

商社における金属資源事業の リスクマネジメントに関する研究

2019年1月

村上 啓二

目次

第1章 序論.....	1
1.1 緒言.....	1
1.2 本研究の基本的な考え方.....	3
1.3 本論文の構成.....	4
第2章 商社における金属資源事業の事例研究.....	6
2.1 緒言.....	6
2.2 問題提起.....	6
2.3 リサーチクエスチョン及び仮説.....	7
2.3.1 リサーチクエスチョン.....	7
2.3.2 仮説（資源一般/商社特有の課題区分を含む）.....	7
2.4 既往研究について.....	8
2.4.1 金属資源の評価.....	8
2.4.2 資源生産コスト.....	9
2.4.3 鉱山経営モデル.....	11
2.5 商社の金属資源事業事例.....	12
2.5.1 MDP 概要.....	13
2.5.2 MDP 設立の経緯・背景.....	13
2.5.3 金属資源事業の位置付け.....	14
2.5.4 原料炭需給及び市況推移.....	15
2.5.5 資源生産コスト.....	17
2.5.6 MDP 事業採算.....	18
2.6 金属資源事業と業界の分析.....	19
2.6.1 競争環境.....	20
2.6.2 資源事業投資と経営.....	21
2.6.3 業界比較.....	22
2.6.4 資源業界の動向.....	25
2.7 考察及び分析結果.....	29

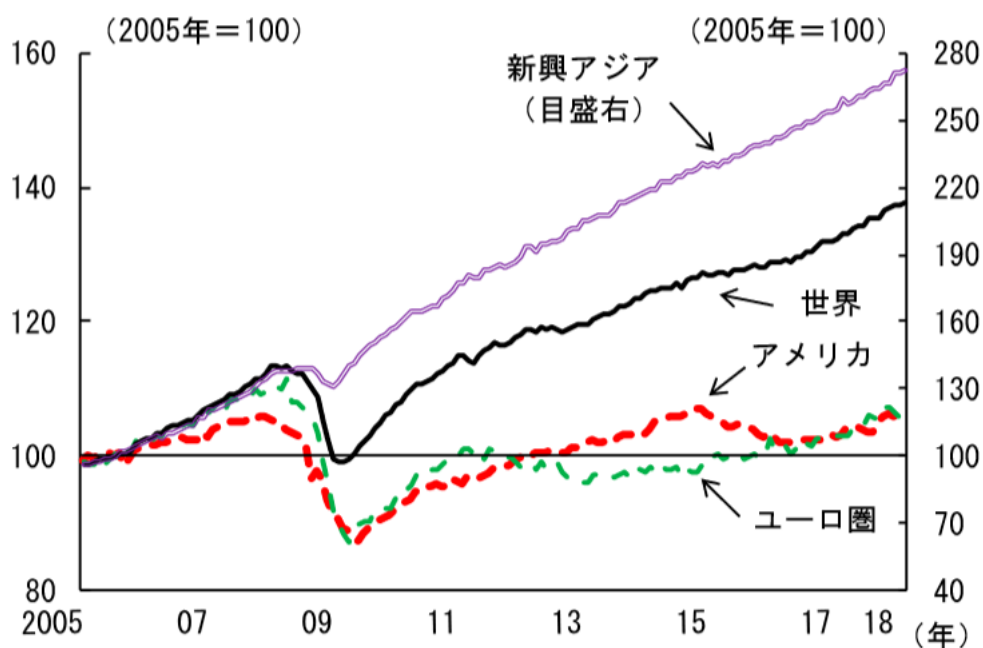
2.7.1	金属資源事業の成功／失敗要因	29
2.7.2	課題と対応策	31
2.7.3	結論	32
2.8	結言	34
第3章	リアルオプションによる鉱山の最適売却タイミングの分析モデル	36
3.1	緒言	36
3.1.1	研究の背景・目的	36
3.1.2	本論文の構成	37
3.2	本研究の基本的考え方	37
3.2.1	リアルオプションとは	37
3.2.2	既往研究の概要	40
3.3	モデルの構成	47
3.3.1	モデルにおける前提	47
3.3.2	鉱山のNPVの定式化	47
3.3.3	鉱山のROV価値の定式化	48
3.3.4	鉱山の売却条件	50
3.4	価格モデルの設定とモデルの検証	50
3.4.1	平均回帰モデル	50
3.5	本モデルの実務への応用	58
3.6	結言	63
第4章	鉱山ポートフォリオの長期最適化	66
4.1	緒言	66
4.2	鉱山ポートフォリオ	66
4.2.1	既往研究の概要	66
4.2.2	当社における鉱山ポートフォリオ	68
4.2.3	モデルの説明	68
4.3	鉱山のポートフォリオモデル	69
4.3.1	モデルの前提	69
4.3.2	鉱山ポートフォリオのモデル化	69
4.3.3	ポートフォリオの最適化モデル	71

4.4	解法	73
4.4.1	分析方法	73
4.4.2	シミュレーション	74
4.4.3	ボラティリティの特定	75
4.5	事例研究	76
4.5.1	問題設定	76
4.5.2	計算結果	78
4.5.3	実務的示唆	86
4.5.4	仮説の検証	86
4.6	結言	87
第5章	商社事業の動的ポートフォリオ最適化	89
5.1	緒言	89
5.2	商社の事業ポートフォリオ	89
5.2.1	既往研究の概要	89
5.2.2	各商社の事業ポートフォリオ	95
5.2.3	資源メジャーの事業ポートフォリオ	115
5.3	考察	119
5.4	結言	120
第6章	結論	123

第1章 序論

1.1 緒言

2018年の世界経済は前年に引き続き緩やかな回復を続けており、世界の実質経済成長率は3.5～4.0%を維持している。また生産の動向は新興国の成長と世界貿易の拡大等を受け、世界の鉱工業生産も堅調な増加が続いており、今後も中長期的に新興国を中心として生産の拡大が期待される¹⁾(図1-1)。この生産拡大を受けて各国でインフラ整備、発電・送電網の拡充、モータリゼーションと環境自動車化等の動きが活発となり、今後その原料となる鉄鉱石・石炭・銅・アルミ等の金属資源需要の拡大が予想される。



出典：内閣府ホームページ 世界経済の潮流 2018年

図1-1 世界の主要国・地域の鉱工業生産

金属資源業界は、資源メジャーと言われる5社（BHP, Rio Tinto, Vale, Anglo American, Glencore）が主要生産者となっているが、他に中小の資源会社も多く、競争環境は厳し

い。また、近年は日本の商社（総合商社）が金属資源事業を行っており、主力事業の一つとなっている。商社は歴史的に金属資源の日本への輸入者としてトレーディングを行ってきたが、1960年代以降に金属鉱山へマイナー出資しオフテイク権（金属資源を引き取る権利）を獲得して金属資源の安定調達を進めてきた。更に2000年代以降に商社は金属資源事業へ本格的に参入し、事業投資先として経営に携わる様になり、現在は人材を含む経営資源を投入の上、積極的に鉱山事業経営を行っている。

金属資源事業は、鉱山への投資や買収に巨額の資金を必要とする一方、世界の需給環境により大きく変動する資源価格の動向によって事業収益が影響を受ける業態であり、ハイリスク・ハイリターン型ビジネスとされている。近年は商社・資源メジャー共に金属資源事業によって莫大なる利益を獲得してきたが、中国の景気減速を発端とする2014～2015年の資源価格急落の影響を受けて、商社の金属資源事業部門や資源メジャーは鉱山事業の価値棄損により会計上の巨額減損を計上し、大幅赤字に陥った経緯がある。したがって、商社にとっては、事業のポートフォリオマネジメントを含めて、ハイリスクの金属資源事業を如何にコントロールして、永続的に事業収益を上げていけるかということは、非常に重大且つ喫緊の課題となっている。

一方、ポートフォリオの最適化に関する研究は、1952年のMarkowitz²⁾に始まり、長期の動的ポートフォリオ最適化については1969年のMarton³⁾らによって研究が進められ、歴史的経緯は長い。然しながら、過去の動的ポートフォリオ最適化に関する理論は、基本的に金融工学に基づき、投資家から見た金融商品のポートフォリオ最適化について論じられている。したがって、企業の事業に対する動的ポートフォリオ最適化の研究は少なく、且つ、コングロマリットとして多くの異質な事業を有する商社事業の動的ポートフォリオ最適化に関する研究は類を見ない。

また、金融工学に基づく動的ポートフォリオ最適化は、長期保有を前提としてリスクエクスポージャーを分散することが前提となっている⁴⁾。但し、金属資源事業は巨額の資金を必要とし、また鉱山経営には規模の経済が働くことより、商社が制限ある経営資源の中で金属資源事業を営む為には、鉱物資源や鉱山の選択と集中を行う必要がある。

上述の実態を踏まえて、本研究では、商社の金属資源事業のリスクマネジメントに関して事例研究、モデル開発及び分析を行い、最適なるリスクマネジメント方法を解明する。

1.2 本研究の基本的な考え方

上述 1.1 に記載した問題意識及び研究課題を踏まえて、本研究のリサーチクエスチョンを以下の通り設定する。

【リサーチクエスチョン】

「商社における金属資源事業は、リスクを如何にコントロールすれば、永続的に事業価値を最大化できるか。」

また、リサーチクエスチョンに対する中心命題は、以下の通り設定する。

【中心命題】

「商社において金属資源事業の価値を永続的に高める条件は、動的アセットアロケーションで論じられる長期保有を前提としたリスク分散ではなく、トレーディング事業とのシナジーを最大化しつつ、全社から配分された一定の経営資源の中で選択と集中を徹底し、積極的にリスク資産を入替え、鉱山ポートフォリオの質を向上することである。」

更に、上述の中心命題を立証する為に、リサーチクエスチョンに対する仮説を以下の通り設定の上、第2章～第5章にて分析及び考察を行う。

【仮説】

仮説1) 上流権益における優良資産（十分な埋蔵量，高い品位，低い生産コスト）を獲得すること。

仮説2) 開発・採掘リスクが低い操業鉱山を適正価格・プレミアムで権益取得すること。

仮説3) 経営資源・開発力・技術力・オペレーション能力・信用力において優良なるパートナーと組み、主体的に機能提供と経営判断/意思決定を行うこと。

仮説4) 鉱山資産の入替えにより事業ポートフォリオの質を向上し、シナジーを追求すること。

仮説5) 鉱山の買収・売却に当たっては、予め事業鉱山の将来価値を算定し、最適タイミングで売買を実行することにより、適正マージンを獲得する。

仮説 6) 鉱山事業は、複数の鉱物資源や鉱山のポートフォリオを形成し、事業全体のリスクをコントロールすることにより、収益やキャッシュフローを安定化させ、鉱山ポートフォリオを長期最適化できる。

仮説 7) 商社は多様な事業を有するコングロマリットであり、金属資源事業に配分される経営資源が制限される為、全社経営資源の中で選択と集中を徹底し、適時にリスク資産を入れ替えることにより、鉱山ポートフォリオの質を向上できる。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は、以下に示す通りである。

第2章では、商社の金属資源事業を題材に事例研究を行い、定性・定量的に分析することにより、経営資源に制限ある条件下での、ボラティリティ（資産価格の変動性）が高い金属資源事業におけるリスクマネジメントのあり方を考察する。また金属資源業界の動向及び資源メジャー/商社の経営手法の比較分析を通じて、金属資源事業の成功条件について仮説の検証及び考察を行う。

第3章では、商社の鉱山事業の特徴に着目し、経営選択として「売却」と「保有・採掘の継続」を設定し、鉱山事業売買取引をモデル化することによって、鉱山事業を適切なタイミングで売却し商社に最大の利益をもたらすための意志決定を可能とする数値計算モデルの開発を行う。尚、銅価格の時系列モデルとしては従来幾何ブラウン運動が用いられることが多かったが、本モデルではより現実的な価格変動に近く、且つ1つの確率変数で表現できる平均回帰モデルを用いる。

第4章では、時系列データの分析モデルであるARMA-GARCHモデルを活用し、鉱山ポートフォリオの長期最適化モデルを開発する。更に、過去の鉱山売買取引の具体事例データによる計算結果を算出し、同モデルの実用性を検証する。尚、動的ポートフォリオの最適化に関する理論は多く研究されているが、基本的に投資家から見た金融商品の動的ポートフォリオについて論じられている。よって、商社等の事業会社の金属資源事業の動的ポートフォリオの最適化に関する研究は類を見ず、新たな領域でのモデル開発及び検証となる。

第5章では、商社事業全体の動的ポートフォリオ最適化について述べる。商社の事業は資源事業と非資源事業に大別される。商社は複数の事業を営む一方、経営資源には一定の

制限があり、その条件下で資源／非資源のバランスを含めた事業の動的ポートフォリオ最適化を図り、リスクマネジメントを行いながら安定的に収益を上げる必要がある。また、金属資源事業については、第4章における鉱山ポートフォリオの長期最適化の概念を活用し、他事業を含めた商社事業全体での動的ポートフォリオの最適化に関して分析と考察を行う。更に、商社の資源・非資源事業ポートフォリオについて、資源メジャーとの相違点を含めて考察し、動的ポートフォリオの最適化を検証する。

第6章では、結論として各章の総括、中心命題に対する立証、学術的貢献と実務的示唆、並びに将来の研究課題について述べる。

参考文献

- [1] 内閣府ホームページ 世界経済の潮流 2018 年
https://www5.cao.go.jp/j-j/sekai_chouryuu/sh18-01/pdf/s1-18-2-1.pdf
- [2] Markowitz, H., "Portfolio selection", *Journal of finance*, Vol.7, pp.77-91, 1952.
- [3] Merton, R.C., "Lifetime portfolio selection under uncertainty : the continuous time case", *Review of economics and statistics*, Vol.51, pp.247-257, 1969.
- [4] James L., "Enterprise risk management from incentives to controls, 2nd edition", *John Wiley & Sons, Inc.*, 2014. (林康史, 茶野努翻訳, 『戦略的リスク管理入門』, 勁草書房, 2016 年.)

第2章 商社における金属資源事業の事例研究

2.1 緒言

日本の商社は歴史的に国内外のメーカーと需要家の間に入り、商品・サービスを提供するトレーディングビジネスを生業にしてきた。しかし、トレーディングビジネスの提供付加価値の減少により、近年は事業への投資による配当収益拡大、更には投資先への経営人材派遣による事業経営により投資企業の価値を向上させ、連結収益を拡大させるビジネスモデルへ変革している。その中で金属資源事業は商社の事業投資・経営モデルの代表例と言える。一方、商社は欧米を中心とする資源メジャーと比較すれば経営資源は制限され、また顧客・ステークホルダーとの関係性を考慮する必要がある。また、金属資源は世界の需給バランスにより市況変動が大きく、事業収益のボラティリティが高い事業である。本研究では、商社の金属資源事業を題材に事例研究を行い、定性・定量的に分析することにより、経営資源に制限ある条件下での、ボラティリティが高い金属資源事業におけるリスクマネジメントのあり方を考察する。

2.2 問題提起

商社はビジネスモデルの変革を図っており、従来からの商品やサービスのトレーディングにより得られる情報や政府・顧客とのネットワークを活用し、事業への投資・経営を中心とするビジネスモデルへシフトしている。商社のビジネスは金属・エネルギー・機械・生活産業・化学品・不動産・インフラ・電力・金融・物流・IT等多岐に亘るが、その中で金属資源・鉱物資源事業への投資・経営によるビジネスは、収益のみならず、商社が果たす社会的貢献の観点からも重要な位置付けとなっている。一方、トレーディングのリスクマネジメントは信用リスクやカントリーリスクが中心であったが、事業投資や事業経営に対するリスクマネジメントは、それらに加えて事業リスク・市場リスクという、ボラティリティが高く、より高度なリスクマネジメントを必要とする。近年は新興国を中心とした資源需要の増加、中国の経済成長や減速、資源国での政策・天候不順等の影響を受けて、金属・鉱物資源市況は乱高下しており、商社のみならず資源メジャー・資源会社の収益変

動は激しくなっている。このような状況下、商社の金属資源事業を題材として、リスクマネジメントの方法について事例研究を行う。

2.3 リサーチクエスチョン及び仮説

本研究では、上述 2.2 問題提起を受けて、商社の金属資源事業のリスクマネジメントのあり方を考察・分析すべく、リサーチクエスチョン及び仮説を以下の通り設定する。

2.3.1 リサーチクエスチョン

「商社の金属資源事業における成功(ハイリターン・持続的価値創造)は、どのような条件によってもたらされるか。」

2.3.2 仮説（資源一般/商社特有の課題区分を含む）

2.3.1 のリサーチクエスチョンに対する仮説として、金属資源事業における成功（ハイリターン・持続的価値創造）の条件を以下の通り設定する。これらは 1.2 の仮説 1)～4)と同じとする。

仮説1)上流権益における優良資産（十分な埋蔵量，高い品位，低い生産コスト）を獲得すること。

仮説 2)開発・採掘リスクが低い操業鉱山を適正価格・プレミアムで権益取得すること。

仮説 3)経営資源・開発力・技術力・オペレーション能力・信用力において優良なるパートナーと組み、主体的に機能提供と経営判断/意思決定を行うこと。

仮説4)資産入替により事業ポートフォリオの質を向上し、シナジーを追求すること。

上述の仮説1)は、次の先行研究2.4.1の投資意思決定に値する優良資産としての金属資源評価に関連、仮説2)は、2.4.2の資源生産コストと2.4.3の鉱山経営モデル面で不確実性が低い操業鉱山の優位性として関連する。また仮説3)は、金属資源事業と業界の分析2.6.1に示す様に、資源メジャーの寡占で参入障壁が高く、競争環境が高い金属資源業界において、

商社に求められるマネジメント方法である。最後の仮説4)は、多数の資源ビジネスを同時並行的に運営し、周辺事業・トレーディングビジネスとのシナジーを追求する商社ビジネスには不可欠となる課題である。

尚、仮説1)と2)、及び4)の事業ポートフォリオの質向上は、商社・資源会社に共通する一般的な課題である。一方、仮説3)は、技術力・オペレーション能力を有する資源メジャー等のパートナーと組む必要性が高い点、並びに仮説4)のシナジー追求は、他事業分野やトレーディングビジネス等の資源周辺事業とのシナジーを追求する点において、商社特有の課題となる。

2.4 既往研究について

商社の金属資源事業のリスクマネジメントを研究するに当たり、まず金属資源事業に関する既往研究を以下に述べる。

2.4.1 金属資源の評価

西山は、金属資源の評価について以下の様に述べている。「鉱物資源の通常概念として、鉱石とは有用元素が現在の経済状態で抽出可能な程度に含まれている岩石をいい、これから採掘される鉱石量を埋蔵量としている。さらに経済状態が好転すれば抽出可能となる鉱石も存在するため、これらを含めて資源量として取り扱われる。資源を評価するには、経済性の存在と信頼性の2つが柱となる。各国または国際機関では、いくつかの資源分類がされているが、現在も鉱物資源関係者の中で最も使われ、纏まっているとされるのは、1980年に米国で作られた分類体系である。この分類基準では、地質学的存在の信頼性を横軸に取り、確認／予測／潜在等に細分化し、縦軸には経済評価を取って経済的／準経済的（将来において価格上昇や採掘技術の改革があれば採算可能となるもの）／経済限界下の3段階に区分している。更に、その間にできる、それぞれの項目に該当する言葉が定義されている。」¹⁾ (表2-1)

この中で、埋蔵鉱量が確認または予測され、経済的であると評価される鉱山は投資意思決定の対象となり、その経済優位性が売買される際の価格に資産価値+高プレミアムとして反映される。また、埋蔵鉱量が確認または予測されるが準経済的である鉱山や、潜在鉱

物資源量があるが経済的／準経済的である鉱山は、開発リスク／市場リスクを伴うため、投資意思決定される場合の売買価格は、資産価値＋低プレミアムとして評価される。

表2-1 金属資源の評価方法

金属資源の評価

累積生産量		地質学的存在の信頼性				
		既知鉱物資源量		潜在鉱物資源量		
		確認		予測	確からしさの程度	
		精測	概則		仮定	純理的
経済評価	経済的	埋蔵鉱量	予測埋蔵鉱量	(探査・開発)		
	準経済的*	準埋蔵鉱量	予測準埋蔵鉱量			
	経済限界下	確認経済限界下 鉱物資源量	予測経済限界下 鉱物資源量			

* 将来において価格の上昇や採掘技術の改革があれば採算可能となるもの。

出典：西山孝"資源経済学のすすめ"

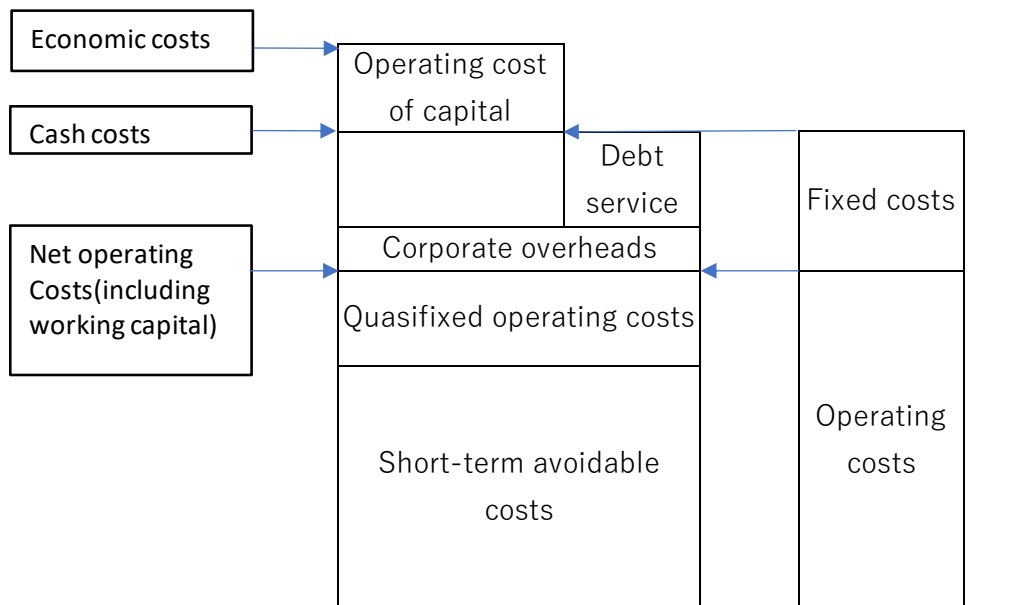
- ：投資意思決定（資産価値＋高プレミアム）
- ：投資意思決定（資産価値＋低プレミアム）

2.4.2 資源生産コスト

資源生産コストは鉱山の収益性にとって重要な要素であるが、まずコストの内訳を定義する。生産コストは固定費（Fixed costs）と操業費（Operating costs）に大別される。固定費は固定資産の原価償却費、賃金、保険料、税金等で操業度が変化してもその総額が変わらないようなものであり、操業費（変動費）は原材料費や電力代等、操業度によって変化するものである。

一方、Adamsによると、生産コストは3つのレベル（Net operating costs, Cash costs, Economic costs）に区分できる。この関係を図2-1に示す。「Net operating costsは、Short-term avoidable costs(短期回避可能費)とQuasi-fixed operating costs(準固定費)から構成される。Short-term avoidable costsは原材料費や電力代等、鉱山が操業を一時的に休止すれば削減できる費用を意味し、現金預金・手形・棚卸資産等の流動資産をまかなうための運

転資金(Working capital) も含まれる。Quasi-fixed operating costsは操業を一時的に休止してもかかる費用で、保守点検等の設備維持費も含まれる。これは一見固定費用のようであるが、操業を完全に止めれば削減できるという意味では可変コストと見做せる。これら2つのコストが操業費 (Operating costs) に相当する。



(出典：R.G.Adams 1991)

図2 - 1 資源生産コストの概念図

次に Cash costs は Net operating costs に鉱山を所有することにより必要となる総務管理・販売・企画等の経費や保険料・経営者の俸給など諸経費 (Corporate overheads)、及び長期借入金返済等の負債経費 (Debt service) を足したものを示す。これらは、操業を止めても支払う必要のあるコストであるため、固定費となる。

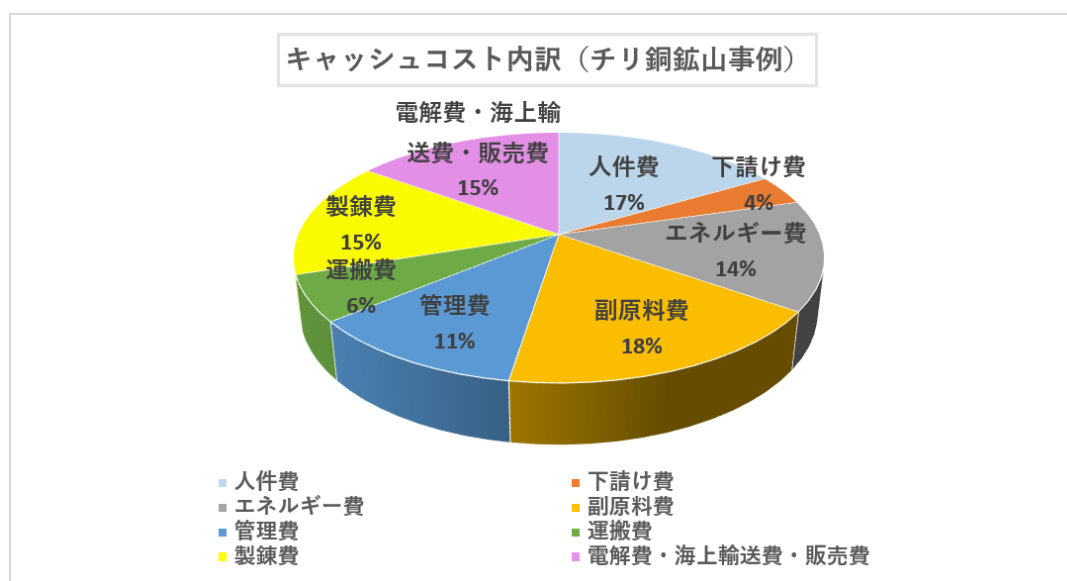
最後に Economic costs は、Cash costs に資本運用の機会コスト (Operating cost of capital) を加えたものとなる。」²⁾ (表2-2)

表2-2 資源生産コスト内訳

生産コスト内訳				
Economic costs	経済コスト (生産コスト)	Fixed costs	固定費	固定資産減価償却費、賃金、保険料、税金等
		Operating Costs	操業費(変動費)	原材料費、電力代等
Net operating costs	ネット操業費	Short-term avoidable costs	短期回避可能費	原材料費、電力代、運転資金等
		Quasifixed operating costs	準固定費	保守点検、設備維持費等
Cash costs	キャッシュコスト	Corporate overheads	諸経費	本社経費、保険料、経営幹部報酬
		Debt Service	負債経費	借入金返済等
Economic costs	経済コスト	Operating cost of capital	資本コスト	資本運用機会コスト

出典：R.G.Adams (1991)

資源生産コストの具体事例として、チリ銅鉱山におけるキャッシュコスト内訳を図2-2に示す³⁾。この鉱山ではキャッシュコストにおける固定費（人件費・下請け費・エネルギー費・副原料費・管理費）比率が64%と高いため、資源生産量の増減による損益の影響が大きいことが想定される。このことより、理論上は、資源生産量の見通しが立ちにくい新規開発鉱山よりも、既に稼働しており資源生産量の見通しが立ちやすい操業鉱山の方が、固定費の観点からも優れていると考えられる。



出典：石油天然ガス・金属鉱物資源機構レポート

図2-2 チリ銅鉱山のキャッシュコスト内訳

2.4.3 鉱山経営モデル

鉱山経営に関する先行研究として、BardiaとRicardoは、開発される資源が非同種である製造業及び鉱業における生産活動を評価するためのオペレーショナルなリスク管理モデルを提示した。「一般的に金融アプリケーションで適用する条件付請求権方法論を使用し、市場（資源価格）やプロセス（生産性）が不確実な環境下での生産管理モデルが数式化された。このモデルによる貢献は、第一に市場とプロセスの不確実性によって特徴付けられ、生産活動を伴うプロジェクトの分析フレームワークを提示したこと、第二に市場とプロセスの不確実性の他要素を捉えることに柔軟なことである。」⁴⁾ これらのことより、理論上は、市場とプロセスの不確実性を下げるためにも、操業鉱山の権益取得が理想的であると考えられる。

また、新熊は、非同質的鉱山企業の意味決定に基づいて、鉱山における品位調整に関する基本ルール「金属価格が上昇（下降）している時には、採掘する鉱石の品位を下げる（上げる）」がもつ経済合理性を見出すと共に、金属資源価格の周期的変動傾向を明らかにした。また、大きな外生的価格変化が鉱山企業に与える影響を、不確実性下での鉱山企業の投資意思決定を分析することにより、投資意思決定は金属市場価格を超えているか否か（開山、生産規模拡張）、または臨界価格を下回っているか否か（閉山）に基づいて行われること、並びにその臨界価格は残存資源ストック量や平均採掘費用に大きな影響を与えることを示した⁵⁾。

上述2.4.1～2.4.3の先行研究は資源会社全般に適用できる研究事例である。一方、資源/非資源等の様々な事業を有し、且つ川上から川下までのバリューチェーンを展開する商社が営む金属資源事業の特異性については述べられていない。したがって、以下2.5と2.6にて商社の金属資源事業の特徴やリスクマネジメントの方法を補完する。

2.5 商社の金属資源事業事例

本研究において、商社が金属資源の国際合弁プロジェクトを展開する代表事例として Mitsubishi Development Pty Ltd(MDP)を主な研究対象とする。MDPは三菱商事100%子会社であるが、世界最大級の資源メジャーBHP Billiton (BHP)と50:50の対等出資の原料炭事業 BHP Billiton Mitsubishi Alliance(BMA)等を傘下に有する⁶⁾。商社の金属資源投資会社の多くはマイナー出資で、資源メジャー等の資源会社または政府系企業がメジャー

出資である中、MDP は鉱山経営・オペレーション・オフテイク権について資源メジャーと対等な権利・義務を有する希少な事例である。

2.5.1 MDP 概要

MDPの概要を以下に示す。

会社名 : Mitsubishi Development Pty Ltd(MDP)

設立 : 1968 年 11 月

株主 : 三菱商事 100%

本社 : オーストラリア NSW 州シドニー

従業員数 : 63 名

業容 : 石炭を中心とする天然資源（原料炭・一般炭・鉄鉱石・ウラン）の開発・生産・販売。

規模 : 豪州における石炭生産量は第 5 位（資源メジャーである Xstrata, BHP, Rio Tinto, Anglo American に次ぐ）であり、日本商社最大級の資源会社。

傘下鉱山 : MDP は傘下に以下の資源メジャーとの合弁炭鉱・鉱山等を有する。

①BHP Billiton Mitsubishi Alliance(BMA)

原料炭(鉄鋼原料となる石炭), MDP50% : BHP50%, 年間持分生産量 33 百万トン。

②Hunter Valley Operations(HVO)

一般炭（主に火力発電用となる石炭), MDP32.4% : Rio Tinto67.6%.

③Crosslands Resources

鉄鉱石, MDP100%.

④Kintyre Joint Venture

ウラン, MDP30% : Cameco70%.

MDP の機能 : 既存炭鉱・鉱山の収益力向上, 投資の選択, 資産入替を含めた資源ポートフォリオの優良化による収益基盤安定化。

2.5.2 MDP 設立の経緯・背景

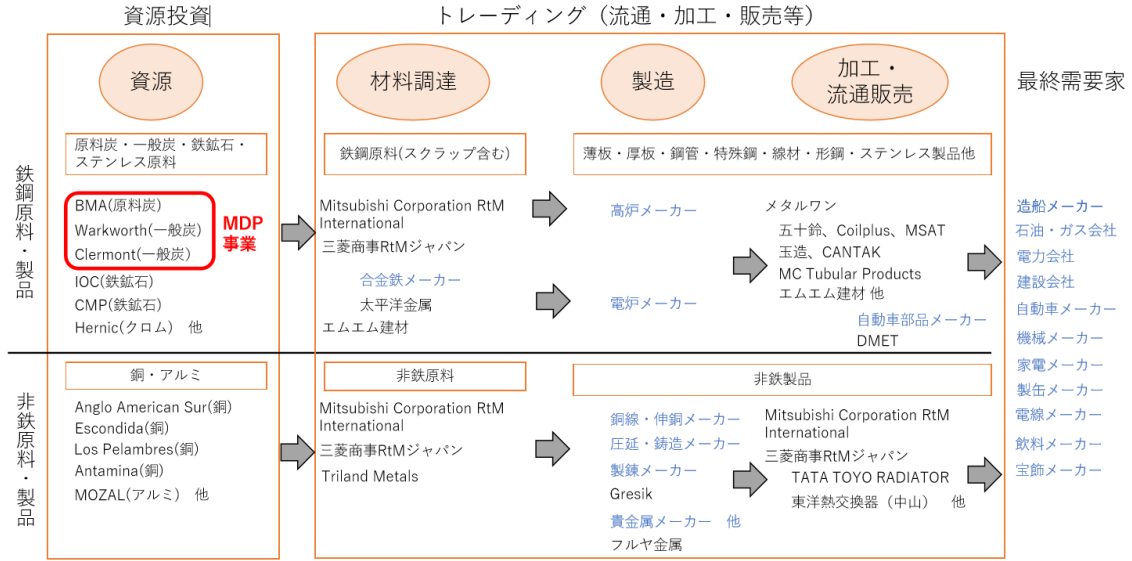
三菱商事は、かねてより原料炭のトレーディングビジネス（鉄鋼メーカーの輸入代行）を行っていたが、1968年に100%子会社MDPを設立し、BHPが開発・操業する豪州原料炭資産（鉱山）にマイナー出資で参画し、原料炭を安定調達した。その後三菱商事は、出資者として同鉱山の事業性・将来性を評価し、2001年にBMAを設立の上、同鉱山のMDP／BHPの権益比率を50:50とした。これは三菱商事が、資源価格低迷により収益が減少傾向であったトレーディングビジネスから、リスクを伴うが高いリターンが期待できる金属資源事業へ参入する転換点であり、世界最大級の資源メジャーで開発・操業・技術力が高いBHPをパートナーとし、且つ主体的に経営に参画すべく、対等出資とした。BMA設立時のMDP所要資金は約1000億円である。その後、MDPは、主力の原料炭に加えて、一般炭・鉄鉱石・ウラン権益も取得した。MDPは、2001年以降安定的に利益を計上し、三菱商事の主力事業の一つとなっている。2015年度は資源価格下落の影響により、MDPは赤字決算となったが、保有鉱山の競争力及び中長期的な収益力の高さを鑑み、継続保有・戦略的な位置付けとしている。

2.5.3 金属資源事業の位置付け

商社の金属ビジネスは、川上の資源投資(鉱山開発)、川中の資源トレーディング(金属原料調達、金属メーカーへの供給)、川下の製品トレーディング(金属製品の加工・流通販売、需要家への供給)に大別される。商品としては、鉄鋼原料(鉄鉱石・原料炭・一般炭・クロム等)・製品(鉄鋼製品)と非鉄原料(銅・アルミ・貴金属等)・非鉄製品に区分される。本事例であるMDPは鉄鋼原料の資源開発(川上)に位置する事業である⁷⁾(図2-3)。

また、北米・南米・豪州・アフリカ・アジアを中心に世界各国で開発される金属資源投資の中で、MDPは金属資源が豊富且つビジネスインフラが優位な豪州を対象とした資源開発案件である(図2-4)。

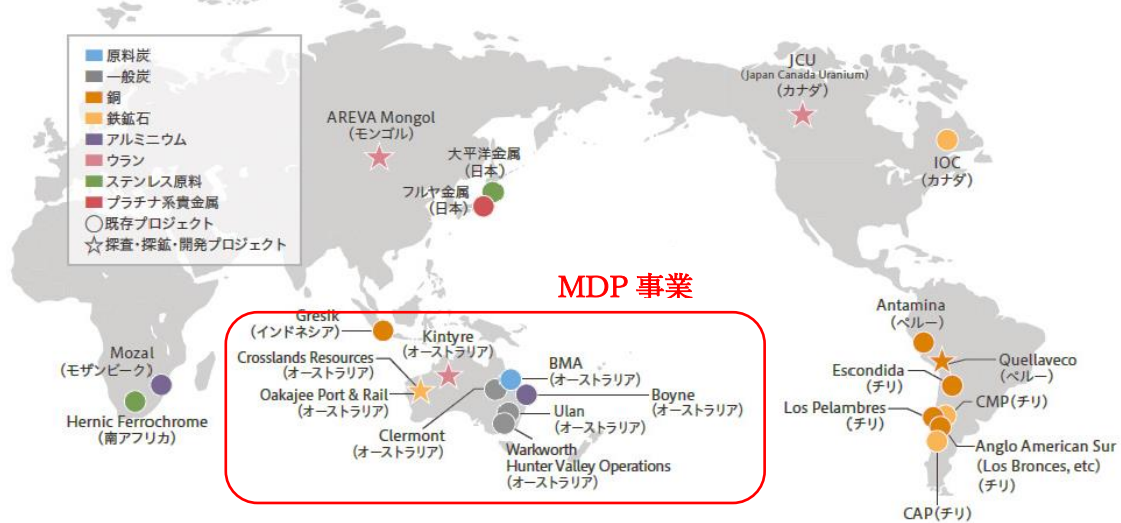
三菱商事の金属事業バリューチェーン



出典：三菱商事ホームページ

図2-3 三菱商事の金属事業バリューチェーン

金属資源関連事業の世界展開 金属グループ



出典：三菱商事ホームページ

図2-4 三菱商事の金属資源プロジェクトMAP

2.5.4 原料炭需給及び市況推移

MDP の主要事業は原料炭事業 BMA であり、世界の原料炭貿易量の約 25%を占める。BMA の事業性を分析するに当たり、まず世界の原料炭需給（表 2-3）及び原料炭・一般炭市況推移（図 2-5）を示す⁸⁾。

原料炭の需要は中国・インド等の新興国の景気変動、供給は中国の政策や豪州の天候不順等の影響により大きく変動しており、需給バランスの変動が激しい。

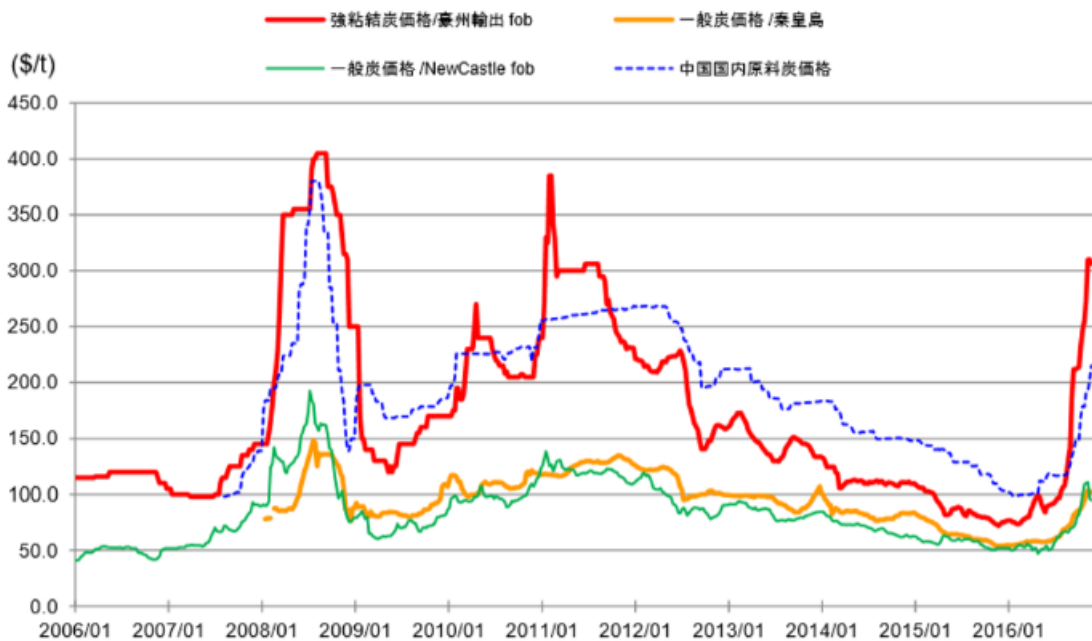
強粘炭（高級原料炭）は鉄鋼メーカー向けであるが、世界の鉄鋼需要(年間約 16 億トン)の半分(同約 8 億トン)を生産する中国鉄鋼メーカーの生産能力過剰・供給量増減等の影響を受けるため、需給バランス変化による市況変動が激しい。一方、一般炭は主に電力会社向けであり、世界の電力需要の影響を受けるが、原料炭と比較して需給は安定しており、市況変動は小さい。一般炭は中長期的に新興国を中心に需要伸長が予想されるが、先進国向けは環境問題の高まりにより中長期的に減少が予想される。

表 2-3 世界の原料炭需給推移

単位：百万トン/年)

地域・国	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
全世界需要	994	995	1,060	1,086	1,072	1,086	1,098	1,120	1,137	1,155
中国	597	603	668	678	658	663	660	665	669	673
インド	78	82	93	102	106	116	124	133	142	152
その他	319	310	299	306	308	307	314	322	326	330
全世界供給	993	1,017	1,077	1,108	1,090	1,061	1,079	1,107	1,142	1,157
中国	540	556	601	620	611	570	555	560	576	573
オーストラリア	146	147	159	180	191	192	203	206	209	212
アメリカ	82	81	78	73	57	50	54	59	65	70
ロシア	65	73	74	76	78	88	90	91	92	93
インド	42	43	50	51	55	60	66	72	79	86
カナダ	34	31	34	32	26	27	30	31	31	31
その他	84	86	81	76	72	74	81	88	90	92
世界過剰供給	▲1	22	17	22	18	▲25	▲19	▲13	5	2

