

| | | | |
|--|---|----|---------------------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | Vitor Ribeiro de Sá |
| 論文題目 | 3D geostatistical modeling and integration of lithology, physical properties and element contents for characterizing metal deposit in a seafloor hydrothermal vent area (岩相, 物性, 元素濃度の3次元地球統計学的モデリングと統合による海底熱水噴出域での金属鉱床の特徴抽出) | | |
| <p>As the world's population rises, demand of metals increases and requires ore production from deposits on land and seafloor areas. The search for valuable metal resources in deep seafloor is both inevitable and vital to accommodate the constantly increasing demand. Seafloor hydrothermal fields account for important source of economically valuable mineral deposits termed as volcanogenic massive sulfide (VMS) types. These deposits generally contain largest amounts of base metals such as Cu, Pb, and Zn and precious metals such as Au and Ag in some cases. Many countries demand strongly these mineral resources. However, due to the difficulties in surveys and sampling of subseafloor and high cost of drilling operations, spatial distributions of metal contents below the seafloor have not yet been clarified well. This PhD dissertation aims at not only specifying target areas where the occurrence of these mineral resources is likely to be expected but also shedding light on the transport and deposit mechanisms of those polymetallic sulfide elements in offshore active hydrothermal areas. For this purpose, a combination of data-characterization methods, such as principal component analysis (PCA) and k-means clustering, and spatial modeling techniques using conditional geostatistical estimations and simulations is applied to whole-rock geochemical data obtained by inductively coupled plasma-quadruple mass spectrometry (ICP-MS) together with lithologic log data by onboard visual core descriptions and X-ray diffraction (XRD) analyses from the Hakurei Site in the middle Okinawa Trough back-arc basin during the cruise CK16-05 (Exp. 909) in 2016 by D/V Chikyū. The primary goal is to construct plausible 3D distribution models for the contents of base and precious metals and lithotypes. This dissertation consists of the following seven chapters, which are intercorrelated and provide the bases to clarify the mechanisms of transport and deposit of polymetallic sulfide elements.</p> <p>Chapter 1 is an introduction to summarize the content of this research with an overview of preceding, general geologic settings, VMS deposit features, unsolved problems, and motivation for understanding the mineralized zones and generation mechanisms of deposits. Chapter 2 is devoted to present the essential materials and methods to implement this research, which is composed of the geologic setting of the Hakurei Site, the characteristics and provenance of available data, data treatment, and statistical and geostatistical methods.</p> <p>Chapter 3 examines the effectiveness of an estimation and two conditional stochastic geostatistical methods, ordinary kriging (OK), sequential Gaussian (SGSIM) and turning bands (TBSIM)</p> | | | |

| | | | |
|--|---------|----|---------------------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | Vitor Ribeiro de Sá |
| <p>simulations, respectively, to clarify metal content distribution and locate mineralized zones by the uses of limited amount of metal content data at few drilling sites. Among these methods, TBSIM was proved to be the best method to achieve the goal of this research in the situation of sparse data. This finding plays a pivot role in the dissertation, and TBSIM is used to divide the model domain for increasing the pluri-Gaussian simulation (PGSIM) performance in Chapter 6. Chapter 4 employs TBSIM to clarify the spatial distributions of physical properties and the chemical elements of dominant constituent sulfide and sulfate minerals in the study area. These outcomes are essential to reveal the metal zoning and physical and chemical interactions with the zoning. In addition, Chapter 5 applies TBSIM alongside PCA of the whole-rock geochemical data to characterize the meaning of the first two principal components (PCs) by examining their loadings and PC values. The first parameter manifests the importance of each element in each PC, while the latter product aids to reveal the 3D distribution of main metal elements over the study area. This chapter Also discusses and highlights reversal relation between chalcophile elements, which represent the mineralized zones in the SMS system, and rare earth elements alongside yttrium (REY). Chapter 6 incorporates the results of Chapters 3 to 5 to extract the maximum information from the sparse drilling data and construct plausible 3D models of geochemical compositions and lithotypes. This goal is achieved by applying a combination of data-characterization methods using PCA, k-means clustering, TBSIM, and PGSIM. The constructed models successfully express the configuration and zonation in the study area with hydrothermal flow paths, which sheds light on hydrothermal circulation system and metal accumulation mechanisms. Furthermore, the models can show in detail inner structure of the stockwork and stratiform polymetallic massive sulfide layers with tens of meters below the seafloor. The approach proposed is demonstrated to be effective for geologic and mineralization modeling and preliminary exploration of seafloor hydrothermal deposits. Finally, Chapter 7 summarizes the concluding remarks, including the primary results from all chapters. Besides, important future works to advance seafloor VMS researches are introduced.</p> | | | |

