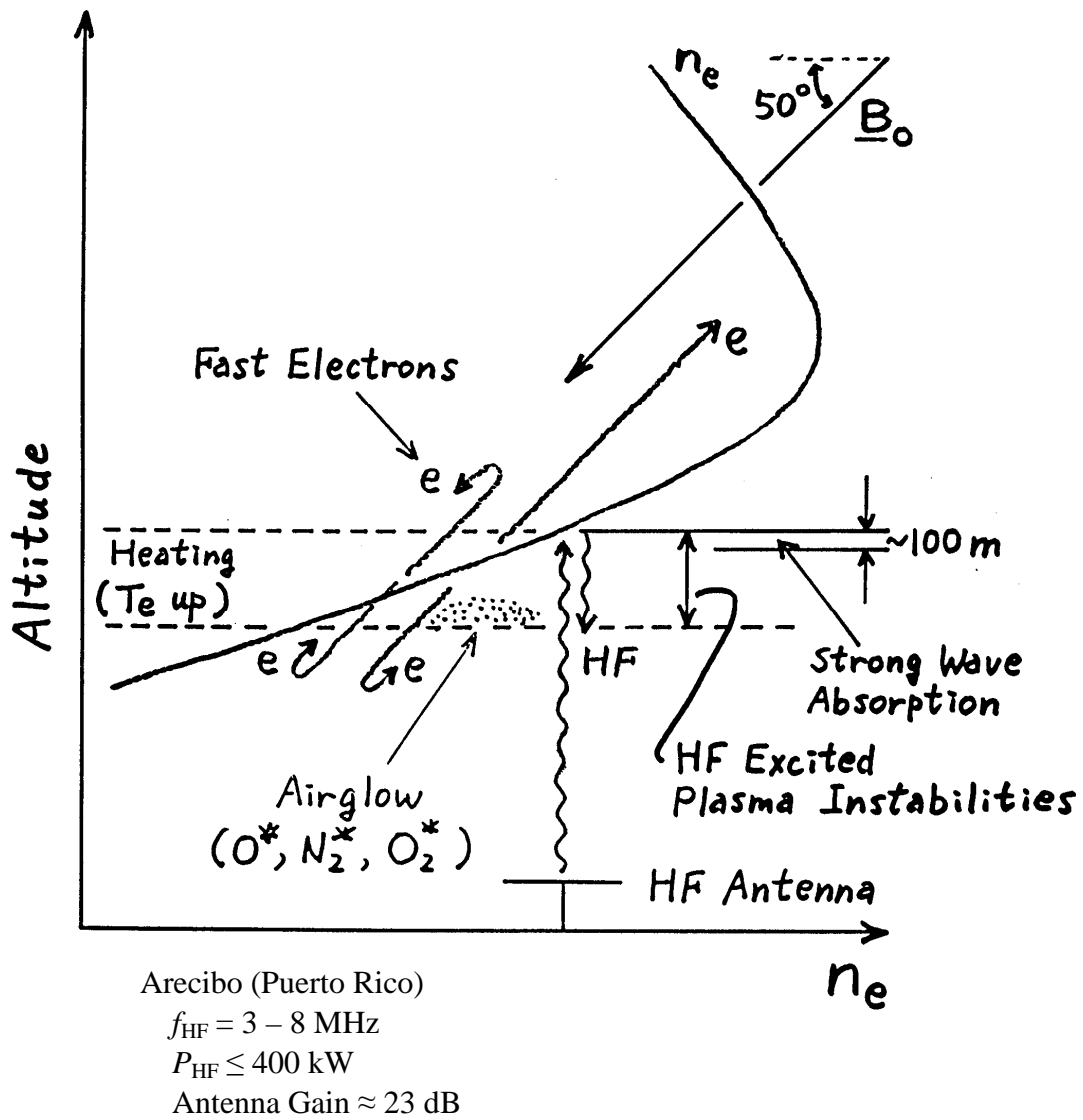


Figure 1. Various phenomena that can be induced during active ionospheric modification experiments at the Arecibo Observatory, Puerto Rico.

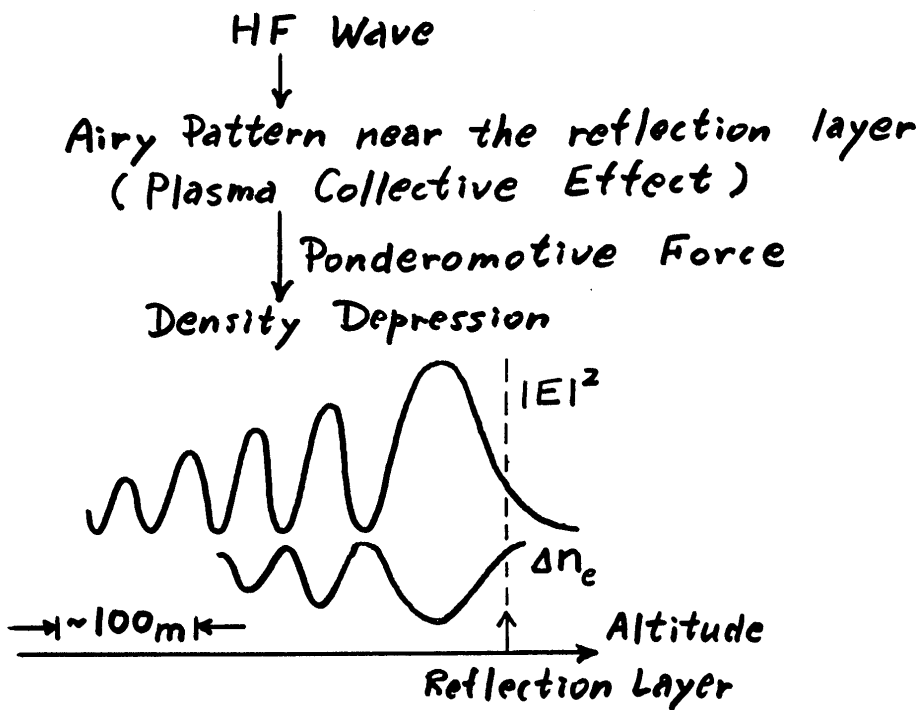
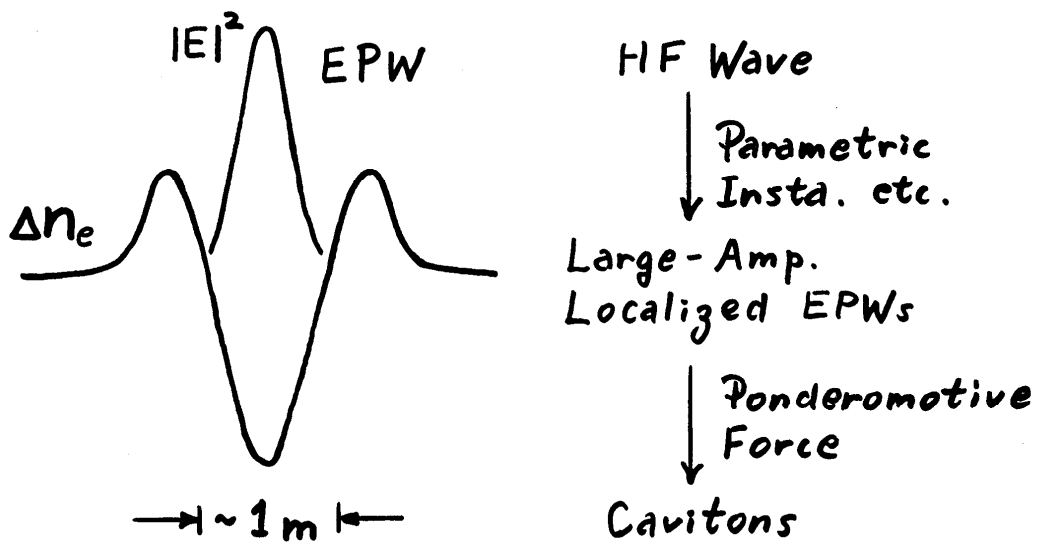


Figure 2. Schematic diagrams of an "electrostatic (ES) caviton" and an "electromagnetic (EM) caviton".

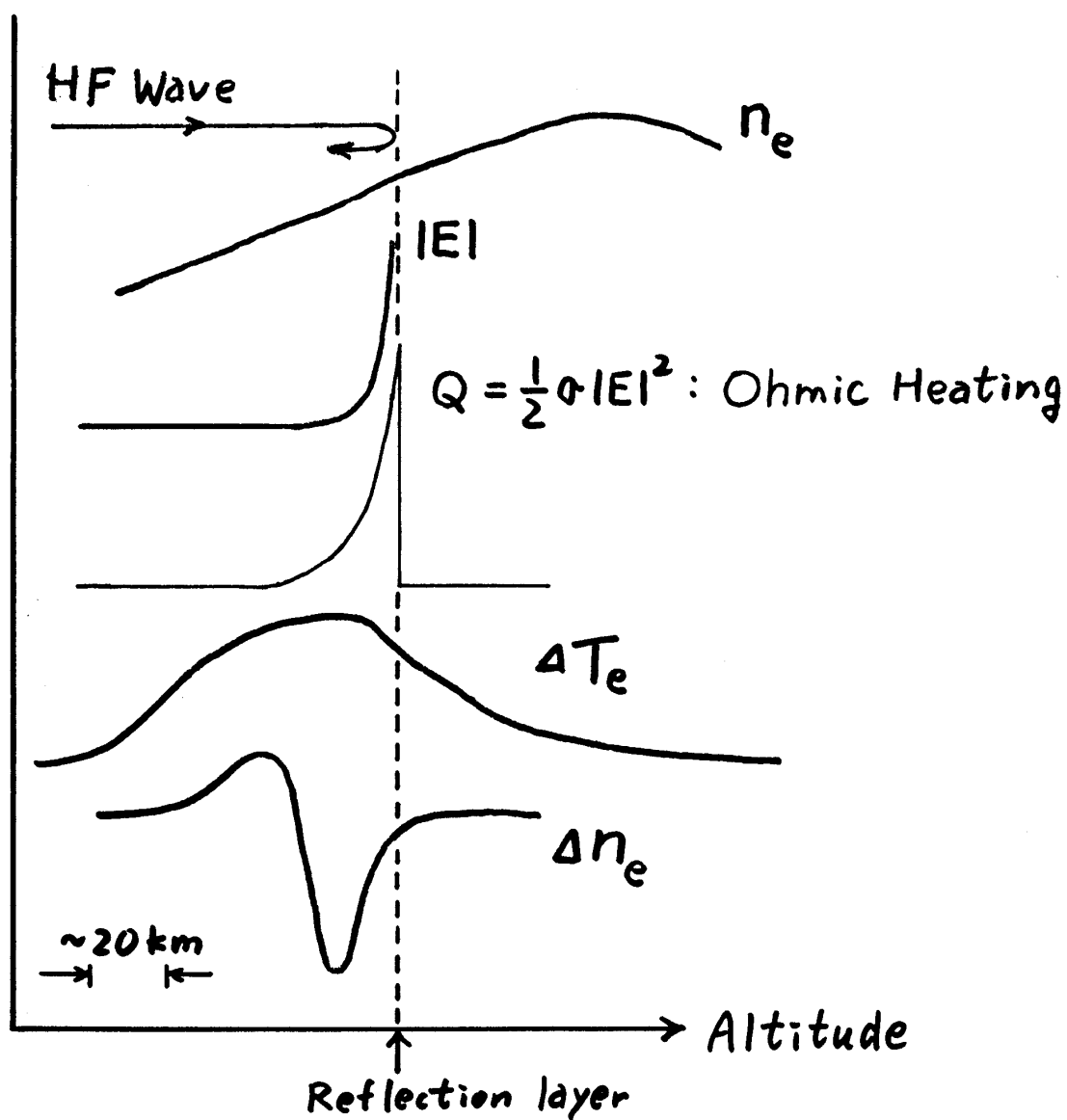


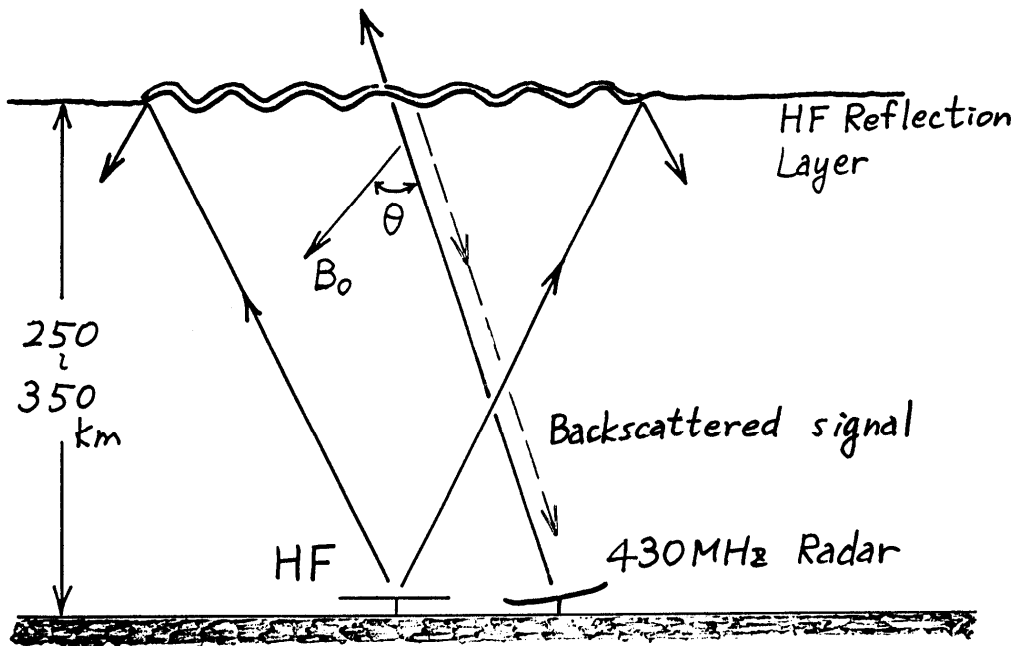
Figure 3. Model of the generation process of a "thermal caviton".

## 2. 実験方法

実験の概要を模式的に Fig. 4 に示す。高度約 300 km の上空における HF 波の照射範囲は直径約 90 km となる。観測用の、キャリア周波数が 430 MHz のトムソン後方散乱レーダーは通常 HF 波の照射領域の中央付近に向けられている。アレンボ電波天文台の位置座標を Table 1 に示す。HF 施設及び 430 MHz レーダーの諸元をそれぞれ Table 2 及び Table 3 に示す。

本研究では電離層の密度プロファイルを知りたいわけであるが、その測定法を Fig. 5 に示す。レーダー反射信号のキャリア周波数付近のスペクトルはイオン線と呼ばれるが、そのパワーは基本的に電子密度に比例する。従って、Fig. 5(b) に示すように、短いレーダー・パルスを次々にたくさん上げ、time-of-flight 測定を行えばレーダー・パルスは殆ど光速で伝播するので、例えば横軸にレーダー反射の遅延時間、縦軸にイオン線のパワー ( $P_{ion}$ ) をとってプロットすれば電子密度の高度分布が得られるというわけである。ここで注意すべき点は、イオン線のパワーは電子温度とイオン温度の比  $T_e/T_i$  にも依存するため、例えば  $T_i = \text{const.}$  の場合、 $T_e$  が上昇すると  $P_{ion}$  が減少し、一見電子密度が下がったように見えることである。熱性キャビトンの測定に際しては、密度が下がる領域で、HF 波照射中は一般に  $T_e$  が上昇するので実際よりも低密度になったように見えることがあり、注意が肝要である。

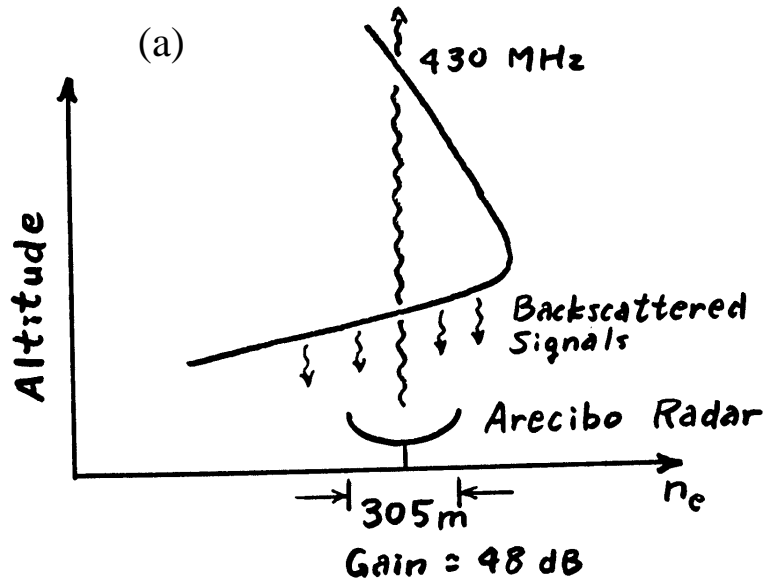
熱性キャビトンの実験では HF 波は O モードで打ち上げられた。X モード（北半球では電子のサイクロトロン回転の方向に一致する円偏波である）は下部電離圏で強く吸収され、このモードで F 層域に大きな効果を引き起こすことはできなかった。



HF :  $f_{HF} = 3.175, 4.45, 5.10, 7.30, 8.175$  MHz,  $P_{HF} = 4 \times 10 \sim 4 \times 100$  kW,  
 Calculated Gain = 23 dB at 5.1 MHz,  
 Equally Radiated Power (ERP) = 8 – 80 MW, Polarization : O-mode

Figure 4. Experimental arrangement for ionospheric modification experiments at Arecibo. The distance between the Arecibo Observatory (the location of the 430-MHz Radar) and the HF Facility is ~17 km. The angle between the radar line of sight and the geomagnetic field line,  $\theta$ , is 42 degrees.

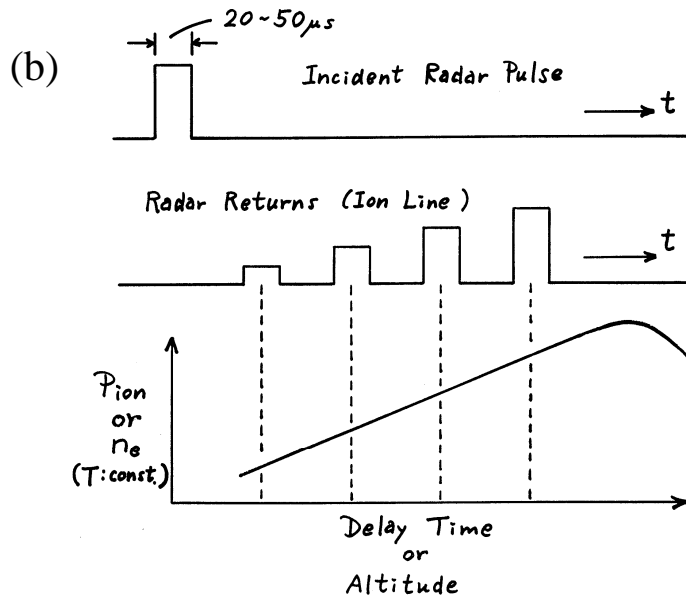




Received Power of Backscattered Signal at ~430 MHz (Ion Line) :

$$P_{ion} \propto \frac{n_e}{h^2 \left(1 + \frac{T_e}{T_i}\right)}$$

$n_e$  : Electron Density  
 $T_e$  : Electron Temperature  
 $T_i$  : Ion Temperature  
 $h$  : Reflection Height



$$f_{\text{Radar}} = 430 \text{ MHz} \gg f_{pe} \text{ (electron plasma frequency)}$$

$\therefore$  Propagation Velocity of the Radar  $\approx c$  (speed of light)

Delay Time of the Radar Return  $\Rightarrow$  Radar Reflection Height

Example : 1 ms delay time  $\Leftrightarrow$  150 km height difference

Figure 5. Technique to measure the electron density profile using the Arecibo Thomson Backscattering Radar.

