

# 理数科 2 年次生実践報告

## 「発展研究・論文研究」の取り組み

平成 28 年度の理数科 2 年次では、総合的な学習の時間（2 単位）を「発展研究・論文研究」として、以下のような要領で計画・実施した。

### 1 目標

理科及び数学に関する事象について課題を設定し、実験・観察などを通して研究を行い、科学的に探究する問題解決の能力を身に付ける。

### 2 研究内容

- ・理科及び数学分野の特定の事象に関する研究
- ・理科及び数学分野を発展させた探究活動
- ・理科及び数学分野の歴史的実験例の研究
- ・自然環境に関する調査・研究

### 3 指導方法

- ・設備・機器などに応じて各グループに課題を設定させ、理科及び数学の教員が指導に当たる。
- ・「発展研究・論文研究」の授業は 2 年次の水曜日に 2 単位時間を設定し、担当教員全員が指導に当たる。  
ティーチングアシスタントとして岡山大学の大学院生、留学生、非常勤講師で指導に当たる。また、放課後や夏季・冬季休業中も利用して指導する。
- ・評価については、主担当教員が原案を作成し、指導教員全員で審議して決定する。

### 4 対象学年 理数科 2 年次生(40 名)

### 5 1 年次からの流れ

1 年次前期	創生研究(1 単位)	1 年次後期	発展研究(1 単位)
2 年次前期	発展研究(1 単位)	2 年次後期	論文研究(2 単位)

### 6 「発展研究・論文研究」校内発表会の日程と形態

#### 第 1 回(研究評価, 口頭発表 9 テーマ)

- ・日 時 平成 28 年 10 月 5 日(水) 13:50 ~ 15:30
- ・会 場 岡山県立倉敷天城高等学校
- ・参加者 理数科 2 年生(40 名)・本校教員
- ・発表時間 1 グループ質疑応答を含めて 7 分

#### 第 2 回(研究評価, 口頭発表 9 テーマ) (第 14 回高大連携理数科教育研究会・第 17 回岡山県理数科理数系コース課題研究合同発表会) ステージ発表選考会)

- ・日 時 平成 28 年 12 月 14 日(水) 13:50 ~ 15:30
- ・会 場 岡山県立倉敷天城高等学校
- ・参加者 理数科 2 年生(40 名), 本校教員, SSH 運営指導委員
- ・発表時間 口頭発表は 1 グループ質疑応答含めて 7 分

#### 第 3 回(研究評価, 口頭発表 4 テーマ, ポスター発表 9 テーマ)

- ・日 時 平成 29 年 1 月 25 日(水) 13:50 ~ 15:30
- ・会 場 岡山県立倉敷天城高等学校
- ・参加者 理数科 2 年生(40 名), 理数科 1 年生(40 名), 2 年生保護者, 本校教員
- ・発表時間 口頭発表は 1 グループ質疑応答含めて 10 分

### 7 平成 28 年度 第 14 回高大連携理数科教育研究会 第 17 回岡山県理数科理数系コース課題研究合同発表会の日程

- ・日 時 平成 29 年 2 月 4 日(土)
- ・会 場 岡山大学創立五十周年記念館

# 平成28年度「発展研究・論文研究」報告

## 【物理分野】

### 1. 熱音響冷却装置の製作と冷却原理の考察

岡田悠汰 柳井脩希 多賀将大 内田莉香 瀧上愛理 pp. 3-7

### 2. メートルブリッジを用いた黒鉛複合体の電気抵抗の温度係数測定

越智龍之介 河端佑一郎 小林廉 塩田理史 pp. 8-10

### 3. 不規則銀河Arp147の見かけの等級の差(B-V)の分布を可視化する

野崎信吾 中村友哉 藤原直音 伊藤友 小原悠里 pp.11-17

## 【化学分野】

### 4. NaCl 溶液－Cu 電極濃淡電池での起電力発生の原因

大野さくら 小西悠斗 篠原俊輔 秦悠己 丸山静香 pp.18-24

## 【生物分野】

### 5. 酵母菌を包み、胃を通過させる

藤原つづみ 三澤遙 三宅彩花 湯浅愛 pp.25-27

### 6. 植物の負傷時における植物性乳酸菌の一般細菌に対する抑制効果

岡田啓佑 笹野玲音 永山智也 秋永結香 樋口幸希 pp.28-31

### 7. プラナリアの自切頻度に短期間の温度上昇が与える影響

有地大哉 江田智彬 京免珠生 永山龍那 pp.32-35

## 【数学・情報分野】

### 8. 感染症の流行シミュレーション

赤堀涼太郎 富岡直毅 中川彰文 pp.36-39

### 9. 人間の判断を用いた本文解析による標的型メールの識別精度向上

川上幸起 小野裕之 谷村勇大 山田敬汰 吉川大智 pp.40-43

## 指導教員

仲達修一(物理) 定金龍輔(物理) 清水逸生(物理) 筒井愛知(物理・天文)  
藤原一郎(化学) 小延靖史(化学)  
野津俊朗(生物) 岡田勝秀(生物)  
太田伸一(数学) 橋村泰司(情報)

ティーチングアシスタント  
白神陽一朗, Yakubu Abdallah

# 熱音響冷却装置の製作と冷却原理の考察

## Production of Thermoacoustic Cooling System and Consideration of Cooling Principle

岡田悠汰 柳井脩希 多賀将大 内田莉香 瀧上愛理  
指導者：筒井愛知 定金龍輔 白神陽一朗 清水逸生 仲達修一

### 要 旨

ステンレス製のパイプを束にして作ったスタックをアクリル製のパイプに挿入し、これに音波を入射させたところ、アクリルパイプ内のスタックの両端の空気の温度が下がることが確認できた。この原理として、音波の振動により、スタックとアクリルパイプ内の空気の間で熱交換が生じ、温度が低下していくというモデル(仮説)を考案した。

### Abstract

We tried to insert a stack made of stainless steel pipe in a bundle of acrylic pipe and injected sound waves, it was confirmed that the temperature of the air at both ends of the stack inside the acrylic pipe drops. As a principle of this, we devised a model (hypothesis) that heat exchange occurs between the stack and the air in the acrylic pipe due to vibration of sound waves, and the temperature decreases.

キーワード：熱音響現象、熱音響冷却、スタック

## 1. 序論

岡山県の吉備津神社では古来より「鳴釜神事」と呼ばれる神事が行われている。釜を炎で熱すると釜が共鳴し、「ボー」という大きな音が出て、この音で吉凶を占うという神事である。これは熱音響現象であるということを知り、熱音響について調べたところ、熱音響冷却という現象を見つけた。



図1. 吉備津神社の神事「鳴釜神事」  
(写真提供 吉備津神社)

る「Thermal Management for Low-Power Handheld Electric Devices using Thermoacoustics and Forced Convection by Vibrating Cantilever Beam」がある<sup>1)</sup>。この報告では、可逆断熱圧縮、不可逆等圧熱移動、可逆断熱膨張、不可逆等圧熱移動の4つの過程を繰り返し、冷却を行うという原理が報告されている。また、畠沢らの研究では、効率的なスタックの位置(アクリルパイプの全長に対する管口からスタックの中心までの距離の比率)を20%から30%が最も効果が高いとの報告がなされている<sup>2)</sup>。

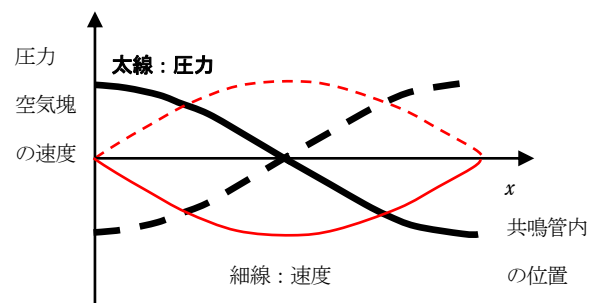


図2. 共鳴管熱交換器内の圧力と空気塊の速度の変化  
(共鳴管の両側を定常波の節としている)