(論文審査の結果の要旨)

海底には熱水鉱床、マンガン団塊、コバルトリッチクラスト、レアアース泥などの金属資源が豊富に胚胎されていることが知られており、陸域での新規鉱床発見が難しくなっている現状において、今後、海底資源の早期開発が一層求められるようになる。しかしながら、陸域での金属資源調査に比べて海底のボーリングの本数は格段に少なく、掘削深度も浅いので、少ない情報量から資源分布予測を高精度で行うことは困難である。そこで、本研究では地球統計学を活用することで、この問題の解決を図り、海底熱水鉱床における主要金属濃度の3次元分布を明らかにできる手法の開発を目的とした。また、ボーリング検層、地質分布、化学成分濃度、各種物理探査結果に関するデータを統合し、鉱床存在ポテンシャルを広域的に評価することも目的に加えた。沖縄トラフ西部に位置する伊是名海穴域を対象フィールドに選び、6地点でのボーリング情報というデータの量、深度範囲ともに極めて限られた条件の下でも上記の目的を達成できた、という初めての資源地質学研究である。成果の概要は以下にまとめられる。

1) 複数ガウスシミュレーション法 (PGSIM) と地質柱状図、比抵抗検層データ、地震波探査データを用いて4つの岩相 (初生・二次堆積物、硫化質岩、熱水変質岩、磁鉄鉱脈を含む緑色変質岩) の空間分布を推定した結果、硫化物マウンドから断層に向けて硫化質岩が水平方向に連続する、などの海底熱水鉱床における地質分布の特徴を明らかにできた。

2) 海底熱水鉱床は黒鉱タイプであるので、この主要金属元素である Zn, Cu, Pb, Ba, Ag, Sn, Cd, Mn を対象とし、回転バンド法という地球統計学的シミュレーション法、および主成分分析により濃度の3次元分布を求めたところ、濃度が高いゾーンは金属種に関わらずほぼ同じ位置にあり、水平方向に連続し、特に硫化物マウンドで高濃度になることがわかった。

3) 主要金属濃度データに k-means 法を適用し、4つのクラスターに分類した結果、金属濃度がいずれも高いというクラスターが見出された。PGSIM を適用して、各クラスターの3次元分布を求めたところ、高金属濃度のクラスターは硫化物マウンドを構成し、その分布は硫化質岩とも概ね重なった。このクラスターに次いで金属濃度が高いクラスターは熱水変質岩、および海底下浅層に主に分布した。このように岩相分布と金属濃度との関連性を明らかにできたので、k-means 法と PGSIM との組み合わせの有効性が確かめられた。

4) 金属高濃度部の形状に基づき、金属イオンを含む熱水の上昇と硫化物マウンド形成、不透水層生成によるマウンド下からの側方流動、および断層による海水の浸透と熱水との混合が高濃度部の分布を規定していることを明らかにできた。

以上、海底熱水鉱床の地質分布と金属濃度分布を明らかにでき、これから鉱床生成メカニズムの解釈、および鉱床存在の可能性の高い場所の推定も可能になった。この成果は、今後の海底資源探査と開発にも貢献し得るので、学術上、実用上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと

| | |
|----|---------------------|
| 氏名 | Vitor Ribeiro de Sá |
|----|---------------------|

認める。また、令和2年6月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、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、全文公表日までの間、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。