Table 1. Location of Arecibo Observatory

Geographic :	
Latitude (N)	18°20'46.2"
Longitude (W)	66°45'10.5"
Geomagnetic :	
Magnetic Dip	50°
Declination (W)	8°13'

Table 2. Arecibo HF Facility

Frequency :	3 – 18 MHz
CW Power :	400 kW max
Antenna Elements :	32 (4 sets of log periodic elements)
Calculated Gain :	23 dB at 5 MHz
Effective Isotropic Radiated Power (ERP) :	80 MW max
Direction of Transmission :	Vertical
Polarization :	Linear, Left Circular, or Right Circular (relative to the direction of propagation)

Table 3. 430-MHz Radar

Frequency :	430 MHz
Wavelength :	69.7 cm
Wavelength of Perturbation Detected :	34.9 cm (= 69.7/2 cm)
Power : Peak	2.5 MW max
Average	150 kW max
Duty Cycle :	6% max
Pulse Width :	2 $\mu$ s – 9.999 ms
Antenna Size :	305 m diameter, circular cross section
Full Half Power Beam Width :	$\sim 1/6^\circ$
Beam Size :	$\sim 900$ m diameter at 300 km altitude

### 3. 実験結果

#### 3.1. 1987 年の実験より

1987 年 3 月にアレシボ電波天文台で実施された能動電離圏実験キャンペーンに参加した際取得したデータより、熱性キャビトンの観測例を幾つか紹介する。実験は全て夜間の電離層プラズマが“静かな”条件下で実施された。従って、太陽紫外線に起因する光電子による電離の効果は全く無い。唯一の例外は、Fig. 6(a) に示したデータである。この図は、Wong, Tanikawa, and Kuthi [4] より転載したものである（因みに、このデータだけは 1986 年 2 月に取得されたものである）。

まず Fig. 6(b) に典型的な熱性キャビトンの観測例を示す。縦軸は基本的に電子密度と考えてよ

い。密度キャビティは約 80 km の高度範囲にわたっており、 $|\delta n/n_o|_{\max} \approx 70\%$  である。一方、昼間の観測例 [Fig. 6(a)] では、密度キャビティの広がりには 6–7 km 程度であり、HF 波の最大パワー (400 kW 即ち ERP = 80 MW) の場合でも  $|\delta n/n_o|_{\max} \approx 7-8\%$  である。加熱領域からプラズマが排除されても、電離などによる新たなプラズマの流入の効果が大きいことを示唆している。

熱性キャビトン生成・消滅の時間発展の観測例を Fig. 7(a) 及び Fig. 7(b) に示す。図の右側に加熱 HF 波の ON, OFF サイクルを示してある。幾つかのデータで反射層に鋭いピークが見られるが、これは電子密度が上昇したということではなく、Enhanced Ion Line と呼ばれるもので、反射層で励起された大振幅の静電波動 (今の場合は低周波のイオン波によるのであるが) によりレーダーがコヒーレントに反射された結果である。これは、この位置にイオン波乱流が発生していることを示唆するものである。Fig. 7(a) から分かるように、HF 波のパワーが 200 kW (即ち、ERP = 40 MW) の間は密度プロファイルに目立った変化は見られない。パワーを 300 kW (即ち、ERP = 60 MW) に上げると、徐々に反射層付近に変化が現れ出してくる。時刻 20:55:51 のデータには Enhanced Ion Line も観測されている。21:01:10 にパワーを 400kW (ERP = 80 MW) と最大にしたところ、大きな変化が生じ始めた。ただ、21:20:30 に HF 波を切るまでの間の 2 つのデータに見られる変化は主に電子温度  $T_e$  の上昇によるものと考えられる。というのは、HF 波を切った後比較的早い時間で元のプロファイルに戻っているからである (21:23:35 のプロファイルを参照)。

21:24:30 に最大パワーで再び HF 波を ON にしたところ、非常にクリアな熱性キャビトンの成長が観測された。最初の 10 分間程はレーダー反射パワーのプロファイルに見られるディップは  $T_e$  の上昇による効果が大きいと考えられるが、明らかに密度キャビティも生成されており、その深さは  $|\delta n/n_o| \approx 60\%$  程度にまで成長した。21:53:03 及び 21:54:47 のデータには強い Enhanced Ion Line が観測されているが、これは熱性キャビトン内に強い静電プラズマ波乱流が生じていることを示唆している。HF 波が切られた後も幅  $\sim 20$  km、 $|\delta n/n_o| \approx 50\%$  の密度キャビティが見られる (21:56:31 のデータ)。これが完全に消滅するまでに約 5 分間かかった。夜間の条件下では電離層 F 層のプラズマは東方向に流れる傾向にあるので、この結果はこのプラズマの流れを反映しているのかもしれない。即ち、プラズマ全体の水平方向の流れにより、低密度部位がレーダーによる観測可能領域を外れてしまい、実際の密度キャビティの消滅時間 [これは主に磁力線方向のプラズマ輸送による密度回復効果により決まると考えられる (第 4 節を参照のこと)] よりも消滅に要する時間が短く見えている可能性がある。

Fig. 8 に示す観測例は、入射 HF 波のパワー が最大値より若干小さい (ERP = 60 MW) にも拘らず大きな効果が観測された例である。この原因として、HF 波の周波数  $f_{HE}$  が電離層のピーク電子プラズマ周波数  $f_oF_2$  に極めて近く、加熱領域の密度勾配が非常に緩やかであったため (即ち、密度勾配が flat であったため) 電波の吸収効率が高かったことが挙げられる (このような場合を“フラット・トップ加熱”と呼ぶ)。

最後に、極めて特異な観測例を Fig. 9 に示す。この例の場合もほぼフラット・トップ加熱であったのだが、巨大な密度キャビティが驚くべきことに電離層のピーク密度を超えた高度域、即ち電離層のトップ・サイドに発生し、徐々にさらに高い高度域に上昇して行っている。HF 波を OFF にした後も、上層部に残った小さなバブル状の低密度部位 (右側 4 つのフレームに矢印で示してある) は約 60 m/s の速さで上昇を続けた。Fig. 9 のデータをどのように解釈すべきかについては第 5 節で考察する。

### 3.2. 1997 年の実験より

この節では、1997 年 8 月にアレンゴ電波天文台にて実施した能動電離圏実験で観測した熱性キャビトンの例を示す。1987 年に観測されたのを最後に 10 年間熱性キャビトンは観測にかかることがなかった。ところが、太陽活動の極小期に入った 1997 年になり再び観測されたのである。要するに、太陽活動が活発な間は熱性キャビトンが観測されなかったことになる。この点については

第5節で考察することにする。

アレシボ電波天文台付属の HF 施設は 1998 年にプエルトリコを襲った大型ハリケーンにより甚大な被害を受け、現時点で復旧の予定はない。従って、ここで紹介する熱性キャビトンのデータが最後のものになってしまった。極めて貴重なデータであると言える。ところで、この節で示すデータは前節の 1987 年のものと比べてノイズが大きくなっている。この主な理由は、430 MHz のレーダー用レシーバーがイオン線観測用に最適化されておらずアンテナ温度が極めて高かったためである。レーダー施設アップグレード後の調整期であったため、今になってみると大変に残念なことであった。

$f_{HF} = 5.10$  MHz (O-mode, CW), ERP = 80 MW の場合の熱性キャビトンの時間発展の様子を Fig.10 に示す。実験はプエルトリコのローカルタイムで深夜に実施され、HF 波は 22:40 から 0:00 の間 ON であった。加熱開始約 1 分後のデータ [Fig. 10(a)] には高度 ~300 km の HF 波の反射層に強い Enhanced Ion Line が見られ、既に密度にも変調がかかり始めている。ところで、本節で示す密度プロファイルの図では縦軸に高度をとってあり、横軸は密度そのものでなく 電子プラズマ周波数  $f_{pe}$  ( $\propto n_e^{1/2}$ ) となっていることに注意されたい。

Figs. 10(b) ~ 10(f) のデータについては、それぞれの時刻に対応する電子温度  $T_e$  及び イオン温度  $T_i$  の高度分布を Figs. 11(b)' ~ 11(f)' に示してある。温度測定は、長いレーダー・パルス (~1 ms) を用いたレーダーの反射信号を周波数スペクトル解析することで行なわれているため、高度の分解能は極めて悪く、温度の上昇率は正しく測定されていると言えるものの高度分布に関しては実際よりもかなりブロードに歪曲されていると解釈すべきである。

さて、Fig. 10 及び Fig. 11 より次のようなことが分かる。加熱開始の初期に電子温度が著しく上昇する。~15 分後には  $T_e \approx 3T_{e0}$  となっている。ここで、 $T_{e0}$  は加熱前のバックグラウンドの電子温度であり、この例では ~730 K であった。時間が経ち、密度キャビティが深まるにつれ HF 波の加熱効率が落ち電子温度上昇は抑制されるようになる。ところが、 $T_i$  は上昇し続け  $T_i \approx T_e \approx 1.7T_{e0}$  となっている (加熱開始約 1 時間後)。キャビティの深さは  $|\delta n/n_0|_{\max} \approx 70\%$  にまで達した [Fig. 10(e)]。HF 波が切られると、温度は急速 (2 分以内) にバックグラウンド・レベルに戻ってしまう [Fig. 11(f)']。この実験例では 1987 年の Fig. 9 に示したデータに見られるようなプラズマ・バブルが HF 波を切った後に観測されている [Fig. 10(f)]。このバブルは 1987 年の場合同様、電離層トップ・サイドを上昇して行った模様である。因みに、Fig. 10(f) のトップ・サイド部に見られるシャープなピークは Enhanced Ion Line ではなく、単にレーダー信号に入った干渉信号によるものである。

Fig. 12 及び Fig. 13 に、 $f_{HF} = 3.175$  MHz (O-mode, CW), ERP = 80 MW の場合について熱性キャビトンの観測例を示す。実験は深夜、午前 1 時頃開始された。Fig. 12 は CW 加熱を開始して約 30 秒後 (上図) 及び 約 8 分 30 秒後 (下図) の  $f_{pe}$  プロファイル 及び 温度の高度分布の様子である。この例では  $f_{HF} \approx f_0F_2$ 、即ちフラット・トップ加熱であった。従って、加熱効果が極めて大きいことが見て取れる。加熱開始後 30 秒以内に電子温度は  $T_e \approx 5.5T_{e0}$  にまで上昇した。ここで、加熱開始前の電子温度は  $T_{e0} \approx 730$  K であった。加熱開始後 30 秒以内に密度にも既に大きな変調がかかり始めており、加熱開始後 10 分以内に電離層のピーク付近が大きくえぐられたような密度プロファイルとなり  $|\delta n/n_0| \geq 70\%$  にまで達している。Enhanced Ion Line も観測されており、強いイオン波乱流の存在を示唆している。

Fig. 13 は、Fig. 12 で示した CW 加熱後、非常に短いパルス・モード (パルス幅 = 10 ms, 0.5% duty cycle) に切り換えた後の  $f_{pe}$  プロファイル 及び 温度の高度分布である。HF 波パルスは極めて短く加熱効果が顕著に現れる余裕がない。従って、実質的に加熱をやめた後の電離層の“冷却”の様子を示していると言える。Fig. 13 上図は短いパルスモードに切り替わってから約 30 秒後のデータ、下図は約 2 分後に取られたデータである。 $T_e$  は急激に減少し 2 分以内にバックグラウンドのレベルに戻っている。それに比べ、当然のことではあるが、密度の方はイオンの時間スケールで変化する

るため密度変調のリカバリーは極めてゆっくりとしたものであった。

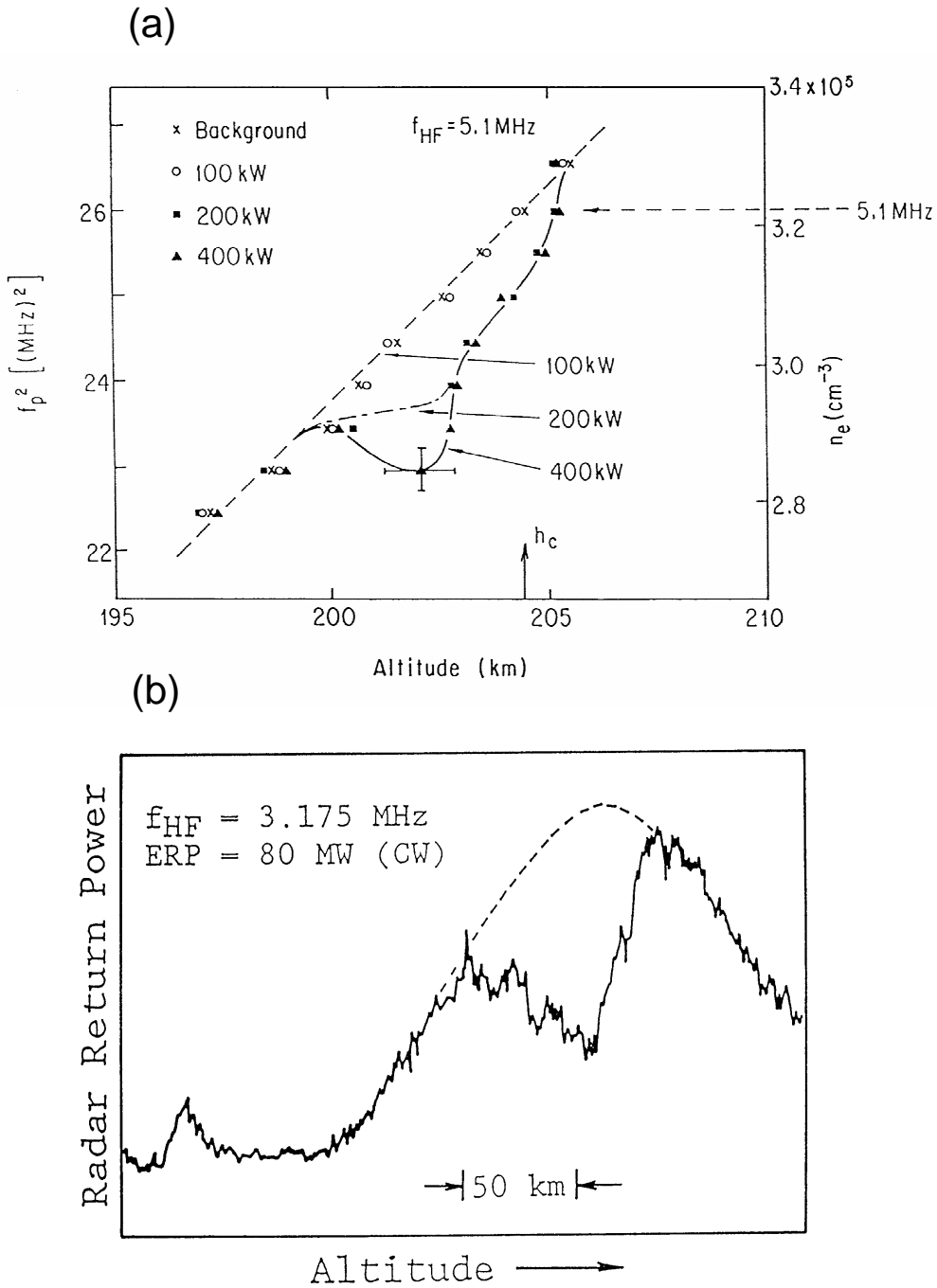


Figure 6. Observations of thermal cavitons.

(a) Example of a thermal caviton observed during the daytime (after Fig. 2 in ref. [4]).

(b) Example of a thermal caviton observed during the night-time. The broken curve indicates the unperturbed density profile before the generation of the thermal caviton.

Note the difference in size and depth of cavities between two cases.

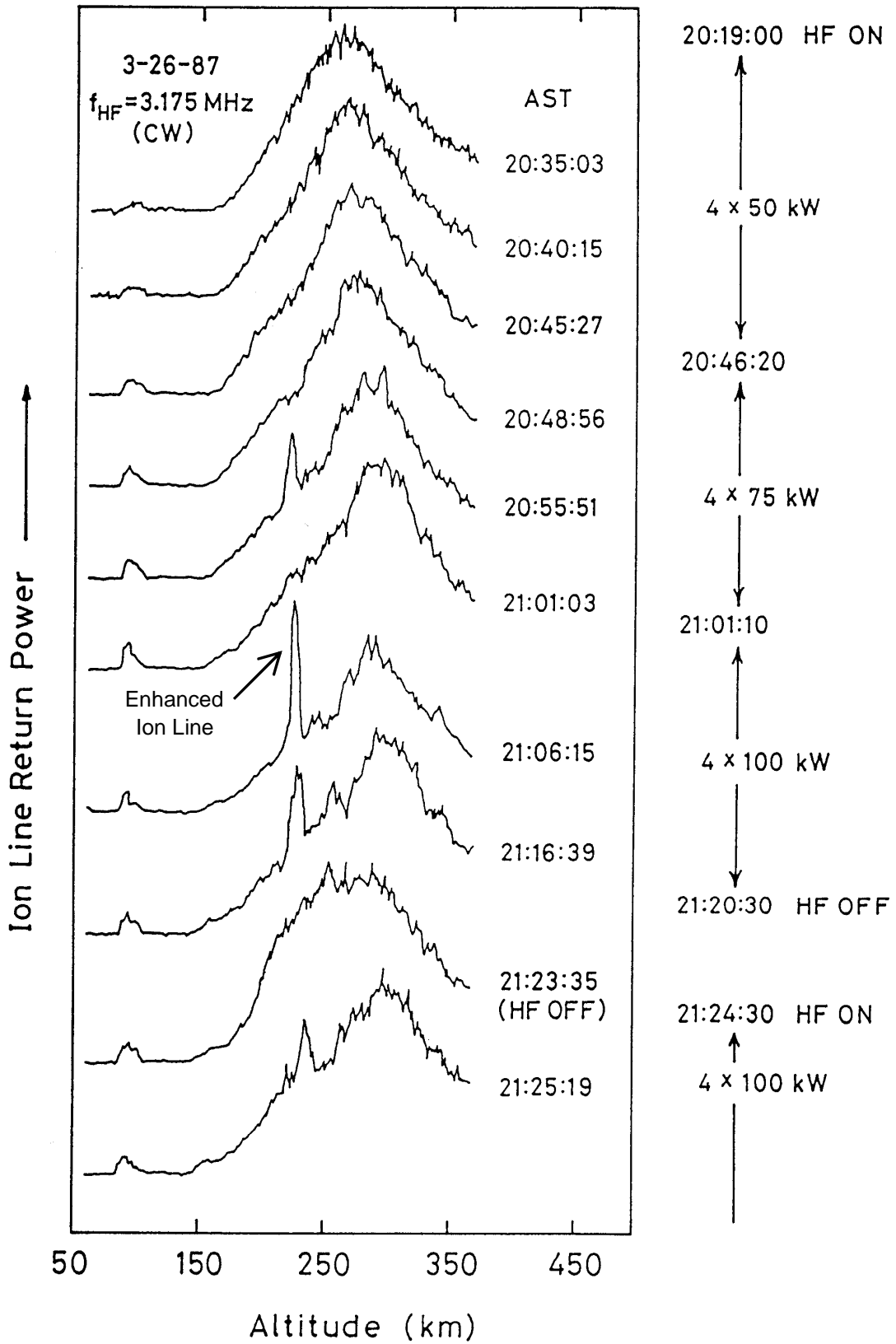


Figure 7(a). Temporal development of a thermal caviton.  
 The data shown here were taken between 20:35:03 and 21:25:19.