先行研究は数多くあり、例えば Jang Woo Kim によ

図2は、Jang Woo Kim の「Thermal Management for Low-Power Handheld Electric Devices using Thermoacoustics and Forced Convection by Vibrating Cantilever Beam」による。

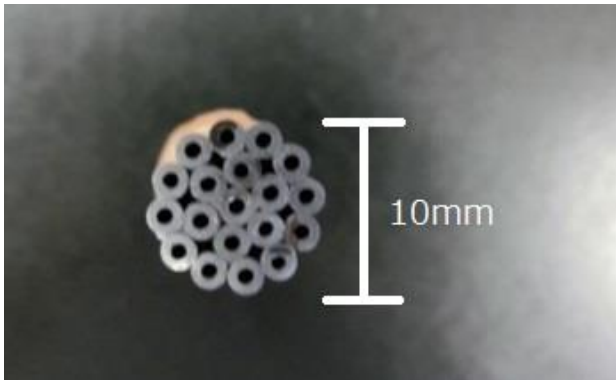


図3. スタック断面の写真  
(ステンレスパイプの外径2mm、内径1mm)

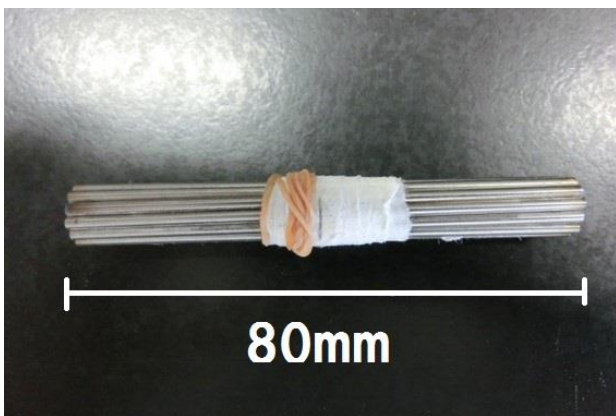


図4. スタック横の写真

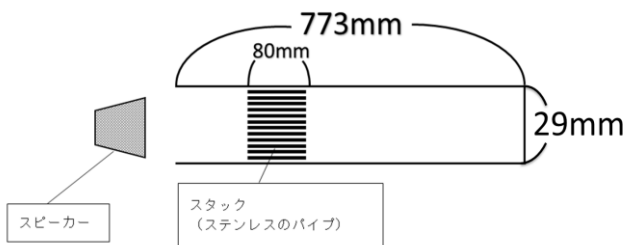


図5. アクリルパイプ熱交換器管内

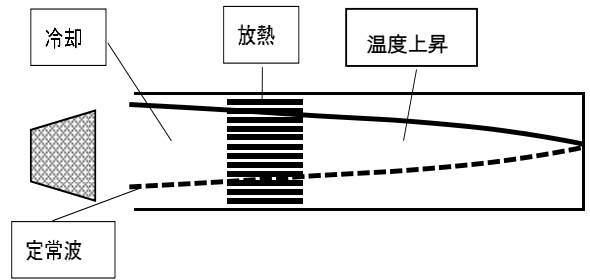


図6. スタック内の音波の様子(当初の仮説)

当初私たちは、熱音響冷却装置内のスタックの位置と温度変化を比較することにした。そして、スタックの位置が温度変化に及ぼす影響について調べた。

## 2. 研究内容

<当初の仮説>

音波を発生させるとアクリルパイプ内でスタックのスピーカー側(腹の側)の温度が下がり、スタックのスピーカーと反対側(節の側)の温度が上がるであろう。

<実験方法>

開口端からスタックの中心までの距離を、アクリルパイプ全体の長さの20%、30%にそれぞれ合わせてスタックのスピーカー側、スタックの中心、スタックのスピーカーと反対側の温度を測定する。

### 実験1. スタック位置 20%の場合

#### 実験の準備

実験1では20%の場合、スピーカーからスタックの中心までの長さを154mm、スタックの中心からアクリルパイプの端までの長さを619mm、アクリルパイプの全長を773mmとしスタックの長さは80mmになる。

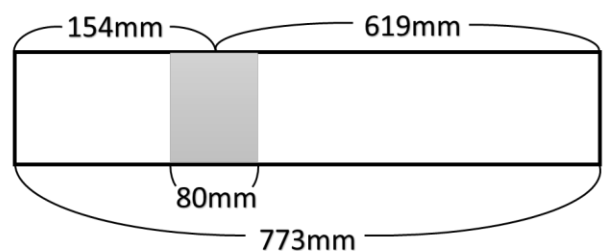


図7. 実験1の寸法

スタックの両端とスタックの中心に温度計を当てて図8、図9のようにし、音波を発生させる。

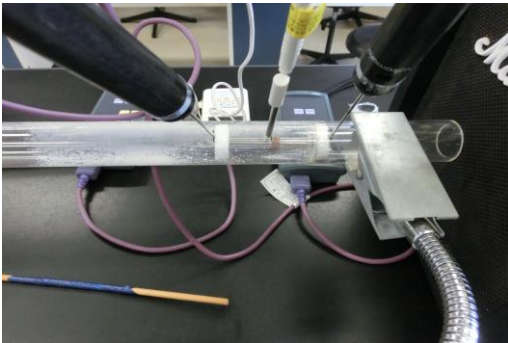


図8. スタックと温度計



図9. 実験全体の様子

#### 実験方法

- ① スタックの中心の位置をパイプ全体の長さの20%で測定する。
- ② 100Hzの音波を入射させる。
- ③ 1分ごとにそれぞれの温度計に表示されている温度を記録する。
- ④ ①から③の操作は温度が3分間変化しなくなるまで行う。完全に数値が定まることは無かったので、変動が0.3°C以下になった段階で記録を終了した。

#### <結果>

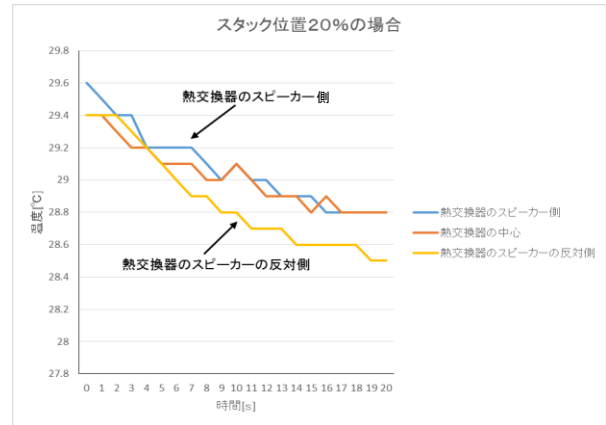


図10. スタック位置 20%の温度変化

スタックのスピーカー側では0.8°C下がり、スタックの中心では0.6°C下がり、スタックのスピーカーの反対側では0.9°C下がった。よって、冷却することが確認できた。およそ20分で安定した。

