

熱水鉱床開発の社会受容性と事業性評価に関する研究

A Study on Social Acceptance and Business Feasibility for Development of Seafloor Massive Sulfide

学籍番号 096645 笠島 優希
指導教員 多部田 茂 准教授

(平成 23 年 3 月 24 日)

Keywords: 環境リスク、熱水鉱床開発、包括的環境影響評価指標、リアル・オプション評価法、経済性評価

Keywords: Environmental Risk, Development of Seafloor Massive Sulfide, Inclusive Impact Indicator, Real Option Valuation, Economical Assessment

1. 序論

豊富な金属資源量を有しており、国内 EEZ 内に幾つかの存在が確認されているという理由から、熱水鉱床開発が脚光を浴びている。しかしながら、未だ海洋産業としては成り立っておらず、その背景には主に社会受容性と事業性という 2 つの問題が存在している。

社会受容性に関する問題の一つに、持続可能性に関する議論がある。これは、熱水鉱床開発によって海洋生態系が被る環境リスクと、金属資源という経済性がトレードオフの関係にあり、経済開発と生態系保全という観点で問題視されており、開発の社会受容性に関する議論を阻害している一因となっている。金属資源獲得という国家的戦略から見ても、この問題は早急に解決する必要がある。しかしながら、熱水鉱床開発が及ぼす生態系への影響に関する十分な科学的調査はなされていないとい実情もあり、このようなジレンマの中で、トレードオフを定量的に明らかにする必要がある。

事業性に関する問題として、金属品位・価格、環境リスクなどの不確定要因により、事業性評価に関する熱心な議論がなされておらず、事業者側にとって参入し難い状況を形成している。

社会受容性と事業性の問題には、共通して、環境リスクという本質的な問題を抱えており、故に、環境リスクを早急に明らかにしなければならないと考えられる。

2. 研究目的

熱水鉱床開発が及ぼす環境リスクを定量的に明らかにする事で、開発によって得る金属資源という経済的利得と、それによって被る生態系被害を包括的かつ迅速に評価し、持続可能性を検討する事により、社会受容性に関する問題に資する事と、事業に内在する不確定性を考慮した事業性評価を行い、事業性の検討に役立てる事が本研究の目的である。

3. 研究手法

専門家リスク認知を利用したアンケートを実施により環境リスクの定量化を行う。その結果を利用して、包括的環境影響評価指標(III)により経済面と環境面での持続可能性の検討と、モンテカルロ DCF による NPV の算出やリアル・オプション法を用いて事業性評価を行う。

4. ハザードマップの作成と専門化アンケート調査

4.1 ハザードマップの作成

Fig.2 のように、熱水鉱床開発を行った際に生じるとされる影響フローを記したハザードマップを作成した。作成の際に大宮(2009)^[1]を参考に、事象の個数をなるべく少なくし、且つ、具体的な表現

