

最新の坑井掘削技術（その8）

東京大学 大学院工学系研究科
地球システム工学専攻 助教
長 縄 成 実

坑井の掘削費は石油開発費のなかでも大きな割合を占めるというが、ではいったいいくらぐらいなのか？と学生から質問されることが時々あります。私が学生だった頃には、大雑把に言えば陸上掘削で10億円ぐらい、海洋掘削で30億円ぐらいと習った記憶があります（かなりあやふやな記憶ですが...）。ところが、ここには坑井の深度などのコストに影響するであろう因子に関する情報は一切入っておらず、これではあまりに大雑把過ぎる気がします。今回は坑井掘削費に関わるお話をします。

1. 坑井掘削費のデータ

坑井掘削費に関するデータは、個々の企業あるいは業界のなかでは共有されて詳細な分析がなされ、作業効率の改善や新たな坑井掘削計画に役立てられているはずですが、誰もが自由に見られるようにまとまった形で公表されることは非常に少ないようです。アメリカでは、1954年から American Petroleum Institute (API), Independent Petroleum Institute および Mid-Continent Oil and Gas Association という3つの団体が共同でアメリカ国内の坑井掘削費に関する調査を毎年行っています。これは、Joint Association Survey on Drilling Costs (JAS) と呼ばれ、APIのウェブサイトから有償で閲覧・利用することができるようになっています。しかし、企業ベースでの利用ならともかく、一般の人が個人的に気軽に利用するにはちょっと利用料が高いようです。ここでは、文献に解説されたり紹介されているデータをもとにJASがどのようなものか見てみたいと思います。

JASの調査方法は、毎年オペレータ各社に質

問表を送付し、その年内に仕上げられた坑井ごとのコストデータを提供してもらうというものです。回答率はおおむね40～50%で、全坑井数および掘削長の40～60%をカバーしているそうです¹⁾。未回答分の坑井については回帰分析モデルを構築して掘削費の推定を行い、データを補っています。データは州あるいは地域ごとに分けられ、掘削深度ごとの掘削費のデータが

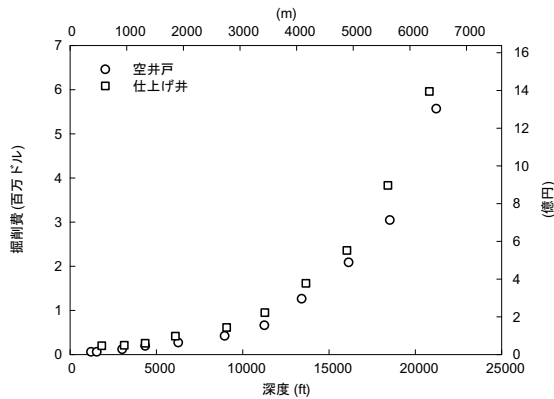
- 陸上掘削 / 海洋掘削
- 探鉱井 / 開発井
- 油井 / ガス井 / 空井戸
- 垂直井 / 傾斜井
- 単層仕上げ / 多層仕上げ

といった情報とともに集計されています。

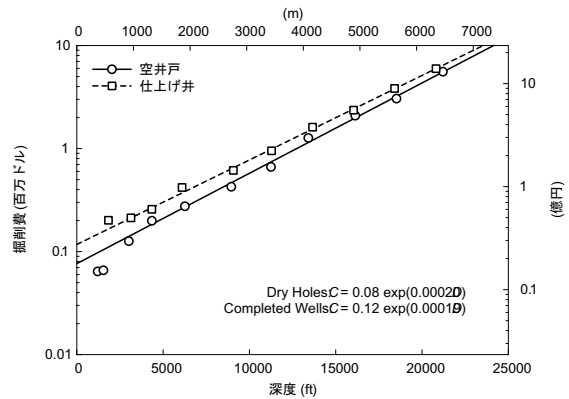
具体的な例として、まず坑井掘削技術の教科書といえるSPEの「Applied Drilling Engineering」に掲載されているJASデータを表1に引用します²⁾。表中の「空井戸 (dry hole)」とは、計画通り掘削作業を終えたものの、石油もガスも産出しなかったり、あるいは産出が確認されても経済的に生産可能な量に満たなかった坑井をいいます。「仕上げ井」は、仕上げを終え

