論 説
 Original Article

石油鉱業における新リスク評価法 —「RACE」の提案と探鉱戦略への応用—*

井上 正澄**・竹内 傳***

(Received July 30, 2009 ; accepted March 5, 2010)

Introduction of the new risk evaluation method “RACE”, and its application to petroleum exploration strategy

Masazumi Inoue and Tsutau Takeuchi

Abstract : The existing risk evaluation methods are not exactly adequate for the petroleum business. To cope with their problems, the new risk evaluation method, “RACE” (Risk Adjusted Certain Equivalent) is introduced. It effectually represents the subjective judgment of risk aversion in petroleum business, and may also be applicable to the evaluation of the “Knight's uncertainty”. It is also practically useful in evaluating and establishing petroleum exploration strategy.

Keywords : Allais' paradox, certain equivalent, Ellsberg's paradox, exploration strategy, Knight's uncertainty, return, risk, utility

1. はじめに

石油鉱業, わけても探鉱には高いリスクが付き物である。探鉱技術の進歩は著しく, 近年原油価格も上昇したが, その一方で探鉱開発コストも高騰し, 今後発見される油田規模はますます小規模になると予想される (井上, 2006)。さらに, 鉱区取得や資産・案件売買において, 情報の透明・共有化, 入札などによる機会の公開・競争化, また科学的評価法の普及により, 従来のような「濡れ手で粟」的な利益は期待できなくなってきた。しかし, 現代経済学の説く効率的・完全無摩擦市場における「合理的価格付け」からは程遠く, 売り手 (産油国を含む) と買手の価格付け (価値観) の差が事業利益の源泉となる。したがって, リスクを適切に評価し管理・対処することが極めて重要になってきている。

そこで筆者および共同研究者は, 石油探鉱戦略の科学的・定量的分析を試み (井上ら, 2008), さらに既存リスク評価法のレビューを行いその問題点を指摘した (井上・竹内, 2010)。本論説では, これらの問題点を克服する新評価法「RACE」(Risk Adjusted Certain Equivalent, 「リスク調整確実等価」) を提案する。まず本手法の概要を紹介し, 各種の既存評価法との比較を試み, 次に, 実際の探鉱戦略構築

への適用例を示し, 今後の応用法や改善点を展望する。

なお, リターンとリスクに関連した諸概念およびその定義は井上・竹内 (2010) に準拠している。

2. リスク性向と既存評価法の問題点

井上・竹内 (2010) の既存リスク評価法のレビューおよび調査結果によると, 人々のリスク性向は以下のように要約できる (表 1 ~ 4 参照)。

まず, 変動 (振れ) の大きさをリスクとして認識し, これを嫌うが, その感じ方は左右 (正負) 対称的ではなく, 負の値 (損失) をより嫌う。また, 極端な値はその確率値より重視する傾向がある。

いっぽう, 既存の評価法には井上・竹内 (2010) で指摘したように次の問題点があり, 上記したリスク性向は十分評価されないといえる。

- ① シャープレシオでは, リスクの方向 (正負) や歪みに対する感覚の非対称性が表現されない。
- ② 期待効用理論では, 負の値 (損失) が定義されない。
- ③ プロスペクト理論を除いては, 負の値 (損失) をより嫌う傾向が表現されない。
- ④ 極端な値を重視する傾向が表現されない。プロスペクト理論では「極端な値」ではなく「低確率」をより重視するとしているが, 実態と矛盾する場合がある。
- ⑤ プロスペクト理論は, 離散系でのみ定義されているため, 連続系への適用および微分が不可能で, 確率を小分けにすると誤差が大きい。
- ⑥ シャープレシオおよび期待効用理論は計算式がシンプ

* 平成 20 年 6 月 12 日, 平成 20 年度石油技術協会春季講演会, 地質探鉱部門の個人講演で一部発表 A part of this paper was presented at the 2008 Technical Meeting of the JAPT, June 12, 2008.

** 三菱商事石油開発㈱ Mitsubishi Corporation Exploration Co., Ltd. (現所属 新日本石油開発㈱ Nippon Oil Exploration Ltd.)

*** 三菱商事石油開発㈱ Mitsubishi Corporation Exploration Co., Ltd.

ルであるが、係数が少なく、人々の感じ方に合わせる微調整が困難である。いっぽう、プロスペクト理論は係数が多く微調整が可能だが、個々の係数の意味づけが直感的には理解できず、その選択に困難が伴う。

3. 新評価法「RACE」の概要

そこでこれらの問題点を解決するために、リスクの新評価法「RACE」(Risk Adjusted Certain Equivalent, リスク調整確実等価)を考案した。具体的には本手法による効用(U_R)をリスクプレミアム(R)を用いて次のように定義する。

$$U_R = (EMV) - R \quad (1)$$

ただし、

$$R = a\sigma - b\mu'_3/\sigma^2 + c\mu_d^- \quad (\sigma^2 = 0 \text{ のときの右辺第2項は0}) \quad (2)$$

$$\mu'_3 = \int_{-\infty}^{\infty} P(N) \cdot (N - \mu)^3 dN \quad (\text{連続系}) \quad (3)$$

$$= \sum_{i=1}^n \{P_i \cdot (N_i - \mu)^3\} \quad (\text{離散系}) \quad (4)$$

$$\mu_d^- = \int_{-\infty}^0 P(N) \cdot (-N)^d dN \quad (\text{連続系}) \quad (5)$$

$$= \sum_{i=1}^{N < 0} \{P_i \cdot (-N_i)^d\} \quad (\text{離散系}) \quad (6)$$

離散系の場合の N_i および P_i は、 n ケースあるときのそれぞれ各ケースの結果のNPVと生起確率、連続系の(結果 N が連続的に変化する)場合の $P(N)$ は確率密度関数(p.d.f.)である。 a, b, c および d は個人/企業のリスク性向を表現する係数および指数である。

