

第2回CPS実験実習報告

荒川 政彦¹, 門野 敏彦², 中村 昭子³, 杉田 精司⁴, 鈴木 絢子³, 大野 宗祐⁵,
 関根 康人⁴, 長谷川 直⁶, 山下 靖幸⁷, 岡村 奈津子⁴, 桂 武邦³, 洪 鵬⁴,
 佐藤 雅彦⁸, 関川 知里³, 高沢 晋³, 高部 彩奈³, 長 勇一郎⁴, 土肥 弘嗣¹,
 保井 みなみ¹, 豊田 丈典⁹, 中村 真季⁴, 長岡 洋一¹⁰, 新居見 励¹¹,
 羽倉 祥雄³, 羽村 太雅⁴, 平井 隆之¹⁰, 楊 馬風¹²

1. はじめに

昨年に引き続き今年度(2009年度)もCPS(惑星科学研究センター)との共催で実験実習を神戸大学中心に実施することになった。この実習は、惑星科学会の研究会である衝突研究会の世話人が中心となり、全国の大学院生を対象に開催している。衝突実験を題材として、物理実験の基礎から応用までを集中講義形式で教授しようという試みである。今年度は、昨年度のCPS衝突実験実習からCPS実験実習と名称を変更し、その実習内容も基礎コース(実験基礎実習)と応用コース(衝突実験実習)の2つに分けることにした。昨年の報告記事と内容は重なるが、この実習を計画することになった背景を簡単に説明したいと思う。

惑星科学の分野では数カ所の大学で衝突実験を行っている。全国に散らばる衝突実験関連の研究グループは、トータルで見れば、低速(数 10 m/s)から超高速(数 10 km/s)までの非常に広い速度領域をカバーする実験設備を持ち、計測系についても高速撮像・分光技術

から物質回収分析や質量分析技術まで様々な技術と装置を持っている。しかしながら、どこも教員1~2名で学生の指導を行うような小規模のグループである。学生に対する実験の指導は、実際に実験を行いながら装置の前で直接行うことが望ましいが、現在の大学の教育環境では基礎的な技術からすべてを一人の教員が教えることは難しい状況にある。また、このような小規模グループでは、各研究室において広い分野の高度実験技術・設備を維持し、発展させることは困難である。そのため、研究に利用できる程の高度な実験技術となると各研究室で学生が習得できる技術は、大変狭い分野に限られてしまっているのが現状である。しかしながら、今後若い研究者が、惑星探査等の技術開発を行っていく上では、学生の頃からできるだけ広い分野において一流の技術に触れておく必要がある。CPS 実験実習は、この2つの問題点を解消して将来の実験研究者を育成することを目的に立案され、実験の基礎教育を行う実験基礎実習と最先端の実験技術を習得する衝突実験実習の2つのプログラムから成る。このようなプログラムを実施することにより、全国に散らばる高度だが狭い分野に特化しつつある研究・教育資源を有機的に連携させ、最先端教育と広範囲教育という二律背反を両立させることを狙っている。

実験基礎実習では、本来なら各大学において教えるべき知識や技術であるが、各大学で時間をとることが難しい内容をピックアップしてカリキュラムに反映させている。特に一人一人が自分の手を動かして行う実習に重点を置いている。そのため、CPS からの援助

1. 名古屋大学大学院環境学研究科
 2. 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
 3. 神戸大学大学院理学研究科・惑星科学研究センター
 4. 東京大学大学院新領域創成科学研究科
 5. 千葉工業大学惑星探査研究センター
 6. JAXA/宇宙科学研究所
 7. 中部大学
 8. 東京工業大学大学院理工学研究科
 9. 東京大学大学院理学系研究科
 10. 総合研究大学院大学物理科学研究科
 11. 大阪大学大学院理学研究科
 12. 名古屋工業大学大学院工学研究科
- arak@eps.nagoya-u.ac.jp

表1：実験基礎実習のスケジュール

日程	時間	内容	主担当
2月22日(月)	10:00-12:30 13:30-18:00	講義「衝突実験」 実習「衝突実験」	荒川, 門野 荒川, 中村, 門野
2月23日(火)	9:30-11:30 13:00-17:30	実習「金属工作1」 実習「金属工作2,3」	工作技術センター
2月24日(水)	9:00-11:50 13:30-18:30	講義「電子回路」 実習「電子回路I」	山田 山田, 山下
2月25日(木)	9:00-12:00 13:00-18:00 19:00	講義「真空技術」 実習「真空技術」 懇親会	大野 大野
2月26日(金)	9:00-12:00 13:00-17:00	実習「電子回路実習II」 衝突実験実習報告会	山田, 山下

により一通りの基礎物理実習装置を1~2人で使用できる環境を整えた。また、学生が所属する研究科によっては経験することが難しい工作実習も神戸大学工学研究科の工作技術センターの方々のご助力でカリキュラムに入れることができた。丸1日という短い間ではあるが学生にとっては大変に貴重な体験になったと思う。

昨年度の反省点も踏まえて、今年度はこの実験基礎実習と衝突実験実習を明確に分けて開催することにした。昨年度は、衝突実験実習のすべてのプログラムを神戸大学で行った。しかしながら、一大学で10名程度の学生が同時に実験を行うのは、実験装置の準備やスペースの点でやや無理があった。そこで、今年度は衝突実験実習を最先端の研究で利用されている実験・分析装置を利用して行う実習として定義し、実験基礎実習とは実習目的を差別化してカリキュラムを組むことにした。実験基礎実習では、半日で行う学生に負担の少ない衝突実験を課題として用意し、3班に分かれて大理石の衝突破壊強度 Q^* に関する衝突破壊実験、弾丸潜り込み観察実験、クレーター形成実験を行った。一方、衝突実験実習では、神戸大学以外の衝突実験施設を利用し、実際の研究に用いている装置で実習を行うことにした。日本には特徴的な実験設備を持つ研究室がいくつかあるが、その中で東大、宇宙研、名大がこの実習に協力することになった。東大では、杉田と関根が担当し、レーザーアブレーションによる分光分析の実習を行った。宇宙研では長谷川、門野、中村の指導により、二段式軽ガス銃を用いた岩石クレーターの形成実験とその超高速撮影を行った。また、名古屋大学では荒川の指導により、固体、気体中を伝播する