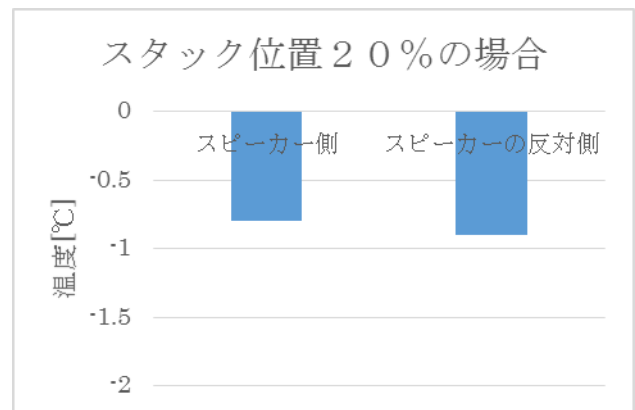


図11. スタック位置 20%の温度冷却の比較

#### 実験2. スタック位置 30%の場合

##### 実験の準備

実験2ではスタックの中心をパイプ全体の長さの30%の位置に設置した。各部のスケールはスピーカーからスタックの中心までの長さは231mm、スタックの中心からアクリルパイプの端までの長さは542mm、アクリルパイプの全長は773mmでスタックの長さは80mmである。

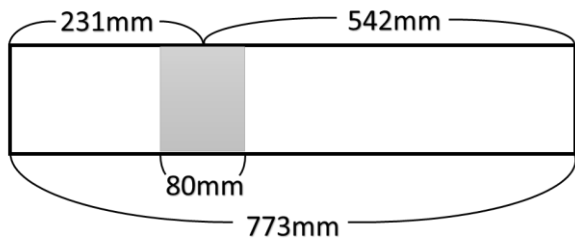


図 12. 実験 2 に用いた器具の寸法

### 実験方法

実験 1 と同様の実験を行い、スタックの中心をパイプ全体の長さの 30%の位置に設置して測定する。

### <結果>

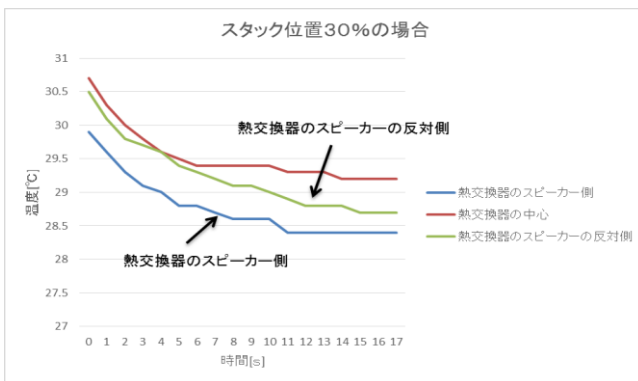


図 13. スタック位置 30%での温度変化

スタックのスピーカー側では 1.5°C 下がり、スタックの中心では 1.5°C 下がり、スタックのスピーカーの反対側では 1.8°C 下がった。よって、冷却することが確認できた。およそ 20 分で安定した。

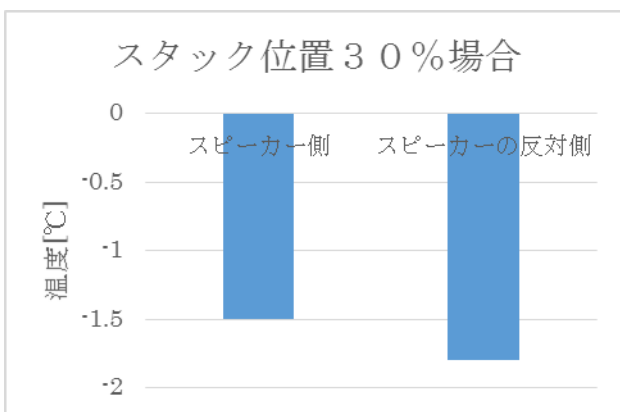


図 14. スタック位置 30%での温度変化の比較

### <考察>

実験 1 では、冷却現象は確認できたが仮説に反し、スタックのスピーカーの反対側の温度も下がった。また、スタックの中心部の温度も下がった。実験 2 では、冷却現象は確認できたが、実験 1 と同様に仮説に反して、スタックのスピーカーと反対側の温度も下がった。

当初の仮説では、スタックのスピーカー側の温度が下がり、スタックのスピーカーの反対側(節の側)の温度が上がると考えたが、実際の実験ではスタックのスピーカー側(腹の側)、スタックのスピーカーの反対側の温度が両方とも下がった。当初の仮説はスタックのスピーカー側の温度が下がり、反対側の温度が上がる現象が現れるはずだったが、今回は確認できなかった。

スタックの両端の温度が下がったため、スタックの中心部の温度の測定も行った。その結果、スタックの両端の温度が下がり、スタックの中心部の温度が上がり、そこから放熱が行われると考えたが、実験 1 と実験 2 からはスタックの中心部の温度も若干 (0.5°C 程度) 下がった。

### 3. 新たな仮説とモデル

次に、スタックの両側で温度が下がるモデル (仮説) を考えた。ステンレスパイプで作製したスタックと、空気塊との相互作用について、音波は縦波なので、左右に振動し、断熱圧縮で発生した熱をスタックの壁面に伝えて放出する。そして、断熱膨張をしてスタックの両サイドの温度が次第に下がる。

熱と音波の間ではお互いにエネルギーを受け渡しが行われる。そのような作用を用いて冷却を行う。まず、音波をアクリルパイプに入射させ、管内の気体をスタックに通す。スタックの中で、気体は断熱圧縮され体積が小さくなる。そして、体積が小さくなった気体は音波により再びスタックの外に移動して気体が断熱膨張し温度が下がるためスタック近傍でアクリルパイプ内の温度が下がると考えた。

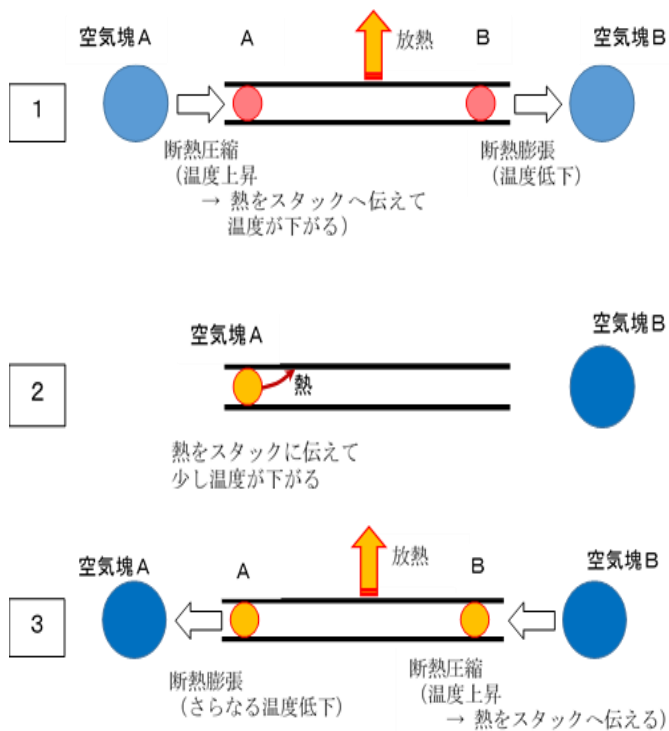


図 15. 熱音響冷却のモデル(仮説)

#### 4. 結論

熱音響システムでは温度が下がる箇所と、温度が上がる箇所ができるが、今回の実験では下がる箇所は確認できたが、温度が上がる箇所は確認できなかった。

また、今後の課題としては、スタックの中心の位置を数%ずつ変えて測定してより細かいスタックの位置による温度変化の関係性について調べること、熱交換によって移動した熱がどこから放熱されたのかについて調べるといことも挙げられる。

#### 5. 参考文献

1) Jang Woo Kim

Thermal Management for Low-Power Handheld Electric Devices using Thermoacoustics and Forced Convection by Vibrating Cantilever Beam