上式は一見複雑に見えるが、上記2で検討した人のリスク性向を次のように3つの要素に分け、それらを足し合わせたものである。リスクのない場合($\sigma = 0$)は(2)式右辺の第1項、第2項は0となるが、結果(N)が負であれば第3項は0ではない。(2)式の右辺第1項は「変動回避度」で、シャープレシオ(井上・竹内, 2010)同様、標準偏差(σ)の定数(a)倍とする。第2項は分布の左右(大小)非対称性を反映している。

一般に次式(μ'_q)を「平均($\mu = EMV$)周りの q 次のモーメント」という(第2辺が連続系、第3辺が離散系)。

$$\mu'_q = \int_{-\infty}^{\infty} P(N) \cdot (N - \mu)^q dN = \sum_{i=1}^n \{P_i \cdot (N_i - \mu)^q\} \quad (7)$$

$q=1$ の場合(μ'_1)は偏差の合計を表し、平均/期待値($\mu = EMV$)の定義から常に0になる。 $q=2$ の場合(μ'_2)は、分散(σ^2)である。ここで使用されている $q=3$ の場合(μ'_3)を標準偏差の3乗(σ^3)で割ったものを「歪度(Skewness)」とよぶ。左(マイナス)側に尾を引いている確率分布は歪度が負、右(プラス)側に尾を引いている分布は歪度が正となる。人は他の条件が同じなら、負の歪度を嫌い、正の歪度を好む傾向があり、同一人物が保険に加入(負の歪度を避ける)しつつ、宝くじ(正の歪度)を購入するのも説明できる。これを反映させた(2)式右辺第2項((3)(4)式)が「下方回避/上方愛好度」を表す。ちなみに本評価法では考慮していないが、 $q=4$ の場合(μ'_4)を標準偏差の4乗(σ^4)で割った(またはそれからさらに3を減じた)

ものを「尖度(Kurtosis)」とよび、確率分布の峰の尖り具合や裾野の広がり具合を表す。

(2)式右辺第3項は「負回避度」で、人は負(損失)を有意に嫌う傾向があり、それを表現した。(5)(6)式(μ'_d)は「負の値だけに対する原点周りの d 次のモーメント」で、それを定数(c)倍したものが(2)式右辺第3項である。

本来、各係数は企業や個人ごとに異なるものであり、過去の実例や仮想例の思考実験により決定すべきであるが、ここでは以下に示すアンケート調査結果(表1~4)を比較的うまく説明できる $a=0.3, b=0.1, c=d=1$ を標準ケースとして選択し、これに基づき説明する。

(1)~(6)式で求めた効用(U_R)によりリスクのある場合とない場合は完全に比較可能となるが、これを貨幣価値で表現するにはCE(確実等価, 井上・竹内, 2010参照)に変換する必要がある。リスクがない(値が変動しない)場合の結果 N を N_0 とすると N_0 が正の場合には(2)式は $R=0$ であり、したがって $U_R = N_0$ となる。いっぽう N_0 が負の場合には(2)式は $R = c\mu_d^- = c(-N_0)^d$ であり、したがって $U_R = N_0 - c(-N_0)^d$ となる。リスク(変動)のある場合の本技法によるCE、すなわちRACE(CE_R)がこの N_0 に対応するのであるから CE_R と U_R には次の関係がある。

$$U_R \geq 0 \text{ のとき, } U_R = CE_R \quad (8)$$

$$U_R < 0 \text{ のとき, } U_R = CE_R - c(-CE_R)^d \quad (9)$$

標準ケース($c=d=1$)のとき、(9)式は次のようになる。

$$U_R < 0 \text{ のとき, } CE_R = U_R/2 \quad (10)$$

d が1や2などの単純な場合を除き、(9)式を解析的に解いて CE_R を求めることは困難であるが、表計算ソフトの「ゴールシーク」や「バックソルバー」などを用いれば求められる。

4. 調査結果および他の評価法との比較

表1~5は既存評価法を比較した調査結果(井上・竹内, 2010)に、新評価法「RACE」(CE_R)の計算結果を加えたものである。各設問で選択肢AとBを比較し、どちらを選ぶかをアンケート調査した結果のAとBの選択比率(%)を4列目に示して、これと各評価法によるCE値を比較している。

表1では基本的なケースについて比較しているが、プロスペクト理論(CE_p)と「RACE」(CE_R)の計算結果がすべてのケースについて筆者らのアンケート調査の選択結果と一致している。表2はKahneman and Tversky (2000)およびTversky and Kahneman (2000)(以下引用時は前者のみ記す)が「アレのパラドクス」について調査した結果で、シャープレシオや期待効用理論では計算結果が実際の選択と合致せず、「パラドクス」になっている(詳細は井上・竹内, 2010参照)。ここでも CE_p と CE_R はすべてのケースでアンケート調査と合致していて「パラドクス」は解決している。

表3もKahneman and Tversky (2000)の調査結果を各評価法の計算結果と比較したものである。彼らはプロスペクト理論を提唱し、その業績によりノーベル賞を受賞したが、

表1 各評価法の結果比較(1) 筆者らの調査による (井上・竹内, 2010 に加筆)

