

オイルサンドの 油層条件下における弾性波速度測定

小川 豊和¹・持永 尚子²・河野 文夫²・
小野塚 重信²・高橋 明久³・鳥越 隆弘⁴

¹正会員 大成建設(株)技術センター(〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: toyokazu.ogawa@sakura.taisei.co.jp

² 石油天然ガス金属鉱物資源機構(〒261-0025 千葉市美浜区浜田1-2-2)
E-mail: mochinaga-hisako@jogmec.go.jp

³ カナダオイルサンド(株)(〒140-0002 東京都品川区東品川2-2-20)
E-mail: taka@japex.co.jp

⁴ 石油資源開発(株)(〒140-0002 東京都品川区東品川2-2-20 天王洲郵船ビル21F)
E-mail: torigoe@japex.co.jp

スチームフラッディングによるオイルサンドからのビチューメンの回収率増進過程において、地震波探査による地質構造の把握や流体挙動予測を行う場合、油層条件下にあるオイルサンドの弾性波速度をあらかじめ正しく理解しておくのは大切である。この論文では、採取後冷凍保存されたオイルサンド試料のコアから、室内における弾性波速度測定に供する試料の作成手順、ならびに試験手順を紹介し、現在までに得られた測定結果を報告する。また、別途実施しているビチューメンの速度・密度測定に関する結果とあわせて、簡単な岩石物理モデルを検討する。

Key Words : oilsand, bitumen, p- and s-wave velocities, steam-flooding, eor, laboratory tests.

1. はじめに

オイルサンドに含まれるビチューメンは粘性が高く常温では流動性を有さないため、何らかの方法で地下での流動性を高め地上に採収する技術が必要である。1990年代に開発されたSAGD法では、1本の水平井より蒸気を油層内に圧入して加熱し、流動性の増加したビチューメンをもう1本の水平井を用いて生産するため、経済的な採収が可能になる* (図-1参照)。このような状況下において、4次元地震探査を実施し地質構造の把握や流体挙動の予測・モニタリングを行う場合、貯留岩の弾性波速度が温度・圧力に対してどのように反応するかを正しく捉えておくことが重要である。

筆者らは、カナダ国内のオイルサンド層で採取された含油砂岩試料ならびにその間隙流体であるビチューメンを用い、油層圧条件下の温度圧力でP波ならびにS波速度を室内試験で測定している。この論文では、採取後冷凍保存された径80mmのオイルサンド試料から、径38mmの

弾性波速度測定用サンプルをどのように作成し、どのような手順で速度測定を実施するかを示す。また、現在までに得られた主な測定結果を、ビチューメンの速度測定結果とともに議論する。

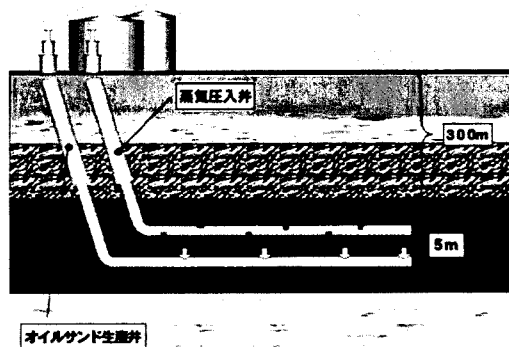


図-1 スチームフラッディングによるオイルサンド内
ビチューメンのEOR (SAGD法のイメージ図)

*海外プロジェクト:石油資源開発(株)ホームページ,
<http://www.japex.co.jp/jp/company/field/beishu.html#1>.

2. スチームフラッディング効果のモデル

スチームの圧入により貯留層の温度と圧力は図-2のように変化すると考えられる。すなわち、スチームを圧入することにより、圧入前の状態 (1) にまず圧力が伝播する (2)。次に温度が伝わり、もとの間隙流体が暖められ (3)、流動性が高くなったオイルは生産井に移動し始める。その後間隙には液化した熱水が流れ込み (4)、最終的には高圧・高温の蒸気が間隙を占める (5)。

