

(続紙 1)

京都大学	博 士（理 学）	氏名	早川 尚志
論文題目	The Extreme Space Weather Events in the 18-20th Centuries: Reconstructions from Contemporary Observational Reports and East Asian Historical Documents (18-20 世紀の極端宇宙天気現象：同時代観測記録と東アジア歴史文献に基づく復元)		
(論文内容の要旨)			
太陽はその長期変動に加え、地球近傍の宇宙空間に短期的な影響を及ぼすことがあり、このような現象を「宇宙天気現象」と称する。このような現象の中で観測史上最大とされるのは1859年に発生したキャリントン・イベントと考えられ、このような大規模の極端現象は、加速度的に科学技術インフラへの依存を深める現代社会にとって大きな脅威であると考えられている。一方、大規模現象は発生頻度が低く、その検討にあたって、既存の科学データベースの時間幅は必ずしも十分ではない。 宇宙天気現象の規模は、現代地球観測では地磁気変動量（Dst指数）で測られるが、オーロラの低緯度境界の広がり方とも相関があることが知られている。既知のオーロラの観測自体も二千年以上の歴史があることから、このようなオーロラ記録を古地磁気モデルと併用することで、過去の宇宙天気現象の定量評価をより長期間に延伸できると考えられる。 そこで、本研究では18世紀以降の極端宇宙天気現象について、欧米の観測記録や東アジアの歴史文献に記録された同時代のオーロラ記録を分析し、その低緯度境界を復元して当該の宇宙天気現象の規模の評価を行う。加えて、当該現象時の太陽表面について同時代の黒点スケッチを検討することで、同時代の太陽活動を検討し、原因となった活動領域を同定する。 第2章では、このような歴史文献の科学的分析の試金石として、キャリントン・イベント周辺での東アジアの同時代記録を分析する。この結果、当時の東アジアでのオーロラ観測範囲は磁気緯度にして23°までと復元され、当時の他地域での観測結果と調和的な結果が得られた。 第3-4章では「特異的なオーロラ」が報告された1872年2月と1909年9月の極端宇宙天気現象について、主に東アジアのオーロラの低緯度境界の復元と当時の地磁気観測との比較を行った。その結果、1872年2月にはオーロラの低緯度境界が24.2°まで広がり、ボンベイでも不完全ながら極端な地磁気擾乱が記録されたことを明らかにした。また、1909年9月にはオーロラの低緯度境界が31.6°まで広がったことを明らかにし、当時の地磁気観測のDst復元値（-595 nT）との比較からこのような低緯度オーロラが電信障害共々、磁気嵐の主相に起きていたことを明らかにした。また同時代の太陽面観測と地磁気観測の分析から、この宇宙天気現象を起こしたフレアがX10以上であった可能性を指摘した。 第5章と第6章では1770年9月と1730年2月の宇宙天気現象を検討し、当時のオーロラ可視範囲を各々18.8°、25.8°と復元し、後者についてはその低緯度境界を34.2°と推定した。同時代の黒点スケッチから1770年9月には太陽半球面積の0.6%にも達する巨大黒点が同定され、当時1週間近く続いた低緯度オーロラの起源が明らかになった。 このような結果を踏まえ、第7-8章ではキャリントン・イベント時のオーロラの低緯度境界を同時代観測記録に基づいて復元し、他の極端現象との規模の比較を行った。この結果、キャリントン・イベントはあくまで1872年や1921年の宇宙天気現象と比肩する観測史上最大級の宇宙天気現象であって、比類ない史上最大の宇宙天気現象ではないらしいことが明らかになった。			

本論は最後にYokoyama et al. (1998) の経験則を当てはめ、1770, 1730, 1582年の極端宇宙天気現象を磁力計データ付きの歴史文献中の宇宙天気現象との比較の俎上に載せた。このような研究成果から、本論は体系的な地磁気計測の開始以前の極端宇宙天気現象の規模の比較についての新地平を開拓し、より長期スパンで歴史的な宇宙天気現象の比較の可能性を提示した。