 CE_S : シャープレシオ ($S=0.4$) CE_E : 期待効用理論 (自然対数) CE_P : プロスペクト理論 ($\alpha=\beta=0.88$, $\gamma=0.61$, $\delta=0.69$, $\lambda=2.25$) CE_R : RACE ($a=0.3$, $b=0.1$, $c=d=1$)カッコ内: (信頼度)=1-(危険率), 危険率: A, B の嗜好に差がないとき (選ぶ確率がともに 50%)
でも, この結果またはより極端な結果が出てしまう確率

(太字数値は優位の選択肢を示す)

(単位: 万円)		(信頼度)							
設問	N	P	選択	EMV	σ	CE_S	CE_E	CE_P	CE_R
4A	10	0.5	74%	11	1	10.6	10.95	9.03	10.7
	12	0.5							
B	8	0.5	(0.983) 26%	11	3	9.8	10.58	9.00	10.1
	14	0.5							
5A	8	0.5	35%	11	3	9.8	10.58	9.00	10.1
	14	0.5							
B	10	0.9	(0.895) 65%	11	3	9.8	10.72	10.62	10.9
	20	0.1							
6A	8	0.5	61%	11	3	9.8	10.58	9.00	10.1
	14	0.5							
B	2	0.1	(0.798) 39%	11	3	9.8	10.03	8.66	9.3
	12	0.9							
7A	1	0.5	9%	2	1	1.6	1.73	1.62	1.7
	3	0.5							
B	1	0.9	(1.000) 91%	2	3	0.8	1.27	2.51	1.9
	11	0.1							

表2 各評価法の結果比較(2) 「アレのパラドクス」 (井上・竹内, 2010 に加筆)

〔選択〕は Kahneman and Tversky, 2000 および Tversky and Kahneman, 2000 の調査による)

 CE_S : シャープレシオ ($S=0.4$) CE_E : 期待効用理論 (平方根) CE_P : プロスペクト理論 ($\alpha=\beta=0.88$, $\gamma=0.61$, $\delta=0.69$, $\lambda=2.25$) CE_R : RACE ($a=0.3$, $b=0.1$, $c=d=1$)

(太字数値は優位の選択肢を示す)

設問	N	P	選択	EMV	σ	CE_S	CE_E	CE_P	CE_R
8A	2500	0.33	18%	2409	246.6	2310	2385	2009	2106
	2400	0.66							
	0	0.01							
B	2400	1.0	82%	2400	0	2400	2400	2400	2400
9A	2500	0.33	83%	825	1176	354.8	272.3	719.6	557.3
	0	0.67							
	2400	0.34	17%	816	1137	361.2	277.4	703.0	551.7
B	0	0.66							
	4000	0.8	20%	3200	1600	2560	2560	2270	2480
	0	0.2							
B	3000	1.0	80%	3000	0	3000	3000	3000	3000
11A	4000	0.2	65%	800	1600	160	160	868.4	560
	0	0.8							
	3000	0.25	35%	750	1299	230.4	187.5	737.0	510.3
B	0	0.75							

その根拠は表2, 3などの調査結果であった。したがって, 多くのケースでプロスペクト理論によるCE値(CE_P)は表2, 3の調査結果と合致しているが, 設問12と20では合致していない。「RACE」(CE_R)の計算結果はこれらのケースでも調査結果と整合的である。ただし, 設問15, 17,

21では CE_R は調査結果と矛盾している。これらは, すべて期待値が負(損失)のケースで, 大勢がかなり悪い場合には, 損失を逃れる可能性がわずかでもあれば人はそれを極端に重視することを示している。人も企業も破産すれば負債額の多寡はもはや無関係であり, むしろわずかな助か

表3 各評価法の結果比較(3)(井上・竹内, 2010 に加筆)
 (「選択」は Kahneman and Tversky, 2000 および Tversky and Kahneman, 2000 の調査による)
 CE_S : シャープレシオ ($S=0.4$)
 CE_P : プロスペクト理論 ($\alpha=\beta=0.88$, $\gamma=0.61$, $\delta=0.69$, $\lambda=2.25$)
 CE_R : RACE ($a=0.3$, $b=0.1$, $c=d=1$)
 (太字数値は優位の選択肢を示す)

設問	N	P	選択	EMV	σ	CE_S	CE_P	CE_R
12A	6000	0.45	14%	2700	2985	1506	2089	1865
B	0	0.55						
	3000	0.9	86%	2700	900	2340	2038	2190
	0	0.1						
13A	6000	0.001	73%	6	189.6	-69.86	48.66	547.9
B	0	0.999						
	3000	0.002	27%	6	134	-47.61	38.83	264.6
	0	0.998						
14A	1000	0.5	16%	500	500	300	373.8	350
B	0	0.5						
	500	1.0	84%	500	0	500	500	500
15A	-1000	0.5	69%	-500	500	-700	-407.6	-575
B	0	0.5						
	-500	1.0	31%	-500	0	-500	-500	-500
16A	6000	0.25	18%	1500	2598	460.8	1474	1021
B	0	0.75						
	4000	0.25	82%	1500	1658	836.7	1609	1084
	2000	0.25						
	0	0.5						
17A	-6000	0.25	70%	-1500	2598	-2539	-1490	-2040
B	0	0.75						
	-4000	0.25	30%	-1500	1658	-2163	-1627	-1790
	-2000	0.25						
	0	0.5						
18A	5000	0.001	72%	5	158	-58.21	40.55	456.6
B	0	0.999						
	5	1.0	28%	5	0	5	5	5
19A	-5000	0.001	17%	-5	158	-68.21	-21.93	-278.2
B	0	0.999						
	-5	1.0	83%	-5	0	-5	-5	-5
20A	240	1.0	84%	240	0	240	240	240
B	0	0.75						
	1000	0.25	16%	250	433	76.8	245.7	170.1
	0	0.75						
21A	-750	1.0	13%	-750	0	-750	-750	-750
B	0	0.25						
	-1000	0.75	87%	-750	433	-923.2	-587.7	-790.0
	0	0.25						
22A	30	1.0	74%	30	0	30	30	30
B	0	0.2						
	45	0.8	26%	36	18	28.8	25.54	27.9
	0	0.2						
23A	30	0.25	42%	7.5	12.99	2.30	7.37	5.10
B	0	0.75						
	45	0.2	58%	9	18	1.8	9.77	6.3
	0	0.8						