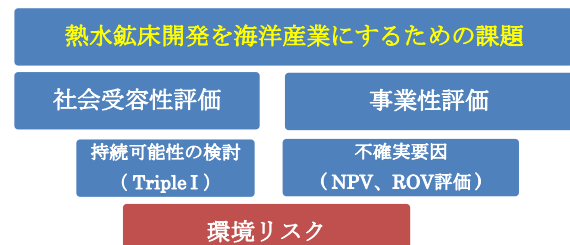


Fig.1 Concept of Research Objection

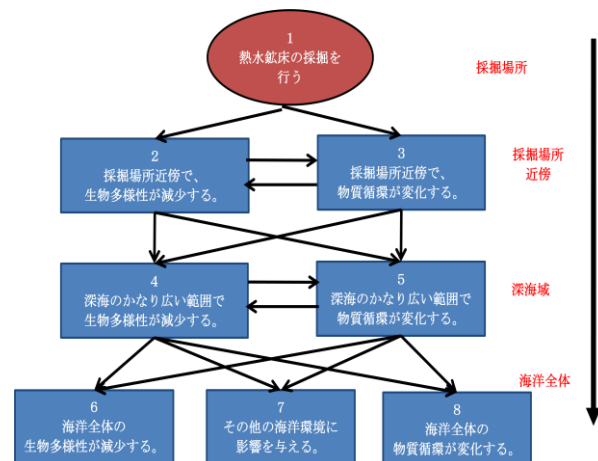


Fig.2 Image of Hazard Map

は出来る限り避けて抽象的な記述とすることで、回答者の負担とならないようにした。このハザードマップを専門家の方々に提示してアンケート調査を行った。

4.2 専門家アンケート調査

熱水鉱床を業務や研究の対象としている方々を専門家として位置づけた。

アンケートの設問と回答数は Table1 の通りである。アンケート結果（設問 1-1 と 1-3）にクロス・インパクト分析を適用することで、確率的に整合した生起確率へ修正した。

4.3 生態リスク（ER）の定量化

生態リスクの推定には Species-Area Relationship の観測式に基づいて式(1)を用いた。

$$ER_{region(k)} = P_{region(k)} \times A_{original,region(k)} \times \left\{ 1 - (1 - s_{n,region(k)})^{1/z} \right\} \quad (1)$$

($region(k)$: 海域 k , $P_{region(k)}$: 海域 k で生物多様性減少が生じる確率、 $A_{original,region(k)}$: 海域 k の環境改変前の生息面積、 $s_{n,region(k)}$: 海域 k における種数減少率、 z : 経験的に 0.25) 専門家アンケートで得た P 、 s_n から算出した各海域における ER は Table2 の通りである。

5. 包括的環境影響評価指標を用いた持続可能性評価

5.1 包括的環境影響評価指標（Inclusive Impact Indicator, III, Triple I）について

本研究では、環境リスクと経済性の概念を統合した包括的環境影響評価指標（以下 III）を使用することで、熱水鉱床開発の持続可能性の検討を行う。III の特徴として、ある経済活動がもたらす経済的利益とそれによって生じる環境リスクを統合的に評価する事で持続可能性を判断でき、III がゼロ以下になれば当該経済活動が持続可能である事が認められる。熱水鉱床開発が及ぼす人間リスクを考慮しなければ III は式(2)で表現される。

$$III = EF + \alpha ER + \gamma(C - B) \quad (2)$$

(EF : エコロジカル・フットプリント、 α : 変換係数、 ER : エコロジカル・リスク、 C : コスト、 B : 収益)

5.2 III を用いた持続可能性評価

サンライズ鉱床（東京から南東 400km、年間採掘量 600 万トン/年）での開発を想定して算出した III は Table3 と Fig.3 の通りである。 $A_{original, 深海のかなり広い範囲}$ が 3.9×10^6 (ha) 以下で、 $s_{n, 海洋全体}$ が 1.0×10^{-5} 以下を満たす時に、III は負値となり、熱水鉱床開発が持続可能であることが示唆される。この条件を満たすように、熱水鉱床開発を推進していく必要があると考える事ができる。

5.3 考察と課題

III を用いた熱水鉱床開発の持続可能性評価を行うことにより、経済性と環境リスクのトレードオフの関係が定量的に明らかになった。持続可能である為には、開発によって被る深海域の生態系の生息面積 $A_{original, 深海のかなり広い範囲}$ を 3.9×10^6 (ha) 以内、且つ、表層・中層域での種数減少率 $s_{n, 海洋全体}$ を 1.2×10^{-5} 以内に抑制する必要がある事を示唆しており、この条件を満たすように開発を行わなければならないと考えられる。

類似事業との相対評価を行っていない点が課題である。本研究では、熱水鉱床開発のみの III を算出する事で持続可能性を評価しているが、類似した複数の事業の III を相対的に評価する方法が一般的である。その為、熱水鉱床の III と、陸上の鉱山開発などの III と比較する必要があると考えられるが、本研究ではそこまでは行っておらず今後の課題としたい。

Table1 Number of Respondents

	設問	回答数
設問 1-1	各事象の生起確率 $P(i)$	17
設問 1-2	各海域で生じる種数減少率 s_n	7
設問 1-3	事象間の相互影響 $P(i,j)$	17
設問 2	熱水鉱床近傍に生息する生態系の経済価値	17