表1 1978 Joint Association Survey on Drilling Costs による南ルイジアナ地域における平均掘削費²⁾

深度区間 (ft)	空井戸				仕上げ井		
	坑井数	平均深度 (ft)	掘削費/坑 (\$)	坑井数	平均深度 (ft)	掘削費/坑 (\$)	
0 ~ 1,249	1	1,213	64,289	0	-	-	
1,250 ~ 2,499	1	1,542	65,921	9	1,832	201,416	
2,500 ~ 3,749	8	3,015	126,294	20	3,138	212,374	
3,750 ~ 4,999	11	4,348	199,397	20	4,347	257,341	
5,000 ~ 7,499	43	6,268	276,087	47	6,097	419,097	
7,500 ~ 9,999	147	8,954	426,336	117	9,070	614,510	
10,000 ~ 12,499	228	11,255	664,817	165	11,280	950,971	
12,500 ~ 14,999	125	13,414	1,269,210	110	13,659	1,614,422	
15,000 ~ 17,499	54	16,133	2,091,662	49	16,036	2,359,144	
17,500 ~ 19,999	21	18,521	3,052,213	17	18,411	3,832,504	
20,000 ~	7	21,207	5,571,320	11	20,810	5,961,053	



(a) 掘削費と坑井深度との関係



(b) 片対数グラフにプロットして指数関数を当てはめた結果

図1 1978 Joint Association Survey on Drilling Costs による南ルイジアナ地域における平均掘削費と深度との関係のプロット (右縦軸は1ドル = 234円として換算)

て油・ガスの生産に及んだ坑井です。空井戸の場合のコストには、ケーシングパイプの抜管作業やセメントプラグの設置などの廃坑に掛かる費用も含まれます。仕上げ井では、通常、プロダクションケーシングの設置、穿孔作業、パッカーや坑内安全装置、サンドスクリーンの設置などの仕上げ作業およびクリスマスツリーの設置までの費用が含まれます。残念ながらここに示したデータはオリジナルのデータではないので、この仕上げ井は油井なのかガス井なのかの区別は不明です。

データは深度区間ごとに平均深度と一坑井あたりの掘削費を算出した表としてまとめられているので、これをグラフにプロットすると図1のようになります。図の(a)では、掘削深度の増加に対して掘削費が指数関数的に増加する傾向にあることが読み取れます。実際、図の(b)に示すように、指数関数

$$C = a \exp(bD) \quad (1)$$

を用いると非常にうまく近似できます。ここで、 C は掘削費、 D は坑井深度、 a と b はフィッティングパラメータです。教科書に載っている例であるためか、あまりにきれいに当てはまりすぎている感がありますが、一つの解析例としてみてください。他の地域や他の年のデータでは必ずしもこのようにきれいに指数関数で近似できるとは限りません。深度区間ごとに平均をとつ

表2 1999 Joint Association Survey on Drilling Costs による掘削費データ³⁾

油井 (仕上げ井)	平均深度 (ft)	掘削費/坑 (\$))
Louisiana	9,742	3,830,000
North Louisiana	4,338	327,000
South Louisiana	11,807	2,428,000
Offshore LA (state waters)	8,153	4,066,000
Federal OCS	10,214	5,254,000
Deepwater Gulf	14,818	9,128,000
United States	5,033	698,774
空井戸	平均深度 (ft)	掘削費/坑 (\$))
Louisiana	8,824	2,772,000
North Louisiana	4,626	231,000
South Louisiana	10,380	1,764,000
Offshore LA (state waters)	10,008	4,873,000
Federal OCS	10,858	5,776,000
Deepwater Gulf	14,202	14,252,000
United States	6,130	1,068,985