出典：三菱UFJモルガン・スタンレー証券作成資料

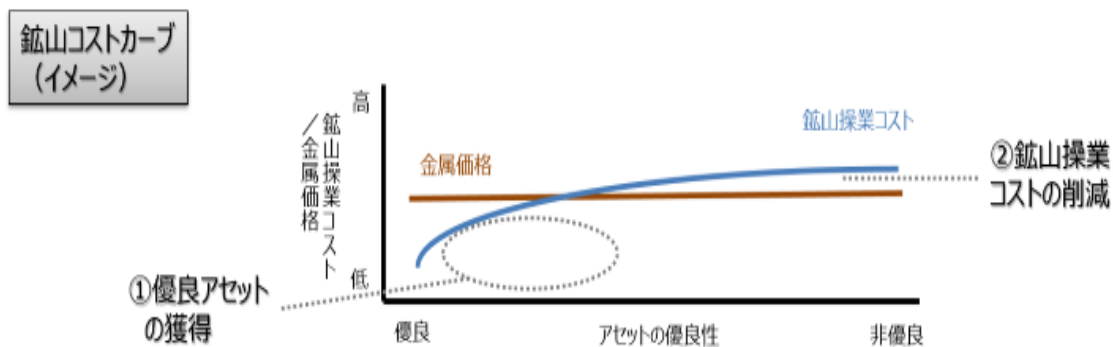


出典：Bloombergより三菱UFJモルガン・スタンレー証券作成資料

図 2-5 原料炭・一般炭の市況推移

2.5.5 資源生産コスト

金属資源事業において資源生産コストは重要な要素であり、市況の変動に関わらず、確実な収益要因とされる。資源業界では世界の鉱山資源コストの競争力を表す指標として、鉱山コストカーブが利用される。図 2-6 の鉱山コストカーブにおいて、左側は生産コストが低く（優良資産）、右側は生産コストが高い（非優良資産）。一般的に鉱山規模が大きく生産量が多いほど、固定費比率が低いため、コスト競争力が高いとされる⁹⁾。BMA はコストカーブ左側に属しており、コスト競争力が高い優良鉱山と言える。また BMA は近年の市況変動環境下で、生産コスト改善を進めており、コスト競争力が向上している。



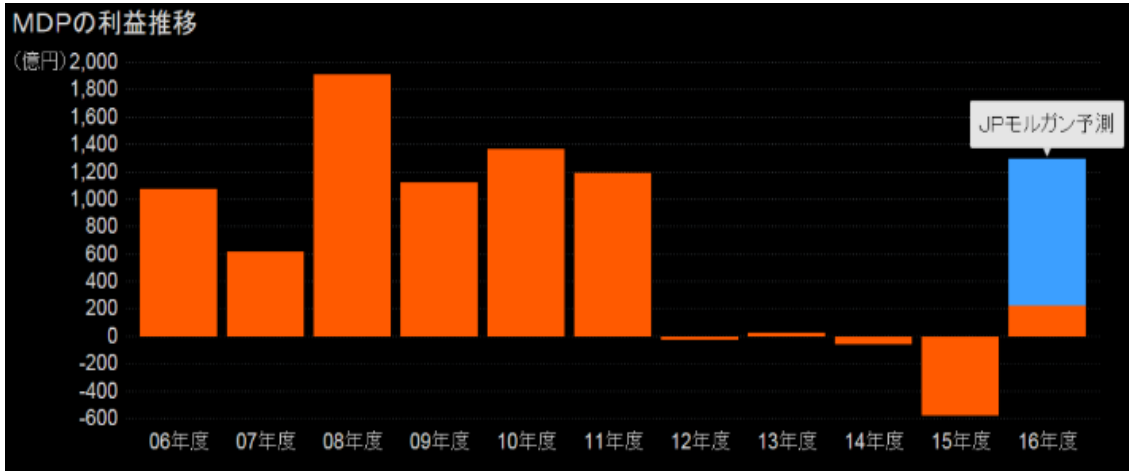
出典：経済産業省資源エネルギー庁

図 2-6 鉱山コストカーブ

2.5.6 MDP 事業採算

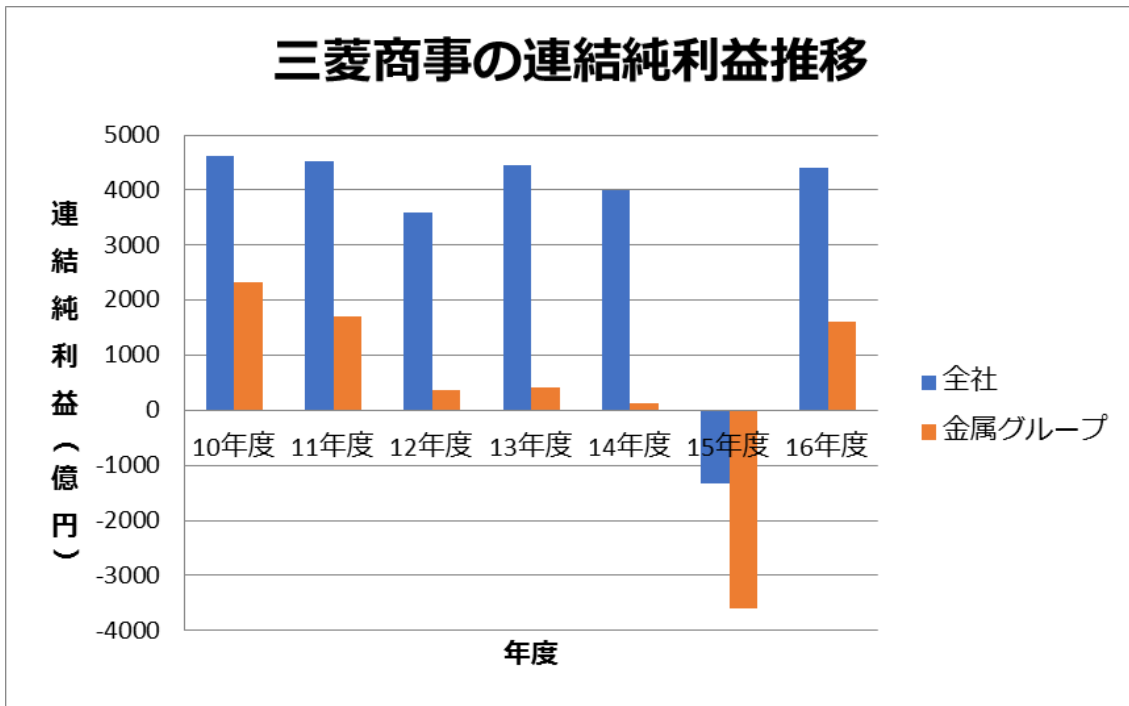
前述の資源需給環境、金属市況変動、生産コスト改善の結果、MDP 業績は図 2-7 の通り推移している¹⁰⁾。2008 年のリーマンショック前は原料炭市況高騰により過去最高の純利益約 1900 億円を計上したが、リーマンショック後は資源価格低迷を受けて業績は低迷した。2016 年は中国の石炭生産抑制政策及び豪州の天候不順の影響により供給が需要を下回ったため原料炭価格が上昇、生産コスト改善の効果もあり、約 1300 億円の純利益を予測する (JP モルガン予測)。

MDP 業績が示すように、金属資源事業は需給環境・市況変動・生産コスト等の要因によりボラティリティが高いビジネスモデルであり、三菱商事全体及び金属グループの経営・業績に与えるインパクトは大きい (図 2-8)。この傾向は資源メジャー・資源会社や他商社でも同様であり、金属資源事業のリスクマネジメントの難しさを表している。



出典：Bloomberg

図 2-7 MDP 業績推移



出典：三菱商事決算資料より作成

図2-8 三菱商事（全社／金属グループ）の連結純利益推移

2.6 金属資源事業と業界の分析

ここでは金属資源事業や業界を比較・分析し、商社の金属資源事業の特徴及び共通性を評価する。

2.6.1 競争環境

金属資源業界はその規模の大きさより、一般的に投資金額が巨額であり、規模の経済が効きコスト優位性に働くため、新規参入の脅威は低いとされる。一方、業界は大手資源メジャー数社による寡占状態であり、競合の脅威は高い。したがって、商社は単独で投資するのではなく、資源メジャー・資源会社とパートナーシップを組むことにより、パートナーの優位性を活かして事業展開するケースが多い。また、金属資源の購入者は、中国等の新興国や日本を中心とする鉄鋼メーカー・金属メーカー並びに電力会社等であり、バーゲニングパワーを有しているため、購入者の脅威は高い。金属資源の代替品は、中長期的に地球環境問題や技術革新等によって代替される可能性はあるが、短期的には代替品は限られており、代替品の脅威は中程度である。これらを Porter の Five Forces¹¹⁾にて図 2-9 に示す。金属資源業界の競争環境は比較的高く、中～高程度と言える。

以上より、資源メジャーの寡占で参入障壁が高く、競争環境が高い金属資源業界において、上述 2.3.2 の仮説 3) に示す通り、商社は優良パートナー（資源メジャー等）と組み、自社の機能提供と経営判断/意思決定することによるリスクマネジメントが求められる。

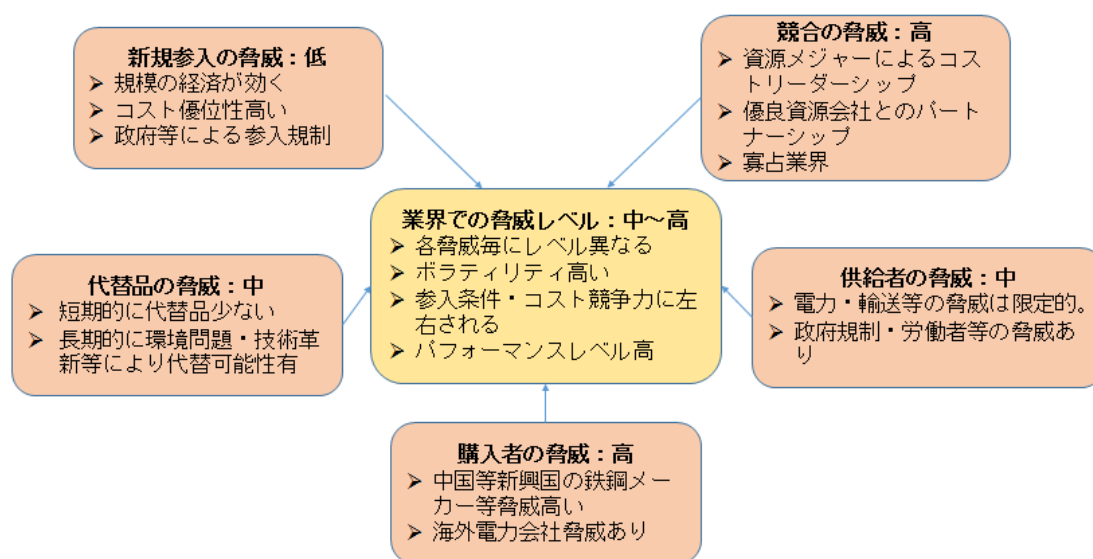


図 2-9 金属資源業界の競争環境(Five Forces)

2.6.2 資源事業投資と経営

a) 金属資源事業ライフサイクルと投資時期

金属資源事業のライフサイクルは、探鉱に始まり、資産評価、開発を経て、採掘・操業に至る。開発までは先行投資であるが、資源採掘・販売により初めてキャッシュを創出し、収益が生まれる。鉱山寿命は鉱山・品種により異なるものの、一般的には数十年あるとされる。しかし、採掘の後にピークを迎え、生産コストアップ・品位の低下（資源含有比率の低下）が起こり、資源量が減り経済性を失った段階で、最終的に閉山となる（図2-10）。

このライフサイクルの中で、投資時期は主に、鉱山新規開発の場合は探鉱段階、既存権益買収の場合は開発～採掘・操業の段階、鉱山権益売却の場合は採掘・操業～閉山間の段階で行われる。新規開発では資源量・埋蔵量や経済性において不確実性が高く、ハイリスク型といえる。また既存権益買収では、資源量・埋蔵量や経済性において不確実性は低い。市況上昇時や中長期価格に先高観がある場合は高い買収プレミアムが付く傾向がある。但し、適正な買収時期・価格と権益の優良性を見極めれば、収益性と確実性が高い投資となる。一方、生産ピークを越えて鉱山を売却する場合は、低価売却となることが多い。このため、市況が良好であり、ライフサイクルのピークを越える前に売却できるよう、先見性を持つことが重要となる。

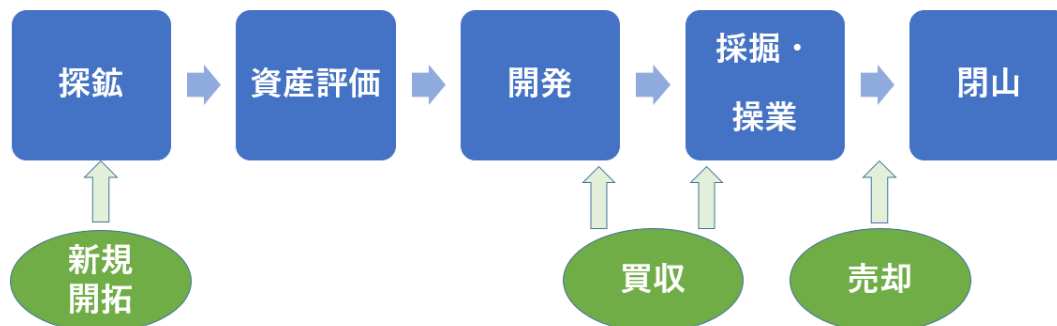


図2-10 金属資源事業のライフサイクル

b) 投資意思決定プロセス

商社の金属資源への投資意思決定プロセスは、まず経営戦略・ポートフォリオ戦略等の基本戦略があり、調査やオプション選択を経て Feasibility Study(FS)に入る。FS では選択オプションの資産評価／需給・市況予測／リスク評価／シナジー・プレミアム評価／投資採算評価等を行った上で、戦略に合致し十分な投資採算が見込める場合に、投資意思決定 (Final Investment Decision, FID) を行う。その後入札や価格交渉を経て、売買契約を締結し、買収が完了する。この段階でファイナンスや経営者派遣等を行い、鉱山経営・運営に入る(図 2-11)。

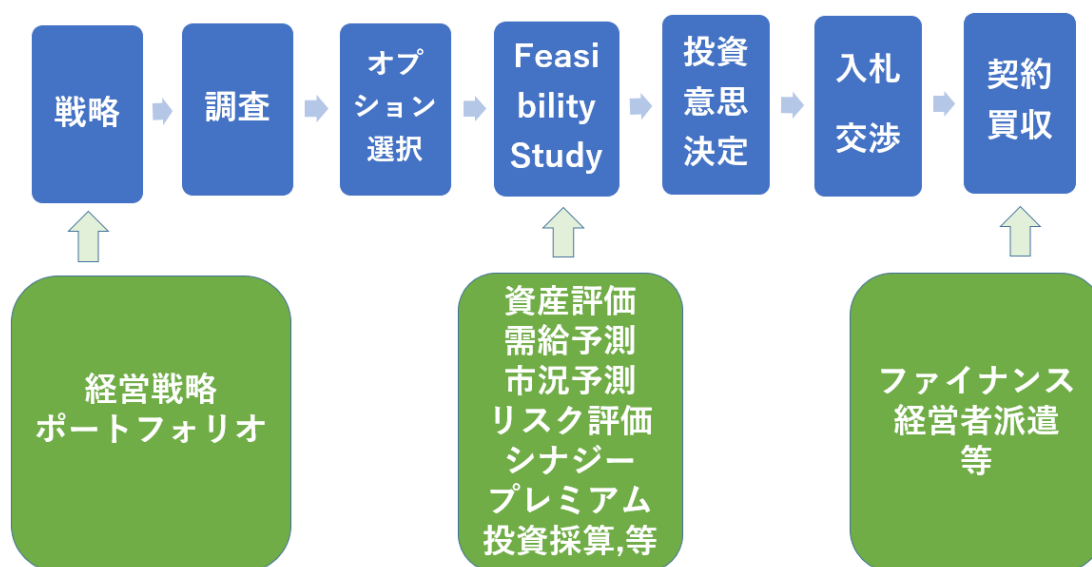


図 2-11 投資意思決定プロセス

2.6.3 業界比較

ここで投資意思決定、投資採算評価、投資後のレビュー(Post Investment Review)、ポートフォリオ管理手法について、商社と資源メジャーとの業界比較を行い、商社の特徴や共通性について分析する。

a) 最終投資意思決定(FID)までのプロジェクト管理

資源メジャーは、探査→コンセプト・スタディ→Pre-FS→FS→FID というプロジェクト管理方法を採用している。一方、商社は戦略立案→事業性調査→投資オプションの選択→FS→FID のプロセスを経るが、経営レベルでの投資意思決定に重点を置く。商社は金属資

源以外のビジネスも行うため、他事業との採算性・成長性・社会性等を比較し、資源/非資源事業全体でのポートフォリオ管理を重視する傾向がある（図 2-12）。

会社	プロセス	備考
商社	①戦略立案 ②事業性調査 ③投資オプションの選択 ④FS(Feasibility Study) ⑤FID(Final Investment Decision)	①投資の狙いを明確化 ②投資オプション、リスクの抽出 ③アクションプランの策定 ④事業採算評価、ファイナンス、リスク対応策の検討 ⑤経営体制、陣容の確定
資源メジャー	①探査 ②コンセプト・スタディ ③Pre-FS ④FS ⑤FID	①鉱山のポテンシャルを調査 ②投資オプションを抽出 ③投資オプションの絞り込み、リスクの評価 ④選出オプションの事業性評価 ⑤投資意思決定・実行

図2-12 FIDまでのプロジェクト管理

b) 投資採算評価

投資採算評価は、商社・資源メジャー共、主にモンテカルロ DCF 法（モンテカルロシミュレーションを活用したダイナミック DCF 法）を採用している。評価基準は、資源メジャー・商社共には NPV（正味現在価値）と IRR（内部収益率）を採用している。特徴として、資源メジャーは新規/既存区分、案件・地域毎に Discount Rate 等を調整、資産の質を重視して評価を行っている。また商社はモンテカルロ DCF 法により最悪ケースでの投資棄損額を評価し、全社経営へのインパクトを図る手法も取る（図 2-13）。

会社	評価法	評価基準	備考
商社	モンテカルロDCF法	IRR(内部収益率)、NPV(正味現在価値)	最悪ケースの投資棄損額を評価。WACC（加重平均資本コスト）とIRRとの比較による評価。
資源メジャー	モンテカルロDCF法（内部収益倍率法）（回収期間方法）	NPV、IRR	新規案件/既存案件、地域別に調整・評価。資産の質を重視する。

図2-13 投資採算評価

c) 投資後のレビュー

金属資源事業において、投資後の事業運営が重要であり、経営が定期的にレビューすることにより、経営体制の改革・改善、オペレーションの向上、コスト改善、資産の入替判断を行う必要がある。資源メジャーは、四半期から 3～4 年毎に NPV 更新等によりレビュー

ーを行い、資産入替・売却を速やかに進める傾向がある。一方、商社は、年一度に経営計画書等で経営陣によるレビュー・方針決定を行う。一般的に商社は資源以外の事業も同様の管理手法を取る（図 2-14）。

会社	手法	頻度	備考
商社	経営計画書	年一度	経営陣で年間計画を討議し決裁。
資源メジャー	NPVの洗い直し・レビュー	四半期毎 ～3・4年毎	実績値の更新 経済指標・価格前提等の更新 資源会社により頻度が異なる

図2-14 投資後のレビュー

d) ポートフォリオ管理

ボラティリティの高い金属資源事業において最適なポートフォリオを形成することは、収益を安定させ、永続的に事業を行うための重要な戦略・リスク管理手法である。資源ビジネスは大きな観点では、世界の政治・経済環境、需給変動で同じような収益構造を持つが、個別の商品や鉱山では、対面業界や政府の政策等の事情により異なる動きを見せるため、複数のポートフォリオを持つことが事業安定に繋がる。

ポートフォリオ管理は企業の戦略・特徴が顕著に表れる。資源メジャーは、コア/ノンコア資産の分類及びコア資産への集中、有望案件を選択し投資することによるポートフォリオ形成、多様品種のポートフォリオ形成によるナチュラルヘッジ形成、低変動資産と高変動資産のベストミックスによるポートフォリオ形成等を図る。一方、商社は、投資資産額・投資採算管理・EXIT（撤退）ルール設定、投融資額のCAP（上限）設定による資産入替、コア/ノンコア商品分類によるポートフォリオ管理等を行う（図 2-15）。

会社	手法	備考
商社	投資資産額 投資採算管理 EXIT（撤退）ルール	投融資額のCAP（上限）設定 資産入替の推進 コア/ノンコア資産を分類
資源メジャー	商品毎のポートフォリオレビュー 有望案件の選択/投資 低変動資産/高変動資産のベストミックス DCF法によるプロジェクト価値評価合算 目標DER（負債資本倍率）・ROE（自己資本利益率）の設定	・商品トレンドを分析 ・コア/ノンコア資産を分類 ・商品・地域を分散 ・多様商品のポートフォリオ形成によるナチュラルヘッジ形成 ・地政学的リスクの考慮・政策的変更

図 2-15 ポートフォリオ管理

一方、スイス資源メジャーGlencoreの資源ポートフォリオは2017年の維持・更新投資(30億ドル)、拡張投資(10億ドル)、合計40億ドルであり、維持・更新投資は銅と亜鉛で全体の約7割を占める。一方、2016年・2017年の拡張投資は銅とニッケルで約7割を占めており、亜鉛やニッケルの商品市況の動向・将来性を考慮し、ポートフォリオの配分変化が表れている¹²⁾(図2-16)。

このように資源ポートフォリオは各社の戦略や特徴を反映して、形成・資産入替されており、その結果、事業安定性・持続性を確保するものとなっている。

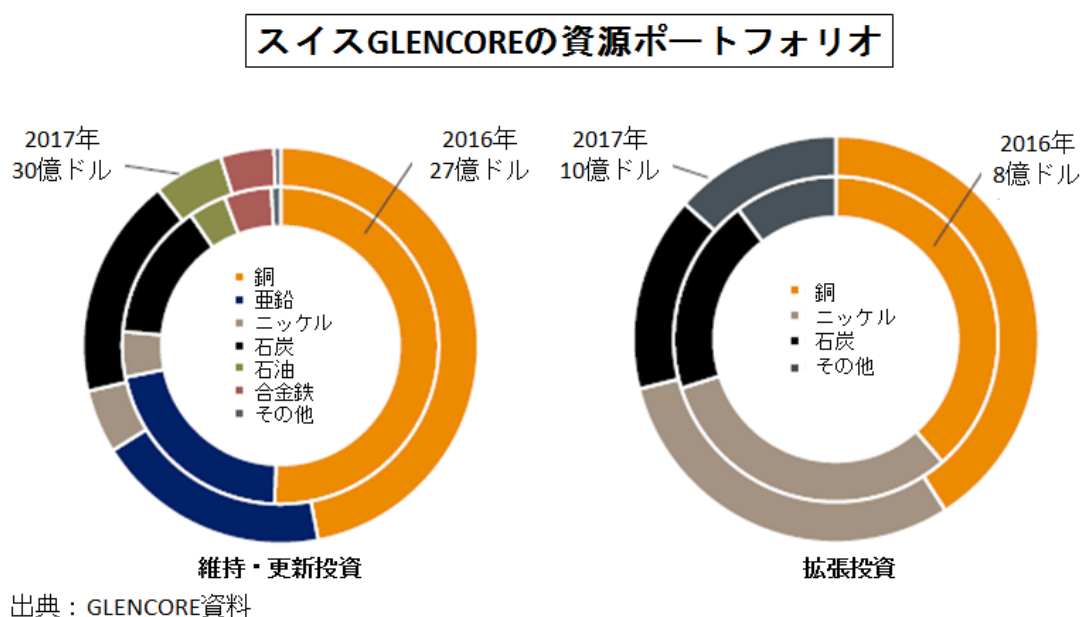
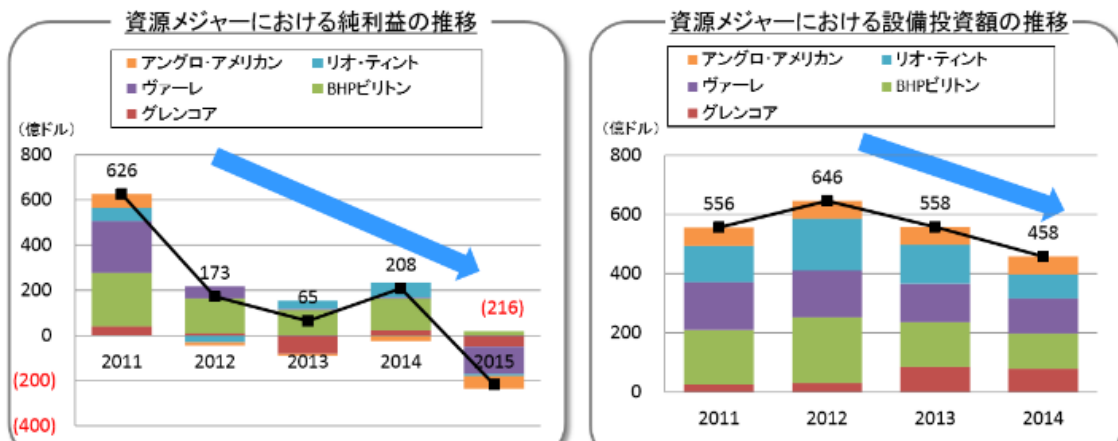


図2-16 スイス Glencore の資源ポートフォリオ

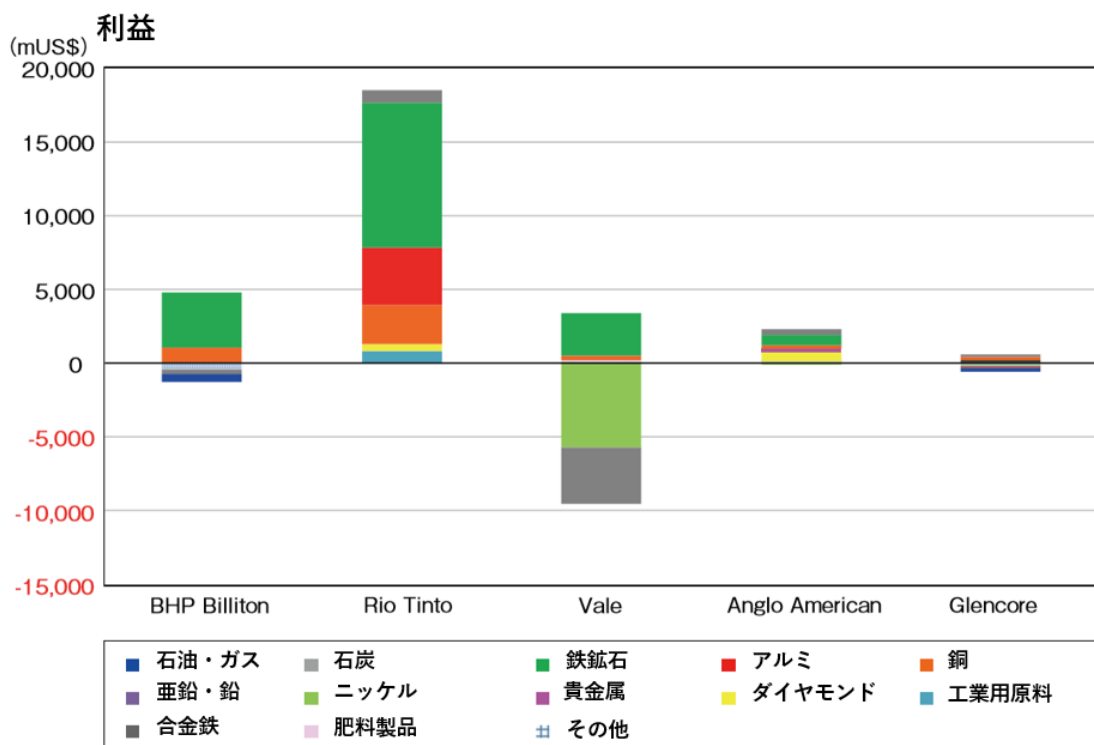
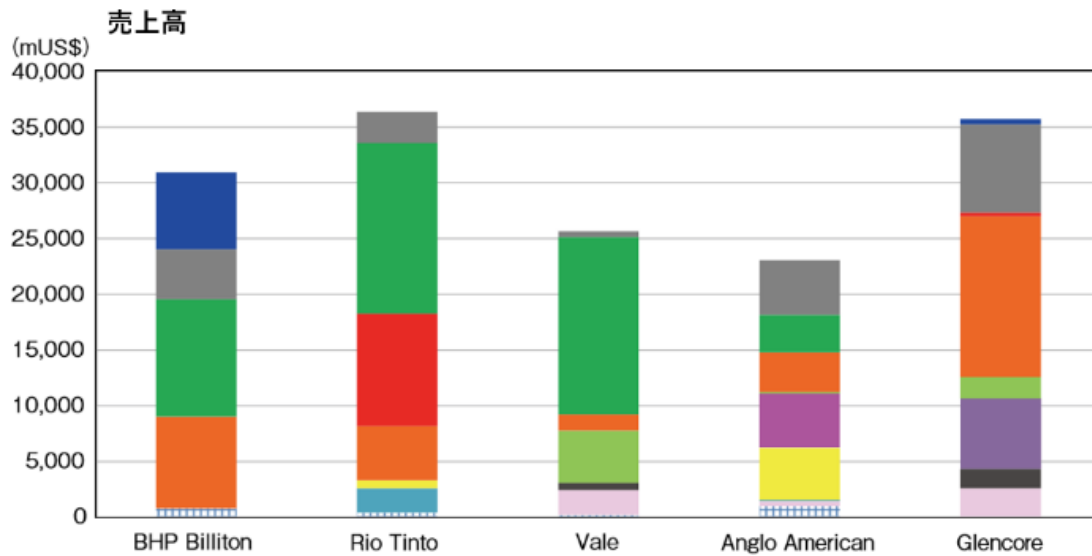
2.6.4 資源業界の動向

近年の金属資源価格変動の影響を受けて、資源メジャーの収益は大きく変動し、2015年度は各社共最終赤字(減損含む)を計上している。資源メジャーの純利益及び設備投資額の推移、2015年度セグメント別売上高・純利益(ポートフォリオ構成)¹³⁾を図2-17,2-18に示す。



出典：経済産業省資源エネルギー庁

図 2-17 資源メジャーの純利益及び設備投資額の推移



出典：石油天然ガス・金属鉱物資源機構レポート

図 2-18 資源メジャー2015 年度セグメント別売上高・純利益

資源メジャーの近年の動向は以下の通り（海外資源会社・報道機関・経済産業省資料等を参考）。各社共に 2015 年度の業績悪化・赤字を受けて、資産売却・ポートフォリオ再

編・コスト削減を進めた結果、2016年度は資源価格回復の影響も受けて業績向上・黒字化した状況である。

a) BHP Billiton (英豪)

- ・ BHP が強みを持つ鉄鉱石・銅・原料炭等のコア事業へ集中的に投資・運営し、ポートフォリオを優良化する計画を発表した。(2014年8月)
- ・ ポートフォリオを再編し、アルミニウム・一般炭・マンガン・ニッケル・銀等のノンコア事業を分離の上、South32へ分社化・移管した。(2015年5月)
- ・ 資源価格下落及びValeとの合弁鉄鉱石鉱山のダム決壊事故による減損等により、2015年6～12月半期決算において純損失▲57億ドル、減配を発表。生産性向上と価値創生を目的として組織の簡素化を行い、操業部門は、鉱種別から地域別へ移行を発表した。2014～2015年の人員削減は17,000人に達する。(2016年2月)
- ・ 資源価格回復及びコスト削減効果により、2016年度期決算において純利益62億ドルを計上した(2017年8月)。

b) Rio Tinto (英)

- ・ 資源価格下落及びギニア鉄鉱石鉱山の減損等により、2015年12月期決算発表において純損失▲17億ドルを計上した(2016年2月)。
- ・ ポートフォリオを再編するため、2016～2017年2年間はノンコア事業の設備投資など資本的支出を30億ドル抑制し、増配方針の見直しを発表。一方、長期的視点での資産優良化の為、鉄鉱石・アルミ・銅の優良案件への集約を発表した(2016年2月)。
- ・ 資源価格回復及び資産優良化により、2016年度決算において純利益48億ドル、Free Cash Flow+58億ドル、キャッシュコスト削減16億ドルを発表した(2017年2月)。

c) Vale (ブラジル)

- ・ 資産優良化のため、鉄鉱石のMBR社株式の36.4%を40億リアル(1200億円)で売却した。(2015年9月)
- ・ 資源価格下落、BHPとの合弁鉄鉱石鉱山の事故・ニッケル事業の減損等により、2015年度決算発表において純損失▲442億リアル(▲121億ドル)を計上。コア事業の売却を含めて、積極的なポートフォリオ再編策を検討中と発表した。(2016年2月)

- ・資源価格回復及びポートフォリオ最適化により、2016年度決算は純利益40億ドルを計上した。(2017年2月)

d) Anglo American (英)

- ・資産優良化のため、南ア Rustenburg 白金鉱山を南ア Sibanya Gold Limited へ45億ランド(450億円)で売却した。またチリ Norte (北) 銅鉱山を英国 Audley Advisor LLP へ3億ドルで売却した。(2015年9月)
- ・コスト削減のため、自社操業案件・人員の2/3削減を発表した。(2015年12月)
- ・資源価格下落及び鉄鉱石鉱山の減損処理等により、2015年度決算において純損失▲56億ドルを計上した。中核3事業(白金系貴金属・ダイヤモンド・銅部門)以外は中長期的に売却し、ポートフォリオを再編する方針を発表した。(2016年2月)
- ・資源価格回復及びポートフォリオ優良化により、2016年度決算において純利益16億ドルを計上した。(2017年2月)

e) Glencore (スイス)

- ・非優良資産であるフィリピン Tampakan 銅鉱山、コートジボワール Sipilou ニッケル鉱山、ドミニカ Falcondo ニッケル鉱山を豪州 Indophil Resources NL へ2.9億ドルで売却した。また豪州 Cobar 銅鉱山、チリ Lomas Bayas 銅鉱山の売却を発表した。(2015年10月)
- ・資源価格下落及び高値で買収した鉱山の売却損・減損等により、2015年度決算において純損失▲49.6億ドルを計上。財務健全化のため、2016年度に40~50億ドルの資産売却の計画を発表した。(2016年3月)
- ・資源価格回復及びポートフォリオ優良化により、2016年度決算において純利益20億ドルを計上。有利子負債を16年1四半期236億ドルから155億ドルへ圧縮した。(2017年2月)

2.7 考察及び分析結果

2.7.1 金属資源事業の成功／失敗要因

上述 2.6.4 資源業界の動向に示す通り、2015 年度は金属市況の下落等を受けて、資源メジャーを含む資源会社及び商社は巨額の減損計上を余儀なくされた。商社における金属資源事業の事例も踏まえて、成功／失敗要因の分析を以下に示す。

a) 成功要因

三菱商事の豪州資源子会社MDPは、操業中の原料炭鉱山にマイナー出資し、その事業性を評価の上、2001年に優良パートナーであるBHPと組み、出資比率50:50でBMAを設立し、原料炭市況が低位安定時に低プレミアムで、競争力ある上流権益を取得した。当該権益取得によるトレーディングビジネスへのシナジーは高く、また現在においても三菱商事の資源ポートフォリオの中核を成す収益源となっており、以下の成功要因①～⑥に繋がる。

また、資源メジャーの中でトレーディングビジネスも展開するGlencoreは、銅・亜鉛・ニッケルを中心とする自社に強みがある資源ポートフォリオを形成し、トレーディングビジネスとのシナジー効果を発揮した。その結果、2015年度赤字決算から脱却し、2016年度は純利益16億ドルを計上しV字回復したが、これは以下の成功要因⑤・⑥によるものであった。

上述より、成功要因としては、①操業実績があり、埋蔵量・品位・コストが明確且つ競争力ある優良資産を取得すること、②バリューチェーンにおいて需給や競合関係の影響を受けにくい上流権益を取得し、事業運営すること、③市況下落・低位安定時に、低プレミアムを設定した適正価格で権益を取得すること、④経営資源・開発力・技術力を有し、オペレーション能力・信用力が高いパートナーと事業を合併すること、⑤周辺権益やトレーディング等とのシナジーが高く、知見を有する事業を運営すること、⑥自社の強みを活かし、バランスの良いポートフォリオを形成すること、と考察する。

b) 失敗要因

上述2.6.4の2015年度の資源メジャーの業績悪化・赤字決算は、金属資源価格の下落が発端であるが、その根本的要因は、未開発・非優良資産の取得（以下①）、競合状況が厳しい鉱山資源・下流権益の取得（同②）、高値での権益取得（同③）、自社に強みの無いポートフォリオ形成（同⑥）に起因するものであった。

また三菱商事を含む商社においては、パートナーの信用力低下によって売却/持分権益買取りを余儀なくされたり（同④）、権益取得後に十分なシナジーが生み出せず、事業より撤退した事例があった（同⑤）。

上述より、失敗要因としては、①埋蔵量・品位・コストにリスクがある新規開発・非優良資産を取得すること、②バリューチェーンにおいて需給の変化を受けやすく、競合状況が厳しい下流権益を取得し、事業運営すること、③市況上昇・高騰時に、高プレミアムを設定した高値で権益を取得すること、④経営資源・開発力・技術力・知見が乏しく、オペレーション能力・信用力が低いパートナーと事業を合併すること、または多業界・多数株主による合併事業や単独で投資・運営を行うこと、⑤周辺事業やトレーディングビジネスとのシナジーが少なく、事業に対する知見が乏しいこと、⑥自社に強みが無く、ポートフォリオ形成に偏りがあること、と考察する。

2.7.2 課題と対応策

上述2.7.1の成功/失敗要因を踏まえた課題と対応策を、一般的な要因と商社に特有の要因に分類し、以下に示す。

【一般的な要因】

a) 資産の優良性

操業実績があり、資産優良性が高い権益取得・買収を優先すること、開発・採掘リスクが高い新規権益取得の評価・取得は慎重に行うこと、並びにバリューチェーンにおいて需給変化・競合関係の影響を受けにくく、利益のアロケーションが高い上流権益を取得することが望ましい。

b) 権益取得条件

競合が多く、市況上昇・高騰時のプレミアム評価は慎重に行うこと、適正価格で権益を取得すること、並びに有利条件・厳格なる契約を締結することが重要である。

c) 投資意思決定

ボラティリティが高い商品への投資は投資基準を厳格化し、また事業参入時でのEXIT条件を明確化し、ピークアウト時の意思決定・撤退を早期化する。

d) ポートフォリオ

自社の強みを活かしたポートフォリオを形成し、商品／地域を分散し市況変動リスク・地政学的リスクを軽減し、またコア／ノンコアを分類し適時に資産入替えを行う。特に商社は、資源メジャーと比較して制限ある経営資源で運営するため、投資採算管理・EXITルール運用の厳格化、投資金額のCAP設定による資産入替、より明確なコア／ノンコア商品分類によるポートフォリオ形成を行う。

【商社特有の要因】

e) パートナーの優良性

商社単独での鉱山運営は実績が少なく限界があるため、経営資源・技術力・オペレーション能力・資金力・信用力が高いパートナー（資源メジャー等）を選定し、合併事業とする。

f) シナジー

取得権益の周辺事業とのシナジーを求め、また商社の強みであるトレーディング・他資源事業・政府／パートナー関係等のシナジーを追及する。

2.7.3 結論

前述の先行研究、商社の金属資源事業の事例、金属資源事業と業界の分析、考察及び分析結果を踏まえ、2.3.1のリサーチクエスチョン「金属資源投資における成功（ハイリターン・持続的価値創造）の条件」の仮説に対する結論は以下の通りとなる。尚、以下3)と4)の内シナジー追求は商社特有の条件と言える。

仮説1) 上流権益における優良資産（埋蔵量・品位・コスト）の獲得

埋蔵量・品位・コスト優位性の資産優良性は重要な条件である。資産優位性を見極める知見・ノウハウ及びそれらを可能とする事業経験・情報力・判断力が競争優位となる。またバリューチェーンにおいて、需給変化・競合環境の影響を受けにくく、収益の分配比率が高い上流権益の獲得が有利である。

仮説 2) 開発・採掘リスクが低い操業鉱山の適正価格権益取得（適正なプレミアム評価）

将来の資産価値を厳格なる投資採算評価により正しく評価し、適正なプレミアムで投資・買収することが重要である。また未開発鉱山は開発・採掘リスクが高いため、開発・採掘リスクが限定的で、早期に収益に貢献する操業・開発済鉱山の権益取得が有利である。

仮説 3) 優良パートナー（経営資源・開発力・技術力・オペレーション能力・信用力等）と組み、主体的な機能提供と経営判断/意思決定

資源ビジネスの専業ではない商社にとって、パートナーの選定は重要である。鉱山経営の収益性・持続性を確保するために、資金力・技術力・オペレーション能力・信用力の高いパートナー（資源メジャー等）と組み、且つトレーディングを通じた顧客・政府等ステークホルダーとのネットワークという商社の強みを活かして、WIN-WINのパートナーシップを構築する必要がある。

また、商社が強みを有し鉱山経営に優位となる機能（マーケティング・ファイナンス・経営・操業管理・グローバルネットワーク等）を主体的に提供し、適時に経営判断・意思決定することが持続的価値を創造する。

仮説 4) 資産入替による事業ポートフォリオの質向上、及びシナジーの追求

資源ポートフォリオの優良性は重要な条件であり、各資源会社・商社の戦略を顕著に表すものである。コア/ノンコア、低変動資産/高変動資産のベストミックス、資産入替の早期促進等の戦略策定、それを実現する知見・ノウハウ・実行力を有し、優良なポートフォリオ形成が重要となる。特に商社は、経営資源に制約があり、より厳格な投資採算管

理・EXIT ルールの運用，投資金額の CAP 設定による資産入替，明確なコア／ノンコア商品分類によるポートフォリオ管理を行う必要がある。

また，商社特有である取得権益の周辺資源事業とのシナジー，商社の強みであるトレーディング・他事業・顧客／政府／ステークホルダー等とのネットワークを活用したシナジー創出が優位となる。

2.8 結言

本研究では，商社の金属資源事業のリスクマネジメントに関する事例研究を行った。代表例として商社の金属資源事業の経営モデルを定量・定性的に分析した。また金属資源業界の動向及び資源メジャー/商社の経営手法の比較分析等を通じて，金属資源事業の成功条件について仮説検証・考察を行った。本研究による貢献は，金属資源会社一般に適用される先行研究に対して，様々な事業を有しバリューチェーン戦略を展開する商社の特異性を補完し，金属資源事業のリスクマネジメントの方法及び成功/失敗の条件を明確化したことと言える。

本研究によって認識する今後の課題は，以下①～③の通りである。

- ①個々の鉱山売買に関する情報量を高める必要がある。
- ②鉱山資産評価額と実際の権益売買価格との差の要因分析により，市況・需給・事業環境の変動が鉱山価値に与える影響が分析可能となる。
- ③金属資源事業は短期評価が難しく，長期的ビジネスとして将来の価値評価が必要となる。

今後ポートフォリオ管理を含む金属資源事業のリスクマネジメントに関する研究を深化させる為，第4章及び第5章にて以下内容について先行研究の分析，リスクの定量化，金属資源事業のあり方の考察を行う。

- ・ボラティリティの推計・マネジメントについて，先行研究の調査を通して，リスク定量化を図る。(第4章)
- ・経営資源に制約がある中での資源ポートフォリオ管理について，流動性マネジメントの観点より研究を進める。(第5章)

参考文献

- [1] 西山孝,『資源経済学のすすめ』, 中公新書, 1993 年.
- [2] Adams,R.G. “Managing Cyclical Businesses”, *Resources Policy*, vol. 17, no. 2, pp. 100–113, 1991.
- [3] 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) , 「金属資源レポート」, pp.49-61, 2008 年.
- [4] Bardia,K. and Ricardo,E., ”An Economic Model for Evaluating Mining and Manufacturing Ventures with Output Yield Uncertainty,” *Operations Research*, Vol.49, No5, pp.690-699, 2001.
- [5] 新熊隆嘉, 「非同質的鉱山企業的意思決定と金属資源価格の相互作用に関する研究」, 京都大学学術情報リポジトリ紅, 1998 年.
- [6] 三菱商事, 『BUSINESS PRODUCERS 総合商社の、つぎへ』, 日経 BP, pp.10-41, 2015 年.
- [7] 三菱商事ホームページ 事業紹介 金属グループ,
<http://www.mitsubishicorp.com/jp/ja/bg/metals/>
- [8] 三菱 UFJ モルガン・スタンレー証券, 「JAPAN EQUITY RESERCH 資源需給分析シリーズ 原料炭」, pp.3-6, 2016 年.
- [9] 経済産業省資源エネルギー庁ホームページ,
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen_nenryo/pdf/016_02_00.pdf
- [10] Bloomberg ホームページ,
<https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2016-12-19/OI5CQL6JTSF101>
- [11] Porter, M, E.: *Competitive Strategy*. New York; Free Press, 1985.
- [12] GLENCORE ホームページ,
<https://www.slideshare.net/Glencore/glencore-investor-update-december-2016>
- [13] 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 「資源メジャー・金属部門の動向調査 2016」, pp.8-10, 2017 年.