る可能性に賭けるということで、これを「破産効果」と名づける。RACE の場合、係数を例えば $c=25$, $d=0.7$ に修正すれば本論説に掲載したすべての設問で調査結果と合致する。しかし「破産効果」は、いわば「だめもとの賭け」で個人や状況による差が大きく、また「ゴーイングコンサーン」を前提とするビジネスで正当化されるかには疑問がある。無理にこれに合わせる必要はないと考えて、本論説で

は一貫して標準係数を用いた。

表4は筆者らの調査結果のうち CE_P が調査結果と矛盾するケースをまとめたもので、これらのケースでは「RACE」(CE_R)を含む他の評価法は調査結果と整合的である。これはプロスペクト理論の確率を小分けすると過大評価になるという致命的欠陥に由来している(井上・竹内, 2010)。表5もプロスペクト理論のこの欠陥を示したものである。

表4 各評価法の結果比較(4) (井上・竹内, 2010 に加筆)

プロスペクト理論の不適合例(筆者らの調査による)

 CE_S : シャーププレシオ ($S=0.4$) CE_P : プロスペクト理論 ($\alpha=\beta=0.88$, $\gamma=0.61$, $\delta=0.69$, $\lambda=2.25$) CE_R : RACE ($a=0.3$, $b=0.1$, $c=d=1$)カッコ内: (信頼度) = $1 - (\text{危険率})$, 危険率: A, B の嗜好に差がないとき (選ぶ確率がともに 50%) でも, この結果またはより極端な結果が出てしまう確率

(太字数値は優位の選択肢を示す)

(単位: 万円)		(信頼度)						
設問	N	P	選択	EMV	σ	CE_S	CE_P	CE_R
24A	10	1.0	73% (0.941)	10	0	10	10	10
B	50 0	0.2 0.8	27%	10	20	2	10.85	7
25A	10	1.0	67% (0.849)	10	0	10	10	10
B	-5 145	0.9 0.1	33%	10	45	-8	10.14	4
26A	12.5 0	0.8 0.2	79% (0.971)	10	5	8	7.09	7.75
B	-10 190	0.9 0.1	21%	10	60	-14	7.13	-0.5
27A	15 -10	0.8 0.2	80% (0.982)	10	10	6	2.45	3.5
B	-10 90	0.8 0.2	20%	10	40	-6	2.52	-2
28A	-20 80	0.7 0.3	80% (0.982)	10	45.83	-8.33	-1.60	-6.87
B	-25 75 80 85	0.7 0.1 0.1 0.1	20%	6.5	48.17	-12.77	4.77	-10.61

実質的にはほとんど差がない A と B で CE_P は 3 倍以上の差が出ているが, 「RACE」(CE_R) の評価は現実的である。

このように CE_R は多くのケースでアンケート調査結果と合致していて, 既存評価法の問題点 (井上・竹内, 2010) のほぼすべてが解決している。

5. 「不確実性」の評価

5.1 「ナイトの不確実性」

以上は, 変動が確率・定量的に予測できる Knight (1921) の「リスク」に限って議論してきた。しかし最近, この予測が困難な「ナイトの不確実性」が注目されており, 多くの場合「リスク」よりさらに回避されるが, 時にむしろ好まれることがあり, これが世界不況の遠因になっているという説もある (竹森, 2007)。

「不確実性」の場合には, 生起確率の総和を 1 未満にするという評価法も提案されている (小島, 2009) が, 個々の確率値の合理的な推定法がない。一般には, 「ナイトの不確実性」は定量評価になじまず, それが不安を拡大して通常は回避されるが, 時には冒険的な投機の対象になると説明されることが多い。

5.2 「エルスバークのパラドクス」

「リスク」と「不確実性」の相違例として「エルスバークのパラドクス」があげられる。A, B 2 つの壺には, ともに赤または白の玉が合計 100 個ずつ入っている。A の中身は赤球・白球それぞれ 50 個ずつであるが, B の中身は不明である。どちらかの壺から玉を 1 つ取り出し, それが赤であれば 100 円がもらえる。このとき他に情報がなければ B の壺から赤玉を取り出す確率も 50% と考えるのが妥当で (「ラプラス原理」), A と B には優劣の差はないはずである。しかし Ellsberg の調査によれば, 実際には A の壺 (「リスク」) が有意に好まれ, B の壺 (「不確実性」) は避けられる傾向があり, 「ナイトの不確実性」は期待値や期待生起確率が同じ場合でも回避される (Fox and Tversky, 2000)。

同じ 50% という赤玉確率を用いれば, どの既存評価法でも両者の効用および CE は同じになり, A と B の選好の差は説明できない。

5.3 RACE による「不確実性」評価

この問題は, 「リスク」は確率値が一意に決定している (または推定できる) のに対し, 「不確実性」は確率値にも変動があるという二重 (不確実の程度に応じて多重) 構造と考えれば RACE で評価できる。表 6 で上段は「リスク」