Table2 Value of Parameters

海域 k	P	$A_{original}$ [ha]	s_n	ER [gha]
採掘場所近傍	0.72	3.0×10^2	30%	1.6×10^2
深海のかなり広い範囲	0.4	$3.0 \times 10^2 \sim 3.9 \times 10^{10}$	4%	$1.7 \times 10 \sim 2.3 \times 10^9$
海洋全体	0.29	3.9×10^{10}	0%~1.2%	0~ 5.4×10^8

Table3 Value of Parameters

$\alpha \cdot EF$	gha	2.6×10^3
$ER_{採掘場所近傍}$		1.6×10^2
$ER_{深海のかなり広い範囲}$		$1.7 \times 10 \sim 2.2 \times 10^9$
$ER_{海洋全体}$		$0 \sim 5.4 \times 10^8$
HR		0
$\gamma \times (C-B)$		-4.3×10^5
III		$-4.2 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^5$

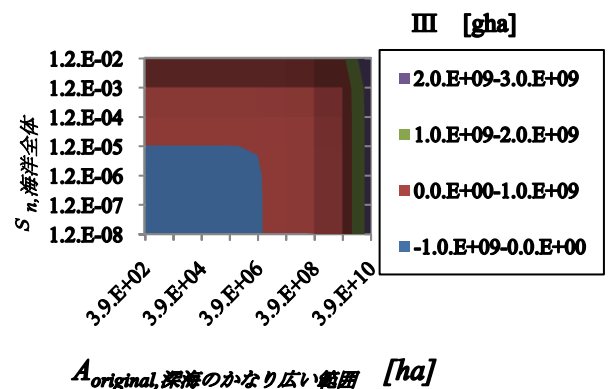


Fig.3 Result of III

6. 不確実性を考慮した事業性評価

6.1 システム境界の明示と不確実要因の定義

小濱ら(2010)^[2]を基に、採掘過程から精錬所へ売却するまでの一連の過程をシステム境界とし、サンライズ鉱床を対象に、年間134万トンの採鉱を行う事を想定した。不確実要因として鉱量、品位、金属価格、環境リスクを設定した。

6.2 Net Present Value(NPV)について

事業性を判断する際に一般的に使用される手法で、式(3)のように、将来の各年の収支額を現在の価値に割り引いて算出された金額の和から、初期投資額を控除した金額であり、NPVが0以上となれば事業性において優れていると判断できる。

$$NPV = \sum_{n=1}^T \frac{CF_n}{(1+r)^n} - CF_0 \quad (3)$$

(NPV: 事業性、 CF_n : n年後の収支額、 CF_0 : 初期投資額、 T : 事業期間(年)、 r : 割引率)

6.3 モンテカルロ DCF による NPV 算出

不確実性がある場合、 CF_n 等が変動するためにNPVを一定に算出することは困難である。そこで、モンテカルロ DCFを用いて、1万個の経路を生成して各経路でNPVの計算を行った。各経路で、鉱量・品位・金属価格・環境リスクは異なる値を用いることで、不確実性がNPVに与える影響を定量的に分析することができ、一般的にリスク分析に有効であるとされている。モンテカルロ DCFの計算イメージはFig.5である。運転費用や開発準備費用などはNautilus社が公表しているデータを参考に算出し^[3]、鉱量は小濱ら(2009)にならぬ推定鉱量900万トン、ボラティリティ31.5%の対数正規分布に従う乱数を発生させ、モンテカルロ DCFに組み込んだ。同様に、品位は一樣分布を仮定し^[4]、金属価格は式(4)に示すような幾何ブラウン運動に従うとした。環境リスクは専門家アンケート結果に基づいて、Table4の様子に正規乱数として与えた。

$$dP = P \times \alpha \times dt + P \times \sigma \times dz \quad (4)$$

(P : 金属価格、 α : ドリフト係数 (=4%/年)、 σ : ボラティリティ、 dz : 標準正規乱数)