た坑井数が異なる点にも注意が必要です。

もう一つ違った形のデータの例としてルイジアナ州のJASデータが一部公開されていますので、それを表2に示します³⁾。今度は、深度ごとではなく地域ごとに掘削費を求めたものです。引用元には詳しい説明がないのですが、1行目の「Louisiana」というのがルイジアナ州全体のデータ、それに続いてルイジアナ北部陸域、南部陸域、さらに海域ごとのデータがあり、最後に米国全体のデータということのようです。表中の「Federal OCS (Outer Continental Shelf)」

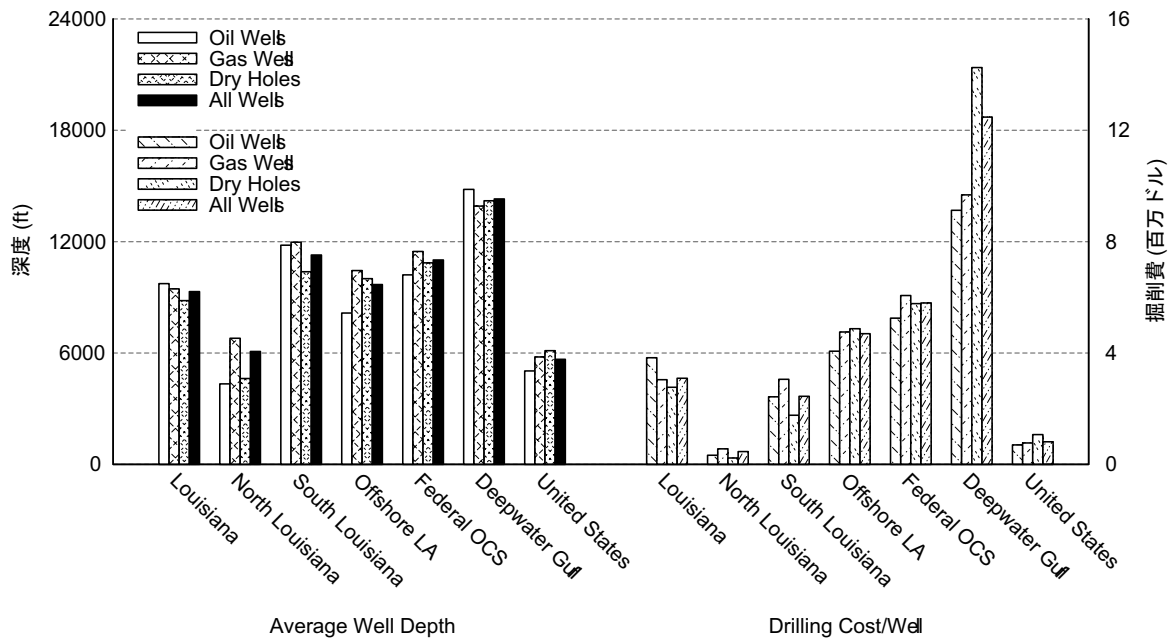


図2 1999 Joint Association Survey on Drilling Costs による掘削費データのプロット

は、領海外大陸棚、連邦管轄大陸棚あるいは大陸棚外縁部などといろいろな呼ばれかたがされていますが、米国の大陸棚のうち、各州の領海の外側の合衆国連邦の管轄になっている部分を指します。州の領海との境界は、フロリダ州のメキシコ湾岸とテキサス州では海岸線から約9海里、その他の州では約3海里と決められています。実際の境界の定義文書に用いられている距離の単位は英海里(=1853.248 m)やマイルなどが混在しているようですが、ここでは国際単位(暫定SI併用単位)として定義されている1海里(=1852 m)に統一して「約～海里」という表現をしました。「Offshore LA (state waters)」と表記されているのはルイジアナ州の領海域で、「Deepwater Gulf」は大陸棚より外側の大水深海域の坑井ということになります。

