

# 碎屑岩を伝わる弾性波速度に関する研究

## 第 II 部 砂岩の石化 (Lithofication) に伴う弾性的性質の変化について

南 雲 昭 三 郎

### Studies on the Elastic Wave Velocity in Clastic Rock

#### Part II Progressive Change of Elastic Property through Lithofication in Sandstone

By

Shōzaburō Nagumo

Abstract

#### 1. Introduction

As stated in part I, various information on the elastic properties such as framework, porosity and internal pressure in sandy clastic rock can be obtained by analyzing the variation of longitudinal wave velocity due to the water content. By applying this method to various sandy clastic rock, the writer investigated the progressive change of elastic property through lithofication in sandstone.

Soft siltstone is pleistocene was chosen as the young sediment and the experiment was carried on the elastic property of soft sediment 2.

Development of framework through lithofication is studied with respect to the porosity in 3, by separating the elastic wave velocity in framework itself from the water content-velocity curve. From these data, progressive change of elastic property through lithofication is examined in 4. Standing on these information, the writer discussed in 5 some problems on seismic prospecting concerning the method of the survey technique and that of interpretation.

#### 2. Variation of elastic wave velocity with respect to water content in siltstone

The core used in this experiment was taken from the boring cores in the pleistocene formation of the Ishikari coal field. The density in water saturation is 1.81; the effective porosity is 47.3%; depth of sampling is 322 m.

The experiment was carried out with the same procedure as that of Part I, and the variation of longitudinal wave velocity with respect to water content is illustrated in Fig. 1. The curve for this high porous siltstone is very similar to the curve which were obtained in undurated sandstone.

Discussion of results:

(i) Velocity increase due to enforced dried condition

Comparing the observed velocity increase with the calculated value (Table 1), of which method is described in the Appendix II of Part I, the amount of velocity increase is inferred by occurrence of the internal pressure in the matrix and cement.

(ii) Velocity in saturated water

Comparing the observed velocity variation in saturated water with calculated value

for various models, namely for the F. Gassmann's porous model of  $\sigma = \bar{\sigma}$  and  $\mu = \bar{\mu}$ , and for the mixture model, the observed velocity variation is quantitatively explained very well by the F. Gassmann's model of  $\mu = \bar{\mu}$  (Table 2). The assumption of Gassmann's model of  $\mu = \bar{\mu}$  means that rigidity  $\mu$  of the porous medium increased in saturated water state as the same grade as that of framework when the bulk modulus  $k$  increases. While the assumption of Gassmann's model of  $\mu = \bar{\mu}$  means that rigidity  $\mu$  remains constant in water saturation condition, in spite of increase of bulk modulus. Taking these physical meaning of each assumption into consideration, the variation of poisson's ratio of the soft siltstone in saturation condition is examined.

Poisson's ratio  $\sigma$  is a function of  $\mu/k$ ,  $\sigma = (3 - 2\mu/k) / (\sigma + 2\mu/k)$ , and the relation is illustrated in Fig. 2. The Poisson's ratio of the framework of soft siltstone is about 0.2 ~ 0.3 and  $\mu/k$  0.6 ( $\sigma = 0.25$ ), according to Dr. Iida's experiment (1940). The bulk modulus of the framework is rather small. In saturated water condition, however, the bulk modulus  $k$  of the rock increases very much due to mixture of particle and water. Therefore,  $k/k$  becomes very small. On the otherhand, rigidity  $\mu$  remains constant under the assumption of  $\mu = \bar{\mu}$ . Therefore,  $\mu/k$  in saturation state becomes very small so that the Poisson's ratio approaches to 0.5. Comparison of calculated value of mixture model with the observed value will support the above interpretation.

Summarizing these considerations, we can conclude about the elasticity of high porous siltstone that i) F. Gassmann's porous model is suitable, ii) rigidity in saturated water condition is nearly the same as that of framework, iii) Poisson's ratio in that time approaches to 0.5, while that of framework is 0.2 ~ 0.3.

### 3. Development of framework with respect to the porosity

As the variation of the longitudinal wave velocity in saturated and partial saturated condition is quantitatively explained very well by F. Gassmann's porous model, elastic property of framework can be separated from the velocity water content curve, and the minimum velocity curve corresponds to the elasticity of the framework. In order to investigate the development of framework due to lithofication, longitudinal wave velocity was obtained by the same experiment of many other sandstone samples, which are tabulated in Table 3. As the result, longitudinal wave velocity of the framework is illustrated with respect to porosity in Fig. 3.

From this graph, we can notice such general tendency, in the framework that the velocity variation shows inverse proportion to the porosity. In the precise view, however, the variation of velocity in framework is very large even for the same porosity.