表5 確率細分時のプロスペクト理論不適合例（井上・竹内，2010 に加筆）

A：微細なゆらぎ（最大幅±0.12%）があるが，中央値で代表した場合

B：微細なゆらぎを再現するために，25分割して評価した場合

 CE_P ：プロスペクト理論（ $\alpha = \beta = 0.88$ ， $\gamma = 0.61$ ， $\delta = 0.69$ ， $\lambda = 2.25$ ） $W(P)$ ：「重み」， $V(N)$ ：主観的価値， U_P ：効用 CE_R ：RACE（ $a = 0.3$ ， $b = 0.1$ ， $c = d = 1$ ）

	N	P	$W(P)$	$V(N)$	U_P	CE_P	CE_R
A	100	1.0	1.0	57.544	57.54	100	100
B (25 分割)	99.88	0.04	0.117	57.483			
	99.89	0.04	0.117	57.488			
	⋮	⋮	⋮	⋮			
	100.00	0.04	0.117	57.544	168.74	339.56	99.98
	⋮	⋮	⋮	⋮			
	100.11	0.04	0.117	57.600			
	100.12	0.04	0.117	57.605			

を，下段は「不確実性」を示している。A と B の壺はともに EMV50 円で等しいが，A では赤玉の確率は 50% で一意に確定しているのに対し，B では赤玉の確率値自体が不確定で一意に決定できない（表 6 では簡略化して 5 ケースの確率値が可能であるとしている）。「ラプラス原理」（情報がないうきには対応する各選択肢の生起確率を同等とみなす）に基づき，B の各ケースの確率をそれぞれ 20% とすると，B の壺の赤玉確率の期待値は 50%（ $0.9 \times 0.2 + 0.7 \times 0.2 + 0.5 \times 0.2 + 0.3 \times 0.2 + 0.1 \times 0.2$ ）となって，これを使用すれば A と同じ結果になる。しかし，まず各ケースの RACE（ CE_{R1} ）を算出し，次にこれらの CE_{R1} 値をあたかも確定値の如く扱い，各々の生起確率 20% を用いて再び計算した B 全体の RACE（ CE_R ）は A より小さくなり，「不確実性」がより回避されることが説明される。

いっぽう，C は壺中の赤玉 25 個，白玉 75 個のときの「リスク」で，D はこれと確率期待値が同じ「不確実性」，すなわち世界中の赤玉と白球の総数比率が 1:3（=25:75）である事は既知だが，壺中の赤白比率が不確定（ただし赤玉確率の期待値は 25%）の場合の 1 例である。このとき，同様に RACE を計算するとごくわずかではあるが D が C を上回る。すなわち，低い期待値が固定される「リスク」

より，低確率ではあってもより高い期待値のケースが生じうる「不確実性」が時には選ばれることも再現される。より正確にはアンケート調査などによる定量的な確認が必要ではあるが，RACE を用いれば，従来は困難と見られてきた「不確実性」の定量評価も行える可能性が強い。

6. RACE の特徴と課題

新評価法「RACE」は，定義が比較的シンプルで計算が容易であり，各係数の意味（「変動回避度」，「下方回避 / 上方愛好度」，「負回避度」）が直観的に理解しやすく微調整も容易である。膨大な調査結果に基づく「プロスペクト理論」と多くのケースで同じ判定を導き，時にはそれよりうまく現実を説明できる。負の値（損失）でも，確率を小分けしても，連続系でも矛盾なく使用でき，「リスク」だけでなく「不確実性」の評価も行える可能性が高い。

しかし，「RACE」（というよりリスク評価法全般）には次のように多くの課題も残されている。

- ① 標準係数の結果は多数派の選好傾向を示しており，全員の性向が一致しているわけではない。現実の企業・個人の好みには個性があり（逆にこれにより「差別化」が可能），それに応じて各係数の微調整が必要である。

表6 リスク (A, C) と不確実性 (B, D) の RACE による評価

 CE_R ：RACE（ $a = 0.3$ ， $b = 0.1$ ， $c = d = 1$ ） PI ， CE_{R1} ：それぞれ各ケースの赤 / 白確率および RACE

（太字数値は優位の選択肢を示す）

（単位：円）

ケース	N	PI	CE_{R1}	壺	P	EMV	CE_R	壺	P	EMV	CE_R
リスク	赤	100	1.0	A	0.5	50	35	C	0.25	25	17.0
	白	0	1.0		0.5				0.75		
不確実性	1	100	0.9	B	0.2	50	31.7	D	0.01	25	17.2
		0	0.1								
	2	100	0.7		0.2				0.03		
		0	0.3								
	3	100	0.5		0.2				0.08		
		0	0.5								
	4	100	0.3		0.2				0.46		
		0	0.7								
	5	100	0.1		0.2				0.42		
		0	0.9								

- ② 多くの評価法 (CE_p の $\alpha \neq \beta$, CE_R の $d \neq 1$ を除く) は「スケールフリー」で、円で計算しても、ドルで計算し為替レートを掛けても CE 値は同じになる。単位 (円, 万円, 億円, ドル, 百万ドル *etc.*) を気にせずに計算できる点は便利であるが、現実のリスク性向は「スケール依存的」である可能性が高く、スケールに応じて係数を変化させる必要がある。
- ③ 個人と企業ではリスク性向が異なり、さらに後者では「エージェント」(経営者) のリスク性向が「プリンシパル」(オーナー/株主) と異なる可能性が高い。
- ④ 案件ごとの評価だけではなく、企業全体の資産 (「フレームワーク効果」) を考慮した分析が必要である。同様に、「破産効果」についても、当該企業や個人は債務を逃れリセットできても、その負の遺産は何らかの形で社会全体が受け継ぐものであり、異なった立場も含めた全体の枠組みの中で検討する必要がある。
- ⑤ 「アンケート調査」の信頼性に疑問があり、真剣味を増すために賞金を出すにしても、実業並みの巨額は無理で、②の「スケール効果」などの評価は困難である。したがって今後は、石油鉱業における事例を多く調査し、理論および係数の値を確認・改善していく必要がある。