元の文献にあるガス井および全坑井のデータも併せて表2のデータをグラフにプロットすると図2のようになります。坑井深度と掘削費との間に相関があるのが分かります。陸上と海洋で分けて見ると、対深度比で海洋では陸域の2倍程度のコストがかかっているのが読み取れ、とくに大水深域での空井戸の掘削費が突出しています。これらの空井戸には不成功に終

わった探鉱井が多く含まれていたのではないかと想像できます。また、陸域での掘削コストは米国全体に比べても小さいですが、海域での高コストのためにルイジアナ州全体では米国全体を大きく上回っています。

さて、日本国内での坑井掘削費はどうかというと、やはり容易に手に入るまとまったデータや資料はなかなか無いようです。また、アメリカに比べると年間に掘削される坑井数は格段に少ないので、先のJASのデータのように統計的に分析することは難しいだろうと考えられます。とはいえ、坑井深度に対して図1に示したような指数関数的な掘削費の増加の傾向は国内での実績値にも見られるようで、陸上で深度1,000 mクラスの坑井を掘削するのに2億円、5,000 mクラスの坑井を掘削するのにおよそ30億円の掘削費がかかるとの報告もなされています⁴⁾。日本国内は地質条件が非常に厳しい地域が多く、アメリカの例に比べると掘削費が大きくなる傾向にあります。

2. 掘削パフォーマンスの評価

JASによる掘削コストデータは、米国のこれまでの実績の傾向を統計的に掴むのには非常に

優れたデータであるといえます。先に述べたように回帰分析モデルを用いれば、掘削費を予測・推定することもできます。しかし、JAS で用いられる回帰分析モデルは、掘削費に影響する多くの因子のうちの限られたものしか変数として持っていないので、ある特定の坑井について掘削コストを予測するようなことには適していません。個々のケースについてより正確な掘削費の推定を行うためには、坑井の特徴や掘削パフォーマンスの評価を詳細に行う必要があります。つぎに、このような評価を行うために用いられる指標をいくつか紹介します。

まず Mechanical Risk Index (MRI) というリスク指標を取り上げます¹⁾。MRI は 1980 年代末に Conoco 社のエンジニアがメキシコ湾でのオフセット坑井データの収集と解析を行うために開発しました。MRI は 6 つの変数で記述された 4 つの構成因子 (component factors) ϕ_i の総和 ϕ と、14 のキーとなる重要掘削因子 (key drilling factors) ψ_i の総和 ψ によって

$$\text{MRI} = \left(1 + \frac{\psi}{10}\right) \phi \quad (2)$$

と定義されます。構成因子はそれぞれ、(1) 掘削深度 TD、(2) 垂直深度 VD、(3) 水平偏距 HD、(4) 水深 WD、(5) ケーシング段数 NS、(6) 泥水比重 MW の 6 つの変数の組み合わせで記述されます。重要掘削因子は、例えば、水平掘削区間が存在すれば $\psi_1 = 3$ 、無ければ $\psi_1 = 0$ 、また J 字型の傾斜区間が存在すれば $\psi_2 = 3$ 、無ければ $\psi_2 = 0$ といったふうに全部で 14 の追加坑井条件について、0 または 1 から 3 までに重み付けした値が与えられます。この MRI 値は坑井の特徴や難易度を現す指標となり、さらにこれを掘削費と相関付けた解析を行うことができます。

傾斜坑井や大偏距坑井の掘削の難易度をより適切に評価するために、Directional Difficulty Index (DDI) と Difficulty Index (DI) という指標も提案されています⁵⁾。DDI はシュルンベルジェ社のエンジニアによるもので、垂直投影面上の偏距ではなく坑井に沿って計算した偏距 AHD (along hole displacement) と、坑跡の曲

率の積算として得られる屈曲度 TORT の 2 つの変数を考慮して傾斜坑井の掘削難易度を表現したものです。また、DI は大偏距掘削の各種サービスを行っている K&M Technology 社が導入したもので、坑跡 (深度、偏距、ドグレグなど)、泥水・温度・圧力 (泥水比重、坑底温度、地層破壊圧勾配)、ケーシング計画のほか坑井種類やリグのタイプ、クルーの習熟度など非常に多面的なパラメータを考慮して坑井の難易度を数値化しています。

