

政策的不確実性を考慮した中国のタイトオイル開発の収益性評価

——不確実性対策モデルとリアルオプションの試み——

柳 小正^{*, **}

Profitability Evaluation of China's Tight Oil Development Considering Policy Uncertainty—A Trial Approach with Uncertainty Countermeasure Model and Real Options—

LIU Xiaozheng

要旨

非在来型石油であるタイトオイルは、有望なエネルギー資源となる可能性を秘めている。中国には豊富なタイトオイル資源が賦存していると評価され、タイトオイル開発はエネルギー供給に重要な意義を有している。一方、タイトオイルの賦存特性が特別であるため、その開発方式などの面では在来型石油と異なり、量的にタイトオイルの開発が期待できるものの、開発コストも高くなる。そのため、タイトオイル開発を促進するには、補助金を含む優遇的な開発政策の導入が不可欠である。本稿は、政策的不確実性を考慮する中国のタイトオイル開発の収益性を評価するものである。分析にあたって、NPV (Net Presented Value) 法とリアルオプションを組み込んだ不確実性対策モデルを用い、多次元の判断基準におけるいくつかの政策案を取り上げて分析した。それによれば、原油価格の低値時期においては開発補助金、原油価格の高値時期においては税制優遇措置、を実施することでタイトオイル開発の収益性が高まることを示している。

キーワード : タイトオイル、エネルギー政策、不確実性分析、リアルオプション、収益性評価、中国

Keywords : Tight oil, Energy policy, Uncertainty analysis, Real options, Profitability evaluation, China

目次

1. はじめに
2. タイトオイルの開発特徴と開発政策
 - 2.1. 開発特徴
 - 2.2. 主要国の開発政策
3. 先行研究と本稿の分析方法
 - 3.1. 先行研究と本稿の目的

* 島根県立大学

** 濱州学院

- 3.2. 本稿の分析方法
 - 3.2.1. 不確実性対策モデル
 - 3.2.2. リアルオプションの適用
 - 3.2.3. 分析枠組と特徴
- 4. 不確実性対策モデルの収益性評価
 - 4.1. 収益性評価にあたっての仮定
 - 4.1.1. 原油価格
 - 4.1.2. 政策案
 - 4.1.3. 開発投資と開発収入
 - 4.1.4. その他のパラメータ
 - 4.2. 評価結果
 - 4.2.1. 投資の現在価値と収益性の試算
 - 4.2.2. 判断基準に基づいた代替案
 - 4.3. 評価結果についての考察
- 5. おわりに

1. はじめに

タイトオイル(tight oil)は、非在来型資源石油系の一つである。中国を含む世界のタイトオイル資源量は豊富に賦存しており[EIA, 2013]、高い開発潜在力を有し、石油供給において重要な役割を果たすことが期待されている[Zhang *et al.*, 2012; Jia *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2013]。21世紀に入り、科学技術の進歩などによって、タイトオイルが開発できるようになってきた。特に、米国のタイトオイル研究・開発は進んでおり、世界的に石油供給に大きな影響を及ぼしている[EIA, 2017]。中国でも、米国の開発成功を受けてタイトオイル研究・開発が行われている。タイトオイルの賦存特性が特別であるため、その開発方式などの面では在来型石油と異なることから、量的にタイトオイルの開発が期待できるものの、開発コストも高くなる[Zhu *et al.*, 2018]。タイトオイル開発の収益性を上げるためには、①地質的賦存要因を評価してタイトオイル濃集帯の抽出、②開発技術の向上、③タイトオイル開発政策や原油価格などの良好な外的環境(外部環境)が挙げられる。特に、タイトオイル開発の初期においては、補助金を含む優遇的な開発政策を受けられるようにすることで、タイトオイル開発のコストを低減させ、開発の収益性(経済性)を上げることが重要不可欠であると考えられる。現状として政策的な不確実性が存在しているものの、これらの要因を考慮したうえで中国におけるタイトオイル開発の収益性について論じられた例もない。

本稿は、政策的な不確実性を考慮する中国のタイトオイル開発の収益性を評価するものである。まず、研究の背景としてのタイトオイルの開発特徴および主要国の政策動向を解説する。次に、タイトオイルを含む中国における非在来型資源の開発政策に関する先行研究を整理し、そして本

研究の位置づけを示したうえで、NPV(Net Presented Value)法とリアルオプションを踏まえた改良分析法およびそれを組み込んだ不確実性対策モデルを提案する。最後に、仮説を立てて改良分析法を組み込んだ不確実性対策モデルを用い、中国の開発政策がタイトオイル開発の収益性に對してどのような影響を及ぼすかについて検証する。

2. タイトオイルの開発特徴と開発政策

2.1. 開発特徴

石油は、有機物を多く含む根源岩において生成されると考えられる。現在、開発されている石油は、地質賦存状況などによって在来型石油と非在来型石油に分類されている。在来型石油は、①根源岩での石油生成、②長距離移動、③多孔質、浸透性の砂岩や炭酸塩岩など貯留層での集積の3段階を経て形成される。一方、根源岩および隣接する岩石に賦存した非在来型石油は、世界のかなり多くの堆積盆地に賦存し、狭義的タイトオイルと広義的タイトオイルに分類されている。狭義では、根源岩となる暗灰色泥岩や頁岩に賦存した石油資源を指し、いわゆるシェールオイル(shale oil)である。これに対し、広義では、根源岩のみならず、長距離移動できず根源岩以外の緻密な岩石やシルトなどに賦存した石油資源を指す。本稿では、広義的タイトオイルを論じることとする。タイトオイルの開発特徴は在来型石油と異なり、次の5点が挙げられる。

1つ目は、開発方式である。タイトオイルの開発方法は、タイトオイル貯留層の浸透率も孔隙率も低いため、従来の開発方法の対象にはなっておらず、主に水平坑井においてフラクチャリング(水圧破碎法)を実施することとする。水平坑井法は、貯留層との接触面積が垂直坑井に比べて拡大するため、生産量が大幅に増大する掘削方法である。フラクチャリングは、もともと在来型石油を開発する際に実施されている坑井刺激法の一つである。一般的に、タイトオイルはフラクチャリングが実施された後、商業開発の価値が出てくる。

2つ目は、単一坑井の初期においてタイトオイル生産量が限定的である。中国では、タイトオイル開発の坑井先導試験が行われている。開発状況によれば、現在の段階では、開発エリアにおける最も高いタイトオイルの生産量は、初年度平均で1日当たり20トンぐらいである[Yang *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2014]。また、初年度平均で1日当たり10トン前後および10トン以下の開発エリアが示されている[Fan *et al.*, 2015; Zeng *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2015; Ning, 2015; Zhao *et al.*, 2017]。こうしたタイトオイル生産量は、貯留層の生成条件や物性条件、フラクチャリングなどに関連があり、開発収入にもかかわっている。

3つ目は、タイトオイル生産量が生産開始から指数関数的に逡減する。米国タイトオイル生産を牽引するバッケン/スリーフォークス(Bakken-Three Forks)層、イーグルフォード(Eagle Ford)層およびパーミアンベイスン(Permian Basin)層の生産量の減退率は、平均で1年後が49%、2年後が38%、3年後が30%、4年後が20%、5年後が20%、に達すると推定されている[Harvard Kennedy School, 2013]。一方、中国では、タイトオイルの生産状況について、全体として「初期」、

「移行期」および「後期」の3つの段階に分けられている[Wang, 2016; Wei *et al.*, 2016; Ning *et al.*, 2017a]。「初期」では、2～6か月を経て生産量のピークを迎えた後、急激に生産量が減少する[Bi *et al.*, 2018]。一方、「移行期」では、さらに産出量が生産開始時の50～70%であり、維持時間が3～5年になる[Wu *et al.*, 2018]。その後、生産の「後期」の段階に入り、生産開始時の生産量の10～20%前後である[Xu *et al.*, 2016; Wei *et al.*, 2018]。こうしたタイトオイルの生産特徴には、価格変動などを引き起こす脆弱性が示され、開発の収益性にかかわっている。特に、原油価格が低い環境においては、経年的な減産による開発投資資金が回収できなくなり、開発の収益性が失われてくる。