第3章 リアルオプションによる鉱山の最適売却タイミングの分析モデル

3.1 緒言

3.1.1 研究の背景・目的

鉱山等資産の需給バランスによる価格変動リスク、いわゆる市場リスクが内在する資産は適切なタイミングで売却することによって継続所有よりも大きな利益を得ることが可能であり、売却の意思決定をサポートするモデルが開発されれば資産の所有者は容易に意思決定を行うことができるようになると期待される。このような市場リスクを有する資産に対しては、リアルオプションと呼ばれる金融工学を応用した手法を用いて価値評価を行うことが従来から行われている。

商品価格や通貨のボラティリティの影響を受け、市場リスクを有する資産の例として商社が保有する鉱山が挙げられる。商社の鉱山事業は1960～1970年代の高度経済成長期においては産業インフラの整備や各種工業製品の生産需要に伴う鉄鋼原料の輸入代行業務における手数料によって収益を生み出すビジネスモデルであったが、二度の石油ショックによる経済停滞やプラザ合意による円高の影響を受けて鉄鋼原料の輸入量が減少し手数料ビジネスに限界が見え始めた。商社はビジネスモデルの転換を迫られ、鉱山資源に資本参画し、資源メジャーとの合弁事業として資源開発・運営を開始した。当初は投資鉱山より鉱物を獲得するオフテイク権を狙ったマイナー出資であったが、21世紀以降出資比率を引き上げ鉱山事業の経営に本格的に参画するようになり、多額の利益を追求するハイリスク・ハイリターン型のビジネスモデルへ転換した。鉱山事業の経営は、鉱物の商品市場に於ける価格ボラティリティに曝され、また埋蔵量・品位・採掘コスト等の変動要因に左右される傾向にある。更に鉱山事業にはライフサイクルがあり、鉱山事業がピークアウトする前の適切なタイミングで売却することは、経営において重要な意思決定となる。このようなビジネスモデルにおいては、適切なリスクヘッジを行いつつ、より大きな利益を得るため

の意思決定フレームワークが必要不可欠となる。したがって、商社が保有する鉱山事業は本研究の対象としては適切且つ有益なものである。

一方、商社は資源事業以外にも多くの事業を行っている為、経営資源には一定の制約があり、ハイリスクな金属資源事業を経営するに当たっては、事業環境の不確実性を考慮の上、フレキシブルに意思決定することが望ましい。尚、リアルオプションとは、オプション等の金融派生商品の価値評価方法を応用し、プロジェクトや不動産等の実物に対する投資の事業価値を評価する方法である。

従来のリアルオプション研究では、投資の意思決定過程において、裁定機会が存在しないことを前提としているため、鉱山の拡張/維持/延期/閉鎖のみのオプションを想定していたが、実際のビジネスの世界においては、鉱山の売却や買収が行われている。したがって本研究では、売却のオプションを追加し、また資源需給・市況変動によるボラティリティを考慮の上、資源会社や商社の資源事業の実態に沿う形態での研究とする。

そこで本研究は、商社の鉱山事業売却の意思決定に資するモデルの構築を行い、また他の資産に対しても応用可能な基本的概念を提示することを目的とする。

3.1.2 本論文の構成

以下、3.2では本研究で用いるリアルオプションという手法について説明を行う。3.3では本研究で用いる計算モデルの構築を行い、3.4では価格モデルとして平均回帰モデルを提示し妥当性を検証する。3.5では3.4までに構築したモデルを商社の鉱山事業経営に資する意思決定フレームワークとして提示の上、実務への応用の評価、並びに1.2の仮説5)に対する検証を行う。最後に、3.6で本研究の総括を行う。

3.2 本研究の基本的考え方

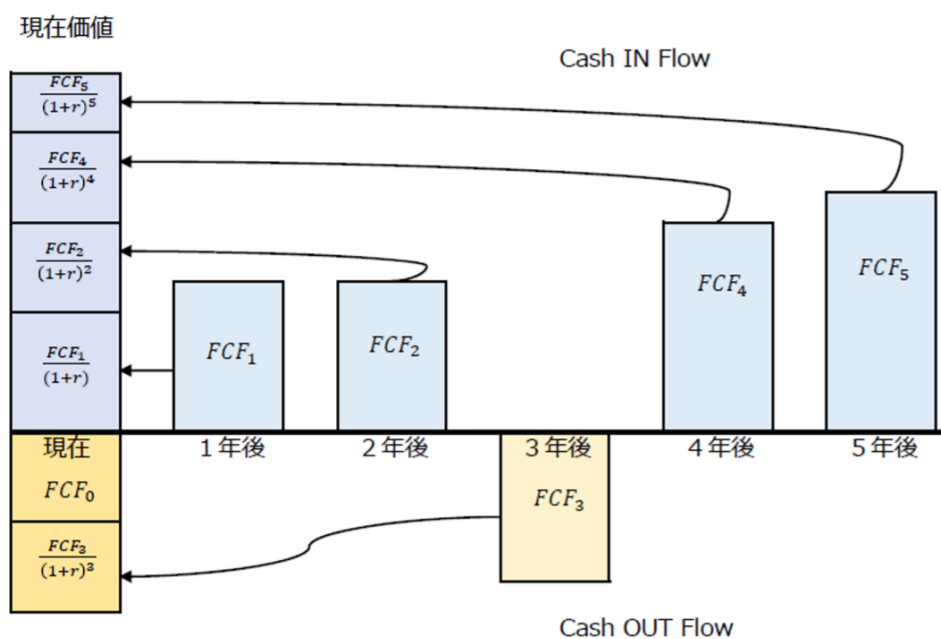
3.2.1 リアルオプションとは

まず従来の事業価値評価の手法について比較し、リアルオプションの特長を把握する。

a) DCF法

Discounted Cash Flow法の略でNPV法とも言われる。この手法は、将来発生すると見込まれる各期の利益を割引率で割り引いて現在価値を求め、事業などの現在価値を算出する。これは意思決定にフレキシビリティがないという仮定の上に成り立つ分析手法である。(図3-1)

DCF法の適用が妥当である事業としては、不確実性要因の少ない事業、例えば、電力、水道、公共交通などの規制産業や市場が十分に成熟した産業における事業が挙げられる。



FCF：フリーキャッシュフロー、r：割引率

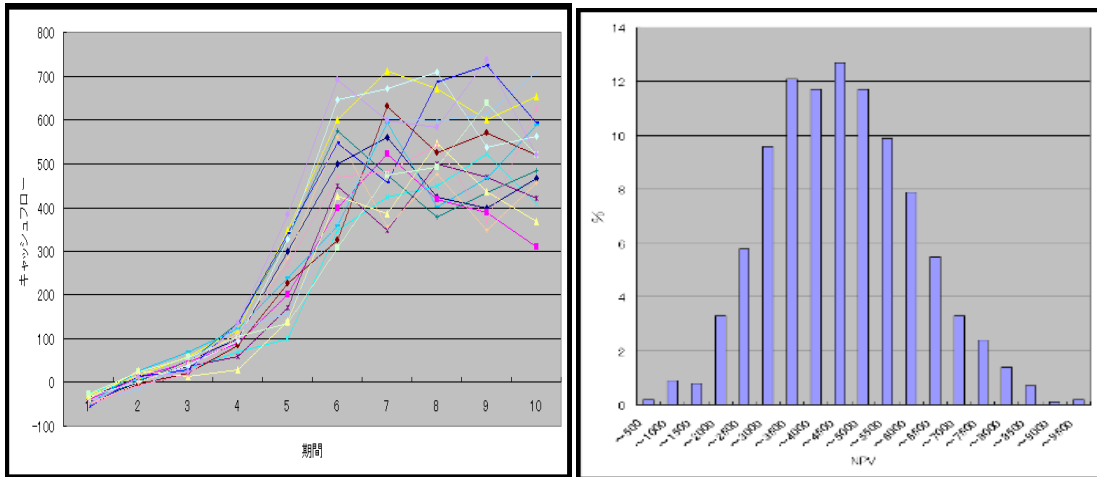
出典：さくら共同法律事務所ホームページ DCF法の数学的基礎

図3-1 DCF法概念図¹⁾

b) モンテカルロDCF法

モンテカルロDCF法とは、DCF法にモンテカルロシミュレーションを応用した手法である。また、モンテカルロシミュレーションとは、将来生じうる事象を確率分布として定義し、その確率分布に対応した乱数を大量に発生させることで現実起こりうる事象について検証する手法である。事業に関する不確実性が大きく将来発生する利益を正確に見積もることができない場合、各期に発生する利益について確率分布を定義し、発生しうる事象を何百万通りもシミュレーションし不確実性を考慮する。

この手法では、経営上のオプションについては考慮していない。(図3-2)



出典：鈴木公明,「特許権価値評価法の変遷」

図3-2 モンテカルロDCF法²⁾

c) デシジョンツリーアナリシス (決定木分析)

デシジョンツリーアナリシスとは、選択可能性のある経営オプション（選択肢）を時系列順に樹形図を用いて表現し、各ノードに至る確率を用いて事業価値を算出する方法である。フレキシビリティを考慮するが、ペイアウトがデシジョンツリーのどこにあるかで変化するため、不確実性も変わることが明らかである場合でも、割引率が一定ある前提で用いられ、この点でデシジョンツリーアナリシスは不適切と言える。

d) リアルオプション法

リアルオプション法とは、不確実性の大きい事業経営に対して選択可能な複数の経営オプション（選択肢）が存在する時、その不確実性や経営オプションの選択可能性を考慮しながら動的に事業価値を算出する方法である。これは上述c)デシジョンツリーアナリシスにおける経営オプションに柔軟性を持たせ、その時の状況によって様々な活動オプションを決定することで、プロジェクト全体の成果を最大化しようとする手法である。派生証券の価格付け理論をもとに構築された比較的新しい手法であり、Myersが初めて"Real Option"という用語を公式に用いた³⁾。

リアルオプション法は、金融工学の評価方法を応用し、実物に対する投資の事業価値を評価する方法である。投資対象の実物価値を原資産、投資金額を行使価格、投資の延期/追加投資/撤退等の選択肢をオプションとして評価する。また、意思決定のフレキシビリティをモデル化すると共に、一物一価の法則に基づき複数ポートフォリオが作成されるため、裁定機会を排除し、フレキシビリティを考慮してプロジェクトの価値を正確に評価できる。リアルオプション法は、正味現在価値法（NPV）と比較し、投資における柔軟性が生み出す価値を評価に反映できる特徴を有する。

e) 本研究におけるリアルオプション法

ここで、上述d)のファイナンス論におけるリアルオプションと、本研究のリアルオプションの違いについて説明する。ファイナンス論における派生証券としてのオプションの市場は完備市場であり、ポートフォリオの複製が常に可能である。このとき無裁定条件により、一物一価の法則が働きオプションの価格は一意に定められる。一方、本研究で想定している取引は相対取引又は入札取引であり、売り手と買い手は経営資源や価値創造能力が異なることによって、鉱山事業価値に対する評価価格に差異が生じる。これによって、売り手は鉱山事業の売却利益を獲得する可能性がある。よって本研究では、売り手にとって資産売却利益を獲得する取引機会が存在するという仮定に基づいてモデルを構築する。

また、鉱山事業経営に際しては維持オプション、拡大オプション、縮小オプション、売却オプションが考えられるが、本研究では鉱物資源の採掘量は毎期一定量と仮定し、維持オプションと売却オプションのみを考えるものとする。

3.2.2 既往研究の概要

「リアルオプション」という用語は、実物資産への投資がオプションであると最初に認識したMayersに遡る。Mayersは、多くの企業資産や成長の機会がコールオプションと見なせ、そのオプションの価値は企業による将来の投資に依存するとした。リスク債務の発行は、最適ではない投資戦略の実行、又は企業と債権者に準最適戦略を避けるためのコスト負担により、リアルオプションを保有する企業の市場価値を低下させる。企業の借入がリアルオプションによって占める市場価値の割合に反比例すると仮説を立て、企業の借入の他側面、例えば資産満期と負債マッチングの実践を合理的に分析した³⁾。

BlackとScholesは、オプションが市場で適切に価格設定されている場合、オプション及び株式のロングポジションとショートポジションのポートフォリオを構成することにより、利益を確保することはできないと説明し、その原則を活用し、オプションの再評価基準を導出した。また、多くの企業負債はオプションの組合せと見做せ、これを表す公式と分析は、普通株式・社債・ワラント債等の企業負債にも適用される。この公式は、債務不履行の可能性を社債に反映する割引率の算出に活用できる⁴⁾。

Myers以降リアルオプションを用いた研究は多数行われてきた。リアルオプションの分野で代表的な研究者としては、Trigeorgis, et al.が挙げられる。Trigeorgisは、経営選択として延期オプション、段階オプション、拡大・縮小オプション、撤退オプション、転用オプション、成長オプションを提示し、各オプション価値の算出を試みた⁵⁾。Dixit and Pindyckは、不確実性の存在する事業に対する投資の機会をアメリカンコールオプションと同質のものと考え、事業価値を算出することを試みた⁶⁾。また、従来の評価手法との比較を行った研究としてMyers, Trigeorgis and Manson, Dixit and Pindyck等の研究が挙げられる。Myersは、DCF法の限界を指摘し事業価値評価にオプション理論を用いるべきだと主張した。Trigeorgis and Mansonは、不確実性の存在する経営環境下においてはDCF法では正確な事業評価が行われないことを指摘した⁷⁾。Dixit and Pindyckは、DCF法を用いた事業評価では事業投資の延期という経営選択を行うことができず、事業全体としての価値評価にずれが生じることを指摘している⁸⁾。

一方、鉱山事業の価値評価方法としてリアルオプションを活用した先行研究には以下がある。Brennan and Schwartzは、鉱山の運営に関する最初の研究を行っており、資源価格の値動きをランダムウォークによってモデル化し、投資政策の価値評価を行っている⁹⁾。Aminul, et al.は、価格変動を幾何ブラウン運動によってモデル化し、外生変数が変化したときの鉱山の価値変動についてPDE（偏微分方程式）を用いて分析し、最適な経営戦略の分析を行った¹⁰⁾。Inthanongsone, et al.は、リアルオプションを用いた露天掘りの鉱山の経営選択決定フレームワークを構築し、その適用と分析を行った。分析では延期オプションや拡大オプションを適用した際の事業価値を算出し検討している¹¹⁾。

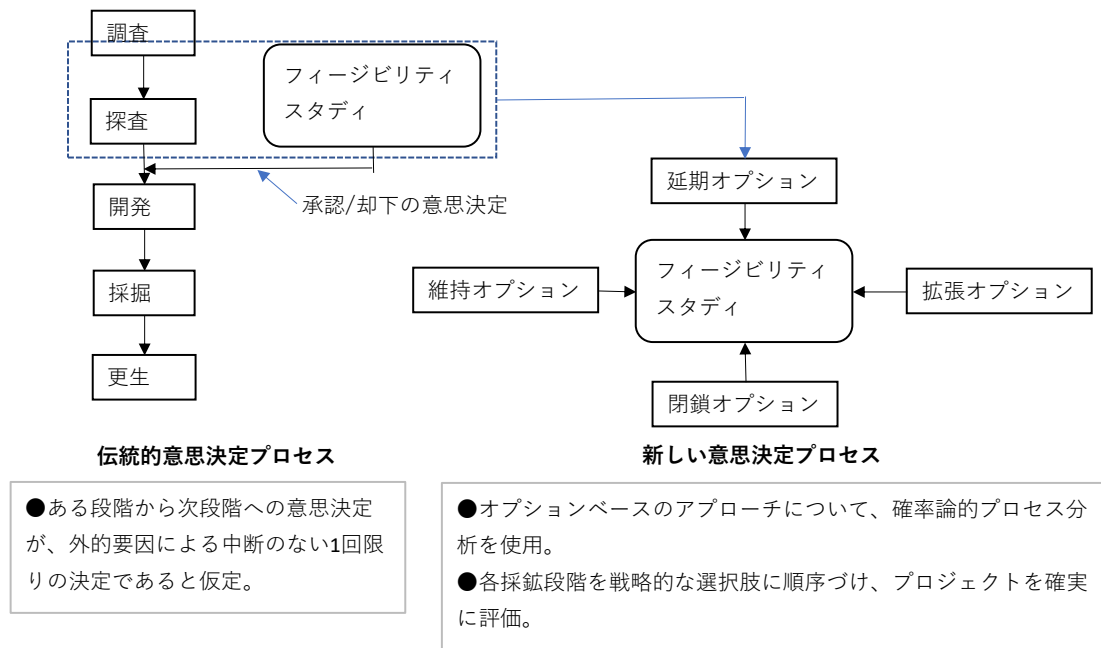
Haque, et al.は、鉱山プロジェクトの不確実性の下で、PDEを構成し、その数値又は近似値を求めた。資源価格の不確実性を低減するため、デルタ・ヘッジ及び先物契約のPDEを導出するためのオプションとして使用した。事例研究として、金鉱を想定した鉱山プロジェクトの数値を近似するためにPDEを利用、明示的差分法（FDM）とMatLabソフトウ

ェアを使用し、鉱山プロジェクトに関連するオプションを考慮の上、プロジェクト価値を算出した。更に、資源価格の変動性を過去のデータから分析し、価格変動が鉱山プロジェクト価値に重大な影響を及ぼすことを明示した¹²⁾。

Ajak and Erkanは、鉱山プロジェクトにおけるリアルオプションをレビューし、鉱山操業に於ける鉱山設計と意思決定におけるリアルオプションの技術的応用を探る新しい方法論を提案した。また、生産決定が頻繁に行われる鉱山操業レベルでのリアルオプション法の使用の適合性を検証。鉱石グレードの変化及び資源価格の変動に関するピット間の切り替えオプションを作成するため、鉱床に複数ピットを設計する際にリアルオプションをどのように使用できるかを分析した。その結果、鉱山設計に柔軟性が含まれていた場合、プロジェクト価値が向上、プロジェクト価値の増加は、設計に組み込んだオプション数に応じて、8%~15%の上昇であることを明示した¹³⁾。

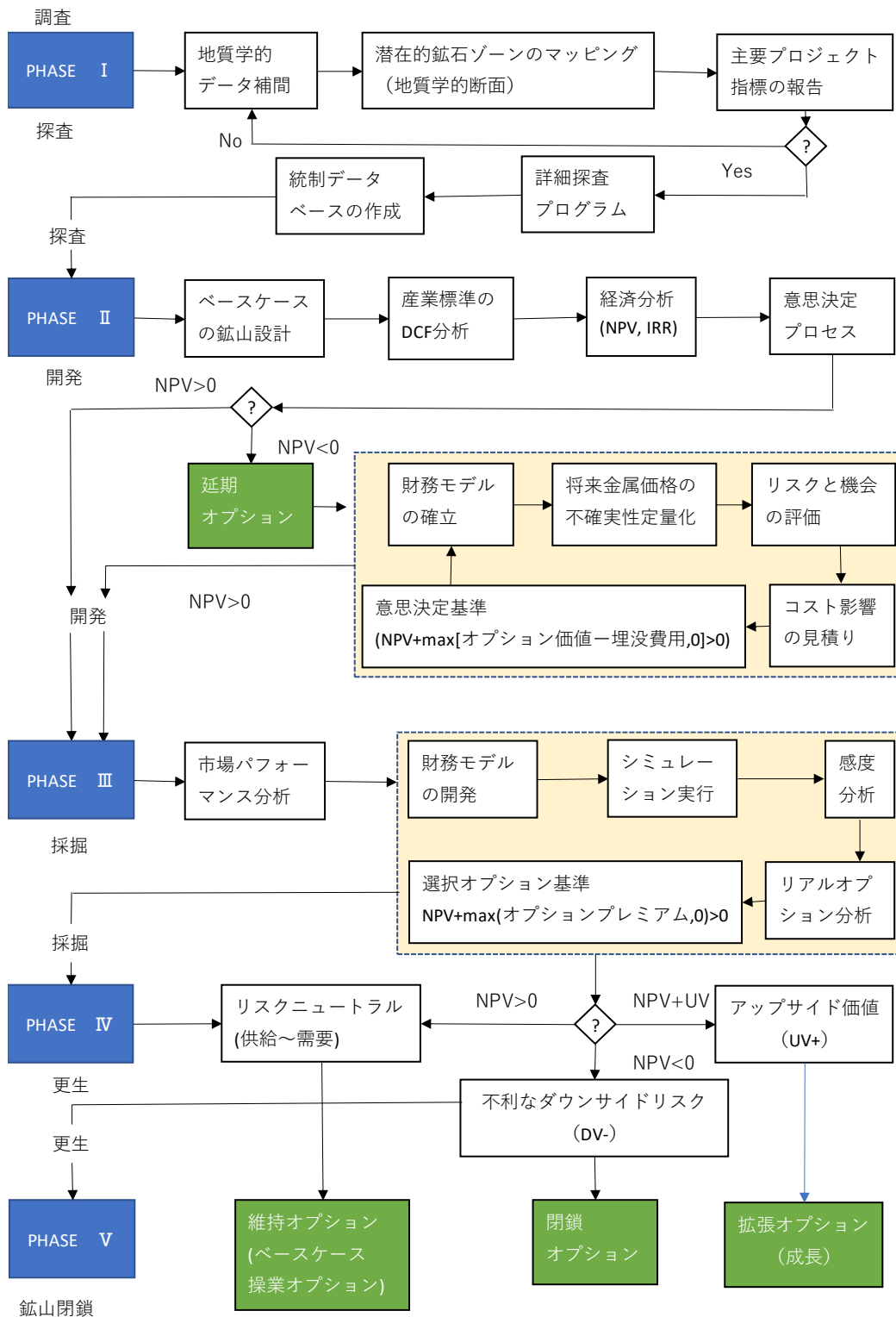
Inthavongsa, et al.は、オープンピット鉱山計画プロジェクトのダイナミクス意思決定ツール (DDMT) 開発に向けたアプローチ方法を分析した。鉱山事業では、4つの戦略的運用オプション (延期/維持/拡張/停止オプション) を想定。リアルオプション分析

(ROV) は、経営者がプレミアムを前払いして特定のオプションのコミットを決定することにより、不確実性を扱うDCF手法を上回る。これは管理上の柔軟性が、上向きの投資機会から価値を獲得する上で重要な役割を果たす事を意味する。DCFとROVは共に、金額の時間価値を考慮するが、主な相違点は、ROVではプロジェクトのライフサイクルの一定の間隔で「時間価値の値」を取得できることである¹⁴⁾。(図3-3, 3-4)



出典：Inthavongsa et al.(2016)より作成

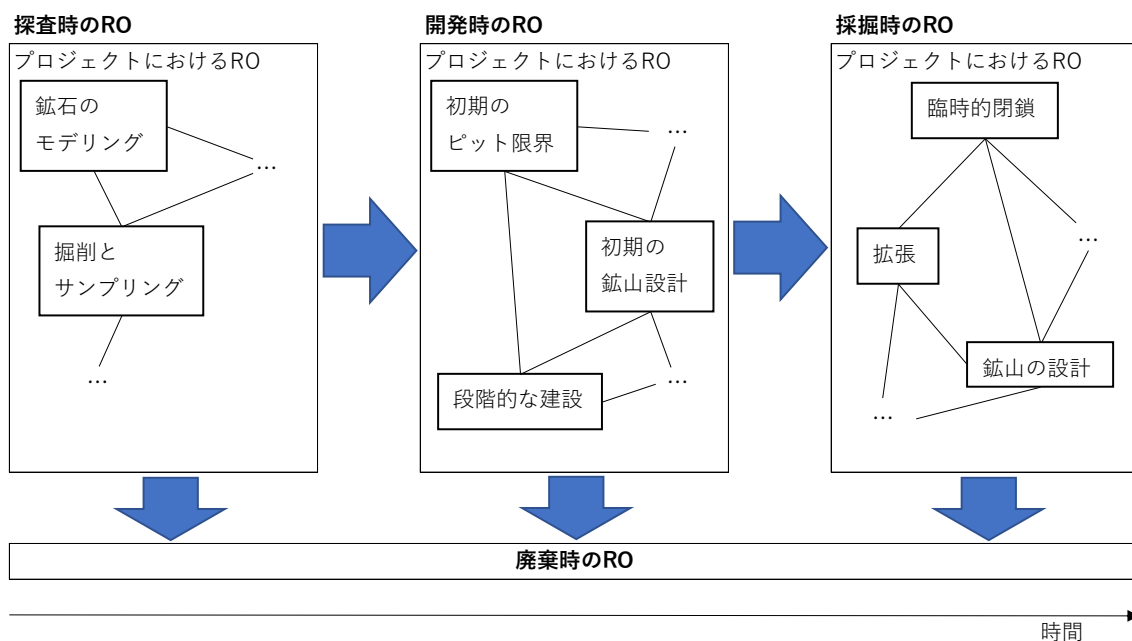
図3-3 鉱山事業の意思決定プロセス



出典：Inthavongsa et al.(2016)より作成

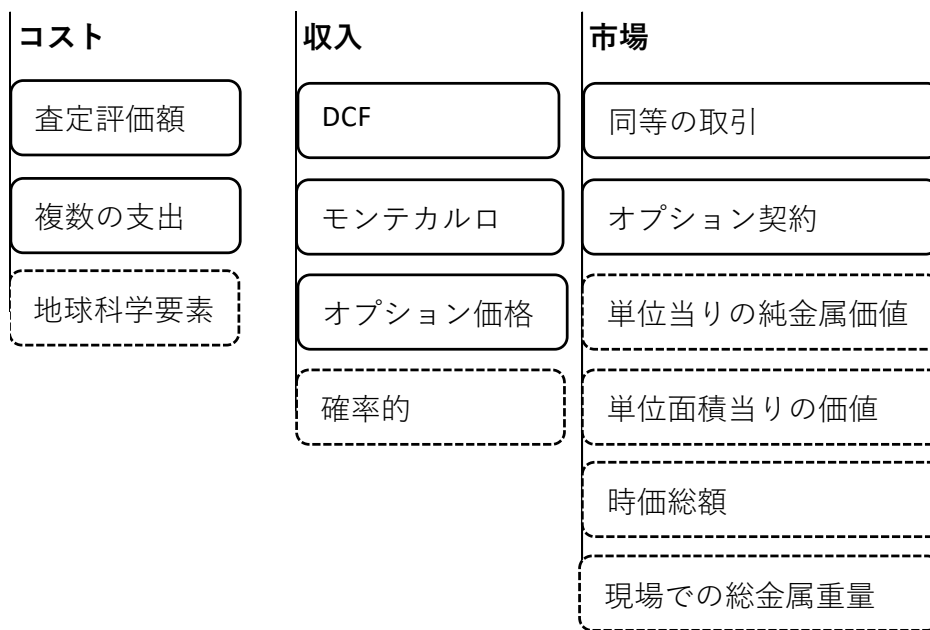
図3-4 リアルオプションの意思決定フレームワーク

Savolainenは、金属鉱業投資のリアルオプション分析を扱う学術文献の文献レビューを紹介した。リアルオプションは、市場の不確実性の増大と新しいプロジェクトの複雑さにより、金属資源採掘において重要になっている。プロジェクト分析に適用されるリアルオプションの評価方法は、予想される経済的利益をヘッジし、増大させる。またレビュー文献を使用した評価アプローチ及び実際の選択肢の種類に基づいて分類した¹⁵⁾。(図3-5～3-7)



出典：Savolainen(2016)より作成

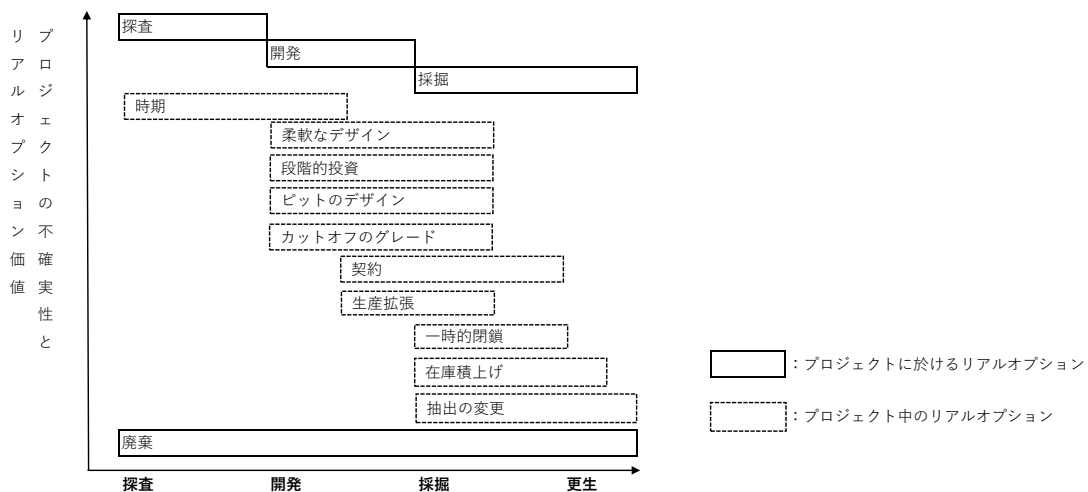
図3-5 金属資源事業に適用されるリアルオプション区分



は二次的及び非分類的方法

出典：Savolainen(2016)より作成

図3-6 評価アプローチ・方法の分類



出典：Savolainen(2016)より作成

図3-7 プロジェクトライフにおけるオプションの利用可能性

以上より、従来のリアルオプションを用いた研究は金融工学のオプション理論をベースに採用したものであり、資産売却利益を獲得する取引機会が存在しないという仮定のもと

で行われた研究が多く、鉱山の売却を想定した鉱山運営に関する研究は前例がない。更に、多くの研究は、リアルオプションに関する理論研究や定量分析に留まるものであり、実務上利用することを目的とするものではない。そこで本研究では資産の例として商社が保有する鉱山を挙げ、商社の鉱山事業売却の意思決定に資するモデルの構築を目標とした研究を行う。

3.3 モデルの構成

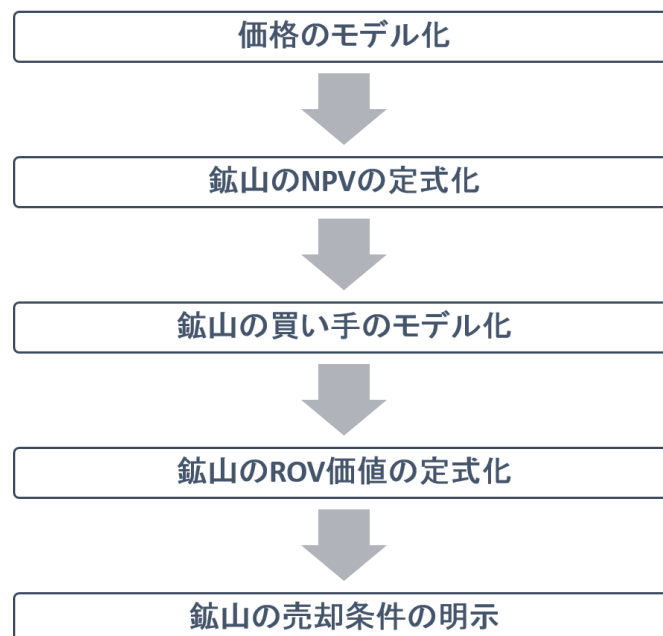


図3-8 モデル構造

3.3.1 モデルにおける前提

本研究におけるモデルでは、単位重量を1ポンドとする（1MT=2,204.62ポンド）。また、1期は1ヶ月であり、金額は米ドル表示として為替レートの影響を無視する。

3.3.2 鉱山のNPVの定式化

DP (Dynamic Programming)の考え方をを用いて鉱山のNPVを定式化する。

$$V_t(S_t) = q(S_t - A) - M + e^{-k} \cdot E_t[V_{t+1}(S_{t+1})] \quad (3.1)$$

ただし、 V_t は t 期時点に算定された鉱山のNPV、 S_t は t 期における銅の価格、 q は1期当りの採掘量、 A は単位可変費用、 M は固定費、 k は企業が計算で用いる割引率を表す。また、想定最終採掘年度を T と表す。

右辺の各項の意味を説明する。 $q(S_t - A) - M$ は、 t 期に行う採掘によって発生する利益である。 t 期の収入は、 qS_t と表され、 t 期の費用は、採掘量に比例して発生する可変費用 qA と、採掘量に依存せず、每期定額発生する固定費 M の和として $qA + M$ と表される。収入から費用を差し引いた値が利益となる。また、 $e^{-k} \cdot E_t[V_{t+1}(S_{t+1})]$ は、 $t + 1$ 期以降に発生すると期待される利益を t 期において知りうる情報のみ用いて算出した期待値に対して現在価値に割り引いた値を表している。この式と、終端条件： $V_{T+1}(S_{T+1}) = 0$ を用いることにより、NPVを後ろ向きに計算することが可能になる。

この式を逐次展開していくと、

$$V_t(S_t) = E_t \left[\sum_{\tau=t}^T e^{-k(\tau-t)} \{ q \cdot (S_\tau - A) - M \} \right] \quad (3.2)$$

と表せ、更に、確率変数は S_t のみであることから、更に以下のように書き換えることができる。

$$V_t(S_t) = \sum_{\tau=t}^T e^{-k(\tau-t)} \{ \quad \} \quad (3.3)$$

上の式より、 t 期の鉱山のNPVが各期における期待利益の現在割引価値の総和であることが明瞭に説明できる。

3.3.3 鉱山の ROV 価値の定式化

a) 鉱山の買い手のモデル化

τ 期に確率 p_τ で鉱山の購入希望企業が現れると仮定する。その企業の提示する購入価格はNPVにマージン (α) を付加した、 $\alpha V_\tau(S_\tau)$ ($= R_\tau(S_\tau)$)である。 α は、一様分布 $[1, \beta_\tau]$ に従う確率変数である。

マージン (α) について以上のように仮定する理由としては、現れる買い手について様々な購入者を想定しているためである。例えば、鉱山ビジネスによる利益を求める企業

や、資源に対する価格支配力を高めたい資源メジャー等が考えられ、それぞれの戦略や内部事情によって同一条件下でも鉱山に対する評価が異なると考えられるためである。

b) 鉱山のROVの定式化

3.2.2と同様にDPを用いて鉱山のROV (Real Option Valuation) 価値 ($W_t(S_t)$) の定式化を行う。①買い手が現れた時のROV価値 $W_t^A(S_t, \alpha)$ は、

$$W_t^A(S_t, \alpha) = \max\{\alpha V_t(S_t), W_t^D(S_t, \alpha)\} \quad (3.4)$$

②買い手が現れなかった時のROV価値 $W_t^D(S_t, \alpha)$ は、

$$W_t^D(S_t, \alpha) = q(S_t - A) - M + e^{-k} \cdot E_t \left[(1 - p_{t+1}) W_{t+1}^D(S_{t+1}, \alpha) + \frac{p_{t+1}}{\beta_{t+1}} \int_1^{\beta_{t+1}} W_{t+1}^A(S_{t+1}, \alpha) d\alpha \right] \quad (3.5)$$

と表現することができる。 p は買い手が現れる確率を表し、 β は買い手が提示する買い取り価格 V_t に対する比率の最大値を表す値である。

①では、買い手の提示する価格が鉱山を所有し続けることで発生すると期待される価値を上回った場合は鉱山を売却し、下回った場合は鉱山を売却せず資源の採掘を継続する。

②では、 t 期に売却することはできないため、 t 期では採掘を行い、キャッシュフロー (CF) として $q(S_t - A) - M$ を獲得し、次期以降の期待CFの期待値の現在価値を加算したものを t 期における期待CFとする。

当期に鉱山の売却を行わないとした場合の鉱山の価値はこの二つの式をまとめたもので、以下に示す。

$$W_t(S_t) = q(S_t - A) - M + e^{-k} \cdot E_t \left[(1 - p_{t+1}) W_{t+1}(S_{t+1}) + \frac{p_{t+1}}{\beta_{t+1}} \cdot \int_1^{\beta_{t+1}} \max\{\alpha V_{t+1}, W_{t+1}(S_{t+1})\} d\alpha \right] \quad (3.6)$$

この定式化は本研究において最も重要な意味を持つ。なぜなら、金融工学の標準的な理論では、資産の価値は式(3.3)で表されるNPVに一致すると想定しているため、資産の保有・売却のどちらを選んでも、将来に得られる期待CFの割引現在価値は変化しない。すなわち、資産売却利益を獲得する取引機会は存在しない。しかし、本研究では、鉱山売却により利益を獲得する取引機が存在すると考える。この取引機会を表現するための変数

が、 p_t と β_t である。 p_t は取引機会が到着する確率を表す変数であり、 β_t は獲得利益の大きさに関する変数である。

3.3.4 鉱山の売却条件

鉱山の所有者は、以下条件下で鉱山事業の売却を行う。

$$\alpha V_t(S_t) \geq W_t(S_t) \quad (3.7)$$

これは買い手の提示する価格 $\alpha V_t(S_t)$ が、保有価値（ROV価値 $W_t(S_t)$ ）を上回ったとき鉱山事業を売却すべきであることを示している。

3.4 価格モデルの設定とモデルの検証

3.4.1 平均回帰モデル

a) モデルの離散化手続き

資源価格を以下のような平均回帰モデルで表現することを考える。

$$S_t = S_0 \cdot \exp(\mu t) \cdot \exp(\rho_t) \quad (3.8)$$

$$\rho_t = \eta \rho_{t-1} + \sigma \epsilon_t \quad (\epsilon_t \sim N(0,1)) \quad (3.9)$$

式(3.9)はAR(1)過程である。また、 ρ_t は平均的な値からの乖離度を表す値である。この値が平均回帰的な挙動を示すとして、価格についての離散化を行う。まず、式(3.9)より $\rho_t - \eta \rho_{t-1} \sim N(0,1)$ が成立する。また、式(3.9)は、

$$\begin{aligned} \rho_t &= \eta \rho_{t-1} + \sigma \epsilon_t \\ &= \eta(\eta \rho_{t-2} + \sigma \epsilon_{t-1}) \\ &= \dots \\ &= \eta^t \rho_0 + \sigma(1 + \eta + \eta^2 + \dots + \eta^{t-1})\epsilon \end{aligned} \quad (3.10)$$

を意味する。この結果を用いて、 ρ_t の取る値を以下のように $\rho_{t,1}, \rho_{t,2}, \dots, \rho_{t,2N+1}$ の $2N+1$ 個に離散化して表す。

$$\rho_{t,i} = \eta^t \rho_0 - \lambda \cdot \frac{N-i+1}{N} \sigma \cdot (1 + \eta + \eta^2 + \dots + \eta^{t-1}) \quad (1 \leq i \leq 2N+1) \quad (3.11)$$

これを利用して価格を表現すると、

$$S_{t,i} = S_0 \cdot \exp(\mu t) \cdot \exp(\rho_{t,i}) \quad (3.12)$$

のように $S_t = f(t, \rho_t)$ の形で書ける。また、 t 期から $t+1$ 期への推移において、 $S_{t,i}$ から $S_{t+1,j}$ へ変化する確率は次のように表される。

$$\begin{aligned} & \pi_{t \rightarrow t+1}(S_{t,i}, S_{t+1,j}) \\ &= \Phi \left(\frac{\rho_{t+1,j} + \frac{1}{2N} \cdot \lambda \sqrt{\sigma^2} - \eta \rho_{t,i}}{\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{\rho_{t+1,j} - \frac{1}{2N} \cdot \lambda \sqrt{\sigma^2} - \eta \rho_{t,i}}{\sigma} \right) \quad (2 \leq j \leq 2N) \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\pi_{t \rightarrow t+1}(S_{t,i}, S_{t+1,j}) = \Phi \left(\frac{\rho_{t+1,j} + \frac{1}{2N} \cdot \lambda \sqrt{\sigma^2} - \eta \rho_{t,i}}{\sigma} \right) \quad (j = 1) \quad (3.14)$$

$$\pi_{t \rightarrow t+1}(S_{t,i}, S_{t+1,j}) = 1 - \Phi \left(\frac{\rho_{t+1,j} - \frac{1}{2N} \cdot \lambda \sqrt{\sigma^2} - \eta \rho_{t,i}}{\sigma} \right) \quad (j = 2N-1) \quad (3.15)$$