以上のような MRI や DDI、DI といった指標による詳細な難易度評価を前項の JAS データに基づく回帰分析に取り入れて、より一般化した掘削費推定モデルの構築もなされています。文献 6 および 7 には、純粋に掘削作業に要する時間 DHD (dry-hole days)、検層などの付随する作業も含めた掘削作業に要する費用 DHC (dry-hole cost)、そして仕上げや坑井テストなども全て含んだトータルの坑井費用 TWC (total well cost) の 3 つの推定モデルが提案されています。それぞれのモデルは MRI における各因子に類似した 6 つの変数の線形結合形の関数で表され、実際のコストデータを用いた回帰分析によって係数を決定して相関モデル式を求めています。

3. 単位掘削費によるビットパフォーマンス評価

前項までは、一坑井あたりのトータルの掘削費についての話でしたが、ビット 1 丁ごとのパフォーマンスを評価することも重要です。この評価指標には単位掘削費 (cost per foot) が用いられ、ビットごとに求められる単位掘削費 C_f (単位 ¥/m、欧米では \$/ft) は

$$C_f = \frac{C_b + C_r(T_b + T_t)}{\Delta D} \quad (3)$$

で定義されます²⁾。ここで、 C_b はビット 1 丁の費用 (単位 ¥)、 C_r は単位時間当たりのリグ費用 (単位 ¥/h)、 T_b は実際にビットを回転していた時間 (rotating time, 単位 h)、 T_t は掘管を追加するためやビットを交換するための揚降管のために掘削を中断していた時間 (trip time, 単位 h)、そして ΔD はこのビットで掘削した掘削長 (単位 m) です。ビットごとに単位掘削費を

求めていけば、ビット間でのパフォーマンスの比較あるいは掘削深度や地層に対するビットパフォーマンスの評価ができ、適切なビットの選択に役立ちます。

また、単位掘削費の式を

$$\Delta D = \frac{C_r}{C_f} \left[T_b + \left(T_t + \frac{C_b}{C_r} \right) \right] \quad (4)$$

のように掘削長 ΔD について整理すると、ビット回転時間 T_b を変数とした関数とみなしてグラフにプロットすることができます。ここで、ビットが摩耗して掘進率が低下してくると単位掘削長あたりの掘削費 C_f が徐々に大きくなるため、曲線の傾きに相当する係数 C_r/C_f は定数にはならず、だんだん値が小さくなっていきます。つまり、掘削を進めるに従って累計掘進長の伸びが鈍ってくる挙動を示します。この挙動をもとにビットの交換時期の判断を行ったり掘削条件の最適化を図ることが可能です。

さらに、単位掘削費を用いると、ブレイクイーブンカーブ (break even curve, 損益曲線) によるビットパフォーマンスの評価ができます⁸⁾。まず単位掘削費の式 (3) によって、それまでの実績データから単位掘削費を求めます。この実績単位掘削費の値を式 (4) に代入すると掘進長をビット回転時間の関数として表すことができます。一方ビットの掘進率 R_p (単位 m/h) は

$$R_p = \Delta D / T_b \quad (5)$$

で求められます。これら両式から T_b を消去すれば、掘進率と掘進長の関係が図 3 のように求められます。こうして作成したブレイクイーブンカーブ上に掘削中のビットの掘進データをプロットしていき、掘進長の増加に従ってデータ

点がこのカーブの右上の領域に入るようであれば、それまでの実績よりも低コストで掘削できていると評価できます。

4. Technical Limit による掘削作業の最適化

掘削作業においては、作業時間の短縮を図ることが掘削費の削減に直接結びつきます。そして作業の効率化には掘削作業時間の分析が役に立ちます。一般的な時間分析では、掘削作業は次のような 8 つのカテゴリーに分類されます。