7. RACE の探鉱戦略への適用

7.1 探鉱案件の優位性

7.1.1 ビジネスチャンスとしての「リスク」

石油鉱業の案件市場も情報の透明・共有化と機会の公開・競争化が進み、「理由ある差別化」がないと利益が上げられなくなってきた。「リターンによる差別化」は井上・竹内 (2010) で検討したが、もうひとつの「リスクを取ることに伴う差別化」がますます重要になってきている。人や企業は一般にリスクを嫌うから、そこに利益を上げるチャンスが生じる。自社と他社のリスク性向を正確に評価し、企業体力 (技術・資金量・格付け・資本コストなど) を活かした戦略を採れば、他社より大きなリスクを取っても適切に管理・対処することができ、利益が上げられる。

7.1.2 探鉱 vs. 埋蔵量買収

こうした観点を念頭に置き、探鉱 (新規案件発掘およびファームイン) と埋蔵量買収の比較を試みる。埋蔵量買収は「ドライ」(炭化水素なし) の危険性がなく、即座に埋蔵量をブックして株主にアピールでき、生産 (キャッシュフロー) 開始までのリードタイムも短い。埋蔵量やプロジェクトを担保に開発資金を調達すること (プロジェクトファイナンス) も可能である。

しかし、探鉱に比べると、埋蔵量買収で利益を上げるとは次のようになりかなり困難である。

- ① 埋蔵量買収では、売手と買手の情報の非対称性が極めて大きい。米国では、見掛けは立派だが中身がポンコツの中古車を「レモン」といい、売手が熟知している欠点に買手は気づかない。埋蔵量買収にはデータレビューでは把握できない開発・操業上の「暗黙知」が多く存在し、「レモン」をつかまされることも少なく

ない。いっぽう、探鉱案件は情報の非対称性が小さいスクラッチ勝負で、時には鉱区入札者および案件買手は独自の知見やアイデアによりむしろ優位に立てる。

- ② 埋蔵量買収は、ドライの危険性がなく結果の変動幅、すなわち「リスク」が小さいため、売手に手放す誘因が少なく、EMV (リターン) を基準に値付けされることがほとんどである。むしろ売手に過去の苦労や投資に対する思い入れ (「保有効果」, 「 sunk cost 効果」) があるため過大評価されやすく、買手は独自技術などによる付加価値が見出せないと正の EMV を得ることは困難である。いっぽう探鉱案件は、ファームインの場合も売手にリスク軽減の誘因があり、EMV ではなく過去費や今後の探鉱費の肩代わりなどにより値付けされるため、案件さえ選べば利益を上げる余地は大きい。
- ③ 探鉱案件には埋蔵量買収に比べ、2D/3D 地震探査、評価井、ファームアウト、スワップなど多くの選択肢 (オプション) が存在し、これらを活用することにより案件価値を最大化することが可能である (詳細後述)。オプション価値は変動 (ボラティリティ) が大きいほど高まることから、探鉱の変動の大きさを逆用できる。
- ④ 探鉱案件は、埋蔵量買収に比して 1 件あたりの取得費が大幅に低いと、後述するように複数案件のポートフォリオ構築によるリスク軽減が容易に行える。

7.1.3 実はリスクが高い埋蔵量買収

埋蔵量買収は探鉱ファームインに比較しリスクが低いと一般には思われているが、仮に上記諸問題が解決しても、実はむしろリスクが高いことを、RACE を用いて示す。

図 1 の (1) が成功確率 25% (うち大規模 1/3, 小規模 2/3) の探鉱案件で、EMV は \$185MM, RACE は \$95.4MM である。ここで探鉱費 (\$65MM) 全額負担と引き換えに 50% 権益をファームアウトすると EMV は減少するが、損失の危険性がなくなるため RACE は約 \$10MM 増加し、このディールは正当化される。いっぽう、ファームインした側は EMV \$60MM, RACE \$-4.6MM であり、この案件単独ではファームインは正当化されない。しかし、独立の同等 (結果とその生起確率が全く同じ) 案件を 3 件行った結果が図 3 (1) の下段のツリーに示されているが、このときポートフォリオとしての RACE は正になる。すなわち、こうした体力と戦略を有する企業ならファームインは正当化される。

この探鉱案件が成功した場合が図 1 の (2) で、EMV \$1000 MM, RACE \$870.3 MM である (過去費は無視)。この 50% を取得して上記探鉱ファームインと同じ EMV \$60 MM を得るには \$440 MM で購入する必要がある。このとき、売却側の RACE の向上はごくわずかなので、「保有効果」(過去の苦労や思い入れから、保有している案件を過大評価しがちなバイアス) などを勘案すると売り手には手放す誘因が小さく、買い手がこの条件で購入するにはかなりのハードネゴが必要であろう。

