



2022 年 2 月 14 日

報道機関 各位

千葉工業大学 地球学研究センター，惑星探査研究センター

ツタンカーメンの鉄剣の製造方法と起源の特定に成功

キーワード：ツタンカーメン、鉄隕石、ウィドマンシュテッテン構造、低温鍛造、ミタンニ由来

千葉工業大学地球学研究センター及び惑星探査研究センター所長の松井孝典率いる研究チームが、エジプト考古学博物館において、ポータブル蛍光 X 線分析装置^{*1}を用いてツタンカーメンの鉄剣の非破壊・非接触での化学分析を行った結果、鉄剣が低温鍛造により製造されたこと、エジプト国外から持ち込まれた可能性があることを明らかにしました。

この研究成果は、2 月 11 日付の米国科学雑誌「Meteoritics and Planetary Science」電子版に掲載されました。

製造方法解明の根拠：

- 1925 年の発掘当時と比べ、錆や腐食がほとんど進んでいない。
- 元素分析の結果、10-12 wt%のニッケルが含まれる。
- 所々黒い斑点状に見られるものは、隕石の包有物である硫化鉄である。
- ニッケルの二次元元素分布は、ウィドマンシュテッテン構造^{*2}を示している。
- ニッケル量、硫化鉄包有物及びウィドマンシュテッテン構造から、オクタヘドライトという種類の隕石が鉄剣の原材料である。
- ウィドマンシュテッテン構造及び硫化鉄包有物が保存されていることは、低温鍛造により製造されたことを示す。

起源推定の根拠：

- 金の柄に少量含まれるカルシウムは、装飾物を接着する漆喰に由来すると考えられる。
- エジプトでの漆喰の利用は、ツタンカーメン王の時代の 1000 年以上後から始まったとされる。
- ヒッタイト帝国（現トルコ付近）の隣国であるミタンニからツタンカーメンの祖父であるアメンホテプ III 世に鉄剣が送られたと記す古文書（アマルナレター）が存在する。
- 金の柄の組成は、ツタンカーメンの鉄剣がミタンニから持ち込まれた可能性を示唆する。

<概要>

古代オリエント世界で栄えたヒッタイト帝国（紀元前 1200～1400 年）は、鉄の製造技術を独占することで軍事的優勢を得たとされている。それ以前には、世界にはまだ鉄の製造技術はなかったと考えられている一方で、エジプトのツタンカーメン王（紀元前 1361 年～1352 年）の墓から、鉄剣が発見されたことは大きな謎であった。この謎を解き明かすため、2020 年 2 月 9 日及び 10 日に、千葉工業大学地球学研究センター及び惑星探査研究センター所長の松井孝典率いる研究チームがエジプト考古学博物館を訪れ、ツタンカーメンの棺から発見された鉄製の短剣の現地調査を行った。この鉄剣は紀元前 14 世紀に製作されたものであるが、棺の中で保管されていたため非常に保存状態が良く、錆などの劣化の影響が小さい（図 1a-c）。紀元前 14 世紀のエジプトには製鉄技術は存在しなかったため、当時の人々は宇宙から飛来した鉄隕石を加工し鉄剣を製造したと考えられていた。2016 年にイタリアの研究チームが鉄剣の調査を行い、鉄・ニッケル・コバルト濃度の測定から、鉄剣の材料が鉄隕石であることを確認したが、鉄隕石からの鉄剣の製造方法については明らかにされていなかった。

千葉工業大学の研究チームは、ポータブル蛍光 X 線分析装置^{※1}を用いて、非破壊・非接触で鉄剣の元素分布の分析を行った。本調査で得られた鉄剣の元素の存在度及び二次元分布の解析、鉄隕石のそれらと比較することにより、鉄剣の製造方法及び起源の特定に成功した。鉄剣の両面の組成分析から 10-12%のニッケルが含まれることがわかった。さらにニッケルの二次元元素分布から、鉄剣の表面にウィドマンシュテッテン構造^{※2}を示す組織が見られた（図 2-3）。ニッケル量とウィドマンシュテッテン構造から、鉄剣の原材料は、オクタヘドライトという種類の隕石であることが明らかとなった。所々黒い斑点状に分布する物質（図 1）は硫化鉄（FeS）であり、オクタヘドライト隕石中に一般的にみられる硫化鉄包有物由来と考えられる。ウィドマンシュテッテン構造及び硫化鉄包有物が保存されていることは、鉄剣が低温（950 度以下）での鍛造により製造されたことを示す。