衝撃波の観察実験を行った。各大学で行った実習の結果は、2月26日の午後に神戸大学で行われた発表会で披露してもらい、参加者全員でじっくりと時間をかけて議論した。その結果をまとめた内容は、以下の学生諸氏のレポートを参考にして頂ければと思う(荒川政彦)。

2. 実験基礎実習

実験基礎実習の全体的なスケジュールに関しては、昨年度は学部四年生が講義のみに参加することを想定して前半に講義、後半に実習をまとめる形をとっていた。しかし実際にはそのような学生がほとんどいないこと、また講義で学んだことを直ぐに実習で実際に手を動かして経験した方が効率的ではないかという意見を踏まえて、基本的には午前中に講義、午後の実習を行う様に変更した(表1)。また昨年度は参加者のほとんどが実際の衝突実験経験者だったために実験基礎実習では実習として衝突実験を行わなかったが、今年度は衝突実験未経験者の参加も加味して前述のような基本的な衝突実験を実習初日に行うことにより、その面白さや難しさを実感して貰えるように変更を行った。昨年度行った弾丸作成実習を今年度は取りやめ、この時間を代わりに衝突実験に充てることとした。また昨年度、当初の予想よりも時間に余裕があった電子回路に関しては本年度は時間を多少削り、その分を衝突実験実習報告会に充てることとした。

また個別の講義、実習の内容に関しても昨年度の反省点等を踏まえていくつかの変更を行った。電子回路

に関しては実験において実践的な内容を行うということで、昨年度はOPアンプを中心に講義や実習を行った。しかし、電子回路に慣れ親しんでいない学生に対しては、やはりトランジスタを用いた回路を使って増幅回路の基本的なしくみを理解してもらう方が教育的な効果が高いということから、今年度はトランジスタによる増幅回路を学んでからOPアンプによる実用的な回路に進むように変更を行った。また昨年度の実習ではそれぞれの課題を想定よりもかなり早くこなしていく学生が何名か見受けられ、最終的に少し手持ちぶさたになっていることがあった。そこで中部大学教授の山田功夫さんにご尽力いただき、今年度はOPアンプを用いたフィルタ回路といった少し応用的な課題もいくつか用意して、これに対応できるようにした。実際に今回の実習では、昨年度に比べてオシロスコープなどの測定機器やハンダ付けなどに多少不慣れな学生が多かったために応用的な課題に到達する学生はいなかったが、様々なレベルの学生に対応できる、より柔軟性のある新しいカリキュラムになったと感じている。

真空実習については、配管や真空ポンプ等の設置のためかなり広いスペースが必要となるが、昨年度は実習を行った部屋が多少手狭だったことに加え、講義などを行っていた建物と離れていたことで効率が悪くなり、想定以上に実習に時間が掛かったことが反省点に

挙げられていた。そこで、今年度は講義室をそのまま実習に使用する様に変更を行い、昨年度よりも広いスペースを確保した。また学生への作業分担をより明確にすることで、昨年度とほぼ同じ実習内容を三分の二程度の時間で行うことが出来た。以上の様に昨年度からいくつかの変更を行うことによって、より多方面の学生に対してスムーズに対応できる様なカリキュラムに改善出来たのではないかと考えている(山下靖幸)。

3. 衝突実験実習

3-1 テーマA:レーザーアブレーションによる模擬衝突蒸気雲の発光分光測定

参加者：佐藤雅彦, 高沢晋, 高部彩奈, 豊田丈典,
羽村太雅, 平井隆之

場所・日時：東京大学柏キャンパス・2009年12月9
日から11日

世話人：杉田精司(東大), 関根康人(東大), レーザ
ー操作法指導・スペクトル分析法指導：鈴木絢子
(CPS), 分光計操作法指導：長勇一郎(東大)