4つ目は、タイトオイルの採取率が低いことである。在来型石油の採取率は油田や開発段階によって異なり、一般的に一次採取、二次採取、三次採取に分けられる。自噴およびポンピングによる石油採取法は一次採取と呼ばれる。一次採取での石油採取率は、20%～30%程度である。一次採取に伴って貯留層のエネルギーが弱まり、地下の圧力を維持するために水やガスを圧入して引き続き石油を採取することは、二次採取と呼ぶ。二次採取法により石油採取率は、通常30%～40%である。さらに、採取率を一層向上させるために増進回収技術(EOR: Enhanced Oil Recovery、三次採取)が確立し、その採取率は最終的に40%～60%以上に向上させることが可能とされる。一方、タイトオイルの一次採取率は、一般的に8～12%にとどまる。開発時期やタイトオイル貯留層に応じて、リフラクチャリング(refracturing)や水攻法(water flooding huff and puff)を採用することで、タイトオイルの採取率を高めることができる。近年の研究では、タイトオイル貯留層によって14～30%に達する可能性がある[Liu *et al.*, 2016]。

5つ目は、開発コストである。在来型石油の開発コストは、地域や油田によって異なるが、経済的に安定した開発ができる。例を挙げると、1バレルあたり中東の石油開発コストが10ドル前後、ナイジェリアが20～40ドル、ベネズエラが30ドル前後、中国が50ドル前後である。一方、タイトオイルの開発コストについては、米国ではすでに32～38ドル/バレルに達しており[Rystad Energy, 2016]、中国では50ドル/バレル以上であると試算されている[Hu *et al.*, 2018]。

このように、タイトオイルの開発方法は、在来型石油の開発技術を基礎として発展してきているが、採取効率の面およびコストの面では、両者の間にまだ大きな差がある。タイトオイルが豊富な資源量を有していると評価されているものの、貯留層の賦存条件が厳しく、資源の開発は困難である。開発収益性を上げるためには、より高度な開発技術や、一定水準以上の原油価格の推移、さらに、開発初期において採算性などの向上が必要であり、補助金を含む優遇的な開発政策が求められる。

2.2. 主要国の開発政策

有効なタイトオイル開発は、石油供給に大きな変化をもたらすと認識されている。そのため、タイトオイル開発の関係国は、優遇的な開発政策を受けられるようにすることでタイトオイル開発を後押ししている。米国は、タイトオイルを含む非在来型資源開発を重視し、1980年から非在

来型資源への優遇的な開発政策を導入した。1980 年の「Crude Oil Windfall Profit Tax Act of 1980」では、石油・天然ガス開発企業に対し、原油価格の上昇により得た利益(1979 年と比べ)に課税し、課税された税金を非在来型資源の開発に補助する形になった。また、1997 年の「Taxpayer Relief Act of 1997」では、非在来型ガス資源開発に対して課税の優遇措置を行った。続いて、米国政府は 2005 年には、エネルギー安全保障へ取り組む内容を中心とする「Energy Policy Act of 2005」を制定し、その中で、2006 年に稼働が開始した非在来型石油・天然ガスの坑井に対し、連続 5 年間(2006～2010 年)で原油換算(oil equivalent)1 トンあたり 22.05 ドルの補助金を実施した。一方、カナダでは、シェールガスおよびタイトオイル開発の初年度において税金の 100%を免除し、また、リスクは高くても収益も低いプロジェクトに対し、一定期間内に最大で 30%の税金を免除している。ロシアについては、2014 年 1 月 1 日以降、タイトオイルを開発する場合、税金の納付を免除している[Sun *et al.*, 2015]。

一方、中国政府は 1990 年代後半、特に 2007 年以降、非在来型天然ガス(炭層ガスとシェールガス)の開発を促進するために補助金を含む優遇的な開発政策を実施した。その結果、これまでは実用化されていなかった炭層ガスおよびシェールガスの開発は、関連政策や開発計画など中国政府の全面的なバックアップなどにより、商用化へ向けての動きが活発化してきている[柳、2017]。

近年における中国のエネルギー政策について、2016 年 12 月に発表した「エネルギー発展第 13 次 5 年計画」では、国内外の情勢変化に対応し、政策の柱として①化石燃料における石炭から天然ガスへの代替、②化石燃料から非化石エネルギーへの代替が示された[中国国家発展改革委員会・国家能源局、2016]。中国では、近年に起こった大気汚染が社会問題化し、石炭利用抑制や天然ガスを含むクリーンエネルギー利用拡大が急務となり、また地球温暖化対策の国際枠組み「パリ協定」が 2016 年 11 月に発効したことから、二酸化炭素排出削減の継続的な取り組みが必要である。一方、米国のシェール革命などを背景に国際原油価格が低下し、原油の輸入依存度が 7 割に達した中国はその恩恵を受けた。そのため、中国政府は国内の石油開発を依然として重視するものの、非在来型石油への優遇的な開発政策を提示しなかった。

こうように、現在の段階では、中国政府は未だにタイトオイルを含む非在来型石油開発に関する優遇的な開発政策を提示していない。タイトオイルの開発技術が未成熟で、開発経験が欠如する開発初期段階では、特に低原油価格において採算性を維持するため、非在来型天然ガスのような優遇的な開発政策の実施が期待されている。

3. 先行研究と本稿の分析方法

3.1. 先行研究と本稿の目的

中国におけるタイトオイルを含む非在来型資源の開発政策に関する研究は、2008 年以降散見され、次のように 2 つに分けられる。その 1 つは、米国をはじめ外国のタイトオイルを含む非在

来型資源の開発政策を紹介し、そのうえでタイトオイル開発政策の提言を行っている。Sun は、米国政府が優遇的な開発政策を通じてタイトオイル・ガス開発を促進することを紹介し、タイトオイル・ガス開発の初期段階において中国が官民一致で協力すべきであると提起した[Sun, 2013]。Ding らは、非在来型資源開発の難しさや高コスト下において中国がまだ商業的開発に至っていない状況を述べたうえで、米国とカナダの非在来型資源開発が優遇的な開発政策により促進されていることを提起し、中国政府が外国の開発政策や中国国内で実施している炭層ガス開発の優遇的な開発政策を参考にし、その他の非在来型資源開発に対しても優遇政策を実施すべきと指摘した[Ding *et al.*, 2014]。Zhang らは、タイトオイルの地質特性および外国のタイトオイルの開発状況を分析し、タイトオイル開発の成功が政府の効果的な開発政策によってもたらされるとの考えた方を示した[Zhang *et al.*, 2015]。Sun らは、世界のタイトオイル開発状況を概観するとともに、米国、カナダなど国のタイトオイル開発政策を紹介し、そのうえで中国のタイトオイル開発政策を提言した[Sun *et al.*, 2015]。Wang らは、米国のタイトオイル開発成功が良好な開発環境や開発技術の進歩などにより開発コストが大幅に削減され、低原油価格においても経済的な開発を実現することができることを示し、中国の開発企業が政府に支持策を推し進めるように積極的に働きかけることを望んだ[Wang *et al.*, 2017]。Li らは、米国の非在来型資源開発の成功は政府の補助金を受けることが端緒であり、そのために中国が米国の開発モデルを参考にして補助金を速やかに設置し、企業の原動力維持を講じる必要があると主張した[Li *et al.*, 2017]。もう 1 つは、非在来型資源開発の特徴や難しさを示し、タイトオイルを含む非在来型資源の開発を促進するため、優遇的な開発政策を実施すべきと提案している。Chen らは、中国国内の非在来型資源を紹介し、非在来型資源開発の初期段階において、融資や減税など適切な優遇政策を実施することが重要であると指摘した[Chen *et al.*, 2009]。Ding らは、現在の段階では中国の非在来型資源開発を促進するための固定的な支援制度を設けていないことを強調し、非在来型資源の種類によって優遇制度の差別化を実施すべきであると提案した[Ding *et al.*, 2013]。Liao らは、中国政府がタイトオイル開発のエネルギー安全保障上の重要性を認識すべきで、タイトオイル開発に対する財政支援が少ない現状から、優遇的な開発政策を早急に充実させる必要性を提言した[Liao *et al.*, 2013]。Wu らは、中国国内の非在来型資源を紹介したうえで、政府が非在来型資源開発の企業に財政補助や資源税の減税を進めることを提案した[Wu *et al.*, 2015]。Ning らは、低原油価格の下においては経済的なタイトオイルの開発が実現できないため、技術革新やコスト削減、優遇的な開発政策などが重要な役割を担うと指摘した[Ning *et al.*, 2017b]。

以上のように、中国におけるタイトオイルを含む非在来型資源開発に関する先行研究を見てきたが、そのほとんどは、優遇的な開発政策の提言に限られている。また、開発政策の研究である以上、政策的影響を考察したものはほぼ見られない。特に、本稿の研究課題として掲げた政策的な不確実性を考慮するタイトオイル開発の収益性についての分析は、見あたらない。本稿では、タイトオイル開発の特徴や開発政策の位置付けを考察するうえで、中国の開発政策がタイトオイル開発の収益性に対してどのような影響を及ぼすかについて分析することを目的とする。