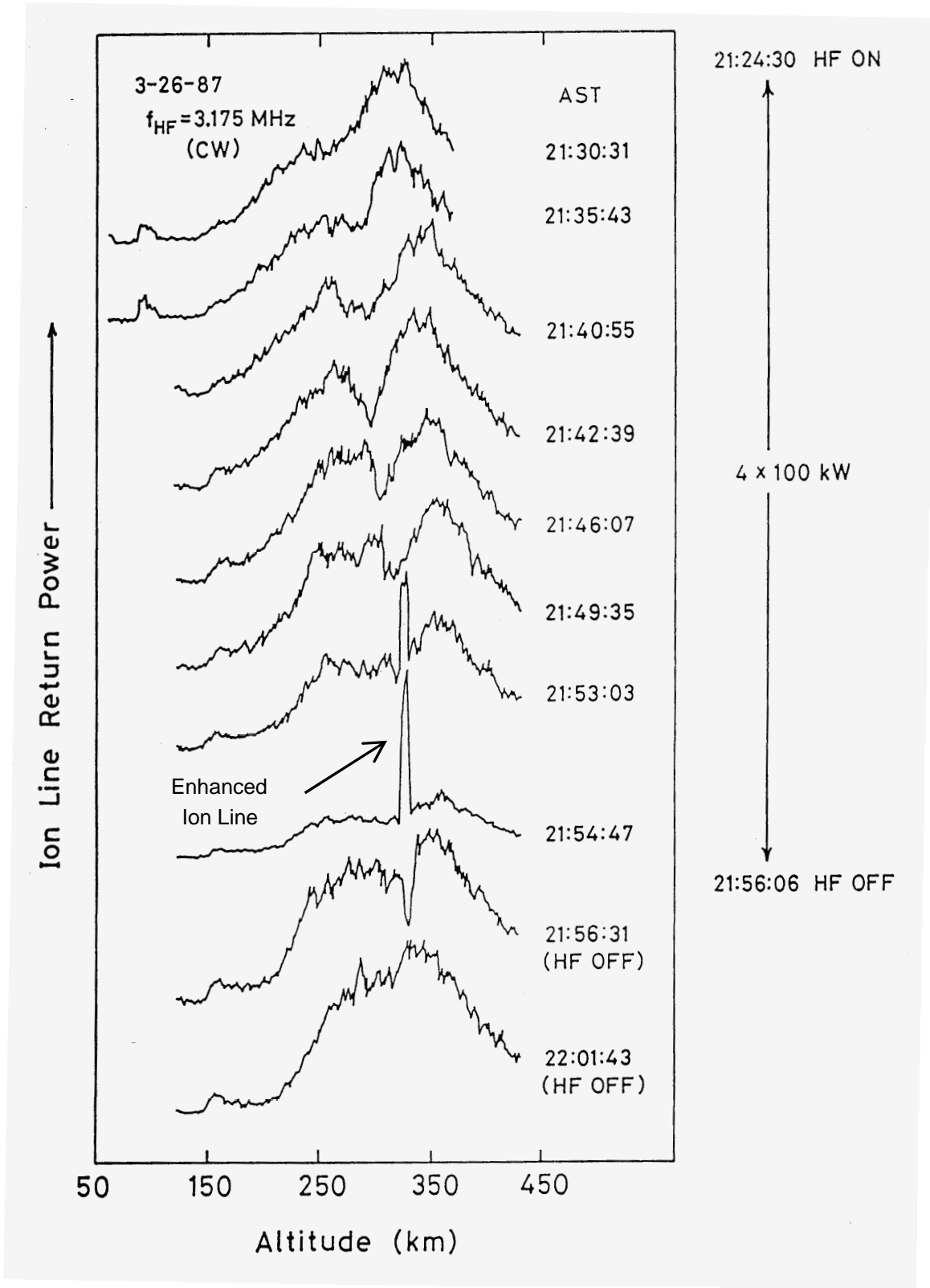


Figure 7(b). Temporal development of a thermal caviton.  
 The data shown here were taken between 21:30:31 and 22:01:43.

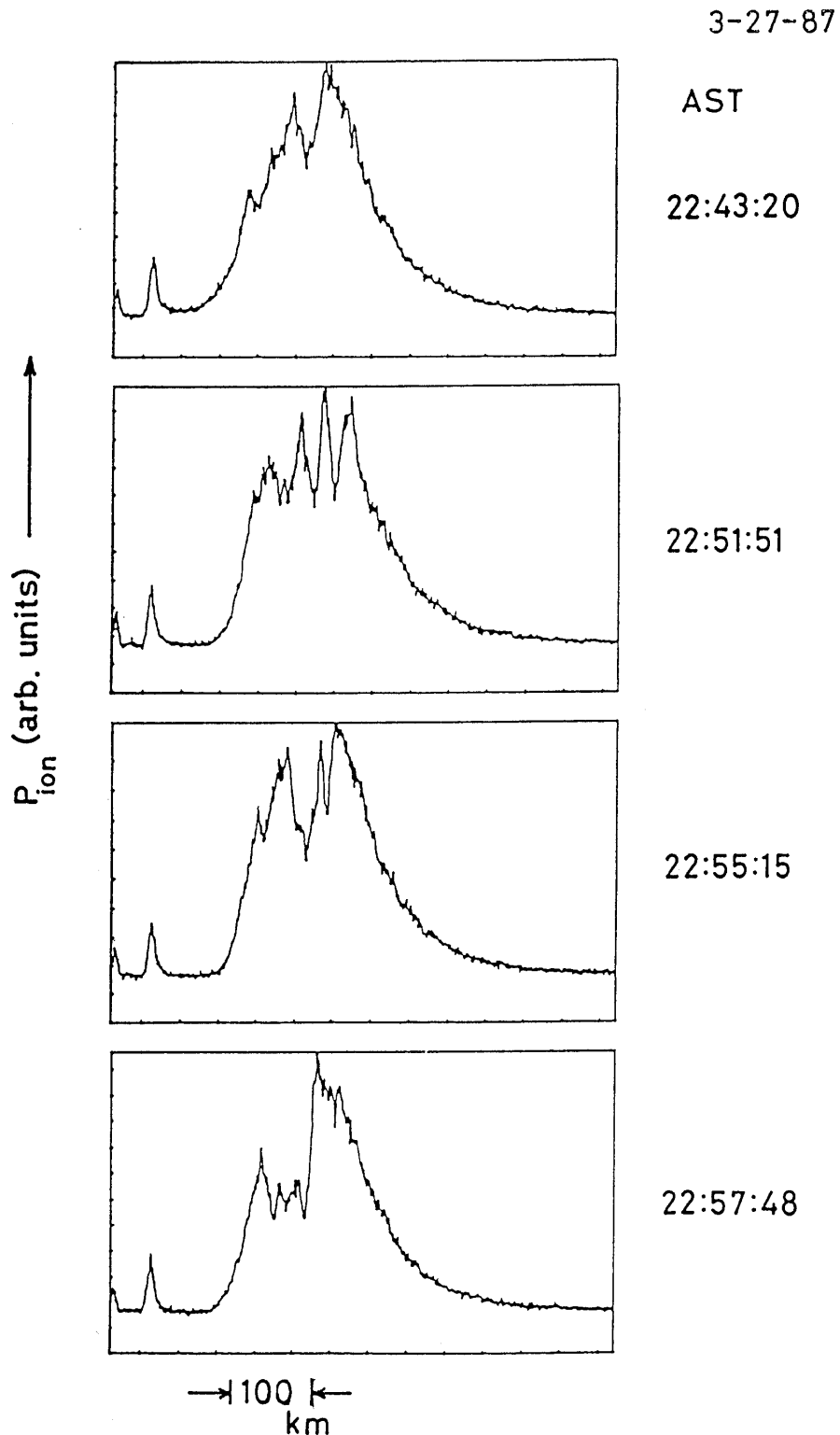


Figure 8. Temporal development of a thermal caviton in the case of  $f_{\text{HF}} \approx f_0 F_2$  (the electron plasma frequency at the peak of the ionosphere). In this experiment, the experimental parameters used were  $f_{\text{HF}} = 3.175$  MHz (CW) and ERP = 60 MW. The HF wave was turned on at 20:22.



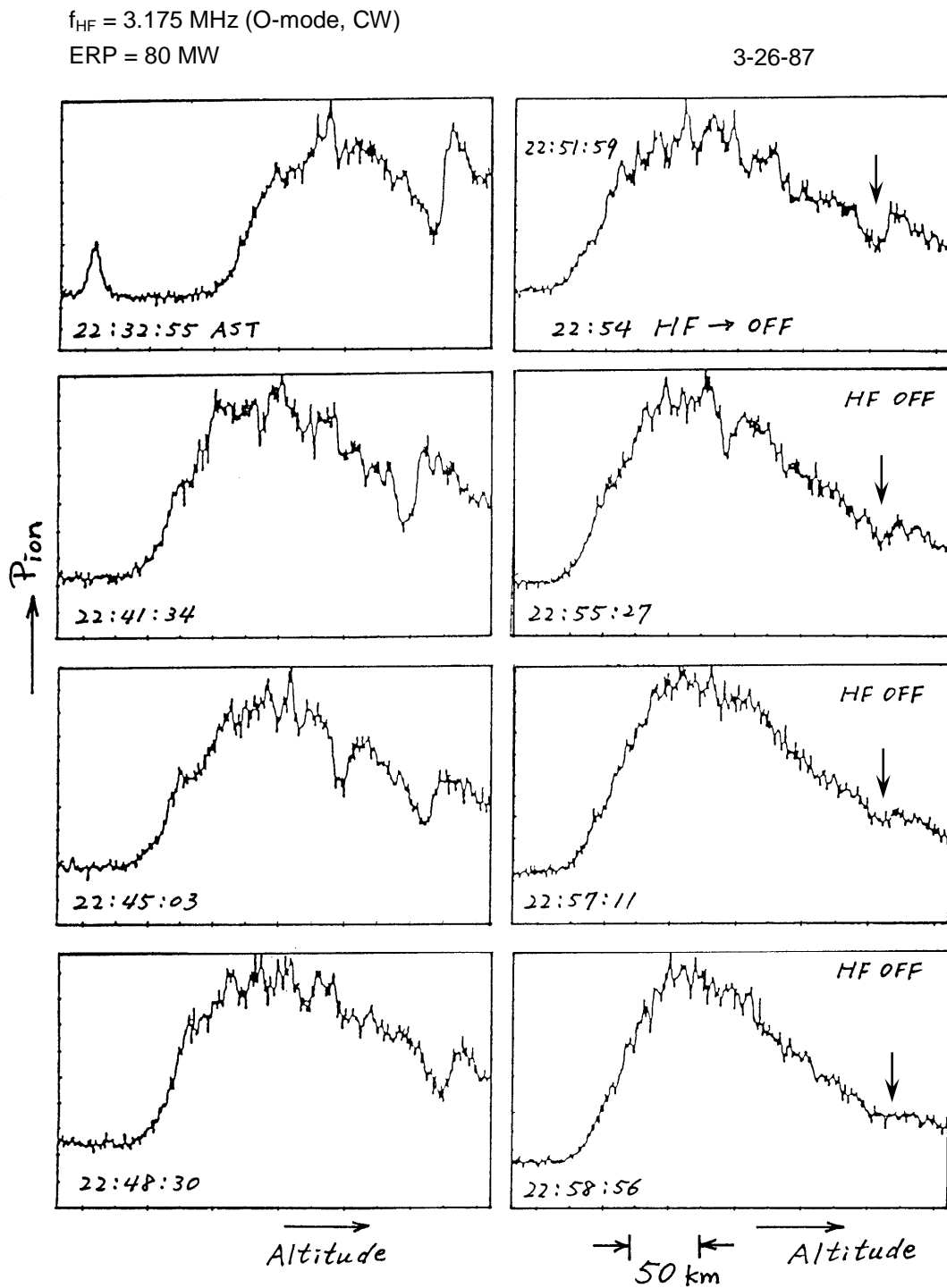


Figure 9. Thermal caviton observed in the top-side of the ionosphere.  
 The HF wave was turned off at 22:54.

$f_{HF} = 5.10$  MHz (O-mode, CW)  
ERP = 80 MW

Aug. 8, 1997

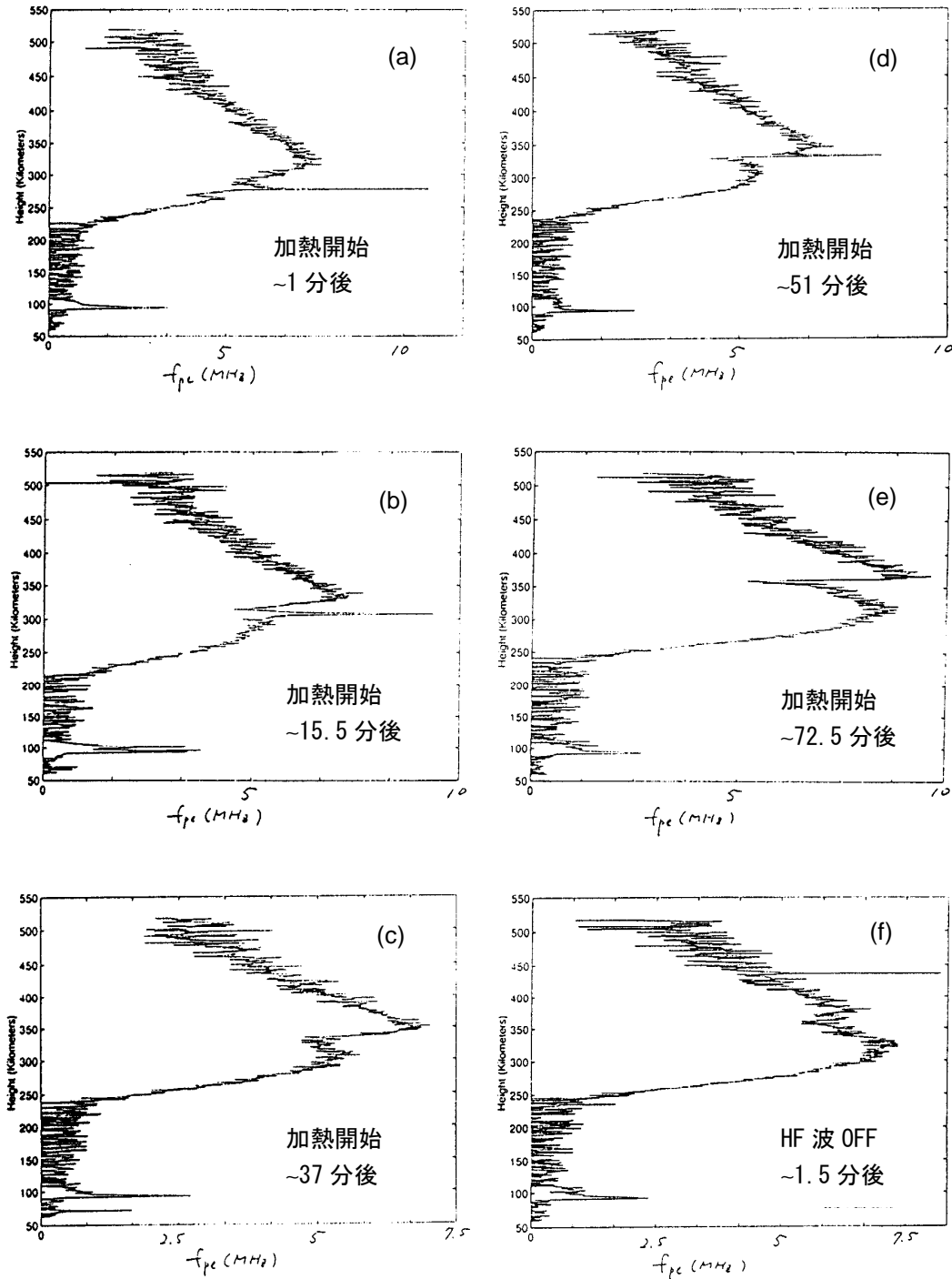
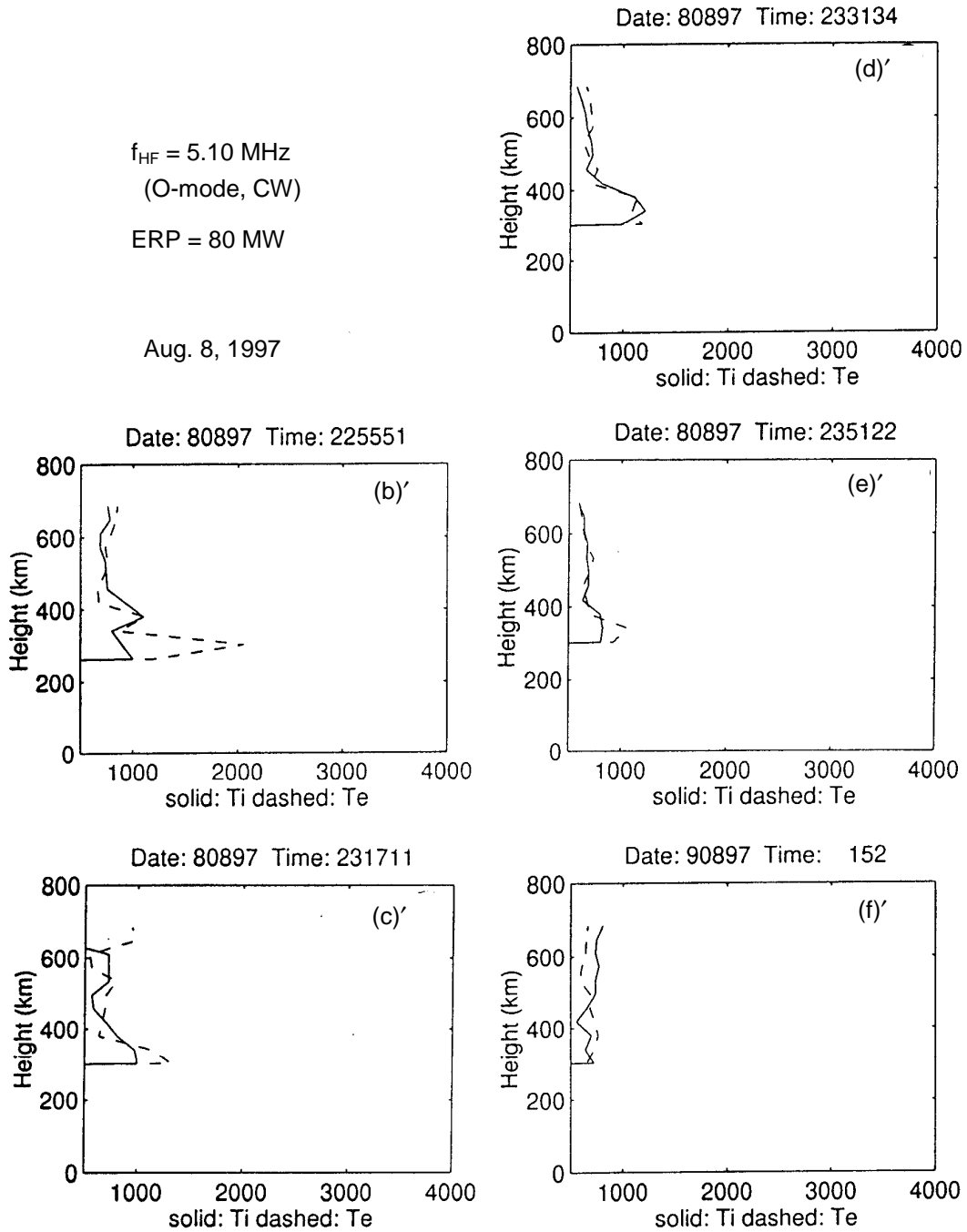


Figure 10. Temporal development of a thermal caviton. The HF wave was ON between 22:40 – 0:00 (local time, midnight). For each figure, the ordinate indicates the altitude,  $h$ , between 50 km and 550 km, while the abscissa denotes the electron plasma frequency,  $f_{pe}$  (MHz).



**Figure 11.** Altitude profiles of the electron temperature,  $T_e$ , and the ion temperature,  $T_i$ . The data shown here were taken at the same time as the data shown in Fig. 10 were taken. The times that the data in Figs. (b)' – (f)' were taken correspond to those that the data in Figs. 10(b) – 10(f) were taken. The ordinate indicates the altitude,  $h$ , between 0 km and 800 km, while the abscissa denotes temperature (K). The solid curves are  $T_i$  profiles, while the broken curves indicate  $T_e$  profiles.