2) 畠沢政保, 瀬尾宜時 熱音響音波発生機の性能に及ぼすスタック位置の影響

・HISAKA 熱交換器事業本部 スタック

<http://www.hisaka.co.jp/cgi-bin/phe/catalog/index.cgi?d=1>

・鷲見孝雄ほか ダブルループ型熱音響冷凍機の製作

・立花一志ほか 大型熱音響冷凍機の開発

・井上龍夫 パルス管冷凍機の研究開発の現状

・中井大貴ほか ループ管型熱音響冷凍機における冷却側スタックの形状及び設置位置が冷却性能に及ぼす影響

・A Study of Thermoacoustic Refrigeration System  
Pranav Mahamuni

・矢崎太一 細管内音波伝播と熱音響現象

・畠沢政保ほか 突合わせ形熱音響音波発生機の特性

・富永昭 熱音響現象の理解とその応用

・堀田浩平ほか 熱音響冷却システムの小型化に関する検討

・経田僚昭 枝管付きループ管型熱音響冷凍機の高性能化に関する研究

・富永昭 熱音響工学の基礎

・坂本眞一ほか 熱音響現象を用いた新しい冷却システム

・上田祐樹 進行波音波を用いた共鳴管冷凍機

・西川宏明ほか ループ管方式による熱音響冷却システムの実用化に向けた検討—薄膜設置が管内音場および熱運送に与える影響—

・石野貴廣 ループ管方式による熱音響冷却システムの実用化に向けた検討—分岐路による管内音場の制御—

・吉田秀穂 細管内の音圧と粒子速度の位相差が熱音響冷却特性に与える影響について

・辻良行 強制駆動時の熱音響現象における冷却特性とスタックの流路半径の関係について

・飛原英治 共鳴波管型冷凍機

・是永定美ほか 熱音響音波発生機の流れとその応用(熱音響発電)

・是永定美ほか 熱音響音波発生器内の流れ

# メートルブリッジを用いた黒鉛複合体の電気抵抗の温度係数測定 Measurement of temperature coefficient of graphite composite using meter bridge

越智龍之介 河端佑一郎 小林廉 塩田理史  
指導者：仲達修一

## 要 旨

本研究ではエナメル銅線と炭素の温度係数  $\alpha$  を求める実験を行った。より正確な値を出すために電流計と電圧計の内部抵抗を考慮せずに済むホイートストーンブリッジ回路を用いた。その結果温度係数が正か負かの判断を確実に得ることができた。

## Abstract

In this study, an experiment was performed to determine the temperature coefficient  $\alpha$  of enameled copper wire and carbon. A wheatstone bridge circuit, which does not need to consider internal resistance of ammeter and voltmeter, was used in order to obtain more accurate value of  $\alpha$ . As a result, we could certainly determine whether the temperature coefficient is positive or negative.

キーワード：メートルブリッジ、温度係数、抵抗、黒鉛

## 1. 序論

物質の抵抗は、物質中の原子の振動により電子の流れが阻害されることによって生じる。このため、温度上昇によって物質中の原子の振動は大きくなるため、抵抗は上昇する。半導体は温度上昇によって電流の担い手となるキャリアの数が増えるので抵抗は小さくなる。これは温度上昇によってキャリアとホール平衡定数が上昇することによって生じる。しかし炭素は半導体ではないが温度上昇によって抵抗が下がると知ったので、これを確認した。

この実験において電流計と電圧計の内部抵抗の影響を少なくするため、ホイートストーンブリッジ回路を用いることとした。

検流計に流れる電流が0の時に、図1のように電流を  $(I_1, I_2, I_3, I_x)$  と、起電力を  $E$  と、抵抗を  $(R_1, R_2, R_3, R_x)$  と設定する。

$R_1 I_1 = R_2 I_2, R_3 I_3 = R_x I_x$  なので、

$R_1 : R_3 = R_2 : R_x$  となる。

メートルブリッジはこの原理を応用したもので、図2のように図1の  $R_2, R_x$  を電導性のある棒に変えて、図2の接点  $c$  が自由に動くようにする。棒状の物体の抵抗は物体自体の長さに比例するので、長さの比がそのまま抵抗の比となる。図2のようにメートルブリッジの端点2つを  $d, e$  として、 $cd$  間の長さを  $CD$ 、 $ce$  間の長さを  $CE$  とすると、

$R_1 : R_3 = CD : CE$

となる。この計算式を用いて実験を行った。

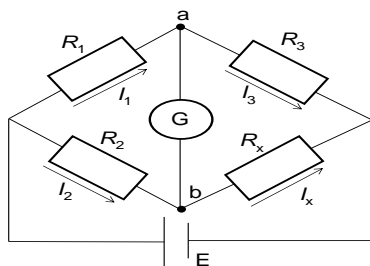


図 1

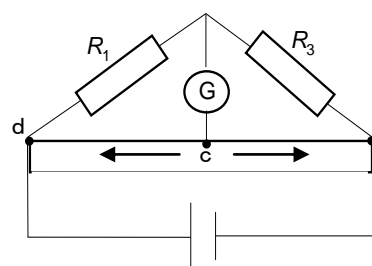


図 2



## 2. 研究内容

### 予備実験

今回使用した温度計の測定値のばらつきを調べるため、同機種温度計3つを同時に冷水、常温水、熱湯の中に入れてすべてを比較した。

結果はどの温度のときも±2.0°C程度のばらつきがあった。

### 実験1. エナメル銅線の電気抵抗測定

#### <目的>

ホイートストンブリッジの原理を利用したメートルブリッジを使うことにより、抵抗比で抵抗が求められるので、電流計や電圧計の内部抵抗による誤差を少なくできる。

#### <実験器具>

メートルブリッジ、温度計、検流計、電流計、電源装置、銅線（太さ0.35[mm]、長さ10[m]）、ビーカー



図3 実験器具

#### <実験方法>

メートルブリッジを用い図2のように装置を作成し、実験を行った。

メートルブリッジにおいて図2のcの部分にはスイッチの役割をしている針がついている。この針をメートルブリッジの抵抗に接触させ、検流計が0.0 μAを示した時の温度と長さの比を記録する。検流計に過剰な電流が流れないようにするため、最初は電流計で0.0mAになるおおよその位置を探し、そこでより正確性の高い検流計に取り換えた。温度を変えて複数回繰り返してデータを得た。

抵抗率ρの公式は0.0°Cのときの抵抗率ρ<sub>0</sub>を用いて、

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (\alpha: \text{温度係数}, t: \text{温度} [^\circ\text{C}])$$

また、抵抗は抵抗率ρを用いて、

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (l: \text{抵抗の長さ} [m], S: \text{断面積} [m^2])$$

よって同じ材料を用いれば、0°Cのときの抵抗をR<sub>0</sub>として、

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$

となる。

これより、温度係数αは温度と抵抗のグラフの切片がR<sub>0</sub>、傾きがR<sub>0</sub>αなので、グラフの傾きを切片で割ってαを求める。この傾きと切片 Microsoft Excelの回帰分析を用いた。R<sub>0</sub>の誤差は標準誤差で求め、αの誤差は商の誤差伝搬を利用して求めた。

抵抗の温度変化は水と食塩を用いた。高温時は熱湯を用い、低温時は氷水を用いた。氷水のみでは0°C付近の実験を行うことができなかったため、氷水の入ったビーカーを凝固点降下した約-10°Cの食塩水で外側から冷やして0°C付近の状態を作った。抵抗の温度は水の温度が安定してから3分経ったとき、水の温度と抵抗の温度が等しいとみなして測定を開始した。

