

Title	X-ray Study of the Cygnus Loop Supernova Remnant
Author(s)	内田, 裕之
Citation	大阪大学, 2009, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/2238">https://hdl.handle.net/11094/2238</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	うちだ ひろゆき 内田 裕之
博士の専攻分野の名称	博士(理学)
学位記番号	第 23443 号
学位授与年月日	平成21年12月16日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 理学研究科宇宙地球科学専攻
学位論文名	X-ray Study of the Cygnus Loop Supernova Remnant (X線による超新星残骸はくちょう座ループの研究)
論文審査委員	(主査) 教授 常深 博 (副査) 教授 松田 准一 教授 芝井 広 准教授 森 浩二(宮崎大学) 准教授 林田 清

### 論文内容の要旨

Cygnus Loop (はくちょう座ループ) は、全天で最も大きく X 線で明るい超新星残骸 (SNR) のひとつである。我々は 2002 年から 2008 年までの間に 2 つの X 線観測衛星、XMM-Newton とすざくを用いて、この天体の計 41 (=9+32) 点の観測を行った。スペクトル解析の結果、一般に Cygnus Loop からの X 線放射は温度の異なる 2 つの成分の重ね合わせで説明できることを示した。Cygnus Loop のような古い SNR (年齢約 10,000 年) の場合、衝撃波が掃き集めた星間物質 (ISM) が温度の低いシェルを形成する一方、その内部では反射波が爆発噴出物 (イジェクタ) を加熱し、双方がプラズマ化して X 線で輝いている。よって Cygnus Loop の X 線スペクトルの低温成分と高温成分は、それぞれ ISM とイジェクタからの放射に対応していると解釈できる。そこでスペクトル解析を行えば、低温成分からはこの SNR の周辺環境についての情報を得ることができ、高温成分からは爆発前の星内部の状態を推測することができる。

我々は最初に Blowout と呼ばれる南西領域に着目した。この領域にはシェルが破れたような構造があることが知られており、この方向の星間物質の密度が極端に低いことが予想されていた。一方電波の観測からは、南西に別の SNR が付随している可能性が指摘され、これが一見 Blowout として見えているのではないかという反論があった。そこで Blowout の素性を明らかにするために XMM を用いてこの領域のスペクトル解析を行い、高温成分の重元素分布は Cygnus Loop の他の領域の分布と滑らかに繋がること、一方で低温成分の寄与が非常に小さいことを示した。結果として、この領域の ISM は他に比べて薄く爆発前に形成された空洞壁自体に破れが存在し、これが Blowout の原因であることを明らかにした。このように、Cygnus Loop の周辺密度は決して一様ではないと考えられる。我々はすざくを用いた北部のシェルの観測から、外縁部の限られた領域の重元素組成比だけが Cygnus Loop 周辺の ISM の組成比に近い値を示すことを発見した。これは他のシェルの一部でも観測されていたが、いずれもシェルが爆発中心から突出した部分でこの傾向が見られる。このことから、このような領域では空洞壁が薄く、進行してきた衝撃波が空洞壁を突き破って外の ISM と真っ先に相互作用していると結論付けた。さらに我々は、視線方向のシェル構造を探るために現在持っている全データをを用いて低温成分のフラックスを計算した。この方法で各領域のシェルの厚みを調べ、Cygnus Loop のシェルの三次元構造を明らかにした。この結果、北西にシェルの薄い領域が存在し、視線方向にも Blowout 領域のようなシェルの破れがあることを突き止めた。

また我々は、Cygnus Loop の X 線スペクトル高温成分の解析を行い、イジェクタ起源の重元素組成比を決定し

た。これをもとに各元素の分布図を作成した結果、鉄や珪素は明らかな中心集中の傾向が見られるのに対してマグネシウムなどのより軽い元素は周辺に多く分布していることを示した。これは爆発前の星の元素分布の階層構造(たまねぎ構造)を反映していると考えられる。さらに鉄や珪素の分布中心が Cygnus Loop の幾何学的中心から南に約 25 分ずれていることを発見した。この観測事実から、元の星は非等方的に重元素をまき散らしたと結論し、これによって非対称爆発の証拠を観測から直接的に示した。さらに 41 観測全てのデータを加算することで、これまでこの天体から検出されたことのなかったアルゴンの輝線を新たに発見した。これらの重元素の観測量を様々な爆発モデルによる理論値と比較することで、Cygnus Loop の起源が約 12 太陽質量の星の重力崩壊型爆発である可能性が高いと結論付けた。