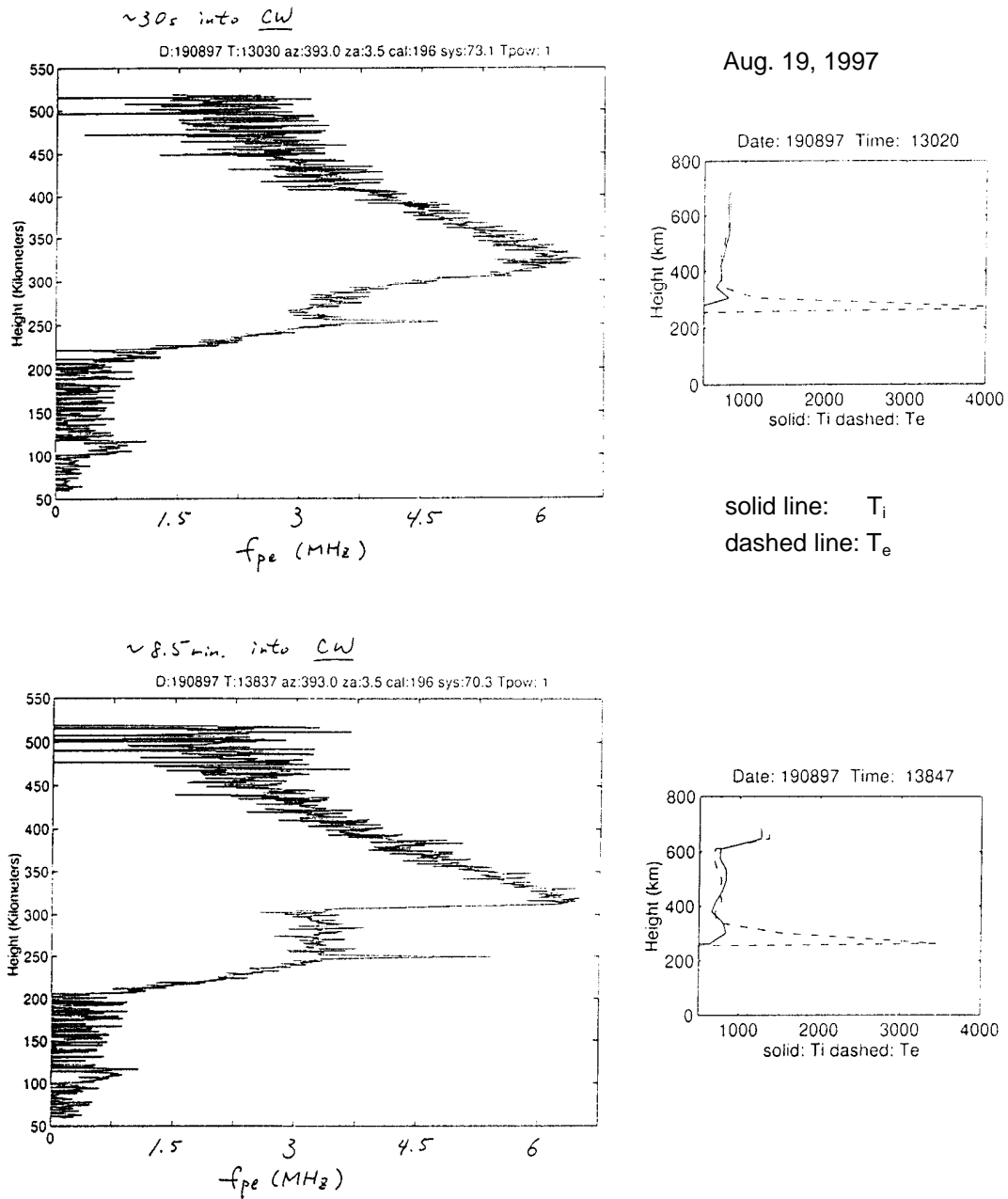


Figure 12. Thermal cavitons and the corresponding altitude profiles of the electron and ion temperatures. The data in the upper figures (or in the lower figures) were taken ~30 s (or ~8.5 min.) after the initiation of the HF heating. The HF power used was ERP = 80 MW at  $f_{HF} = 3.175$  MHz (O-mode, CW).

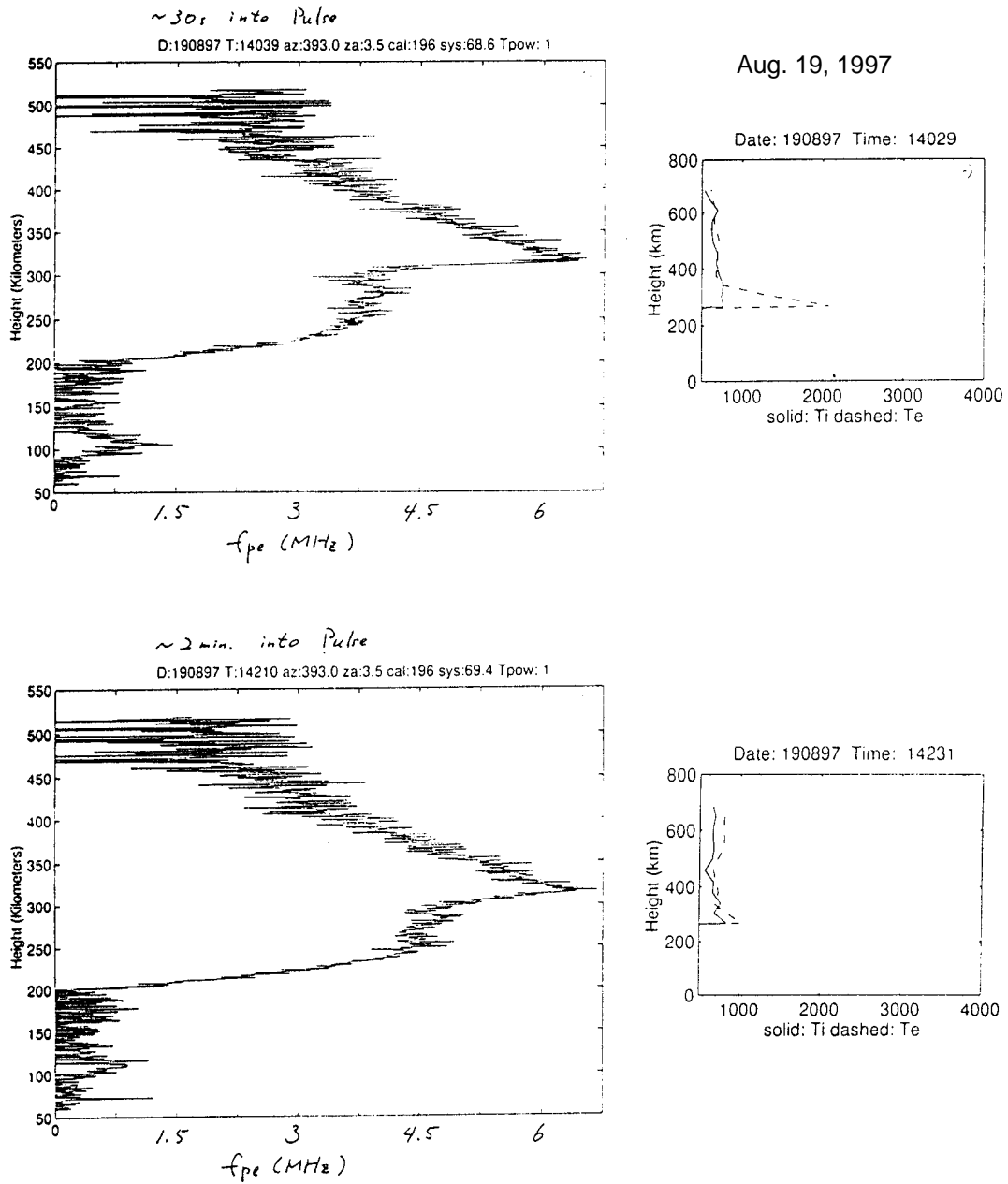


Figure 13. Thermal cavitons and the corresponding altitude profiles of the electron and ion temperatures. The data were taken during the short-pulse heating mode (0.5% duty cycle). The data in the upper figures (or the lower figures) were taken ~30 s (or ~2 min) after the termination of the CW heating shown in Fig. 12. The heating frequency was  $f_{HF} = 3.175$  MHz.

#### 4. 理論 – 輸送モデル –

熱性キャビトンは反射層付近のプラズマ圧（温度）の上昇によりプラズマ粒子がその領域から排除されることにより生成される。従って、熱性キャビトンの生成・消滅過程は基本的に熱・粒子輸送方程式により記述できる筈である。電離層風の影響が小さい場合、粒子及び熱の輸送は主に地磁気の方に沿って生じるため、輸送方程式はその方向についての以下に記すような1次元の方程式群に帰着する[6–8]。

$$\frac{3}{2} \left\{ n_e \frac{\partial T_e}{\partial t} + n_e v_s \frac{\partial T_e}{\partial s} \right\} + n_e T_e \frac{\partial v_s}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} \left[ \kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial s} \right] + Q - L_e \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial s} (n_e v_s) - \beta n_e + S_i \quad (2)$$

$$n_e v_s = -D \left[ \frac{\partial}{\partial s} [n_e (T_e + T_i)] + n_e m_i g \sin \theta \right] + n_e u \cos \theta \quad (3)$$

ここで、

$s$  : 地磁気に沿った位置座標

$v_s$  : 地磁気に沿った方向のプラズマ流速

$m_i$  : イオンの質量

$u$  : 南北方向の中性粒子風速

$\theta$  : 地磁気の伏角

$g$  : 重力加速度

$Q$  : HF波に起因するエネルギー源

$S_i$  : 局所的な電離によるプラズマ源

$\kappa_e$  : 熱伝導率

$L_e$  : 冷却係数

$D$  : 拡散係数

$\beta$  : 再結合係数

$n_e$  : 電子密度

$T_e, T_i$  : エネルギー単位で表した電子温度とイオン温度

式 (1) – (3) を隣接するたくさんの異なる磁力線に沿って解くことにより2次元効果について調べることも可能である。 $Q$ にいろいろな異なるメカニズムによる入射HF波の電離層による吸収を取り入れることが可能であり、これを如何に取り扱うかが大きな課題の一つである。ここでは、イオン種を $O^+$ として $Q$ がHF波によるオーム加熱である場合について数値的に検討した例をFig. 14に示す。この図では、 $\delta T_e/T_{e0}$ を高度 $h$ に対してプロットしてある。ここで、 $\delta T_e \equiv T_e - T_{e0}$ である。また、バックグラウンドの電子温度 $T_{e0}$ は高度 $h$ の関数である。図を見て分かるように、ERP = 500 MWの場合でも $T_e/T_{e0}$ は高々3であり、実験的に観測された温度上昇を十分に説明できるものではない。この点については次節で考察することにする。

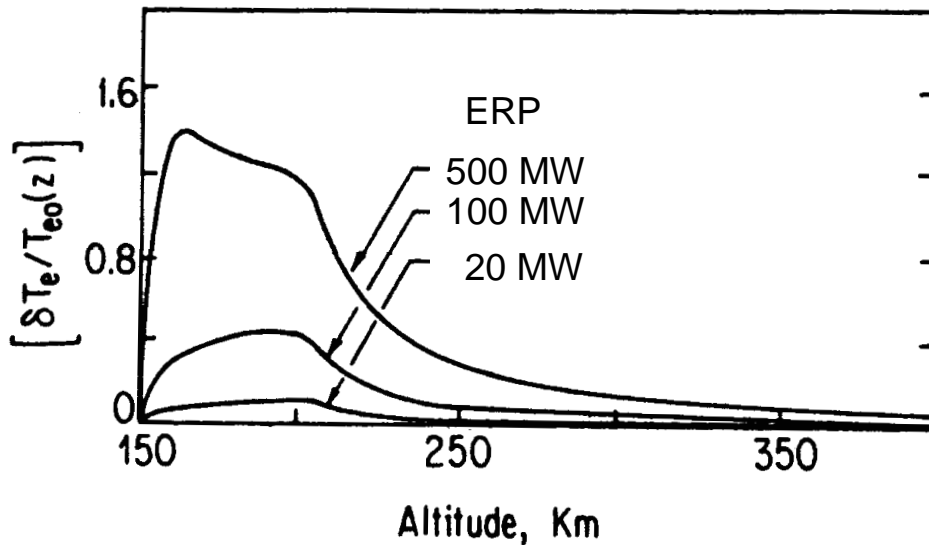


Figure 14. Numerical results of the HF heating of the ionosphere using Eqs. (1) – (3) assuming that the heating source is due to the Ohmic heating of the HF wave only. (after ref. [7]).

## 5. 考察

### 5.1. 巨大キャビティ構造の生成

巨大キャビティ構造の生成を理解するためには反射層付近で生じる大きな電子温度上昇を正しく説明できなくてはならない。

輸送モデルの熱源として入射電磁波のオーム加熱の効果を取り入れただけでは温度上昇の半分程度しか説明できない(第4節を参照)。F層域のプラズマを大電力HF波で照射する場合、共鳴層(即ち、反射層)付近で入射電磁波のエネルギーの30%~50%程度が静電波にモード変換されると評価できる[9]。従って、モード変換された静電波のエネルギーがどの程度プラズマ加熱に寄与し得るのかを正しく評価する必要がある。大規模キャビティが観測された多くの場合について非常に強度の高いEnhanced Ion Lineが同時に熱性キャビトン内に観測されており、イオン波乱流の寄与の重要性を示唆している。

また、ひとたび密度キャビティが生じると、入射電磁波の伝播経路に変化が生じ、セルフ・フォーカシングの効果が重要になってくる。その結果、反射層域で実効的に入射電磁波のエネルギー密度が上がる可能性が出て来る。セルフ・フォーカシング効果を現象論的に輸送方程式に取り入れることで加熱領域がフィラメント状に分離する様子を再現することに成功した報告がある[8]。この効果をセルフ・コンシスタントに輸送モデルに取り入れるには未だ不十分な状況である。セルフ・フォーカシング効果の重要性は古くから指摘されているにも拘らず[10]、未だ満足のできるモデル構築に至っていないというのが実情である。

### 5.2. 熱性キャビトンと太陽活動

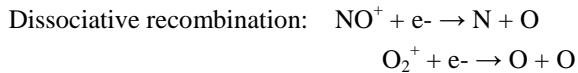
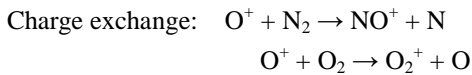
1980年代の終わり、太陽活動が活発になるにつれ熱性キャビトンは観測されなくなった。これは基本的に、電離層密度が全体として上昇し、特定の周波数のHF波に対する反射層高度が下がり、下部電離圏におけるHF波の吸収が大きくなったことに主な原因があると考えられる。より高周波のHF波を使うとモード変換で励起される静電波のプラズマ粒子とのカップリングが悪くなり全体

として HF 波の F 層域プラズマによる吸収効率が落ちる。従って、熱性キャビトンは生じ難くなるということになる。しかしながら、我々は 1990 年の能動電離圏実験キャンペーンの際  $f_{HF} = 7.30$  MHz 及び 8.175 MHz においても（これらの周波数は、アレシボ実験では周波数が高めで、必ずしも加熱実験における最適の周波数ではない）CW 加熱で若干の密度変調の兆候を観測した経験がある。今後アレシボ電波天文台で新たな能動電離圏実験を行うことは絶望的であるので、過去に取得したデータをもう一度詳しく見直す作業を実施する必要性を感じている。

### 5.3. トップ・サイドに観測された密度キャビティ

この新たに発見された密度キャビティの振る舞いを理解する目的で、以下に述べるようなモデル [11] を定量的に検討すべきであろう。

HF 波は反射層付近で今まで述べてきたようないろいろなメカニズムで吸収され電子温度を増大させるばかりでなく、イオン波乱流などを通してイオン温度も上昇させる。その結果、加熱領域のプラズマは膨張し、加熱領域内に磁力線方向の電場  $\mathbf{E}_{\parallel}$  が発生する。 $O^+$  イオンはこの  $\mathbf{E}_{\parallel}$  により加速され加熱領域から漏出する。一方、周りの低温の電子はこの領域に流入し入射 HF 波により加熱される。このように“熱く”なった ( $O^+, e^-$ ) プラズマは次の様な電荷交換 (charge exchange) 反応、解離再結合 (dissociative recombination) 反応を促進させ、結果として加熱領域付近の磁力線に沿った領域のプラズマ密度が低下し“プラズマ・バブル”が発生する可能性がある。



夜間の赤道域電離層では  $O^+$  イオンの  $\mathbf{g} \times \mathbf{B}$  ドリフト（ここで、 $\mathbf{g}$  は重力加速度）により東向きのイオン電流が顕著であるが、この電流が前述の磁力線に沿ったプラズマ・バブルを横切って流れる際、電流保存を満足させるためにはバブル内でイオンを加速する必要があり、バブル内には東向きの分極電場  $\mathbf{E}_p$  が発生するだろう。この  $\mathbf{E}_p$  と地磁気  $\mathbf{B}$  とによる  $\mathbf{E}_p \times \mathbf{B}$  ドリフトによりバブルは上方に移動することになる。Fig. 9 の場合、ドリフト速度は  $\sim 60$  m/s であったが  $B = 0.5$  G とすると  $E_p \sim 3$  mV/m ということになる。

自然現象として発生するプラズマ・バブルや磁力線に沿った密度変調チャンネルが存在する場合、上述の現象が生じ易くなる可能性がある。EM キャビトンが引き金になる可能性も考えられる。熱性キャビトンとプラズマ・バブルがどのように相互作用するのも興味ある課題である。まだまだ解決すべき課題は多い。

## 6. まとめ

プエルトリコのアレシボ電波天文台で実施した大電力 HF 波で電離層 F 層域プラズマを照射する“能動電離圏実験”の際に、巨大な密度キャビティ（熱性キャビトン）が電離層プラズマ中に観測された。本論文はこの観測結果についての報告である。昼間の条件下では、キャビティの高度方向の広がり  $\Delta h = 6 - 7$  km, 最大密度変調度  $|\delta n/n_o|_{\max} = 7 - 8\%$  程度であった。一方、夜間の条件下では、 $\Delta h = 20 - 80$  km,  $|\delta n/n_o|_{\max} \approx 70\%$  という巨大な密度キャビティが観測され、 $|\delta n/n_o|$  が 50% を超える場合がしばしばあった。

HF 波によるプラズマのオーム加熱を熱源とする輸送モデルだけでは温度上昇、密度減少の度合いを正しく評価するには不十分である。反射層域で共鳴的に励起される静電波のダンピング効果、成長し始めた密度キャビティによる入射 HF 波のセルフ・フォーカシング効果などを正しくモデルに取り入れる必要がある。

G. Meltz *et al.* [10] の計算によると、 $f_{HF} \approx f_o F_2$  の場合、HF 波のセルフ・フォーカシング効果によ



り上方に膨張したプラズマがトップ・サイドに“噴出し” HF 波がトップ・サイドに漏れ出す場合もあり得るといふ。フラット・トップ加熱 ( $f_{HF} \approx f_oF_2$ ) の有効性は我々の実験においても確認されているが、この様な burn-through 効果がトップ・サイドに“漏れ出す”プラズマ・バブルの生成に関係していることも考えられる。我々の実験において観測された、電離層のピークを越えてトップ・サイドにドリフトする密度キャビティ (プラズマ・バブル) の現出を正しく理解するためには、5.3 節で述べたように様々な異なる現象をコヒーレントに考慮する必要があるだろう。

熱性キャビトン内にしばしば観測される Enhanced Ion Line の存在は、強い静電プラズマ波乱流が生じていることを示唆している。Fig. 15 に電離層中に生成される“キャビトン”の統一的なイメージ図を示す。今後静電波乱流の熱性キャビトンに対する影響を詳細に検討して行く必要があるだろう。

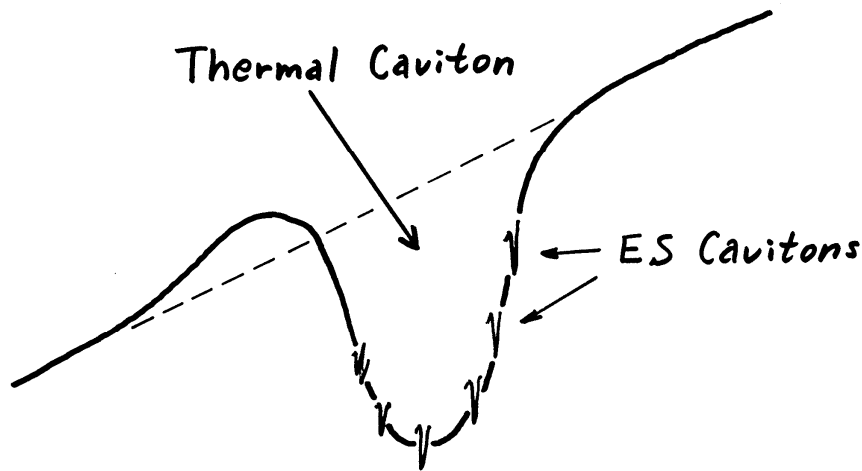


Figure 15. Schematic diagram of the relationship between a thermal caviton and ES cavitons that are generated inside the big cavity.