本研究では、オイルサンドのコア試料とビチューメンを用いて、スチーム圧入過程における油層条件下のオイル

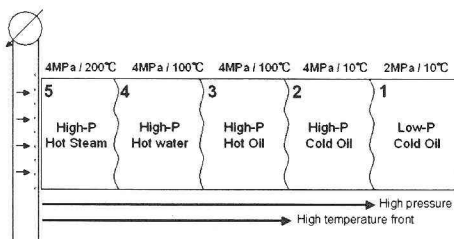


図-2 蒸気圧入井周辺における温度・圧力伝播状況

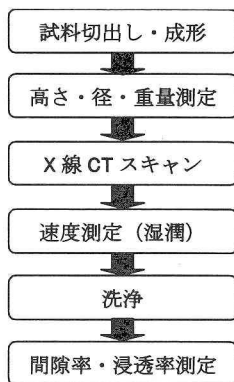


図-3 室内試験のワークフロー

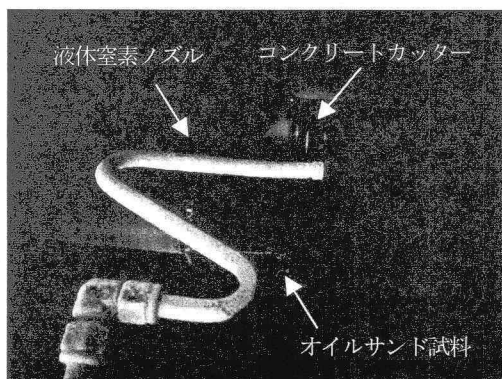


図-4 旋盤に取り付けたオイルサンド試料

サンドと間隙流体の弾性波速度応答を明らかにする実験を試みた。

3. サンプル作成・試験手順

図-3に、弾性波速度を測定するオイルサンドコア試料の作成手順、ならびに試験手順を示す。オイルサンドのコア試料は未固結であり、室温10°Cでの取り扱いが難しいため、予め冷凍した状態で保存したコア試料を、液体窒素を用いて加工した (図-5)。ここでは、試料の切出しから成形までを詳細に記述する。径80mmの冷凍コアを電動バンドソーで必要な長さに切断し、端面の直角具合を点検し地質記述に必要な部分を面取りして、液体窒素で予め40°C程度に冷却した旋盤上の剣山の間にサンプルをセットする (図-4)。

カバーを取り付け (図-5)、図-4に示すノズルから液体窒素を試料表面に噴霧しながら、旋盤を56rpmで回転させ、切削ビットの代わりに取り付けしたコンクリートカッター (ダイヤモンドビットの削りしろ8mm程度) を11,000rpmで回転させ、何度かに分けて径が38mmになるまで切削を継続する。この後すばやくマイターボックスの中で端面成形を行う (図-6)。

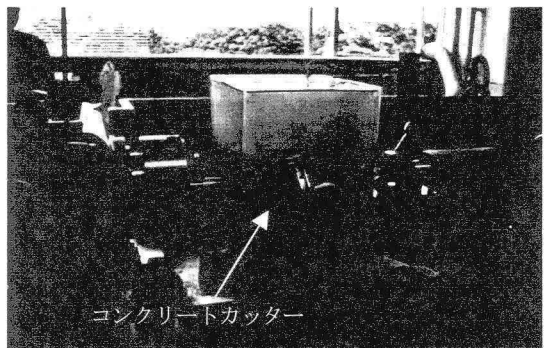


図-5 旋盤とコンクリートカッター

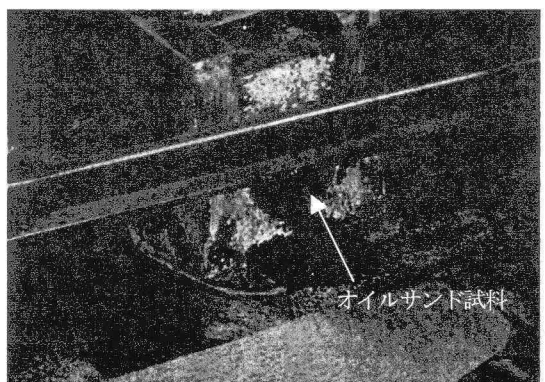


図-6 オイルサンド試料の端面成形

その後X線CTで非破壊検査をして、サンプル内部にクラックや不均一な部分がないことを確かめた後、図-7に示す測定装置にセットして温度圧力を変化させ弾性波速度を測定する。なお、試験後には試料をトルエン蒸気で洗浄して、中に含まれる油分、水分量を同定する。