本研究では全て1.0Vを印加して実験を行った。

#### <結果>

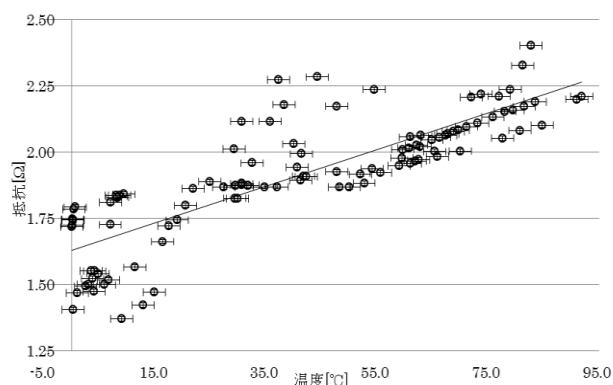


図4 エナメル銅線の電気抵抗測定

表1 エナメル銅線の電気抵抗測定

抵抗 R <sub>0</sub> [Ω]	1.63 ± 0.02
温度係数 α [1/K]	(4.2 ± 0.5) × 10 <sup>-3</sup>

#### <考察>

今回の実験では誤差となりうる抵抗などを減らすためホイートストンブリッジを用いて抵抗の比でエナメル銅線の抵抗値を求め、それを利用しαの値を求めた。

その結果±約10%の誤差が生じた。

予備実験において温度計の誤差が±2.0°Cと分か

りその誤差が結果に与える影響をエラーバーとして図4に載せたが、結果がその範囲を動いても近似直線には乗らない。つまり温度計の誤差よりも測定した抵抗の大きさのばらつきの影響が多いということが分かった。

## 実験2. 鉛筆の芯の電気抵抗測定

### <目的>

炭素には温度が上がると抵抗が下がる性質があることを知った。そこで炭素が含まれている鉛筆の芯で上記の性質があるのかを調べた。

### <実験器具>

メートルブリッジ、温度計、検流計、電流計、電源装置、鉛筆の芯(長さ126mm, 半径1mm, HB)、鍋

### <実験方法>

鉛筆を鉛筆の芯だけになるようにカッターナイフで削る。その後は実験1と同じである。ただし鉛筆の芯はビーカーに入らなかったため温度調節には鍋を用いた。

### <結果>

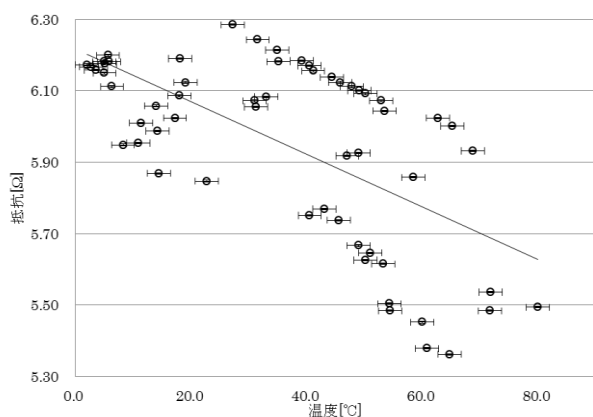


図5 鉛筆の芯の電気抵抗測定

表2 鉛筆の芯の電気抵抗測定

抵抗 $R_0$ [Ω]	$6.22 \pm 0.01$
温度係数 $\alpha$ [1/K]	$(-1.2 \pm 0.2) \times 10^{-3}$

### <考察>

実験1同様に温度計の誤差が測定に影響しているとは判断できない。

また炭素単体の温度係数の文献値  $-5 \times 10^{-4}/K$  に比べて結果が2倍となった。この実験で用いた鉛筆の芯における炭素含有率は68%だった。このことから炭素含有率が温度係数に影響すると考えられる。

## 3. 今後の課題

2つの実験において温度による誤差よりも抵抗の誤差の方が大きい。原因の一つとして、装置内の接触抵抗が考えられるが、今回の実験のみでは原因を特定することはできなかった。誤差の原因究明とさらなる精度上昇が今後の課題である。

また実験2の考察にあるように炭素の含有率が鉛筆の芯の温度係数と関係があると考えたので、純度の高い炭素棒を用いて関係式を求めることも今後の課題である。

## 4. 参考文献

- 鉛筆の黒鉛と粘土の比率  
<http://sharpen-memo.suzuna.org/article/92639613.html>
- Table of Resistivity  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/rstiv.html>
- 株式会社トンボ鉛筆  
<http://www.tombow.com/>
- 半導体の電気伝導度  
<http://www.sakai.zaq.ne.jp/duain107/SemicondRT/SemicondRT1.htm>

# 不規則銀河 Arp147 の見かけの等級の差(B-V)の分布を可視化する

## Making the distribution about Arp147 by apparent magnitude (B-V)

野崎信吾 中村友哉 藤原直音 伊藤友 小原悠里

指導者：筒井愛知

### 要 旨

一般的に連続スペクトルの青が強い恒星は比較的若い、赤色のスペクトルが強い恒星は比較的年老いた恒星ばかりでなく比較的若い恒星も含まれるといわれている。私たちは銀河同士の大規模な衝突が起きた Arp147 での領域ごとの見かけの等級の差(B-V)の分布を調べた。MIKULSKI ARCHIVE FOR SPACE TELESCOPES<sup>1)</sup> で公表されている Arp147 の画像データ全体で、領域ごとの見かけの等級の差(B-V)を可視化することで、画像内で比較的新しい恒星が集まる領域を視覚的に表すことに成功した。可視光での見かけの等級の差(B-V)の分布図を作成することができた。

Generally, it is said that a star with a strong blue spectrum is relatively young, but a star with a strong red spectrum includes not only comparatively old stars but relatively young stars. We examined the distribution of the apparent difference in grade (B-V) for each region at Arp 147 where a massive collision between galaxies occurred. By visualizing the apparent grading difference (B-V) for each region in the image data of Arp 147 published in MIKULSKI ARCHIVE FOR SPACE TELESCOPES 1), it visually represents the region where relatively new stars gather in the image succeeded. I could create a distribution map of the apparent grade difference (B-V) with visible light.

キーワード：可視光データ、見かけの等級、色等級図

### 1. 序論

Bフィルターでの見かけの等級からVフィルターでの見かけの等級を引いた差（以下、見かけの等級差(B-V)とする。）によって銀河内の恒星を測光することで年齢を推測することが可能であることから、私たちは恒星ではなく銀河を領域ごとに分割し、測光することで銀河内での恒星の年齢の偏りを表せるのではないかと考えた。目的銀河を Arp147 に設定した理由は、これまでの研究で画像内の比較的古い恒星が集まる領域と比較的新しい恒星が集まる領域が明瞭にわかっているためである<sup>2)</sup>。Arp147 とは、2つの銀河が衝突して形成された銀河である。明確な構造を持たず、渦巻銀河や楕円銀河等の分類に入らない不規則銀河でもある。

データを反映し加工したものである。先行研究<sup>3)</sup>でのX線を用いた測定の結果では、向かって右側の環状の銀河は左側の銀河と衝突したときに、衝突の影響で新たに恒星が生誕している領域であるとわかっている。一般的に赤色のスペクトルが強い（スペクトル型のM型に近い）恒星（以後赤い星と記す）は比較的年老いているとは限らないが、連続スペクトルの青が強い（O型に近い）恒星（以後青い星と記す）には若い恒星が多い<sup>4)</sup>。このことは恒星の寿命から理解することができる。青い恒星は赤い恒星に比べて、表面温度が高い。そのため、より活発に核融合をしているので、寿命が短いと考えられている。