## 謝辞

Arecibo Observatory における実験は、P. Y. Cheung, J. Santoru, M. P. Sulzer との共同研究として実施したものである。データの取得・解析には、Dr. Sulzer が開発したソフトを使用したことを付記しておく。我々の実験時、アレシボ電波天文台は、米国科学財団 (the National Science Foundation) のスポンサーシップの元、コーネル大学により運営されていた。現在では National Astronomy and Ionosphere Center の名の下に、やはり NSF の施設として主に SRI International により運営されているようである[12]。

## 参考文献

- [1] 河島 信樹, プラズマ・核融合学会誌 **72**, 42 (1996).
- [2] P. Y. Cheung, A. Y. Wong, T. Tanikawa, J. Santoru, D. F. DuBois, H. A. Rose, and D. Russell, Phys. Rev. Lett. **62**, 2676 (1989); P. Y. Cheung, D. F. DuBois, T. Fukuchi, K. Kawan, H. A. Rose, D. Russell, T. Tanikawa, and A. Y. Wong, J. Geophys. Res. **97A**, 10575 (1992); P. Y. Cheung and T. Tanikawa, in *Nonlinear Space Plasma Physics* (AIP Press, New York, 1993), pp. 172 – 206.
- [3] L. M. Duncan, J. P. Sheerin, and R. A. Behnke, Phys. Rev. Lett. **61**, 239 (1988).

- [4] A. Y. Wong, T. Tanikawa, and A. Kuthi, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 1375 (1987).
- [5] 谷川隆夫, 「科学研究費補助金研究成果報告書」基盤研究 (C)(2) 12680482 (2000—2001 年度).
- [6] M. M. Shoucri, G. J. Morales, and J. E. Maggs, *J. Geophys. Res.* **89** (A5), 2907 (1984).
- [7] J. D. Hansen, G. J. Morales, and J. E. Maggs, *J. Geophys. Res.* **94** (A6), 6833 (1989).
- [8] J. D. Hansen, G. J. Morales, L. M. Duncan, J. E. Maggs, and G. Dimonte, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 3285 (1990).
- [9] V. L. Ginzburg, *The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas*, 2nd ed. (Pergamon, Oxford, 1970).
- [10] G. Meltz, L. H. Holway, Jr., and N. M. Tomljanovich, *Radio Sci.* **9**, 1049 (1974).
- [11] M. C. Lee *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 579 (1998).
- [12] [http://www.naic.edu/index\\_scientific.php](http://www.naic.edu/index_scientific.php)

能動電離圏実験関連の学会誌の特集号及び解説論文：

- [13] 1970 年代初めの実験結果など：  
    *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, Nov. (1970); *Radio Sci.*, Vol. 9, Nov. (1974).
- [14] 70 年代から 80 年代にかけての研究成果等：  
    *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 44, Dec. (1982); *ibid.*, Vol. 47, Dec. (1985); *Radio Sci.*, Vol. 18, Nov./Dec. (1983).
- [15] 80 年代後半の研究成果等：  
    *Radio Sci.*, Vol. 25, Nov./Dec. (1990).
- [16] ロシアでの実験結果を中心に 90 年代後半の研究成果等：  
    *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* Vol. 59, Dec. (1997).
- [17] J. A. Fejer, “Ionospheric Modification and Parametric Instabilities,” *Rev. Geophys. Space Phys.* **17**, 135 – 153 (1979).
- [18] T. R. Robinson, “The Heating of the High Latitude Ionosphere by High Power Radio Waves,” *Phys. Reports* **179** (2 & 3), 79 – 209 (1989).

# ラクチドとアミン類の開環反応を利用した乳酸アミド類の合成法

渡邊 幹夫、島 弓子（理学部化学科）

The Synthetic Method for the Lactic acid Amides by Utilizing Ring-opening  
Reaction of Lactide with Various Amines

Mikio WATANABE and Yumiko SHIMA

(Department of Chemistry, School of Science, Research Institute of Science  
and Technology)

Yumiko SHIMA(School of Science Department of Chemistry)

キーワード：ラクチド，乳酸アミド，開環反応

Keywords: Lactide, lactic acid amide, ring-opening reaction

## Abstract

It is well known that lactic acid amide skeleton is important as a part of depsipeptide<sup>[1]</sup>. It was found that the ring-opening reaction of lactide with amines followed by hydrolysis of the ring-opening products to give corresponding lactic acid amides in high yields.

Further, when in this ring-opening reaction, excess amount of amine was used, it was also found that the lactic acid amide was obtained directly without hydrolysis process in high yield.

## 1. はじめに

*L*-(−)ラクチド (1) は天然の乳酸が環化縮合したもので、近年その開環重合物は、生分解性プラスチックとして注目を集め、環境にやさしい素材として注目されている。<sup>[2],[3]</sup>

一方、乳酸アミドの骨格は、近年注目を集めているデプシペプチドの部分骨格として重要であり興味をもたれている。従来より、我々はラクチドの開環反応について種々検討を行っているが、入手容易なラクチドが、安価な不斉源としてとして利用できるのではないかと考えた。

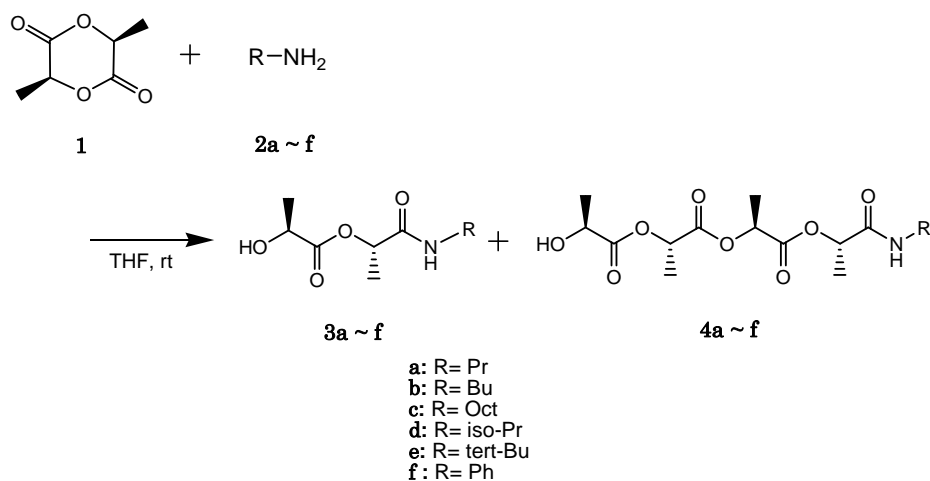
すなわち、ラクチドと不斉炭素を有するアミン類との開環反応を行い、得られたラクチル乳酸アミド類の加水分解を行い、得られた乳酸アミドの <sup>1</sup>H-NMR を測定し、ジアステレオ異性体の比率を求めることにより、アミンの光学純度が簡単に測定できるのではないかと考えた。

現在、不斉炭素をもつアミン類の光学純度を求めるには、モッシャー試薬を用い、対応するアミドに導き、その <sup>19</sup>F-NMR を測定しジアステレオ異性体の比率より求めるのが一般的であるが、試薬が高価であったり操作が煩雑であったり問題が有る。

ラクチドとアミン類との開環反応は、報告例が少なく、わずかにジメチルアミンとの反応が報告されているのみである。<sup>[4]</sup>そこで、本研究ではラクチドのアミン類との開環反応の反応条件を検討するため、立体障害の異なる第1アミンを用い開環反応について検討した。

## 2. 結果および考察

まず初めに、第1アミンとして、プロピルアミン、ブチルアミン、オクチルアミン、*i*-プロピルアミン、*tert*-ブチルアミン、アニリンを用い、各々*L*-(-)-ラクチドとの開環反応について検討した。すなわち、THF 溶媒中室温で1~6時間攪拌し反応させたところ立体障害の小さいプロピルアミン、ブチルアミン、オクチルアミンは極めてスムーズに反応は進行し、対応するラクトイル乳酸アミド (**3**) が好収率で得られることを見出した。しかしながら、本反応において、開環生成物がさらに未反応のラクチドと反応した化合物 (**4**) も得られることが明らかとなった。(Scheme 1)



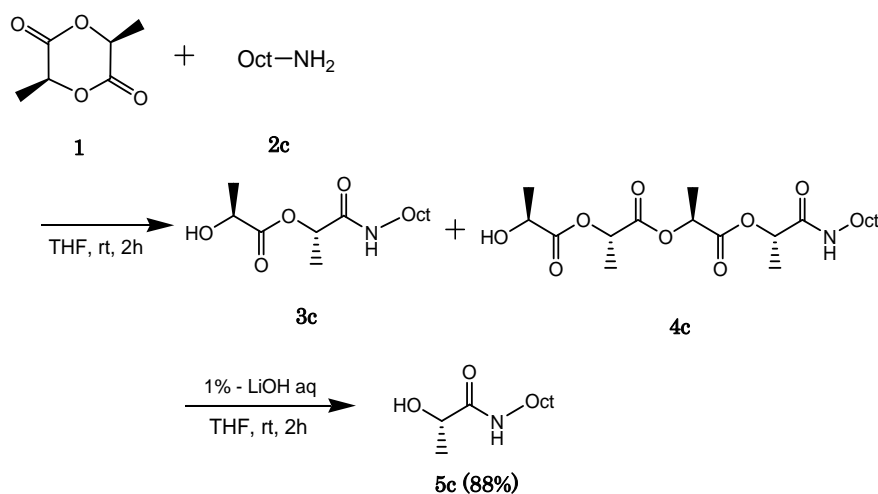
Scheme 1

**Table 1.** The reaction of *L*-(-)-lactide with various primary amines

entry	amines	time (h)	yield of <b>3</b> (%)
1	<b>2a</b>	1	89
2	<b>2b</b>	1.5	88
3	<b>2c</b>	2	87
4	<b>2d</b>	6	49
5	<b>2e</b>	6	-
6	<b>2f</b>	6	-

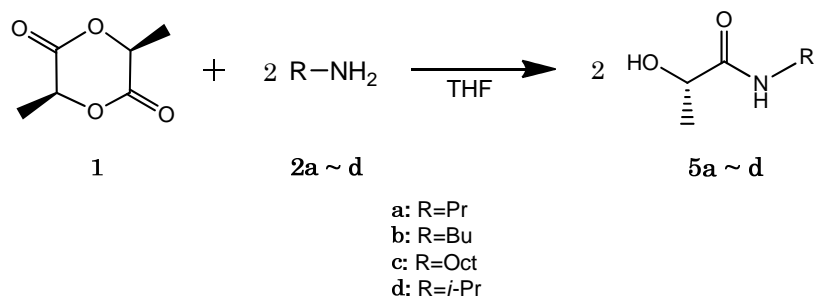
また、直鎖アルキルアミンに比べやや嵩高いイソプロピルアミンは、開環生成物である **3d** がさらに未反応のラクチドと反応した化合物 **4d** が多く生成したため、直鎖アルキルアミンに比べ低収率が得られた。さらに、立体障害の大きな *tert*-ブチルアミンやアニリンについては、*L*-(-)-ラクチドとの開環反応は全く進行せず、原料の回収にとどまった。これらの結果を **Table 1** にまとめた。次に、得られた開環生成物 **3a~d** を単離することなくそのままエステル結合の加水分解を行う目的物である乳酸アミドの合成について検討を行った。ラセミ化を伴うことなく加水分解を行う

ためより温和な条件で加水分解を行う必要がある。ラクチドは、水溶液中で容易に乳酸に加水分解されることから、まず、水溶液中での加水分解について検討を行った。すなわち、水溶媒中 60℃で 6 時間攪拌し反応を行ったが、反応は全く進行せず、原料回収にとどまった。そこで、開環生成物 **3c** を用いて加水分解の条件について、塩基の種類、反応温度の種々検討を行ったところ、最も温和な条件としては 1%の水酸化リチウム水溶液を加えて室温で 2 時間攪拌し反応させることで目的となる乳酸アミド **5c** が 88%の収率で得られることを見出した。(Scheme 2) また、他の開環生成物 **3a**・**3b**・**3d** も同様に 1%の水酸化リチウム水溶液を加えて室温で攪拌し反応を行ったところ、スムーズに反応が進行することが明らかとなった。



Scheme 2

また、Scheme 1 で示した L-(−)-ラクチド (**1**) と種々の第 1 アミンとの開環反応を検討中、過剰のアミンを用いて反応を行うと、開環生成物 **3** とアミンが反応し目的化合物である乳酸アミドが得られることが明らかとなった。そこで **1** に 2 当量以上のアミンと反応を行えば、副生成物である化合物 **4a~c** の生成を低減させ、加水分解することなく目的とする乳酸アミドが得られるのではないかと考えた。すなわち、**1** に 4 当量のプロピルアミン (**2a**) 加え室温で 2 4 時間反応させたところ、予期した通り一気に目的とする (*S*)-2-ヒドロキシ-N-プロピルプロパンアミド **5a** が 93%の高収率で得られることを見出した。同様に **2b~d** についても過剰に用い反応を検討したところ、対応する乳酸アミドが高収率で得られた。さらに、Scheme 1 の反応において収率の低かったイソプロピルアミンの場合でも 69%の収率で対応する乳酸アミドが得られることが明らかとなった。(Scheme 3, Table 2)

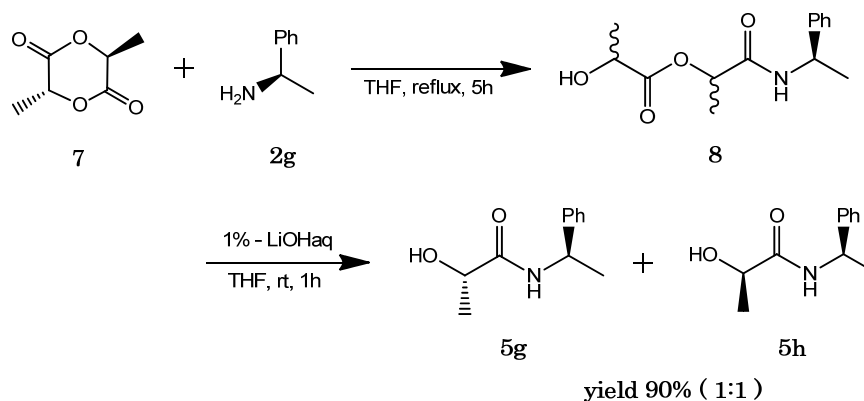


Scheme 3

Table 2. The preparation 2a~d by using excess amount of amines

entry	amines	molar ratio of 1 and 2	temp	time (h)	yield (%) of 5
1	2a	1 : 4	rt	24	93
2	2b	1 : 4	rt	24	95
3	2c	1 : 3	50°C	6	97
4	2d	1 : 4	rt	24	69

以上のように、ラクチドと第1アミンの開環反応において立体障害の小さいアミンとの反応においては、ラクチドとアミンのモル比が1 : 4(当量比1 : 2)と過剰のアミンを用いた場合、反応は室温で十分スムーズに進行し、加水分解の工程を経ることなく目的とする乳酸アミド **5** が得られることを見出した。Scheme 1 で示した1当量のアミンとの開環反応、得られた開環生成物の加水分解反応により乳酸アミドを合成する方法、および過剰のアミンとの開環反応による直接乳酸アミドを合成反応において、ラセミ化を伴うことなく反応が進行しているかどうか確認するために、(*S*), (*R*)-ラクチド反応させ、得られた生成物の NMR を測定し、そのジアステレオ比より反応が立体を保持したまま進行しているかどうか確認できるものと考えた。



Scheme 4

すなわち、(*S*), (*R*)-ラクチドと等モルの(*R*)-フェニルエチルアミンを THF 溶媒中5時間還流し反応させた後、先と同様に1%水酸化リチウムを加え室温で1時間攪拌し反応させたところ乳酸 N-(1-フェニルエチル)アミドが90%(**5g** : **5h**=1 : 1)の高収率で得られることを見出した。このことからアミンによる開環反応およびその後の加水分解反応は、ラセミ化を伴うことなく立体を保持したまま進行することが明らかとなった。(Scheme 4)

このことより、(*R*)-ラクチド、(*S*)-ラクチドおよび(*S*), (*R*)-ラクチドと(*R*)-フェニルエチルアミン若しくは(*S*)-フェニルエチルアミンと各々反応させることにより、簡単に乳酸フェニルエチルアミドの絶対配置を決定することが出来、(*R*)体および(*S*)体のフェニルエチルアミンの混合物を同様に反応を行うと容易にその混合比を決定できるものと推察されるが、詳細な反応について現在検討を行っている。

### 3. 実験

NMR スペクトルの測定は、BRUKER AVANCE 500 型スペクトロメーターを用いた。

分析用 TLC は Merck 社の Kieselgel 60F264 を、カラムクロマトグラフィー用シリカゲルは、関東化学のカラムクロマトグラフィー用シリカゲル 60N (球状、中性、 $\text{pH}=7.0\pm 0.5$ 、100~210mesh) を用いた。テトラヒドロフラン(THF)は、モレキュラーシーブス 4A で一晩乾燥した後、金属ナトリウム、ベンゾフェノンを加え、還流後、蒸留したものを直ちに使用した。その他の試薬、薬品は、市販品を精製せずそのまま使用した。

#### (L)-(-)-ラクチドとプロピルアミンとの開環反応

窒素雰囲気下、50mL ニロナスフラスコにプロピルアミン 0.0625g(1.06mmol)の 4mL THF 溶液を入れ、(L)-(-)ラクチド 0.1440g(1.00mmol)の 4mL THF 溶液を滴下して加えた後、室温で 1 時間攪拌した。10%の塩酸を加えて pH を 2 程度にし、水 10mL を加え、塩化メチレン 30mL で 5 回抽出した。有機層を飽和食塩水で洗い、無水硫酸マグネシウムで一晩乾燥した後、ろ過して、ロータリーエバポレーターを用いて減圧濃縮を行った。カラムクロマトグラフィー (展開溶媒 酢酸エチル : ヘキサン = 9 : 1) にて単離精製を行ったところ、透明な油状物である (S,S)-2-ラクトイル-N-プロピルプロパンアミド **3a** が 0.1804g(収率 89%)と (S,S,S,S)-2,5,8-トリラクトイル-N-プロピルプロパンアミド **4a** が 0.0164g で得られた。比率は、**3a** : **4a** = 92 : 8 であった。また、次の加水分解反応では得られた開環生成物 **3a** を単離することなくそのまま使用した。

#### (S,S)-2-ラクトイル-N-プロピルプロパンアミド **3a**

$^1\text{H}$  NMR (500MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 0.92(3H, t,  $J=7.5\text{Hz}$ ), 1.48(3H, d,  $J=7.0\text{Hz}$ ), 1.51(3H, d,  $J=6.9\text{Hz}$ ), 1.54(2H, sext,  $J=7.3\text{Hz}$ ), 3.19-3.30(2H, m), 4.36(1H, q,  $J=6.9\text{Hz}$ ), 5.25(1H, q, 6.9Hz), 6.02(1H, s)