(1) 実験概要

太陽系内の惑星X, Y, Zから岩石試料を採取した。レーザーアブレーションにより発生する岩石蒸気の分光観測から、母惑星を特定せよ!!この指令で実習は始

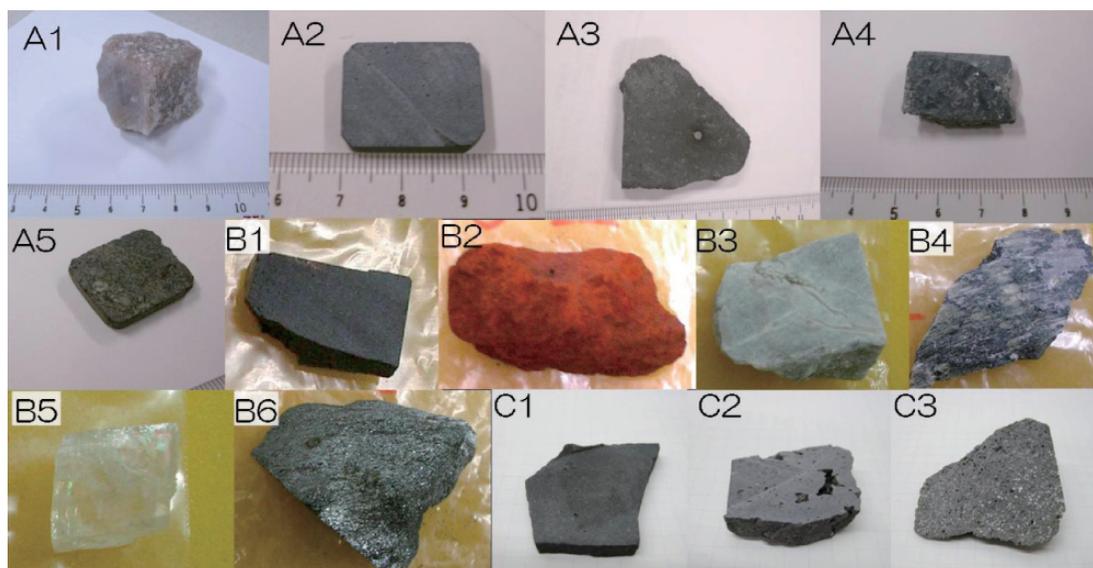


図1：各班の試料写真(C4は写真撮り損ね)。

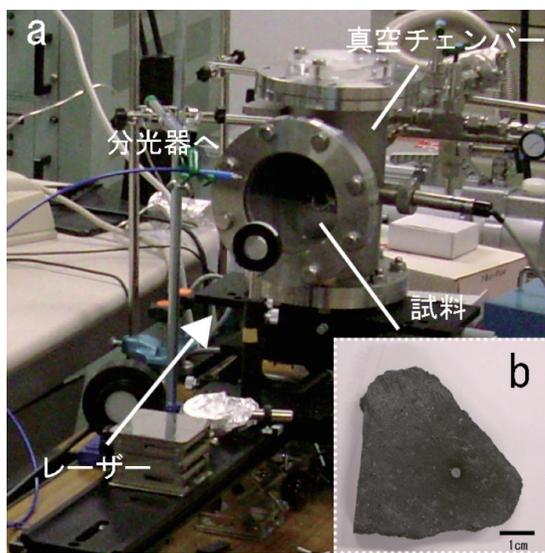


図2：レーザーアブレーションによる岩石蒸気の分光実験ターゲット部。(a)実験装置。(b)岩石試料。円内にレーザーの照射痕が見える。

また、天体衝突に伴い発生する超高温・高圧の衝突蒸気雲は現象の持続時間も短く計測が難しい。そこで有効な分光観測に関して講義の後、各班異なる天体からの複数の岩石へレーザー照射・分光測定を行った。

(2) 実験方法と結果及び考察

テーマAは東京大学杉田研究室のバックアップの元、Nd-YAGパルスレーザー、真空チェンバーおよび分光器を用いて実習を行った。実験はA、B、Cの3班に分かれて行い、各班に異なる惑星X、Y、Zの岩石試料が複数個配布された(図1)。レーザー照射により発生した岩石蒸気の発光を分光測定し、解析結果から惑星X、Y、Zを特定することが目的である。まさに、惑星衝突現象・惑星探査を模擬した実験である。以下、A班が行なった実験を例として、詳細を説明する。

真空チェンバー内に岩石試料をセットし、数 k Pa の真空状態とした。集光したレーザー光を岩石試料に照射し、岩石蒸気が発光を分光観測した(図2a)。得られたデータは、波長が既知の水銀アルゴンランプを用いて波長を、約 3000 K の黒体放射に近い発光をするクォーツタングステンハロゲンランプを用いて強度をそれぞれ較正した。較正後、原子輝線のデータベースを参照し、得られたスペクトルの輝線がどの元素の発光かを同定、岩石試料が含有する元素を特定した(図3)。

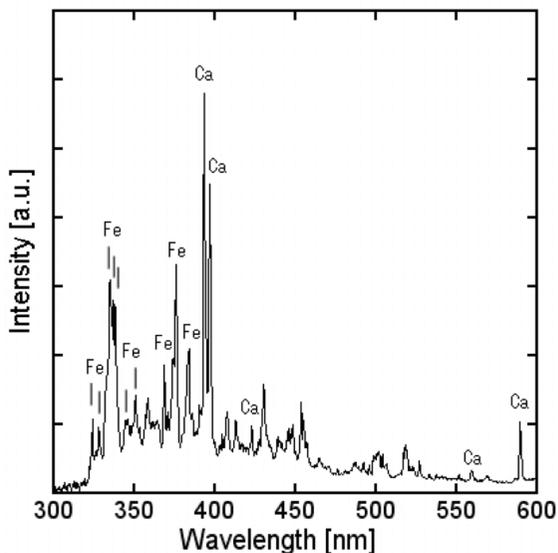


図3：測定結果(試料A2)。輝線の上の文字は同定した元素を表す。320-390 nmに、多くのFe輝線が見られる。

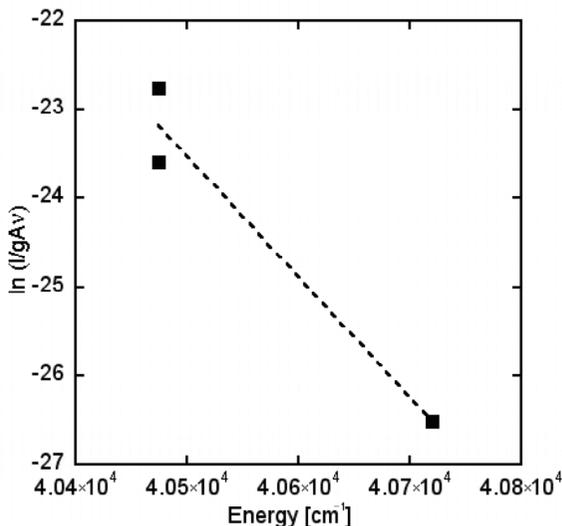


図4：ボルツマンプロット(試料A2・Ca)。プロットは測定値を、破線はフィッティングを表す。I, g, A, νはそれぞれ光の強度、統計的重率、遷移確率、光の振動数である。縦軸の切片から粒子数、傾きから温度が算出できる。

ここで原子輝線とは、原子の電子軌道が励起状態からより低エネルギーの状態へと遷移する際に、差分のエネルギーが決まった波長を持つ光として放出されるものである。また、複数の輝線が観測できた原子については、各波長における発光強度の測定値からボルツマンプロット[1]を作成し、岩石蒸気中の原子総数と温度