- (1) 敷地造成
- (2) リグアップ
- (3) 掘削
- (4) 揚降管作業
- (5) 地層評価・坑井調査
- (6) ケーシング設置
- (7) 坑井仕上げ
- (8) 掘削障害

この分類に基づく時間分析の例を表 3 に示します。この例ですと、実際にビットを回転して岩

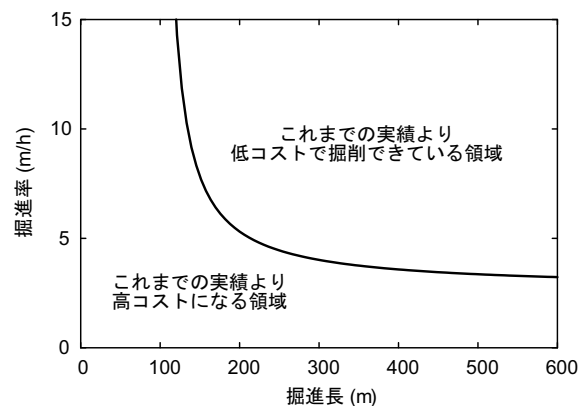


図 3 実績の単位掘削費に基づくブレイクイーブンカーブ

表 3 テンダー付きプラットフォームによるルイジアナ沖の深度 1,000 ft の坑井掘削の場合の時間分析例²⁾

掘削作業内容	作業に要した時間		掘削障害時間内訳 (h)	
	(h)	(%)		
掘削	351	17	調泥	143
揚降管	388	19	ウェルコントロール作業	12
リグアップ	348	17	採揚作業	152
地層評価・坑井調査	103	5	悪天候	97
ケーシング設置	199	10	リグ修理	20
坑井仕上げ	211	10	ロジスティクス	26
掘削障害	450	22	合計	450
合計	2050	100		

石を掘削している時間は20%にも満たないことが分かります。そして全体の20%以上が掘削障害の対処に使われています。時間分析を作業の効率化のツールとして用いるには、さらにこれらの作業時間を生産時間 (productive time, PT) と非生産時間 (non-productive time, NPT) に分類します。そして、実際の作業に生かされていないNPTを削減するよう努力することで、掘削作業の効率化が図られます。

このような作業時間分析に基づく掘削作業の効率化手法をさらに進めたものに Technical Limit (技術限界) と呼ばれる手法があります。Technical Limit は、オフセット坑井 (計画中の坑井の近傍にあって参考データを得られる坑井) に対して作業時間分析を行い、図4に示すように今まで生産時間 (PT) と考えられてきた中に隠れていた不可視の損失時間 (invisible loss time, ILT) を洗い出し、これを削減することによって技術的な限界である作業時間 (technical limit time, TLT) を実現しようという手法です⁹⁾。一般に全掘削工程のうちおよそ10~15%がNPTであるといわれ、またPTのなかでも掘進率の向上や、揚降管、ケーシング降下、セメンチング作業などで掘進が停止している

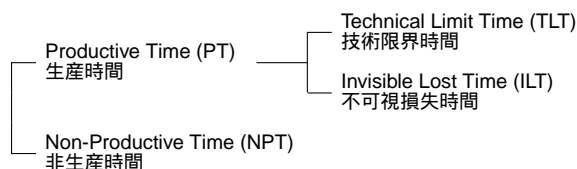


図4 Technical Limit における作業時間の分類

わゆるフラットタイム中の作業の効率化により全工程に対して約20~40%のILTが削減可能といわれています。

石油公団によって平成12年度基礎試錐「チカップ」へ Technical Limit が適用されたときには、オフセット坑井である基礎試錐「天北」に対して、上述の8つのカテゴリーよりもさらに細かい分類での掘削作業時間分析が実施されました¹⁰⁾。その結果が表4で、Technical Limit では、このような細分化された時間分析結果を元に徹底的に機器や手法の最適化と作業の効率化が図られます。