$^{13}\text{C}$  NMR (125MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 11.2, 17.9, 20.4, 22.7, 41.0, 67.0, 71.5, 170.0, 174.1

#### (S,S,S,S)-2,5,8-トリラクトイル-N-プロピルプロパンアミド **4a**

$^1\text{H}$  NMR (500MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 0.91(3H, t,  $J=7.5\text{Hz}$ ), 1.48(3H, d,  $J=6.9\text{Hz}$ ), 1.49(3H, d,  $J=6.9\text{Hz}$ ), 1.54(2H, sext,  $J=7.3\text{Hz}$ ), 1.58(3H, d,  $J=6.5\text{Hz}$ ), 1.59(3H, d,  $J=6.9\text{Hz}$ ), 3.16-3.26(2H, m), 4.37(1H, q,  $J=7.0\text{Hz}$ ), 5.16(1H, q,  $J=7.2\text{Hz}$ ), 5.20(1H, q,  $J=7.1\text{Hz}$ ), 5.23(1H, q,  $J=6.8\text{Hz}$ ), 6.21(1H, s)

$^{13}\text{C}$  NMR (125MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 11.3, 16.7, 17.8, 20.4, 22.6, 41.1, 66.6, 69.2, 69.9, 71.8, 168.6, 169.6, 170.7, 175.2

開環生成物 3a の加水分解反応

100mL ナスフラスコに得られた開環生成物 **3a** 0.1968g(0.97mmol)の 4mL THF 溶液を入れて、1%の水酸化リチウム水溶液 6mL を滴下して加えて、室温で 1 時間攪拌を行った。10%の塩酸を加えて pH を 3 程度にし、水 10mL を加え、クロロホルム 30mL で 5 回抽出した。有機層を飽和食塩水で洗い、硫酸マグネシウムを加えて一晩乾燥した。ろ過してロータリーエバポレーターを用いて減圧濃縮を行ったところ、透明な油状物である (*S*)-2-ヒドロキシ-N-プロピルプロパンアミド **5a** が 0.0868g (収率 68%) で得られた。

ラクチドに対して 2 倍モルのプロピルアミンを用いた場合の乳酸アミド 5a の合成

窒素雰囲気下、50mL ニロナスフラスコにプロピルアミン 0.2410g(4.08mmol)の 4mL THF 溶液を入れ、(*L*)-(-)-ラクチド 0.1443g(1.00mmol)の 4mL THF 溶液を滴下して加えた後、室温で 24 時間攪拌した。10%の塩酸を加えて pH を 3 程度にし、水 10mL を加え、クロロホルム 30mL で 5 回抽出した。有機層を飽和食塩水で洗い、無水硫酸マグネシウムで一晩乾燥した後、ろ過して、ロータリーエバポレーターを用いて減圧濃縮を行ったところ、透明な液状物である (*S*)-2-ヒドロキシ-N-プロピルプロパンアミド **5a** が 0.2437g (収率 93%) で得られた。

(*S*)-2-ヒドロキシ-N-プロピルプロパンアミド 5a

<sup>1</sup>H NMR (500MHz, CDCl<sub>3</sub>)

δ (ppm) = 0.93(3H, t, *J* = 7.4Hz), 1.44(3H, d, *J* = 6.8Hz), 1.55(2H, sext, *J* = 7.3Hz), 3.25(2H, q, *J* = 6.4Hz), 4.23(1H, q, *J* = 6.8Hz), 6.47(1H, s)

<sup>13</sup>C NMR (125MHz, CDCl<sub>3</sub>)

δ (ppm) = 11.3, 21.4, 22.8, 40.8, 68.4, 174.5

アミン 5b~d の合成

アミン **2b~d** とラクチドとの開環反応 (Scheme 1) および開環生成物の加水分解 (Scheme 2) についてもプロピルアミン **2a** の場合と同様に行い、いずれも高収率で対応する乳酸アミド **5b~d** を得た。(Table 1)

さらに、ラクチドと過剰のアミン **2b~d** との反応 (Scheme 3) も同様に反応を行い対応する乳酸アミド **5b~d** を高収率で得た。(Table 2) 以下、生成物の NMR データを示す。

(*S,S*)-2-ラクトイル-N-ブチルプロパンアミド 3b

<sup>1</sup>H NMR (500MHz, CDCl<sub>3</sub>)

δ (ppm) = 0.93(3H, t, *J* = 7.4Hz), 1.34(2H, sext, *J* = 7.6Hz), 1.47(3H, d, *J* = 6.9Hz), 1.51(3H, d, *J* = 6.9Hz), 1.47-1.52(2H, m), 3.23-3.33(2H, m), 4.36(1H, q, *J* = 6.9Hz), 5.25(1H, q, *J* = 6.9Hz), 5.96(1H, s)

<sup>13</sup>C NMR (125MHz, CDCl<sub>3</sub>)



$\delta$  (ppm) = 13.7, 17.97, 20.0, 20.4, 31.5, 39.0, 66.9, 71.6, 169.8, 174.1

(S,S,S,S)-2,5,8-トリラクトイル-N-ブチルプロパンアミド 4b

$^1\text{H NMR}$  (500MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 0.91(3H, t,  $J=7.4\text{Hz}$ ), 1.33(2H, sext,  $J=7.6\text{Hz}$ ), 1.47(3H, d,  $J=7.1\text{Hz}$ ), 1.49(3H, d,  $J=7.1\text{Hz}$ ), 1.47-1.52(2H, m), 1.58(3H, d,  $J=6.5\text{Hz}$ ), 1.59(3H, d,  $J=7.01\text{Hz}$ ), 3.19-3.29(2H, m), 4.37(1H, q,  $J=7.0\text{Hz}$ ), 5.16(1H, q,  $J=7.2\text{Hz}$ ), 5.20(1H, q,  $J=7.1\text{Hz}$ ), 5.23(1H, q,  $J=6.9\text{Hz}$ ), 6.18(1H, s)

$^{13}\text{C NMR}$  (125MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 13.7, 16.7, 17.8, 20.0, 20.5, 31.3, 39.1, 66.6, 69.1, 69.8, 71.8, 78.2, 168.6, 169.6, 170.8, 175.2

(S)-2-ヒドロキシ-N-ブチルプロパンアミド 5b

$^1\text{H NMR}$  (500MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 0.91(3H, t,  $J=7.4\text{Hz}$ ), 1.34(2H, sext,  $J=7.8\text{Hz}$ ), 1.39(3H, d,  $J=6.9\text{Hz}$ ), 1.45-1.52(2H, m), 3.24(2H, q,  $J=6.6\text{Hz}$ ), 4.17(1H, q,  $J=6.8\text{Hz}$ ), 6.73(1H, s)

$^{13}\text{C NMR}$  (125MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 13.7, 20.0, 21.3, 31.6, 38.8, 68.3, 174.8

(S,S)-2-ラクトイル-N-オクチルプロパンアミド 3c

$^1\text{H NMR}$  (500MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 0.87(3H, t,  $J=6.7\text{Hz}$ ), 1.28(10H, d,  $J=13.2\text{Hz}$ ), 1.48(4H, d,  $J=6.9\text{Hz}$ ), 1.50(4H, d,  $J=6.9$ ), 3.26~3.32(2H, m), 4.36(1H, q,  $J=6.6\text{Hz}$ ), 5.24(1H, q,  $J=6.9$ ), 6.0(1H, s)

(S)-2-ヒドロキシ-N-オクチルプロパンアミド 5c

$^1\text{H NMR}$  (500MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 0.86(3H, t,  $J=6.7\text{Hz}$ ), 1.26(10H, d,  $J=7.3\text{Hz}$ ), 1.39(3H, d,  $J=6.8\text{Hz}$ ), 1.46-1.50(2H, m), 3.17~3.27(2H, m), 4.17(1H, q,  $J=6.7\text{Hz}$ ), 6.76(1H, s)

(S,S)-2-ラクトイル-N-イソプロピルプロパンアミド 3d

$^1\text{H NMR}$  (500MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 1.15(3H, t,  $J=6.6\text{Hz}$ ), 1.17(3H, d,  $J=6.6\text{Hz}$ ), 1.48(3H, d,  $J=6.7\text{Hz}$ ), 1.50(3H, d,  $J=6.3\text{Hz}$ ), 4.03~4.12(1H, m), 4.36(1H, q,  $J=6.9\text{Hz}$ ), 5.22(1H, q,  $J=6.9$ ), 5.75(1H, s)

(S)-2-ヒドロキシ-N-イソプロピルプロパンアミド 5d

$^1\text{H NMR}$  (500MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 1.16(6H, d, 6.6Hz), 1.41(3H, d, 6.8Hz), 4.01-4.11(1H, m), 4.17(1H, q, 6.8Hz), 6.39(1H, s)

$^{13}\text{C NMR}$  (125MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 21.0, 22.5, 22.5, 40.9, 68.0, 77.4, 174.6

(*D,L*)-ラクチドと(*R*)-フェニルエチルアミンとの開環反応による乳酸アミド **5j, 5k** の合成  
窒素雰囲気下、室温で、50mL ニロナスフラスコに(*R*)-(+)-フェニルエチルアミン 0.1226g(1.01mmol)の 0.8mL THF 溶媒を入れ、(*D,L*)-ラクチド 0.1467g(1.02mmol)の 2.2mL THF 溶媒を滴下して加えた後、5 時間還流した。0.5M-HCl 3mL を加えて pH を 1 にし、水 10mL を加え、クロロホルム 30mL で 3 回抽出した。有機層を飽和食塩水で洗い、無水硫酸マグネシウムで一晩乾燥した後、ろ過して、ロータリーエバポレーターで減圧濃縮を行ったところ、粗収量 0.2772g であった。そのまま次の反応で使用するものとした。

室温で、100mL ナスフラスコに入った(*R*)-(+)-1-フェニルエチルアミンによる(*D, L*)-ラクチドの開環物を、THF 9mL で溶かした。1 %の水酸化リチウム水溶液 4mL をゆっくり滴下して加え、1 時間攪拌した。0.5M-HCl 4mL を加えて pH を 3 にし、水 10mL を加えてクロロホルム 30mL で 3 回抽出した。有機層を飽和食塩水で洗い、無水硫酸マグネシウムで一晩乾燥した。ろ過して、ロータリーエバポレーターで減圧濃縮を行ったところ、粗収率は 0.1931g であった。その後、カラムクロマトグラフィー (展開溶媒 酢酸エチル : ベンゼン = 4 : 1) によって精製分離したところ、0.0811g と 0.0753g が合計 0.1564g(80%)で得られた。

(*S*)-2-ヒドロキシ-N-((*R*)-1-フェニルエチル)プロパンアミド **5g**

$^1\text{H NMR}$  (500MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 1.44(3H, d,  $J=6.8\text{Hz}$ ), 1.51(3H, d,  $J=6.9\text{Hz}$ ), 4.22(1H, q,  $J=6.8\text{Hz}$ ), 5.12(1H, quin,  $J=7.3\text{Hz}$ ), 6.71(1H, s), 7.27~7.36(5H, m)

(*R*)-2-ヒドロキシ-N-((*R*)-1-フェニルエチル)プロパンアミド **5h**

$^1\text{H NMR}$  (500MHz,  $\text{CDCl}_3$ )

$\delta$  (ppm) = 1.42(3H, d,  $J=6.8\text{Hz}$ ), 1.51(3H, d,  $J=6.9\text{Hz}$ ), 4.25(1H, q,  $J=6.8\text{Hz}$ ), 5.12(1H, quin,  $J=7.5\text{Hz}$ ), 6.73(1H, s), 7.25~7.36(5H, m)

**参考文献**

- [1] Fernando Albericio, Klaus Burger, Javier Ruiz-Rodriguez, and Jan Spengler, Org. Lett., **33**, pp.3413-21 (1999).
- [2] 小原仁実, 化学と生物, 34, 174-180 (1996)
- [3] S. S. Branda, A. Vik, L. Friedman and R. Kolter, Trends Microbiol., 13, 20-26(2005)
- [4] Brine, George A, Boldt, Karl G, J. Chem. Soc., **18**, 1809(1991).

# 物理演示実験の活用と展開 ～モンキーハンティングを例として～

佐藤杉弥（日本工業大学・共通教育系）  
塚林功（いろは理科工房）

Practical use and development of the physical demonstration experiments

- The monkey and the hunter as an example. -

Sugiya SATO (Department of human science and common education, Nippon Institute of Technology)

Isao TSUKABAYASHI (Iroha Science Atelier)

キーワード：物理教育、演示実験、モンキーハンティング

Keywords: physics education, demonstration experiment, the monkey and the hunter

## Abstract

The demonstration experiment is widely used as a physics teaching method. There are various experimental devices and various instructional approaches even about one specific theme. In this paper we try to organize such diversity. The monkey and the hunter is taken up as an example. That is a well-known demonstration experiment of dynamics. Various devices that we developed are introduced and teaching methods are arranged. The expansive ideas are also briefly mentioned.

## 1. はじめに

物理教育あるいは理科教育、科学教育において広く用いられている手法である演示実験（教師実験とも）は、ある科学的な内容の啓蒙や教育のために授業や講演の一部として教師が聴衆に示す形で自ら行う実験である。現代的な演示実験は、17世紀の英国王立研究所での John Keill の講義に端を発するとされる[1]。これがファラデーの『ロウソクの科学』を産んだ 1825 年からの伝統をもつ一般講演のクリスマス・レクチャーにつながり、西欧での学校教育にも普及した。近年では、テレビ放送等で評判となった M.I.T. のウォルター・ルーウィン教授の授業などでもその例を知ることができる[2]。日本では昭和 32 年に東京理科大学で学長の真島正市が物理講義実験を導入したのが全国で初めての試みとして記録されているが[3]、現在では国内でも初等教育から大学教育まで広く取り入れられている。

授業に占める演示実験の割合は目的や内容によってさまざまであり、黒板消しを投げ上げて見せるといった単純なものから、ファラデーやルーウィンの例にみられるような、授業の中で大きな割合を占める、特別に製作した装置類を用いた準備を要する大掛かりなものまで幅が広い。また、到達目標や対象の履修歴などに応じて活用の仕方も多様であって、同じ実験テーマであっても単に現象の提示や既に学習した法則の確認としてのものから、実験の組み立てや結果の解析への導入、法則の発見的理解にいたるようなものまで、場合によって使用する装置や教授法も変わってくる。最近では学校教育の外でサイエンスショーとして実験そのものを楽しむことを前面に打ち出す場合もあるが、これは理科離れや実体験不足といった問題に対処する 1 つの方策でもある。

このようなことから、ある特定のテーマに関する演示実験をとっても、多くの実験装置や教授法の開発がなされてきた。定番とされるような実験や装置も数多くあり、また、特に学校教育では指導案という形でシナリオも作成されている。しかし、演示実験に用いられる装置は開発者から離れ

て広く共有されるものは多いとはいえ、常に再生産が繰り返されている。また、前述のようなバリエーションについて整理されたものはあまりない。本論ではよく知られたモンキーハンティング問題を例として、主に筆者らの開発した演示実験装置、および教授法について紹介し、特定の演示実験テーマのスケラブルな活用と展開について考察する。

## 2. モンキーハンティングの概要と実験方法

まずモンキーハンティングの概要を示す。モンキーハンティング (The monkey and the hunter, The monkey and the gun) 問題はよく知られた初等力学の思考実験である。ハンターが木にぶらさがった猿を仕留めるために銃を撃ちたいが、発射音に驚いて猿は木から落下する。狙いと弾の速度をどうすれば当てることができるか？というのが問題である。物理の問題らしく整理すると、Fig.1 に示すような設定において、『原点から小球 A を角度  $\theta$ 、初速度  $v_0$  で発射し、発射と同時に水平距離  $L$ 、高さ  $H$  にある落下体 B が自由落下を始めるとき、命中する角度  $\theta$ 、初速度  $v_0$  を求めよ、ただし、重力加速度の大きさを  $g$  とし、空気抵抗は無視する。』のようになる。このとき、発射体 A、落下体 B それぞれの運動方程式は鉛直方向の様な重力にのみ依存するので、発射体が落下体の水平位置  $x=L$  への到達時刻  $t_L=L/v_0 \cos \theta$  での高低差  $\Delta y$  は、

$$\Delta y = L \tan \theta - H \quad \dots (1)$$

である。これから、衝突条件  $\Delta y=0$  は  $\tan \theta = H/L$  となる。すなわち、発射体が落下体の水平位置まで到達できれば、発射速度に依存せず、発射時に落下体をまっすぐ狙えばよいことになる。

これは論理的には数式を用いずとも、重力による落下距離が等しいことから、相対運動が直線的になるために当然の帰結である。しかし、初学者にこの発問をして事前に計算せずに予想をたてさせると、発射体と落下体が「それぞれ下に落ちていく」ということから混乱が起こり、落下体の初期位置より上または下を狙ったほうがよいという予想が一定以上見られる。筆者の経験からはすでに高校物理の履修歴のあるものでもおよそ 2/3 以上が誤解答または不明とすることも珍しくない。そこで演示を行い、実際に「狙えば当たる」ことを示すことになる。

次に演示実験装置の基本について述べる。実現のためには発射と同時に落下を始めることが要であり、一般に実験装置は①発射装置、②落下装置、③照準装置、④タイミング機構、で構成される。それぞれ機械式、電気式などいくつかやり方があるが、代表的なものとし

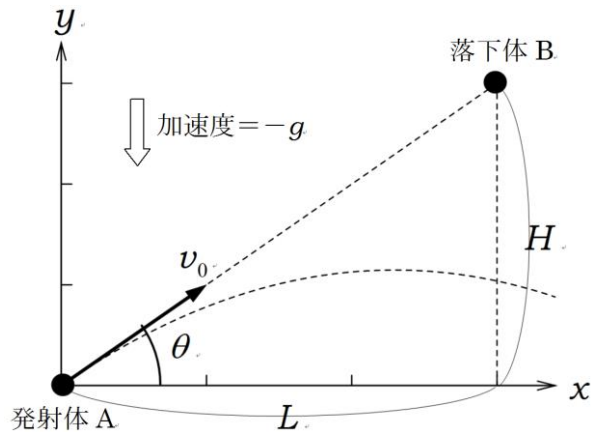


Figure 1. Configuration of the monkey and the hunter.