3.2. 本稿の分析方法

3.2.1. 不確実性対策モデル

オペレーションズ・リサーチの範疇にある不確実性対策モデルは、不確実状況の発生確率が確定できない条件下における対策方法であり、不確実性下における投資プロジェクトに対する組み合わせた対策方法としてよく使われている [Zhu *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2014]。タイトオイルの開発はさまざまな不確実性を有しているため、分析方法として不確実性対策モデルを用いることが有効である。不確実性対策モデルの考え方は、次のようになる。

不確実性対策モデルの基本要素は 4 つから構成される。すなわち、自然状態(例えば、地質的賦存要因や技術的要因や原油価格など)、代替案(選択肢)、収益関数および判断基準である。これを使って以下のように考えを表すことができる。

$A = \{a\}$ 代替案集合、 $S = \{s\}$ 自然状態集合であるとし、代替案集合と自然状態集合がそれぞれ $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 、 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ の場合、収益関数(q)の値は $m \times n$ 個であり、その収益の値は Table 1 のように示している。

Table 1 Expected return on natural conditions and alternative plans

Alternative plan \ Natural state	Natural state(s_1)	Natural state(s_2)	...	Natural state(s_n)
Alternative plan (a_1)	q_{11}	q_{12}	...	q_{1n}
Alternative plan (a_2)	q_{21}	q_{22}	...	q_{2n}
...
Alternative plan (a_m)	q_{m1}	q_{m2}	...	q_{mn}

Source: Prepared by the author

Table 1 による不確実性における収益関数の行列式は、次のように示す。

$$Q = \begin{pmatrix} q_{11} & \dots & q_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ q_{m1} & \dots & q_{mn} \end{pmatrix}$$

自然状態、代替案および収益の値が分かった場合、判断基準を示せば、代替案の中で最もよい案を選択することができる。判断基準は、意思決定者の考え方や経験によって変わる。今まで、よく使われているのは、(1)悲観的な基準(pessimistic criterion)、(2)楽観的な基準(optimistic criterion)、(3)楽観度係数基準(coefficient of optimism)、(4)最大後悔最小化基準(minimum regret criterion)、(5)中間的な基準(laplace criterion)という 5 つの判断基準がある。以下では、それぞれの判断基準に基づいて収益関数の値を得る方法を述べる。

(1) 悲観的な基準は、意思決定者が解決課題に対し慎重や保守的態度をもち、最悪の状態を考え、その中で最も収益が高い代替案を選択する。悲観的な基準における収益関数の値(d)は、以下のように示す。

$$d = \max_i \min_j \{q_{ij}\} \quad (1)$$

上式では、代替案 a_i に対し、 $d_i = \min\{q_{ij} \mid 1 \leq j \leq n\}$ とすると、 $d_k = \max\{d_i \mid 1 \leq i \leq m\}$ は、対応した a_k の最適な代替案における収益関数の値である。

(2) 楽観的な基準は、意思決定者が解決課題に対し楽観的態度をもち、最良の状態を考え、その中で最も収益が高い代替案を選択する。楽観的な基準における収益関数の値(d)は、以下のよう示す。

$$d = \max_i \max_j \{q_{ij}\} \quad (2)$$

上式では、代替案 a_i に対し、 $d_i = \max\{q_{ij} \mid 1 \leq j \leq n\}$ とすると、 $d_k = \max\{d_i \mid 1 \leq i \leq m\}$ は、対応した a_k の最適な代替案における収益関数の値である。

(3) 楽観度係数基準は、悲観的な基準と楽観的な基準を折衷した代替案である。楽観度係数基準では、意思決定者が経験に基づき、楽観度係数を決め、楽観度係数による代替案ごとに折衷値を計算し、その中で最も収益が高い代替案を選択する。楽観度係数基準における収益関数の値(d)は、以下のよう示す。

$$d = \max\{\lambda q_i^{(1)} + (1 - \lambda)q_i^{(2)} \mid 1 \leq i \leq m\} \quad (3)$$

上式では、 $q_i^{(1)} = \max\{q_{ij} \mid 1 \leq j \leq n\}$ 、 $q_i^{(2)} = \min\{q_{ij} \mid 1 \leq j \leq n\}$ とし、代替案 a_i に対する $d_i = \lambda q_i^{(1)} + (1 - \lambda)q_i^{(2)}$ とすると、 $d_k = \max\{d_i \mid 1 \leq i \leq m\}$ は、対応した a_k の最適な代替案における収益関数の値である。中では、 λ は楽観度係数である。

(4) 最大後悔最小化基準は、意思決定者が自然状態の影響で最善の収益代替案をとらなかったことで、ほかの代替案を選択することにより、機会損失がもたらされたことを指す。最大後悔最小化基準では、代替案ごとに最大損失値を計算し、その中で最小損失値の代替案を選択する。最大後悔最小化基準における収益関数の値(d)は、以下のよう示す。

$$d = \min_i \max_j \{q_j - q_{ij}\} \quad (4)$$

上式では、 $q_j = \max\{q_{ij} \mid 1 \leq i \leq m\}$ とし、代替案 a_i に対する $d_i = \max\{q_j - q_{ij} \mid 1 \leq j \leq n\}$ とすると、 $d_k = \min\{d_i \mid 1 \leq i \leq m\}$ は、対応した a_k の最適な代替案における収益関数の値である。

(5) 中間的な基準はラプラス基準とも呼ばれ、発生する可能性が相同であり、収益均等代替案を選択する。中間的な基準では、代替案ごとに収益の平均値を計算し、その中で平均値の最大値を採る。中間的な基準における収益関数の値(d)は、以下のよう示す。

$$d = \max\left\{\left(\sum_j q_{ij}\right)/n \mid 1 \leq i \leq m\right\} \quad (5)$$

上式では、代替案 a_i に対し、 $d_i = \left(\sum_j q_{ij}\right)/n$ と、 $d_k = \max\{d_i \mid 1 \leq i \leq m\}$ は、対応した a_k の最適な代替案における収益関数の値である。

以上で示したように、判断基準によって異なる代替案を得る可能性がある。これらの判断基準に基づいて適合する代替案を導き出し、不確実性下における有用な情報を提供・検討することで、不確実性に関する分析が深まり、代替案を評価するうえで多くの示唆が得られる。本稿では、上述した5つの判断基準を用い、タイトオイル開発の収益性における最適な代替案の選定を試みる。

3.2.2. リアルオプションの適用

石油開発投資の評価にあたっては、従来も投資の収益性を試算するためにさまざまな手法が用いられてきた。例えば、①投資が行われると期待される将来のキャッシュフローの時間的価値を考慮し、現在価値に割り引いて投資の評価を行う NPV 法、②投下資金の回収期間の遅速で優劣を判断する回収期間法、などが挙げられる。これらの手法は静態的な評価方法であり、投資を変更・中止・拡大するなど柔軟性が考慮されていないため、不確実性の環境下においては投資判断を誤らせる可能性がある。

こうした静態的な評価方法の限界を補完する分析方法としては、リスクが高い石油開発の投資でも、金融工学のオプション理論を実物資産大型プロジェクトに適用するリアルオプションという考え方が実用化されつつある。リアルオプションの利用は、投資資産の将来的な価値に不確実性があるため、その投資決定がなされる以前にその投資の不確実性を検討し、開発するか否かを判断するうえで多くの示唆を得ることができる。リアルオプションは、①延期オプション、②学習オプション、③拡張(成長)オプション、④操業開始(停止)オプション、⑤放棄(撤退)オプション、⑥段階オプション、⑦複合オプション、⑧レインボーオプションなどの種類があり、いずれも柔軟に対応しており、事業利益の最大化をはかる[石油公団企画調査部、2002; ジョナサン・マン、2003]。タイトオイル開発の収益価値評価には有益であるが、石油業界の共通認識には至っていない。

リアルオプションでは、オプションの価値を計算するために、ブラック・ショールズモデル、格子法(2項、3項、4項および多項ツリー)、モンテカルロ・シミュレーション法などが使われている。中でも、よく用いられているのは、ブラック・ショールズモデルと2項モデルである。なお、リアルオプションの価値評価は、従来の NPV 分析より評価額が高い値となる。

一方、リアルオプションは、不確実な環境において有用な投資決定の評価手法であるが、いくつかの課題も残っている。例えば、①多数の不確実性の中で、オプションの価値評価は、ただ少ないパラメータに統合され、評価のモデルの妥当性が疑問視される。②不確実性が常に存在し、開発投資決定時と資金投入発生時でタイムラグが生じるため、収益性評価の最大化が実際にはとれない、などが挙げられる。