金の柄部分の定量分析を行ったところ、少量（数 wt%）のカルシウムを含んでいた。これは、柄に装飾物を接着するために使われた漆喰に由来すると考えられる。硫黄が含まれないことから、焼石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ）ではないことがわかる。エジプトで漆喰が利用され始めたのは、ツタンカーメン王の時代の 1000 年以上後だとされているため、鉄剣はエジプト国外で製造された可能性がある。アマルナレターという古文書には、ヒッタイト帝国の隣国であるミタンニからツタンカーメンの祖父であるアメンホテプ III 世に送られた品々の中に、鉄剣が含まれると記録されている。金の柄に漆喰が用いられていることは、ツタンカーメンの鉄剣が、アメンホテプ III 世への贈答品としてミタンニからエジプトへと持ち込まれた可能性を支持する。

※ 本調査は在エジプト日本大使館、JICA のご協力をいただいた。

※1 蛍光 X 線分析では、X 線を分析対象試料に照射し、発生する蛍光 X 線の測定により試料中の元素濃度を決定する。本調査で用いた ELIO は、装置を精密 XY ステージ上で移動させることで、二次元の元素分布分析が可能である。

※2 ウィドマンシュテッテン構造とは、ニッケル濃度の低い鉱物であるカマサイトと、ニッケル濃度の高いテーナイトが交互に晶出することによって見られるオクタヘドライト特有の帯状模様である。

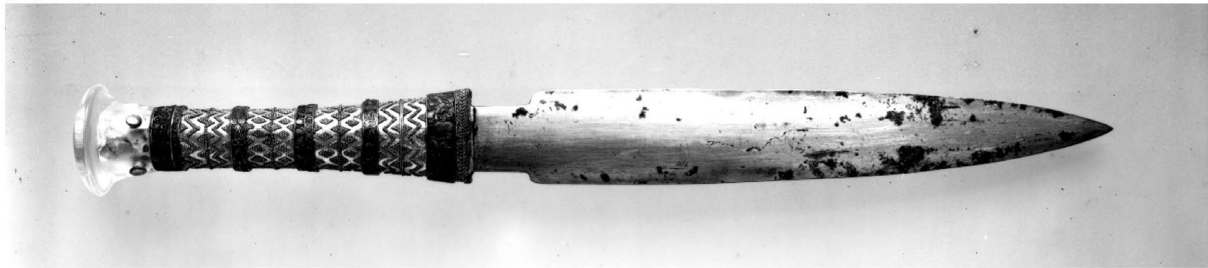
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



図 1 ツタンカーメンの鉄剣の画像。(a)(b) 2020 年 2 月に我々が鉄剣の両面を撮像したもの。(c) 1925 年発掘時に鉄剣の片面(a)を Harry Burton 氏が撮影したもの。オックスフォード大学グリフィス研究所の許可を得て複製した画像。(d) 鉄剣の面(a)の拡大写真。中央を横切るひび割れと鉄剣の長手方向に平行に走る細かい擦り傷。(e) 鉄剣の面(a)の拡大写真。所々斑点状に分布する黒い部分は硫化鉄。