4. 実験結果

(1)オイルサンド

対象とするオイルサンドの油層状態は、スチーム圧入前には温度が約10℃、間隙圧が2MPa(約300psi)、封圧が6MPa(約900psi)であり、スチーム圧入後は温度圧力が時間空間方向に変化する(図-2)。スチーム圧入前の油層条件下の温度10℃における圧力実験(封圧一定、間隙圧変化)結果の一例を、図-8に示す。この温度においては、圧力の影響は小さい。

今回の速度測定実験における温度・圧力の条件の一例を表-1に示す。実験では、コア試料の弾性体としての性質について検討するために圧力・温度に対するヒステリシスを確認する実験も試みた。

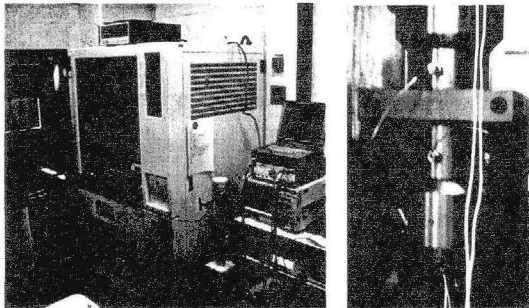


図-7 オイルサンドコア弾性波速度測定装置

表-1 速度測定に用いた温度と圧力条件の一例。

	温度 ℃	封圧 psi	間隙圧 psi	有効圧 psi
温度実験	10	900	600	300
	50	900	600	300
	100	900	600	300
圧力実験	10	900	200	700
	10	900	300	600
	10	900	400	500
	10	900	500	400
	10	900	600	300
	10	900	700	200
	10	900	800	100

(2)ビチューメン

対象油層のビチューメンを用いてP波とS波の速度、密度と粘性の測定を行った¹⁾。速度測定装置は、単振方向のトランスミッターとレシーバー、プラスチックのバッファから構成されており、振幅の減衰特性を明らかにすることを目的として、反射波と透過波の波形を記録できる仕組みである(図-9)。温度一定(10℃)での圧力変化時と、圧力一定(大気圧)での温度変化時のP波速度測定結果をそれぞれ図-10、図-12に示す。図-10では、温度10℃における圧力変化に対するビチューメンのP波速度の変化は比較的小さいことがわかる。また、図-12より、温度が40℃以上になるとP波速度は低下率が減少し、一定の値に向かいつつあることが分かる。

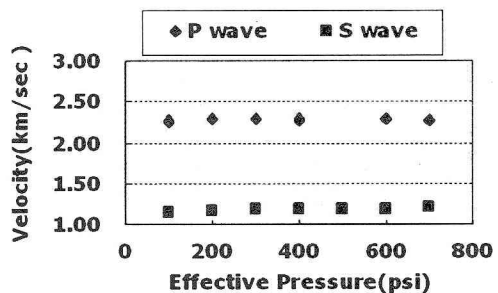


図-8 圧力と速度の関係 (10℃)

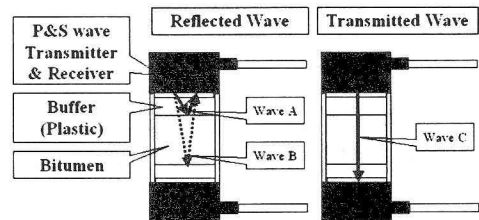


図-9 ビチューメンの速度測定装置

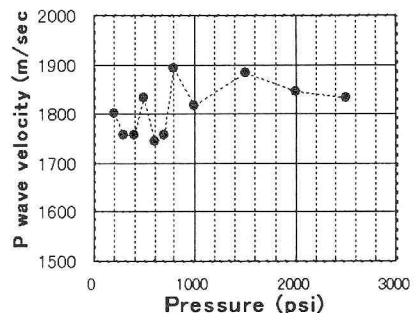
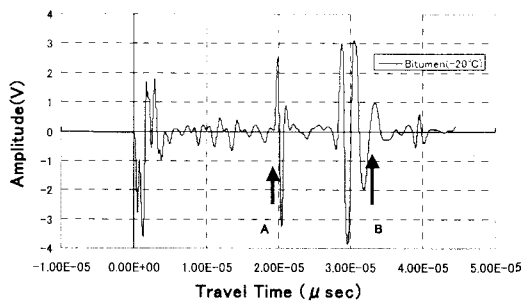
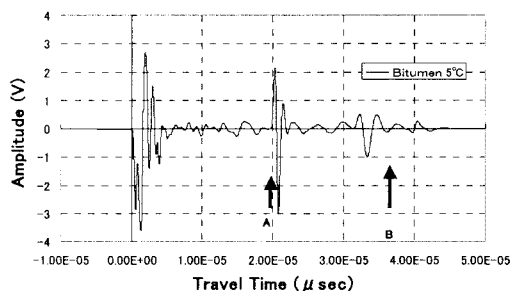