それにしても、リアルオプションは、不確実性やマネジメント手段の柔軟性を認識できる分析手法として有益であると評価されている。現在の段階では、リアルオプションによる価値評価法は、石油企業における共通認識の評価手法に至っていないが、油田開発の評価において使われ

てきつつあり、中でも、NPV法とリアルオプションを合計した修正案はいくつかの応用例がある[Zhang, 2002; Li, 2002; 金ら、2007; Ju *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2014; Cui *et al.*, 2018]。NPV法とリアルオプションを合計した修正案の式は、次のようである。

$$CNPV^+ = NPV + C = \left(\sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} - K \right) + (SN(D_1) - Ke^{-rT}N(D_2)) \quad (6)$$

上式では、 $CNPV^+$ がNPV法とリアルオプションを合計した修正案による評価値、NPVがNPV法による評価値、 C がリアルオプション(ブラック・ショールズモデル)による評価値、とする。また、全体の計算に必要なパラメータは、以下に示される。

$N(D_1)$ および $N(D_2)$: 標準正規分布の分布関数

$$D_1 = \frac{\ln(S/K) + (r + \sigma^2/2)T}{\sigma\sqrt{T}}$$

$$D_2 = \frac{\ln(S/K) + (r - \sigma^2/2)T}{\sigma\sqrt{T}}$$

S : 投資の現在価値(収入 - 操業費 - 課税額)

K : 投資の行使価格(初期の設備投資額など)

r : 利子率(国債など安全債券の利子率)

T : 投資の行使期間(行使価格で定められた期間)

σ : ボラティリティ (収益変動性)

C_t : 第 t 年度のキャッシュフロー

式(6)のNPV法による評価値とリアルオプションによる評価値を直接に加算する修正案では、プロジェクトの評価値が二重計上されることになっている。また、NPV法による評価値とリアルオプションによる評価値が両方プラスになる場合、経済性の評価値はさらに拡大し、過大評価になると考えられる。

そこで、本稿では先行研究を踏まえ、NPV法とリアルオプションの特徴を活用した改良分析法を提案する。改良分析法の式は、次のようになる。

$$CNPV = (1 - \alpha)NPV + \alpha C = (1 - \alpha) \left(\sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} - K \right) + \alpha(SN(D_1) - Ke^{-rT}N(D_2)) \quad (7)$$

上式では、 $CNPV$ が改良分析法による評価値、NPVがNPV法による評価値、 C がリアルオプション(ブラック・ショールズモデル)による評価値、 α が投資楽観度、とする。そのほかの計算に必要なパラメータは、式(6)と同様である。

提案した改良分析法は、2つの評価方法(NPV法とリアルオプション)を補完する統合的な役割を持ち、合理性を失わずに新たな価値解釈がある可能性を示している。以下の3つの意義・新規性がある。

(1) NPV 法による過小評価およびリアルオプションによる過大評価を回避したうえで、静的収益評価(NPV 法)・動的収益性評価(リアルオプション)の両方の役割を捉えることができる。

(2) 2つの評価方法の役割を捉えるためには、固定的な重み付けによる加重平均ではなく、変動的な投資楽観度を重み付けとして導入し、意思決定者の経験や勘を生かし、開発事業の過程における更なる柔軟性を反映している。

(3) 投資楽観度の加重平均を導入することにより、NPV 法とリアルオプションを合計した修正案と比べ、リアルオプションによる大きな値が全体の影響を受けにくく、上記修正案の過大評価(両方がプラスの場合)を避けることができる。

投資楽観度は人間の意思決定を数値で表すものであり、意思決定者の立場や開発環境によって解釈が変わる。良好な開発環境は、タイトオイルの生産が採算に見合うものとなり、その開発が進められるようになり、投資楽観度が高くなる。

投資楽観度の設定方法には、①意思決定者が開発環境に基づいて直接的に設定する直接評価法、②ほかの開発プロジェクトを比較して設定する間接評価法、が挙げられる。投資楽観度の数値は0~1の間で変動し、 $\alpha = 0.5$ の時に中立的な立場、 $\alpha \in [0, 0.5)$ の時に悲観的態度、 $\alpha \in (0.5, 1]$ の時に楽観的態度が示される。

一方、提案した改良分析法は、割引計算の際にリスクフリーレートを用いることができなければ、利子率の決定にも NPV 法およびリアルオプションと同様の問題点が残っている。また、油田の地質状況が極めて複雑化し、リスクに当たるボラティリティの推定が困難である。

3.2.3. 分析枠組と特徴

中国の開発政策がタイトオイル開発の収益性に対してどのような影響を及ぼすかについて分析するにあたっては、NPV 法とリアルオプションを組み込んだ不確実性対策モデルを用い、いくつかの政策案を設定し、多次元の判断基準に基づいて考察する。具体的には、後述のように「市場化案」、「政策案Ⅰ」、「政策案Ⅱ」、「政策案Ⅲ」、「政策案Ⅳ」および「政策案Ⅴ」という6つの政策案をとらえ、税制優遇措置や開発補助金などの優遇政策を提示する政策案がタイトオイル開発の収益性に有効であるという仮説を立て、2段階の分析を通じて検証する。第1段階では、提案した改良分析法を用いてタイトオイル開発の収益性を試算する。第2段階では、悲観的な基準、楽観的な基準、楽観度係数基準、最大後悔最小化基準、中間的な基準という5つの判断基準を通じて最適な代替案を選定し、タイトオイル開発の収益性に良い効果がある優遇政策を明らかにする。

本稿の特徴は、次の2点である。その1は、収益性評価を行うにあたり、NPV 法とリアルオプションを踏まえた改良分析法を提案し、ある想定条件の下で定量的に評価することである。その2は、NPV 法とリアルオプションを組み込んだ不確実性対策モデルを用い、いくつかの判断基準に基づいて政策案の中で最適な代替案を選定することである。先行研究をみる限り、タイトオイルを含む中国の非在来型資源開発に関する政策分析では、政策的な不確実性を考慮した収益性

に関する分析が行われていなかった。

4. 不確実性対策モデルの収益性評価

以下では、説明してきた不確実性対策モデルを用い、政策的な不確実性を考慮したタイトオイル開発の収益性評価を行う。収益性評価にあたって、まずいくつかの仮定を設定し、それに基づき各判断基準に最適な代替案を示す。

4.1. 収益性評価にあたっての仮定

4.1.1. 原油価格

原油価格は、3つの想定価格ケースを設定する。具体的には、2000年から2019年にかけて国際原油市場(WTI: West Texas Intermediate)における年間平均価格の平均値の62ドル/バレルを油価基準ケース、最安値の26ドル/バレルを低油価ケース、最高値の100ドル/バレルを高油価ケース、として設定する。

4.1.2. 政策案

政策案を立てるにあたって、まず、中国の石油開発にかかわる課税および開発補助金を整理・検討し、以下のようにまとめている。

(1) 鉱産資源税：中国では、資源開発に対する有償取得制度を実施しており、探鉱権税、資源補償税、鉱区使用税、資源税など鉱産資源税が設けられ、すべての企業は税金を納める義務がある。探鉱権税が100人民元/km²、資源補償税が1%、鉱区使用税が4~12.5%(年度総生産量100万トン以下が免除、100~150万トンが4%、150~200万トンが6%、200~300万トンが8%、300~400万トンが10%、400万トン以上が12.5%)、資源税が5~10%(基本的に5%をとる)と規定され、開発事情により減免されることができ。中国政府は2006年、炭層ガス開発企業に対し、探鉱権税および探鉱権税の減免、資源税の免除を提示した。こうしたことにより、中国政府はタイトオイル開発を促進するため、鉱産資源税の軽減策を提示する可能性が高いと考えられる。

(2) 石油特別収益金：石油開発企業に対し、国際原油価格が一定レベルを超える場合、石油の超過収入の一定割合を徴収する税金である。この税金は2006年から設定され、2014年の改正案(修正案)では最低限を65ドル/バレルから徴収することが規定されている。具体的には、①1バレルあたり65~70ドル(上限値を含む)が20%(控除額:0)、②70~75ドル(上限値を含む)が25%(控除額:0.25ドル/バレル)、③75~80ドル(上限値を含む)が30%(控除額:0.75ドル/バレル)、④80~85ドル(上限値を含む)が35%(控除額:1.5ドル/バレル)、⑤85ドル以上が40%(控除額:2.5ドル/バレル)、という5段階に分けている。徴収の計算式は、以下の通りである。

$$\text{石油特別収益金} = \{(\text{国際原油価格} - 65) \times \text{比率} - \text{控除額}\} \times \text{原油販売数量} \quad (8)$$