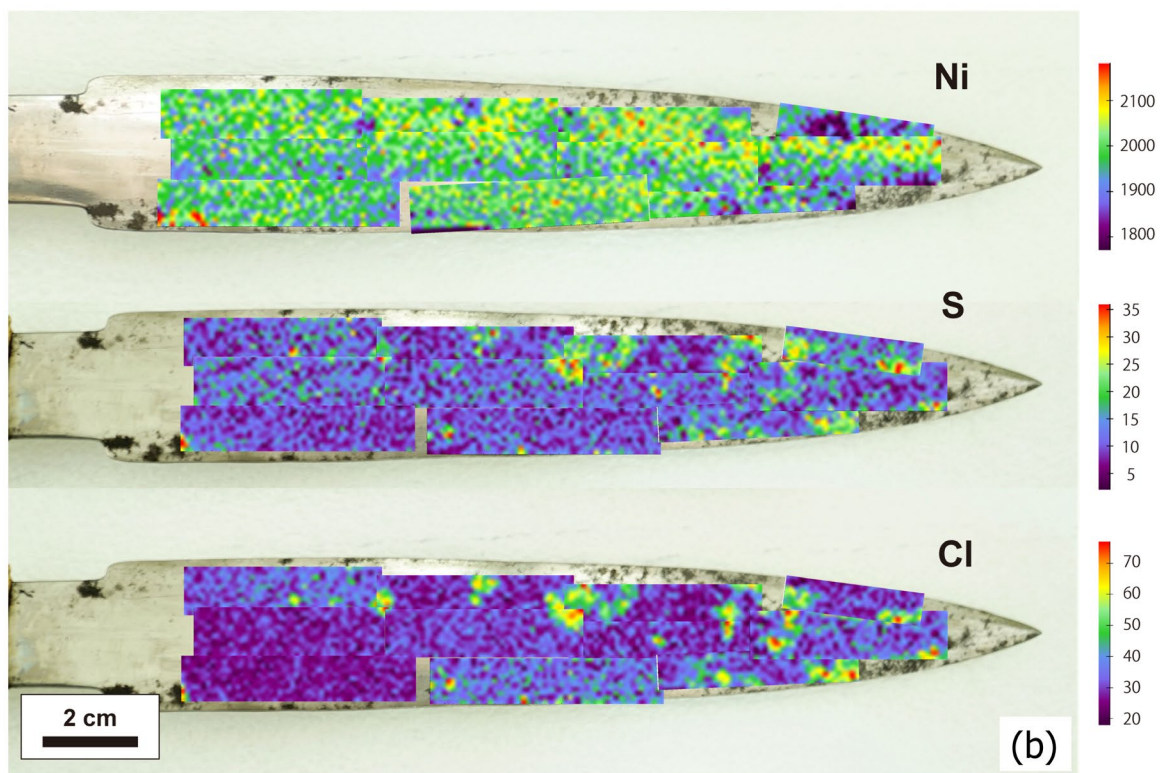
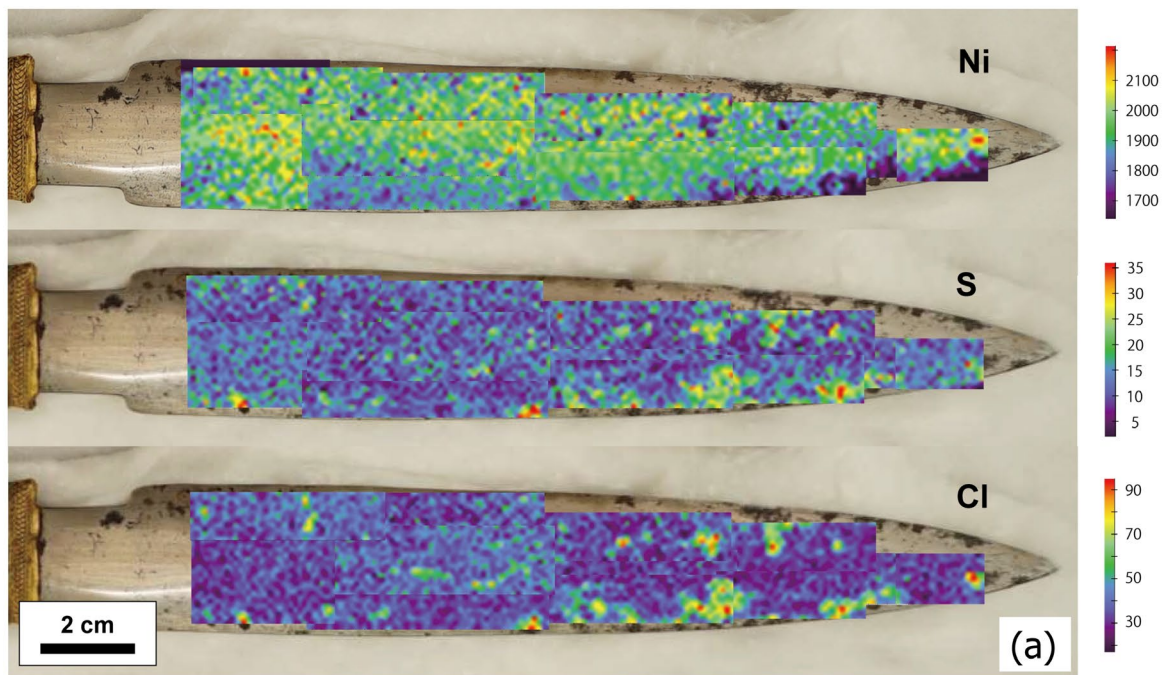


