

審 査 の 結 果 の 要 旨

論文提出者氏名 陳 慶 華

論文提出者は、坑内掘鉱山における生産計画の最適化手法として、ダイナミックプログラミング(DP)に基づく手法を開発し、さらには、鉱床の品位推定に含まれる誤差や、生産量の変動などの不確実性を考慮した生産計画を可能にする手法を開発し、実規模充填採掘式坑内掘鉱山に応用し、その妥当性を明らかにした。

研究の対象とした鉱山は、中国に実在する銅鉄の大規模鉱山で、その中の坑内掘で操業を行っている部分だけが選ばれた。著者は、実際に、この鉱山を何度か訪問して、鉱床評価に用いられた探査ボーリングの結果、操業に関するコストデータを収集した。

長さ780m、幅580m、深さ512mの領域に対して実施された124本の探査ボーリングのデータ(銅と鉄の品位)を、著者は現地で集めた。そのデータを整理して、銅品位は対数正規分布(平均銅品位は1.16%)、鉄品位は正規分布(平均鉄品位は28.5%)で表現できることをまず明らかにし、実験バリオグラムを作成した。さらに、鉱体の走向方向、傾斜方向、厚さ方向の三方向を主軸に選び、三方向の実験バリオグラムに球モデル(数学モデル)をあてはめ、そのパラメータ(Nugget Effect, Sill Value, Range)を定めた。次に、得られた三次元バリオグラムの数学モデル(球モデル)の妥当性を、Jack-knifingとあだ名される手法を使ってチェックした。要は、一つの品位データを取り除き、残りの品位データを使ってクリッキングにより、取り除いたデータを採取した場所の品位推定を行う。これを、すべてのデータに対して行い、実測値とJack-knifingによる推定値の関係に偏りがなく、推定誤差が最小となることを確認した。三次元球バリオグラムとクリッキングを使って、鉱体を採掘する際の最小単位となるスライスに品位割り当てを行い、最適生産計画に使用した。

次に、当該鉱山の採鉱-選鉱プロセスに必要な、主な資材費(爆薬・鋼材・充填用セメントなど)、電力費・用水費・労務費などのデータを、現地で収集した。論文提出者は、鉱石1トンを採掘するのに要するコスト、銅精鉱・鉄精鉱を生産するのに要するコストを明らかにするとともに、生産量の変動によって、全体のコストがどのように変化するかをプロセス連関の手法を使って求めた。これらを使って、例えば、銅品位が標準値から上下することによって、銅精鉱生産コストがどれだけ変化するかを明らかにする感度分析を行った。その結果、鉱石品位と選鉱実収率が精鉱生産コストに最も大きな影響を与えることがわかった。一方で、ズリ混入率・残鉱率・ズリ鉱石比・電力費は大きな影響を生産コストに及ぼさないことがわかった。これらの分析結果を、不確実性を考慮した最適計画策定に使用した。

資金が有する時間価値と操業に関わる様々な制約条件を考慮した多期間最適生産計画を、動的計画法を基に求める手法を開発した。鉱体は28の採鉱ブロックに分割され、それぞれの採鉱ブロックはさらに、厚さが4.0mである15個のスライスから構成される。10年間で28個の採鉱ブロックを採掘するものとし、各年(合計で10期)には、その期間に生産を義務づけられている銅生産量(5000トン~2500トン、精鉱中の含有銅量)が割り当てられているものと仮定した。ただし、ある年の精鉱生産量に余裕が生まれた場合には、翌年に持ち越せるものとし、逆に、ある年の生産量が目標値に達せなくても、前年のストックでカバーすることも可能とした。さらに、採鉱ブロックの年間生産容量は68,000トン、鉱石とズリをあわせた坑内運搬量と巻上量は年間800,000トンと1,000,000トンに制約され、選鉱場の年間処理能力は1,200,000トンであると設定した。また、採鉱法の制約として、隣り合った採鉱ブロックを同時には採掘できないという条件も与えた。まず、簡単なモデルで、アルゴリズムの妥当性を検証し、実際の鉱体について、計算を実施し、DPによる最適化を組み込まなかった場合とも計算結果を比較した。その結果、開発した手法は有効であり、実用的な価値も高いことを確認した。

最後に、不確実性を考慮したDPによる最適計画法(Chance-constrained計画法)を提案した。鉱山経営・操業は様々な不確実性を抱えている。その中には、技術的なものばかりではなく、経済・社会的な要因も含まれるので、不確実性を考慮することは実用上、非常に有意義である。本研究では、精鉱生産量の変動と品位推定の誤差を考慮し、これらが単独に影響を持つ場合、複合して影響を持つ場合の解析を行った。そして、生産量の変動・品位推定の誤差を危険率で代表させ、危険率を組み込んだ制約条件式を導き、計算に使用した。ある危険率を想定した場合に、それがどれだけ操業全体の収益性に影響するか、その関係を、DPとChance-constrained計画法を組み合わせたアルゴリズムを開発して明らかにした。これによって、鉱山経営者が持つリスク選好基準にマッチした最適生産計画が可能となり、工学上の意義は非常に大きい。

著者の研究は、極めて数学的にもエレガントでありながら、実用上の価値が評価できるものである。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。