図1は可視光の画像データにX線を用いた観測の



図1 Arp147の画像<sup>5)</sup>

スペクトルの表し方として、今回は B(blue) フィルターの画像から V (visual:黄と緑の中間色) フィルターの画像での見かけの等級 (地球から直接見た場合の等級) の値を引いたものを使用する。

フィルターとは、ある特定の波長だけをレンズに透過させるものである。青色のスペクトルが強い恒星は、青色の光を通す B フィルターの画像の等級よりも、V フィルターの画像の等級が大きく (暗い)、B-V は小さい値になるはずである。反対に赤色のスペクトルが強い恒星は B-V の値が大きくなる。※等級が大きいほど暗い。

今回使用した測光データには見かけの等級の差 (B-V) を用いる。見かけの等級の差であれば、他の天体画像データと比べることはできなくとも画像内で比較することはできる。見かけの等級の差を求めるには、ポグソンの式のみを用いることによって簡単に求められる。そこで、2つの異なるフィルターのカウント値<sup>\*1</sup>を用いて見かけの等級の「差」を次に示すポグソンの式<sup>6)</sup> から求めた。

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10}(L_1 / L_2)$$

ポグソンの式の  $m$  は見かけの等級、 $L$  はカウント値である。この式ではピクセル<sup>\*2</sup>内の光量であるカウント値が2種類わかるだけで、見かけの等級の差 (B-V) を求めることができる。

## 2. 研究内容

<実験 1 >

### 用語

フィルター：各フィルターによってそれぞれ異なる特定の波長だけをレンズに透過させるもの、フィルターごとの等級を調べる

ことで、天体の特徴を知ることができる。図2のジョンソンフィルターは、研究者・ジョンソンが作成した、現在の U, V, B フィルターを正確に測定するためのフィルターである。

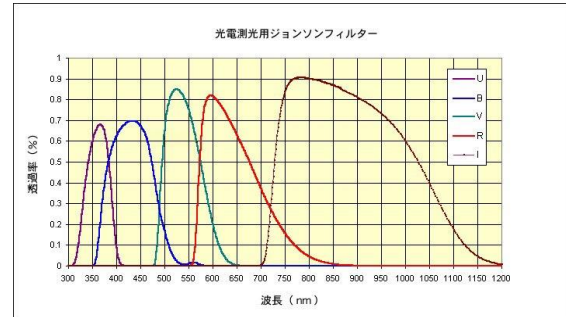


図2 ジョンソンフィルター<sup>7)</sup>

\* 1 カウント値：ピクセル毎に蓄積した電子を CCD 内にあるコンデンサを通して生じた電圧を量としてあらわしたもの。

\* 2 ピクセル：コンピュータで画像を扱うときの、色情報 (色調や階調) を持つ最小単位

### 方法

本研究では、ハッブル宇宙望遠鏡が観測したアーカイブデータ (MIKULSKI ARCHIVE FOR SPACE TELESCOPES) を使用する。

#### 1. 解析準備

- (1) 目的天体は、不規則銀河の中からアープ・アトラス<sup>8)</sup> (特異銀河を収録した天体カタログ) を参考にして Arp147 に決定した。
- (2) アーカイブデータから Arp147 の画像データを入手し、解析に使用した (図3)。

#### 2. 画像解析方法

画像データ解析には画像解析ソフト「Makali`i」(マカリ)<sup>9)</sup>を使用する。これは Makali`i で指定した領域のカウント値を求めるためのものである。今回はアーカイブデータを解析したため、観測データを利用するときに行う、ノイズなどを取り除く一次処理は行わなかった。

- (1) 縦 10 ピクセル、横 10 ピクセルの計 100 ピクセルの正方形を 1 単位として分割し、縦 650 ピクセル、横 650 ピクセルの計 422500 ピクセル (4225 単位) の天体画像を矩形測光する。
- (2) B フィルター、V フィルターそれぞれを天体

画像での座標を合わせ(1)の測光を行う。ただし、このときBフィルターとVフィルターの画像の座標が1ピクセル単位で合致しているという保証はない。そこで、Bフィルター・Vフィルターの画像に映る縦横2ピクセルの光源を比較することにより、誤差2ピクセルの範囲で画像での座標が合致していることを確認した。(カウント値の算出)

- (3) すべてのデータを Microsoft® Excel® に出力する
- (4) 天体画像の縦軸を 1 ~ 65、横軸を A ~ BM として、4225 単位の区画に分割する。
- (5) それぞれの単位について見かけの等級の差 (B-V) を求めるために

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10}(L_1 / L_2)$$

のポグソンの式を利用して、 $L_1$  に B フィルターのカウント値、 $L_2$  に V フィルターのカウント値を代入して、 $m_1 - m_2$  すなわち B-V を求める。

- (6) すべてのデータを用いて、(1) で説明した単位ごとの見かけの等級の差 (B-V) を求め、等高線グラフ (図 5、図 6、図 7) に表す

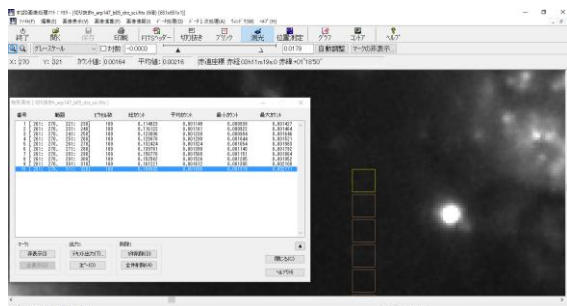


図3 コンピュータ画面での Makali'i の矩形測光の様子

<目標天体>

- Arp147 ( IC298 )

R. A. (赤経) : 03h 11m 18.90s

Dec. (赤緯) : +01° 18' 53.0"

<仮説>

不規則銀河 Arp147 は、銀河同士が衝突して生成したものと考えられている。その銀河を実験 1 の方法で説明した単位ごとに測光し、見かけの等級の差 (B-V) をグラフ化することで、見かけの等級の差 (B-V) を視覚化することができる。そのことによって

恒星の年齢の偏りを視覚化することができると考えた。

<結果>

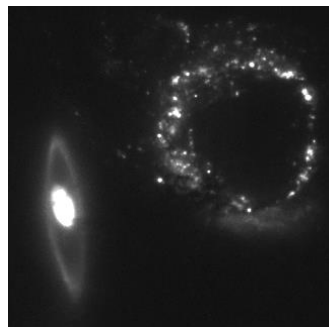


図4 Arp147 の V フィルター画像

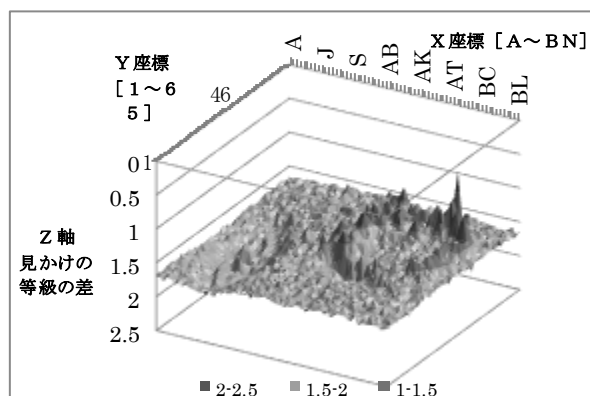


図5 Arp147 の見かけの等級の差 (B-V)