図2 鉄剣の両面のニッケル(Ni)、硫黄(S)、塩素(Cl)の元素分布。図1写真の黒い斑点状の部分が硫黄の濃度が高いことがわかる。これは、鉄隕石によく見られる硫化鉄包有物だと考えられる。

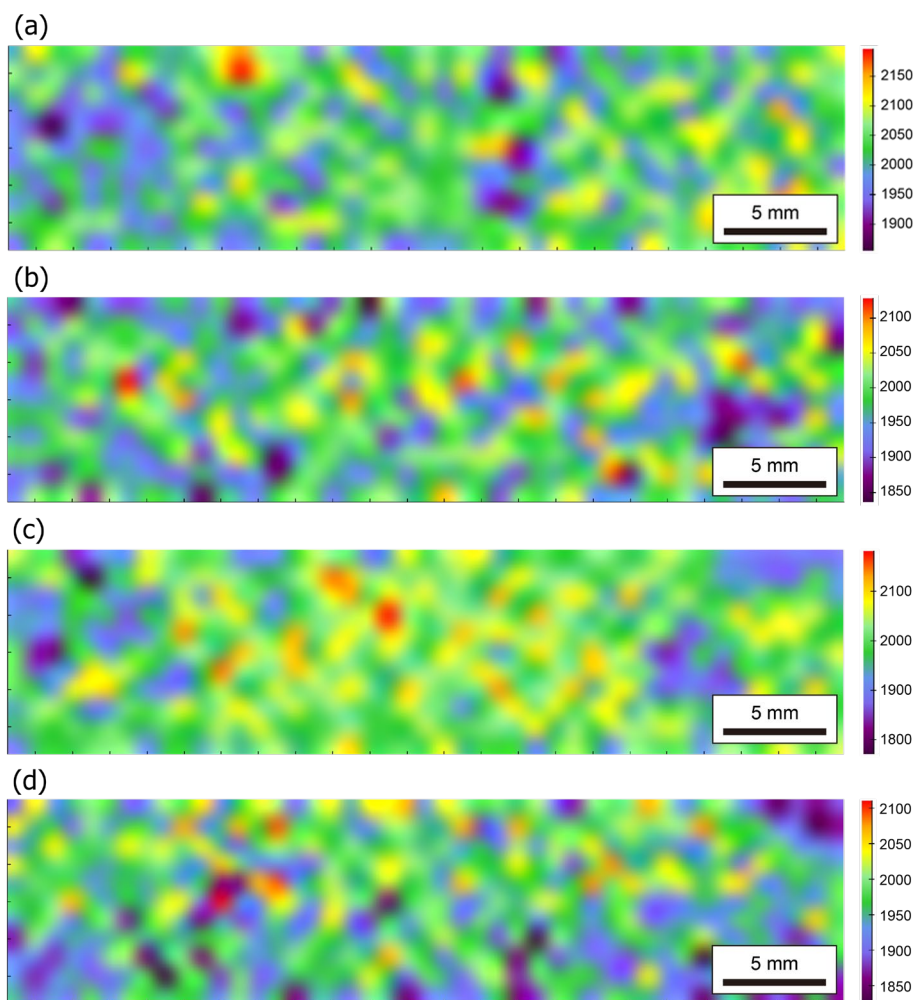


図 3 図 2 のニッケルの元素分布で、ウィドマンシュテッテン構造が顕著な箇所の拡大図。
 (a)(b)は図 2(a)面の一部、(c)(d)は図 2(b)面の一部。ニッケル濃度の高い部分と低い部分が
 格子状に分布している箇所が所々あり、ウィドマンシュテッテン構造の存在を示している。

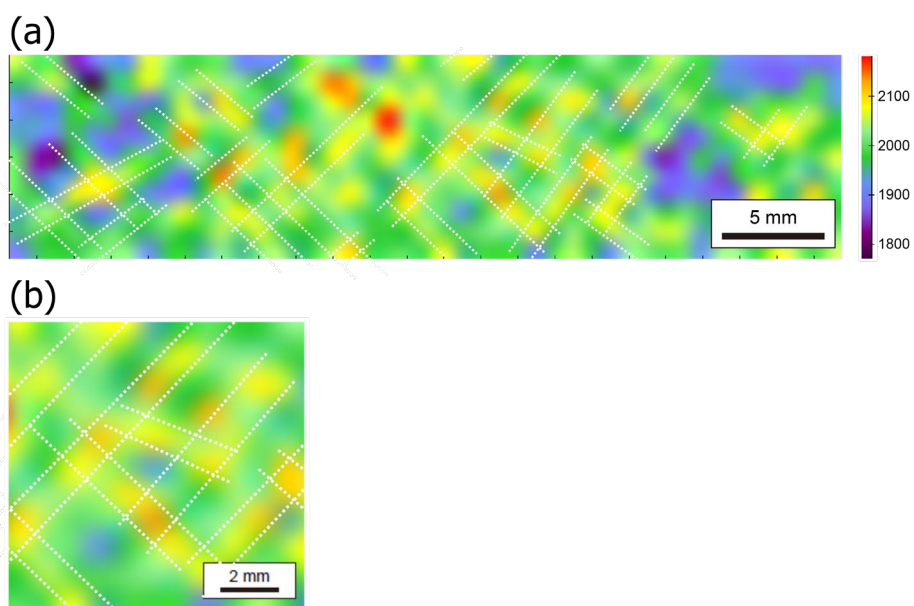


図 4 (a) 図 3(c)のニッケルの分布図に見られるウィドマンシュテッテン構造にガイド線を引いたもの。
 (b) 図(a)の中央部分の拡大図。

論文情報：

論文タイトル：The manufacture and origin of the Tutankhamen meteoritic iron dagger

著者名：Takafumi Matsui^{1,2}, Ryota Moriwaki¹, Eissa Zidan³, Tomoko Arai^{2*}

著者所属：

¹Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, Japan

²Institute for Geo-Cosmology, Chiba Institute of Technology, Japan

³Conservation Center, Grand Egyptian Museum, Egypt

掲載誌：Meteoritics and Planetary Science

DOI: 10.1111/maps.13787

掲載リンク：<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/maps.13787>

<お問い合わせ先>

【本研究内容に関する問い合わせ先】

千葉工業大学 惑星探査研究センター

荒井 朋子

TEL: 047-478-0320 FAX: 047-478-0372

E-mail: tomoko.arai@it-chiba.ac.jp

【取材・大学広報関連に関する問い合わせ先】

千葉工業大学 入試広報部

大橋・海老根

TEL: 047-478-0222 FAX: 047-478-3344

E-mail: ohhashi.keiko@it-chiba.ac.jp