の推定を行った(図4)。

A班はCa, Feにターゲットを絞って輝線を同定し、5試料中2試料についてボルツマンプロットを作成して原子総数を求めた。そして求めたCa/Fe比を惑星の地殻・マントル組成のデータベースと比較し母天体の推定を行った。2試料ともCa/Fe比が0.01程度と非常に小さかった事から、水星・金星・火星・月の候補中で最もCa/Fe比の小さい火星であると結論付けた。B班、C班は分光学的に得られた元素の情報と、岩石学的知見を組み合わせてそれぞれ火星、金星の岩石であると結論付けた。なお、正解は実験参加者のみに知らされ、文書に残すことはできない。

上記の結果は改善すべき点を含んでいる。岩石試料中の結晶粒径に比べ、ごく一部しかレーザーアブレーションしていない(図2b)。岩石試料のバルク組成を反映していない可能性があるため、試料の複数位置をアブレーションする必要がある。また、原子輝線の同定、ボルツマンプロットの不十分さも挙げられる。この問題を解決し、さらには将来の惑星探査への応用につなげるには、最適な実験条件(真空チャンパー内の圧力・レーザーのセッティング等)によるデータの改善や、得られたより多くの輝線を丁寧に同定し、ボルツマンプロットから含有元素比を正確に求め、惑星Xを決定することが必要である。

(3) 感想

(高沢 晋) 惑星科学分野において非常に応用範囲の広いレーザーアブレーションにより発生する蒸気雲の分光観測法を学べたことを大変嬉しく思います。このような機会を我々に与えて下さった惑星科学研究センターの皆様、そして実習の準備、進行等に多大な時間を割いて下さった東京大学大学院新領域創成科学研究科杉田精司研究室の皆様にご挨拶申し上げます。

輝線の発生する波長、そしてその強度は詳細に決まっているため、実習では波長較正や感度較正などデータ解析に高い精度を求められました。しかしその分輝線から元素を特定できたときは大きな達成感と充実感を得ることができました。また、そういった高い精度の解析を求められる状況下で、大胆さや勘といった要素が解析スピードに大きく影響してく

ることも身を持って感じることができました。これからの自分自身の研究においても、ここで得た経験は大きく役に立つと思います。

(高部彩奈) 今回、私たちに与えられた課題は「岩石の分光観測から惑星Xを決定せよ!」というものでした。目的も明確であり、やりがいのある課題だと感じました。2人1組でグループを作り実習を行いました。レーザーを用いた実験も、分光観測も初めてでわからないことばかりでしたが、始めに受けた講義の知識や指導者のアドバイスにより理解することができ、多くのことを学ぶことができました。輝線の波長から観測できた原子を特定することの大変さやその結果による岩石の推定など、今までにない多くの体験ができました。また、グループで協力しながら実習をやることは私にとって非常に楽しく、他大学の人と交流を深めることもできました。知識、経験、交流等を得た、意義深い実習でとても満足しております。最後に遊星人投稿というかけがえのない機会を与えてくださった関係者の方々、また貴重な時間を使ってご指導くださった東京大学の皆様に深く感謝申し上げます。

3-2 テーマB: 堆積岩に対する二段式軽ガス銃による超高速衝突実験

参加者: 関川知里, 中村真季, 新居見励, 羽倉祥雄, 羽村太雅

場所・日時: JAXA / 宇宙科学研究本部・2010年1月27日から29日

世話人: 門野敏彦(阪大), 中村昭子(神戸大), 鈴木絢子(CPS), 長谷川直(ISAS/JAXA)

(1) 実習概要

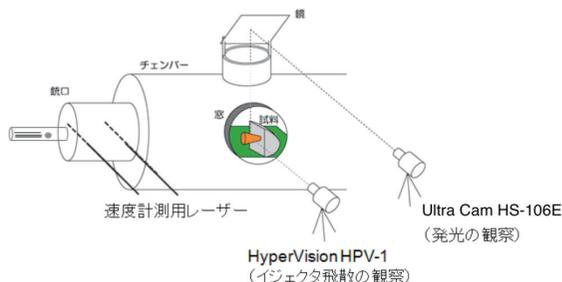


図5: 実験系の概略図

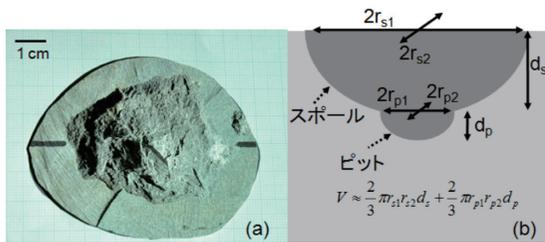


図6：(a)ショット4で形成されたクレーター。(b)クレーター形状の概略図。すべてのクレーターには、スポールとピットが見られ、図に示したそれぞれの長さからクレーター体積を概算した。

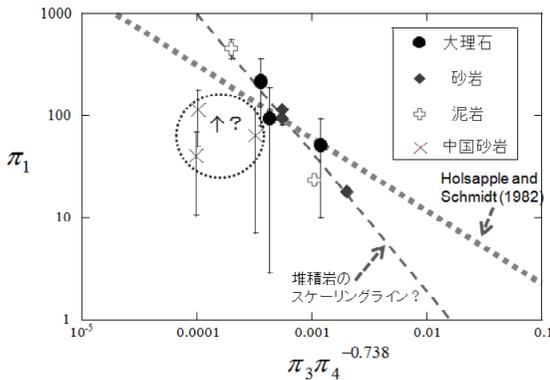


図7：既存のスケーリング則[3]との比較。表面が剥離した中国砂岩は体積が少なめに見積もられていると考えられる。中国砂岩以外のデータをフィット(図中破線)すると、金属の場合[3]とは異なった傾向が見られる。