6.3 NPV ケーススタディ結果

明神海丘サンライズ鉱床を対象に行ったモンテカルロ DCFによるNPVの結果がTable5の通りである。事業性判断の指標であるNPVの期待値は416億円で正值であるが、ボラティリティは約446%と非常に大きく、当該事業は非常にリスクが大きい事業である事が分かる。これは、事業者にとって参入障壁が大きい事を裏付けている。その為、当該事業の事業性評価には、NPVによる評価だけではなく、事業の不確実性を考慮できるリアル・オプション評価法の適用の可能性を示唆している。

6.4 リアル・オプション(ROV)法について

金融工学の分野で使用される手法を応用したもので、一般的に、不確実性が高い事業の採算性を評価する際に用いられる。特徴として、不確実性によって事業の柔軟性(オプション)も考慮して評価できる点である。例えば、ある事業に投資をしようとしており、現時点($t=0$)で投資を実行すれば V_0 が得られるが、1年後($t=1$)に $V_{1,up}$ か $V_{1,down}$ に変化する。投資額 I_0 とすると、このとき、NPV評価においては現時点で投資を実行するので $(V_0 - I_0)$ が事業価値となる。一方、ROV評価では、現時点で投資実行する場合($V_0 - I_0$)と、投資を延期する場合の事業価値を比較して高い方を選択する(Fig.6)。

本研究では、小濱ら(2009)は鉱量と金属価格を不確実性として2段階の投資延期オプション想定した

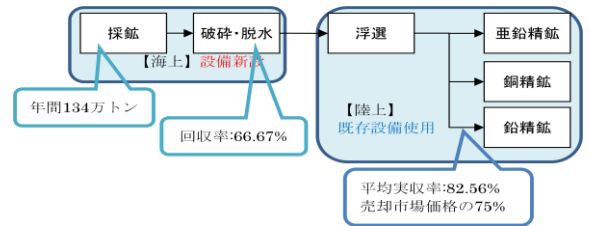


Fig.4 Image of Operational Flow

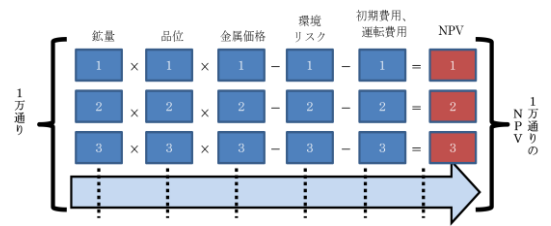


Fig.5 Concept of Monte Carlo DCF

Table4 Amount of Environmental Risk

対象鉱床	明神海丘サンライズ鉱床
貯存海域	伊豆・小笠原海域
環境リスク (期待値)	675 億円/年
ボラティリティ	33%
確率分布	正規分布

Table5 Result of Case Study

項目	単位	値
期待収益 (現在価値)	億円	4,361
運転費用(per year)		116
環境リスク (per year)		675
探査費用		60
環境調査費用		60
開発準備費用		262
NPV (期待値)		416

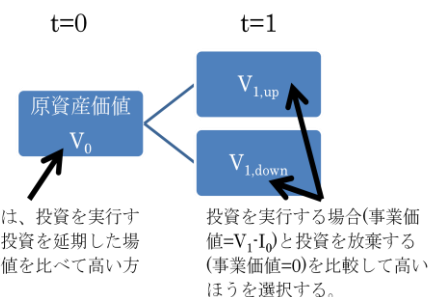


Fig.6 Concept of ROV

ROV 評価を行っている。しかし、品位を一定としている事や、環境リスクや環境調査に係る費用などを考慮していない点が課題である。本研究では小濱らの手法に、品位と環境リスクを不確実性として与え、さらに、環境ベースライン調査を投資機会として新たに加え、2段階の投資延期オプションを設定し ROV 分析をする事で、熱水鉱床開発の事業性評価を行う事にする。

6.5 事業シナリオ

鉱量調査の為の探査、環境ベースライン調査、開発準備の3つを投資機会として捉え、投資判断において、投資の意思決定を行う。意思決定を行う期間は24ヶ月間とした。環境ベースライン調査を実施するタイミングによって2ケースの事業シナリオを想定し、ケース1 (Fig.7) では、環境ベースライン調査は開発準備と同時に進め、ケース2 (Fig.8) では探査と同時に環境ベースライン調査を実施するとし、各ケースでオプション価値の算出を行った。