現在の段階では、中国のタイトオイル開発コストが 50 ドル/バレル以上であると試算され、タイトオイル開発の収益性が確保できず、タイトオイル開発を促進するために石油特別収益金を免除する可能性が高いと考えられる。

(3) 増値税(付加価値税)：物品の販売や生産、貨物の輸入に対する税金の一種であり、17%の税率が課される。中国政府は 1997 年および 2007 年、炭層ガス開発企業を対象に増値税の払い戻しを実施することを提示した。こうしたことを踏まえ、中国政府はタイトオイル開発を促進するため、増値税の軽減策を提示する可能性が高いと考えられる。

(4) 企業所得税：法人の所得金額に課される税金であり、25%の税率が課される。中国政府は 1996 年、炭層ガス開発の外資を誘致するため、外資会社および合弁会社に企業所得税の優遇政策(「二免三減半」)を提示している。国内の開発企業は、この優遇政策の適用対象外である。現在、中国におけるタイトオイル開発を行っている企業が主に中国企業であり、企業所得税の減免が実施されないと考えられる。ちなみに、「二免三減半」とは、利益が生じ始めた年度の 1 年目と 2 年目が全額免除、3 年目から 5 年目が半額免除の軽減税率の優遇措置が設けられることである。

(5) 開発補助金：ある事業に向けて取り組む事業者に対し、一定額を助成する制度である。中国政府は 2007 年以降、炭層ガス開発を促進するために補助金を用意し、その後も補助の金額と範囲を見直し、2012 年からシェールガス開発にも適用している。シェールガス開発企業に対する補助金については、2012 年から 2015 年の間に 1 m³ のシェールガスの採掘ごとに 0.4 元の助成基準に基づいて算定するとされ[中国国家能源局、2012]、当時の天然ガス卸価格の 15%に達し、その後に補助金額が減額された。このように、炭層ガスおよびシェールガス開発に対し、主に 3 年間の補助期間で補助金を実施しており、将来的にタイトオイル開発に対しては、指定された年から最大 3 年間の補助期間および最大で原油価格の 15%の補助金額を実施する可能性がある。

前にも述べたが、主要国のタイトオイル開発政策では主に 3 つがある。その 1 は、指定した年度に補助金を実施することである。その 2 は、開発の初年度において税金の 100%を免除することである。その 3 は、開発の初年度から税金を免除することである。

以上のことを踏まえ、中国政府のタイトオイル開発に対する政策案は、①税金の免除を実施するか否か、②補助金を実施するか否か、③補助金を実施する場合の実施時期、が挙げられる。現状では、中国政府はタイトオイル開発に対する税金の免除および補助金をまだ提示していないが、将来的に税金の免除および補助金を提示する可能性を否定できない。そこで、主要国の開発政策事例や、中国の炭層ガスおよびシェールガスに対する補助金を含む優遇的な開発政策を勘案し、以下のように 6 つの政策案を立てる。

1 点目は「市場化案」と称し、タイトオイル開発に補助金を助成せず、また税金を免除しないこととする。

2 点目は「政策案Ⅰ」と称し、開発期間において鉱産資源税、石油特別収益金および増値税を免除することとする。

3 点目は「政策案Ⅱ」と称し、開発の初年度において鉱産資源税、石油特別収益金および増値税

を免除することとする。

4点目は「政策案Ⅲ」と称し、開発補助金と「市場化案」を組み合わせた案であり、すなわち、タイトオイル開発の1年目から3年目まで1バレルあたり9.3ドル(平均値62ドル×15%)を補助し、開発期間において税金を納めることとする。この政策案は、開発補助金の実施期間の開始年(指定された年)がタイトオイル開発の1年目に重なった場合と想定される。

5点目は「政策案Ⅳ」と称し、開発補助金と「政策案Ⅱ」を組み合わせた案であり、すなわち、タイトオイル開発の2年目から4年目まで1バレルあたり9.3ドルを補助することに加え、開発の初年度において鉱産資源税、石油特別収益金および増値税を免除することとする。この政策案は開発補助金の実施期間の開始年(指定された年)がタイトオイル開発の2年目に重なった場合と想定される。

6点目は「政策案Ⅴ」と称し、開発補助金と「政策案Ⅰ」を組み合わせた案であり、すなわち、タイトオイル開発の3年目から5年目まで1バレルあたり9.3ドルを補助することに加え、開発期間において鉱産資源税、石油特別収益金および増値税を免除することとする。この政策案は、開発補助金の実施期間の開始年(指定された年)がタイトオイル開発の3年目に重なった場合と想定される。

4.1.3. 開発投資と開発収入

タイトオイルの開発投資は、主に掘削費やフラクチャリング費などの開発費であり、初期の投資額とも呼ばれる。そこで、金宝油田の開発費3,693.5万人民元を参照し[Liu *et al.*, 2014]、555万ドル(1ドルあたり6.65人民元)を仮定する。

投資の現在価値にかかわる項目は、開発収入と開発の操業費である。操業費は年度によって変化するものであるが、そこで金宝油田操業費の73.2ドル/トンを採用する。一方、開発収入にかかわる項目は、生産量と原油価格である。生産量は、タイトオイル貯留層の主な賦存特性を考案し、高産出量、中産出量および低産出量の3つに分ける。コアエリアⅠにおける単一坑井の初年度石油産出量が1日当たり20トン(高産出量)、コアエリアⅡにおける単一坑井の初年度石油産出量が1日当たり10トン(中度産出量)、有力エリアにおける単一坑井の初年度石油産出量が1日当たり5トン(低産出量)、を仮定する。タイトオイル生産減退率については、第2年目が50%、第3年目が38%、第4年目が30%、第5年目が20%、を仮定する。

4.1.4. その他のパラメータ

利率は、米国の国債を参照する。2020年1月6日現在、米国債5年の利率が1.75%、その利回りが1.57%である。それを参照し、1.70%の利率を仮定する。

開発の行使期間に関しては、5年間の段階オプションとする。5年以内に単一坑井のリフラクチャリングなど追加投資を行わないこととする。

収益リスクに当たるボラティリティは、タイトオイル開発プロジェクトのキャッシュフローか

ら試算が必要であり、そこで簡便のためにボラティリティを 50%と仮定する。

楽観度係数については、中国ではすでにタイトオイル開発の先導試験が行われており、一定の開発成果があり、楽観度係数である $\lambda=0.5$ とする。

投資楽観度は、開発プロジェクトの投資意思が示され、そこで投資者の中立的立場をとり、投資楽観度の $\alpha=0.5$ とする。

4.2. 評価結果

4.2.1. 投資の現在価値と収益性の試算

以上の仮定および式(7)に基づいて、タイトオイル開発に関する投資の現在価値と収益性を試算する。単一坑井の初年度石油産出量が1日当たり 20 トン(コアエリア I での産出量)、10 トン(コアエリア II での産出量)、5 トン(有力エリアでの産出量)とし、その投資の現在価値は Table 2 に示している。また、投資の現在価値による収益性の試算結果は、Table 3 に示している。試算にあたって、探鉱権税(100 人民元 / km²)は探鉱段階の税金であり、ここでは計上しないこととする。石油特別収益金については、高油価ケースにおいて「85 ドル以上」のランクが適用されている。

Table 2 Present value of investment

Unit: 10,000 USD

Oil price case	Classification	Core area 1	Core area 2	Favorable area
Reference oil price case (62 USD/bbl)	Market measure	601	300	150
	Measure 1	657	328	164
	Measure 2	624	312	156
	Measure 3	695	348	174
	Measure 4	684	342	171
	Measure 5	701	350	175
Low oil price case (26 USD/bbl)	Market measure	178	89	45
	Measure 1	202	101	50
	Measure 2	188	94	47
	Measure 3	273	136	68
	Measure 4	247	124	62
	Measure 5	246	123	61
High oil price case (100 USD/bbl)	Market measure	830	415	208
	Measure 1	1,094	547	273
	Measure 2	941	471	235
	Measure 3	925	462	231
	Measure 4	1,000	500	250
	Measure 5	1,138	569	285

Source: Prepared by the author

Table 3 Profitability of investment by improved analytical method

Unit: 10,000 USD

Oil price case	Classification	Core area 1	Core area 2	Favorable area
Reference oil price case (62 USD/bbl)	Market measure	153	-91	-196
	Measure 1	202	-70	-186
	Measure 2	174	-82	-192
	Measure 3	236	-55	-180
	Measure 4	226	-59	-182
	Measure 5	240	-53	-180
Low oil price case (26 USD/bbl)	Market measure	-177	-232	-256
	Measure 1	-162	-225	-253
	Measure 2	-171	-229	-254
	Measure 3	-111	-204	-243
	Measure 4	-130	-212	-247
	Measure 5	-132	-213	-247
High oil price case (100 USD/bbl)	Market measure	356	-2	-158
	Measure 1	598	107	-111
	Measure 2	458	44	-138
	Measure 3	442	37	-141
	Measure 4	517	68	-128
	Measure 5	638	126	-103