(論文審査の結果の要旨)

太陽活動は地球環境と地球上の生命の維持に必要不可欠だが、その一方、突発的な太陽面爆発及びその結果生じる各種擾乱は大規模な地磁気擾乱を引き起こすことがある。その内特に大規模なものは停電、通信障害、人工衛星の故障などを引き起こすことから、高度に発達した科学インフラに依拠する現代社会にとって喫緊の脅威であり、太陽地球物理学をはじめとした各種研究分野において緊急性の高い研究課題として注目を集めている。

このような宇宙天気現象は規模と頻度に一定のべき乗則が成立することが知られている。そのため、極端宇宙天気現象の頻度に対し、現代の科学データベースのカバーする60-100年間程度は必ずしも十分であるとは言えない。実際、観測史上最大とされる1859年9月のキャリントン・イベントに匹敵するような極端宇宙天気現象は現代科学観測に基づくデータベースには捉えられていない。

その一方、近年の研究では、観測史上最大規模のフレアを規模ではるかに上回るスーパーフレアが太陽型星の観測から太陽で起きうる可能性も指摘されている。過去の年輪や氷床コア中の放射性同位体比の研究からも、実際に過去に太陽が観測史上最大規模を遥かに超える極端宇宙天気現象を引き起こしたと思われる痕跡が発見されている。

これに対し、申請者等のグループは既存のデータベースを越えて、過去の同時代観測文献、ひいては歴史文献に記録されたオーロラ、地磁気計測、黒点などの記録を検証することで、過去の宇宙天気現象の検討の時間幅を延伸し、その各々について特にオーロラの低緯度境界に基づいて定量評価を行うとともに、同時代の太陽表面の様子を明らかにした。

申請者はまず第2章でキャリントン・イベントをテストケースとして、同時代の歴史文献による復元研究の実現可能性を検証し、第3-4章で地磁気観測と比較可能な極端宇宙天気現象の、第5-6章で地磁気観測以前の歴史文献中の極端宇宙天気現象の復元研究を行なった。加えて、第7-8章では、このような復元成果を踏まえて、キャリントン・イベントの規模評価と他の極端現象との比較検討を行い、観測史上最大とされるキャリントン・イベントに相当するような極端宇宙天気現象が少なくとも1872年、1921年、1770年にも発生していたことを定量的に明らかにした。また、その際の太陽表面の様子を同時代の黒点スケッチの検討などから明らかにすることで、このような極端宇宙天気現象の起源も明らかにした。

本研究の成果はこれまでのオーロラ低緯度境界と磁気嵐規模の議論を既存の観測幅（地磁気変動量： $Dst \sim -589$ nT）から極端宇宙天気現象（ $Dst \sim -900$ nT）まで実証的に延伸し、その当時の太陽表面の様子を未公刊史料も駆使して明らかにした点で、極端宇宙天気現象をはじめとする太陽地球系物理学の進歩に大きく寄与するものである。極端宇宙天気現象が現代社会にもたらしうる脅威の大きさを考えれば、申請者の研究成果は天文学的観点のみならず、その社会的応用にあっても極めて重要性と緊急性の高い研究であると言える。

このような研究は今後、近代観測の側ではさらなる地磁気観測記録を精査することで、局地的な変動の影響を取り除いた磁気嵐規模の復元が期待される。また、より古い時代については、2000年以上の観測記録のある東アジアの歴史文献を精査による、より古い時代の極端宇宙天気現象を同定・定量評価が期待される。その際、東アジアの歴史文献の記述を近代観測との比較の俎上に載せるために、17世紀以降欧米の科学観測記録と重複する事例の比較検討を通し、記述の質を評価していくことで、過去の記述をより正確かつ定量的に理解・評価できるものと考えられる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和1年11月8日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降