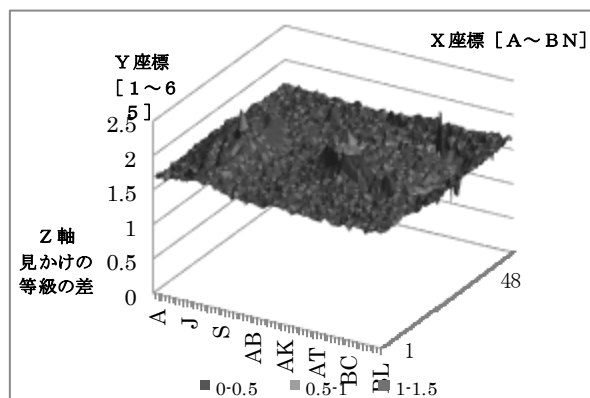


図6 Arp147 の見かけの等級の差 (B-V) (Z 軸を反転させたもの)

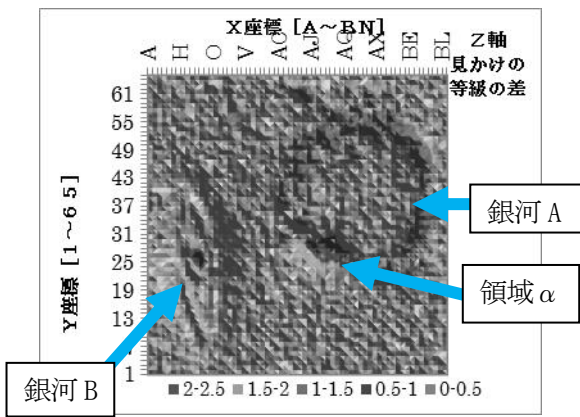


図7 Arp147の見かけの等級の差(B-V)の分布図

本研究ではデータを座標上に表すために、等高線グラフを用いることにした。そして見かけの等級の差(B-V)をわかりやすくするためにZ軸を反転させたグラフも作成した。グラフを見やすくするために2方向からみた等高線グラフを作成した。

若い恒星ほど見かけの等級の差(B-V)が小さいといえるが、老いた恒星ほど見かけの等級の差(B-V)が大きいとは必ずしも限らない。

#### <考察>

図4, 7を比較してみると、図7の凹凸面と図4の光源がほぼ一致していることから、天体画像のカウント値を見かけの等級の差(B-V)に変換しグラフ化することができたと考えられる。図7の画像うち、右側の銀河をA、左側の銀河をBとおく。銀河Aの左下でB-Vの値が大きい領域を領域αとする。また、図4で銀河Aの右上を見てみるとB-Vの値が局地的に大きい領域を領域βとする。図7から銀河Aの領域αを除いた領域の見かけの等級の差(B-V)は大きな光源のない領域の見かけの等級の差(B-V)に比べて小さく、銀河Bと銀河Aの領域αの見かけの等級の差(B-V)は大きな光源のない領域の見かけの等級の差(B-V)に比べて大きいことがわかる。そのため、銀河Aの領域α以外の領域が画像内で比較的若いということがわかる。

#### <実験2>

##### ・目的

図7の結果、銀河Bと領域αの色指数が同じ範囲に分布していることから、我々は領域αが銀河Bの一部で、領域αと銀河Bを構成している主要な恒星

が、同年代の同じ性質の恒星であると考えた。また銀河Aの領域α以外の領域を構成している主要な恒星と領域αと銀河Bを構成している主要な恒星が年代、性質という観点において違うものであると考えた。領域αの色等級図(HR図)を作成する必要があると考えた。そのために、Arp147の銀河A・Bについて、色指数の大きい領域上位10%と、色指数の小さい領域下位10%を色等級図に表す。これは、目立った光源のない領域を色等級図(HR図)から除くためである。

#### 1. 解析準備

(1)アーカイブデータからArp 147のIフィルターの画像データを入手し、解析に使用した。

#### 2. 画像解析方法

- (1)画像データ内で比較星を1つ定める。
- (2)I, B, Vフィルターで比較星を矩形測光する。  
なおIフィルターは濃い赤色を透すものである
- (3)(2)で得たデータをMicrosoft® Excel®に出力する。
- (4)ALADIN<sup>10)</sup>に記載されている比較星の絶対等級、NASAのArp 147までの距離のデータを基に、式
$$M = m - 5(1 - \log_{10} d)$$
( $M$ :絶対等級、 $m$ :見かけの等級、 $d$ :距離)を使用して、距離を代入してIフィルターでの比較星の見かけの等級を求めると。
- (5)(2)で求めた値を基に、実験1で使用したポグソンの式を使用して見かけの等級の差(B-I)を求めると。
- (6)(5)の式に(4)で求めた値を代入してBフィルターでの比較星の見かけの等級を求めると。
- (7)同様に、Vフィルターの比較星の見かけの等級を求めると。
- (8)B, Vフィルターそれぞれ(2)(6)(7)で求めた値を基に実験1で定めた各領域の見かけの等級をポグソンの式を使用し求めると。
- (9)(8)で求めた値をもとに、B, Vフィルターでの各領域の絶対等級を視等級を求めると。
- (10)(9)で求めた値を基に色指数(Bフィルターの絶

対等級・Vフィルターの絶対等級)を求める。

(11)縦軸をVフィルターの絶対等級、横軸を色指数として、色等級図(HR図)を作成する。

<結果>

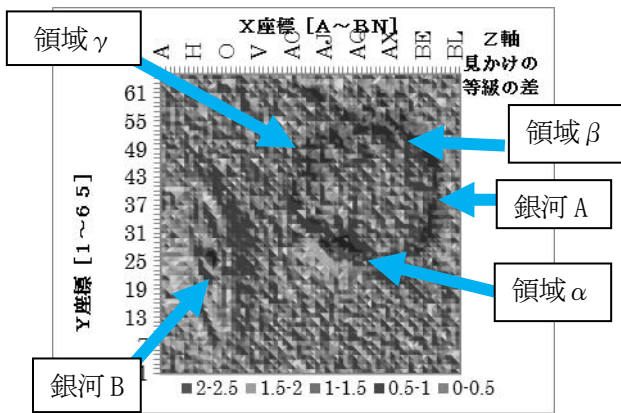


図8 Arp147の見かけの等級の差(B-V)の分布図

図6で、銀河Aの右上を見てみるとB-Vの値が局地的に大きい領域を領域βとする。また、図7で銀河Aの左上の薄っすらとガスがあるように見える、環状部の外側の部分を領域γとする。本実験では、色指数上位10%の領域を表した色等級図(図9)と、色指数下位10%の領域を表した色等級図(図10)を作成した。図9に含まれる領域は、銀河Bの中央部、銀河Aの領域α、銀河Aの領域βであった。また、図10に含まれる領域は、銀河Aの環状部、特に銀河Aの領域βの周辺であり、銀河Bには見られなかった。

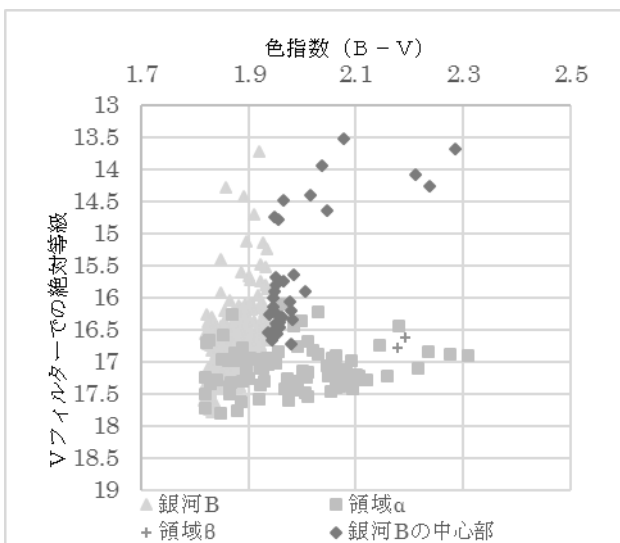


図9 Arp147の領域ごとの色等級図(色指数上位10%)