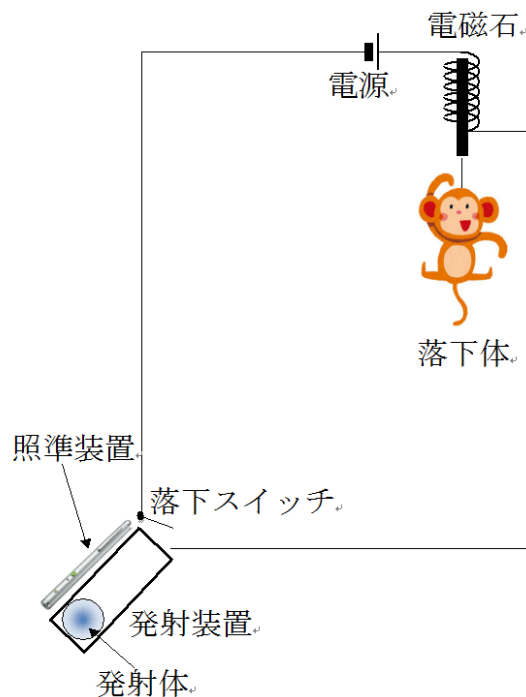


Figure 2. An example of experimental settings [8]

て落下装置とタイミング機構に電磁石の回路を用いた場合の構成例を Fig.2 に示す。

### 3. 実験装置と教授法のバリエーション

#### 3.1. 実験装置

実験装置の多様性は、主に(1)装置のスケール、(2)メカニズムの違いによって生じる。様々な形が試みられているが、われわれもこれまでいくつか異なった種類のものを開発してきた[4-8]。上記の視点からそれらについて紹介する。

##### ①小型装置 (Fig.3)

アクリルパイプを用いた吹き矢を発射装置、電磁石を落下装置、電磁石の回路スイッチをタイミング装置として用いたもので、実験スケールは水平到達距離  $L=2\sim 5\text{m}$  程度である。電磁石の回路スイッチを吹き矢の発射口にとりつけてあり、発射体として用いるペンなどが通過した際にスイッチが切れて落下体が切り離される構造である。照準にはレーザーポインターを用いる。落下体は猿のぬいぐるみなどを使用するが、これはビジュアルにイメージを高めるためであると共に、一定の面積を持たせることにより衝突条件を緩和して、実験の「成功率」を上げるための工夫でもある。この装置の特徴は、屋内で比較的簡便に使えることと、受講者も簡単に操作できて参加できる点が挙げられる (Fig.3.(a))。このことから初等教育以下向けの理科教室や、授業内での現象のデモンストレーションに用いることが多い。このスケールの装置は、われわれの他にも、鉄球を使って精密に当てられるものや、黒板にセットできるもの、機械的タイミング機構を用いたものなど、多くのバリエーションが開発されている。われわれもタイミング機構を赤外線リモコンを用いて無線化したタイプなども開発してきている[6]。



Figure 3. Small device. (a) Schematic view (b) Components [7]

##### ②中型装置 (Fig. 4)

小型の装置は簡便ではあるが、飛行時間が短い点と、精度の信頼性において不満がある。この場合に精度とはおよそ実験スケール  $L$  と発射体・落下体のサイズ  $s$  の比  $s/L$  で、小型の装置ではぬいぐるみなどを使うと  $1/10$  程度になるが、より精度を上げるために発射体や落下体を小さくすると観察がしにくいことになる。このため、一回り大きいものも開発した。実験スケールは水平到達距離  $L=3\sim 10\text{m}$  程度である。このスケールでは狭い場所で実施するのは難しいが、逆に屋外でデモンストレーションすることもできるし (Fig.4(a))、大教室で多人数に見せるのにも向いている (Fig.4(b))。発射体、落下体として野球ボール程度のものを使用すれば (Fig4.(c))、視認性を損なわずに精度を  $1/50\sim 1/100$  程度にすることができる。この装置では、タイミング機構はやはり電磁石を用いているが、発射装置には改造したピッチングマシン玩具を用いて再現性を高めている。

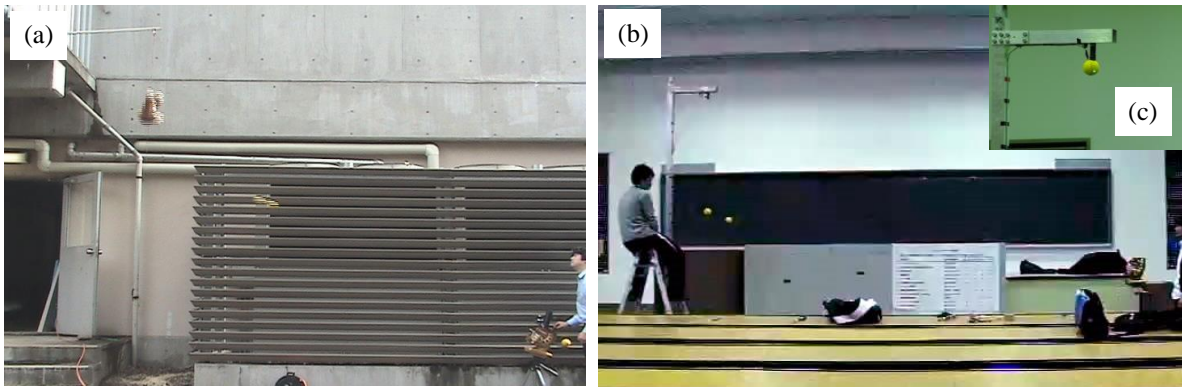


Figure 4. Medium device. (a) Outdoor, (b) Indoor, (c) Falling body setup

### ③大型装置 (Fig.5)

2節で述べたように相対運動は直線的になるはずであるが、これを発射体および落下体の視点からみるとどのようになるかは興味深い。このため、大型の発射体と落下体にそれぞれビデオカメラを搭載した大型装置を作成した[6,7]。落下体にはホームビデオを搭載するため、保護のためにウレタンクッション材で作成した。発射体はペットボトルロケットを使用して先端部に小型無線ビデオカメラを取り付けた。連動機構はこれも電磁石回路であるが、重量があるためにより強力なものを使用している。初期条件はペットボトルロケットの発射台角度と充填圧力で調整する。水を入れると飛びすぎるので空気のみで行っている。スケールとしては必然的に  $L \geq 10\text{m}$  程度になるが、精度としては小型と中型の間程度である。操作には複数人が必要で、発射体の飛翔が一定しないなど実施の難易度は高いが、このスケールで当たるとインパクトは大きい。これに関しては都度の実施はできないため、ビデオを作成して紹介している。



Figure 5. Large device. (a) Falling body, (b) Projectile and launcher, (c) Schematic view, (d) An image of the projectile seen from the falling body

### ④緩斜面を用いた装置

一般にこの演示は短時間で終わるため、詳しい観察はし難い。また、上記のように大掛かりにしていると利便性が失われる。そこで、緩斜面を利用して実効的な重力を減らし、小型で取り回しやすく、かつ、一定の精度で観察がし易い装置を開発した。水平からの角度  $\phi$  の斜面上に束縛された運動では斜面に沿った重力の成分が鉛直方向 ( $\phi = 90^\circ$ ) の  $\sin \phi$  倍となるため、緩斜面を用いれば実効的な加速度を大きく減らすことができる。例えば  $\phi = 10^\circ$  ならば  $\sin \phi = 0.17$  と約 1/8 にできる。このため平面内で同じ軌道を描くための初速度は  $\sqrt{\sin \phi}$  倍となり、滞在時間は  $1/\sqrt{\sin \phi}$  倍に伸びる。例えば  $\phi = 10^\circ$  の場合、約 2.4 倍である。また、通常の装置では平面運動を空間内で行わせるために横にそれて当たらない場合があるが、この装置では斜面に拘束されるため実験を成功させやすい。

また、小型化して水平に近く置けるために、教卓から書画カメラで投影して見せるといった使い方が考えられる。これについては現在開発中であるが、プロトタイプについてはすでに報告している[8]。また、発展的な利用法が考えられるが、それについては後述する。

### 3.2. 教授法

ここではモンキーハンティング実験の活用を、理解の深さを軸にとって整理する。前項で紹介したような演示装置は、もちろん教育目標と対象によって使い分けられるものである。ただし、複数の目的をもって複数の装置を利用することも多い。また、発展的な内容については、筆者らの授業での実践の具体例についても述べる。

#### (i) 物理現象の体験とモチベーション喚起

主に対象が初学者であったり、小学校生向けの理科教室などで行ったりする場合には、自然現象の実体験や実験の経験がとぼしく抽象的な概念に馴染みが薄いため、体験あるいはモチベーション喚起のために行うことが多い。この場合、なぜか狙えば当たるという予想外の事実の体験が主である。このためには前項①の簡便な装置を用い、実際に体験もさせるという利用法が主である(Fig.3)。また、大学初年次の授業のように理論的な教授を行う場合でも、実際の物理現象との関連性を印象づけるため、あるいはクイズ的な面白さと実演で集中力を途切れさせないために、短時間で取り入れることも多い。また、インパクトを増すために③の大型装置のビデオと併用することもある。

#### (ii) 理論の検証、物理実験への導入

力学の基礎として一定の重力の下の運動である自由落下、投射運動の教授を目的とする場合に、論理的な結果が実験事実と整合することを示すために理論と対比させるためには、前項②の装置の実演またはビデオを用いることが多い。短時間で実演を行う場合は①の簡易型で行うこともある。この場合は理屈どおりに当たるという理論の確認になるが、当たらない場合も重要である。この段階では受講者が落下体のサイズと実験スケールによって精度が変わってくることを理解しやすいために、より高精度な実験で行って示したほうが納得しやすい。しかし、失敗も増えるために、逆に管理された実験の重要性を示すためにも利用できる。この目的のためには、時間がとれば、実際に受講者にセッティングから参加させ自ら行わせると教育効果が高い(Fig.4(b))。また、実験の規模による困難を示すために③の大型装置のビデオも用いられる。

#### (iii) 物理法則の発見的理解、データ解析への導入

モンキーハンティングは重力加速度が一定で運動がニュートンの法則に支配されるという前提で理論・実験が行われるが、実験からこれらを逆に発見的に導く、あるいは確かめることもできる。これは、物理未履修者に理論的な説明から入り難い場合、また、高校で物理を一度履修したものなどに、天下りの知識を納得して定着させる、あるいは、数学的な取り扱いに慣れていないものへの理論的解説への導入として行う。このためには、実験そのものをビデオ・演示などで紹介することの他に、ビデオ撮影したデータを測定して速度や加速度を求めさせる。筆者の佐藤は実際に日本工業大学の情報工学科の授業「コンピュータ基礎物理Ⅱ」でこの手法を用いている[9]。使用するデータはFig.4の中型装置の実験をビデオ撮影したもので、フレームを切り出した15枚の画像から投射体の位置を画像ソフトを用いてPC上で受講者各自が測定し、表計算ソフトを用いて解析する。実際の測定データから計算された速度の例をFig.5(a)に示す。ただし、投射体の進行方向は $-x$ 方向、画面座標では下向きが $+y$ 方向である。これから、「下向きの加速度一定」というモデルを導いて、運動法則は使わず、差分の逆操作で加速度から位置が求められるということから、シミュレーショ

ンでモンキーハンティングが成立することを確かめさせる (Fig.5(b))。なお、この授業の以前に自由落下は学生実験で行っている。シミュレーションは実際には4次のRunge-Kutta法を用いているが、Leap-Frog法などを用いて簡便に表計算ソフトで学生に検証させることもできる。このシミュレーションではデータを取得可能にしているため、再解析も可能である。さらに、実際のデータを各自が測定するので、測定誤差や水平方向の変化の可能性についても考察させることができる。また、シミュレーションで重力加速度を減じていけば、落下距離が同じなので当たることを納得させやすい。

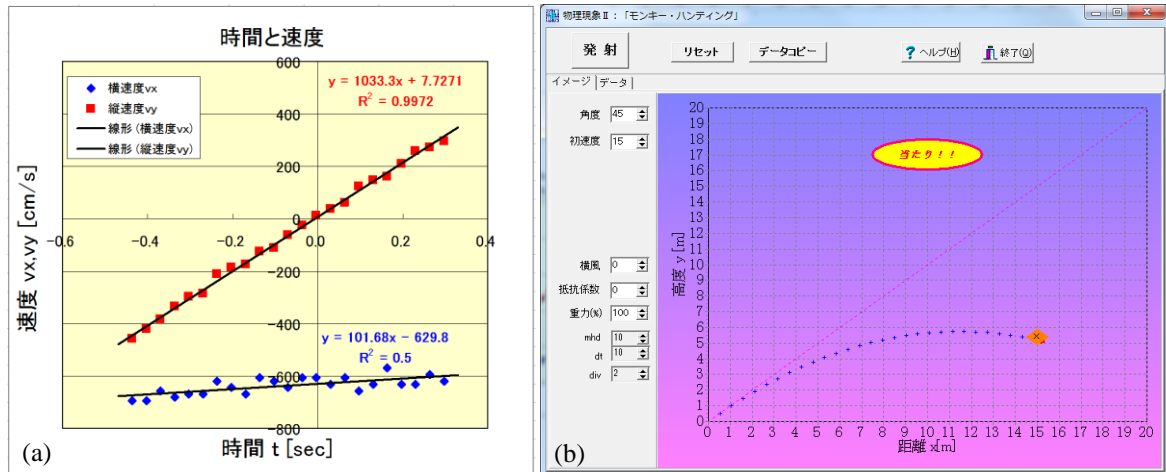


Figure 6. (a) An example of reconstructed velocity from a video of experiment, (b) Simulation of the monkey and the hunter

(iv) 発展的内容への展開

ここでは2つの例について述べる。まず、(iii)で示したように一様重力を発見したとすると、次はその根拠である万有引力に話をつなげることが普通である。一般に教科書ではこのつながりがやや唐突であることが多いが、(iii)での経験に基づけば、今度は力として万有引力のみを仮説として取り入れたシミュレーションのデータから、ケプラーの法則などが実際に成り立つことを導かせることで、その検証を行うことができる。また、シミュレーションは地上付近も拡大可能なため、地上高度が低い場合は加速度一定の放物運動と同様の軌道を確認でき、モンキーハンティングで導入した投射運動と万有引力による楕円軌道の接続をすることができる。ここでもデータ取得可能なシミュレーションを用いて各自が仮想実験を行うが (Fig.7)、 $\Delta t$ の有限性からやはり計測誤差が混入

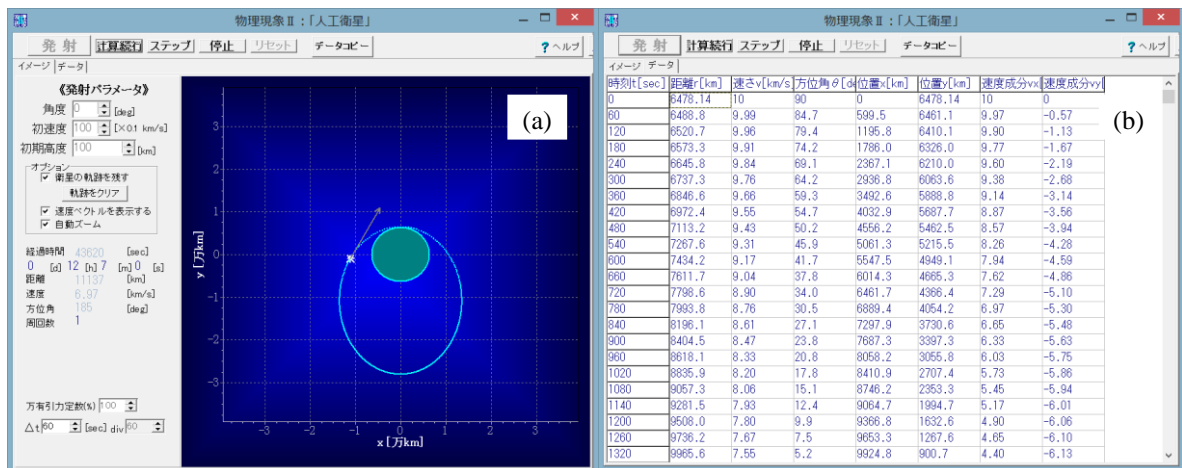


Figure 7. Simulation of satellite motion: (a) Image (b) Data



するため、多人数の結果を突き合わせて総合する。このとき、およそ不注意なものや理解度の低いものが含まれるのが普通であるため、シミュレーションといっても使用者の設定や注意の度合いによっては結果が異なる、あるいはデータの取り扱いが問題となることも気づかせることができる。

次に、前項④の緩斜面を用いた装置での発展的利用について考える。実は斜面を用いた場合は現象として同一なのかという疑問があるが、発射体と落下体がともに一定の等しい加速度で運動するという点が満たされればよい。主に摩擦の有無が想定されるが、これは実験的に低減することが可能で、実際にタイヤなどを用いた例もある。小型化するためにはエアホッケーのような空気浮上などの方法も考えられる。また、球体などを用いればころがり摩擦が小さいために摩擦を軽減できるが、この場合は剛体運動となるため、実効加速度がさらに  $5/7$  (剛体球の場合) に低減されるという利点がある。この場合の解析は剛体の力学の初等例題にあるような基礎運動方程式を解く必要があるため、剛体運動への導入にも利用できる。実際に前述の試作装置で金属剛体球を落下させた場合の測定データを Fig.8 に示す。理論的な滑りなし回転の曲線とよく一致しており、剛体回転のために加速度がさらに低減されていることがわかる。わずかなずれは転がり抵抗のためと推測されるが詳しくはより検討が必要である。さらに、剛体の場合は形状 (慣性モーメント) によりこの低減比率が異なるために、通常のモンキーハンティング実験では不可能な、投射体と落下体の加速度が異なる場合の実験・解析を行うことができる。つまり、より難度の高いモンキーハンティングである。投射体の加速度を  $a$ 、落下体の加速度を  $b$  とすれば、(1)式に示した高低差は、

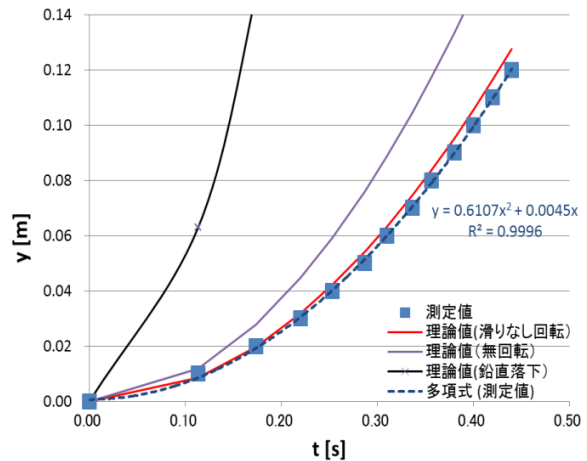


Figure 8. An observed motion of a falling metal rigid sphere. Slope angle  $\phi = 11^\circ$ .

$$\Delta y = L \tan \theta - H - \frac{1}{2}(a-b) \left( \frac{L}{v_0 \cos \theta} \right)^2 \quad \dots (2)$$

となる。衝突条件  $\Delta y=0$  は  $\tan \theta$  に関する初速度を係数に含む 2 次方程式になる。直感性は失われるが、大学レベルの新しい問題として提案できる。

#### 4. まとめ

よく知られたモンキーハンティング問題を例として、演示実験の装置および教授法のバリエーションについて筆者らの実践にもとづき整理し考察した。演示実験について問題となるのは、目的に対して適切な時間的な割合や手法を用いない場合、単なるショーとして終わり概念の理解や知識の定着に結びつかないことである。本論では一定の整理を行ったが、その点では達成度についての実証的データが不足している。授業アンケートなどを実施して演示実験の導入については好意的であることはわかっているが、今後は装置や教授法の開発とともに、知識の定着と達成度についての検証を行っていく必要がある。低温実験、放電実験、大気圧実験など、モンキーハンティング以外の演示実験でも、ここで論じたような装置や教育方法の整理を行うことは有用だと考えられる。

最後に、一連の装置開発や緩斜面装置の利用などに協力していただいた関一先生に感謝する。文献 3 は関一先生に紹介いただいたものである。本研究の一部は科研費 (挑戦的萌芽研究 24650564) の助成を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] Charles Taylor, "The Art and Science of Lecture Demonstration", Taylor&Francis Group (1988)
- [2] ウォルター・ルーイン, "これが物理学だ！マサチューセッツ工科大学「感動」講義", 文藝春秋 (2012).
- [3] 東京理科大学新聞, 昭和 32 年 7 月 20 日号, p.1 (1957).
- [4] 塚林功, "モンキーハンティング", 日本物理学会誌, vol.56, pp.617-618 (2001)
- [5] I. Tsukabayashi, S. Sato, H. Seki, "Observation of Relative Motion in Monkey Hunting", Proc. The 3rd China -Japan Symp. of Univ. Physics Teacher , pp.143-145 (2002)
- [6] 塚林功, 関一, "やってみようモンキーハンティング : ポータブル・リモコン型からペットロケット型まで", 応用物理教育, vol.28, pp.9-14 (2004)
- [7] I. Tsukabayashi, "Development of the Demonstration Experimental Apparatus for Physic Lecture Assist", J. Advanced Sci., vol.17, No.3&4 (2005)
- [8] 佐藤杉弥, 塚林功, "緩斜面を利用したモンキーハンティング", 第 24 回物理教育に関するシンポジウム講演予稿集, pp.54-55 (2013)
- [9] S. Sato, K. Suzuki, H. Seki, I. Tsukabayashi, "The Computer Virtual Experiment for the Students Who Have Not Learned Physics Sufficiently", Proc. 2nd Japan-China Symp. on Physics Experiment Education in Universities, pp.174-178 (2000)

# 高速度ビデオでの運動解析プログラムの開発 —画像処理による気泡および粒子を対象とした ROI の自動生成—

横山直樹（総合科学技術研究所）

Development of Versatile Motion Analysis Program(VMAP)

- Generation of ROIs by Image Processing -

Naoki YOKOYAMA (Research Institute of Science and Technology, Tokai University)

キーワード : ROI、相関計算、高速度ビデオグラフィ、画像処理

Keywords: Motion analysis, Template Matching, High-speed videography, Image Processing

Motion analysis program for images acquired by high-speed videography was developed and tested so far. In the case of actual analysis scene, particle or object density can be very high. So some scheme of distributed computation will be required for practical use of this program. CUDA and OpenCL were adapted to perform cross-correlation calculation in previous papers. In this paper automated generation of ROIs for particles is discussed.