表2：衝突実験条件と形成されたクレーター体積の結果。

ショット番号	標的	衝突速度 (km/s)	体積 (× cm ³)
1	大理石	3.85	7.7 ± 7.5
2	大理石	4.20	18 ± 11
3	大理石	2.31	4.2 ± 3.4
4	砂岩	3.90	9.36 ± 0.06
5	砂岩	2.02	1.5 ± 0.1
6	砂岩	3.90	7.7 ± 1.0
7	泥岩	4.37	32 ± 7
8	泥岩	3.67	×
9	泥岩	1.91	1.6 ± 2
10	中国砂岩	4.21	4.0 ± 3
11	中国砂岩	2.22	6.2 ± 5.5
12	中国砂岩	3.96	11 ± 6
13	石灰岩	3.82	×

× 測定不能

金属ターゲットに対する高速衝突実験[2]により形成されたクレーターのスケーリング則(実験と実際の天体衝突現象をつなぐ関係式)が導出されている[3]が、

これが岩石に対しても適応されるかということは解明されていない。そこで我々は5種類の堆積岩に対して、宇宙科学研究本部の二段式軽ガス銃を用いてクレーター形成実験を行い、既存のスケーリング則との比較を行った。また高速カメラを用いて、衝突時の発光、イジェクタの飛散のその場観察を試みた。

(2) 実験方法と結果及び考察

二段式軽ガス銃(藤原銃)を用いて、堆積岩(大理石、砂岩、泥岩、中国砂岩、石灰岩)を標的としたクレーター形成実験を行った。この二段式軽ガス銃は、火薬の燃焼によって駆動されたピストンが軽ガス(ヘリウム)を断熱圧縮し、高压のガスが、ダイヤモンドと呼ばれる金属板の隔壁を破って噴出する圧力で、弾丸を数km/sにまで加速することのできる装置である。弾丸の速度は、無煙火薬の量、ダイヤモンドの材質や厚さを変えることで調整が可能である。一度ショットを行うと、銃身等を丁寧に掃除する必要がある。

今回の実験では、全てのショットで、弾丸は直径7.14 mmのナイロン球を用い、真空中(数十～数百Pa)で2～4 km/sでの衝突実験を行った。2台の高速カメラ(Ultra Cam HS-106E; nac イメージテクノロジー / HyperVision HPV-1; 島津製作所)でそれぞれ衝突時の発光(カラー; FPS(Frame per second)=250,000～1,000,000)とイジェクタの飛び散る様子(モノクロ; FPS = 31,250～125,000)を撮影した。実験系の概略図を図5に示す。

形成したクレーターは全てスポールとピットを有した。既存のスケーリング則[3]と比較するため、まずクレーター体積を求めた。体積は、必要なパラメータをノギスで測定し、クレーターのスポールとピットをそれぞれ半楕円体に近似することで求めた(図6)。大理石等の、元々クラックが存在する堆積岩が衝突時に粉碎した場合は、可能な限り岩石を復元してから測定した。ただし、ショット8の泥岩は弾丸が端に当たったため、ショット13の石灰岩は非常に不均質であったため、それぞれクレーターの復元が不可能であった。衝突実験条件と、クレーター体積を表2に示す。

次に、各堆積岩のコアをくり抜き、円盤型サンプルを作成して、圧縮試験機(EZ Graph;島津製作所)を用いた圧裂引張強度試験により引張強度を測定した。ま

た、質量体積比からバルク密度を決定した。

これらの実験で得られた結果を元に、金属試料に対する既存のスケーリング則[3]との比較を行う。[2]によると、金属に高速衝突して形成されたクレーターは、無次元数

$$\pi_1 \equiv V\rho/m, \pi_3 \equiv Y/\delta U^2, \pi_4 \equiv \rho/\delta \text{ に対して,}$$

$$\pi_1 = (0.458 \pm 0.080) (\pi_3 \pi_4^{-0.738})^{-0.709 \pm 0.027} \quad (1)$$

という関係があることが分かっている。ここで、 V はクレーター体積、 ρ は標的の密度、 m は飛翔体質量、 Y は標的の引張強度、 δ は飛翔体密度、 U は衝突速度である。

図7に式(1)と今回の実験結果を併記する。大理石は、元々存在したクラックの影響で衝突時に激しく破碎され、正確に復元ができなかったため、誤差が非常に大きい。また、今回用いた中国砂岩は5 mm程度の薄い層が重なったもので、クレーター形成時に表面が粉碎・剥離したため、測定されたクレーター体積は実際より小さいものとなっていると考えられる。図7の中国砂岩以外のデータは既存の式の周りにばらついているものの、少し異なった傾向を持つようにも見える。これは金属と堆積岩の性質の違い（不均質性の程度、延性や展性の有無など）の寄与と考えられる。

今回の実験では、大理石のように破碎してしまったものがあったため、正確なクレーター体積が計測できなかった上に、データ点も少ない。より詳細なスケーリング則の確立には、体積の大きな標的とより多くのショット数が必要である。

高速カメラを用いた発光の観測では、多くのショットで橙色の発光が観測された。カルシウムの炎色反応の色と類似しており、大理石等のカルシウム含有試料でも見られたことから、標的中のカルシウムの発光と考えられる。一方、泥岩では緑色の発光が観測された。これは泥岩中の銅の発光である可能性が予測される。分光実験による解析が望まれる。

また、イジェクタ飛散の観測結果からは、一般的なイジェクタ飛散現象と同様、始めに細かいイジェクタが非常に速い速度（ ~ 1 km/s）で飛散し、その後大きなサイズのイジェクタが比較的遅い速度（ ~ 100 m/