但し、 Φ は標準正規分布の累積分布関数である。

p , β は ρ_t の関数として表現する。しかし $p(\rho_t)$, $\beta(\rho_t)$ の現実的な関数形は不明であるため、上限値と下限値が明確となるロジスティック関数を用いて以下のように簡易的に表現する。 a, b, c, d, f はパラメータである。

$$p(\rho_t) = a + \frac{1-a}{1 + bt + \frac{1-f}{f-a} \exp(-c\rho_t)} \quad (3.16)$$

$$\beta(\rho_t) = 1 + \frac{0.3}{1 + \exp(-d\rho_t)} \quad (3.17)$$

このとき、

$$\lim_{\rho_t \rightarrow -\infty} p(\rho_t) = a \quad (3.18)$$

$$\lim_{\rho_t \rightarrow \infty} p(\rho_t) = 1 \quad (3.19)$$

$$p(0) = f \quad (3.20)$$

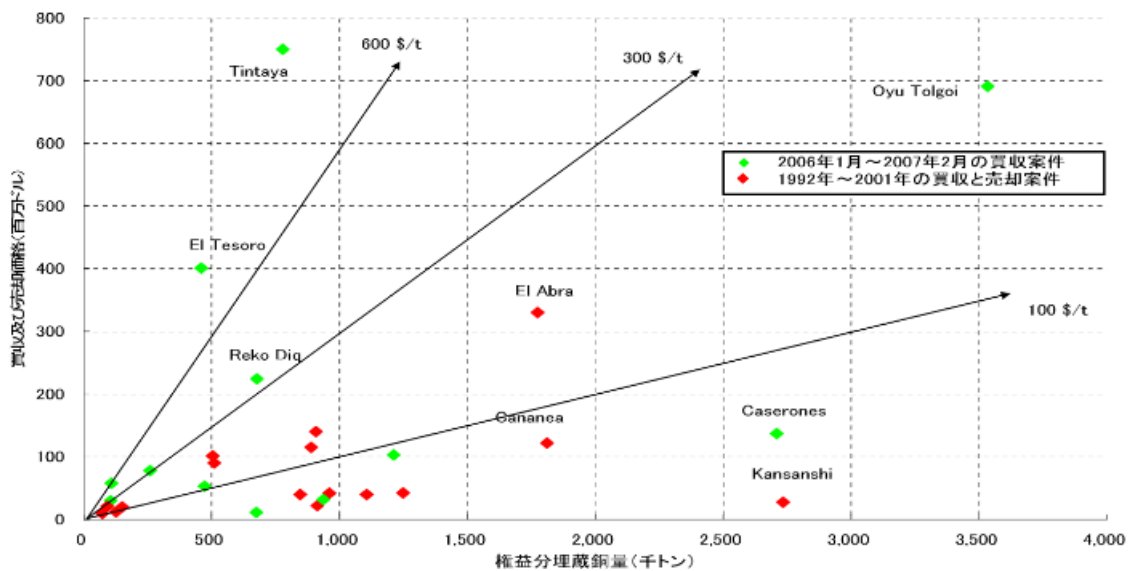
$$\lim_{\rho_t \rightarrow -\infty} \beta(\rho_t) = 1 \quad (3.21)$$

$$\lim_{\rho_t \rightarrow \infty} \beta(\rho_t) = 1.3 \quad (3.22)$$

$$\beta(0) = 1.15 \quad (3.23)$$

という関係が成り立つ。 $\rho_t = 0$ は市況が良くも悪くもない標準的な状態を表す。

ρ_t が大きいとき、すなわち銅市場の市況が良いときは、銅市場の成長性が高く評価されるため、鉱山の買い手が多く現れ、付加されるマージン率が高くなる傾向がある。これは過去事例で証明されており、例えば銅鉱山売却案件の売却コストは、銅市況の低い1992～2001年では全て200 \$/t以下であったが、銅市況が高騰した2006～2007年では600 \$/t以上のものも存在する。つまり、銅市況の良いときは、銅鉱山の売却価格が保有価値を上回り、マージン率が高まることを示している（図3-9,3-10）。



出典：石油天然ガス・鉱物金属資源機構レポート¹⁶⁾

図3-9 銅鉱山の買収/売却価格・コスト比較

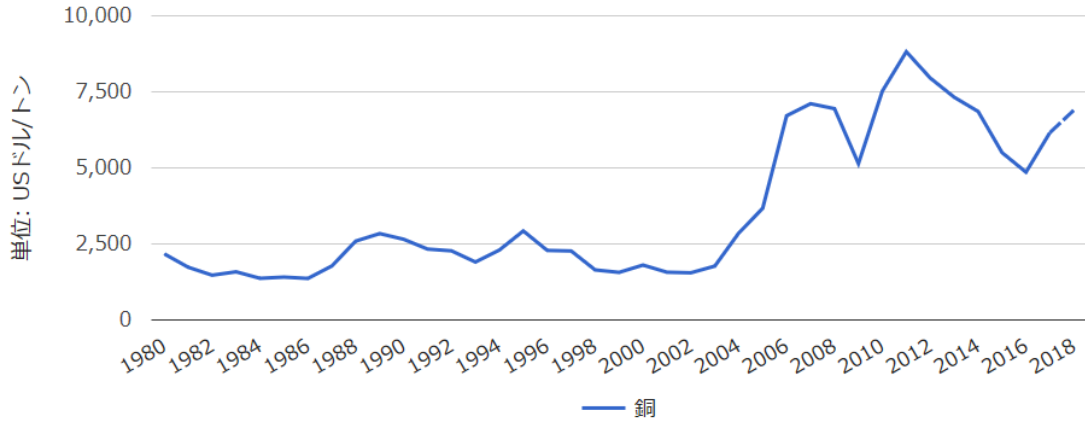


図3-10 LME 銅先物価格推移

式(3.11)-(3.17)を用いると， $V_t(S_t)$ ， $W_t(S_t)$ を定義する式(3.2)，(3.6) は以下のように書き直せる．

$$V_t(S_{t,i}) = q(\exp(Z_{t,i}) - A) - M + e^{-k} \cdot \sum_{j=1}^{2N+1} \pi_{t \rightarrow t+1}(Z_{t,i}, Z_{t+1,j}) \cdot V_{t+1}(S_{t+1,j}) \quad (3.24)$$

$$W_t(S_{t,i}) = q(\exp(Z_{t,i}) - A) - M + e^{-k} \cdot \left[(1 - p_{t,i}) \sum_{j=1}^{2N+1} \pi_{t \rightarrow t+1}(Z_{t,i}, Z_{t+1,j}) \cdot W_{t+1}(Z_{t+1,j}) + p_{t,i} \cdot \sum_{j=1}^{2N+1} \pi_{t \rightarrow t+1}(Z_{t,i}, Z_{t+1,j}) \cdot \left\{ \frac{\tilde{\alpha}(Z_{t+1,j}) - 1}{\beta_{t,i} - 1} \cdot W_{t+1}(Z_{t+1,j}) + \int_{\tilde{\alpha}(Z_{t+1,j})}^{\beta_{t,i}} \frac{1}{\beta_{t,i} - 1} \cdot \alpha V_{t+1}(Z_{t+1,j}) d\alpha \right\} \right] \quad (3.25)$$

$$\tilde{\alpha}(Z_{t+1,j}) = \begin{cases} X_{t+1,j} & (1 < X_{t+1,j} < \beta_{t+1,j}) \\ 1 & (X_{t+1,j} \leq 1) \\ \beta_{t+1,j} & (\beta_{t+1,j} \leq X_{t+1,j}) \end{cases} \quad (3.26)$$

$$X_{t+1,j} = \frac{W_{t+1}(Z_{t+1,j})}{V_{t+1}(Z_{t+1,j})} \quad (3.27)$$

但し， $p_{t,i} = p(\rho_{t,i})$ ， $\beta_{t,i} = \beta(\rho_{t,i})$ である．

価格に関するパラメータ μ, σ の決定方法について述べる．IMF（国際通貨基金）が公表している銅の月次価格（US \$ /1MT）のデータ（1980年1月～2017年6月）を用いて式(3.9)の

推定を行う。モデル推定における資源価格は S_t^r と表し、1980年1月における資源価格を S_0^r とする。また、資源価格のドリフトに関しては、過去のデータから将来の予測を行うことは困難であると考え、 $\mu = 0$ を仮定する。

このとき、 $\rho_t^r = \ln S_t^r - \ln S_0^r$ と書ける。この ρ_t^r について回帰分析を行うと、 $\rho_t^r = \hat{\eta}\rho_{t-1}^r + \hat{\sigma}\epsilon_t$ ($\epsilon_t \sim N(0,1)$)に関して以下の結果が得られる。図3-11より、 $\hat{\eta} = 0.996675$ 、 $\hat{\sigma}^2 = 0.003971$ である。

概要							
回帰統計							
重相関 R	0.994883						
重決定 R2	0.989792						
補正 R2	0.98756						
標準誤差	0.063016						
観測数	449						
分散分析表							
	自由度	変動	分散	調整された分散	有意 F		
回帰	1	172.5068	172.5068	43440.98	0		
残差	448	1.779036	0.003971				
合計	449	174.2859					
	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上限 95%	下限 95.0% 上限 95.0%
切片	0	-	-	-	-	-	-
X 値 1	0.996675	0.004782	208.425	0	0.987277	1.006073	0.987277 1.006073

図3-11 回帰分析の結果

b) パラメータに関する感度分析

このプログラムの運用者がパラメータを決定する際に、パラメータをどの程度厳密に定めるかを決定するための一助となるよう、式(3.16)、(3.17)に含まれる $p(\rho_t), \beta(\rho_t)$ のパラメータ a, c, d, f に関する感度分析を行う。各パラメータについて、

$$0.01 \leq a \leq 0.1 \tag{3.28}$$

$$0.1 \leq c \leq 10 \tag{3.29}$$

$$0.003 \leq f \leq 0.3 \tag{3.30}$$

$$0.1 \leq d \leq 10 \tag{3.31}$$

と変動させたときの $W_t(S_t)/V_t(S_t)$ の変化を調べる。

パラメータ a, c, d については、パラメータの変化に対して $W_t(S_t)/V_t(S_t)$ の変化は 10^{-4} の単位であり影響は小さいと判断できる。(図3-12~3-14)

また、パラメータ f については、モデル運用者の想定する値の幅(± 0.01 程度)は小さく、その範囲内における影響は 10^{-3} の単位であり影響は小さいと判断できる。(図3-15)

以上より、本モデルにおいてはパラメータの設定は最終的な結果に大きな差異を生じさせないと考えられる。

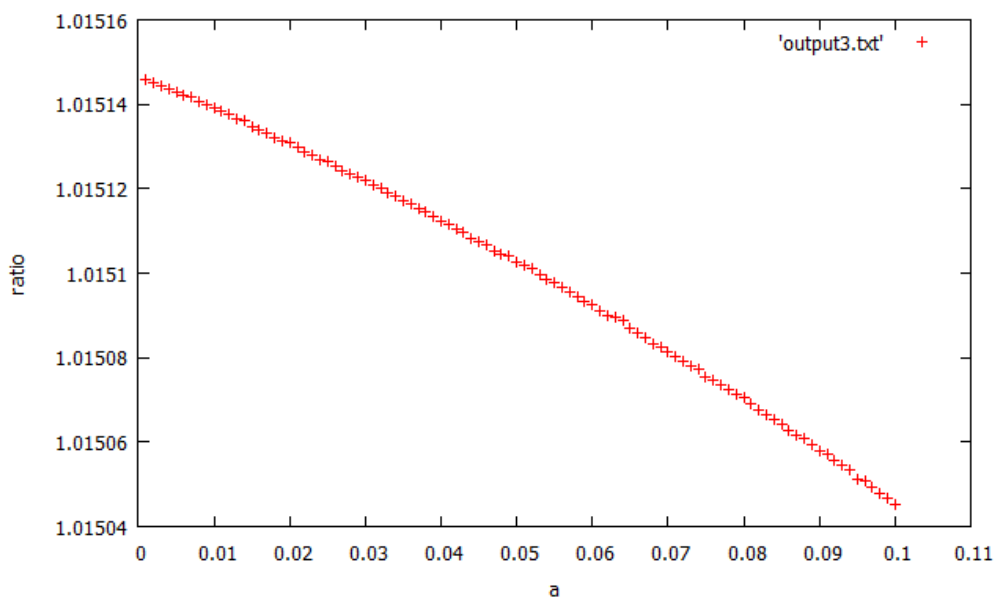


図3-12 a に関する感度分析

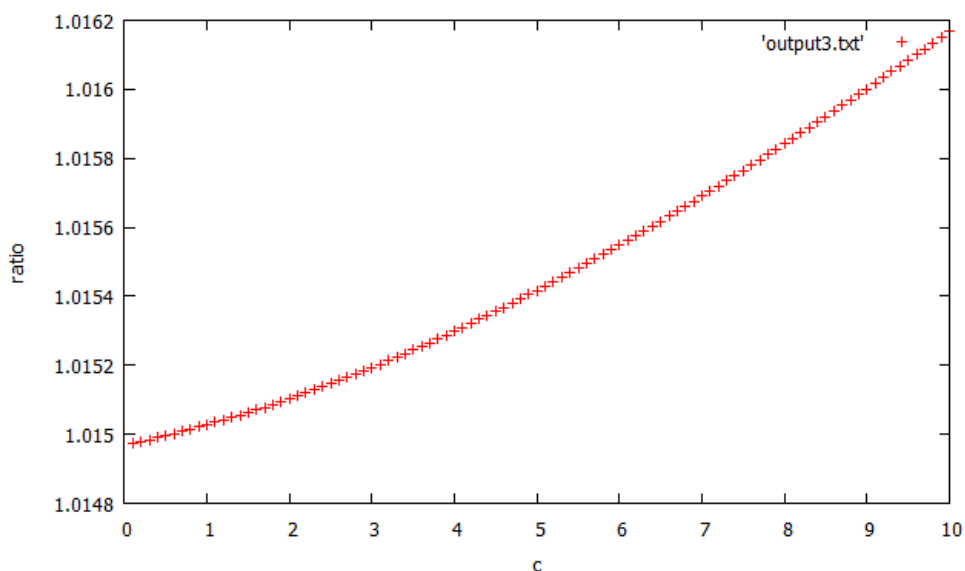


図3-13 c に関する感度分析

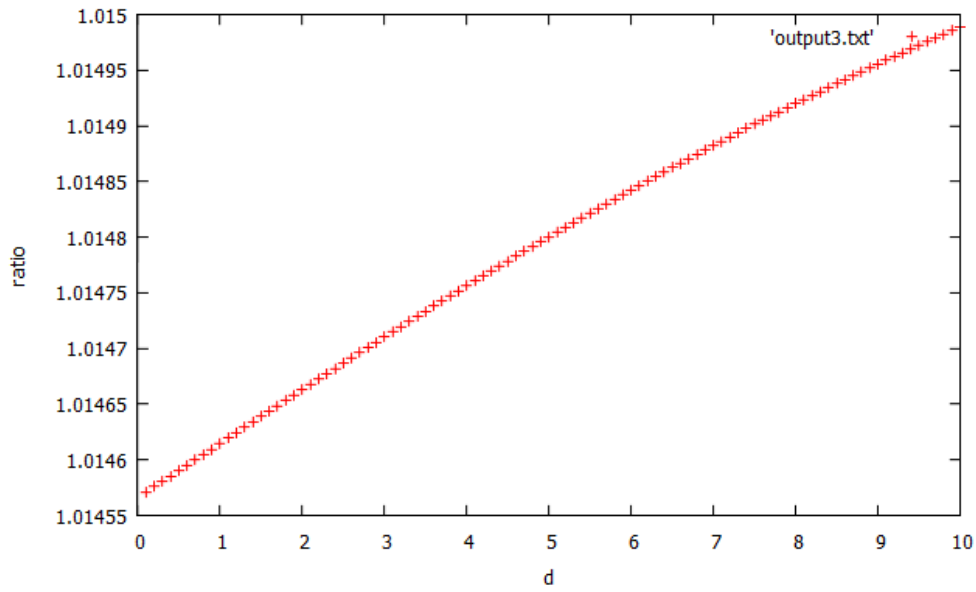


図3-14 d に関する感度分析

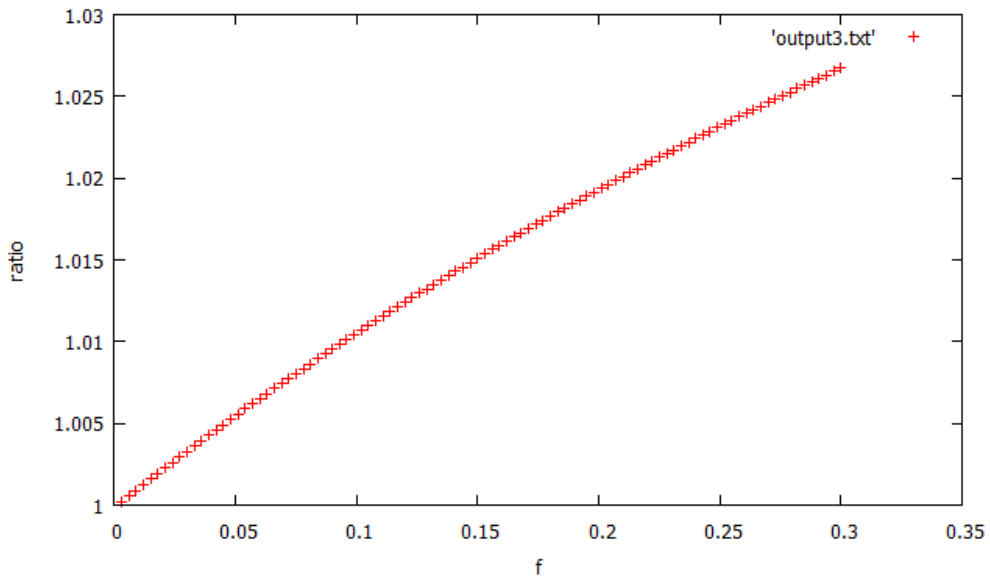


図3-15 f に関する感度分析

c) 数値計算

これらの式を用いて、 $V_t(S_t), W_t(S_t)$ についての数値計算を行う。この結果の妥当性を以下の三次元グラフ($t, S_t, \tilde{\alpha}$)によって考察する。そのためにグラフ(図3-16)から読み取れる以下の2項目について実際の挙動との整合性を考える。

- ① t が大きくなるにつれて $\hat{\alpha}$ の値は1に収束する.
- ② 同一の t においては S_t が大きいほど $\hat{\alpha}$ の値は大きくなる.
- ①については, p が t の増加に伴い減少することで, $W_t(S_t)$ は $V_t(S_t)$ に収束すると推測できる. ②については, 価格 S_t が大きい, 即ち ρ_t が大きいときは, 銅市場の好調さを評価し鉱山に対してより高い価格をつけると考えられる. ①, ②の内容は実務上の整合性があると判断できるため, このモデルによって適切に現実の鉱山事業売買取引をモデリングすることができると考えられる.

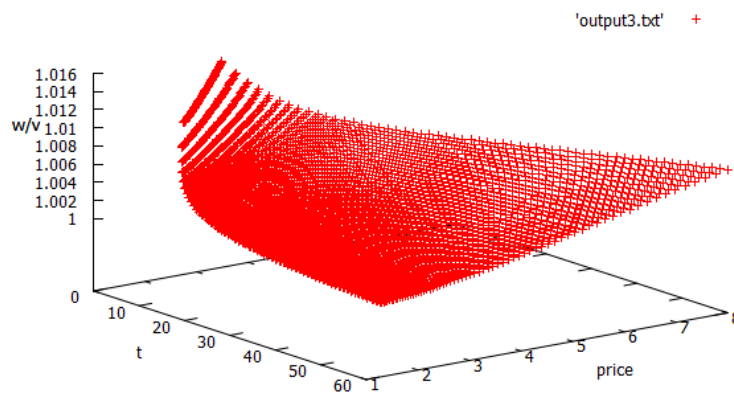


図3-16 数値計算の結果

表3-1 用いた変数

変数	表す値	数値
q	一期あたりの採掘量	1,000,000
A	単位採掘量当たりの採掘費用	0.5
M	一期あたりの固定採掘費用	50,000
k	企業の用いる割引率	0.01
μ	ドリフト	0.001
σ	ボラティリティ	0.06
T	仮定の採掘終了時期(month)	300
a	パラメータ	0.05
b	パラメータ	0.003
c	パラメータ	2.0
d	パラメータ	2.0
f	パラメータ	0.15

3.5 本モデルの実務への応用

従来の手法では、鉱山事業の売却に関する判断に際してNPVを参考に用いていたが、NPVは鉱山の保有の継続を前提とした現在価値であり、売却の判断に際する指標としては有効性が低い。そこで、本研究の成果を利用した意思決定フレームワークを形成することで迅速且つ適切な意思決定をサポートすることができると期待される。鉱山事業の運営会社が本モデルを実務面で活用するためには、買収希望者が現れた際に鉱山事業を売却するか否かについて、即座且つ的確に意思決定できなければならない。この要件を満たすモデル運用方法を述べる。

まず、鉱山事業を買収した時点、もしくは既に所有している鉱山事業についてはモデル運用開始時点を $t = 0$ とする。前章の感度分析を参考にパラメータを決定し、また、資源価格 S_0 を入力して $W_t(S_t)$ を計算する。即ち、鉱山買収時点で、将来時点における鉱山の事業価値を予め算出しておく。

次に、鉱山の買収希望者が現れた時点 t ($\leq T$)として、既に算出されている $W_t(S_t)$ を出力する。本モデルにおいて S_t は離散化されているため、時点 t における資源価格に最も近い値を S_t として選ぶ。

そして、出力された $W_t(S_t)$ と提示価格 $R_t(S_t)$ を比較し、 $W_t(S_t) < R_t(S_t)$ であれば鉱山事業の売却を行う、 $W_t(S_t) \geq R_t(S_t)$ であれば売却を行わない、という意思決定を行うことができる。

これについてグラフを用いて説明する。図3-17は、 $t = 21$ における資源価格とROVについての関係を示した図である。青点(3, 4,000,000)は、 $t = 21$ 時点に現れた鉱山買収希望者が資源価格 $S_{21} = 3$ のとき、鉱山事業を価格4,000,000での買収を希望していることを表したものである。このとき、 $W_t(S_t) < R_t(S_t)$ となっているため、鉱山事業の売却を行うべきと判断することができる。また、緑点(4, 3,000,000)は、 $t = 21$ 時点に現れた鉱山買収希望者が資源価格 $S_{21} = 4$ のとき、鉱山事業を価格3,000,000での買収を希望していることを表したものである。このとき、 $W_t(S_t) \geq R_t(S_t)$ となるため、鉱山事業の売却を行うべきではないと判断できる。即ち、買収希望条件に対応する座標が曲線の上側にあれば売却を行うべき、曲線より下側にあれば売却を行うべきでないと判断できる。

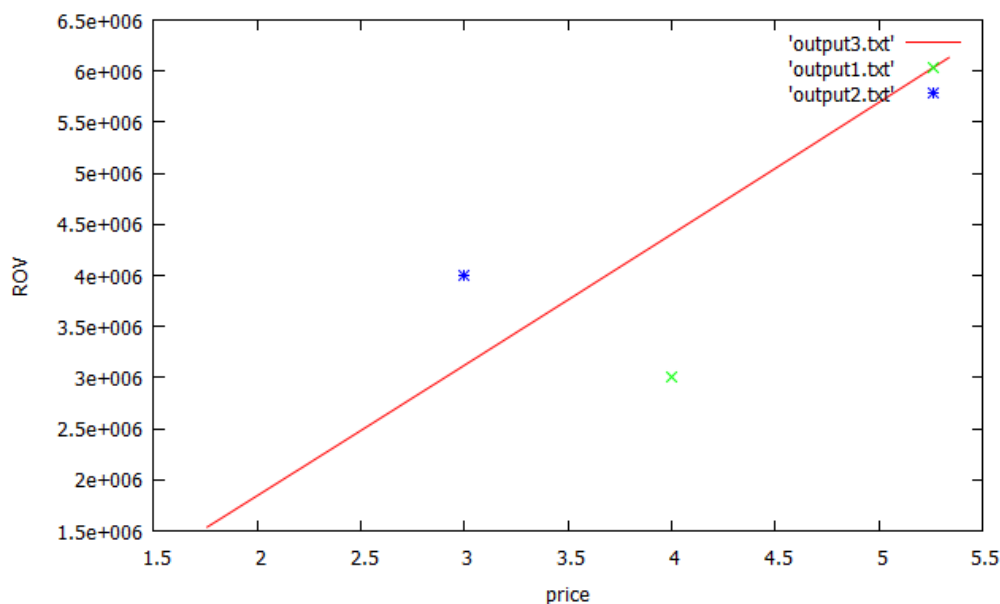


図3-17 売却判断

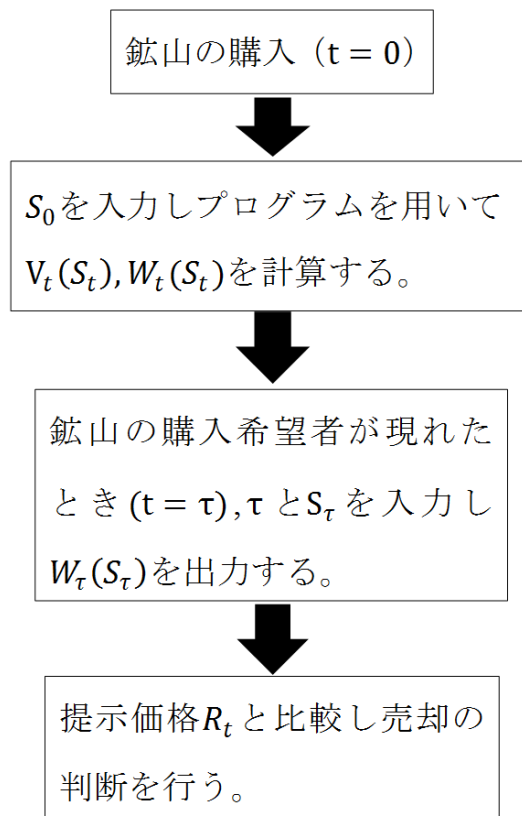
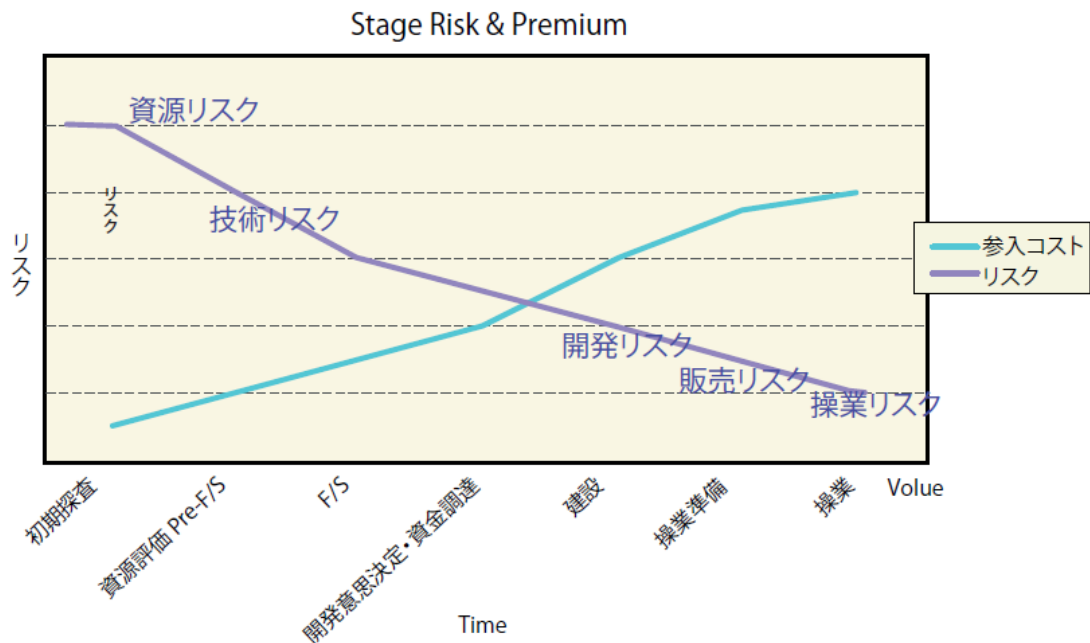


図3-18 運用方法

実務面に於いて、鉱山事業の売却は、探査済／開発済／採掘・操業済の夫々の段階で、入札形式／相対取引での権益売却、又はM&Aによる鉱山事業会社の売却等、様々な形態がある。一方、鉱山事業の其々の段階で、資源リスク／技術リスク／開発リスク／販売リスク／操業リスクの観点から、早期での売却はリスクを免れるが売却価格（参入コスト）が低く、後期での売却はリスクを負担するが売却価格が高くなる傾向がある（図3-19）。また、鉱山事業の価格はその時点の資源市況によって変動する為、売却タイミングをよく見計らう必要がある。



出典：一般財団法人 石炭エネルギーセンター

図3-19 資源開発時期とリスク／プレミアム¹⁸⁾

鉱山事業の運営に当たってのフィージビリティ・スタディ(F/S)は多岐に亘り、主には Technical F/S (技術), Marketing F/S (販売), Legal F/S (法務), Financial F/S (経済性評価)があるが、その中でもFinancial F/Sは最重要項目とされる。鉱山事業会社はF/Sの結果を踏まえ、不確実性の推計・現在価値について他鉱山事業と比較し、有効性を検証する。更に、鉱山事業について、リアルオプションによる事業価値評価と鉱山の収益性の比較、並びに投資意思決定(拡張/維持/延期/閉鎖/買収/売却)を行う(図3-20)。

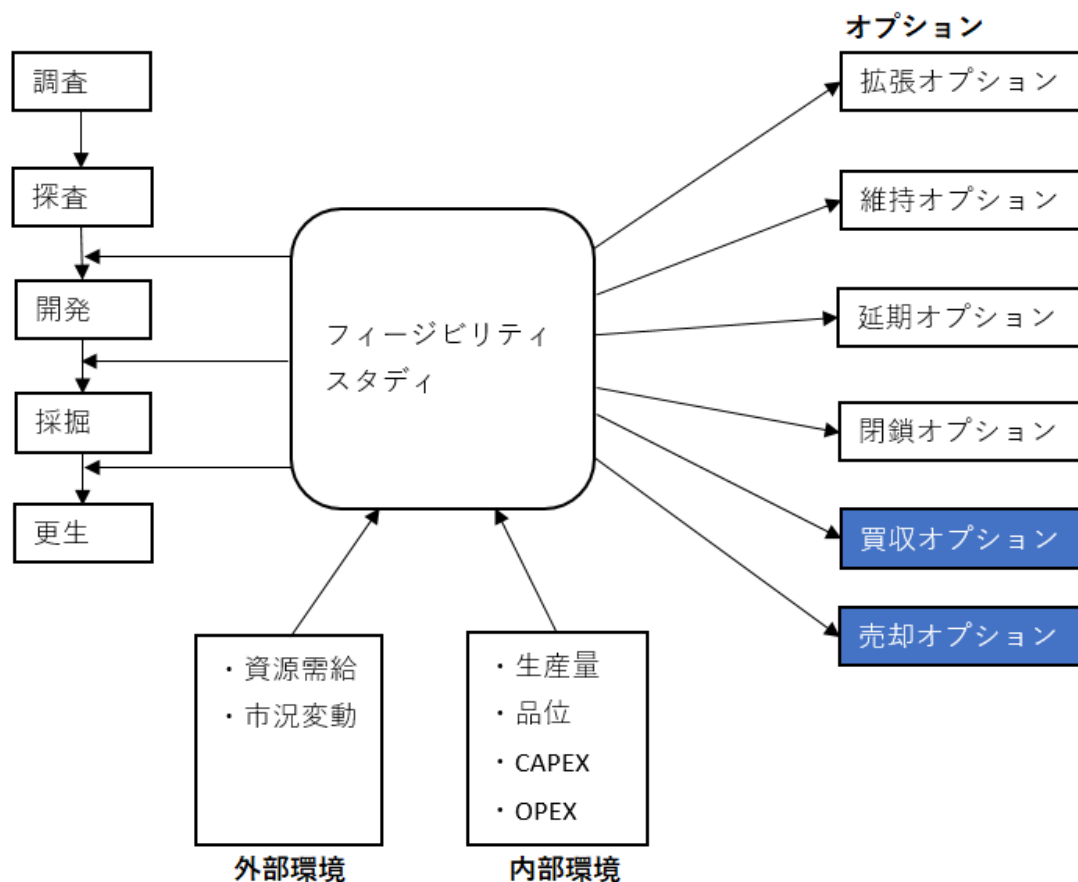


図3-20 鉱山事業に於ける意思決定プロセス

鉱山事業会社は、上述のF/S、事業価値・リスク評価、タイミングの見極めを行った上で売却意思決定するが、入札形式／相対取引／M&A方式で売却するに当たり多岐に亘る検証・行動を要する中、市場環境、鉱山の事業環境、及び売り手と買い手の意向により、実際には鉱山事業の売却には時間的制約を伴うことが殆どである。これは筆者自身が実務上経験してきたことであり、近年の資源会社／商社間、又は商社間同士の鉱山事業売買事例で実証されている。鉱山事業売却に上述課題を抱える状況下、本モデルの活用により、迅速且つ的確なる売却意思決定をサポートできると共に、売却先との条件交渉を優位に進めることが可能となり、実務面での応用性・有用性は高いと言える。

更に、上述の結果及び考察を踏まえて、1.2で設定した仮説5)「鉱山の買収・売却に当たっては、予め鉱山事業の将来価値を算定し、最適タイミングで売買を実行することにより、適正マージンを獲得する。」に対して、本フレームワークの活用により立証が可能となったため、仮説5)は有意であり、妥当と言える。

3.6 結言

本研究においては、商社の鉱山事業の特徴に着目し経営選択として「売却」と「保有・採掘の継続」を設定し、鉱山事業売買取引をモデル化することによって、鉱山事業を適切なタイミングで売却し商社に最大の利益をもたらすための意志決定を可能とする数値計算モデルの構築を行った。また、銅価格の時系列モデルとしては従来幾何ブラウン運動が用いられることが多かったが、本モデルではより現実的な価格変動に近く、且つ1つの確率変数で表現できる平均回帰モデルを用いた。そして、上述3.5で述べた通り本モデルによって算出された値は実務的または定性的に考察した値との整合性をもつことが判明した。本研究によって、市場リスクを有する資産の売却に関する基本的な概念が示されたため、資産の種類や運用目的に応じて柔軟なモデルを構築することが可能になったと考えられる。

商品市場の価格ボラティリティに曝され、埋蔵量・品位・採掘コスト等の変動要因が多く、またライフサイクルを有する鉱山事業において、本意思決定フレームワークの活用により適切な価格・タイミングでの売却意思決定を行い、高い利益の獲得を可能とする。また、本フレームワークは、商社の鉱山事業のみならず、資源メジャー等のグローバルな資源開発・運営会社にも適用可能であり、実務面での示唆に富むと言える。更に、上述の結果により、1.2の仮説5)の妥当性が立証された。

但し、本研究における課題は二つある。第一に、本研究は単一の鉱山の所有を前提としているが、商社は複数の鉱山を所有し、資源ポートフォリオを構築している。よって、資源ポートフォリオの構成を考慮した意思決定モデルの構築を考える必要がある。第二に、商社では鉱山事業以外の非資源事業（機械・生活産業・化学品・インフラ・電力・金融等）多くの事業を営んでおり、経営資源に一定の制限がある環境下において、各事業への経営資源配分を考慮した動的ポートフォリオの最適化を検討する必要がある。

上述課題に対して、前者は第4章で、後者は第5章で検証の上、論ずることとする。

参考文献

- [1] さくら共同法律事務所ホームページ DCF法の数学的基礎
<https://www.sakuralaw.gr.jp/profile/matsumura/>
- [2] 鈴木公明, 「特許権価値評価法の変遷」
<http://www.geocities.co.jp/WallStreet/8900/value/value.html>
- [3] Myers,S.C., "Determinants of corporate borrowing", *Journal of Financial Economics*, Vol.5, pp.147-175, 1977.
- [4] Black,F. and Scholes,M., "The pricing of options and corporate liabilities", *Journal of political economy*, Vol.81, No.3, pp.637-654, 1973.
- [5] Trigeorgis,L., "Real Options and Interactions with Financial Flexibility", *Financial Management, Autumn 1993*, Vol.22, No.3, pp.202-204, Wiley, 1993.
- [6] Dixit,K. and S.Pindyck., "*Investment Under Uncertainty*", Princeton Univ Pr, 1994.
- [7] Trigeorgis,L. and S.P.Manson, "Valuing Managerial Flexibility", *Midland Corporate Finance Journal*, Vol.5, No.1, pp.14-21, New York, N.Y. : Stern, Stewart, Putnam and Macklis 1987.
- [8] Dixit K. and S.Pindyck, "The Option Approach to Capital Investment", *Harvard Business Review*, Vol.77, No.3, pp.105-115, 1995.
- [9] Brennan M. and E.Schwartz, "Evaluating Natural Resource Investments", *The Journal of Buisiness*, Vol.58, No.2, pp.135-157, The University of Chicago Press Journal, 1985.
- [10] Aminul.H, T.Erkan and L.Eric, "A numerical study for a mining project using real options valuation under commodity price uncertainty", *Resource Policy*, Vol.39, pp.115-123, Elsevier, 2013.
- [11] Inthanongsone,I, D.Carsten, B.Jan and S.Phongpat, "Real options decision framework: Strategic operating policies for open pit mine planning", *Resource Policy*, Vol.47, pp.142-153, Elsevier, 2016.
- [12] Haque,M.A., E.Topal, E.Lilford, "A numerical study for a mining project using real optional valuation under commodity price uncertainty", *Resources Policy*, Vol.39, pp.115-123, 2014.
- [13] Ajak,A.D., E.Topal, "Real option in action : an example of flexible decision making at a mine operational level", *Resources Policy*, Vol.45, pp.109-120, 2015.
- [14] Intavongsa,I., C.Drebenstedt, J.Bongaerts, P.Sontamino, "Real option decision framework : strategic operating policies for open pit mine planning", *Resources Policy*, Vol.47, pp.142-153, 2016.
- [15] Savolainen,J. "Real option in mineral mining project valuation : review of literature", *Resources Policy*, Vol.50, pp.49-65, 2016.

[16] 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構: "世界の銅鉱業の変化と我が国への影響", p.30,
2007年.

http://mric.jogmec.go.jp/kouenkai_index/2007/briefing_071127_3.pdf

[17] 刈屋武昭,山本大輔,『入門リアルオプション』,東洋経済新報社,2001年.