図1 探鉱 vs. 埋蔵量買収
(1) 探鉱ファームイン, (2) 埋蔵量買収

仮にこの条件で買収に成功しても、そのRACEは大幅に負(\$-49.1MM)となる。莫大な費用を要するポートフォリオ構築が可能だとしてもRACEを正に転じる事は困難である。すなわち埋蔵量買収は、埋蔵量値の変動の影響が大きく、正当化されないことが多いが、探鉱ファームインでは逆にこのリスクが失敗可能性により希釈され、数件のポートフォリオ構築によりRACEは正となる。

ここでは成功時の埋蔵量の変動を問題にしているが、これを昨今の原油価格や開発費の乱高下と読み替えても良い。こうした「経済リスク」は近似的には完全相関している(すべての案件に同等の影響を与える)ため、ポートフォリオによるリスク軽減ができない。これに対し、探鉱案件の主要リスクは発見の成否の「地下リスク」(近似的には案件ごとに独立)であるから、ポートフォリオ構築により軽減可能で、両者の差はより拡大する。

7.2 探鉱戦略への応用例

7.2.1 ファームアウトとオプション

探鉱戦略への応用例を単純化して図2に示す。A社が発掘した探鉱案件(過去費は無視)は、試掘費\$50MM、成功確率20%で成功時のNPVは\$500MM(試掘費を差し引くと\$450)で、EMVは\$50MMである(以下では単位「\$MM」は省略)。しかしRACEは負(-10)で、このままでは採択する魅力がない。このときRACEを正、すなわち採択する価値のある案件に変換する戦略を考察する。

(1)は80%ファームアウトの例で、参入するB社に試掘費全額を負担させると、A社の権益は20%、EMVは20に減少するが、損失の危険性はなくなりRACEは正(14)になる。いっぽう、参入したB社はEMV30、RACE-17であるが、同等・独立の案件を6件行えばRACEも正になるので、そうした体力のある会社なら参入は正当化される。

(2)は地震探査の結果に応じて試掘をオプションとする場合で、地震探査の結果が悪い場合(50%)は撤退、結果が良い場合(50%)のみ試掘し、その40%(全体の20%)

で成功する。こうすることにより、EMV(65)、RACE(12.75)ともに改善される。このとき、地震探査費用をC社に負担させ30%ファームアウトすると、EMVは若干減少するがRACEはさらに改善される。いっぽう、C社もポートフォリオを組めばRACEを正にできる。

この続きが(3)で、地震探査の結果が良かった場合(50%)には、さらに試掘費をD社に負担させ25%ファームアウトする。A社の権益は45%になり、地震探査結果が悪いとき(確率50%)にはファームアウトせず撤退なので、それも考慮するとEMVは45と若干減少するが、RACEは撤退ケースを加味しても大幅に向上する。D社のRACEもポートフォリオを組めば正となる。

7.2.2 権益スワップ

図3は権益スワップの例である。(4)では、A社とE社は同じくEMV50でRACEが負の異なる探鉱案件を持っているが、これらを50%ずつスワップすると、両社のポートフォリオ(EMV50)のRACEは正に改善される。このE社がEMV、RACEは同じ(したがってリターンも、主観的なリスクの程度も同じ)だが案件の性格が正反対の(発見確率は低いが発見時の利益は高い)F社案件と権益スワップを行う例が(5)で、効果がより高く、RACEの改善が著しい。

ここでは単純な例しか示していないが、EMVさえ正であればファームアウト、スワップ、オプション、ポートフォリオなどにより探鉱案件の価値を向上させることが可能であり、その評価にはRACEが有効である。

7.3 探鉱戦略策定手順と留意点

(1) 過去の実例や仮想例についてRACEを計算し、これと自らの意思決定やリスク感覚と比較することにより、(2)式における自社の各係数および指数を判定する。その値が首尾一貫しない、または標準係数と大きく異なる場合は、リスク評価が適切でない可能性があり、チェックを要する。また、同様に業界

図2 探鉱戦略の検討

(1) ファームアウト, (2) 地震探査+試掘オプション, (3) 地震探査後ファームアウト

図3 探鉱戦略の検討

(4) (5) 権益スワップ

他社の係数を推定して計算し、比較することにより、自社のリスク性向/耐性が判定でき、今後の戦略選択の指針となる。

- (2) 知見やアイデアを活用して EMV が正の案件を発掘する。その RACE が負の場合はもとより、正の場合でも、ファームアウト・スワップ・オプションなどを駆使して RACE の最大化を目指す。その際、上記した自社/他社のリスク性向の相違の認識が役立つ。
- (3) 逆に他社が保有する EMV が正の案件で、彼らにとってはリスクが大きいが、自社のリスク性向やポートフォリオ効果により RACE を正にできる案件があればファームインを検討する。この際、RACE により両社のリスク性向の相違を検討すれば、先方に受け入れられやすく、自社の利益も最大化する戦略が選択できる。ファームイン後も常に RACE を最大化する戦略（売却を含む）を模索する。

8. おわりに

石油鉱業は「熟成・競争時代」（井上ら，2008）に入り、事業利益を確保することがますます困難になってきた。しかし、特に探鉱においては、得意技術や財務力を活かして適切な案件を発掘・選択し、ファームイン/アウト、権益スワップ、オプション、ポートフォリオなどを駆使してリスクをマネージすれば利益確保が可能になる。

この際、リスクの定量的評価が重要になるが、既存の評価手法はいくつかの問題点があり、石油鉱業で使用するには必ずしも適していない。そこで、これらの問題を克服した新評価法を考案した。新評価法「RACE」はリスクを科学的に数量化する手法で、厳しい競争（race）を勝ち抜く探鉱戦略構築に極めて有効と考えるが、今後さらに多くの事例で検証して改善し、その活用法を確立・拡張していく必要がある。