The variation range of velocity with respect to the porosity is very wide. When the porosity becomes less 20%, the velocity in the framework seems to be rather independent on porosity. The general dependency between velocity and the porosity of the framework will be due to the compaction and cementation. The wide variation in less porous medium, however, will be due to both the texture of the rock and the quality of cementation materials.

### 4. Progressive change of elastic property through lithofication in sandstone

Summarizing the experimental data in Part I and Part II, longitudinal wave velocities of unsaturated and saturated framework are plotted with respect to the porosity in Fig. 4. Reference curve (1) in the Fig. 4 shows the velocity of the mixture model con-

sisting of elastic particle and water. Reference curve (2) presents the velocity of the assumed mixture model of  $\sigma=0.25$ . The observed longitudinal wave velocity in saturation condition is a little larger than the curve (1) at the high porous region. As the porosity decrease (50% ~ 30%), the observed velocity deviate upwards from the curve (1). When the porosity is less than about 15%, the velocity becomes larger and the development of the framework shows remarkable.

From these curves and experimental data described in this report, progressive change of elastic property of sandstone was examined and schematically summarized in Table 4. For the very young sediment, range about from 100% ~ 50%, the elastic property is mostly determined by the mixture model of elastic particle and water. As the lithofication phenomenon such as compaction and cementation, develops with reduction of pore spaces, the framework begins to develop. In the porosity range of about 50 ~ 20%, the strength of the framework is still weak. In saturated condition, the bulk modulus of the rock become large due to mixture model, while the rigidity remains nearly constant as that of framework. Therefore, in saturated ration conditions Poisson's ratio approaches to about 0.5. When the lithofication develops very much and the porosity decreases less than 20%, the elastic property of the framework becomes very strong. In saturation condition, both bulk modulus and rigidity become large, so that the Poisson's ratio does not change in such condition.

#### 5. Consideration and remarks on seismic prospecting

On the bases of above knowledge, the writer has taken some considerations on seismic prospecting.

##### (1) Elastic property of low velocity layer surface

By considering the elastic property of low velocity layer surface particularly concerning the rigidity, it was remarked that the surface waves should be carefully controlled by examining the shear wave velocity in the formations.

##### (2) On the reflection bed

From the physical view point, the reflection horizon is merely a boundary of acoustical impedance. The elastic wave velocity is mainly controlled by the porosity and the framework, and these factors have close relation to classification and description of rock facies. Therefore, the reflection bed should be correlated first to the rockfacies.

##### (3) On the correlation between seismic units and stratigraphic units

Correlation procedure is schematically presented in Fig. 5. The relation between velocity layer and reflection and refraction horizon should be studied with the stratigraphic facies analysis such as sand-shale ratio, iso-pack and other analysis.

#### 6. Summary and Conclusion

Progressive change of elastic property in sandy clastic rock was studied by carrying out the experiment on the variation of the longitudinal wave velocity in saturated condition.

As regards the elastic property of soft siltstone (porosity: 47.3%; longitudinal wave velocity in saturated condition: 1.54 km/sec) in pleistocene formation. Results obtained are;

- (1) Longitudinal wave velocity variation in saturation condition is controlled by

the elastic property of framework, porosity and inner pressure. The F. Gassmann's porous model of  $\mu = \bar{\mu}$  seems to be suitable to such high porous siltstone.

(2) The longitudinal wave velocity in saturated state mainly depends upon the mixture model of elastic particles and water, and the velocity in partially saturated state decreases to the velocity of the framework.

(3) The shear wave velocity is determined by the elasticity of the framework, and the rigidity does not affected by the water content.

(4) Poisson's ratio in the saturated state is a little less 0.50.

As regards the development of framework through lithofication, results obtained are;

(1) As a general dependency, the longitudinal wave velocity of the framework increases as the porosity decreases.

(2) When the porosity becomes less than about 15 %, there seems to be no close relation between porosity and the strength of the framework.

From these data, progressive change of elastic property of sandy clastic rock was summarized and tabulated in Table 4.

Remarks on the seismic prospecting, from the view point of these elastic property of the elastic rock, are;

(1) Shear wave velocity should be carefully examined in the case of controlling the surface waves.

(2) Reflection bed should be correlated first to the lithofacies.

(3) Correlation procedure between seismic units and stratigraphic units is schematically illustrated in Fig. 5.