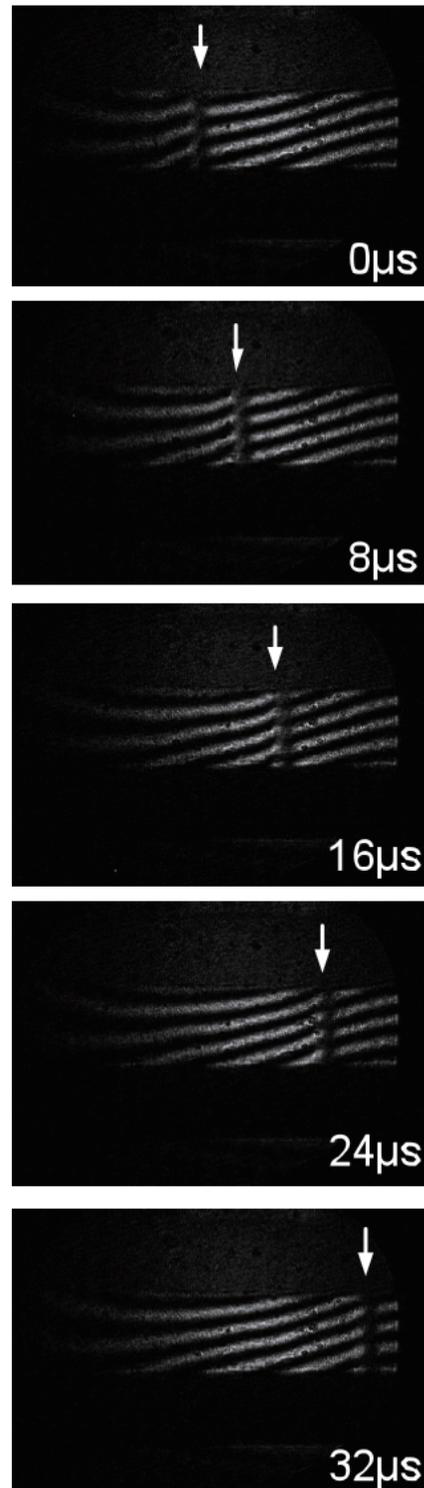
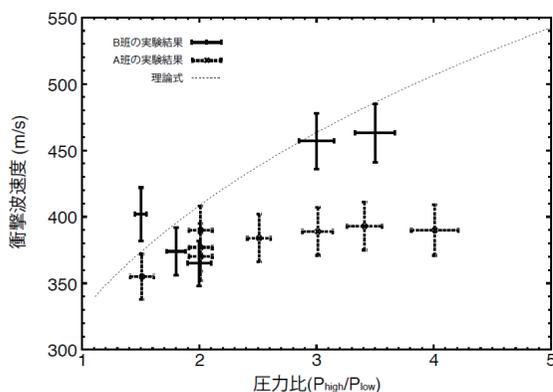


図8：衝撃波管で発生させた衝撃波の可視化画像、高圧室に0.25MPaのヘリウムを充填した場合で、圧力比 P_4/P_1 は3.5である。

図9：圧力比 P_4/P_1 に対する衝撃波速度

s)で飛散していく様子が観察された。

(3) 感想

これまでは知識としてしか知らなかった軽ガス銃を実際に扱うことができた事は有意義な体験だった。宇宙研・長谷川さんの指導で、銃の掃除等を含めて実験に必要な一連の作業をよく理解することができた。

また今回の実習は、同年代の学生との交流の場としても大きな意味合いを持っていたと思う。同じ「惑星科学」に関わっているけれども、研究分野を異にする学生と共に実験をする機会はあまり無いので、今回の出会いを大切にしたい。自分とは違う環境で研究をしている人たちは、異なる考え方やものの見方を持っており、そこから生まれる発想に触れられたこともいい経験になったと思う。

最後になりましたが、今回の実験実習にてご指導いただいた先生の方々に感謝の意を表したいと思います。ありがとうございました。

3-2 テーマC：衝撃波の可視化

参加者：桂武邦，楊馬風，洪鵬，長勇一郎，岡村奈津子，長岡洋一

場所・日時：名古屋大学理学館205/206室・2009年12月16日から18日

世話人：荒川政彦(名大)，衝突実験指導：土肥弘嗣(名大)，衝撃波管指導：鈴木絢子(CPS)，弾性波速度指導：保井みなみ(名大)

(1) 実験の概要

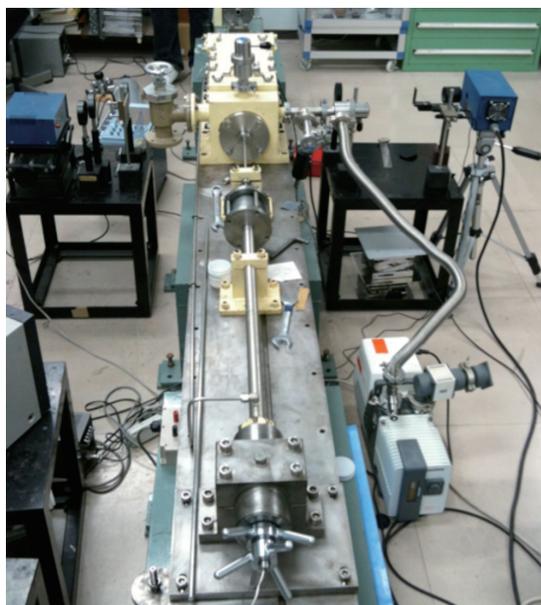


図10：二段式軽ガス銃(名古屋大学)

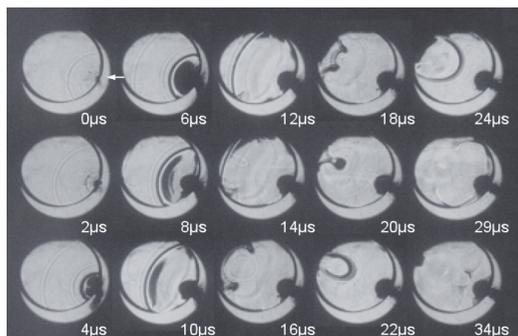
名古屋大学の衝撃波管，二段式軽ガス銃を用いて，衝撃波の伝播による媒体中の密度変化を利用した可視化実験を行った。衝撃波管実験ではマッハツェンダー干渉計を用いて空気中に生じる衝撃波の可視化を行い，圧力と衝撃波速度の関係を調べた。また，超高速衝突実験ではナイロン弾丸をアクリルやガラス標的に衝突させ，標的内に生じる衝撃波を観察した。