謝 辞

本論文に使用したアンケート調査には、石油技術協会・探鉱技術委員諸氏および三菱商事石油開発㈱社員諸氏のご協力を得た。三菱商事石油開発㈱井上久隆氏を始めとする技術者諸氏からは数々のご助言を賜わった。これらの方々

使用記号

- a (無名数): RACE 算出の際に用いる係数。人/企業のリスク性向のうち「変動回避度」を表す。「シャープ・レシオ」(井上・竹内, 2010) に相当する。通常 (変動回避的な場合) は正だが変動愛好的な場合は負となる。「標準ケース」では 0.3。
- b (無名数): RACE 算出の際に用いる係数。人/企業のリスク性向のうち「下方回避 / 上方愛好度」を表す。通常は正である。「標準ケース」では 0.1。
- c (無名数): RACE 算出の際に用いる係数。人/企業のリスク性向のうち「負回避度」を表す。通常は正である。「標準ケース」では 1。 $c=d=1$ のとき (標準ケース) は負のインパクトが正の倍になる。
- d (無名数): RACE 算出の際に用いる指数。人/企業のリスク性向のうち「負回避度」を算出する際に用いる。通常は 1 であるが、「破産効果」を考慮するときなどは異なる値を用いる。

CE (ドル, 円など貨幣価値表記): 確実等価 (Certain Equivalent)。リスク (結果に変動) があるとき, その案件の主観的価値と等価の (リスクのない) 貨幣価値。評価法により次のように異なる定義のものがある (井上・竹内, 2010 参照)。

CE_E : 期待効用理論による CE。

CE_P : プロスペクト理論による CE。

CE_R : 今回提案する新評価法による CE。「RACE」に同じ。

CE_S : シャープレシオを用いて求めた CE。

EMV (貨幣価値): Expected Monetary Value の略。結果の期待値。平均 (μ) に同じ。井上・竹内 (2010) 参照。

N (貨幣価値): 結果の貨幣価値。リスク (変動) のない場合は N_0 と表記。結果が離散系の (とびとびの値を取る) ときは i 回目の結果を N_i と表記。

NPV (貨幣価値): Net Present Value の略。ある割引率で割り引いて求めた結果の現在価値。井上・竹内 (2010) 参照。

P (0~1 の小数表記): 結果の生起確率。離散系の (とびとびの値を取る) ときは i 回目の結果の生起確率を P_i と表記。連続系 (結果 N の値が連続的に変化するとき) では $P(N)$ と表記する確率密度関数 (p.d.f.) を用い, これは N のすべての値について積分すると 1 になる。

R (通常は貨幣価値): 「リスクプレミアム」(井上・竹内, 2010 参照)。

RACE (貨幣価値): Risk Adjusted Certain Equivalent の略。今回提案する新評価法ならびにそれにより求めた CE

値 (CE_R に同じ)。

U (通常は無名数): 効用値。人/企業に好まれる度合いを数値化したもの (大きいほど好まれることを意味する)。評価法により次のように異なる定義のものがある (井上・竹内, 2010 参照)。

U_E : 期待効用理論による効用値。

U_P : プロスペクト理論による効用値。

U_R : 今回提案する新評価法による「RACE」による効用値。

U_S : シャープレシオを用いて求めた効用値。通常 CE_S と同じで貨幣価値表記。

μ (貨幣価値): 結果の平均 (期待値)。EMV に同じ。

μ'_q : (通常は無名数): 平均周りの q 次のモーメント。 $q=1$ のとき, 「偏差」で常に 0。 $q=2$ のとき, 「分散」(σ^2 に同じ)。 $q=3$ のとき, σ^3 で割ると「歪度」(skewness)。 $q=4$ のとき, σ^4 で割ると (あるいはさらに 3 を引く) と「尖度」(kurtosis)。

μ'_d : (通常は無名数): 負の値だけに対する原点周りの d 次のモーメント (本文参照)。

σ (貨幣価値): 結果の標準偏差。

σ^2 (無名数): 結果の分散 (μ'_2 に同じ)。

引 用 文 献

Fox, C.R. and Tversky, A., 2000: Ambiguity Aversion and Comparative Ignorance. In Kahneman, D. and Tversky, A., eds., *Choices, values, and frames*. Cambridge University Press, 528-542.

井上正澄, 2006: 未来の石油発見を予測する—「探鉱シミュレーター」の試み—。石技誌, **71** (3), 280-292.

井上正澄・中東秀樹・足立原路雄・松本和彦・森山哲太郎, 2008: 石油探鉱戦略の科学—熟成・競争時代を勝ち抜く技法—。石技誌, **73** (1), 7-19.

井上正澄・竹内 傳, 2010: 石油鉱業におけるリターンとリスク—既存リスク評価法の比較—。石技誌, **75** (3), 211-222.

Kahneman, D. and Tversky, A., 2000: Prospect theory: an analysis of decision under risk. In Kahneman, D. and Tversky, A., eds., *Choices, values, and frames*. Cambridge University Press, 17-43.

Knight, F. H., 1921: *Risk, uncertainty and profit*. University of Chicago Press (Reprint: Cosimo Classics, 2006). 448p.

小島寛之, 2009: 「時間」と「不確実性」の理論。現代思想 5月号, **37** (6), 168-181, 青土社。

竹森俊平, 2007: 1997年—世界を変えた金融危機—。朝日新書, 朝日新聞出版, 245p.

Tversky, A. and Kahneman, D., 2000: Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty. In Kahneman, D. and Tversky, A., eds., *Choices, values, and frames*. Cambridge University Press, 44-65.