## 1. 緒言

砕屑岩を伝わる弾性波速度の含有水分に伴う変化について、第I部においては、まず中・粗粒砂岩について実験を行い、その結果、含水飽和状態の砂岩を伝わる弾性波速度は、frameworkの弾性的性質と孔隙率とによって支配されていること、含水飽和状態の砂岩のPoisson比はframeworkのそれと等しいことが明らかになった。その含有水分に伴う縦波速度の変化についての実験が岩石の弾性的性質を調べるのにかなり役立つことがわかったので、今回 lithofication (石化) に伴う弾性波速度の変化を考察するために、稚い堆積物である柔い siltstone について、その実験を続けてみた。土の弾性的性質については、飯田汲事<sup>7)</sup>の念入りな実験によつて、かなり明らかになっているので、今回は、飯田汲事の取り扱ったサンプルよりさらに石化の程度が進んだと考えられる第三紀滝川層の siltstone を取り扱つてみた。

また前回の実験によつて framework の弾性的性質が縦波速度—含水率曲線から分離されることが明らかに

なつたので、今回さらに多くの砂岩サンプルについて同様の実験を行い framework の発達と孔隙率との関係を求めてみた。

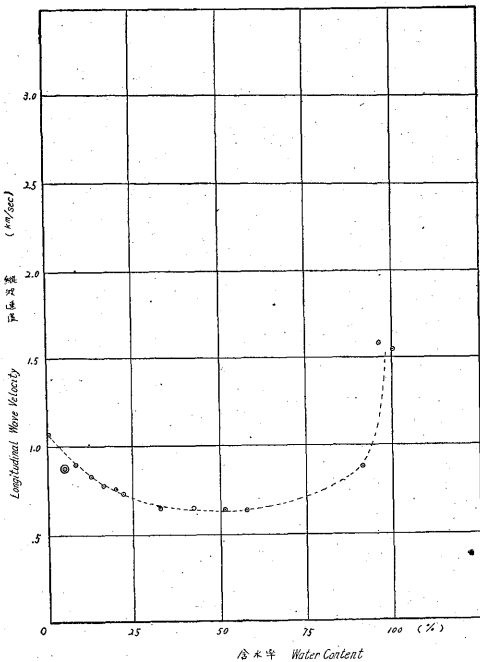
Krumbein<sup>12)</sup>は“Some Relation Among Sedimentation, Stratigraphy and Seismic Exploration”と題する有名な総合報告において、石化に伴う弾性波速度の変化についての知識が、石油開発において層位学的探鉱と地震探鉱とをさらによく結びつけるであろうことを指摘したが、最近砕屑岩を伝わる弾性波速度を支配する因子についての知識が急速に増してきた。例えば最近 E.L. Hamilton et al<sup>11)</sup>の海底の柔い堆積物についての実験、M.R.J. Wyllie et al<sup>13)</sup>の人工および自然の粒状物体についての実験、W.G. Hicks and J.E. Berry<sup>8)</sup>の岩石を伝わる弾性波速度を支配する因子に対する実験、N.R. Paterson<sup>14)</sup>の framework の分離の実験等が発表されてきた。それで今回岩石の石化に伴う弾性的性質の変化について考察を加えてみた。

最後に、これらの知識が、地震探鉱の調査技術および解釈にどのような関係をもつか、考察を加えてみた。

2. 柔かい Siltstone についての実験

および結果の検討

この実験に用いた岩芯は、第 I 部と同様北海道奈井江試錐孔の岩芯のなかから選んだもので、滝川層の siltstone、採集深度 322m、含水飽和時の比重1.81、孔隙率 47.3%である。実験に用いた器械は第 I 部と同様である。しかし柔いコアは含水させてから長く水に浸しておくはずれてしまうので、あらかじめ、吸水量の時間的変化を測定し、ほぼ一定値に落ちつくまでの時間を観測しておいて、その時間だけ水に浸しておいた。このサンプルについては、真空排気した後約20分水に浸しておいたものである。



第 1 図 Siltstone について含有水分に伴う弾性波速度の変化 ◎自然乾燥状態

Longitudinal Wave Velocity as a Function of Water Content in a Siltstone

Note: ◎ Natural Dry State

実験結果の縦波速度—含水率曲線を第 1 図に示す。自然乾燥状態で約 900m/sec の速度を示していた物が水分が飽和によって、1.57 km/sec まで増加した。飽和状態における波の透過はすばらしく良い。飽和状態から少し乾燥し始めると、急激に波の透過が悪くなり、速度も急激に小さくなる。含水率約60%位でふたたび波の透過は良くなり、以後波の透過は良く、速度も含水率50~60%以降増加の傾向をたどる。最低速度は含水率50~60%