[18] 一般財団法人石炭エネルギーセンター

<http://www.jcoal.or.jp/2.pdf>

第4章 鉱山ポートフォリオの長期最適化

4.1 緒言

鉱山事業は、鉱物資源の世界的な需要と供給のバランスにより価格変動リスクに晒されている。また鉱山事業は、埋蔵量・品位・採掘コスト・輸送コスト・為替・天候・オペレーション能力等複数の要因により採掘量やコストが変動する事業リスクも有しており、単一の鉱山だけでは収益を安定化させることが困難である。したがって、鉱山経営会社は、複数の鉱物資源や鉱山のポートフォリオを形成し、収益やキャッシュフローを平準化させることにより、鉱山事業全体のリスクをコントロールしている。

一方、ファイナンス理論においては、分散不均一性を示す時系列データの分析モデルとしてARMA-GARCHモデルがある。本章においては、ARMA-GARCHモデルを活用し、鉱山ポートフォリオの長期最適化モデルを開発し、具体事例による計算結果を分析の上、実務的な応用及び示唆を示す。最後に1.2の仮説6)に対する検証を行う。

4.2 鉱山ポートフォリオ

4.2.1 既往研究の概要

ポートフォリオの長期最適化に関する先行研究を以下に紹介する。ポートフォリオ最適化に関する理論的な取組みは、1952年のMarkowitzによる平均分散分析に始まる。Markowitzは、投資家が1期間後のポートフォリオのリターンと分散、或いは同等のことであるが、平均と標準偏差にのみ注意を払う場合、どの様にして資産を選ぶべきかを示した。この分析では静的な1期間を想定し、投資家は期末の富のみを考慮しているが、現実には期中でのリバランスや資金の流出入が存在し、通常は長期の最適ポートフォリオが短期のものとは異なることを示した¹⁾。

長期での動的ポートフォリオ選択に関する研究は、1969年にMertonによって始められ、1970年代に多くの研究者によって発展した。Mertonは、投資機会が時間変動する場合に、

長期投資家にとってのポートフォリオの需要を理解する一般的な枠組みを提供した²⁾。

RubinsteinやBreedonは、Mertonの結果が消費リスクという観点からどの様に解釈できるかを示した³⁾⁴⁾。これらのアイデアは他研究者の業績を通じて、マクロ経済学に大きな影響を与えてきた。

CambellとViceiraは、従来は閉形式解を得ることが困難であったMertonの異時点間モデルに対して、近似的に解析解を求める手法を開発した。この解は既知の厳密解の摂動を基にしており、厳密解の近傍では正確であることを示した。厳密解が存在するクラスは限界的であるが、この範疇に属さないモデルのポートフォリオ選択においても、解析的な洞察を与えた⁵⁾⁶⁾。

高屋と枇々木は、モンテカルロシミュレーションを用いた動的ポートフォリオ最適化モデルを提示した。本論文では、混合型最適化モデルをベースに投資量関数を工夫し、状態に依存した最適な意思決定が可能な線形近似モデルを提案し、その有用性を検証した。また、既存の確率計画モデル（シミュレーション型モデル、混合型モデル）に加えて、多期間ポートフォリオ最適化問題に対する異なるアプローチ（解析解、モンテカルロ回帰）も含めて、比較分析を行った⁷⁾。

近年では、Cong and Oosterleeが、Brandt et al.が提案した、ダイナミックポートフォリオ管理アルゴリズム⁸⁾を応用し、動的ポートフォリオの管理問題に対する数学的検定方法を提示した。この数学的検定は、COS法(Fang and Oosterlee)⁹⁾に基づくベンチマーク手法による最適な近似式を用いて計算された¹⁰⁾。

またZakamulinは、多期間最適ポートフォリオ選択問題を解決した。本論文では、最適リスク割り当てのポートフォリオ選択問題を最適資本配分問題から分離した。最適な資本配分は、リスクのあるポートフォリオの分散に反比例するリスクのあるポートフォリオのポジションを保持することにある。更にポートフォリオ管理者が取引コストの量を劇的に減らすことを可能にし、実市場における時間の経過と共に最適なポートフォリオリスクコントロールを実施するための可能なアプローチを提示した¹¹⁾。

上述の通りポートフォリオの長期最適化に関する理論は歴史的に多く研究されているが、基本的に金融工学に基づき、投資家から見た金融商品ポートフォリオの長期最適化について論じられている。一方、企業の事業に対するポートフォリオ最適化の研究は少なく、特に商社のように多くの異質の事業を持つ企業における鉱山ポートフォリオの長期最適

化に関する研究は類を見ない。したがって、本研究では商社における鉱山ポートフォリオの長期最適化について論じる。

4.2.2 商社における鉱山ポートフォリオ

商社における鉱山事業は、単に投資に対するリターンを求めるものではなく、採掘された鉱物資源のトレーディング事業とのシナジー、及び最終需要家に至るまでのバリューチェーン構築による付加価値向上等を総合的に勘案して経営されている。したがって、商社は通例、短期的な鉱山売買による売却差益獲得よりも、寧ろ鉱山の長期保有を前提とした事業収益獲得を狙っている。この場合、商社の鉱山ポートフォリオは近視眼的なポートフォリオではなく、連続時間における戦略的アセットアロケーションを実施し、鉱山ポートフォリオの長期最適化を訴求している。よって、上述4.2.1の既往研究を踏まえて、鉱山のポートフォリオモデルを開発及び分析する。

4.2.3 モデルの説明

モデルの開発に当たっては、時系列分析におけるARMA-GARCHモデルを活用する。まず、ARMA(p, q)モデル（自己回帰移動平均：Auto-Regressive Moving Average）は、AR(p)モデル（自己回帰：Auto-Regressive）とMA(q)（移動平均：Moving Average）を連結させた時系列モデルであり、(4.1)の通り表せる。

$$X_t = a_1 X_{t-1} + a_2 X_{t-2} + \dots + a_p X_{t-p} + b_1 \varepsilon_{t-1} + b_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + b_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (4.1)$$

ここで、 X_t は t 期の期待値、 a_i と b_i は係数、 ε_t は t 期の予測誤差とする。したがって、ARMA(1, 1)モデルは、(4.2)となる。

$$X_t = a_1 X_{t-1} + b_1 \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4.2)$$

一方、GARCH(p, q)モデル（一般化自己回帰条件付き不均一分散：Generalized Auto-Regressive Conditional Heteroscedasticity）は、(4.3)の通り表せる。

$$h_t^2 = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i \varepsilon_{t-i}^2 + \sum_{i=1}^q \gamma_i h_{t-i}^2 \quad (4.3)$$

ここで、 h_t^2 は t 期の条件付き分散、 β_i と γ_i はパラメータとする。したがって、GARCH(1, 1)モデルは、(4.4)となる^{12)~15)}。

$$h_t^2 = \beta_0 + \beta_1 \varepsilon_{t-1}^2 + \gamma_1 h_{t-1}^2 \quad (4.4)$$

4.3 鉱山のポートフォリオモデル

4.3.1 モデルの前提

時刻を $t = 0, 1, 2, \dots$ のように離散的に表す。本研究のシミュレーションでは、時刻 t の単位に四半期を用いる。

鉱物の種類を N^R とする。 N^R 種類の鉱物をそれぞれ $1, \dots, N^R$ で表す。鉱物 i ($1 \leq i \leq N^R$) の時刻 t の期首における価格を $S_{t,i}$ で表す。 $S_{t,i}$ は以下の非定常時系列モデルに従うとする。

$$\ln \frac{S_{t+1,i}}{S_{t,i}} = \mu_i + \varepsilon_{t+1,i} \quad (4.5)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{t+1} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{t+1,1} \\ \varepsilon_{t+1,2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{t+1,N^R} \end{bmatrix} \sim N(\mathbf{0}, \boldsymbol{\Sigma}) \quad (4.6)$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & l_{12}\sigma_1\sigma_2 & \cdots & l_{1N^R}\sigma_1\sigma_{N^R} \\ l_{12}\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 & \cdots & l_{2N^R}\sigma_2\sigma_{N^R} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{1N^R}\sigma_1\sigma_{N^R} & l_{2N^R}\sigma_2\sigma_{N^R} & \cdots & \sigma_{N^R}^2 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

μ_i は $S_{t,i}$ のドリフトを表す定数である。 $\boldsymbol{\varepsilon}_{t+1}$ は平均がゼロベクトルの多変量正規分布に従う誤差項であり、その共分散行列 $\boldsymbol{\Sigma}$ は式(4.7)で与えられる。 σ_i^2 は $\varepsilon_{t+1,i}$ の分散である。異なる鉱物価格のボラティリティの間には相関関係があると考え、この相関関係を相関係数 l_{ij} ($-1 \leq l_{ij} \leq 1$) によって表現する。 l_{ij} は鉱物 i のボラティリティと鉱物 j のボラティリティの間の相関係数である。 $\boldsymbol{\varepsilon}_{t+1}$ の実現値が判明するタイミングは、時刻 t の期末とする。

4.3.2 鉱山ポートフォリオのモデル化

鉱物 i ($1 \leq i \leq N^R$)を産出する投資対象の鉱山の数を N_i^M とする。鉱物 i を産出する N_i^M 座の鉱山をそれぞれ $1, \dots, N_i^M$ で表す。鉱物 i を産出する鉱山 j ($1 \leq j \leq N_i^M$)が時刻 t に生み出すキャッシュフロー $R_{t,i,j}$ を以下のように定式化する。

$$R_{t,i,j} = q_{t,i,j}(S_{t,i} - c_{i,j}) \quad (4.8)$$

$$q_{t,i,j} = \begin{cases} \min\{\bar{q}_{i,j}, Q_{t,i,j}\} & (S_{t,i} > c_{i,j}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.9)$$

ただし、 $q_{t,i,j}$ は時刻 t における採掘量、 $c_{i,j}$ は鉱石1単位当たりの採掘費用である。 $q_{t,i,j}$ は式(4.9)に従い決定される。採掘を行っても採算が取れない場合には採掘は行われず、採算がとれる場合にはフル操業が行われると考える。 $\bar{q}_{i,j}$ はフル操業時の1期間当たりの採掘量である。 $Q_{t,i,j}$ は時刻 t の期首における埋蔵量である。埋蔵量が $\bar{q}_{i,j}$ を下回っている場合には、当然ながら、採掘量の上限は埋蔵量となる。埋蔵量は採掘に伴い減少する。

$$Q_{t+1,i,j} = Q_{t,i,j} - q_{t,i,j} \quad (4.10)$$

時刻 t における、鉱山 j の価格を $V_{t,i,j}$ で表す。 $V_{t,i,j}$ は式(4.11)に従い決定されると考える。

$$u_v(V_{t,i,j}) = E_t \left[u_v \left(\sum_{\tau=t}^{t+L} \left(\frac{1}{1+r} \right)^{\tau-t} R_{\tau,i,j} \right) \right] \quad (4.11)$$

$$u_v(V) = \begin{cases} \ln V & (rra = 1) \\ \frac{V^{1-rra} - 1}{1-rra} & (rra \neq 1) \end{cases} \quad (4.12)$$

鉱山の価格は、当該鉱山が現在から L 期間内に稼ぎ出すキャッシュフローの割引現在価値の期待値(DCF)をリスク調整したものになると考える。 L は十分に大きい正の定数である。本研究のシミュレーションでは、 $L = 200$ (50年)を採用した。 r は鉱山市場の参加者の1期間当たりの資本収益率である。関数 u_v は相対的リスク回避度一定の効用関数であり、式(4.12)により表される。 rra は鉱山市場の参加者の相対的リスク回避度である。

意思決定者が時刻 t に鉱山 j ($1 \leq i \leq N^R, 1 \leq j \leq N_i^M$)を保有しているかどうかを変数 $h_{t,i,j}$ で表す。 $h_{t,i,j}$ は0か1のいずれかを取り、1のときは鉱山を保有していることを表し、0のときは保有していないことを表す。意思決定者の予算には限りがあり、保有できる鉱山はこの予算内に制約される。時刻 t における予算制約式を以下のように定式化する。

$$\sum_{i=1}^{N^R} \sum_{j=1}^{N_i^M} h_{t,i,j} V_{t,i,j} + s_t = W_t \quad (4.13)$$

W_t は時刻 t の期首における意思決定者の保有資産総額である。 s_t は時刻 t において意思決定者が保有する流動性資産の総額である。 W_t は前期の意思決定に依存して、以下の式に従い決定される。

$$\sum_{i=1}^{N^R} \sum_{j=1}^{N_i^M} h_{t-1,i,j} (R_{t-1,i,j} + V_{t,i,j}) + (1 + \rho)s_{t-1} = W_t \quad (4.14)$$

左辺の総和は、時刻 $t-1$ において鉱山から得られるキャッシュフローと、時刻 $t-1$ の期末において意思決定者が保有する鉱山の資産価値の総額である。 ρ は流動性資産に付く金利である。

4.3.3 ポートフォリオの最適化モデル

鉱山は購入・売却の意思決定を行ってから、購入・売却が実現するまでの間にタイムラグが存在する。そのため、時刻 t に鉱山 j の購入を決定したとしても、 $h_{t,i,j}$ が直ちに1になるわけではない。このような購入・売却のタイムラグをモデル化する。まず、鉱山の購入・売却に関する時刻 t の意思決定を表す変数として、 $x_{t,i,j}$ を定義する。 $x_{t,i,j} = 1$ は、時刻 t において鉱山 j の購入・売却の意思決定を行うことを意味する。具体的には、鉱山 j を所有していない場合は購入の意思決定を意味し、所有している場合は売却の意思決定を意味する。他方、 $x_{t,i,j} = 0$ は、そのような意思決定を行わない、現状維持の選択を意味する。 $x_{t,i,j} = 1$ を選択してから、鉱山の購入・売却が成立するまでのタイムラグを表現するために、鉱山 j に関する状態変数 $y_{t,i,j}$ を定義する。 $y_{t,i,j}$ は、鉱山 j の購入・売却が実現するまでの残り時間を表す整数値の変数であり、以下の遷移式に従い推移する。

$$y_{t+1,i,j} = \begin{cases} \bar{y}_{i,j}^{buy} - 1 & (h_{t,i,j} = 0 \text{ and } x_{t,i,j} = 1) \\ \bar{y}_{i,j}^{sell} - 1 & (h_{t,i,j} = 1 \text{ and } x_{t,i,j} = 1) \\ y_{t,i,j} - 1 & (y_{t,i,j} \geq 1) \\ 0 & (y_{t,i,j} = 0 \text{ and } x_{t,i,j} = 0) \end{cases} \quad (4.15)$$

時刻 t に鉱山 j の購入の意思決定が行われる ($h_{t,i,j} = 0$ and $x_{t,i,j} = 1$) と、 $y_{t+1,i,j}$ は $\bar{y}_{i,j}^{buy} - 1$ に設定される。 $\bar{y}_{i,j}^{buy}$ は鉱山 j を購入するのに要する時間である。また、時刻 t に鉱山 j の売却の意思決定が行われる ($h_{t,i,j} = 1$ and $x_{t,i,j} = 1$) と、 $y_{t+1,i,j}$ は $\bar{y}_{i,j}^{sell} - 1$ に設定される。 $\bar{y}_{i,j}^{sell}$ は鉱山 j を売却するのに要する時間である。 $y_{t,i,j}$ は残り時間を表すので、その値が正 ($y_{t,i,j} \geq 1$) のときは、時刻の経過に伴い1ずつ減っていく。また、その値が0であり、

かつ、鉱山 j の購入・売却の意思決定が行われなるとき ($y_{t,i,j} = 0$ and $x_{t,i,j} = 0$) は、0のまま推移する。

$y_{t,i,j}$ に依存して、 $h_{t,i,j}$ は以下のように推移する。

$$h_{t+1,i,j} = \begin{cases} h_{t,i,j} & (y_{t,i,j} \neq 1) \\ 1 & (h_{t,i,j} = 0 \text{ and } y_{t,i,j} = 1) \\ 0 & (h_{t,i,j} = 1 \text{ and } y_{t,i,j} = 1) \end{cases} \quad (4.16)$$

$h_{t,i,j}$ の値が切り替わるのは、 $y_{t,i,j}$ が1から0に変化するときである。よって、 $y_{t,i,j} \neq 1$ のときには、 $h_{t,i,j}$ の値は不変に留まる。

意思決定者が操作可能な変数は $x_{t,i,j}$ である。ただし、 $x_{t,i,j}$ を1にするためには、時刻 t において一定の条件が満たされていなければならない。まず、鉱山 j の購入・売却の意思決定が行われてから、購入・売却が実現するまでの間は、 $x_{t,i,j}$ を1にすることはできない。

$$x_{t,i,j} = 0 \text{ when } y_{t,i,j} \geq 1 \quad (4.17)$$

次に、鉱山を購入する場合には、購入の意思決定を行う段階において十分な流動性資産を有していなければならない。これは現実にも存在する制約であり、将来に得られる見込みの現金を担保として、鉱山の購入に関する交渉を行うことはできない。この制約は以下の式で表される。

$$\sum_{i=1}^{NR} \sum_{j=1}^{NM} x_{t,i,j} (1 - h_{t,i,j}) V_{t,i,j} \leq \left[s_t - \sum_{i=1}^{NR} \sum_{j=1}^{NM} \delta(y_{t,i,j} \geq 1) (1 - h_{t,i,j}) V_{t,i,j} \right]_+ \quad (4.18)$$

この式に含まれる鉱山の資産価値 $V_{t,i,j}$ には $(1 - h_{t,i,j})$ が掛けられている。 $(1 - h_{t,i,j})$ は $h_{t,i,j} = 1$ のときに0となる。つまり、式(4.18)(4.19)は意思決定者がまだ保有していない鉱山を対象とした制約である。 s_t は既に定義した通り、時刻 t において意思決定者が保有する流動性資産の総額である。右辺の総和記号は、時刻 t よりも前に既に購入を決定したが、まだ購入が実現していない鉱山の資産総額である。よって、右辺の $[]_+$ 内は、手元に残されている現金の総額から、将来の鉱山購入のために留保されている現金の総額を差し引いたものである。他方、左辺は時刻 t に購入を決定する鉱山の資産総額を表す。なお、 $[]_+$ は $[]$ 内が正のときにその値を、負のときに0を返す関数である。市況によっては、右辺の $[]_+$ 内の値は負になることもある。具体的には、購入しようとしている鉱山の価格が大きく値上がりした場合である。この場合でも、制約式を満たすことが可能なように、右辺は負にならないようにしている。右辺がゼロのときには、新たな鉱山の購入を諦めれば左辺

もゼロとなるため、制約式を満たすことができる。制約式(4.21)により、ポートフォリオを組み替えるのに時間がかかることを表現できる。鉱山の購入に関する意思決定を行うには、それに先立ち、手持ちの鉱山の売却を行い、流動性資産を十分に確保する必要があるからである。

以上の前提の下で、意思決定者はある時刻 T における資産総額から得られる期待効用を最大化するように $x_{i,j,t}$ ($0 \leq t < T$)を決定すると考える。

$$\max_{\{x_{t,i,j}\}_{0 \leq t < T, 0 \leq i \leq N^R, 0 \leq j \leq N_i^M}} E_0[u(W_T)] \quad (4.19)$$

$$\text{s. t. (4.5) - (4.19)}$$

ただし、 u は意思決定者のリスク回避性向を表す効用関数である。効用関数の引数は、時刻 T の期首における意思決定者の保有資産総額である。効用関数 u には相対的リスク回避度一定の効用関数を使用する。

$$u(w) = \frac{w^{1-b} - 1}{1-b} \quad (4.20)$$

ただし、 b は意思決定者の相対的リスク回避度である。

4.4 解法

4.4.1 分析方法

状態変数が多いため、以上の最適化問題を厳密に解くことは、数値的にも不可能である。そこで、以下のような近似的解法を考える。まず、鉱物 i を産出する鉱山の保有資産額の上限（予算）を \bar{A}_i で表し、この予算の時刻 t における水準を $\bar{A}_{t,i}$ で表す。意思決定者は予算 $\bar{A}_{t,i}$ の範囲内で、鉱物 i を産出する鉱山を保有できるとする。

$$\sum_{j=1}^{N_i^M} h_{t,i,j} V_{t,i,j} \leq \bar{A}_{t,i} \quad (4.21)$$

$\bar{A}_{t,i}$ を時刻 t における状態変数の関数として次のように表す。

$$\bar{A}_{t,i} = W_t \cdot \frac{\exp U_{t,i}}{1 + \sum_{j=1}^{N^R} \exp U_{t,j}} \quad (4.22)$$

$$U_{t,i} = a_{i0} + a_{i1} \ln\left(\frac{W_t}{W_0}\right) + a_{i2} \ln\left(\frac{S_{t,i}}{S_{0,i}}\right) \quad (4.23)$$

a_{i0}, a_{i1}, a_{i2} は意思決定者が設定するパラメータである。 $U_{t,i}$ は鉱物*i*の投資対象としての魅力を得点化したものである。 $U_{t,i}$ が高い鉱物*i*には、より多額の予算が割り当てられる。

次に、各鉱物*i*について、当該の鉱物を産出する鉱山の投資優先順位を定める。この優先順位を $O(i, k)$ ($1 \leq k \leq N_i^M$)は優先順位が*k*番目の鉱山を表す。すると、 $\bar{A}_{t,i}$ と $O_i(k)$ を用いて、 $x_{t,i,j}$ を以下のように決定できる。

$$\begin{aligned} \bar{k}_{t,i} &= \max_k \bar{k} & (4.24) \\ \text{s. t. } \sum_{k=1}^{\bar{k}} V_{t,i,O(i,k)} &\leq \bar{A}_{t,i} \\ x_{t,i,O(i,k)} &= \begin{cases} 1 & (k > \bar{k}_{t,i} \text{ and } h_{t,i,O(i,k)} = 1 \text{ and } y_{t,i,j} = 0) \\ 1 & (k \leq \bar{k}_{t,i} \text{ and } h_{t,i,O(i,k)} = 0 \text{ and } y_{t,i,O(i,k)} = 0 \text{ and satisfies (16)}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} & (4.25) \end{aligned}$$

すなわち、予算 $\bar{A}_{t,i}$ の範囲内で優先順位の高い鉱山を保有するように、 $x_{t,i,j}$ を決定する。 $\bar{k}_{t,i}$ は時刻*t*において保有対象となる鉱物*i*を産出する鉱山数である。優先順位が $\bar{k}_{t,i}$ 番目以下の鉱山が保有対象となり、それ以外の鉱山は非保有対象となる。非保有対象の鉱山を保有している場合には、売却の意思決定を行う。保有対象の鉱山が未保有の場合には、購入の意思決定を行う。ただし、購入の意思決定を行う際には、式(4.18)(4.19)の流動性資産の制約を満たさなければいけない。そこで、購入の意思決定は以下のルールに従い行う。 k の値が低い鉱山から順番に、 $x_{t,i,O(i,k)}$ を1にして式(4.18)(4.19)を満たせるかどうかを確認する。満たせる場合は $x_{t,i,O(i,k)}$ を1にし、そうでなければ0にする。以上を $k = 1, 2, 3 \dots$ の順に全ての鉱山に対して繰り返す。なお、順位は各鉱物について定義されるため、順位が同じ鉱山は複数存在することがある。この場合には、鉱山価格 $V_{t,i,j}$ が高い鉱山を優先して $x_{t,i,j}$ の判定を行う。

4.4.2 シミュレーション

以上の意思決定ルールを用いると、 a_{i0}, \dots, a_{i5} と $O_i(k)$ を定めれば、 $h_{t,i,j}$ を自動的に決定できるようになるため、モンテカルロ法により式(4.19)の目的関数を評価できるようになる。

る。あとは、目的関数を最大化するように a_{i0}, \dots, a_{i5} と $O_i(k)$ を定めれば、近似的に最大化問題の解を得ることができる。ただし、モンテカルロ法を使う際には、(仮に a_{i0}, \dots, a_{i5} と $O_i(k)$ を固定しても) 評価の度に目的関数が増減してしまうという問題がある。これを防ぐためには、モンテカルロ法で用いる乱数に毎回同じものを使えば良い。本研究では、式(4.12), (4.19)における期待値を評価する際には、1000本のパスを発生させている。最適化には遺伝的アルゴリズム(GA)を用い、 a_{i0}, \dots, a_{i5} の最適化には実数値GAを、 $O_i(k)$ の最適化には順列GAを利用する。

4.4.3 ボラティリティの特定

投資対象の鉱物として、原料炭・一般炭・銅・鉄鉱石・アルミの5種類を考える。これらの鉱物の価格のボラティリティを分析した結果を表4-1, 4-2に整理する。分析には、2009年第1四半期から2017年第2四半期にかけての34四半期のデータを利用した。価格データの出所は、原料炭のものはBloombergであり、それ以外の鉱物のものはIMF Primary Commodity Prices掲載である。表4-2の()内の数値は、帰無仮説 $l_{ij} = 0$ に関するt値である。原料炭と銅、および、一般炭と銅のボラティリティの相関は有意ではなかったため、ゼロとした。

表 4-1 鉱物ごとのボラティリティ

	原料炭	一般炭	銅	鉄鉱石	アルミ
σ_i^2	6.023E-02	1.816E-02	1.485E-02	3.639E-02	6.839E-03

表 4-2 ボラティリティの相関係数

l_{ij}	原料炭	一般炭	銅	鉄鉱石	アルミ
原料炭	1 (NA)	0.4998 (4.306)	0 (NA)	0.3698 (3.039)	0.2289 (2.114)
一般炭	0.4998 (4.306)	1 (NA)	0 (NA)	0.4666 (4.071)	0.2632 (2.395)
銅	0 (NA)	0 (NA)	1 (NA)	0.4695 (4.215)	0.7229 (10.855)
鉄鉱石	0.3698 (3.039)	0.4666 (4.071)	0.4695 (4.215)	1 (NA)	0.5496 (5.171)
アルミ	0.2289 (2.114)	0.2632 (2.395)	0.7229 (10.855)	0.5496 (5.171)	1 (NA)

4.5 事例研究

4.5.1 問題設定

本事例研究においては、近年に売買された鉱山事業取引を基に、上述4.3及び4.4のモデル計算を活用し、一定の条件下での鉱山ポートフォリオの最適化を検証する。モデル計算に用いる変数は表4-3～4-5に設定する。

表4-3 モデル計算の変数

i_1	鉱物 i_1	原料炭
i_2	鉱物 i_2	一般炭
i_3	鉱物 i_3	銅
i_4	鉱物 i_4	鉄鉱石
i_5	鉱物 i_5	アルミ
N_{i1}^M	原料炭鉱山の数	4
N_{i2}^M	一般炭鉱山の数	4
N_{i3}^M	銅鉱山の数	4
N_{i4}^M	鉄鉱石鉱山の数	4
N_{i5}^M	アルミ鉱山の数	4
t	単位期間	四半期 (1/4年)
L	採掘可能期間	200 (50年)
T	モデル計算期間	40 (10年)
r	資本収益率	0.0241136890844451
rra	相対リスク回避度	1.0
s_0	期初の流動性資産総額	30,000,000,000
ρ	金利 (割引率)	0.00741707177773
y_{buy}	鉱山を購入するのに要する期間	2.0
y_{sell}	鉱山を購入するのに要する期間	2.0

表4-4 金属資源の期首・収斂価格

(単位：US\$/MT)

記号	鉱物名	$S_{0,i}$ 期首価格	$S_{40,i}$ 10年後価格
i_1	原料炭	170	130
i_2	一般炭	115	75
i_3	銅	6050	6620
i_4	鉄鉱石	68	70
i_5	アルミ	2030	2050

表 4-5 各鉱山の条件

原料炭

<i>j</i> 1	鉱山	単位	<i>j</i> 1,1	<i>j</i> 1,2	<i>j</i> 1,3	<i>j</i> 1,4
<i>v</i> 1	鉱山価格	US\$百万	15,000	1,240	940	2040
<i>c</i> 1	採掘コスト	US\$/MT	94	92	95	95
<i>Q</i> 1	埋蔵量	千MT	1,980,000	1,233,000	106,000	165,000
<i>q</i> 1	月間生産量	千MT/月	5,500	930	420	460

一般炭

<i>j</i> 2	鉱山	単位	<i>j</i> 2,1	<i>j</i> 2,2	<i>j</i> 2,3	<i>j</i> 2,4
<i>v</i> 2	鉱山価格	US\$百万	2190	760	140	800
<i>c</i> 2	採掘コスト	US\$/MT	47	55	47	41
<i>Q</i> 2	埋蔵量	千MT	890,000	331,000	159,000	420,000
<i>q</i> 2	月間生産量	千MT/月	1,080	975	420	1,660

銅

<i>j</i> 3	鉱山	単位	<i>j</i> 3,1	<i>j</i> 3,2	<i>j</i> 3,3	<i>j</i> 3,4
<i>v</i> 3	鉱山価格	US\$百万	6700	22650	23750	3400
<i>c</i> 3	採掘コスト	US\$/MT	2,450	4,760	4,250	4,200
<i>Q</i> 3	埋蔵量	千MT	21,000	54,000	159,000	13,000
<i>q</i> 3	月間生産量	千MT/月	34	37	105	25

鉄鉱石

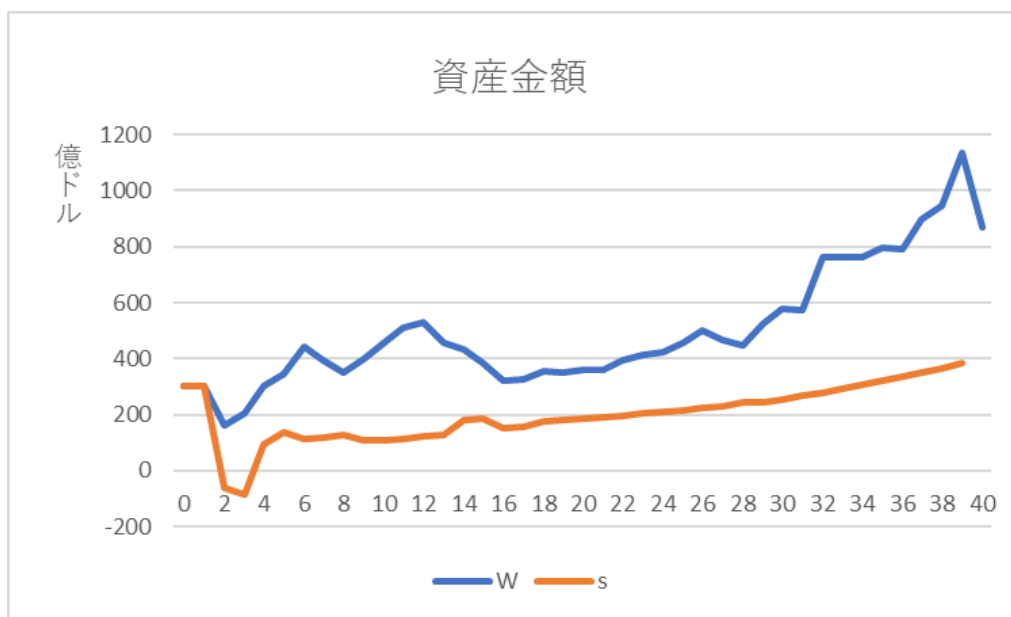
<i>j</i> 4	鉱山	単位	<i>j</i> 4,1	<i>j</i> 4,2	<i>j</i> 4,3	<i>j</i> 4,4
<i>v</i> 4	鉱山価格	US\$百万	380	4800	1870	240
<i>c</i> 4	採掘コスト	US\$/MT	60	55	52	55
<i>Q</i> 4	埋蔵量	千MT	96,600	430,000	702,000	400,000
<i>q</i> 4	月間生産量	千MT/月	270	1,190	1,830	1,666

アルミ

<i>j</i> 5	鉱山	単位	<i>j</i> 5,1	<i>j</i> 5,2	<i>j</i> 5,3	<i>j</i> 5,4
<i>v</i> 5	鉱山価格	US\$百万	1400	105	545	1125
<i>c</i> 5	採掘コスト	US\$/MT	1,700	2,000	1,900	2,000
<i>Q</i> 5	埋蔵量	千MT	17,000	17,000	14,000	13,000
<i>q</i> 5	月間生産量	千MT/月	47	47	38	36

4.5.2 計算結果

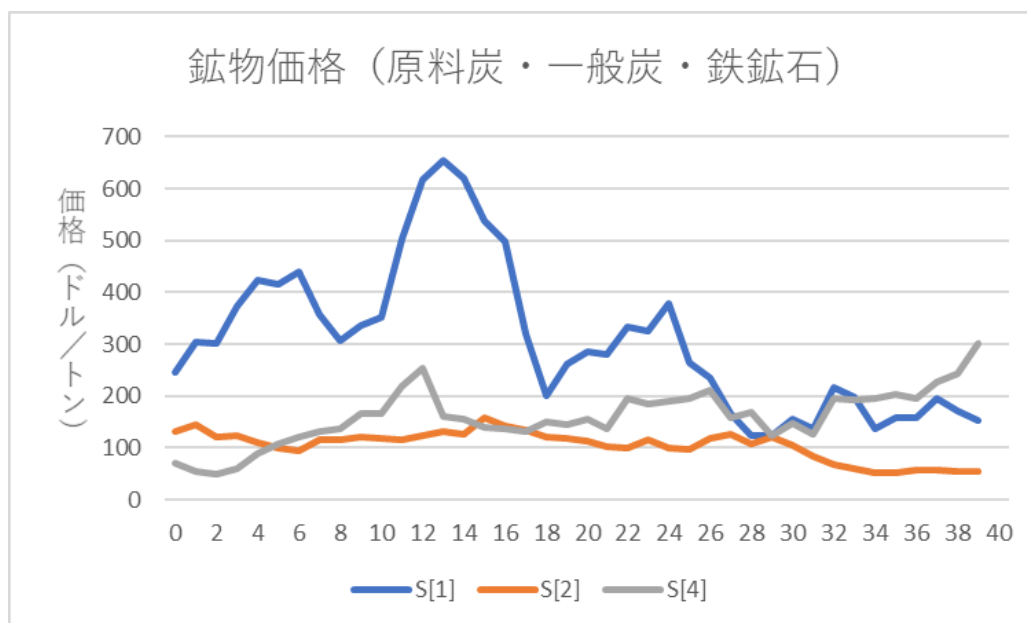
上述4.5.1の条件の下、モデル計算を行った結果を以下に示す。資産金額は、流動性資産総額がUS\$300億から開始し鉱山を買収し始めるt=2で一旦マイナスとなるが、その後鉱山から得られるキャッシュが徐々に増加し、10年後にはUS\$約400億まで増加した。一方、保有資産総額は、保有鉱山価格の変動により上下を繰り返しながら、ピークでUS\$約1100億、10年後はUS\$約900億まで増加した。(図4-1)



W:保有資産総額, s:流動性資産総額

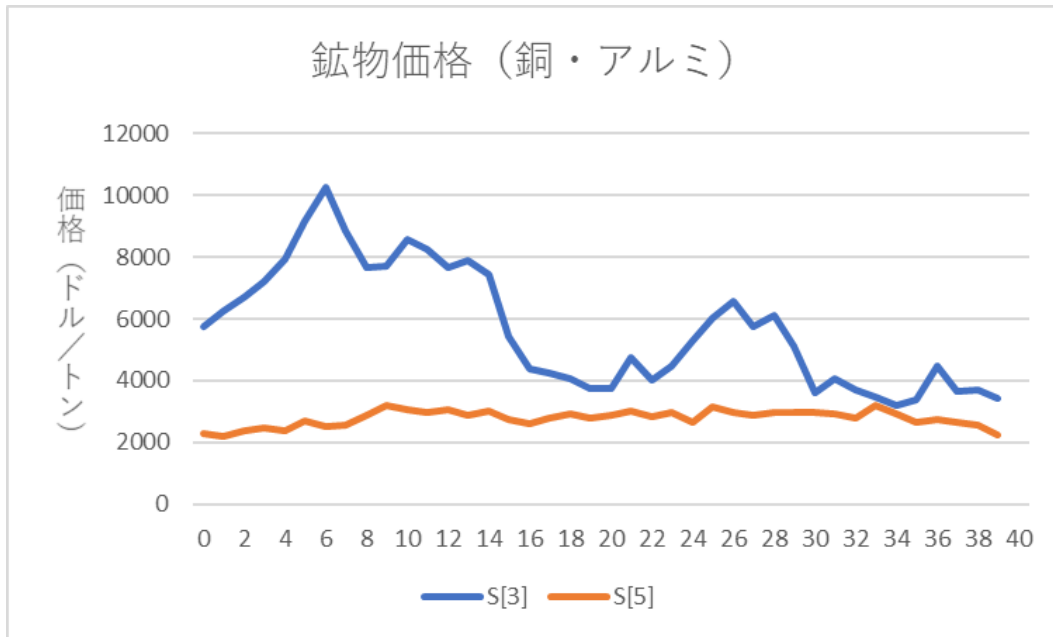
図4-1 資産金額推移

鉱物価格は、過去の市況変動実績を反映して、原料炭、銅及び鉄鉱石は価格変動が激しいが、一般炭及びアルミは比較的安定的に推移している。(図4-2, 4-3)



S[1]:原料炭価格, S[2]:一般炭価格, S[4]:鉄鉱石価格

図4-2 鉱物価格推移 (原料炭・一般炭・鉄鉱石)



S[3]:銅価格, S[5]:アルミ価格

図4-3 鉱物価格推移（銅・アルミ）

鉱山価格合計は、US\$約1100億から開始して、鉱物市況の変動と共に大幅な価格変動を繰り返す、ピークでUS\$約4000億、ボトムでUS\$約600億、10年後にUS\$約1100億となった。これは鉱山事業のボラティリティが非常に高いことを裏付けている。（図4-4）

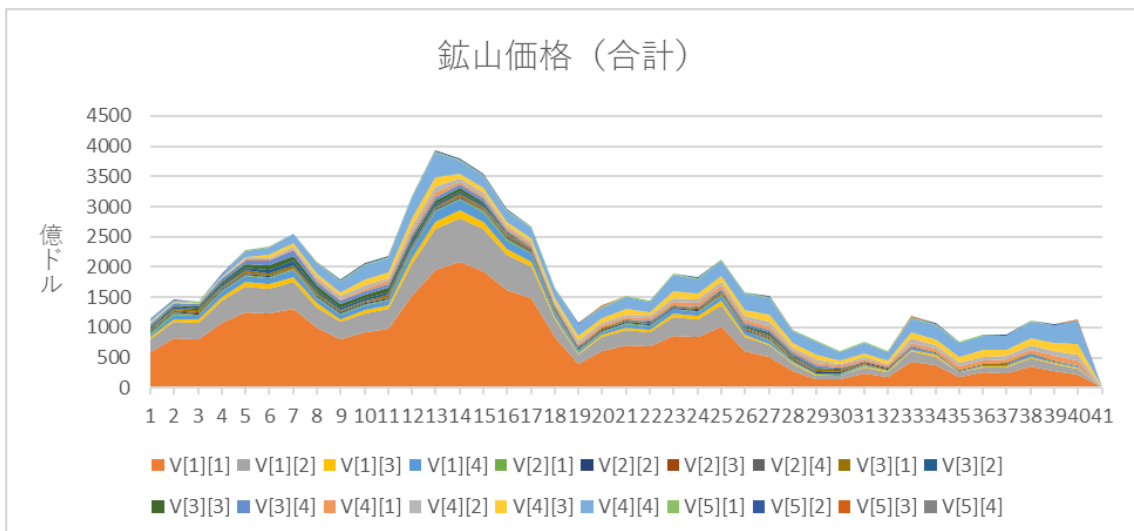


図4-4 鉱山価格合計推移

また、鉱物毎の鉱山価格は、原料炭・銅・鉄鉱石を中心に殆どの鉱山が大きく変動しているが、その変動周期にはズレが生じている。これは前述4.4.3の通り、完全な相関が見られないことを表している。(図4-5~4-9)

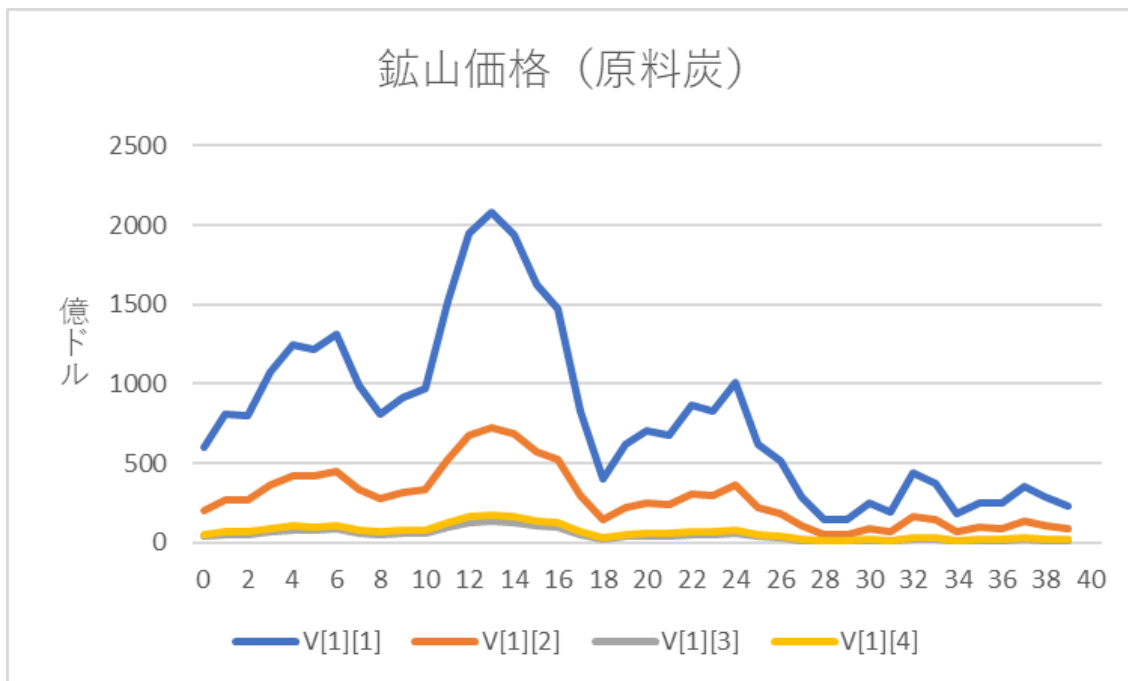


図4-5 原料炭の鉱山価格推移

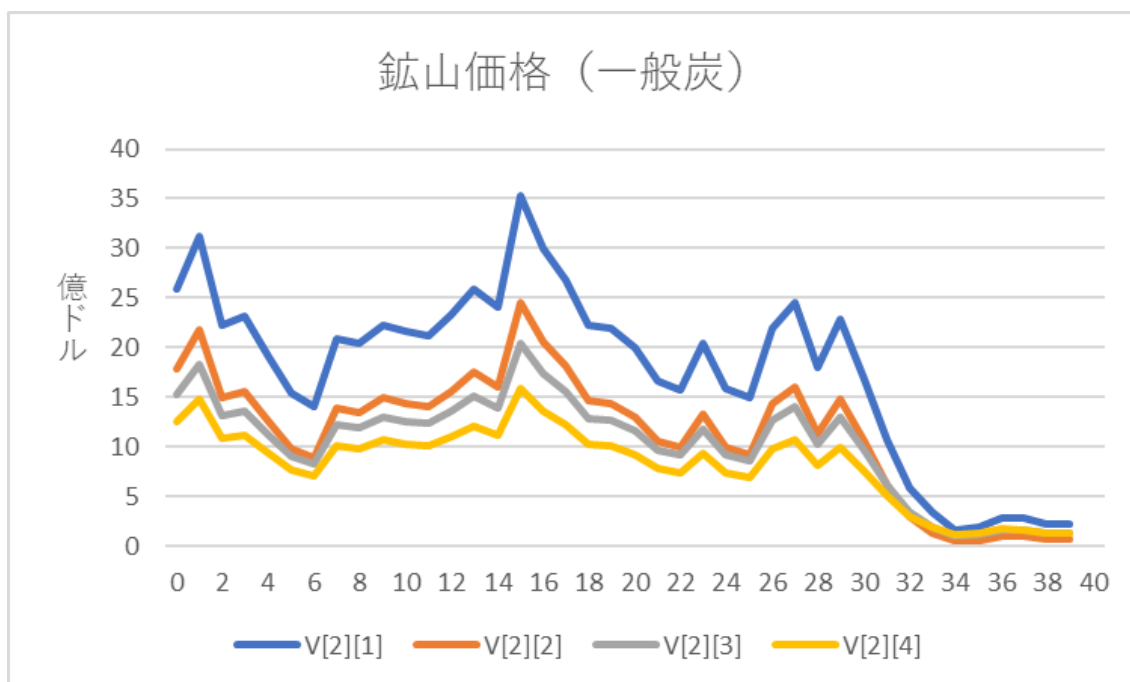


図4-6 一般炭の鉱山価格推移

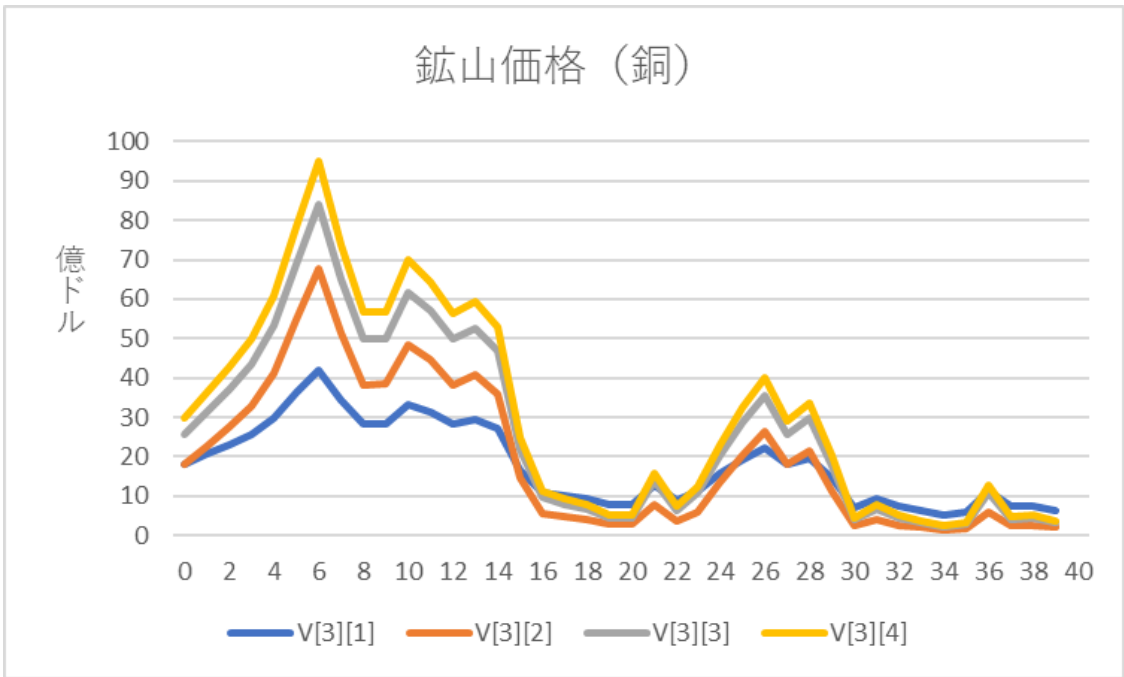


図4-7 銅の鉱山価格推移

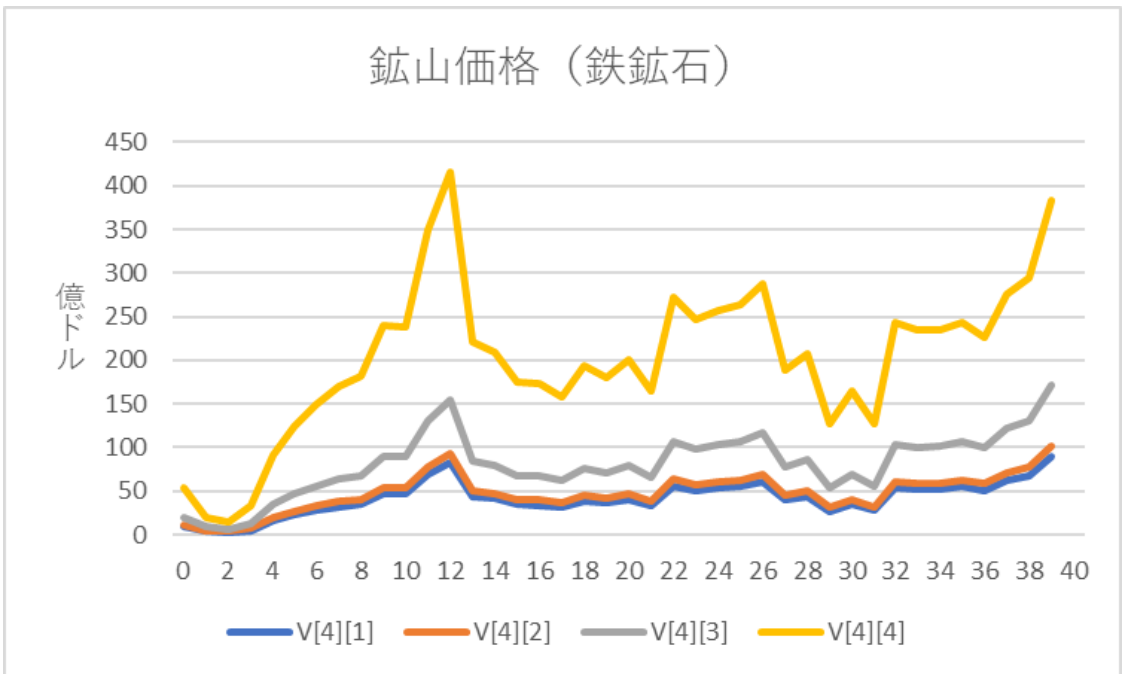


図4-8 鉄鉱石の鉱山価格推移

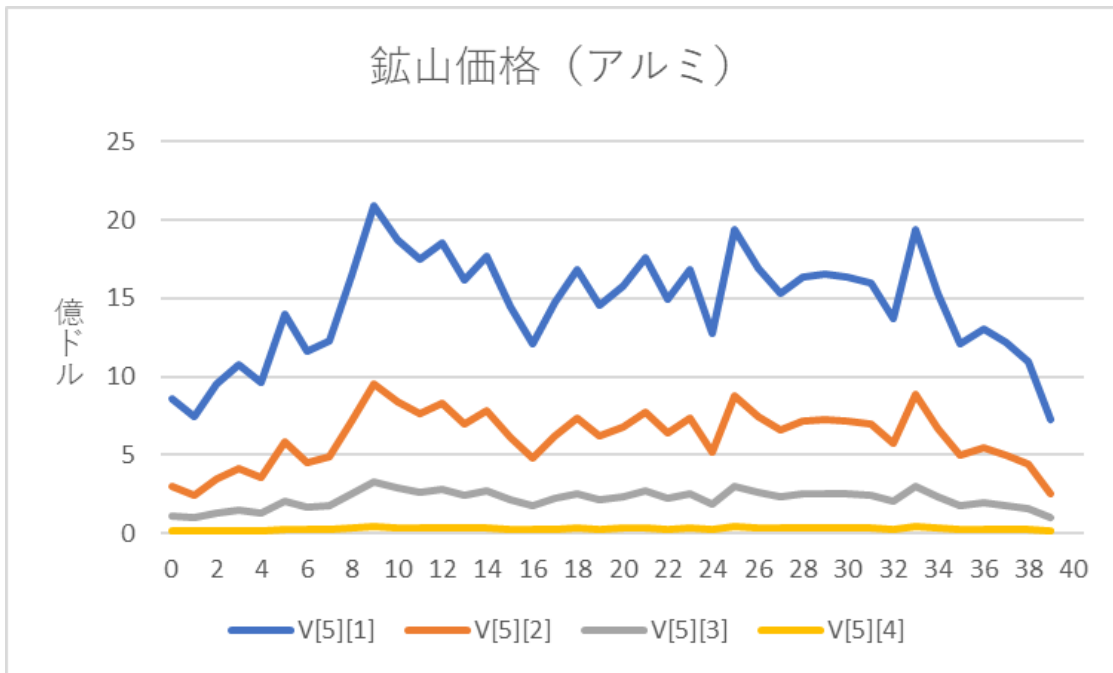


図4-9 アルミの鋳山価格推移

保有鋳山数全体については、 $t=2$ 以降、最大で16鋳山、最小で7鋳山となったが、大凡10～12鋳山を保有し、鋳山価格の変動と流動性資産（資金量）に応じて鋳山ポートフォリオの入替えが行われている。（図4-10）