NPTなどの作業時間分析による掘削作業評価は広く用いられていますが、最近ではkey performance index (KPI) と呼ばれる指標もよく耳にします。これは設定された目標に対してどの程度達成できているか業績を測る指標といえます。例えば、ジャパン石油開発の中東アブダビ海域での掘削作業においては、(1) 掘削日数の実績を計画で除した指標 (well efficiency KPI), (2) 掘削障害の有無や坑井仕上げ作業の成否、検層・コアリングなどの評価データの取得、坑井インテグリティの確保などの観点から坑井の質を評価する指標 (well quality KPI), (3) 掘削費指標 (well cost index) の3つが設定され、評価が行われていることが紹介されています¹¹⁾。

表4 基礎試錐「天北」の作業時間分析結果¹⁰⁾

Productive Time (PT)		Non-Productive Time (NPT)	
作業内容	時間 (%)	作業内容	時間 (%)
掘削	37.43	抑留	0.13
拡掘	3.86	ウェルコントロール	0.98
揚降管	14.24	ドリルストリング切断	0.07
ワイバートリップ	0.59	坑壁トラブル	3.22
循環・調泥	2.31	坑内遺留	2.77
傾斜測定	0.16	評価 (コア採取, 検層, DST)	0.72
評価 (コア採取, 検層, DST)	8.81	泥水性状に起因するトラブル	10.12
ケーシング作業	2.41	掘削資機材	1.84
セメンチング	2.85	天候待機・資材待ち	0.23
ウェルコントロール機器	3.10	合計	20.08
その他	4.16		
合計	79.92		

文献

- 1) Kaiser, M. J., 2007: Estimating Drilling Costs—1: Joint Association Survey, Mechanical Risk Index Methods common in GOM. *Oil & Gas Journal*, Vol. 105, Issue 29, August 6, pp. 39–47.
- 2) Bourgoyne, A. T., Jr., Millheim, K. K., Chenevert, M. E. and Young, F. S., Jr., 1991: *Applied Drilling Engineering*, Second Printing, SPE Text Book Series Vol. 2, “1.10 Drilling Cost Analysis”, pp. 32–37, Society of Petroleum Engineers.
- 3) Louisiana Mid-Continent Oil and Gas Association ウェブサイト, URL: <http://www.lmoga.com/>.
- 4) 武田秀明, 2003: 低浸透性火山岩貯留層への挑戦 - 大深度火山岩貯留層生産性向上技術開発について -. 石油技術協会誌, 第 68 巻, 第 2-3 号, pp. 137–144.
- 5) Kaiser, M. J., 2007: Estimating Drilling Costs—2: Indices describe Complexity of Drilling Directional, Extended-Reach Wells. *Oil & Gas Journal*, Vol. 105, Issue 30, August 13, pp. 46–52.
- 6) Kaiser, M. J. and Pulsipher, A. G., 2007: Estimating Drilling Costs—3: Systems Approach combines Hybrid Drilling Cost Functions. *Oil & Gas Journal*, Vol. 105, Issue 32, August 27, pp. 39–47.
- 7) Kaiser, M. J. and Pulsipher, A. G., 2007: Generalized Functional Models for Drilling Cost Estimation. *SPE Drilling & Completion*, Vol. 22, No. 2, pp. 67–73.
- 8) 石油技術協会作井技術委員会マニュアル分科会, 1995: ビットマニュアル, 技術資料 15, 「5.2 コストの評価」, pp. 59–61, 石油技術協会.
- 9) 石油技術協会編, 2004: 石油・天然ガス資源の未来を拓く - 最前線からのメッセージ -, 石油技術協会創立 70 周年記念, 「2.2 掘削評価法 (Technical Limit)」, pp. 204–209, 石油技術協会.
- 10) 土井英太郎, 2001: Technical Limit の基礎試錐「チカップ」への適用. 石油技術協会誌, 第 66 巻, 第 5 号, pp. 469–472.
- 11) 田村満夫, 2007: 中東アブダビ海域における坑井作業の変遷. 石油技術協会誌, 第 72 巻, 第 5 号, pp. 430–435.