

氏名	Wijepala Mudiyansele Tikiri Bandara Wijepala		
学位の種類	博士（理学）		
学位記番号	総博甲第 157 号		
学位授与年月日	令和 4 年 9 月 1 6 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項		
文部科学省報告番号	甲第 761 号		
専攻名	総合理工学専攻		
学位論文題目	Early Iron Production in Sri Lanka: An Archaeological and Geochemical Approach to the <i>Yodhawewa</i> Metallurgical Settlement (スリランカにおける初期の鉄の製造：ヨダウェワ冶金居留地に対する考古学的・地球化学的アプローチ)		
論文審査委員	主査	島根大学教授	酒井 哲弥
		島根大学教授	入月 俊明
		島根大学准教授	林 広樹
		島根大学教授	半田 真
		島根大学名誉教授	石賀 裕明

## 論文内容の要旨

Sri Lanka is a South Asian country where ancient metalwork was done using unique methods adapting to the prevailing natural conditions. Very few scientific studies of metallurgy have been conducted in Sri Lanka, and until 2018, no such research was carried out in the northern part of the country. The *Yodhawewa* site is located in the Mannar District of Northern Province and the northern plains of Sri Lanka. Physically, the artifacts pool reflected that it was a historic metallurgical site. This thesis aims to provide multi-disciplinary interpretations of this newly discovered metallurgical site based on the artifacts and nature-facts collected from the *Yodhawewa* research in 2018.

The *Yodhawewa* metallurgical site is close to *Mannar* (12 km), the main port city of *Anuradhapura*, the first and foremost kingdom of Sri Lanka, for over 1500 years. After the historical and geomorphological overview of the study area, research was conducted on a field survey, and vertical excavation at two localities was carried out in March – April 2018. The total survey area was 201,600 m<sup>2</sup> based on the canal and the right bank starting from the *Yodhawewa* reservoir. The collected artifacts (n=14,017) were classified based on the source material, and selected artifacts and nature-facts were used for multi-disciplinary analysis.

The research analyses were mainly based on archaeology and geochemistry disciplines. The constant relative probability was considered in interpreting the archaeological context based on slag, crucible fragments, and furnace factors. The slag had the highest artifact density (n=6,814 of 48.5 kg) on the premises, significantly contributing to the definition of a metallurgical site. Slags represented several production conditions through physical factors such as color configuration, high or low vascularity, oxidation, and glassy or non-glassy

texture. According to the archaeological analysis, two types of crucibles were identified; elongated tube-shaped crucibles from the second excavation (Ex-2) area were used to make crucible steel through the carburization process, and the other crucibles (found in the first excavation area) were used for copper works. The crucible-shaped (lower half-spherical typed) furnace (activated by the 'Bellow method') discovered in the *Yodhawewa* excavations was used for ancient crucible steel production.

Selected soil (n=33) and slag (n=46) samples were analyzed by X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) in the Earth Science laboratory of Shimane University. Through soil chemistry, the vertical soil distribution of the study area revealed that copper residues were abundantly mixed with the soil in the first excavation area (Profiles 1 and 2). The iron ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) average abundance of cultural layers (6.97 wt%) and natural layers (6.55 wt%) of the soil gives clues that the ore was not procured from the premises. However, analyzing the elements of cultural and natural layers through vertical soil profiles and correlations (against  $\text{TiO}_2$ ) evidence that metalworking affected Earth's soil chemistry. With the geochemical analysis of slags, heavy slags converted to HIS (*High Iron Slag*, content of 10-50 wt%), and light slags became LIS (*Low Iron Slag*, 1-10 wt%). The discrepancies in the elemental correlations between HIS and LIS against  $\text{TiO}_2$  suggest that they are not the result of the same metallurgical activities.

Significantly LIS shows luster and is transparent by observation of thin section through EPMA analysis. The colors of these samples are highly variable, ranging from light green to dark gray, some with hues of red. Further, some glassy slags have a flowing texture. Noteworthy is an occurrence of olivine in the slags with higher iron contents. Olivine crystals show various morphologies, namely, almost euhedral (0.5-1.0 mm in size), fletching, and acicular, which might be related to cooling mode. Electron probe microanalysis of olivine demonstrates that they are fayalite in composition. Fayalite in the slags is associated with glass, leucite and wüstite. The phase equilibrium examination of olivine and glass in the crystal showed that the crystallization temperature of olivine was estimated to be over 1100 °C. Leucite forms fine-scale intergrowth with fayalite, suggesting its crystallization at the fayalite-leucite eutectic temperature of ~1128 °C.

## 論文審査結果の要旨

申請者が提出した論文は、8章から構成される。第1章では、論文の目的、構成について述べられているほか、南アジアならびにスリランカでの冶金の歴史についてレビューがなされている。第2章ではスリランカの地理・歴史のレビュー、ヨダウェワ冶金居留地に隣接し、重要な港湾都市であるマナーとその歴史、マナーでの考古学的研究のレビューがなされている。それに引き続いて、調査地域であるヨダウェワ地域の紹介がされている。第3章においては、現地での考古学的な調査方法、得られた遺物の分析方法、現地で得られた土壌や鉄滓(スラグ)の地球化学的・岩石学的分析方法が述べられている。第4章では現地での調査結果が述べられている。(1) 土壌の層序、(2) 得られた遺物の組成、(3) 遺物から推定される相対年代、(4) 炉の破片や鉄滓の特徴等、が詳細に述べられている。第5章では地球化学的・岩石学的分析結果が述べられている。土壌や鉄滓の XRF 分析結果、鉄滓がカンラン石を包有すること、鉄滓の EPMA 分析結果がこの章で示されている。これらの成果に加え、炉の遺物の内部にあった木炭や、他のタイプの遺物と共に産出した木炭の炭素 14 年代測定結果が示されている。第6章では、考古学的な調査結果に基づく議論が展開されており、とくに下半球型のるつぼタイプの炉が復元されたことが述べられている。

これはスリランカにおいて初めての発見である。また Tuyere と呼ばれる、炉に酸素を送り込むパイプ状の遺物の存在から、ふいごを使っての冶金が行われていたと結論づけられた。第7章では、地球化学的・岩石学的分析結果に関する議論が展開されている。自然土壌と遺物を産出する土壌（文化土壌）との比較から、長期にわたる人間活動が土壌の化学組成に影響を与えていたことを指摘した。鉄滓中に見つかったカンラン石等の EPMA 分析結果に基づき、カンラン石等に対する鉱物学的検討がなされた。その結果として、炉内の温度は最低でも 1100 度であることを示した。すなわち、当時としては比較的高温の火力が製錬に用いられていたことが具体的に示された。第8章ではこの研究の成果がまとめられている。

この研究の成果として特筆すべきは、スリランカにおいて下半球型のるつぼタイプの炉が初めて報告された点、同時に産出した遺物から、ふいごを用いての冶金が行われていたことが復元された点である。同じタイプの炉はインドなどではすでにみつまっている。冶金に関する研究成果、他の遺物の情報、炭素 14 年代より明らかとなった冶金居留地の活動年代は、当時のスリランカと他国との関係を推定する上で重要な考古学的成果である。地球化学的・岩石学的な分析の成果として特筆すべきは、製錬の際の温度の情報が示された点である。伝統的な考古学的手法に、地球科学の手法を加えたこの研究により、スリランカでの鉄をめぐる歴史の理解を一步前進させる成果が得られた。

ここで示された研究成果は 3 編の査読付き論文として公表されているほか、1 編の国際雑誌に投稿中である。これらのことを総合的に判断すると、提出された論文は、博士の学位を授与するにふさわしい内容であると判断された。