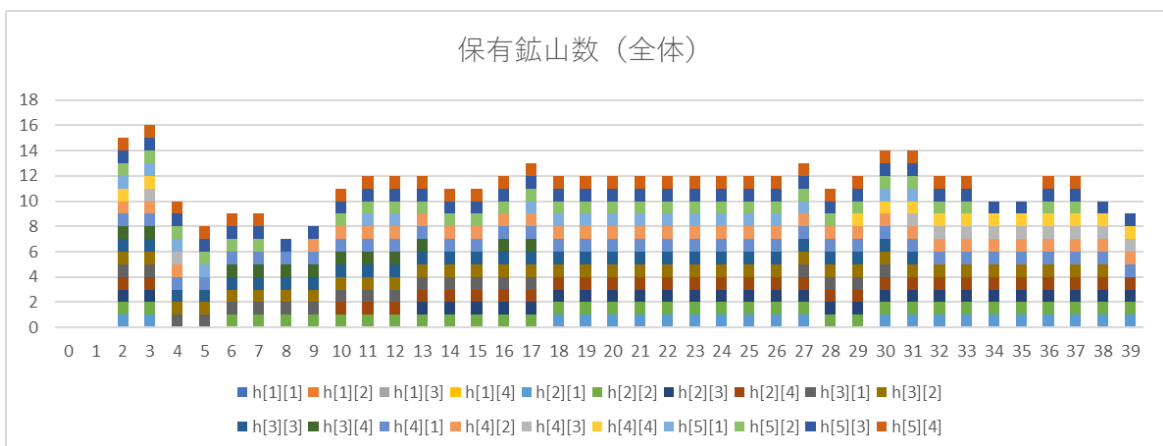


図4-10 保有鋳山数（全体）推移

鋳物毎の保有鋳山数について、一般炭・銅・鉄鋳石・アルミは鋳山保有数が随時変動し、同一鋳物内でも鋳山ポートフォリオの入替えが行われている。一方、原料炭の鋳山は

終始保有されなかった。これは保有資産金額に制限がある状況下、原料炭の鉱山価格が相対的に高いこと、並びに鉱物価格のボラティリティが高いことにより、鉱山ポートフォリオ形成において優先順位が下がったためと推測できる。(図4-11～4-15)

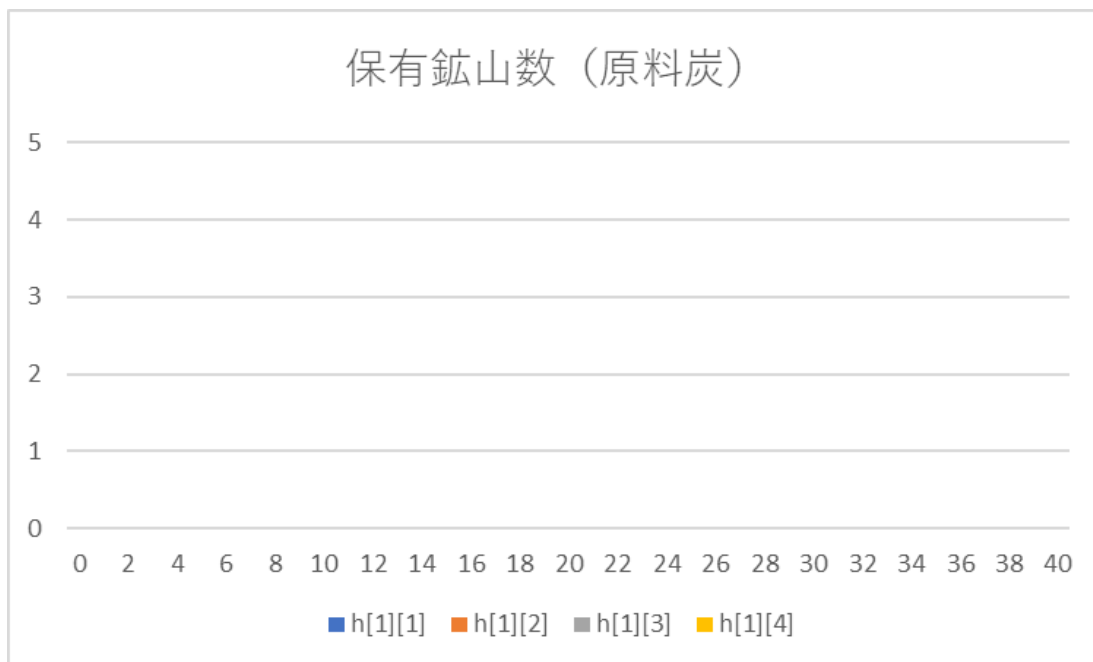


図4-11 原料炭の保有鉱山数推移

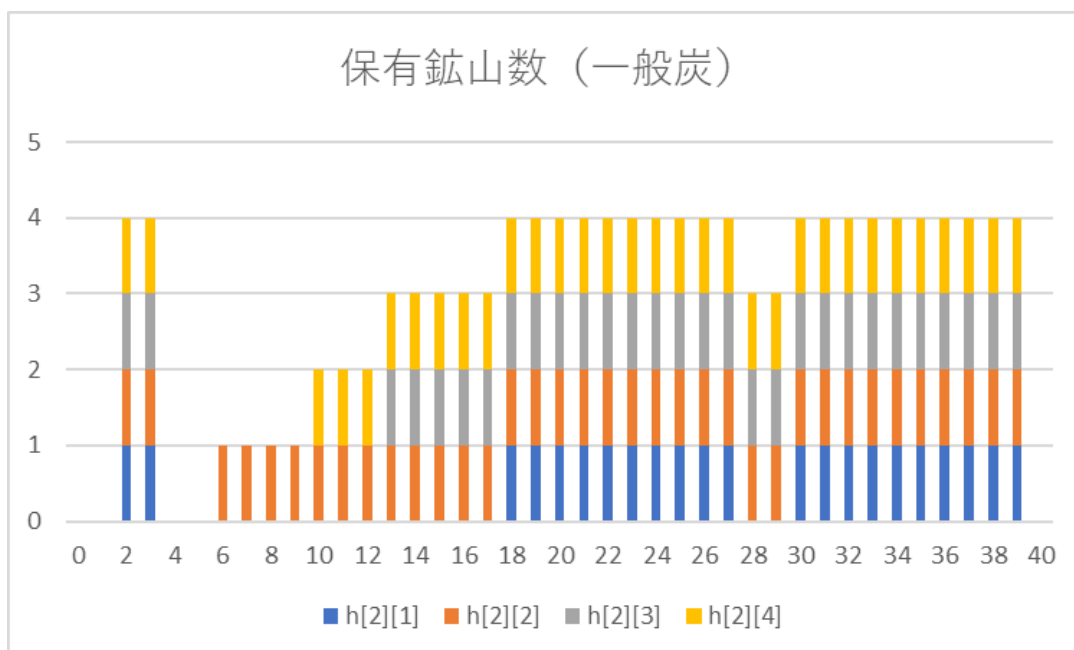


図4-12 一般炭の保有鉱山数推移

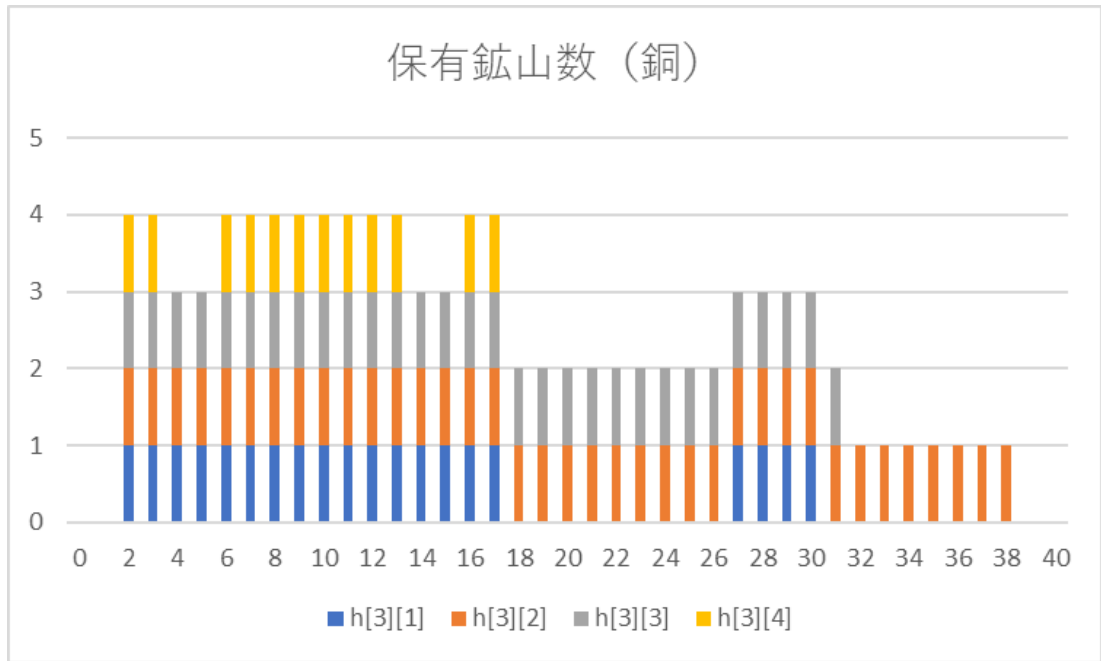


図4-13 銅の保有鉱山数推移

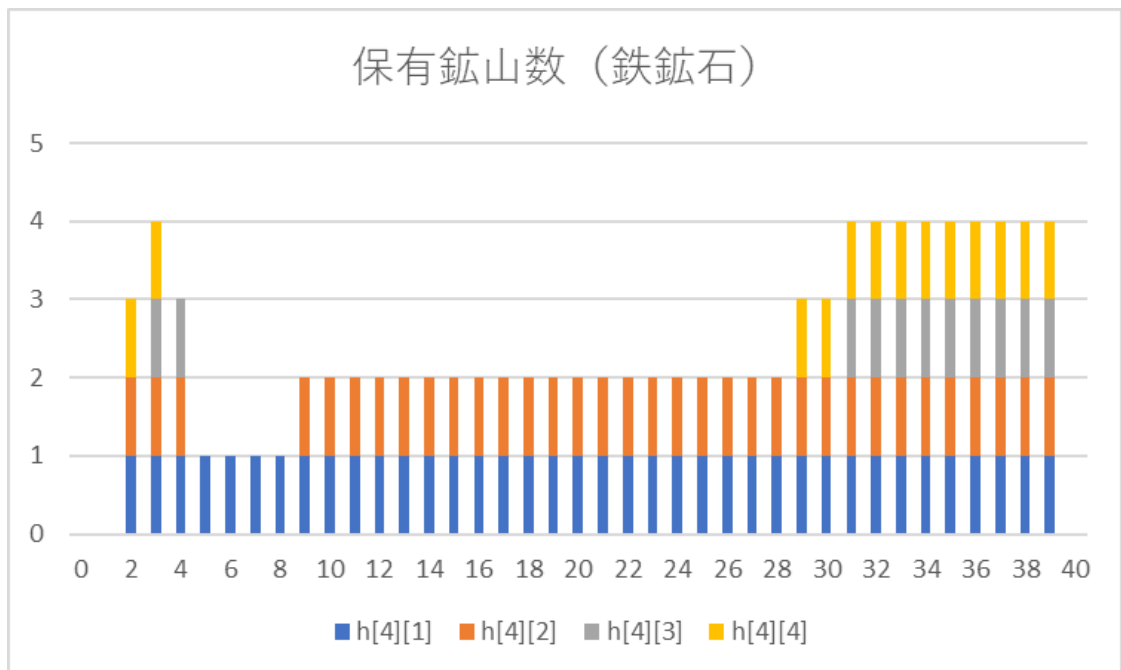


図4-14 鉄鉱石の保有鉱山数推移

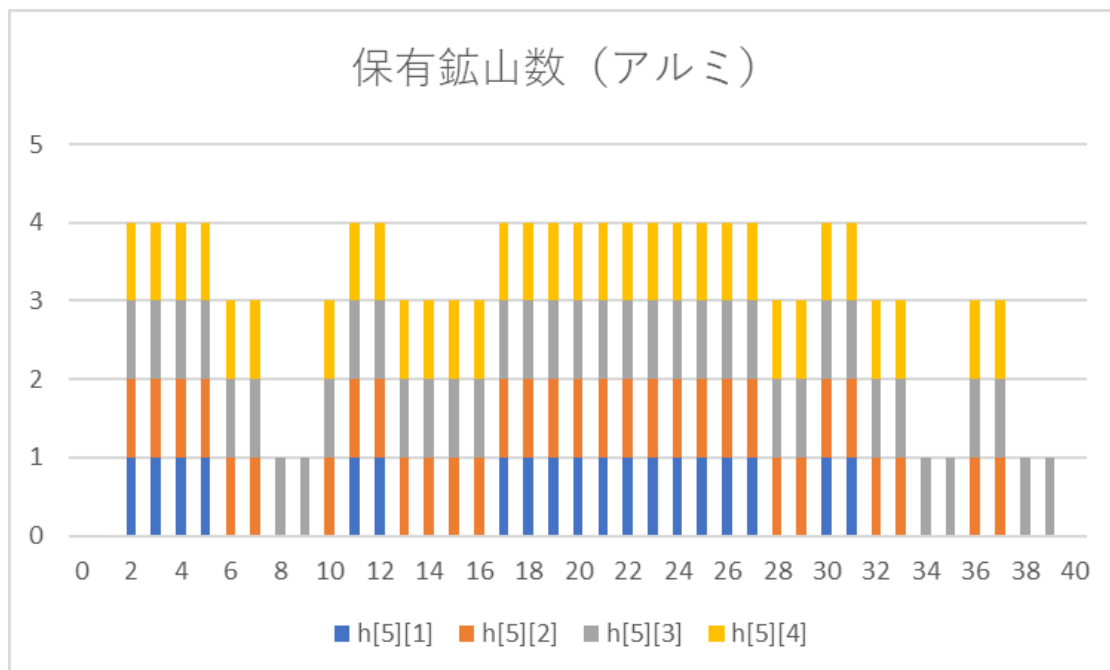


図4-15 アルミの保有鉱山数推移

4.5.3 実務的示唆

本モデル計算による結果において、鉱物毎に異なる価格や鉱山価格の変動に伴い、一定期間を以て鉱山ポートフォリオの入替えが行われている。本モデルでは、近年の鉱山事業売買の実績値に基づき算出されていた為、筆者の実務経験上、商社の金属資源事業部門において近年実際に行われてきた鉱山ポートフォリオの構築や資産入れ替えの実情に近い結果が得られた。これは鉱山ポートフォリオの長期最適化を設定する際に、本モデルが有効に機能することを表している。但し、本モデル計算では、4.5.2に示した通り原料炭の鉱山が終始保有なされないことが発生した為、今後の課題としては、対象とする鉱山規模や価格、鉱物資源の選定の際に、制限される資産総額とのバランスを考慮して対応する必要があると言える。

4.5.4 仮説の検証

4.5.2及び4.5.3を踏まえて、1.2で設定した仮説6)「鉱山事業は、複数の鉱物資源や鉱山のポートフォリオを形成し、事業全体のリスクをコントロールすることにより、収益やキ

キャッシュフローを安定化させ、鉱山ポートフォリオを長期最適化できる。」の検証を行う。本モデル計算の結果から、鉱山事業において一定の資金の制限の下、複数の鉱物資源と鉱山のポートフォリオを構築し、鉱物価格や鉱山価格の変動に応じて資産入替えを行うことにより、全体の資産価値が向上し、ポートフォリオの長期最適化が実現できた。上述の結果及び考察により、理論上仮説6)の妥当性が立証可能となった。

4.6 結言

本研究では、時系列データの分析モデルであるARMA-GARCHモデルを活用し、鉱山ポートフォリオの長期最適化モデルを開発した。更に、鉱山売買取引の具体事例データによる計算結果を算出し、同モデルの実用性を検証の上、実務的示唆を示した。

ポートフォリオの長期最適化に関する理論は歴史的に多く研究されているが、基本的に金融工学に基づき、投資家から見た金融商品のポートフォリオについて論じられている。したがって、商社等の事業会社における鉱山事業のポートフォリオ長期最適化に関する研究は類を見ず、本研究は新たな領域でのモデル開発及び検証である。

先ず、ARMA-GARCHモデルを活用したポートフォリオ最適化モデルを開発した。次に、投資対象の鉱物5種類（原料炭・一般炭・銅・鉄鉱石・アルミ）の過去市況推移データ、鉱物毎に4鉱山、合計20鉱山の売買取引実績を基にして、保有資産に一定の上限額を設定の下、10年間での資産金額・鉱物価格・鉱山価格・保有鉱山数それぞれの推移を算出した。その結果、鉱物価格の変動と共に鉱山価格が変動し、鉱山売買により資産を入替えながら保有資産総額を増大させ、鉱山ポートフォリオの最適化を行っていることが検証できた。またその結果は、事業会社が営む鉱山事業のポートフォリオ入替え及び最適化の実情に近いことも確認できた為、本モデルは実務面でも有効性が高いと言える。

一方、事業会社の経営者の観点では、鉱物資源の数について増加/減少/維持の選択肢がある。いずれの選択肢においても本モデルによる計算は可能であるが、選択パターンが多岐にわたる為、本研究において全てのパターンの検証は行っていない。経営者が本モデルを実用的に活用することを想定し、選択肢を増やした場合の計算結果について更なる研究が可能である。

参考文献

- [1] Markowitz, H., "Portfolio selection", *Journal of finance*, Vol.7, pp.77-91, 1952.
- [2] Merton, R.C., "Lifetime portfolio selection under uncertainty : the continuous time case", *Review of economics and statistics*, Vol.51, pp.247-257, 1969.
- [3] Rubinstein, M., "The strong case for the generalized logarithmic utility model as the premier model of financial markets", *Journal of finance*, Vol.31, pp.551-571, 1976.
- [4] Breeden, D., "An intertemporal asset pricing model with stochastic consumption and investment opportunities", *Journal of finance*, Vol.7, pp.265-296, 1979.
- [5] Campbell, J.Y., "Asset prices, consumption, and the business cycle", chapter 19 in John Taylor and Michael Woodford (eds), *Handbook of macroeconomics*, Vol.1, North-Holland, Amsterdam, 1999.
- [6] Viceila, L.M., "Optimal portfolio choice for long-horizon investors with non-tradable labor income", *Journal of finance*, Vol.56, pp.433-470, 2001.
- [7] 高屋圭介, 枇々木規雄, 「モンテカルロ・シミュレーションを用いた動的ポートフォリオ最適化モデル」, 『日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌』, 第55巻, 84-109ページ, 2012年.
- [8] Brandt, M.W., Goyal, A., Santa-Clara, P., Stroud, J.R., "A simulation approach to dynamic portfolio choice with an application to learning about return predictability", *Review of financial studies*, Vol.18(3), pp.831-873, 2005.
- [9] Fang, F., Oosterlee, C.W., "A novel pricing method for European options based on Fourier-cosine series expansions", *SIAM journal on scientific computing*, Vol.31(2), pp.826-848, 2008.
- [10] Cong, F., Oosterlee, C.W., "Accurate and robust numerical methods for the dynamic portfolio management problem", *Comput Econ*, Vol.49, pp.433-458, 2017.
- [11] Zakamulin, V., "Optimal dynamic portfolio risk management", *The journal of portfolio management*, Fall, pp.85-99, 2016.
- [12] 小暮厚之, 照井伸彦, 『計量ファイナンス分析の基礎』(ファイナンス・ライブラリー4), 朝倉書店, 2001年.
- [13] 沖本竜義, 『経済・ファイナンスデータの計量時系列分析』, 朝倉書店, 2010年.
- [14] 佐竹元一郎, 『経済の統計的分析』, 中央経済社, 2001年.
- [15] 小暮厚之, 照井伸彦, 『計量ファイナンス分析の基礎』(ファイナンス・ライブラリー4), 朝倉書店, 2001年.

第5章 商社事業の動的ポートフォリオ最適化

5.1 緒言

本章では、商社事業全体の動的ポートフォリオ最適化について述べる。商社の事業は一般的に、金属資源・石油・天然ガス等の資源事業と、機械・化学品・生活産業・インフラ・金融・IT等の非資源事業に大別される。商社は複数の事業を営む一方、資産・資金・人材等の経営資源には一定の制限があり、その条件下で資源／非資源のバランスを含めた事業の動的ポートフォリオ最適化を図り、リスクマネジメントを行いながら安定的に収益を上げる必要がある。金属資源事業については、第4章における鉱山ポートフォリオの長期最適化の概念を活用しつつ、株主や経営者の観点から、他事業を含めた商社事業全体での動的ポートフォリオの最適化に関して分析と考察を行う。

日本特有のコングロマリットである商社は、近年トレーディングより事業投資へ、更に事業投資先へ経営人材を派遣し、投資企業の価値向上により事業収益を向上し、連結収益を拡大する事業経営モデルへシフトしている。一方、商社は金属資源を含む資源事業と非資源事業を有しているが、事業経営モデルへのシフトに従い、各商社は独自の経営戦略やポートフォリオ構築を行っている。したがって、商社の資源・非資源ポートフォリオについて、資源メジャーとの相違点も含めて考察し、動的ポートフォリオの最適化を検証する。最後に、1.2で設定した仮説7)に対する評価を行う。

5.2 商社の事業ポートフォリオ

5.2.1 既往研究の概要

商社の事業ポートフォリオに関する既往研究を以下に述べる。

田中は総合商社のグローバル戦略について、以下の通り述べている。第一に、21世紀型(次世代)商社の眼目は事業投資とトレードを両輪とする総合事業運営・事業投資会社であって、資源ビジネスはあくまでその一つの事業分野にすぎない。商社は資源企業ではなく、ビジネスモデル進化の時期に資源ブームが重なったために有力な収益源となった。第

二に、商社に巨額の収益をもたらしたのは資源ブーム入り以後（2000～2015年頃）の投資よりも、それ以前の投資である場合が大きい。三菱商事のオーストラリアの石炭事業、三井物産のオーストラリアの鉄鉱石・石炭事業など、両社の底堅い収益力を支えてきた投資案件は高度成長期にさかのぼる。資源価格が高騰し、乱高下するもとで、中長期的な権益保有の観点と短期的な収益性を両立した投資を行うことはもとより容易ではなかった。第三に、21世紀型商社の組織改革の原点はリスク資産マネジメントと事業ポートフォリオマネジメントにある。但し、資源ビジネスは投資規模が大きく、巨額案件になればなるほどその投資判断は現場ビジネスユニットレベルよりも相応の上層レベルでなされることが多かった。それだけに、通常の投資規律を逸脱したトップの判断になりがちであった。この点の検証とノウハウ蓄積を続けることによって、商社の資源ビジネスモデルはより持続可能なものへと洗練されていく。

また田中は、商社と、資源メジャーの一つでトレーディング部門を持つGlencoreとの比較を以下の様に述べている。両社は急速な上流部門投資拡大に伴う事業リスクの増大という点で共通するが、商社がGlencoreと異なる点を二点挙げている。第一は、商社が非資源部門を持ち、資源部門と並ぶ柱にしていること。第二は、資源部門での事業投資に当たっては鉱山等の経営権を握るマジョリティ出資を極力控え、資源企業化しないようにしている。これは資源メジャーと比較して商社の事業リスクを限定し、また資源価格下落というシステムック・リスクをヘッジしうることを意味すると述べた¹⁾。

北村は、商社のリスクマネジメント施策とポートフォリオマネジメントについて、以下の通り述べている。第一に、リスクマネジメントの進化として、従来型は防衛的リスクマネジメントであり、「企業経営内の予防・防衛的管理の一要素（損失発生防止）」「個別の事業・投資・取引における損失発生要因の抽出・認識と対応」「定性的な把握が中心で、定量的にはエクスポージャーの総額・残高把握」であった。これに対し現代型リスクマネジメントは経営戦略の基幹要素となり、①資本政策として「リスク総量と必要資本の決定」、②利益目標・業績評価として「リスク量に対する期待収益率の設定」、③事業ポートフォリオマネジメントとして「事業単位のリスク・リターン評価と投下資本量の設定」へ進化している。

第二に、想定最大損失として実質リスクの総量（事業リスク+信用リスク+市場リスク+カントリーリスク+オペレーションリスク）を算出し、これが会社の体力である連結株主資本の範囲内でコントロールすることが重要であるとしている。あらゆるリスクの顕在

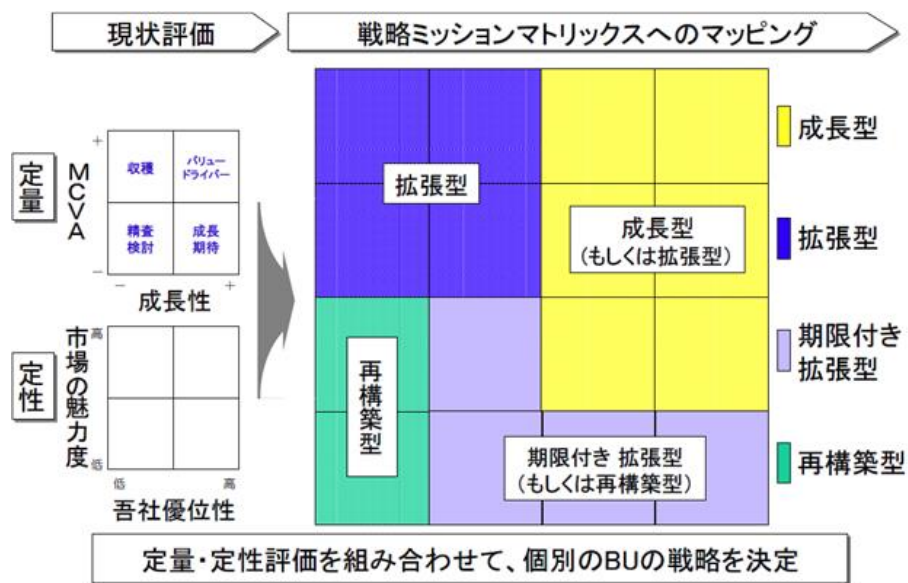
化は、極めて特殊な状況を除けば、全部が同時に起きる可能性は低い。商社は、しばしば資本市場からコングロマリット・ディスカウント（グループ総体の事業価値が、個別事業の事業価値の総和を下回る現象）の典型例と言われることがあるが、多角的な業界対応や多種商品の取扱いは結果的にナチュラルヘッジ的な意味においても分散投資効果を楽しんでいる業態と言える。

第三に、リスク調整後のEVA（経済的付加価値）を用いたポートフォリオマネジメントの確立である。三菱商事においてはリスク調整後のEVAをMCVA(Mitsubishi Corporation Value Added)を定義し、経営計測指標を適切な組織単位レベルに当てはめて価値創造額を計測する。そしてその結果に基づき抜本策も含めた改善の為の計画・アクションプランを立て、実行する。

$$MCVA = \text{事業収益}^* - (\text{最大損失額} \times \text{株主資本})$$

$$* \text{事業収益} = \text{税引後純利益} - (1 - \text{限界税率}) \times (\text{有価証券売却損益} + \text{上場有価証券評価損})$$

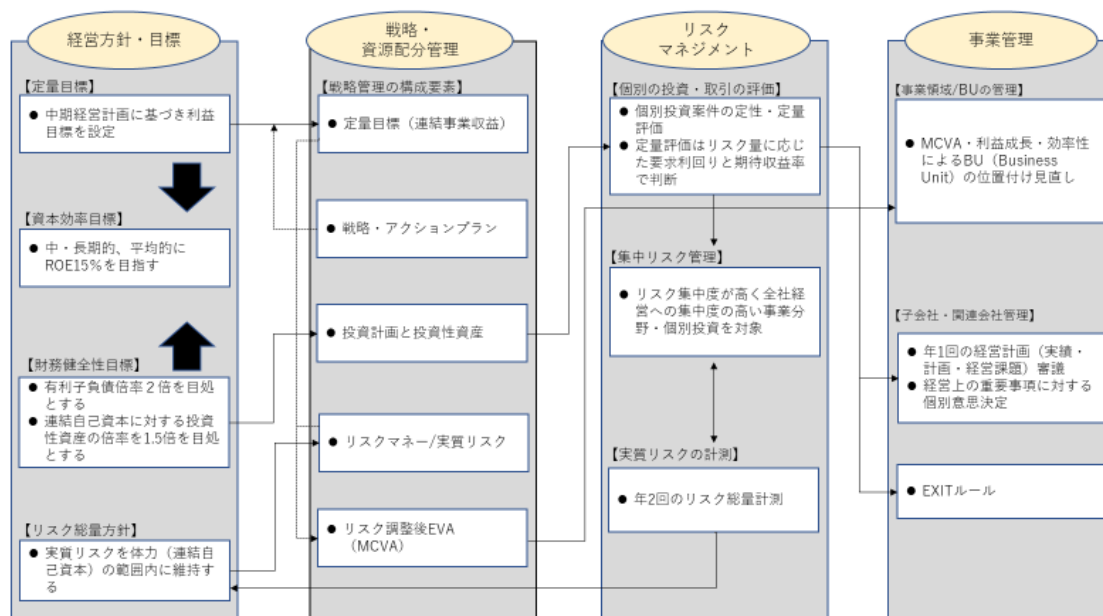
経営サイクル的観点では、ポートフォリオの全体像を把握し、そこから撤退するのか、より効率的に事業継続するのか、更に追加投資をするのかを決めた上で目標を設定し、この管理サイクルを回して結果をレビューすることになる。ビジネスモデル毎に「拡張」「成長」「再構築」という戦略ミッションを定め、リスク・リターンを見て、短期だけではなく長期的にどのようなようになるのかというプランを勘案した上で、次のサイクルに繋げていく。図5-1はその戦略ミッションを決定するプロセスである。定量では縦軸にMCVA、横軸に成長性（連結営業キャッシュフローの成長率）を置いた4象限、定性では縦軸に市場の魅力度、横軸に自社の優位性をおいた4象限を配し、個々のビジネスモデルを掛け合わせ（4×4）による16象限にプロットした上で、戦略ミッションを決定している。



出典：三菱商事・早稲田大学商学大学院「新・現代総合商社論 三菱商事・ビジネスの創造と革新2」

図5-1 事業ポートフォリオの現状把握の手法

最後に、経営管理サイクルとリスクマネジメントである。図5-2は、リスクマネジメントを経営に生かすということをどのようなサイクルで回しているかを示している。明確な「経営方針・目標」とそれを実現する「戦略・資源配分」は確りとシンクロする必要がある。こうした目標や戦略を阻害するもの全てのリスクに対処することを「リスクマネジメント」と定義し、具体的数値目標や施策に落とし込むことが、右2列の「リスクマネジメント」と「事業管理」の具体的内容である。個別ビジネスの事業管理とポートフォリオの全体像について、実質リスクやリスク調整後EVAという共通の物差しを用いて、木も森もしっかり見ることが、リスクマネジメントであると述べた²⁾。



出典：「新・現代総合商社論 三菱商事・ビジネスの創造と革新2」

図5-2 経営管理サイクルとリスクマネジメント

一方、格付会社による商社業界の評価を以下に示す。先ず事業リスクについて、事業領域は、市況の市況の影響を受けやすい資源関連から、比較的安定した需要を抱える生活関連産業まで非常に多岐にわたる。事業ポートフォリオの分散に加え、機能・地域の分散を考慮すると、総合化によるリスク低減効果が相応に働いているといえる。手掛ける事業が幅広いが故に、各事業の状況を組織的にモニタリングし、変化に応じてリスク管理態勢を整備・充実させることが利益の安定的・継続的な成長には欠かせない。各社ともリスク量を適切にコントロールするべくリスク管理を高度化させ、投資の意思決定過程における内部統制を強化している。これらを総合的に勘案し、総合商社の事業リスクは中程度とみている。

次に業界構造について、総合商社の手掛ける事業は多岐にわたり、複数の業界にまたがる。資源分野では権益の取得に多額の資金を要する上、開発技術やファイナンスのノウハウなどが必要で、投資を実行できるプレーヤーは限られる。資源権益にも限りがあり、案件獲得競争は比較的激しい。総合商社の権益持分はマイノリティーにとどまるケースが多く、その地位は高いとはいえない。非資源分野では、それぞれの事業を本業とする専門事業者と競合することが多い。大手商社は国内市場で歴史的に優良な商権を確保しているこ

とが強みではあるが、商流の各段階で経営資源を当該事業に集中している専門事業者との競争に勝つのは容易ではない。総じて、総合商社の競争状況は比較的厳しい。

また事業ポートフォリオについて、総合商社はハイリスク・ハイリターンからローリスク・ローリターンまで数多くの事業を展開し、事業リスクの分散を図っていることが強みとなっている。主な事業として 1)トレーディング業務と2)事業投資がある。1)トレーディング業務は取引高に対する口銭ビジネスで、売買契約に基づき価格変動はヘッジされているケースが多い。利益の変動は比較的小さい半面、利益率は低い。2)事業投資は開発リスクを抱える資源分野の投資から出資を通じた事業参画まで含まれる。需給変動や市況の動向、パートナーやバリューチェーンの状況によって利益の変動は異なり、投資時期などにより利益率も異なる。総じてみれば事業投資はトレーディング業務に比べリスクは大きくリターンも大きい。景気サイクルや市況変動を吸収し安定した利益・キャッシュフローを確保するためには、収益の柱となる事業を複数持ち、収益源を分散させることが欠かせない。国内の商権に基づく営業基盤をベースに、資源権益など事業投資や三国間貿易の拡大などにより、海外の資産・利益が増加している。自国に加えて、複数の地域・国での分散を図ることが、安定的な成長には重要といえる。

最後に、リスク管理体制について、総合商社は、事業環境変化に合わせて柔軟にビジネスモデルを変化させ、新規投融资や資産の入れ替えにより絶えず事業ポートフォリオを変化させている。抱えるリスクを網羅的かつ正確に把握し、リスクアセットを十分にカバーできるだけのリスクバッファーを備えると同時に、潜在的なリスク量をコントロールするリスク管理態勢の充実が経営の安定化には欠かせないと述べている³⁾。

上述の通り商社の事業ポートフォリオについて、過去の歴史及び近年の事業環境・動向を踏まえた定性的な概念に関して論じられている。しかし、商社では金属資源事業が注力され、商社全体の業績やキャッシュフローに大きな影響を与える様になったのは2000年代以降である為、まだ歴史的に浅く、金属資源事業を含めた商社の事業ポートフォリオに関する研究は少なく、また将来の動的ポートフォリオ最適化に関する研究は確立されていない。したがって、本研究では様々な事業を有する商社が、将来において如何に金属資源事業を含めた全社での動的ポートフォリオを最適化させるかについて、各商社の戦略、並びに資源メジャーとの比較を踏まえて検証の上、解明する。

5.2.2 各商社の事業ポートフォリオ

商社は日本特有のコングロマリットと言われる。戦前よりトレーディングビジネスを産業にしてきたが、2000年代以降事業投資にシフトしており、現在は事業投資先へ経営人材を派遣し、投資企業の価値向上により事業収益を向上し、連結収益を拡大する事業経営モデルへ進化している。一方、事業経営モデルへのシフトに従い、各商社が独自の経営戦略やポートフォリオ構築を行うようになった為、商社毎に特徴ある事業ポートフォリオを有している。大手総合商社である三菱商事、三井物産、住友商事、及び伊藤忠商事について、以下の通り具体事例を示す。

a) 三菱商事

三菱商事は2016年5月に発表した「中期経営戦略2018」において、四つの経営方針①資源と非資源のバランス見直し、②キャッシュフロー重視の経営、③事業投資から事業経営へのシフト、④事業のライフサイクルを踏まえた入れ替えの加速を挙げた。その狙いは、事業ポートフォリオの最適バランス実現及び資産の入れ替え加速としている。新たな事業分類である「市況系」と「事業系」を設定し、更に資源市況の影響を中長期的に強く受ける事業を「資源市況型」、バリューチェーンや契約形態により市況リスクを低減している事業を「投資・ファイナンス型」、業界における経営への関与を深めて企業価値を創出する事業を「事業経営型」に分類した。この内「資源市況型」については投資資産に上限を設定し投融資残高を一定に保ちつつ、コスト削減等を図りながら競争力を高めることにより、資産の入れ替えを加速し、事業ポートフォリオの質の向上を図っている。(図5-3)