Source: Prepared by the author

4.2.2. 判断基準に基づいた代替案

油価ケースごとに5つの判断基準に基づいて最適な代替案を求める。まず、Table 3のデータによる6つの政策案における各開発エリアの収益性の試算結果をとり、次に、5つの判断基準により複数の代替案の中から適合する代替案を求める。

(1) 油価基準ケース

1) 悲観的な基準

油価基準ケースの悲観的な基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = \min\{153, -91, -196\} = -196$$

$$d_2 = \min\{202, -70, -186\} = -186$$

$$d_3 = \min\{174, -82, -192\} = -192$$

$$d_4 = \min\{236, -55, -180\} = -180$$

$$d_5 = \min\{226, -59, -182\} = -182$$

$$d_6 = \min\{240, -53, -180\} = -180$$

$\max\{-196, -186, -192, -180, -182, -180\} = -180$ であるため、 d_4 (「政策案Ⅲ」)と d_6 (「政策案Ⅴ」)は悲観的な基準における6つの政策案の中で最適な代替案である。

2) 楽観的な基準

油価基準ケースの楽観的な基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = \max\{153, -91, -196\} = 153$$

$$d_2 = \max\{202, -70, -186\} = 202$$

$$d_3 = \max\{174, -82, -192\} = 174$$

$$d_4 = \max\{236, -55, -180\} = 236$$

$$d_5 = \max\{226, -59, -182\} = 226$$

$$d_6 = \max\{240, -53, -180\} = 240$$

$\max\{153, 202, 174, 236, 226, 240\} = 240$ であるため、 d_6 (「政策案Ⅴ」)は楽観的な基準における6つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_4 (「政策案Ⅲ」)は2番目に良い案であると示されている。

3) 楽観度係数基準

油価基準ケースの楽観度係数基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = 0.5 \times 153 + 0.5 \times (-196) = -21$$

$$d_2 = 0.5 \times 202 + 0.5 \times (-186) = 8$$

$$d_3 = 0.5 \times 174 + 0.5 \times (-192) = -9$$

$$d_4 = 0.5 \times 236 + 0.5 \times (-180) = 28$$

$$d_5 = 0.5 \times 226 + 0.5 \times (-182) = 22$$

$$d_6 = 0.5 \times 240 + 0.5 \times (-180) = 30$$

$\max\{-21, 8, -9, 28, 22, 30\} = 30$ であるため、 d_6 (「政策案Ⅴ」)は楽観度係数基準における6つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_4 (「政策案Ⅲ」)は2番目に良い案であると示されている。

4) 最大後悔最小化基準

油価基準ケースの最大後悔最小化基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = \max\{240-153, -53-(-91), -180-(-196)\} = 87$$

$$d_2 = \max\{240-202, -53-(-70), -180-(-186)\} = 38$$

$$d_3 = \max\{240-174, -53-(-82), -180-(-192)\} = 66$$

$$d_4 = \max\{240-236, -53-(-55), -180-(-180)\} = 4$$

$$d_5 = \max\{240-226, -53-(-59), -180-(-182)\} = 14$$

$$d_6 = \max\{240-240, -53-(-53), -180-(-180)\} = 0$$

$\min\{87, 38, 66, 4, 14, 0\} = 0$ であるため、 d_6 (「政策案Ⅴ」)は最大後悔最小化基準における6つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_4 (「政策案Ⅲ」)は2番目に良い案であると示されている。

5) 中間的な基準

油価基準ケースの中間的な基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = (153-91-196) / 3 = -45$$

$$d_2 = (202-70-186) / 3 = -18$$

$$d_3 = (174-82-192) / 3 = -33$$

$$d_4 = (236-55-180) / 3 = 0$$

$$d_5 = (226 - 59 - 182) / 3 = -5$$

$$d_6 = (240 - 53 - 180) / 3 = 2$$

$\max\{-45, -18, -33, 0, -5, 2\} = 2$ であるため、 d_6 （「政策案Ⅴ」）は中間的な基準における 6 つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_4 （「政策案Ⅲ」）は 2 番目に良い案であると示されている。

(2) 低油価ケース

1) 悲観的な基準

低油価ケースの悲観的な基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = \min\{-177, -232, -256\} = -256$$

$$d_2 = \min\{-162, -225, -253\} = -253$$

$$d_3 = \min\{-171, -229, -254\} = -254$$

$$d_4 = \min\{-111, -204, -243\} = -243$$

$$d_5 = \min\{-130, -212, -247\} = -247$$

$$d_6 = \min\{-132, -213, -247\} = -247$$

$\max\{-256, -253, -254, -243, -247, -247\} = -243$ であるため、 d_4 （「政策案Ⅲ」）は悲観的な基準における 6 つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_5 （「政策案Ⅳ」）と d_6 （「政策案Ⅴ」）は 2 番目に良い案であると示されている。

2) 楽観的な基準

低油価ケースの楽観的な基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = \max\{-177, -232, -256\} = -177$$

$$d_2 = \max\{-162, -225, -253\} = -162$$

$$d_3 = \max\{-171, -229, -254\} = -171$$

$$d_4 = \max\{-111, -204, -243\} = -111$$

$$d_5 = \max\{-130, -212, -247\} = -130$$

$$d_6 = \max\{-132, -213, -247\} = -132$$

$\max\{-177, -162, -171, -111, -130, -132\} = -111$ であるため、 d_4 （「政策案Ⅲ」）は楽観的な基準における 6 つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_5 （「政策案Ⅳ」）は 2 番目に良い案であると示されている。

3) 楽観度係数基準

低油価ケースの楽観度係数基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = 0.5 \times (-177) + 0.5 \times (-256) = -216$$

$$d_2 = 0.5 \times (-162) + 0.5 \times (-253) = -207$$

$$d_3 = 0.5 \times (-171) + 0.5 \times (-254) = -213$$

$$d_4 = 0.5 \times (-111) + 0.5 \times (-243) = -177$$

$$d_5 = 0.5 \times (-130) + 0.5 \times (-247) = -188$$

$$d_6 = 0.5 \times (-132) + 0.5 \times (-247) = -189$$

$\max\{-216, -207, -213, -177, -188, -189\} = -177$ であるため、 d_4 (「政策案Ⅲ」)は楽観度係数基準における6つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_5 (「政策案Ⅳ」)は2番目に良い案であると示されている。

4) 最大後悔最小化基準

低油価ケースの最大後悔最小化基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = \max\{-111-(-177), -204-(-232), -243-(-256)\} = 66$$

$$d_2 = \max\{-111-(-162), -204-(-225), -243-(-253)\} = 51$$

$$d_3 = \max\{-111-(-171), -204-(-229), -243-(-254)\} = 60$$

$$d_4 = \max\{-111-(-111), -204-(-204), -243-(-243)\} = 0$$

$$d_5 = \max\{-111-(-130), -204-(-212), -243-(-247)\} = 19$$

$$d_6 = \max\{-111-(-132), -204-(-213), -243-(-247)\} = 21$$

$\min\{66, 51, 60, 0, 19, 21\} = 0$ であるため、 d_4 (「政策案Ⅲ」)は最大後悔最小化基準における6つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_5 (「政策案Ⅳ」)は2番目に良い案であると示されている。

5) 中間的な基準

低油価ケースの中間的な基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = (-177-232-256) / 3 = -222$$

$$d_2 = (-162-225-253) / 3 = -213$$

$$d_3 = (-171-229-254) / 3 = -218$$

$$d_4 = (-111-204-243) / 3 = -186$$

$$d_5 = (-130-212-247) / 3 = -196$$

$$d_6 = (-132-213-247) / 3 = -197$$

$\max\{-222, -213, -218, -186, -196, -197\} = -186$ であるため、 d_4 (「政策案Ⅲ」)は中間的な基準における6つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_5 (「政策案Ⅳ」)は2番目に良い案であると示されている。

(3) 高油価ケース

1) 悲観的な基準

高油価ケースの悲観的な基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = \min\{356, -2, -158\} = -158$$

$$d_2 = \min\{598, 107, -111\} = -111$$

$$d_3 = \min\{458, 44, -138\} = -138$$

$$d_4 = \min\{442, 37, -141\} = -141$$

$$d_5 = \min\{517, 68, -128\} = -128$$

$$d_6 = \min\{638, 126, -103\} = -103$$

$\max\{-158, -111, -138, -141, -128, -103\} = -103$ であるため、 d_6 (「政策案Ⅴ」)は悲観的な基準における6つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_2 (「政策案Ⅰ」)は2番目に良い案であると示