本論文ではこれらの研究結果を踏まえ、SNR 研究の近年の課題である、古い SNR からの陽子加速の観測的証拠の提示、超新星爆発の非対称性について論じている。また、Cygnus Loop 研究における残された問題と今後の展望についても述べる。

## 論文審査の結果の要旨

Cygnus Loop (はくちょう座ループ) は、全天で最も大きく X 線で明るい超新星残骸 (SNR) のひとつで、2002 年から 2008 年までに X 線観測衛星、XMM-Newton とすざくを用いて、41 (=9+32) 点の観測を行った。スペクトル解析の結果、Cygnus Loop からの X 線放射は温度の異なる 2 つの成分の重ね合わせで説明できることを示した。Cygnus Loop のような古い SNR (年齢約 10,000 年) の場合、衝撃波が掃き集めた星間物質 (ISM) が温度の低いシェルを形成する一方、その内部では反射波が爆発噴出物 (イジェクタ) を加熱し、双方がプラズマ化して X 線で輝いている。よって Cygnus Loop の X 線スペクトルの低温成分と高温成分は、それぞれ ISM とイジェクタからの放射に対応していると解釈できる。そこでスペクトル解析を行えば、低温成分からはこの SNR の周辺環境についての情報を得ることができ、高温成分からは爆発前の星内部の状態を推測することができる。

最初に、Blowout と呼ばれる南西領域で、シェルが破れたような構造に着目した。その強度から、この方向の星間物質の密度が極端に低いことが予想された。一方電波の観測からは、南西に別の SNR が付随している可能性が指摘され、これが一見 Blowout として見えているのではないかという反論があった。そこで Blowout の素性を明らかにするために XMM を用いてこの領域のスペクトル解析を行い、高温成分の重元素分布は Cygnus Loop の他の領域の分布と滑らかに繋がること、一方で低温成分の寄与が非常に小さいことを示した。結果として、この領域の ISM は他に比べて薄く爆発前に形成された空洞壁自体に破れが存在し、これが Blowout の原因であることを明らかにした。このように、Cygnus Loop の周辺密度は決して一様ではないと考えられる。次に、すざくを用いた北部のシェルの観測から、外縁部の限られた領域の重元素組成比だけが Cygnus Loop 周辺の ISM の組成比に近い値を示すことを発見した。これは他のシェルの一部でも観測されていたが、いずれもシェルが爆発中心から突出した部分でこの傾向が見られる。このことから、このような領域では空洞壁が薄く、進行してきた衝撃波が空洞壁を突き破って外の ISM と真っ先に相互作用していることがわかった。さらに、現在利用できる全データを用いて低温成分のフラックスを計算し、視線方向のシェル構造を調べた。この方法で各領域のシェルの厚みを調べ、Cygnus Loop のシェルの三次元構造を明らかにした。この結果、北西にシェルの薄い領域が存在し、視線方向にも Blowout 領域のようなシェルの破れがあることを突き止めた。

また、Cygnus Loop の X 線スペクトル高温成分の解析を行い、イジェクタ起源の重元素組成比を決定した。これをもとに各元素の分布図を作成した結果、鉄や珪素は明らかな中心集中の傾向が見られるのに対してマグネシウムなどのより軽い元素は周辺に多く分布していることを明らかにした。これは爆発前の星の元素分布の階層構造(たまねぎ構造)を反映していると考えられる。さらに鉄や珪素の分布中心が Cygnus Loop の幾何学的中心から南に約 25 分ずれていることを発見した。この観測事実から、元の星は非等方的に重元素をまき散らしたと結論し、これによって非対称爆発の証拠を観測から直接的に示した。さらに 41 観測全てのデータを加算することで、これまでこの天体から検出されたことのなかったアルゴンの輝線を新たに発見した。これらの重元素の観測量を様々な爆発モデルによる理論値と比較することで、Cygnus Loop の起源が約 12 太陽質量の星の重力崩壊型爆発である可能性が高いと結論付けた。

本論文ではこれらの研究結果を踏まえ、SNR 研究の近年の課題である、古い SNR からの陽子加速の観測的証拠

の提示、超新星爆発の非対称性について論じている。また、Cygnus Loop 研究における残された問題と今後の展望についても明確に記述している。

よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分価値あるものと認める。