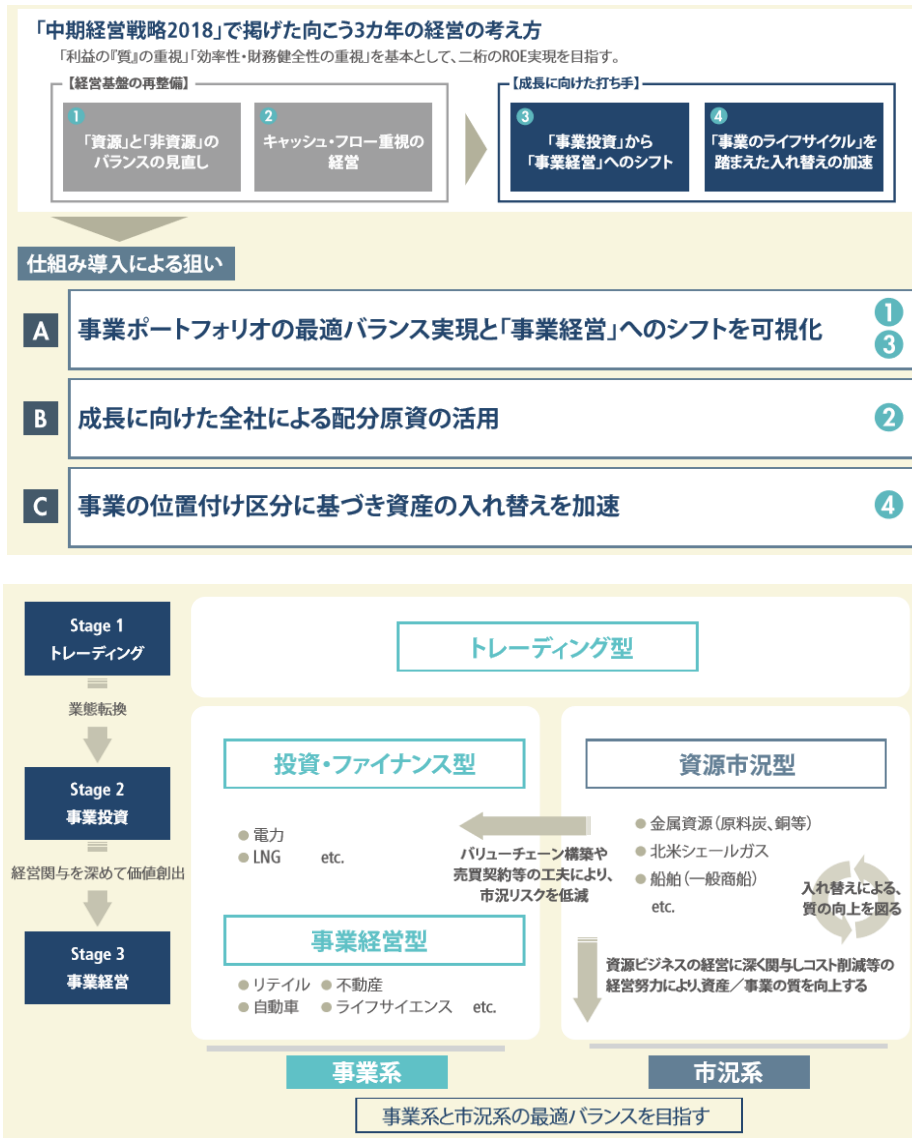
更に、三菱商事は2018年11月に「中期経営戦略2021」を発表し、その骨子の一つとして事業ポートフォリオ戦略を挙げている。これは全産業を俯瞰し、外部環境の変化も踏まえ、次に攻めるべき分野や入替えを進める分野を全社で検討する為、事業ポートフォリオの枠組みを導入するものである。横軸に「生活」「モビリティ・インフラ」「エネルギー・電力」「サービス (IT, 物流, 金融等)」, 縦軸に「川上」「川中」「川下」の12セクターに分類し、今後ポートフォリオ議論を進める。今後はサービス分野と川下領域を強化することにより、安定性の高い事業ポートフォリオを、更なる成長ステージに引き上げることを目指すとしている。(図5-4)

三菱商事の業績は、2015年度の資源価格の急激な下落を受けて2015年度（2016年3月期）は連結純損失▲1,494億円と史上初の連結赤字に陥ったが、上述の様に事業ポートフォリオの質向上及び事業経営へのシフトを進めた結果、2016年度に連結純利益4,403億円、2017年度は同5,602億円に急回復した。また、2018年度は史上最高益の同6,400億円を見込み、2021年度は同9,000億円を計画する。（図5-5）

次に、三菱商事の連結純利益の34%、総資産の24%を占める金属グループの事業ポートフォリオについて述べる。金属グループは、金属資源事業を運営する市況系、鉄鋼製品及び金属資源（非鉄金属）トレーディング事業を運営する事業系に分類される。金属資源事業は金属グループの利益及び資産の大層を占めるが、資源価格の変動リスク及び地政学リスクの顕在化を踏まえ、資産入れ替えを通じたポートフォリオの強靱化、並びに保有資産の競争力強化を図っている。金属資源事業の資産入れ替えについては、原料炭及び銅に集中し、一般炭・アルミ・ニッケル・クロム・ウラン・貴金属等の他事業は見極め又は撤退を進めている（図5-6）。特に、原料炭は資源メジャーBHPとの合弁（BHP50%：三菱商事50%）、銅は資源メジャーAnglo Americanとの合弁（Anglo American60%：三菱商事40%^{*}）の形態を取り、マイノリティー出資からメジャー又は経営権・拒否権確保へシフトし、主体的に事業経営に参画する方針としている⁴⁾。

三菱商事が金属資源事業のポートフォリオにおいて原料炭及び銅へ集中する背景は、その歴史にある。前述2.5.2の通り、原料炭は1968年からのMDPへの出資参画及び2001年の本格経営参画（出資比率50%へ引上げ）、銅は1980年代半ばからチリやペルーの銅鉱山へのマイノリティー出資及び2011年のチリAnglo American Sur社の株式取得（当時24.5%出資）に始まっており、早期から原料炭と銅の鉱山事業に参画し、ノウハウ・知見を蓄積していたためである⁵⁾。原料炭及び銅への経営資源集中は、世界人口の増加とインフラ需要拡大による鉄鋼・銅の中長期的な需要増加及び価格上昇を見込んだ戦略であり、当面の収益力向上に寄与するが、資源ポートフォリオの集中は資源価格下落時に分散によるナチュラルヘッジが効きにくい為、株主や経営者の視点では集中リスクを抱えた戦略とも言える。

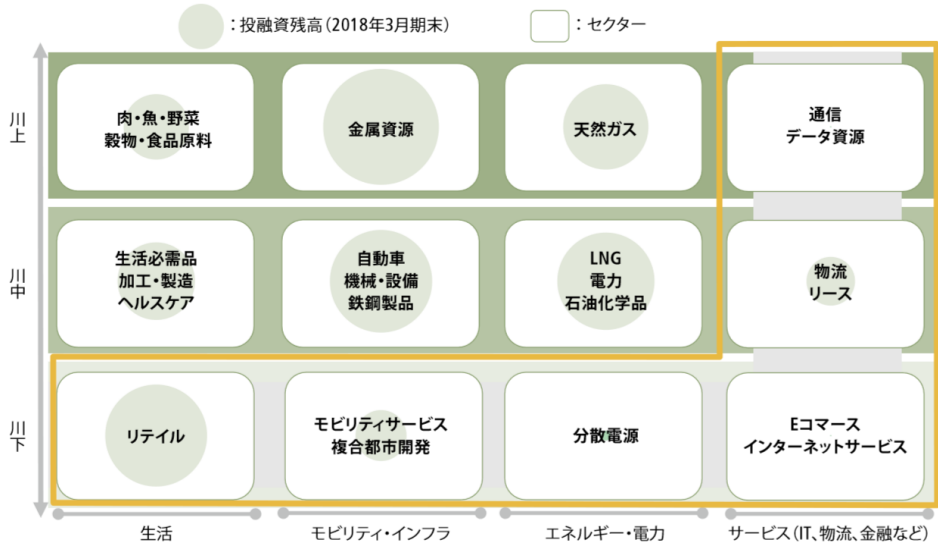
* 三菱商事は2018年度にAnglo American Surの株式を買増し、出資比率を20.4%から40%へ引上げた。



出典：三菱商事ホームページ 統合報告書2017

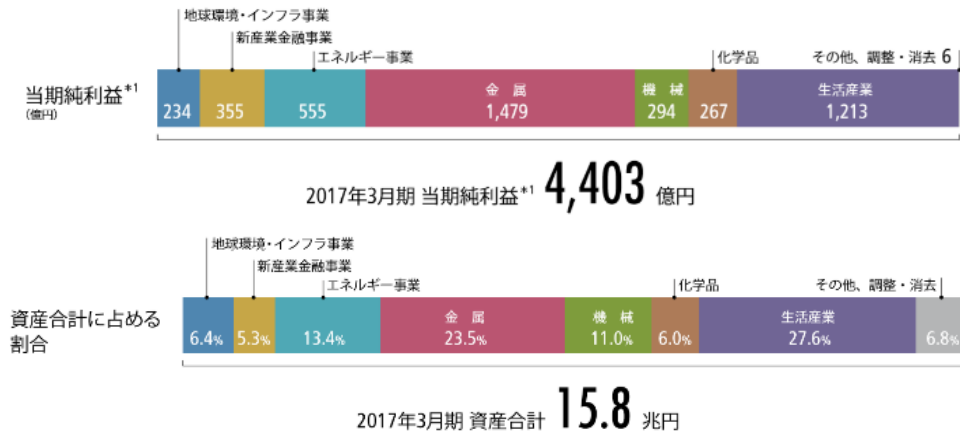
図5-3 三菱商事の中期経営戦略2018

【事業ポートフォリオ戦略】

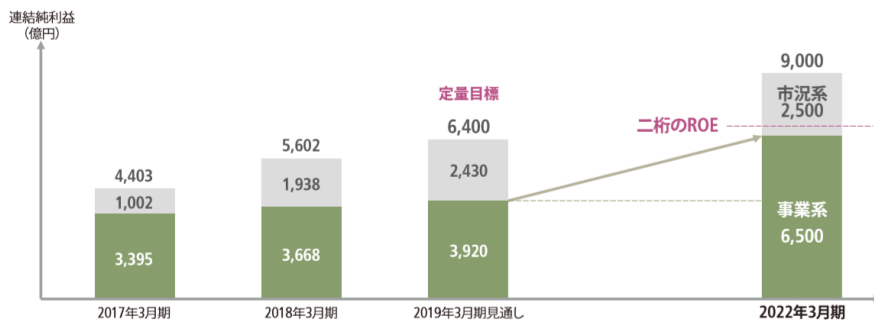


出典：三菱商事ホームページ 統合報告書2018

図5-4 三菱商事の中期経営戦略2021



【定量目標】



出典：三菱商事ホームページ 統合報告書2017, 2018

図5-5 三菱商事の業績及び資産

分野	「中期経営戦略2018」の進捗	今後の成長と課題
市況系 (金属資源)	<ul style="list-style-type: none"> 資産入れ替えを通じたポートフォリオ強靱化 コスト削減／生産性向上施策の継続による競争力強化 	<ul style="list-style-type: none"> 保有資産の更なる競争力強化 下方抵抗力が高く、価格上昇時の追い風を取りこめる体制の構築
事業系 (鉄鋼製品トレーディング/ 金属資源トレーディング)	<ul style="list-style-type: none"> 国内事業の統廃合、海外事業の加工・販売体制の強化 (鉄鋼製品トレーディング) 事業会社からのソーシングをてこにした供給ソースの多様化と拡大 (金属資源トレーディング) 	<ul style="list-style-type: none"> 成長市場を中心とした需要の取りこみ 安定収益基盤としての収益の更なる積み増し

グループ全体を取り巻くリスクと機会

- 資源価格の動向
- 成長市場を中心とした金属資源・製品需要の動向
- 地政学リスクの顕在化
- AI/IoTを含めた先進技術がもたらす構造変化

主要金属プロジェクト一覧					
商品	プロジェクト	所在国	年間生産能力*1	主なパートナー	三菱商事出資比率
原料炭	BMA	オーストラリア	原料炭ほか 69百万トン*2	BHP	50.00%
	Escondida	チリ	銅 1,200千トン	BHP, Rio Tinto	8.25%
銅	Los Pelambres	チリ	銅 410千トン	Luksic Group (AMSA)	5.00%
	Anglo American Sur	チリ	銅 354千トン*3	Anglo American	20.4%
	Antamina	ペルー	銅 450千トン 亜鉛 400千トン	BHP, Glencore, Teck	10.00%
	Quellaveco 事業化調査を推進中	ペルー	年間平均生産量 銅220千トン(予定)	Anglo American	18.10%
	Gresik (製錬)	インドネシア	銅 300千トン	PT Freeport Indonesia 三菱マテリアル JX金属	9.50%

出典：三菱商事ホームページ 統合報告書2017

図5-6 三菱商事金属グループの事業ポートフォリオ

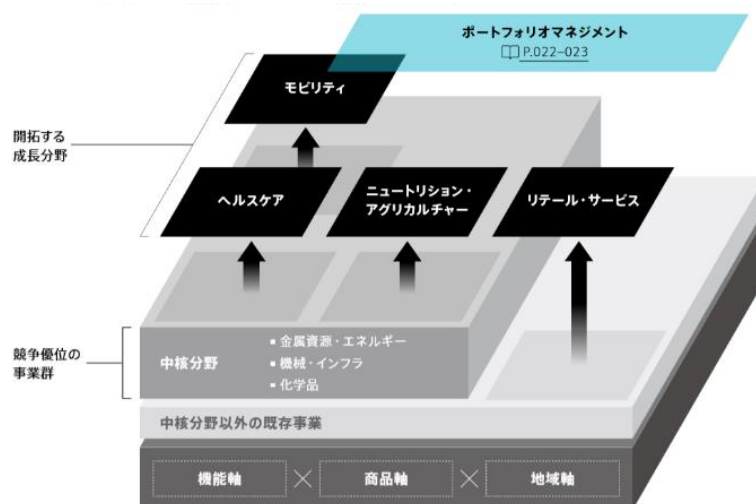
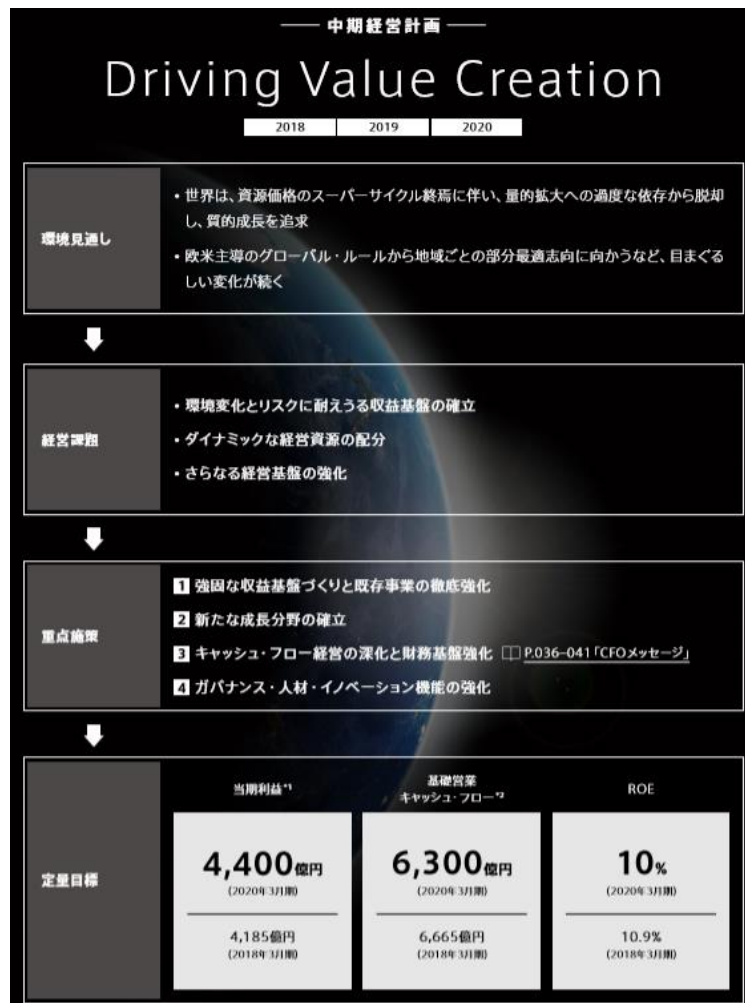
b) 三井物産

三井物産は2018～2020年度の中期経営計画において、重点施策として①強靱な収益基盤づくりと既存事業の徹底強化、②新たな成長分野の確立、③キャッシュフロー経営の深化と財務基盤強化、④ガバナンス・人材・イノベーション機能の強化を挙げている。また、ポジショニング戦略として、中核分野である金属資源、エネルギー、機械、インフラ及び化学品事業は資産を積み増す投資を継続し、新たな成長分野であるヘルスケア、ニュートリションアグリカルチャー、リテールサービス及びモビリティを発展・進化させ、中核分野と成長分野の両立に向けて、ポートフォリオマネジメントを通じ、限りある経営資本をバランスよく配分するとしている（図5-7）。

また、ポートフォリオマネジメントについては、事業投資のライフサイクルマネジメント及び規律あるポートフォリオマネジメント経営の実践を進めている。ライフサイクルマネジメントでは、投資意思決定・事業立ち上げからリサイクルの各ステージで、リスクマネジメント機能を強化し、事業の良質化とリターン獲得を目指し、一方、投資規律の徹底と資産入れ替えにより、バランスあるキャッシュフロー配分と資本効率の向上、事業ポートフォリオの強化を図るとしている。

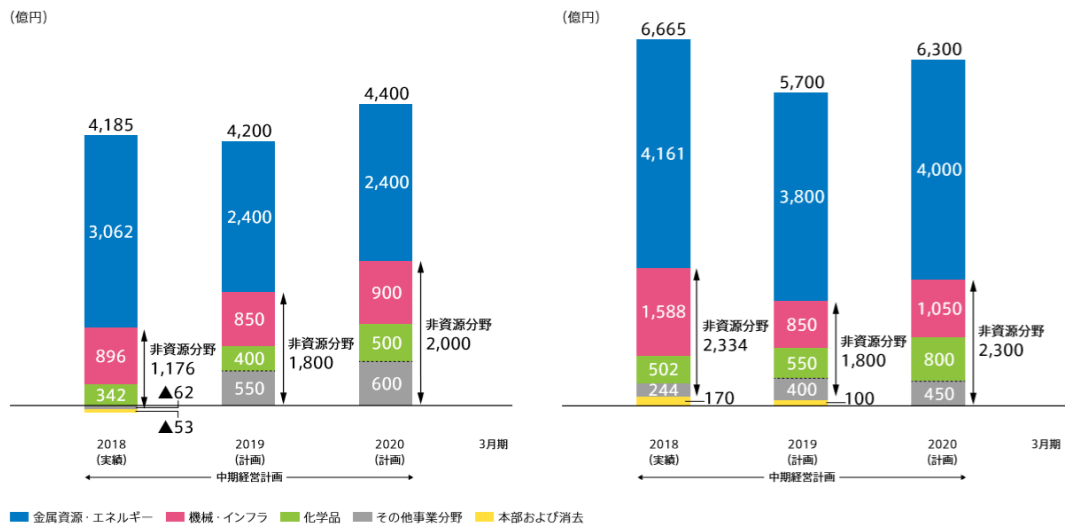
三井物産の業績は、2015年度の資源価格下落を受けて金属・エネルギープロジェクトの減損計上により、2016年度（2016年3月期）の当期損失が▲834億円の赤字となった。その後資源価格の回復と非資源事業の収益化により、2017年度当期利益が3,061億円、2018年度当期利益が4,185億円に回復した。三井物産の特徴は、資源分野（金属資源・エネルギー）への依存度が高いことであり、2017年度実績ベースで当期利益の57%、営業キャッシュフローの68%を資源分野が占める（図5-8）。これは他商社との比較（当期利益ベースの資源分野比率）で、三菱商事35%、住友商事34%、伊藤忠商事22%に対して圧倒的に高く、資源ポートフォリオに傾注した経営と言える。

三井物産の金属資源事業は、鉄鉱石を中心としており、石炭・銅・ニッケルの鉱山も保有している。但し、近年で業績に大きく貢献しているのは鉄鉱石事業のみである（図5-9）。三井物産の鉄鉱石事業を中心とする背景はその歴史にあり、1970年代に遡る。三井物産は資源メジャーであるValeとの関係が深く、2001年にブラジル鉱物資源企業カエミ社へ共同出資、2003年にValeの持株会社Valeparの株式15%を取得し、役員派遣等によりValeの経営に参画している⁶⁾。金属資源事業の中でのポートフォリオは一定程度分散されているが、基本的にマイナー出資であり、経営主体はパートナーである資源メジャー又は資源会社である為、事業価値向上や持分利益・配当取込みはパートナーに依存する体質となっていると言える。



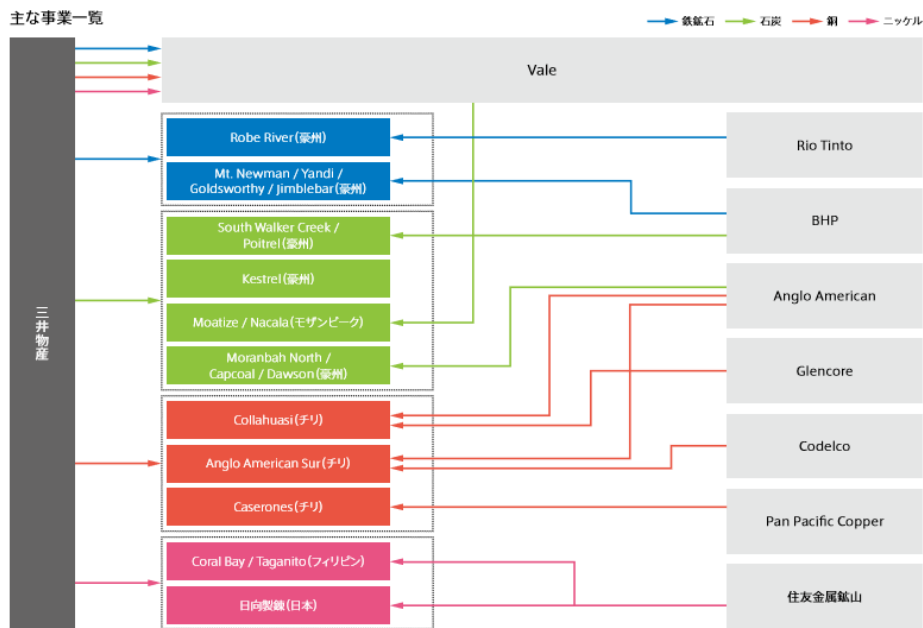
出典：三井物産ホームページ 統合報告書2018

図5-7 三井物産の中期経営計画



出典：三井物産ホームページ 統合報告書2018

図5-8 三井物産の業績（当期利益）及びキャッシュフロー



主な関係会社

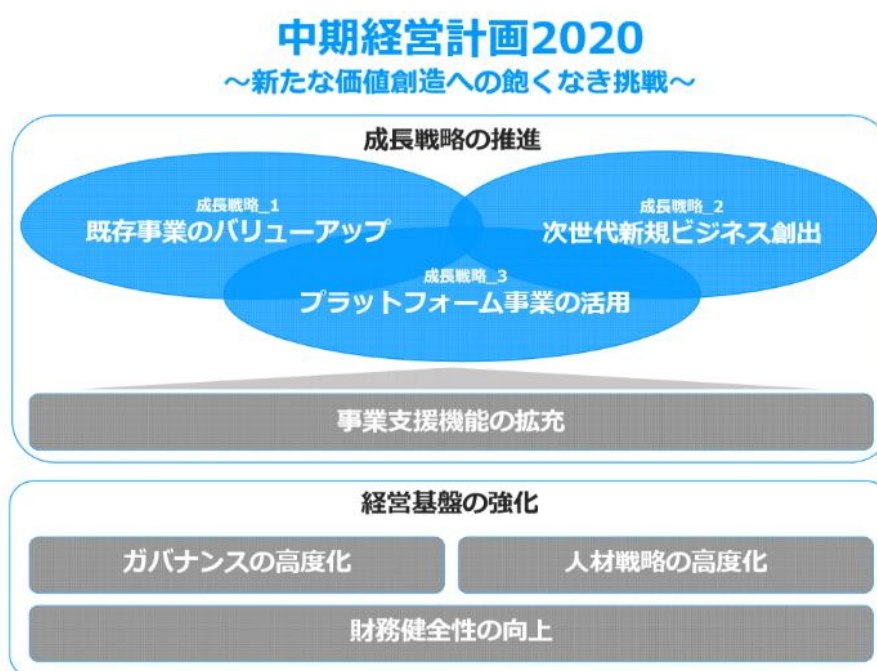
会社名	事業内容	損益比率 (%)	年間持分業績 (億円)		
			16/3期	17/3期	18/3期
(集約) 豪州鉄鉱石事業	豪州鉄鉱石の採掘・販売	Var.	747	1,029	1,104
(集約) 豪州石炭事業	豪州石炭の採掘・販売	Var.	▲264	343	463
(集約) モザンビーク石炭および鉄道・港湾インフラ事業	モザンビーク石炭および鉄道・港湾インフラ事業への投資	100.0	—	▲15	26
Japan Collahuasi Resources	チリCollahuasi銅鉱山への投資	91.9	14	33	63
Oriente Copper Netherlands	チリ銅事業会社Acruxへの投資	100.0	▲997	▲86	26
三井物産カッパーインベストメント	チリCaserones銅鉱山への投資	100.0	▲521	▲89	▲226

出典：三井物産ホームページ 統合報告書2018

図5-9 三井物産の金属資源事業のポートフォリオ

c) 住友商事

住友商事は2018～2020年度の中期経営計画において成長戦略として、①既存事業のバリューアップ、②次世代新規ビジネス創出、③プラットフォーム事業の活用を挙げている。①は既存事業の収益拡大とフルポテンシャル化、事業環境変化への対応、②はテクノロジーとイノベーション、ヘルスケア、社会インフラ事業への資金投下、③は複数事業の掛け合わせと組織間連携による価値創造を示している（図5-10）。



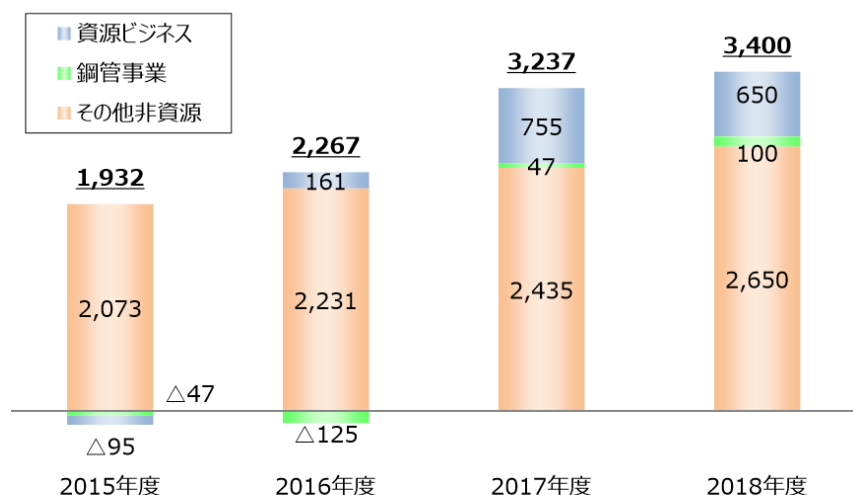
出典：住友商事ホームページ 統合報告書2018

図5-10 住友商事の中期経営計画

住友商事の業績は、基礎収益ベース（減損を除く）で、2014年度1,840億円、2015年度1,932億円、2016年度2,267億円、2017年度3,237億円と年々向上している（図5-11）。但し、減損を含めた連結純損益では、2014年度▲732億円（内減損額▲2,572億円）、2015年度745億円（同▲1,187億円）、2016年度2,267億円（同▲558億円）、2017年度3,237億円（同▲152億円）と、減少傾向であるものの多額の減損を計上している。これは金属鉱山・石油・シェールガス等の資源プロジェクトの価値棄損が主要因であり、投資案件の事業リスクマネジメントとポートフォリオマネジメントに課題があると言える。

住友商事は6つの事業部門の中に資源・化学品事業部門があり、ここに金属資源事業が含まれる組織となっている。2015～2017年度（3年間）の全社投資額8,900億円に占める資源投資（上流権益）1,400億円の比率16%に対して、同3年間の全社基礎収益7,436億円に占める資源事業基礎収益821億円の比率は11%であり、資源事業の投資効率は全社平均を下回る（図5-12）。これに対し新中期経営計画における資源・化学品事業部門の戦略は、「中長期的に大きな収益貢献が可能であり、リスク分散の効いた事業ポートフォリオを構築しつつ、産業界への安定供給を目指す」とする。具体的には、①既存案件の早期収益化、②新規優良案件の獲得、③中下流ビジネスは上流とのバリューチェーンを強化し、高付加価値のビジネスを展開する戦略としている。

金属資源事業におけるリスクエクスポージャーは、ニッケルを中心としており、他にも銅・銀・亜鉛・鉛があり、三菱商事・三井物産とは異なるポートフォリオを形成している（図5-13）。ニッケルは、ステンレス鋼の他、電池材料・電子材料等に利用され、近年では携帯電話や環境対応車等の急伸に伴い世界的に需要が高まっている。住友商事はその需要を取り込むべく、2005年にマダガスカル共和国のニッケル鉱山事業アンバトビー・プロジェクトへ出資参画した経緯がある。同プロジェクトのニッケル地金生産能力は年間6万トンで、世界市場シェアの約3%を占める⁷⁾。一方、住友商事の金属資源事業のリスクエクスポージャー（資産額ベース）0.6兆円は、三菱商事（金属グループ）3.7兆円の1/6弱、三井物産（金属資源本部）2.1兆円の1/3強に留まり、相対的な事業規模は大きくない。



*1 基礎収益 = (売上総利益 + 販売費及び一般管理費(除く貸倒引当金繰入額) + 利息収支 + 受取配当金) × (1 - 税率) + 持分法による投資損益除、減損損失：(2017年度) インドネシア商業銀行 △151億円

出典：住友商事ホームページ 統合報告書2018

図5-11 住友商事の業績（基礎収益）

(単位：億円)	投資額		主な投資実績
	実績 (15/4-18/3)	3年合計計画* (15/4-18/3)	
金属	600	1,200	・米国 車軸加工事業 ・欧州 自動車用鍛造部品事業
輸送機・建機	2,100	2,800	・米国 建機レンタル事業 100%子会社化 ・ブラジル 風力発電向け鍛造品製造・販売事業
環境・インフラ	1,400	1,400	・ブラジル 水事業 ・欧州 洋上風力発電事業
メディア・生活関連	2,900	2,800	・アイルランド 青果物生産・卸売企業 (Fyffes社) ・国内外不動産事業
資源・化学品	1,800	1,800	・マダガスカル ニッケル事業 ・米国 ジェネリック製薬事業
(内、上流権益 (更新投資))	(1,400)	(1,400)	
合計	8,900	10,000	

出典：住友商事ホームページ 統合報告書2018

図5-12 住友商事の事業部門別投資金額

(単位：億円)

	2017/3末	2018/3末
原料炭・一般炭	900	900
鉄鉱石	800	800
銅	1,200	1,100
銀・亜鉛・鉛	1,100	1,000
ニッケル	1,900	1,800
原油・ガス・LNG	800	800
合計	6,700	6,500

備考) 上記エクスポージャーは出資、融資、保証の合計

出典：住友商事ホームページ 統合報告書2018

図5-13 住友商事の資源事業リスクエクスポージャー

d) 伊藤忠商事

伊藤忠商事は2018～2020年度の中期経営計画において、新戦略として①商いの次世代化、②スマート経営、③健康経営No.1企業を挙げている。具体的には、①は新技術を活用したビジネスモデルの進化、ユニー・ファミリーマートホールディングス（CVS）を起点とするグループバリューチェーンの価値向上、戦略的パートナーとの連携強化による中国・アジアでのビジネス創出、②は経営効率性・労働生産性の向上、③は社員の健康増進とグループ全体の活力向上である。一方、投資戦略は次世代・新技術分野への投資推進、及びキャッシュフローを意識した規律ある成長投資の継続としている。これにより2015～2017年度の実質フリーキャッシュフローは年平均2,950億円の黒字を確保している。但し、上述の実質フリーキャッシュフローには2015年度のCITIC（中国国際信託投資公司）への大型投資6,000億円が織り込まれていない金額である（図5-14）。

伊藤忠商事の業績は、2011年度以降安定して連結純利益3,000億円前後を確保しており、資源分野の比率が低いことが功を奏して、2014～2015年度の資源価格下落時でも減損額は限定的であった為、黒字を確保した。また2018年度の連結純利益見込みは4,500億円（前年度比+497億円）であり、堅調に推移している（図5-15）。伊藤忠商事の特徴は、繊維・機械・食料・住生活等の非資源分野に傾注していることであり、資源分野の比率は基礎収益の14%、総資産の12%と他商社と比較して低く、資源価格の変動リスクを受けにくい体質である。これは伊藤忠商事が歴史的に繊維部門を中心とした生活産業を生業としており、金属鉱山等の資源部門への参入が遅かったためである。一方、上述の中国CITICへの大型投資は全社資産の7%を占めており、カントリーリスク及び事業の集中リスクを抱えていると言える（図5-16）。

伊藤忠商事の金属カンパニーは、金属・鉱物資源開発、鉄鋼・非鉄製品トレード、リサイクルビジネスに大別される。その内金属・鉱物資源開発が事業ポートフォリオの大層を占め、且つ収益源はオーストラリアの鉄鉱石・石炭・アルミ資源開発会社であるITOCHU Minerals & Energy of Australia Pty Ltd(IMEA)1社にほぼ限定されている。金属カンパニーの戦略として、資産入替えや優良権益保有による最適資源ポートフォリオの構築、原料・燃料の安定供給の基盤となる優良権益の拡充を挙げているが、金属資源事業の優良権益取得には巨額投資を必要とする一方、全社における金属資源事業の位置付けは高くなく、経営資源が限定される状況下での本戦略の実行は難易度が高いと言える（図5-17）。

基本方針

豊富な優良資産に先端技術や新たなビジネスモデルを組み合わせることで、新しい時代のビジネスモデルを構築し収益を拡大すると共に、経営効率や健康経営も追求していきます。



商いの次世代化(⇔Page 51)

- ▶ すべてのカンパニーによる新技術を活用したビジネスモデルの進化
- ▶ ユニー・ファミリーマートホールディングスを起点とするグループバリューチェーンの価値向上
- ▶ 戦略的パートナーとの積極連携を進め、中国・アジアでのビジネス創出を加速



スマート経営(⇔Page 42、58)

- ▶ ROEをはじめとした経営効率性、労働生産性で業界No.1
- ▶ 働き方改革と“削る”の深化



健康経営No.1企業(⇔Page 58)

- ▶ 社員がやりがいを持って存分に働き、家族にとっても一番いい会社へ
- ▶ 一人ひとりの健康増進とグループ全体の活力向上

投資方針

これまでのキャッシュ・フローを意識した規律ある成長投資等の方針を継続、「商いの次世代化」に向けた投資を着実に実行していきます。

次世代・新技術分野への投資推進による「次世代“商い”」の創造

キャッシュ・フローを意識した規律ある成長投資の継続

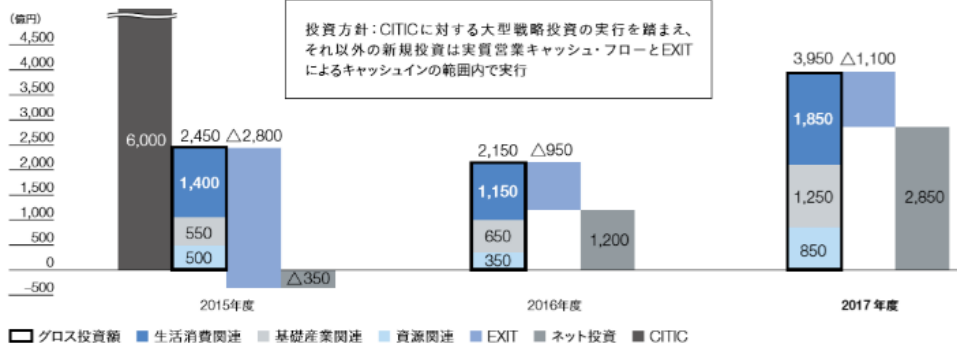


株主還元後実質フリー・キャッシュ・フロー※の黒字継続

※「実質営業キャッシュ・フロー」-「ネット投資」-「配当・自己株式取得」

単位：億円	2015年度 実績	2016年度 実績	2017年度 実績	2018年度 イメージ
実質営業キャッシュ・フロー	3,750	4,200	4,600	5,000程度
ネット投資	350	▲1,200	▲2,850	
実質的なフリー・キャッシュ・フロー	4,100	3,000	1,750	1,200以上
配当	▲750	▲830	▲930	▲1,200程度
自己株式取得	—	▲160	▲280	機動的に実施
株主還元後実質フリー・キャッシュ・フロー	3,350	2,010	540	黒字継続

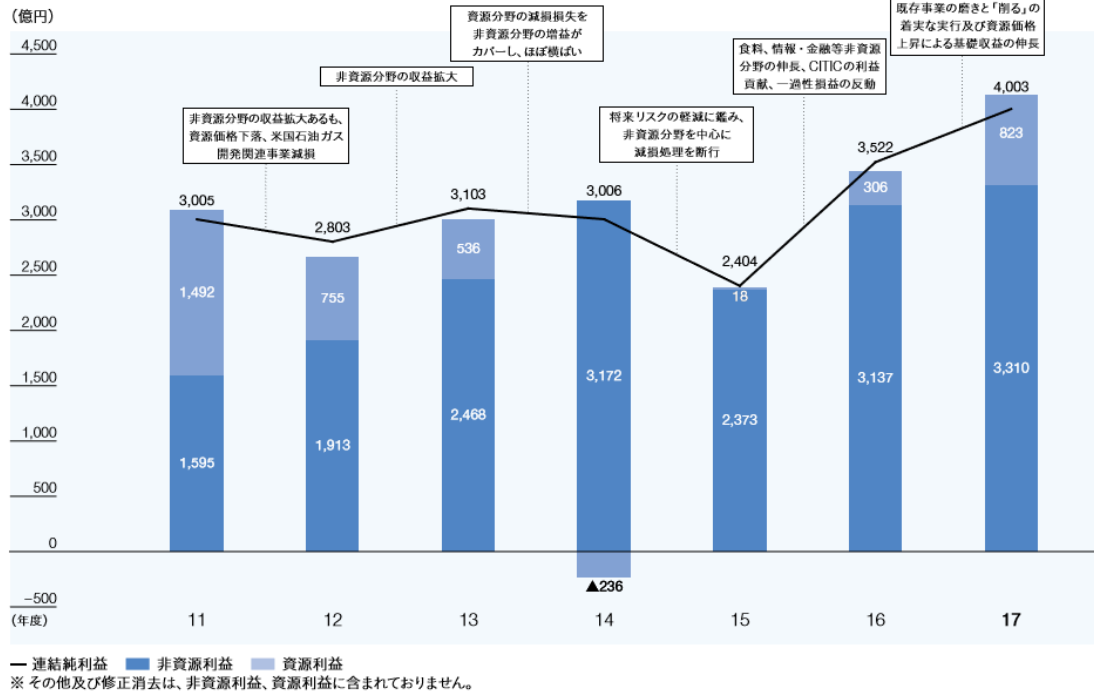
投資実績



出典：伊藤忠商事ホームページ 統合レポート2018

図5-14 伊藤忠商事の中期経営計画

連結純利益(非資源 / 資源)



出典：伊藤忠商事ホームページ 統合レポート2018

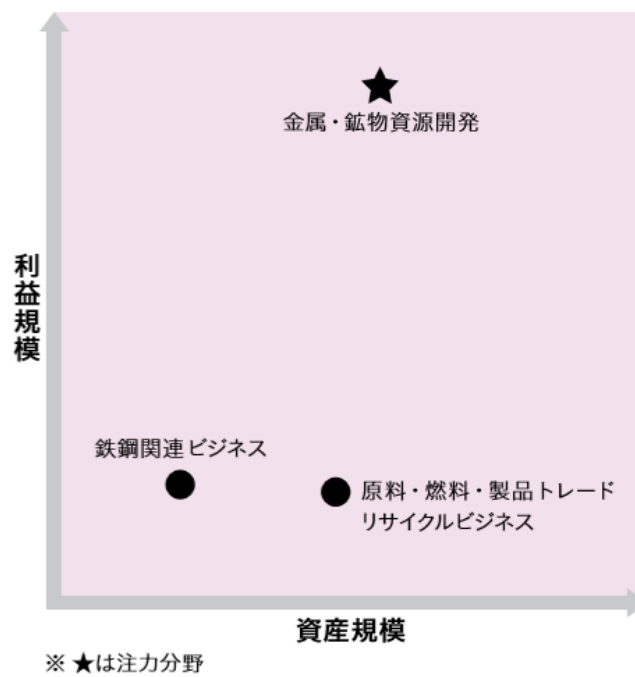
図5-15 伊藤忠商事の業績



出典：伊藤忠商事ホームページ 統合レポート2018

図5-16 伊藤忠商事の事業ポートフォリオ

資産ポートフォリオと効率性



業績推移及び主要連結対象会社からの取込損益内訳

	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度(計画)*1
連結純利益	112	△167	452	825	600
主要連結対象会社からの取込損益内訳					
1 ITOCHU Minerals & Energy of Australia Pty Ltd (IMEA)	423	△226	428	623	427
2 日伯鉄鉱石㈱(CSN Mineração**)	△448	△9	△29	33	—
3 ITOCHU Coal Americas Inc. (ICA) (Drummond**)	1	△23	△26	29	—
4 伊藤忠丸紅鉄鋼㈱*	128	66	76	92	—
5 伊藤忠メタルズ㈱	2	20	11	16	13
セグメント別資産	12,618	8,764	8,549	8,503	—
ROA(%)	0.9	△1.6	5.2	9.7	—
基礎収益	—	213	532	805	—

*1 「2018年度(計画)」は、2018年5月2日公表の数値を表示しています。
 2 「」は持分法適用関連会社、「**」は一般投資先です。

戦略の方向性

成長機会	戦略(打ち手)
金属・鉱物資源、金属原料に対する時代や社会からの要求の変化	⇒ 資産入替や優良な権益の保有を通じた次世代の産業に利する最適な資産ポートフォリオの構築
堅調な世界経済の発展に伴う金属・鉱物資源及び鉄鋼・非鉄製品トレードやリサイクルビジネスの拡大	⇒ 優良パートナーとの強固な関係を活かした新規・高付加価値トレードの仕組み形成
ESGの観点からの中長期的な成長阻害要因	対応
温室効果ガス排出規制に伴う化石燃料需要の不透明感と低炭素社会実現に向けた産業素材の変化	⇒ 温室効果ガス排出削減に寄与する技術開発への関与の継続、自動車軽量化・EV化に寄与するビジネス(アルミ等)の取組強化
資源量の減耗や鉱山の終掘による生産量・販売数量の減少	⇒ 原料・燃料の安定供給の基盤となる優良権益の拡充
環境・衛生・労働安全や地域住民との共生への配慮	⇒ EHS*ガイドラインの運用並びに社員教育の徹底、地域社会への医療・教育・寄付、地域インフラ整備等への貢献