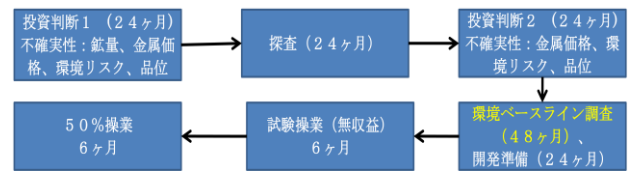


Fig.7 Image of Business Scenario (Case1)

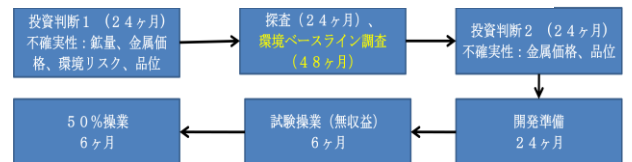


Fig.8 Image of Business Scenario (Case2)

6.6 ROV ケーススタディ結果

2 ケースに ROV 評価法を適用した結果が Table6 である。ケース1では約72%のオプション価値が存在し、ケース2では約53%であり、両ケース共にリアル・オプションを設定する価値が認められる結果となった。ケース1の方がケース2よりオプション価値が大きくなるのは、投資判断2における不確実性の大きさが異なる事に起因するものであると考える事ができる。ケース1では、環境ベースライン調査をまだ行っていない状態である為、投資判断2の時点においては環境リスクが不確実性として存在している。一方でケース2では、環境ベースライン調査が既に実施されており環境リスクが既知の状態であるために、投資判断2においてケース1の方が、不確実性が大きくなりオプション価値が相対的に大きいと考えられる。

Table6 Result of ROV

		ケース1	ケース2
期待収益 (現在価値)	億円	4,361	
運転費用 (per year)		116	
環境リスク (per year)		675	
探査費用		60	
環境調査費用		60	
開発準備費用		262	
NPV		405	416
事業価値		698	637
オプション価値		293(72%)	221(53%)

6.7 考察と課題

鉱量・品位・金属価格・環境リスクを不確実性として捉え、探査・環境ベースライン調査・開発準備を投資機会として考慮し、2段階の投資延期オプションの価値を算出した結果、両ケースとも一定のオプション価値が存在し、熱水鉱床開発にリアル・オプション法を適用する価値が有る事が認められると考えられる。また、環境ベースライン調査を実施するタイミングによってオプション価値が異なる事が定量的に明らかになった。本研究では、専門家アンケートから算出した環境リスクを操業費用としてモデルに組み込んでいるが、この費用は環境保全に係る費用とは本質的に異なるものであると考えられ本研究の課題である。

7. 結言

熱水鉱床開発に伴う環境リスクに関する情報が多くは無かったが、本研究でハザードマップを用いた専門家アンケート調査を行う事により環境リスクの定量化を行った。それを用いて、持続可能性に関する評価と事業性評価を行った。持続可能性評価では、環境リスクと経済性の概念を統合的に評価する包括的環境影響評価指標(III)を用いた結果、開発によって被る深海の生態系の生息面積 $A_{original, 深海}$ のかなり広い範囲を 3.9×10^6 (ha) 以内で、表層での種数減少率 $s_n, 海洋全体$ を 1.0×10^{-5} 以内に抑制する必要がある事が示唆された。事業性評価では、不確実性による事業の柔軟性を評価するリアル・オプション法(ROV)を適用する事で、従来の NPV による投資判断による評価だけでなく、ROV も用いた評価を行う必要がある事が示唆された。

8. 参考文献

- [1]大宮 俊孝,CO₂ 海洋隔離の環境リスク評価に関する研究,東京大学大学院,(2009)
- [2]小濱 真,安達 毅,リアルオプション分析による不確実性を考慮した海底熱水鉱床開発プロジェクトの経済性評価,(2009)
- [3]Nautilus Minerals Inc.,Offshore Production System Definition and Cost Study(2010),Chapter 20,(2010)
- [4]日本プロジェクト産業機構,我が国 EEZ 内の海底鉱物資源・海底エネルギー資源量評価,(2008)