されている。

2) 楽観的な基準

高油価ケースの楽観的な基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = \max\{356, -2, -158\} = 356$$

$$d_2 = \max\{598, 107, -111\} = 598$$

$$d_3 = \max\{458, 44, -138\} = 458$$

$$d_4 = \max\{442, 37, -141\} = 442$$

$$d_5 = \max\{517, 68, -128\} = 517$$

$$d_6 = \max\{638, 126, -103\} = 638$$

$\max\{356, 598, 458, 442, 517, 638\} = 638$ であるため、 d_6 (「政策案 V」)は楽観的な基準における 6 つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_2 (「政策案 I」)は 2 番目に良い案であると示されている。

3) 楽観度係数基準

高油価ケースの楽観度係数基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = 0.5 \times 356 + 0.5 \times (-158) = 99$$

$$d_2 = 0.5 \times 598 + 0.5 \times (-111) = 243$$

$$d_3 = 0.5 \times 458 + 0.5 \times (-138) = 160$$

$$d_4 = 0.5 \times 442 + 0.5 \times (-141) = 151$$

$$d_5 = 0.5 \times 517 + 0.5 \times (-128) = 195$$

$$d_6 = 0.5 \times 638 + 0.5 \times (-103) = 267$$

$\max\{99, 243, 160, 151, 195, 267\} = 267$ であるため、 d_6 (「政策案 V」)は楽観度係数基準における 6 つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_2 (「政策案 I」)は 2 番目に良い案であると示されている。

4) 最大後悔最小化基準

高油価ケースの最大後悔最小化基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = \max\{638-356, 126-(-2), -103-(-158)\} = 282$$

$$d_2 = \max\{638-598, 126-107, -103-(-111)\} = 40$$

$$d_3 = \max\{638-458, 126-44, -103-(-138)\} = 180$$

$$d_4 = \max\{638-442, 126-37, -103-(-141)\} = 196$$

$$d_5 = \max\{638-517, 126-68, -103-(-128)\} = 121$$

$$d_6 = \max\{638-638, 126-126, -103-(-103)\} = 0$$

$\min\{282, 40, 180, 196, 121, 0\} = 0$ であるため、 d_6 (「政策案 V」)は最大後悔最小化基準における 6 つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_2 (「政策案 I」)は 2 番目に良い案であると示されている。

5) 中間的な基準

高油価ケースの中間的な基準に基づいた各政策案の収益値は、次のようである。

$$d_1 = (356 - 2 - 158) / 3 = 66$$

$$d_2 = (598 + 107 - 111) / 3 = 198$$

$$d_3 = (458 + 44 - 138) / 3 = 121$$

$$d_4 = (442 + 37 - 141) / 3 = 113$$

$$d_5 = (517 + 68 - 128) / 3 = 153$$

$$d_6 = (638 + 126 - 103) / 3 = 220$$

$\max\{66, 198, 121, 113, 158, 220\} = 220$ であるため、 d_6 （「政策案V」）は中間的な基準における6つの政策案の中で最適な代替案である。また、 d_2 （「政策案I」）は2番目に良い案であると示されている。

4.3. 評価結果についての考察

(1) 収益性の試算結果によれば、タイトオイル開発の収益性は、優遇的な開発政策の実施により向上させられることが検証されたものの、促進される開発効果が地質的賦存状況に限定される。コアエリアI（20トン/日）では、タイトオイルの生産性がよく、一定の原油価格（油価基準ケースおよび高油価ケース）において税制優遇措置および開発補助金を実施しなくても収益性を持っている。コアエリアII（10トン/日）については、高い原油価格において税制優遇措置および開発補助金を実施することにより開発の採算性が高くなり、タイトオイルの開発が促進されたと考えられる。一方、有力エリア（5トン/日）では、タイトオイルの生産性がよくないため、開発の採算性が取れるようになるためには、さらなる良好な外的環境（優遇的な開発政策および原油価格）や開発技術の向上による開発費の削減が必要であると推察される。

(2) 不確実性対策モデルを用いた分析結果によれば、優遇的な開発政策によりもたらされる促進効果は、油価ケースによって異なる。5つの判断基準に基づいて適合する代替案を導き出した結果について、油価基準ケースでは「政策案V」、低油価ケースでは「政策案III」、高油価ケースでは「政策案V」、であることが示されている。

(3) 各油価ケースにおいて1番目と2番目の良い案を考察することにより、次の知見を得た。油価基準ケースでは、開発補助金は高い促進効果が示され、さらに開発期間において鉱産資源税、石油特別収益金および増徴税を免除することで、タイトオイルの開発が促進される。低油価ケースでは、開発補助金は高い促進効果が示され、さらに開発の初年度において鉱産資源税、石油特別収益金および増徴税を免除することで、タイトオイルの開発が促進される。高油価ケースでは、開発期間において鉱産資源税、石油特別収益金および増徴税を免除することで高い促進効果が示され、さらに開発補助金を提示すれば、タイトオイルの開発が促進される。この違いは、税制優遇措置および開発補助金による開発企業の収益性が異なると考えられる。

(4) タイトオイルの開発が拡大していくと、中国のエネルギー産業には大きな変化をもたらす

可能性があると考えられる。ただし、先進技術の導入や採算性を維持するため、優遇的な開発政策の導入が必要となり、タイトオイル開発政策は非在来型天然ガスのように良い影響を与えることが期待される。また、近年における中国の石炭利用抑制や天然ガスを含むクリーンエネルギーへの転換が進む中で、国際エネルギー情勢やほかのエネルギー補助を踏まえ、今後では、タイトオイルの優遇的な開発政策はどのように位置づけられるかが注目される。

(5) タイトオイル開発の収益性評価は、多数の要因に影響される。中でも、投資楽観度は開発プロジェクトの投資意思が示される。例えば、開発環境(地質的・技術的・外的)が開発プロジェクトに有利になると示され、意思決定者が楽観的態度を持てば、改良分析法による評価値はリアルオプションの評価値に傾く。本稿では、開発環境における条件とそれに適する投資楽観度の検討や議論は行わず、今後の課題とする。

5. おわりに

本稿では、NPV法とリアルオプションを組み込んだ不確実性対策モデルを用い、政策案(「市場化案」、「政策案Ⅰ」、「政策案Ⅱ」、「政策案Ⅲ」、「政策案Ⅳ」、「政策案Ⅴ」)がタイトオイル開発に対してどのような影響を及ぼすかについて分析した。その結果は以下のようにまとめることができる。

タイトオイル開発の収益性は優遇的な開発政策の実施により向上させられ、促進される開発効果は地質的賦存状況によって異なる。また、優遇的な開発政策によりもたらされる促進効果は、原油価格が上昇するにつれて変化する。原油価格が一定の値(油価基準ケース)以下になった時期においては開発補助金、原油価格の高値時期においては税制優遇措置、を実施することでタイトオイル開発の収益性を高める示唆が得られている。さらに、開発補助金と税制優遇措置を組み合わせることで、もっと良い促進効果もたらされる。今後は、中国のタイトオイル開発政策が国内外のエネルギー情勢を踏まえ、どのように位置づけられるかが注目される。

引用文献

- Bi, H., Duan, X., Zheng, J. *et al.*
2018 Production dynamic characteristics and recoverable reserve estimation method of tight oil. *ACTA PETROLEI SINICA*, **39**(2), 172-179.
- Chen, L., Song, Z., Jiang, Q. *et al.*
2009 Potentials and proposed strategies of the development of China's unconventional oil and gas resources. *Modern Chemical Industry*, **29**(10), 9-13.
- Cui, C., Li, R., Bing, S. *et al.*
2018 Application of real option method on economic evaluation of carbonate reservoirs on rolling development, *CHINA MINING MAGAZINE*, **27**(3), 50-53.