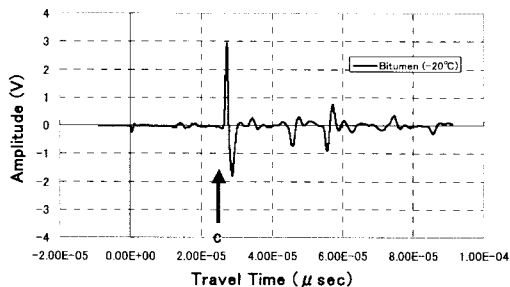
図-10 圧力のP波速度への影響



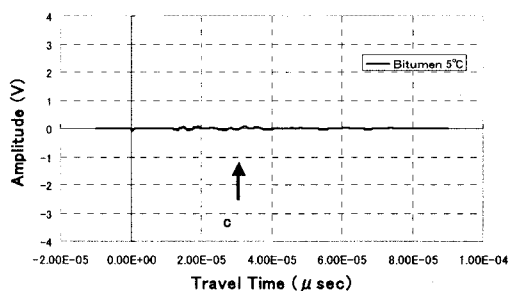
(a) 反射法 (-20°C)



(b) 反射法 (5°C)



(c) 透過法 (-20°C)



(d) 透過法 (5°C)

図-11 ビチューメンのS波速度測定結果

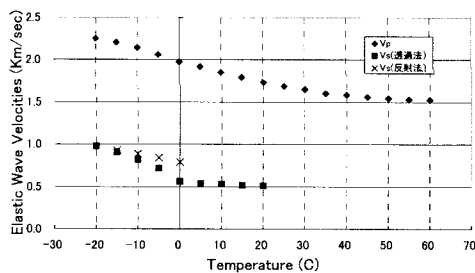


図-12 弾性波速度に及ぼす温度の影響

S波速度測定については、圧力をかけない状態で温度を-20°Cから60°Cまで5°C間隔で変化させて実験を行った。温度-20°Cと温度5°CにおけるS波の反射波の波形を、図-11に示す。図には、反射法の波形（図-11(a)と図-11(b)）と透過法の波形（図-11(c)と図-11(d)）をそれぞれ対比して示した。

図-11(a)と図-11(b)を比較すると、反射法では図-9で示される一番目のバッファを伝播してビチューメンとの

境界で反射した波（Wave A）は、温度-20°Cと温度5°Cの場合において振幅が大きい。一方、一番目のバッファとビチューメンを伝播して二番目のバッファとの境界面で反射した波（Wave B）は、その直前に原因不明の強振幅の波があり紛らわしいが（P波変換波？）、ここでは温度-20°Cの場合に透過法から逆算される反射波の初動位置を決定し、その他の温度においてもそれに対応する位置で初動を読み取った。温度5°Cの場合もWave AやWave Cと比較して振幅が小さいことがわかる。

一方図-11(c)と図-11(d)を比較すると、透過法では温度-20°Cの場合には振幅が大きい、温度の上昇とともに振幅が小さくなり、温度5°Cの場合には振幅は非常に小さくなることわかる。

図-12に、反射法・透過法で求めた大気圧下でのS波速度に及ぼす温度の影響を、P波の場合と対比して示した。反射法と透過法の結果はほぼ整合していることが分かる。また、温度上昇とともにS波速度は減少している。さらに、20°C以上では反射法・透過法ともに振幅が非常に小さくなり、S波の測定は不能になる。

表-2 岩石物性算出に用いた入力値と計算値

パラメータ			値	単位
インプット	S_w	水飽和率	0.196	
	ϕ	孔隙率	0.356	
	C	粒子間における接触数の平均値	9	
	K_0	鉱物の体積弾性率(Quartz)	37	GPa
	μ	鉱物のせん断弾性率(Quartz)	44	GPa
計算値	K_e	有効体積弾性率	2.03	GPa
	μ_e	有効せん断弾性率	3.39	GPa
	ρ_e	有効密度	1.71	g/cc
	V_p	P波速度	1.96	km/s
	V_s	S波速度	1.41	km/s