## 1. はじめに

前報までで高速度ビデオシステムによって記録された動画を対象とし、対象物体の運動を自動解析するプログラムを開発し、その有効性を実験的に検証してきた。特に時間分解能を高めた高速度ビデオシステムにおいては、空間分解能に制限があり、各フレームにおける対象物体の位置の計測精度が低くなりがちであるが、画像相関値を評価関数とし、その極大値が得られる位置を物体位置として把握するアプローチでは、位置情報をサブピクセルの単位で求めることが可能であること示した。しかし正規化相関を用いたアプローチでは、その計算量が膨大になるために、実用的にはなんらかの計算負荷軽減が必要である。そのために相関計算を並列化することを試み、CPU の複数のコアあるいは GPU を利用することで高速化が可能であることを示した。今回は、微粒子や気泡が視野に多数存在する場合について、それらを効率的にトレースするために、対象を取り囲むような Region of Interest (ROI) を自動生成することを目指した。

## 2. VMAP(Versatile Motion Analysis Program for ultra high-speed videography)

このプログラムの主な特徴は以下のとおりである、

- 島津製作所の 100 万駒/秒超高速ビデオカメラで記録されたファイルに関しては、その内部構造までを把握しており、ヘッダ部分から撮影速度等の記録時の主要なパラメータを読み取る。
- 上記システム以外で得られた動画であっても、Windows の標準的な AVI ファイルであれば解析可能である。この場合は撮影速度等をマニュアルで正しくセットする必要がある。
- 物体の位置把握は、相互相関計算により行われる。位置検出は、サブピクセルの精度で実行される。
- 変位後の物体位置をさがすパターンは、螺旋である。これをスパイラルサーチと

呼ぶ。時間分解能が充分な場合は、効率的なサーチが可能である。

- テンプレートを回転させながら相関計算を行うことで、物体の動きに回転成分が含まれている場合にも、その角度を検出することができる。
- 静止画を扱うことができる。時間的に連続する静止画は、それらを一旦 AVI ファイルに連結してから取り扱うことができる。
- 運動解析結果の軌跡を、元の動画に重ねた形で動画として出力できる。
- マニュアル解析が可能である。
- 各フレームの画像を、ヒストグラムの等値化アルゴリズムにより強調できる。
- ROI の数が多いか、またはその領域が大きいときは、相関計算にかなり時間がかかることが見込まれるが、前者の場合はネットワーク上で複数の計算機を用意することで、分散処理が可能である。
- 相関計算を工夫することで、上記のネットワーク分散処理に加えて単一ノードでも処理の高速化を図ることができる。
- 最近よく使われるようになってきた GPU を用いて並列に相関計算を行うことで、CPU のマルチコアでの並列計算による高速化以上の効果が得られる。

しかし、相関計算は ROI に基づいて計算され、画像内の粒子が多数存在する場合には、各粒子を最小限の面積で取り囲むような矩形領域を計算機により自動的に決定する必要がある。本論文では、この手法に関する議論を行う。

### 3. ROI の自動生成

画面内に多数の粒子（ないし気泡）が存在するような典型的な画像を Fig.1 に示す。通常 of 画像処理の流れでは、まず適切なしきい値で二値化し、二値画像に対して形状認識を行い、円形部分を把握する。こうした標準的な方法で得られた結果を、中間状態も含めて Fig.1～Fig.4 に示す。



Fig.1 Many bubbles in still image

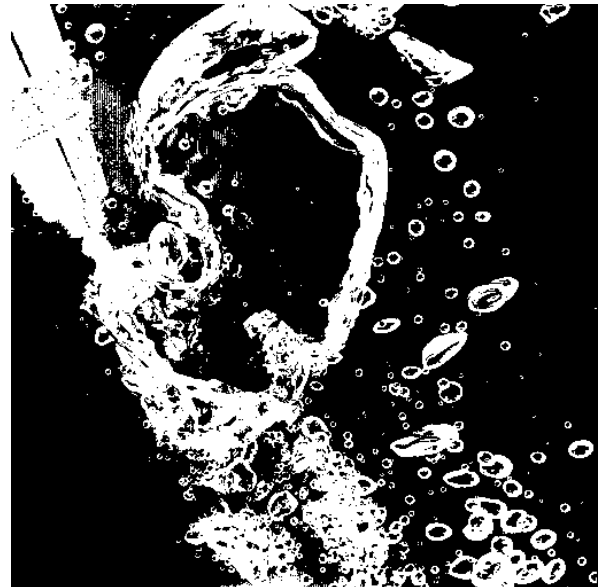


Fig.2 Binarized frame

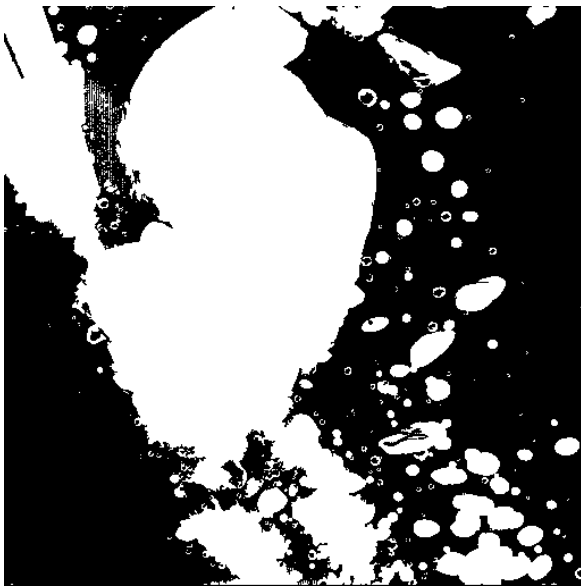


Fig.3 Filling holes

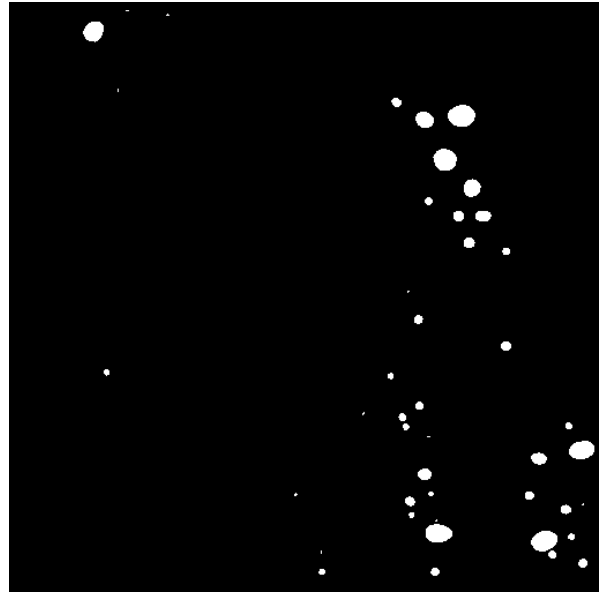


Fig.4 Dected and filtered circles

Fig.1～Fig.4 は、市販の粒子解析プログラム（粒子解析 Ver3.5 日鉄住金テクノロジー（株））による解析結果であるが、同様な処理はインターネット等でダウンロードできる無料のパッケージでも可能である。Fig.5 および Fig.6 は ImageJ というプログラムでの結果の一部を示す。

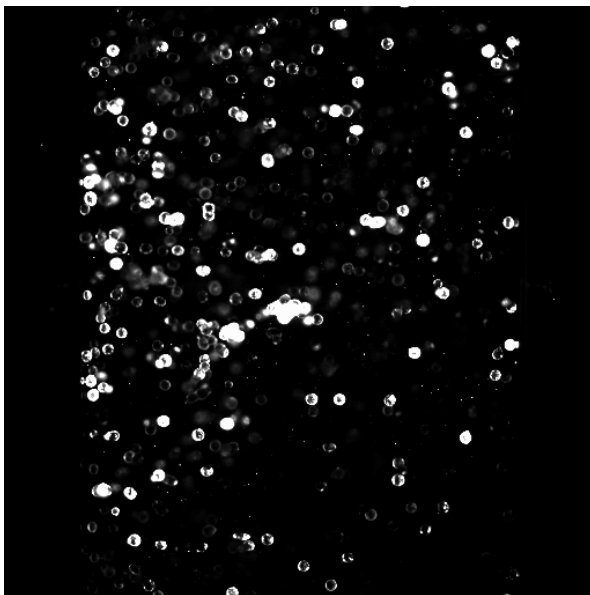


Fig.5 Many particles in a start frame

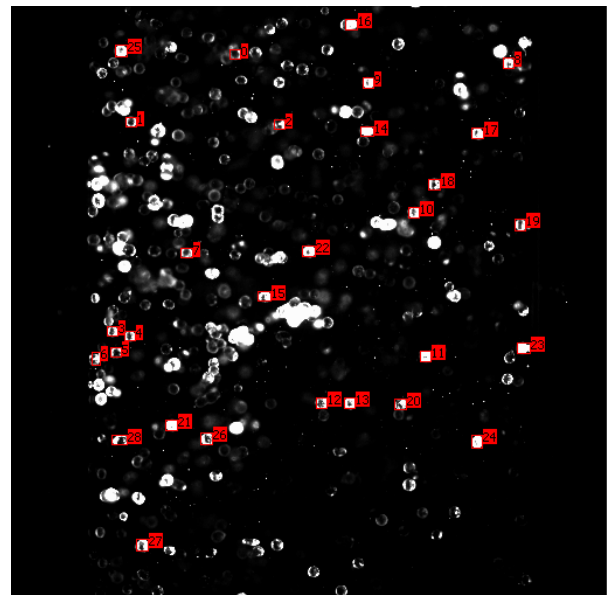


Fig.6 Dected and filtered ROIs

いずれの場合も、気泡ないし粒子は“円”として把握されており、中心座標と水平および垂直のフェレ径の情報とを併せて、ROI として使用できる対象物体を最小限取り囲む領域を自動的に計算することができる。この時に、必要に応じて円形度、面積、位置などの数値によって不要な対象を除外することができる。得られた粒子解析結果（視野情報）の一部の例を表形式で Table 1 に示す。

【 粒子解析結果 (視野情報) 】

粒子No.	水平フェレ径	垂直フェレ径	水平中心座標	垂直中心座標	円形度係数	円相当径	x0	y0	x1	y1
1	3	3	234	12	1.1727	3.39	232	10	236	14
2	14	9	288	15	0.9279	11.89	281	10	295	20
3	5	4	223	21	1.0654	4.79	220	19	226	23
4	10	9	439	30	0.9433	9.57	434	25	444	35
5	7	10	333	32	0.8113	7.65	329	27	337	37
6	10	9	137	35	0.8267	8.81	132	30	142	40
7	18	21	421	42	0.5408	15.59	412	31	430	53
8	11	10	93	38	1.0082	10.52	87	33	99	43
9	3	3	188	35	1.1727	3.39	186	33	190	37
10	4	6	273	37	0.942	5.05	271	34	275	40

Table 1 Various parameters for detected particles

4. トレース結果および考察と結論

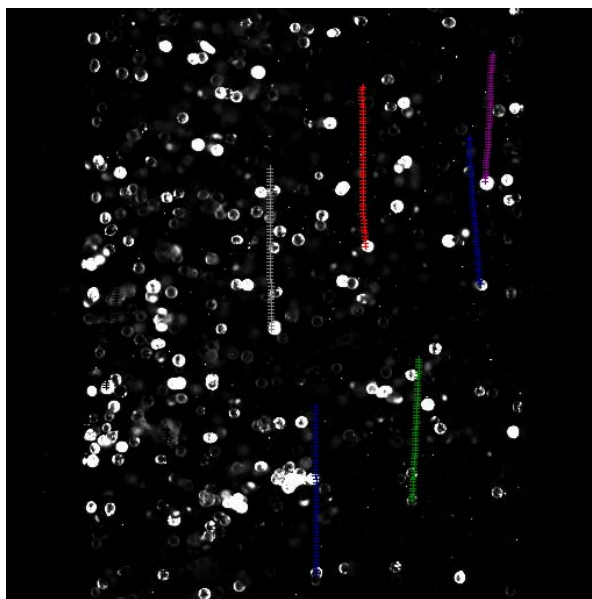


Fig.7 Results of traced particles

Fig.7 に自動生成された ROI を用いてトレースした結果の例を示す。Fig.6 に示された ROI のうち 8 個を選んで VMAP を用いて追跡した。ROI の情報はテキストファイルで渡した。Fig.6 からわかるように、自動生成された ROI は対象の気泡ないし粒子を取り囲む最小領域であるために、相関計算が軽く済む効果もある。今回の方法では、特殊なケースで対象を除外することができない場合があった。それは主に粒子が重なっている場合であるが、上述の円形度の設定を旨く行うことで重なっている粒子の全部を除外することはできた。片方の粒子を選択したい場合は、手動で選択すれば良いので、自動生成と手動とを併用していくことが必要になると考えられる。

参考文献

- [1] 横山直樹, 高速度イメージングとフォトンクスに関する総合シンポジウム 2011、pp. 183-186 (2011)
- [2] 画像解析・画像計測ソフトウェア 粒子解析 Ver. 3.5 <http://www.smt-kashima.com/com/pack/ryusikaiseki/>
- [3] ImageJ <http://rsbweb.nih.gov/ij/index.html>

## ■第 243 回総合科学技術研究所談話会

日 時：2012年6月6日(水) 11:15～12:30

テーマ：「先進プラズマロケットの紹介」

所 属：宇宙科学研究所 招聘研究員 松岡 健之

小惑星探査機”はやぶさ”に搭載されたイオンエンジンは、推進剤ガスをプラズマ化して加速することにより推力を得る電気推進の一種である。本研究が目指すのは、イオンエンジンと同等かそれ以上の性能を持ち、より長寿命の推進機を開発することであり、長寿命な推進機ができればより野心的なミッション、たとえば木星周回衛星や月への大量物資輸送、火星往復ミッションなどが可能となる。イオンエンジンの場合に寿命は次の二つの要因で決まる。第一は加速電極の損耗であり第二は中和器の機能低下である。このうち加速電極の損耗はプラズマと加速電極が接触しているのが原因となり、したがって、プラズマを非接触で生成し加速できる中和器のいない電気推進機を開発できれば本研究の目的を達成できると予想される。比推力と効率は、推進機が発生する推力を計測して評価するので推力計測は必須である。現在 JAXA では推力計測システムの開発を行っており、その一部である推進機のプラズマ源が完成した。本講演ではプラズマ源の開発経緯について紹介する。

## ■第 244 回総合科学技術研究所談話会

日 時：2012年10月10日(水) 10:00～11:00

テーマ：「青色光障害と青色光傷害」

所 属：総合科学技術研究所 准教授 竹下 秀

日本国内では、白熱電球や蛍光灯から、白色 LED へと照明光源が急速に切り替わりつつある。これに伴い、白色 LED から発せられる青色光の障害が、社会的関心事となっている。青色光による“しょうがい”は、“障害”と“傷害”に区分される。ただし、両者ともに、光の波長と量が、その作用量に影響を与える。青色光障害は、生体リズム障害など生理作用に変調をきたすものであり、生体リズムをコントロールするメラトニン分泌リズムが青色光によって変調をきたされて発生する。光源の発達と人間生活の多様化によって障害が発生したと考えられる。青色光傷害は、光化学反応による傷害であり、網膜の加齢性黄斑変性はその代表例とされている。市販されている LED 電球及び直管 LED 電球の青色光傷害を評価した結果、いずれの光源も安全レベルにあった。しかし、LED 電球の拡散グローブを外すとリスクは増大した。なお、太陽光は照明用光源と比較すると極めて危険であることが明らかになった。

## ■第 245 回総合科学技術研究所談話会

日 時：2012年11月14日(水) 10:00～11:00

テーマ：「泡状プラズマとプラズマロケットエンジン」

所 属：総合科学技術研究所 教授 谷川 隆夫

地球上では特殊な環境下でしか存在しないが、宇宙全体では目に見える物質の殆どを占めるプラズマは、ちょっとした擾乱に対して大きな密度変調を生じ易い。特に強い擾乱に対しては言わずもがなで、例えば強いラングミュア乱流と言われる状態にあるプラズマ中にはキャビトンと呼ばれる低密度部位があたかも泡の様にプラズマ中に分散している。泡状プラズマが核融合プラズマ、宇宙空間プラズマなど色々なところに存在する証拠は多々ある。しかしながら、泡状プラズマの特異性に気付いている研究者は少ない。プラズマ物理に新たなパラダイムを導入すべく泡状プラズマの物理現象解明に向け研究を進めている。泡状プラズマが生じる過程で重要な役割を果たすものに“ポンドロモーティブ力”という非線形力がある。この力を利用してプラズマを効率よく加速し、長寿命のプラズマロケットエンジンに利用しようという研究も進めている。九州大学で理論・シミュレーションによる検討を、その知見を生かして東海大学で実験研究を進めている。因みに、このプラズマロケットエンジンの研究は、東京農工大学の篠原教授をリーダーとする HEAT (Helicon Electrodeless Advanced Thrusters) プロジェクトの一環である。

## ■第 246 回総合科学技術研究所談話会

日 時：2012年12月19日(水) 10:00～11:00

テーマ：「GPU によるプログラムの高速化 行列計算を例として」

所 属：総合科学技術研究所 教授 横山 直樹

高速度ビデオ記録装置で得られた動画像を対象とし、興味のある対象あるいはその部位が、時間とともにどのように変位していくかをコンピュータを用いて解析するプログラムを開発している。対象部位の位置をサブピクセルの精度で求めるためには、画像の一致度を計算する必要があり、対象部位をとりまく画素数が大きい場合や部位の数が多い場合には、最新のコンピュータを用いても計算負荷が重く、処理時間がかかる。この画像の一致度は相互相関係数を求めることで評価するが、計算を工夫することで並列化が可能である。つまり CPU や GPU を活用して並列分散処理を行うことで、処理時間を大幅に短縮することができる。前回までで、ネットワークを用いた分散処理を PC やスーパーコンピュータの場合について紹介してきたが、今回は特に最近注目されつつある GPU を用いての分散処理をおこない、その有効性について検討した同等なコストの CPU に対して GPU は数倍の計算処理能力を持つことがわかった。今回はより一般的な場合（行列計算）において、CPU での高速化と GPU での高速化の比較を実例でデモする。



---

# 東海大学 総合科学技術研究所

## 紀要編集委員会

---

委員長 **渡邊 幹夫** 総合科学技術研究所 所長  
理学部化学科 教授

委員 **横山 直樹** 総合科学技術研究所 教授

事務局 **志賀 桂子** 研究推進部研究支援課  
(総合科学技術研究所担当)

本紀要の全ての掲載情報は、著作権者の許諾なしに、著作物の全部または一部を無断で複製複製（コピー）することは、著作権法上での例外を除き、禁じられています。



Research Institute of Science and Technology

---

### 東海大学紀要 総合科学技術研究所

発行日 2014年3月31日

発行人 渡邊 幹夫（東海大学総合科学技術研究所 所長）

発行 東海大学総合科学技術研究所

住所 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目四丁目1番1号

電話 0463-58-1211（代表）

---



Research Institute of Science and Technology

東海大学総合科学技術研究所

〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1  
TEL. 0463-58-1211