

論文の内容の要旨

論文題目 Multi-period Production Planning for Underground Cut-and-Fill Operations
(和訳 坑内充填採掘の多期間生産計画に関する研究)

氏 名 陳 慶華

操業開始・開山から生産終了・閉山に至る鉱山開発プロジェクト全体の利益を最大化するような生産計画の作成は鉱山経営者にとって重要な課題である。これまでに適切な生産計画を作成するために数多くの手法が開発されてきた。しかしその多くは、鉱床の品位や期間ごとの生産コスト、生産量等生産計画に大きな影響を及ぼすパラメータが全て確定値であると仮定されている。本研究では、品位の推定及び生産コストの計算も含めた多期間坑内掘生産計画の作成について研究を行った。また、今まで無視されてきた品位、生産量の不確実性に注目し、これらの不確実性を考慮した生産計画の作成を行った。

本研究では、中国のある銅鉄鉱山について、地球統計学を用いた銅・鉄の品位推定を行い、その手法の検討を行った。まず、全てのサンプルデータに対して、銅・鉄品位分布の正規性及び対数正規性を検定した。次に、対象となる鉱体の地質状況を鑑み、最も代表性がある三つの方向、すなわち鉱体走向、傾斜方向、厚さ方向を選択して、三次元バリオグラムモデルを構築し検定した。これらの銅・鉄のバリオグラムモデルに基づき、Lognormal Ordinary Kriging を用いて銅のブロック品位を推定し、Normal Ordinary Kriging を用いて鉄のブロック品位推定を行った。

次に、その鉱山のある年の生産経営データを用いて、採掘から精鉱の出荷に至るまでの生産コストモデルを、生産要素を含めた連関表を用いることによって構築した。また様々な不確実性要因、例えば品位やズリ混入率、選鉱実収率、材料購入価格等が生産コストに及ぼす影響を明らかにするために感度分析を行った。その結果から、鉱石品位と選鉱実収率の変動が精鉱生産コストに大きな影響を与えることが分かった。一方、ズリ混入率、鉱石損失率、ズリ/鉱石比率や購入材料・電気価格等の変動が精鉱生産コストに与える影響は小さいことが明らかになった。

計画生産量、採鉱ブロックの採掘容量、坑内運搬容量、巻揚容量、選鉱処理容量を制約条件とし、プロジェクトの総利益の現在価値を最大化するような多期間坑内掘生産計画モデルを構築した。具体的には、動的計画法を用いて全採掘期間から得られる総利益の現在価値を最大化するために、精鉱計画生産量あるいは金属量が規定された場合の最適な採掘順序を求める坑内掘生産計画作成アルゴリズムを提案し、ケーススタディを行った。動的計画法を用いた生産計画の結果を、鉱山経営者がよく考えるシナリオ、すなわち立坑から鉱体周辺境界へ向う採掘順序 (advance mining sequence) 及び鉱体周辺境界から立坑へ戻る採掘順序 (retreat mining sequence) と比較し、本研究において導かれた生産計画法はより大きな総利益の現在価値をもたらす採掘順序を得ることが明らかになった。

最後に、今まで無視されてきた鉱床品位や精鉱生産量などの不確実性に注目し、不確実性を考慮した坑内掘生産計画モデルを構築した。ここでは、以下のような三つのケース、すなわち精鉱計画生産量の変動を許容するケース、推定品位の不確実性を考慮するケース及び推定品位と精鉱計画生産量の二つの不確実性を考慮するケースに対して、それぞれに鉱山経営者のリスクに対する選好規準に見合った生産計画シミュレーションを実行した。具体的には、まず Chance-constrained 計画法を用い確率変数が含まれる確率制約を確実性等価制約に変換した。次に、確実性等価制約の付いたモデルを求めるため動的計画法を用いた坑内掘生産計画作成アルゴリズムを提案した。得られる総利益の現在価値の期待値を最大化する採掘順序を、確率制約が満たす確率である信頼度を変動させて求めた。これらのシミュレーションから、各々の信頼度を变化させた場合の総利益の現在価値は安全水準として指定する信頼度の増加とともに低下するという関係が見られた。これによって、リスクに対する選好規準を考慮に入れた最適生産計画を提示することが可能となった。