表-3 間隙流体物性の計算値

Type	V_p (km/s)	ρ (g/cc)	K (GPa)
ブライン	1.48	1.006	2.21
ビチューメン	1.61	1.008	2.62
混合流体	1.59	1.008	2.53

表-4 速度の計算値と測定値の比較

パラメータ	電検データ	コア試料	モデル
	実測値	実測値	計算値
T(°C)	10	10	16
V_p (km/s)	2.5	2.25	2.44
V_s (km/s)	1.0	1.18	1.28
V_p/V_s	2.5	1.91	1.90

5. 岩石物理モデリング

オイルサンドの体積弾性率と V_p, V_s についてモデリングを行い、コア試料の弾性波速度測定の結果と比較した。

乾燥状態の砂の体積弾性率は、コンタクトモデルのうちWalton²⁾を用いて計算した。計算に用いた各パラメータと計算結果を表-2に示す。孔隙率と水飽和率は、対象油層の電検データより得られた平均値を用いた。

間隙流体については、油と塩水が混合したものとして、その物性値をプログラムFLAG04³⁾を用いて計算した。計算結果を表-3に示す。計算には対象油層の生産井から回収されたビチューメンの比重 8.5APIと、油層の地層水の塩分濃度 9,000ppmと間隙圧 2Mpaを用いた。その他のパラメータについては、温度を 16°C、GORを 2、ガスの比重を 0.55とした。

ビチューメンが液体であると仮定したとき、Gassmannの式⁴⁾から求められたP波とS波の弾性波速度を、電検データと本実験から得られたオイルサンドの速度と比較したものを表-4に示す。電検データとコア試料の弾性波速度の差は比較的小さい結果となり、モデル計算値においても、実験値との大きな乖離は認められなかった。ただし、実験においては V_p と V_s の比が 2.0以下と通常値より低めに出ているため、試験を継続して検証する予定である。スチーム圧入前の油層条件下においては、ビチューメンがせん断剛性を持つと考えられることから、今後はビチューメンの状態変化を考慮したモデリングを検討する予定である。

6. まとめ

未固結のオイルサンドのコア試料とビチューメンを用いて、弾性波速度の測定実験を行った。本論文ではスチーム圧入前の油層条件下での圧力実験結果の一例と、間隙流体であるビチューメンの弾性波速度を示した。今後は、岩石物理モデリングの検討や振幅の減衰特性について報告する予定である。

謝辞：本研究においてカナダオイルサンド(株)と石油資源開発(株)技術研究所よりコア試料とコア分析データを提供して頂いた。特に、資源機構の加藤文人氏と小西祐作氏には、速度測定実験への有益なご助言を頂いた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 持永ら：油層条件下におけるオイルサンドの弾性波速度測定、平成17年度物理探査学会、秋期講演会、2005。(投稿中)
- 2) Walton,K.: The effective elastic moduli of a random packing of spheres. J. Mech. Phys. Solids, 35, 213-226. 1987.
- 3) FLAG04: FLUID/DHI consortium, University of Houston and Colorado School of Mines.
- 4) Mavko, G. et al.: The Rock Physics Handbook, Cambridge University Press, 1998.

SEISMIC WAVE VELOCITY MEASUREMENTS OF OILSAND UNDER INSITU PRESSURE AND TEMPERATURE CONDITIONS

Toyokazu OGAWA, Hisako MOCHINAGA, Fumio KONO,
Shigenobu ONOZUKA, Akihisa TAKAHASHI and Takahiro TORIGOE

In the process of enhanced oil recovery of oil sand by steam flooding, it is very important to know and understand in advance the behaviours of elastic wave velocities in oil sand under insitu pressure and temperature conditions. Introduced in this paper is the oil sand plug preparation procedure for seismic wave velocity measurements: 1.5" diameter plugs are trimmed in a cryogenic environment from frozen oil sand core retrieved from the reservoir. Test procedures of the oil sand and bitumen seismic wave velocity measurement are also explained, followed by a discussion on a set of preliminary results. A simple rock physics model is proposed, and is compared with the experimental results.