- Ding, H. and Dai, R.
2013 A Study on China's Fiscal Policies for Unconventional Hydrocarbon Industry. *SINO-GLOBAL ENERGY*, **18**(5), 33-36.
- Ding, H. and Zhang, S.
2014 Research on Preferential Policies on Finance and Taxation of Unconventional Hydrocarbon Industry. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences)*, **30**(1), 6-9.
- EIA
2013 Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States, https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/archive/2013/pdf/fullreport_2013.pdf (Last access: 2017.6.20)
- Fan, J., Yang, Z., Li, *et al.*
2015 Assessment of fracturing treatment of horizontal wells using SRV technique for Chang-7 tight oil reservoir in Ordos Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, **39**(4), 103-110.
- Harvard Kennedy School
2013 The Shale Oil Boom: AU.S. Phenomenon, <https://www.belfercenter.org/sites/default/files/legacy/files/draft-2.pdf#search=%27Leonardo+Maugeri%2C+%E2%80%9CThe+Shale+Oil+Boom%3A+A+U.S.+Phenomenon%27> (Last access: 2018/1/31)
- Hu, S., Zhu, R., Wu, S. *et al.*
2018 Profitable exploration and development of continental tight oil in China. *PETROLEUM EXPLORATION AND DEVELOPMENT*, **45**(4), 737-748.
- Jia, C., Zheng, M. and Zhang, Y.
2012 Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development. *PETROLEUM EXPLORATION AND DEVELOPMENT*, **39**(2), 129-136.
- Ju, Y. and Sun, M.
2011 Study on real options project evaluation method of oil extraction. *CHINA MINING MAGAZINE*, **20**(6), 21-14.
- 金 玉仙, Jin Yuxia, 柴川林也ほか
2007 石油資源開発とリアルオプションの適用—ベトナム事業を中心に—。アジア経営研究、13、109-118。
- Li, D., Liu, Z., Zhang, G. *et al.*
2017 Comparison and revelation of tight oil accumulation conditions, distribution characteristics and development status between China and U. S. *NATURAL GAS GEOSCIENCE*, **28**(7), 1126-1138.
- Li, Q., Lei, X., Luo, S. *et al.*
2014 Uncertain Decision-making Analysis Methods and its Relevant Application. *Journal of Tongren University*, **16**(4), 176-180.
- Li, T.
2002 Estimate method of real option of natural resources development project. *JOURNAL OF CHENGDU UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGY*, **17**(4), 285-288.
- Liao, X., Guo, J. and Li, W.
2013 Make greater efforts to develop tight oil and shale oil enhance the security of national energy. *CHINA MINING MAGAZINE*, **22**(7), 8-9.
- Liu, B., Yi, W. and Liu, J.
2014 Economic evaluation of tight-oil development. *INTERNATIONAL PETROLEUM ECONOMICS*, **12**, 65-70.
- Liu, X., An, F., Chen, Q. *et al.*
2016 ANALYSES OF THE EOR TECHNIQUES FOR TIGHT OIL RESERVOIRS: TAKING BAKKEN-FORMATION AS AN EXAMPLE. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, **35**(6), 164-169.
- 柳 小正
2017 中国における非在来型天然ガス開発に関する政策とその影響。熊本大学政策研究、8、89-110。
- Liu, X., Zhang, Y., Zhang, W. *et al.*
2013 CONCEPT, CHARACTERISTICS, DISTRIBUTION AND POTENTIAL PREDICTION OF THE TIGHT OIL IN THE WORLD. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, **32**(4), 168-174.

- Ma, X. and Cai, J.
2014 Research on the Investment Decision of Oil and Gas Exploration Project Based on the Real Options Law. *Journal of Xi'an University of Petroleum (Social Science Edition)*, **23**(3), 7-10.
- Ning, F.
2015 The main control factors of shale oil enrichment in Jiyang depression. *ACTA PETROLEI SINICA*, **36**(8), 905-914.
- Ning, Y., Zhong, M., Wei, Y. *et al.*
2017a Evaluation of the tight oil resources economic benefit under the low oil price. *CHINA MINING MAGAZINE*, **26**(2), 51-57.
- Ning, Y., Zhong, M., Wei, Y. *et al.*
2017b Research on the tight oil resources development present situation and countermeasures against low oil price. *CHINA MINING MAGAZINE*, **26**(4), 35-40.
- Rystad Energy
2016 AVERAGE SHALE WELLHEAD BREAKEVEN PRICES ARE BELOW 40 USD/BBL, <https://www.rystadenergy.com/newsevents/news/press-releases/shale-well-breakeven> (Last access: 2018/12/2)
- Song, G., Xu, X., Li, Z. *et al.*
2015 Factors controlling oil production from Paleogene shale in Jiyang depression. *OIL & GAS GEOLOGY*, **36**(3), 463-471.
- Sun, Z., Tian, Q., Wu, X. *et al.*
2015 Advancements in global tight oil exploration and exploration and the implications for China. *CHINA MINING MAGAZINE*, **24**(9), 7-12.
- Sun, P.
2013 A Study on Development Mode of U.S. Shale Oil and Gas Industry. *SINO-GLOBAL ENERGY*, **4**, 19-23.
- ジョンナサン・マン
2003 実践リアルオプションのすべて——戦略的投資価値を分析する技術とツール。19-42、ダイヤモンド社。
石油公団企画調査部
2002 流事業評価の新技术：リアルオプション——どこまで有効か。石油・天然ガスレビュー、**35**(3)、1-18。
中国国家能源局
2012 『関与出資頁岩気開発利用補貼政策的通知』。 http://www.nea.gov.cn/2012-11/06/c_131953346.htm (accessed 2018/11/16)。
中国国家発展改革委員会・国家能源局
2016 『関与印発能源發展「十三五」計画の通知』。 http://www.nea.gov.cn/2017-01/17/c_135989417.htm (accessed 2019/12/30)。
- Wang, T., He, W., Yuan, Y. *et al.*
2017 Latest Development in US Cost-effective Development of Shale Oil under Background of Low Oil Prices. *Oil Forum*, **2**, 60-68.
- Wang, W.
2016 Forecast of Initial Horizontal Well Productivity in Tight Reservoirs by Volumetric Fracturing Process. *XINJIANG PETROLEUM GEOLOGY*, **37**(5), 575-579.
- Wei, Y., Ran, Q., Tong, M. *et al.*
2016 A Full Cycle Productivity Prediction Model of Fractured Horizontal Well in Tight Oil Reservoirs. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, **38**(1), 99-106.
- Wei, Y., Xu, T., Zhong, M. *et al.*
2018 Dynamic characteristics under different matrix-fracture coupling modes in tight oil reservoirs. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, **25**(2), 83-89.
- Wu, C., Guo, Z., Tang, F. *et al.*
2014 Early Exploitation Characteristics of Lucaogou Tight Oil of Permian in Jimusaer Sag, Junggar Basin. *XINJIANG PETROLEUM GEOLOGY*, **35**(5), 570-573.
- Wu, L., Guo, X., Luo, W. *et al.*
2018 Influence Factors Controlling the Productivity of Horizontal Well by Volume Fracturing in Tight Oil Reservoirs—A Case Study of Dense Oil Horizontal Well in Damintun, Liaohe Oilfield, *UNCONVENTIONAL OIL & GAS*, **5**(3), 56-62.

- Wu, Y., Wei, W. and Cai, W.
2015 A Research on the Development Strategy of Unconventional Oil and Gas Resources in China. *CHINA POPULATION, RESOURCES AND ENVIRONMENT*, 25(11), 292-295.
- Xu, L., Yan, Y., Cao, R. *et al.*
2016 A study on division development and productivity-influencing factors for tight oil developed by pseudo-natural energy. *Petrochemical Industry Technology*, 1, 114-116.
- Yang, H., Li, S. and Liu, X.
2013 Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin. *ACTA PETROLEI SINICA*, 34(1), 1-11.
- Zeng, X., Liu, C., Xiao, H. *et al.*
2015 Optimized Design of Horizontal Well and Its Application in Tight Reservoirs in Tiaohu Formation of Santanghu Oilfield. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 12(29), 47-51.
- Zhang, J., Bi, H., Xu, H. *et al.*
2015 New progress and reference significance of overseas tight oil exploration and development. *ACTA PETROLEI SINICA*, 36(2), 127-137.
- Zhang, J., Lin, L., Li, Y. *et al.*
2012 Classification and evaluation of shale oil. *Earth Science Frontiers*, 19(5), 322-331.
- Zhang, Q.
2002 Application of Real Option in Oil Exploration. *Journal of Xi'an Petroleum Institute (Social Science)*, 11(3), 11-14.
- Zhao, Z., Tang, M., Du, X. *et al.*
2017 Factors affecting rate transient of fractured horizontal well in tight oil reservoir: Erdos Basin Changqing tight oil. *JOURNAL OF SHENZHEN UNIVERSITY SCIENCE AND ENGINEERING*, 34(6), 647-654.
- Zhu, F. and Qiu, W.
2002 Methods of decision-making and uncertainty for enterprise portfolio management. *Journal of Southeast University (Philosophy and Social Science)*, 4, 40-43.
- Zhu, X., Pan, R., Zhu, S. *et al.*
2018 Research progress and core issues in tight reservoir exploration. *Earth Science Frontiers*, 25(2), 141-146.