出典：伊藤忠商事ホームページ 統合レポート2018

図5-17 伊藤忠商事金属部門の事業ポートフォリオと戦略

e) 各商社の事業ポートフォリオと業績の関連性

各商社の2009～2018年度（10年間）における金属資源事業の連結純利益・資産比率の推移を図5-17に示す。資産ベースの事業ポートフォリオでは、三菱商事が最も金属事業比率が高く20～30%程度（10年平均25%）であり、同事業の連結純利益が平均1,134億円と最大であるが、最高3,263億円、最低▲3,607億円と変動幅も最大であり、業績のボラティリティは高い。次いで三井物産が近年の金属資源事業比率が高く、また2009年度11%→2018年度20%へと年々比率を高めている（同16%）。また三井物産の同事業の連結純利益は平均1,085億円と二番目に高いが、資産比率向上が必ずしも連結純利益の増大には繋がっていない。住友商事は金属資源事業比率が15～19%（同17%）と相対的に安定しているが、同事業の連結純利益は10年平均で91億円と最小である（最高908億円、最低▲1,910億円）。これは2014～2016年度に減損により大幅赤字を計上した為である。伊藤忠商事は金属資源事業比率を2009年度19%→2018年度10%へ年々引き下げており（同13%）、これに伴い同事業の連結純利益も2009年度1,147億円→2018年度600億円へと徐々に減少しており（平均707億円）、同事業の希薄化（非資源事業の強化）を進めている。



図5-17 各商社における金属資源事業の連結純利益及び資産比率

商社毎の全社連結純利益，金属資源事業の連結純利益，金属資源事業の連結純利益比率，及び金属資源事業の資産比率を図5-18～5-21に示す。金属資源事業比率の低い伊藤忠商事を除き，三菱商事・三井物産・住友商事全ての金属資源事業の業績が全社業績に大きな影響を与えている。つまり商社が高い業績を上げるためには，金属資源事業を一定比率保有することが有効であるが，同事業の損益の変動が激しい為，如何に事業リスクをコントロールするかが極めて重要となる。また，各商社の事業ポートフォリオ戦略によるが，非資源事業は比較的安定収益を獲得できる為，全社の経営資源を非資源事業へ十分に配分する必要がある。したがって，商社は全社資産・資金等の経営資源の一定割合について制限を設けて金属資源事業へ配分することにより，事業ポートフォリオの最適化を図り，適正な利益を獲得し，株主等のステークホルダーの期待に応えることが重要視される。但

し、金属資源鉱山の買収・出資参画には巨額の資金を必要とし、数多くの鉱物資源や鉱山への投資は不可能である為、各商社は歴史的経緯等から自社に強みがある鉱物資源や鉱山に集中投資している。こうして、三菱商事は原料炭と銅、三井物産は鉄鉱石、住友商事はニッケルへ集中投資している要因となっていると言える。

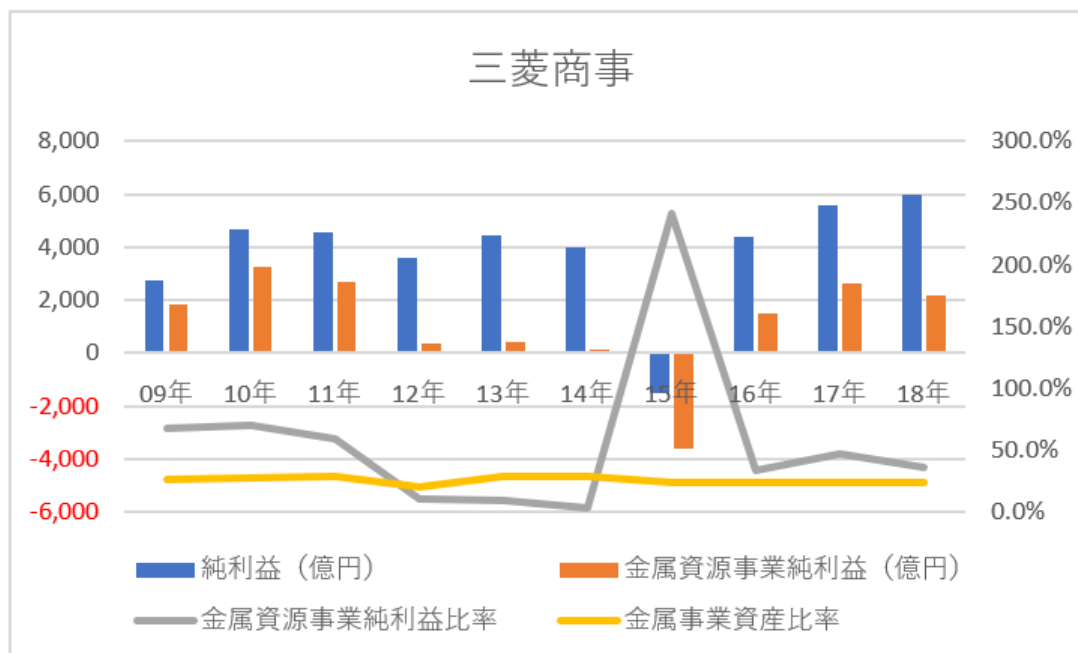


図5-18 三菱商事の全社/金属資源事業の連結純利益・純利益比率及び資産比率

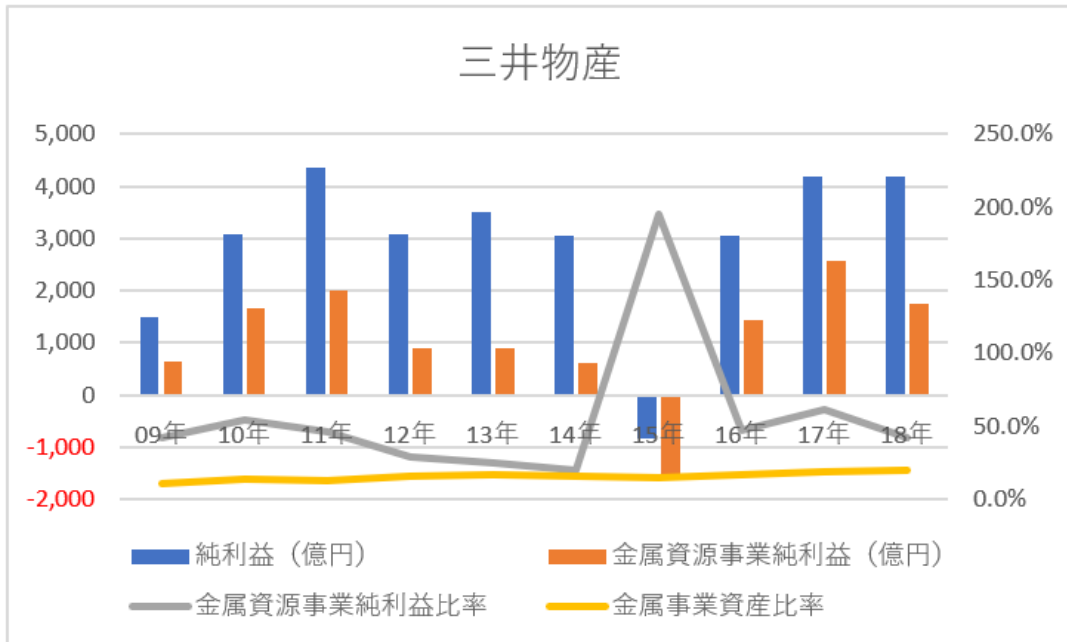


図5-19 三井物産の全社/金属資源事業の連結純利益・純利益比率及び資産比率

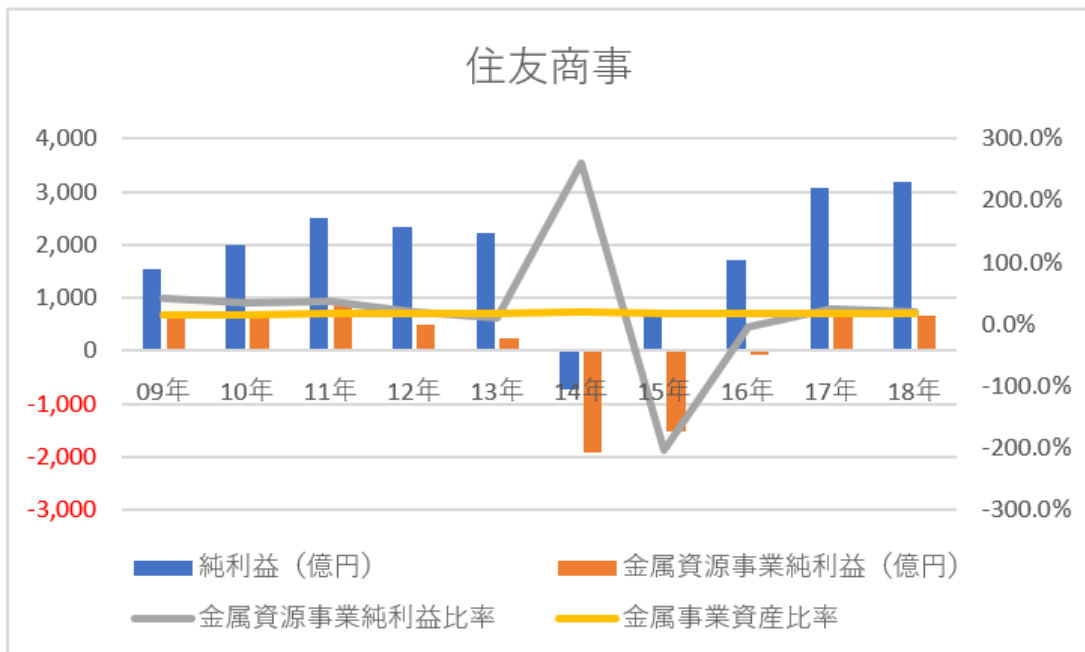


図5-20 住友商事の全社/金属資源事業の連結純利益・純利益比率及び資産比率

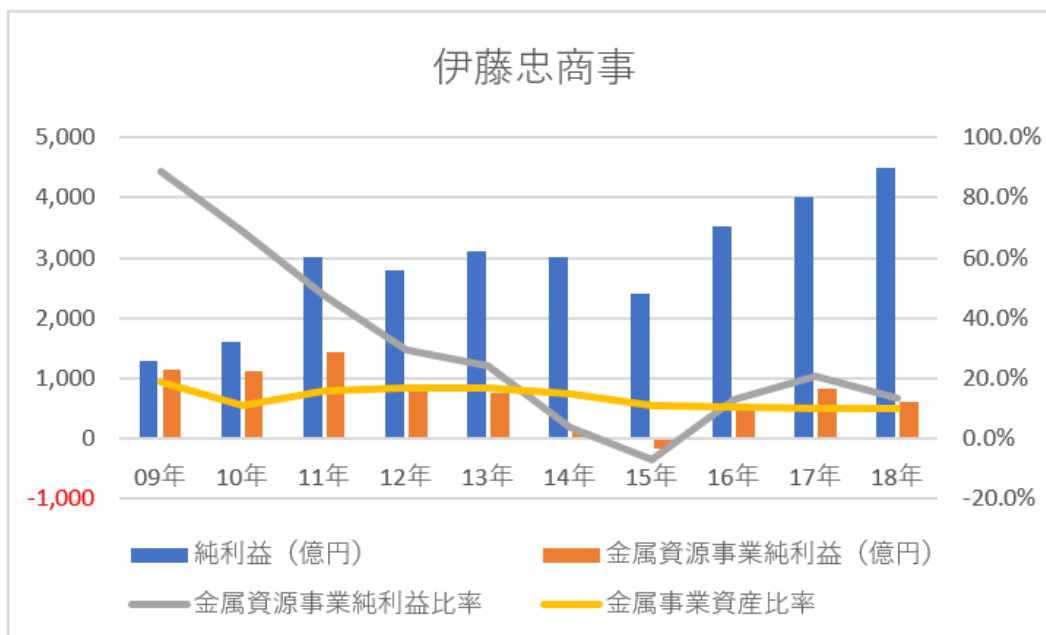
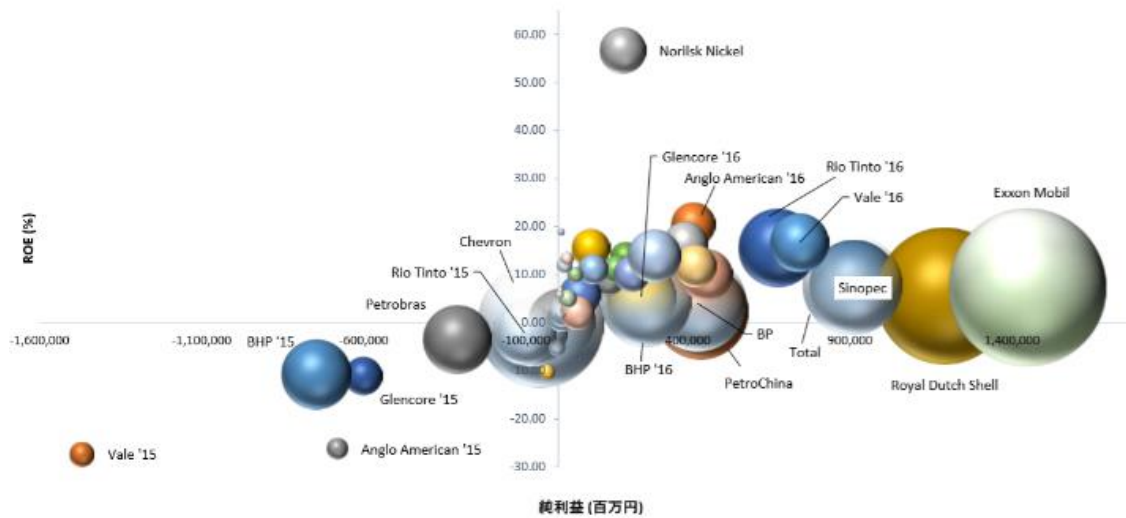


図5-21 伊藤忠商事の全社/金属資源事業の連結純利益・純利益比率及び資産比率

5.2.3 資源メジャーの事業ポートフォリオ

資源メジャーは、石油・天然ガス・金属資源等の資源開発・販売を行うグローバル企業で、豊富な資産・資金を有しており、その位置付けを図5-22に示す。また資源メジャーは、商社の資源事業の合弁パートナーでもある。金属資源メジャー5社（BHP、Rio Tinto、Vale、Anglo American、Glencore）は、売上高・純利益が石油・天然ガスメジャー（Exxon Mobil、Royal Dutch Shell、Sinopec、Total等）には及ばないものの、ROE（16年度）が同等以上であり、相対的に経営効率が高い財務体質である。また、2015年度は金属資源価格下落により総じて赤字決算であったが、2016年度は資源価格の回復・コスト削減・資産入替効果により高い利益を確保した。

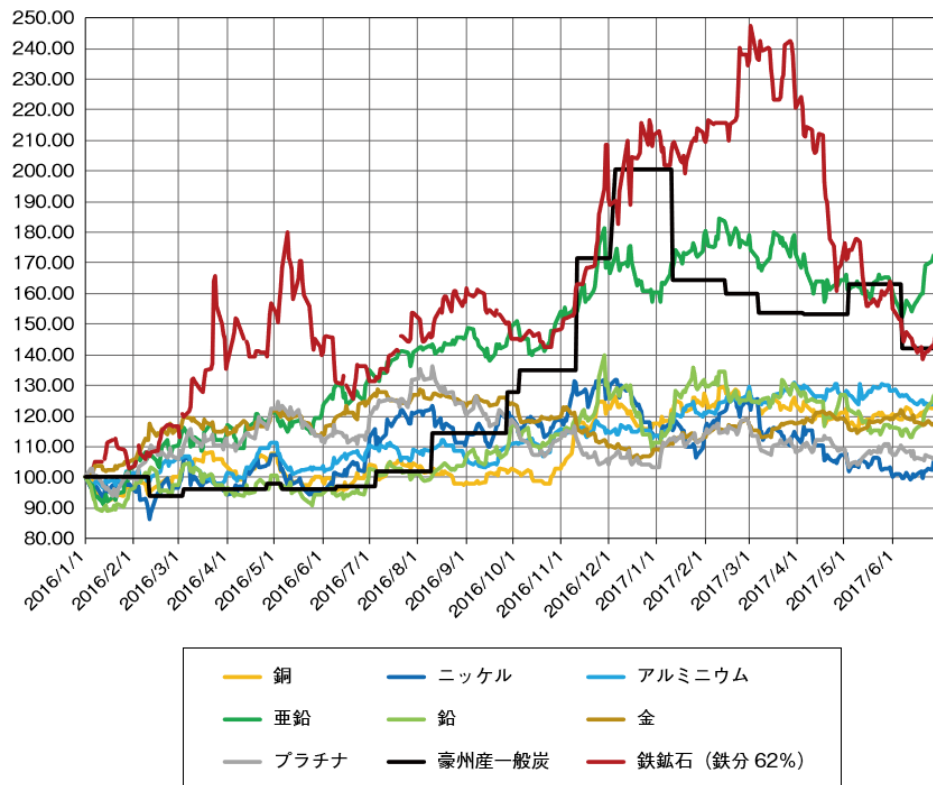
金属資源価格は、2016年1月以降徐々に回復傾向にあるが、品種によりバラツキが大きい。世界的なインフラ・電力需要の回復により、鉄鋼製品の原料である鉄鉱石・亜鉛、及び火力発電原料である一般炭は上昇幅・変動幅共に大きい。その他品種は上昇幅が小さい（図5-23）。これにより後述の通り、各資源メジャー間での収益構造やポートフォリオ戦略に大きな相違が発生したと言える。



売上高：円の大きさ，純利益：横軸，ROE：縦軸

出典：JOGMEC(石油天然ガス金属鉱物資源機構)ホームページ 資源メジャー・金属部門の動向調査2017

図5-22 資源メジャーの位置付け



資源価格推移 (2016年1月1日の価格を100として指数化)

出典：JOGMECホームページ 資源メジャー・金属部門の動向調査2017

図5-23 金属資源価格推移

金属資源メジャー各社は夫々強みを持つ優良資産を有しているが、近年のポートフォリオ戦略や資産入替え方針により、更に企業体力・業績差が発生している。(図5-24～5-26)

BHPは、鉄鉱石・銅・原料炭に注力し、自社保有の大型有力案件の拡張・開発を進めた結果、2016年度は資源メジャー最大の利益を計上した。

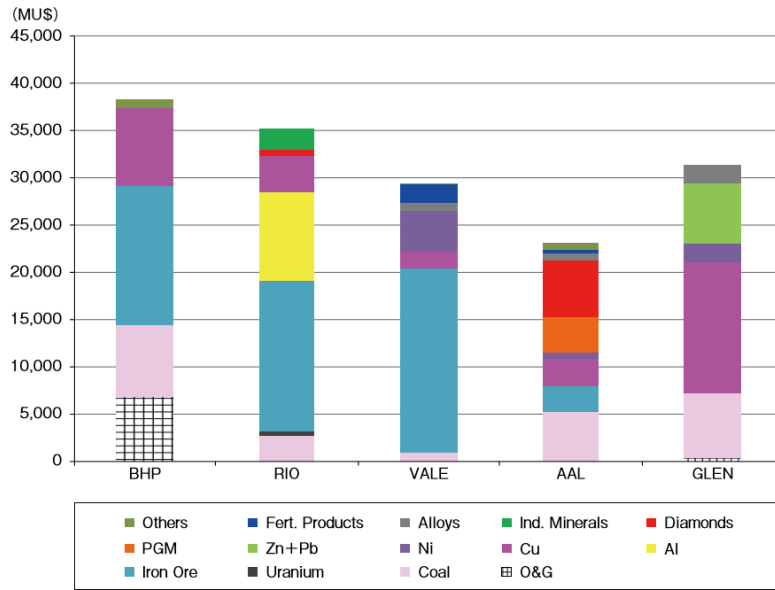
Rio Tintoは、鉄鉱石・ボーキサイト（アルミ）・銅に注力し、事業の選択と集中を積極的に展開。リストラによる財務改善・コスト削減を進めた結果、BHPに次ぐ利益を計上した。

Valeは、鉄鉱石・ニッケルに注力し、財務体質改善を目的とした事業・資産の売却を推進した。Valeは品種毎の利益額を公表していないが、鉄鉱石で利益を上げた一方、主力のニッケルでは十分な利益を確保できなかったと考えられる。

Anglo Americanは、特徴あるポートフォリオを有しており、ダイヤモンド・PGM (Platinum Group Metal)・銅に注力し、財務体質改善を目的とした事業・資産の売却を積極的に推進した。リストラ費用・資産売却損の計上があった為利益は相対的に低かったものの、コスト競争力が高まった為、今後の利益向上が予想される。そのため株価の上昇率(2016年1月比株価3.5倍)は金属資源メジャートップである。

Glencoreは、銅・亜鉛に注力し、他社に先駆けて戦略的に事業・資産の入替えを進めた。石炭等資産売却損の計上により利益は資源メジャーの中で最も低かったものの、資源メジャーで唯一トレーディング部門を有しており、資金提供対価確保等で、全社ベースの利益は堅実に上げた⁹⁾。

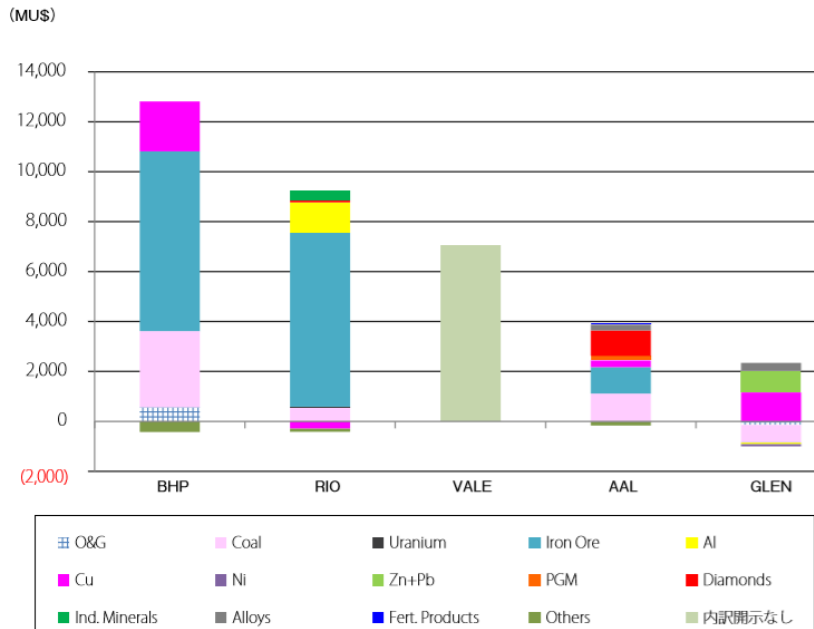
尚、資源メジャーは前述の通り豊富な資産と資金を有し、且つ資源事業に特化している為、複数の金属資源や相当数の鉱山を保有することができる。一方、資源事業のみであるが故、業績は資源価格によって左右される傾向が強い。したがって、資源メジャーは鉱山ポートフォリオを分散することによりナチュラルヘッジを行い、適宜資産の売却や入替えを行うことにより、収益やキャッシュフローの安定化を図っている。



出所：各社アニュアルレポート
 (注) Glencoreはトレード部門を除いた、生産部門のみの売上である。

出典：JOGMECホームページ 資源メジャー・金属部門の動向調査2017

図5-24 金属資源メジャーの2016年度売上高



出所：各社アニュアルレポート
 (注1) Glencoreはトレード部門を除いた、生産部門のみの値である。
 (注2) Valeは2016年より事業セグメントの内訳を開示せず。

出典：JOGMECホームページ 資源メジャー・金属部門の動向調査2017

図5-25 金属資源メジャーの2016年度利益(EBIT)



出典：JOGMECホームページ 資源メジャー・金属部門の動向調査2017

図5-26 金属資源メジャーのポートフォリオ戦略

5.3 考察

商社は多様な事業を有するコングロマリットであるが、トレーディングから事業投資、更に事業経営へシフトする中、商社毎に特徴ある事業ポートフォリオを有するようになった。商社の事業は資源事業と非資源事業に大別されるが、相対的には三菱商事と三井物産が資源事業の資源事業比率が高く、中でも三菱商事は金属資源事業の比率、三井物産はエネルギー資源事業の比率が高い。住友商事は資源事業比率が中程度である。伊藤忠商事は資源事業比率が低く、且つ近年は希薄化を進めている。資源事業は高い利益率や、鉱物資源のトレーディング事業等へのシナジーが期待できるが、資源価格の変動リスクや鉱山経営の事業リスクに晒される為業績の変動が激しい。一方、非資源事業は事業の付加価値が比較的安定しており、価格変動リスクは限定的である為、業績安定化に寄与している。

商社は、経営のみでなく株主やステークホルダーからも高い利益や配当、更に安定した業績が求められる。したがって、商社は事業ポートフォリオ戦略として、安定収益を稼げる非資源事業を基盤としつつ、高い利益が期待できる資源事業に対して一定の経営資源を配分している。また資源事業においても、金属資源とエネルギー資源への経営資源の配分が必要となる。よって商社において金属資源事業に配分できる経営資源には制限がある

為、投資金額や保有資産にCAPを設けて、その範囲内で選択と集中を徹底し、リスク資産である鉱山の売却/買収を進め、積極的に優良資産へ入れ替えることにより、鉱山ポートフォリオの質を高めることができる。尚、鉱山ポートフォリオの質向上については、第4章で開発したモデルを活用することにより、将来の鉱山ポートフォリオの長期最適化を図ることが可能となる。

したがって、前述1.2で設定した仮説7)「商社は多様な事業を有するコングロマリットであり、金属資源事業に配分される経営資源が制限される為、全社経営資源の中で選択と集中を徹底し、適時にリスク資産を入れ替えることにより、鉱山ポートフォリオの質を向上できる。」は有意であり、妥当と言える。

一方、資源メジャーは豊富な資産と資金を持ち、多くの鉱山資源をポートフォリオとして保有していると共に、長い歴史と専門であるが故に持つ鉱山経営のノウハウや知見を有している。したがって、商社は単独ではなく、資源メジャーとの合併形態で鉱山経営を行うことにより、事業リスクの低減と高いリターンを獲得することができる。これは前述1.2の仮説3)に該当し、第2章で立証した内容と整合性がある。

また、商社の動的ポートフォリオの最適化に当たっては、永続的に事業を継続できることが大前提となる。商社の資源事業と非資源事業のバランスは、当該企業の経営戦略や企業体力等によって最適解が異なる。但し、想定最大損失としての実質リスクの総量が、当該企業の体力である株主資本の範囲内でコントロールされていることが重要であり、過去に発生した世界金融危機、貿易戦争、天災発生等の異常時においても、致命的な問題を発生させず、安定的に事業を継続することが求められる¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。

5.4 結言

本章では、商社事業全体の動的ポートフォリオの最適化について研究した。先ず既往研究であるが、商社は事業投資とトレーディングを両輪とする総合事業運営・事業投資会社であり、資源事業については基本的にマイナー出資として事業リスクを限定していることを述べた。また、商社のリスクマネジメント施策とポートフォリオマネジメントについて、資本政策は「リスク総量と必要資本の決定」、利益目標・業績評価は「リスク量に対する期待収益率の設定」、事業ポートフォリオマネジメントは「事業単位のリスク・リターンの評価と投下資本量の設定」へ進化した経緯を述べた。更に、外部機関である格付会

社から見た商社業界の評価として、事業領域が広く事業リスクは中程度、業界構造として競争状況は比較的厳しく、事業ポートフォリオはトレーディングと事業投資があり、また国内外に経営資源を分散しており安定的な成長を図っていること、リスク管理体制は事業環境変化に合わせてビジネスモデルを変化させ、リスクアセットをカバーできるだけのリスクバッファーを備えて全体リスクをコントロールしていることについて述べた。

次に、大手商社4社の経営戦略と事業ポートフォリオの相違、及び事業ポートフォリオと業績の関連性について分析した。各商社共に経営戦略においてポートフォリオマネジメントの重要性を掲げているが、全社ポートフォリオにおける金属資源事業の位置付けは各商社で大きく異なる。金属資源事業の業績は資源価格の動向を受けて大きく変動する為、同事業の比率が高い商社は全社業績に与える影響が非常に大きい。また、金属資源の買収・出資参画には巨額の資金を必要とし、多くの鉱物資源や鉱山への投資は不可能である為、各商社は歴史的経緯から自社に強みがある鉱物資源や鉱山に集中投資している実態がある。

一方、商社の比較対象として、金属資源メジャーの事業ポートフォリオについて分析した。金属資源メジャーは夫々強みを持つ優良資産を保有しているが、近年のポートフォリオ戦略や資産入替え方針の違いにより、企業体力や業績に差が発生している。また、資源メジャーは豊富な資産と資金を有し、資源事業に特化している為、複数の鉱物資源や相当数の鉱山に投資し保有できる。したがって、資源メジャーは鉱山ポートフォリオを分散することによりナチュラルヘッジを行って、収益やキャッシュフローを安定化している。

最後に考察として、商社は事業ポートフォリオ戦略として、安定収益を稼げる非資源事業を基盤としつつ、高い利益が期待できる金属資源事業に対して一定の経営資源を配分している。商社において金属資源事業に配分できる経営資源に制限がある為、投資金額や保有資産規模にCAPを設けて、その範疇で選択と集中を徹底し、積極的に優良資産へ入れ替えることにより、鉱山ポートフォリオの質を向上できることを解明した。また商社の資源事業と非資源事業のバランスは、経営戦略や企業体力等によって最適解が異なるが、想定最大損失である実質リスクの総量が、リスクバッファーである株主資本の範囲内でコントロールされていることが、永続的な事業経営の観点で重要であることを述べた。

参考文献

- [1] 田中彰,「総合商社のグローバル戦略－資源ブーム終焉の衝撃」,京都大学大学院経済学研究科ディスカッションペーパーシリーズ, No.J-16-001, 1-15 ページ, 2016 年.
- [2] 三菱商事,早稲田大学商学学術院,『新・現代総合商社論－三菱商事・ビジネスの創造と革新 2』,早稲田大学出版部, 2013 年.
- [3] 格付投資情報センターホームページ, 業種別格付方法 総合商社
https://www.r-i.co.jp/methodology_sector/2018/06/methodology_sector_20180604_jpn.pdf
- [4] 三菱商事ホームページ, 統合報告書 2017, 2018
<https://www.mitsubishicorp.com/jp/ja/ir/library/ar/>
- [5] 三菱商事,『BUSINESS PRODUCERS 総合商社の、つぎへ』,日経 BP, pp10-41, 2015 年.
- [6] 三井物産ホームページ, 統合報告書 2018
<https://www.mitsui.com/jp/ja/ir/library/report/index.html>
- [7] 住友商事ホームページ, 統合報告書 2018
<https://www.sumitomocorp.com/ja/jp/ir/financial/investors-guide/2018>
- [8] 伊藤忠商事ホームページ, 統合レポート 2018
https://www.itochu.co.jp/ja/ir/doc/annual_report/index.html
- [9] JOGMEC ホームページ, 資源メジャー・金属部門の動向調査 2017
<http://mric.jogmec.go.jp/report/>
- [10] James L., *"Enterprise risk management from incentives to controls, 2nd edition"*, John Wiley & Sons, Inc., 2014. (林康史,茶野努翻訳,『戦略的リスク管理入門』, 勁草書房, 2016 年.)
- [11] 津森信也,大石正明,『経営のためのトータルリスク管理』,中央経済社, 2005 年.
- [12] 小林潔司,田村敬一編著,『インフラ資産のアセットマネジメントの方法』,理工図書, 2015 年.

第6章 結論

本論文は、商社における金属資源事業に関して、事例研究による成功条件/失敗条件の検証、リアルオプションを活用した鉱山事業の最適売却タイミングの分析モデルの開発、鉱山ポートフォリオの長期最適化モデルの開発及び具体事例による実用性の検証、並びに商社事業の動的ポートフォリオ最適化の検証を行い、最適なるリスクマネジメント方法を解明したものである。

本研究の背景として、以下①～③の課題認識があった。①金属資源事業は資源価格の動向によって事業収益が影響を受ける業態であり、ハイリスク・ハイリターン型ビジネスである。②商社は2014～2015年の資源価格急落により、商社が保有する鉱山事業の価値棄損により巨額減損を計上し、赤字に陥った経緯がある。③したがって商社がハイリスクの金属資源事業を如何にコントロールして、永続的に事業収益を上げていけるかということは、重要且つ喫緊の課題となっている。

上述の課題認識の下、1.2に述べた通りリサーチクエスション「商社における金属資源事業は、リスクを如何にコントロールすれば、永続的に事業価値を最大化できるか」を挙げ、設定した仮説1)～7)に対して第2～5章にて論証を行った。尚、第2章では仮説1)～4)、第3章では仮説5)、第4章では仮説6)、第5章では仮説7)に対する検証を行い、夫々の仮説が妥当であることを立証した。ここで改めて、以下の通り各章の研究成果を要約する。

第2章では、商社の金属資源事業のリスクマネジメントに関する事例研究を行い、事例として商社の金属資源事業MDPの経営モデルを分析した。また金属資源業界の動向及び資源メジャー/商社の経営手法の比較分析等を通じて、金属資源事業の成功条件について考察を行い、以下の結論を導き出した。

- (1)上流権益における優良資産（埋蔵量・品位・コスト）の獲得
 - (2)開発・採掘リスクが低い操業鉱山の適正価格での権益取得（適正なプレミアム評価）
 - (3)優良パートナー（経営資源・開発力・技術力・オペレーション能力・信用力等）と組み、主体的な機能提供と経営判断/意思決定
 - (4)資産入替による事業ポートフォリオの質向上、及びシナジーの追求
- 尚、(3)及び、(4)の内シナジー追求は商社特有の条件である。

本研究による貢献は、資源会社一般に適用される既往研究に対して、多様な事業を有しバリューチェーン戦略を展開する商社の特異性を補完し、金属資源事業のリスクマネジメントの方法及び成功/失敗の条件を明確化したことである。

第3章では、商社の鉱山事業の特徴に着目し経営選択として「売却」と「保有・採掘の継続」を設定し、鉱山事業の売買取引をモデル化することによって、鉱山事業を適切なタイミングで売却し商社に最大の利益をもたらすための意志決定を可能とする数値計算モデルの開発を行った。ここで銅価格の時系列モデルとしては従来幾何ブラウン運動が用いられることが多かったが、本モデルではより現実的な価格変動に近く、且つ1つの確率変数で表現できる平均回帰モデルを用いた。更に、本モデルによって算出された値は実務的または定性的に考察した値との整合性をもつことを立証した。本研究により、市場リスクを有する資産の売却に関する基本的な概念が示された為、資産の種類や運用目的に応じて柔軟なモデルを構築することが可能となった。本研究による貢献は、商品市場の価格ボラティリティに曝され、埋蔵量・品位・採掘コスト等の変動要因が多く、またライフサイクルを有する鉱山事業にておいて、本モデルの活用により適切な価格・タイミングでの売却意思決定を行い、高い利益の獲得を可能とすることである。また、本モデルは、商社の鉱山事業のみならず、資源メジャーや資源会社にも適用可能であり、実務面での示唆に富むと言える。

第4章では、鉱山ポートフォリオの長期最適化モデルを開発した。更に、過去の鉱山売買取引の具体事例データによる計算結果を算出し、同モデルの実用性を検証の上、実務的示唆を示した。従来のポートフォリオの長期最適化に関する理論は金融工学に基づき、投資家から見た金融商品のポートフォリオ最適化について論じられている。本論文の貢献は、事業会社の鉱山事業のポートフォリオ長期最適化に関して新規にモデル開発及び検証を行ったことであり、モデル計算の結果が実務面での有効性が高いことを解明したことである。本研究においては、先ずARMA-GARCHモデルを活用したポートフォリオ最適化モデルを設定した。次に、投資対象の鉱物5種類の過去市況推移データ、鉱物毎に4鉱山、合計20鉱山の売買取引実績を基にして、一定の鉱山保有資産の上限設定の下、10年間での資産金額・鉱物価格・鉱山価格・保有鉱山数それぞれの推移を算出した。その結果、鉱物価格の変動と共に鉱山価格が変動し、鉱山売買により資産を入替えながら資産総額を増大させ、鉱山ポートフォリオの最適化を行っていることが検証できた。またその結果は事業会社が営む鉱山事業のポートフォリオ入替え及び最適化の実態と近いことも確認できた為、

本モデルは実務面でも有効性が高いと言える。事業会社の経営者の観点では、鉱物資源の数について増加/減少/維持の選択肢があり、どの場合においても本モデルによる計算は可能である。今後は経営者が実用的にこのモデルを活用することを想定し、選択肢を増やした場合の計算結果について更なる研究を可能とする。

第5章では、商社事業全体の動的ポートフォリオの最適化について研究した。先ず大手商社4社の経営戦略と事業ポートフォリオの相違、及び事業ポートフォリオと業績の関連性について分析した。金属資源事業の業績は資源価格の動向を受けて大きく変動する為、同事業の比率が高い商社では全社業績に与える影響が非常に大きい。また、金属資源鉱山の買収・出資参画には巨額の資金を必要とし、数多くの鉱物資源や鉱山への投資は不可能である為、各商社は歴史的経緯から自社に強みを持つ鉱物資源・鉱山に集中投資している実態が判明した。一方、資源メジャーは豊富な資産と資金を有し、資源事業に特化している為、複数の鉱物資源や相当数の鉱山に投資し保有できる。したがって、資源メジャーは鉱山ポートフォリオを分散することによりナチュラルヘッジを行って、収益やキャッシュフローの安定化を図っている。最後に、商社は事業ポートフォリオ戦略として、安定収益を稼げる非資源事業を基盤としつつ、高い利益が期待できる金属資源事業に対して一定の経営資源を配分している。商社において金属資源事業に配分できる経営資源には制限がある為、投資金額や保有資産規模にCAPを設けて、その範囲内で選択と集中を徹底し、積極的に優良資産へ入れ替えることにより、鉱山ポートフォリオの質を向上できることを解明した。また商社の資源事業と非資源事業のバランスは、経営戦略や企業体力等によって最適解が異なるが、想定最大損失である実質リスクの総量が、リスクバッファである株主資本の範囲内でコントロールされていることが、永続的な事業経営の観点で重要となることを述べた。

以上が各章の研究成果であるが、これらの結果を踏まえて、1.2において設定した中心命題「商社において金属資源事業の価値を永続的に高める条件は、動的アセットアロケーションで論じられる長期保有を前提としたリスク分散ではなく、トレーディング事業とのシナジーを最大化しつつ、全社経営資源の中で選択と集中を徹底し、積極的にリスク資産を入替え、鉱山ポートフォリオの質を向上することである」に対する妥当性の立証が可能となった。

本研究の学術的貢献は、商社の金属資源事業における動的ポートフォリオの最適化について、既往研究で述べられている金融商品等の様に長期保有を前提としてリスク資産を分

散するのではなく、全社の中で配分され制限ある経営資源の中で選択と集中を行い、適宜リスク資産を入れ替えることがポートフォリオの質を向上し、事業価値を最大化できることを、新たに示したことである。

一方、本研究の実務的示唆は、鉱山の最適売却タイミングの分析モデル及び鉱山ポートフォリオの長期最適化モデルが、商社に限定されず、資源メジャーや資源会社等でも活用可能であることである。更に、事業の動的ポートフォリオの最適化が、商社に限らず、コングロマリットと呼ばれる複合企業においても応用可能と言える。この点については、今後の研究の対象としたい。

本研究では商社における金属資源事業のリスクマネジメントについて論証したが、これは主に市場リスク（価格変動リスク）、事業リスク及びポートフォリオ最適化に対するマネジメント方法に関する分析と検証であった。一方、グローバル企業が抱えるリスクは益々と複雑化しており、近年では地政学的リスクの顕在化が懸念されている。グローバル企業は、従来必要とされていた事業リスク、市場リスク、信用リスク、カントリーリスク、オペレーショナルリスクに加え、地政学的リスク等の新たなリスクを考慮の上、トータルリスクマネジメントについての更なる研究が求められる為、今後の研究課題としたい。

謝辞

本論文を結ぶに当たり、本研究の遂行に際して、多くの方々にご指導・ご協力をいただきました。ここに心より感謝の意を申し上げます。

先ず、本研究の遂行、並びに本論文の作成に当たって、終始ご指導とご鞭撻を賜りました京都大学経営管理大学院の小林潔司教授に心より感謝申し上げます。本研究に関する分野のみならず、学会・研究会等を通じて、幅広く関心を持ち知見を修得する機会を与えていただき、大変勉強になり感謝致しております。

本研究に関してファイナンスや企業価値評価の観点、並びに副指導教員・本論文主査としてご指導いただきました、京都大学経営管理大学院の砂川伸幸教授に厚く御礼申し上げます。

プロジェクトマネジメント及びアセットマネジメントの観点で懇切丁寧にご指導いただきました、京都大学経営管理大学院の戸田圭一教授と河野広隆教授に対して、心より感謝申し上げます。

本研究に関して、数学的な見地より様々なご指導をいただきました京都大学大学院工学研究科の瀬木俊瀬助教、また共同研究を行った同研究科の川北恰於様に対しても大変感謝致しております。

京都大学経営管理大学院への入学に当たり、ご指導いただき、またご相談に丁寧に応じて頂きました、京都大学経営管理大学院長の原良憲教授、同大学院の江尻良特別教授、櫻木恵子室長に厚く御礼申し上げます。

京都大学経営管理大学院における基礎科目修得に当たり、多大なるご指導をいただきました成生達彦教授（現同志社大学大学院特別客員教授）、若林直樹教授、澤邊紀生教授、松井啓之教授、アスリ・チョルパン教授、鈴木智子准教授（現一橋大学大学院准教授）に対して御礼申し上げます。

本研究を進めるに当たり、建設マネジメント勉強会へ参加の上、数多くの研究者や実務家の講演を拝聴し、また議論をさせていただいたことにより刺激を受け、貴重な経験となりました。京都大学大学院工学研究科の天津宏康教授、松島格也准教授、同大学経営管理大学院の山田忠史教授、金広文准教授、前川佳一特定准教授、藤木修特命教授、井之上喬特

命教授、同大学防災研究所の大西正光准教授、株式会社国際協力銀行の安間匡明取締役をはじめ、同勉強会の皆様に御礼申し上げます。

京都大学経営管理大学院掛の皆様、小林潔司教授秘書の川端まゆこ様と細見さやか様には筆者の研究生活のご支援、並びに種々のご調整を頂きまして感謝致しております。

京都大学経営管理大学院博士課程に同級生として入学し研究を共にした、石川康様、石田英和様、岩嵯博論様、繁本知宏様、侍留啓介様、塚田虎之様、高広伯彦様からは、とても良い刺激を受け、また大変お世話になりました。ここに御礼申し上げます。

更に、三菱商事株式会社代表取締役常務執行役員の鴨脚光眞様には、実務面で商社におけるリスクマネジメント及び事業投資に関して多大なるご指導をいただくと共に、京都大学経営管理大学院博士後期課程への進学に当り推薦状のご出状等ご支援をいただき、厚く御礼申し上げます。また同社の金属グループ及び事業投資総括部の皆様には、日々の業務と実践を通じて、本研究の問題意識及び対応方法について議論させていただき、大変感謝致しております。

最後に、長年に亘り筆者の社会人人生と研究生活を両面から支援し温かく見守ってくれた妻、大学生として筆者の研究を支えてくれた長男、並びに家族全員に対して心より感謝します。