(2) 実験1：衝撃波管の原理と実験方法

実験に使用した衝撃波管は，高圧室，低圧室，両者を分離するための隔膜で構成されている。隔膜には，セロファンやマイラー膜を使用した。高圧室にはヘリウムガスの導入部が接続され，低圧室は大気中に開放されている。高圧室へのヘリウムガスの導入は大気圧から行われるため，高圧室へ充填されている気体は空気とヘリウムの混合気体となっている。

撃針で隔膜を瞬間的に破ることにより，高圧気体が高圧室から低圧室へ急激に伝播し，低圧気体はその圧縮を受ける。低圧室に衝撃波が発生し，図8の右方向へと向かう一次元流れとして伝播する。この時に形成される衝撃波の速度は，隔膜が破られる前の高圧室の圧力 P_4 と低圧室の圧力 P_1 の圧力比 P_4/P_1 で決まり，式(2)で表わされる。ここで， a は音速， M はマッハ数， γ は比熱比を表しており，添え字の1は低圧室，4は高

(a)



(b)

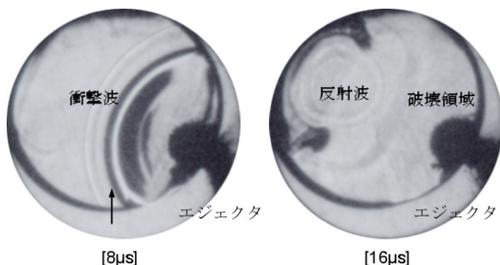


図11：シャドウグラフ法により可視化したアクリル中を伝播する衝撃波(a)アクリル標の中を伝播する衝撃波の様子，(b)衝撃波、反射波、破壊領域、エジェクタ

圧室を表している。伝播する衝撃波の後には、衝撃波によって誘起された高速気流が続く。衝撃波管で発生させることができる流れの持続時間は極めて短く、一般に数ミリ秒から10数ミリ秒の程度である。今回の実験では、低圧室側の観測窓から衝撃波面の観測を行った。衝撃波の観測可能な領域は、観測窓の大きさと同軸径の大きさにより決まる。観測した衝撃波は数百m/s程度の速度であり、現象の観測には高速撮影が可能なカメラ(HPV-2, 島津製作所)を用いた。

$$\frac{P_4}{P_1} = \left[\frac{2\gamma_1 M_1^2 - (\gamma_1 - 1)}{\gamma_1 + 1} \right]^{2\gamma_4 / (\gamma_4 - 1)} \left[\frac{1}{1 - \frac{(\gamma_4 - 1)a_1}{(\gamma_1 + 1)a_4} \left(M_1 - \frac{1}{M_1} \right)} \right] \quad (2)$$

(3) 結果と考察

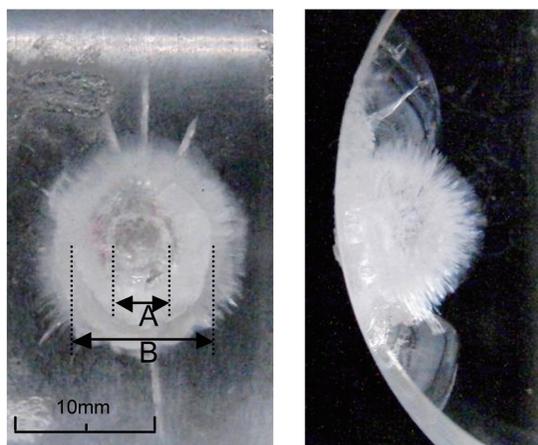


図12：円柱標的側面への衝突で出来たクレーター

図8は、衝撃波管で発生させた衝撃波をマッハツェンダー法により可視化した結果である。左(高圧室側)から右(低圧室側)へと向かう衝撃波が観測された。図9は、今回の実験結果と式(2)から求めた理論曲線である。注目すべき点は隔膜の種類や枚数によってあまり差がなかったことである。圧力比が3.0以上の時は隔膜にセロファン代わりに、セロファンよりも強度の強いマイラー膜を使い、特に圧力比が4.0の時にはマイラー膜を2枚重ねて使った。マイラー膜はゴムのように伸びる性質があるため、セロファンほど瞬間的に割れない。そのため、高圧室の圧力を高くしていても理論的に予想されるほど衝撃波速度が上がらないという結果となったと考えられる。式(2)はマッハ数が1から10の領域で良く成り立つことから、今回の実験範囲(マッハ数：1～2)での各班の実験結果の違いが何に起因するかは定かではないが、隔膜の違いなどが影響している可能性がある。

(4) 実験2：アクリル中を伝播する衝撃波の可視化

本実験は、標的となるアクリル材に高速で弾丸を衝突させ、その際に生じる衝撃波を可視化することを目的とした。

高速で弾丸を射出する装置として、二段式軽ガス銃を使用した(図10)。二段式軽ガス銃とは、火薬の爆発による圧力を利用して音速の速い軽ガス(分子量の小ささと安全性から、今回はHeを用いた)をピストンで圧縮し、その圧力によって弾丸を高速度で飛ばす装置

である。このとき圧縮されるHeガスの圧力は数百気圧、それによって加速される弾丸の速度は秒速3~4 kmに達する。これは小惑星への隕石の衝突速度に相当する速度である。発射された弾丸は、予め1000分の1気圧程度まで真空引きされたチャンバーへ入って行き、そこで標的であるアクリルに衝突する。アクリルの大きさ(数十mm)と形状(立方体, 円柱)を変えて、各班5回ずつ衝突実験を行った。

この衝突現象は、イメージコンバータカメラによって一コマ数マイクロ秒の時間分解能でポラロイド写真として記録された。それをコンピュータにスキヤナで取り込んで、衝撃波・反射波の速度を解析した。また弾丸を発射した後は毎回銃身を解体し、内部の掃除と火薬の詰め直しを行った。