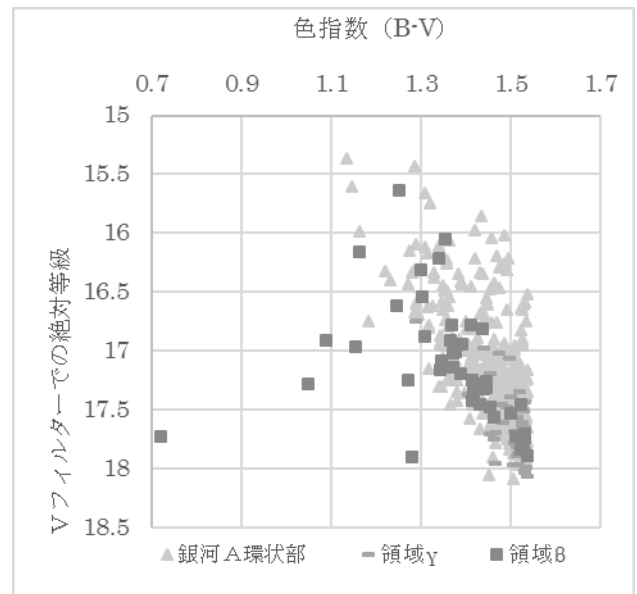


図10 Arp147の領域ごとの色等級図(色指数下位10%)

<考察>

図9から、色指数上位10%のうち、銀河Bの領域は色指数1.9~2.0の範囲に集中している。そして、Vフィルターでの絶対等級は13.5~17等級と大きく広がっており、幅がある。また、銀河Aの領域αはVフィルターでの絶対等級が16~17.5等級と狭い範囲に集中している。一方で、色指数は大きく広がっており幅がある。銀河Aの領域βは、ほんの一部が色指数上位10%に含まれており、Vフィルターでの絶対等級は領域αのものと同じ範囲に含まれることがわかる。図10から、領域βは他の領域と比べて、全体的に色指数が小さい領域が多い。全体としては等級には幅があるものの、多くが色指数1.1~1.5の範囲に集中している。また、領域γは銀河A環状部の領域と色等級図の上で、似た位置に集中していることがわかる。領域βについては、領域の中心側の一部は色指数が非常に大きく、その周りには色指数が非常に小さくなっており、色指数が大きいものと小さいもの両方が混在していることがわかった。このことから、銀河Bと領域αには異なる性質、年代の恒星が存在する可能性が高いと考えられる。領域γと銀河A環状部には似た性質、年代の恒星が存在する可能性が高いと考えられる。

### 3. 結論

以上のことから、私たちは不規則銀河 Arp147 の可視光画像データを区画ごとに区切って測光することで、方法で説明した単位ごとの見かけの等級の差(B-V)の分布を視覚化することができた。グラフから見かけの等級の差(B-V)の分布をみると、銀河Aの領域 $\alpha$ を除く領域で見かけの等級の差(B-V)が小さくなり、銀河Aの領域 $\alpha$ ・銀河Bの見かけの等級の差(B-V)が大きくなることがわかった。このことから、銀河Aの環状部のうち、左下の領域を除く領域が衝突の影響で新たに恒星が誕生している領域だと考えられる。また実験2では、Arp147の色等級図を作成し、さらに色指数上位10%、色指数下位10%の範囲でグラフを作成した。そうすることで、領域 $\beta$ は色指数が非常に大きい領域と非常に小さい領域両方を含めていることがわかった。また、領域 $\alpha$ と銀河Bの中心部の領域が色等級図の上では明らかに異なる。このことから銀河Aと銀河Bの衝突が原因で、領域 $\alpha$ と銀河Bの中心部は性質が似ているという可能性は低いと考えられる。一方で領域 $\gamma$ は銀河A環状部の領域と色等級図の上で似ていることから、性質が似ている可能性が高いと考えられる。

Arp147以外の不規則銀河でも本研究と同じようにグラフ化することでさらに銀河が衝突したときの様子が詳しくわかってくると考える。

### 4. 今後の課題

赤い恒星には、比較的年老いた恒星ばかりでなく比較的若い恒星も含まれるため、見かけの等級の差(B-V)のみを用いて、領域内を構成している主な赤い恒星が比較的老いている恒星か比較的若い恒星かの判断をすることはできない。

そのため改善策としては

- 1) 赤い領域が、比較的年老いた恒星の多い領域か、比較的若い恒星の多い領域かどうかを判別する方法を考える。
- 2) 領域を使った色等級図(HR図)が領域を構成している主な恒星の年齢を判断できる材料になるか検証する必要がある。

また、今回領域 $\beta$ の色等級図を作成したところ、色指数が非常に小さい領域の中に色指数の非常に大

きい領域が混ざっていることが分かった。さらに先行研究<sup>3)</sup>で明らかにされているブラックホールの位置と領域 $\beta$ が近いことから、今後の方針としてブラックホールとの関連を考慮して解析していく必要がある。

### 5. 謝辞

本研究を行うにあたり、様々なご指導をいただきました井原市美恒星天文台の前野将太技師に深謝いたします。

### 6. 参考文献

- 1) MIKULSKI ARCHIVE FOR SPACE TELESCOPES  
(本研究で用いたアーカイブデータ)  
<https://archive.stsci.edu/prepds/merggal/arp147.html>
- 2) A model for ring galaxy: Arp147-like systems  
(Published Apr. 26 1992, RICHARD A. GERBER ら)  
<http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1992ApJ...399L..51G/L000051.000.html>
- 3) ULTRALUMINOUS X-RAY SOURCES IN ARP 147  
(Published Sep. 9 2010, S. RAPPAPORT ら)  
(Arp147の先行研究)  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/721/2/1348;jsessionid=B87E8E60FAC2CD A86E3F27C7918683CC.c2.iopscience.cld.iop.org>
- 4) 地学 数研出版 P. 315~317
- 5) Arp 147: Giant Ring of Black Holes  
[CHANDRA X-RAY OBSERVATORY NASA's flagship mission for X-ray astronomy  
(図1、Arp147の画像)]  
<http://chandra.harvard.edu/photo/2011/arp147/>
- 6) 恒星の明るさと等級 (ポグソンの式)  
<http://paofits.nao.ac.jp/Mk1Documents/tutorial/M45/M45TG.pdf>
- 7) 図3、ジョンソンフィルター  
(SBIG JAPAN 国際光器 株式会社マゼラン)  
[http://www.sbig-japan.com/UBVRI/ubvri\\_m.html](http://www.sbig-japan.com/UBVRI/ubvri_m.html)
- 8) アープ・アトラス  
[https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Arp/Arp\\_contents.html](https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Arp/Arp_contents.html)
- 9) Makali`I (国立天文台)



<https://makalii.mtk.nao.ac.jp/manual/ja/>

10) Aladin Sky Atlas

<http://aladin.u-strasbg.fr/>

11) HR図

前掲書 5) P. 322~327

- Color index

[https://en.wikipedia.org/wiki/Color\\_index](https://en.wikipedia.org/wiki/Color_index)

- SIMBAD

[http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?](http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=Arp148&submit=SIMBAD+search)

[Ident=Arp148&submit=SIMBAD+search](http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=Arp148&submit=SIMBAD+search)

- Astronomy Picture of the Day

(Arp147 についての知識)

<http://apod.nasa.gov/apod/ap081104.html>

- SWIFT observations of the Arp 147 ring galaxy system ( Oct 21 2011, L. Fogarty )

<http://mnras.oxfordjournals.org/content/417/>

[2/835.short](http://mnras.oxfordjournals.org/content/417/2/835.short)