(5) 結果と考察

ナイロン弾丸の衝突により標的内に生じた衝撃波をシャドウグラフ法により可視化した。図11に実験結果の一例を示す。プロジェクトイルは図11(a)の矢印の向きへ飛行し、標的に衝突した。0 μ sは画像の撮影が開始された時刻を表しており、弾丸は時刻2 μ sで標的に衝突した。時刻4 μ sから14 μ sでは衝突位置から衝撃波が伝播していく様子が分かる。更に、時刻14~16 μ sの間に衝撃波が標的の界面に到達し、反射波となって衝突点へと向かっている。また、弾丸が衝突した位置からは、数十 μ sに渡ってエジェクタが噴出していた。図11(b)の矢印は、弾丸本体の衝突により生じたと考えられる衝撃波の波面を示している。また、標的内の黒い領域は、光源からの光が透過していない部分であり、衝突により形成された衝突クレーターなどの破壊領域を示している。これらの破壊領域は、衝突直後から形成されていることが分かる。エジェクタに関しても、衝突直後から放出されていることが分かる。

衝突直後の衝撃波速度(時刻2 μ s~4 μ sでの平均速度)は3.5 km/sであり、衝撃圧力に換算すると1~2 GPaである。その後の時間帯(4~28 μ s)で求めた波の速度は3.0 km/s程度に減衰していた。また、標的表面での反射前後で有意な速度変化は見られなかった。ナイロン弾丸が衝突速度4km/sでアクリル標的に衝突した際の衝撃圧力はインピーダンスマッチング法から

計算すると14 GPaであり、アクリル標的の中を伝播する衝撃波の速度は6 km/sである。画像データから求めた結果と比較すると、衝突直後に6 km/sであった衝撃波の速度は、2 μ sの間にその半分程度の3.5 km/sにまで減衰したと考えられる。つまり、衝突直後にカメラの撮影間隔以下の時間で衝撃波の強い減衰が生じ、更に標的の中を伝播すると共に減衰していき、衝撃波から強い弾性波となったのではないかと考えられる。

衝突位置から放出されたエジェクタに関しては、追跡可能な塊の飛散距離から放出速度を求めたところ、10~100 m/s程度の比較的低速なものと約2 km/sの高速なものが存在していることが分かった。更に、衝突により形成されたクレーターを観察した(図12)。その典型的なサイズは、外側部分の直径(A)が8~10mm程度、内側の直径(B)が2.0~2.5 mm程度、深さは2.5~3.0 mm程度であった。また、衝突点を中心とした亀裂が発生しているのが見られた。

(6) 感想

(桂武邦)本実験はCPSと衝突研究会により企画された第2回CPS実験実習の応用コースの一部であり、様々な衝突実験を通して惑星科学に関わる学生の基礎訓練、また相互啓発を目的とした実験であった。そのため普段行っている研究とは異なる実験であるため、イメージコンバータカメラや衝撃波管などの実験器具の原理や特徴など、基礎の部分から学ぶこととなった。我々の実験では、特に衝撃波を可視化するための光学干渉計の理解、二段式軽ガス銃の仕組みや使用方法、また画像解析の手法を学ぶことができた。この実験により衝撃波が物質中をどのように伝播するのかを理解できた。何よりいつもは違う研究をしている学生たちの集まりであるため、結果に対する捉え方が異なり、お互いに新たな視点を共有できたことが本実験の一番の収穫といえるだろう。今後はこの実験を通して得た惑星科学に対する多様なアプローチを、自らの研究にも活かすことができると考えられる。

(長岡洋一)私は「宇宙機に対するスペースデブリの超高速衝突」を研究テーマとしており、主に二段式軽ガス銃を用いて実験を行っています。ただ、衝突実験をしていると言っても、大抵の場合、研究テ-

マは明確に決められているので、自分の研究対象以外の実験を行う機会は、ほとんどありません。以前から超高速現象の可視化に興味があったのですが、実際にそれを行うためには、可視化を行うための光学系や観測装置を用意する必要がありました。そんな中で、偶然知った第2回衝突実験実習のテーマの中に「衝撃波の可視化」があり、分野が違いましたが、参加させていただきました。今回の実習では、2種類の可視化法を学ぶことができた上に、私にとってはあまり知り合う機会のない惑星科学の分野の方とも知り合うことができ、貴重な体験となりました。実習後に開催された神戸大での各コースの発表会の準備でも、皆で時間の都合をつけて協力して実験データの解析や発表資料をまとめることができたのも良い経験になったと思います。

年末のお忙しい時期に、3日の間、6名もの学生の面倒を見てくださった荒川先生ら名古屋大の皆様と神戸大の鈴木絢子さんに、Cコースに参加した学生一同、大変感謝しております。ありがとうございました。

謝 辞

今年度の実験基礎実習は、昨年に引き続き、電子回路技術の講義・実習には中部大学・教授の山田功夫さん、工作実習では、神戸大学工作技術センターに、衝突装置の運用では神戸大学・技術専門職員の三軒一義さんにお世話になりました。衝突実験実習のテーマBは宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部スペースプラズマ共同利用に基づき実施されました。また、衝突実験実習では(株)ナックイメージテクノロジー様のご厚意で高速度撮影機材(ULTRA cam HS106E)をお借りすることができました。この場をお借りして、お礼申し上げます。

参考文献

- [1] H. R. Griem, 1997, Principles of Plasma Spectroscopy, Cambridge University Press.
- [2] Payne, J. J., 1965, Impacts of spherical projectiles of aluminum, stainless steel, titanium, magnesium, and lead into semi-infinite targets of aluminum and stainless steel, Rep. AEDC-TR-65-34, Arnold Eng. Develop. Center, Arnold Air Force Sta., Tenn.
- [3] Holsapple, K. A. and Schmidt R. M., 1982, On the scaling of crater dimensions 2. Impact processes, J. G. R., 87, B3, 1849-1870.