で認められ 640 m/sec であつた。強制乾燥で速度は増加し、1.08 km/sec となつた。

この siltstone は孔隙率約 50% という非常に porous なものであつたが、含水率—縦波速度曲線は、固い岩石のそれと等しい傾向をもっているため、第 I 部と同様に最低速度からのさらに乾燥していく部分と、飽和状態から最低速度の状態へ至る部分との 2 つに分て実験結果を検討してみる。

実験結果の検討

(i) 強制乾燥による速度の増加について

含水率50%から 0%に至る乾燥過程においての速度増加を、粒状物体内部に発生する内部圧力によるものかどうか検討してみる。前回の計算結果註1)を参照すると、圧力のかゝっていない framework の速度  $V_0=500$  m/sec をもつ粒状物体の速度は、圧力 40bar, 60bar でそれぞれ1.05km/sec, 1.10km/sec に増加する。

また前回の報告において述べたように、水の表面張力によつて matrix 内部に発生する圧力は40~60bar 程度と考えられる。したがつて今回の siltstone において、 $V_0=640$  m/sec のものが、乾燥状態において  $V_{dry}=1.08$  km/sec に増加するという事は、このように孔隙率約50%という porous なものについても粒状物体のモデルが適用されることを示しているものと思われる。

第 1 表 強制乾燥による縦波速度の増加観測値と観測値の比較

Longitudinal Wave Velocity Increase due to Forced Dry Comparison of Observation with Computation

	観測値 observed value	計算値 computed value	
Framework の速度 $V_0$	640 m/sec	500 m/sec	
pressure		40 bar	60 bar
乾燥状態の速度 velocity in dry	1.08 km/sec	1.05km/sec	1.10 km/sec

(ii) 飽和状態の速度について

Framework を伝わる弾性波の速度  $\bar{v}$  として最低速度をとり、すなわち、 $\bar{v}=0.64$  km/sec として Gassmann の理論<sup>9)</sup>によつて飽和状態の速度を計算すると、 $\mu=\bar{\mu}$  の仮定のもとでは  $V_{sat}=1.56$  km/sec となり  $\sigma=\bar{\sigma}$  の仮定のもとでは  $V_{sat}=2.00$  km/sec となる。すなわち、飽和状態の剛性率が framework のそれと変わらない

註1) 第 I 部補足 II 参照

第2表 含水飽和状態の縦波速度

観測値と Gassmann Model, Mixture Model  
についての計算値との比較

Longitudinal Wave Velocity in Water Saturation State Comparison of Observation with Computation on Various Models

飽和状態の縦波速度 longitudinal wave velocity in saturation state			
観測値 observed value	計算値 calculated value		
	v—0.64km/sec n—47.3%		
	Gassmann's porous model		mixture model
	$\mu=\bar{\mu}$	$\sigma=\bar{\sigma}$	
1.54 km/sec	1.56km/sec	2.00km/sec	1.48km/sec

という仮定 ( $\mu=\bar{\mu}$ ) のもとでは、計算値は観測値に非常に良く一致しているが、飽和状態のポアソン比が、framework のそれと変わらないという仮定 ( $\sigma=\bar{\sigma}$ ) 一さらに補足すれば含水飽和によつて体積弾性率  $k$  が水分の影響をうけて framework の  $\bar{k}$  より増加するとともに剛性  $\mu$  も同じように増加するという一仮定のもとでは、計算値は、実験値より非常に大きくなる。次に、framework を考えないで、弾性粒子と水の混合物としてのモデルを考えると圧縮率の加法定理から飽和状態の速度を計算してみると、 $V=1.48$  km/sec となり、計算値は実験値に較べて、僅かに小さくなってくる。これは、siltstone の飽和状態には、やはり framework の影響がはいっていることを示しているものと考えられる。

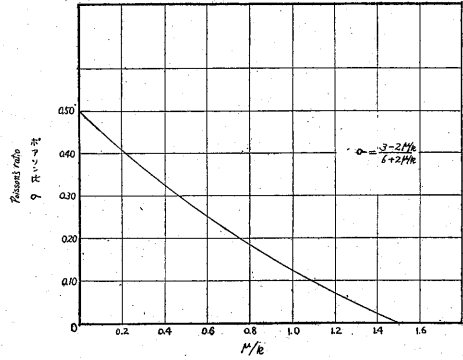
前回の孔隙率 5~15% 程度の中・粗粒砂岩についての実験においては、Gassmann Model の  $\sigma=\bar{\sigma}$  の仮定の方が、計算値と実験値と一致していたが、今回孔隙率の 50% 程度の柔い siltstone については  $\mu=\bar{\mu}$  の仮定の方が、適合している。このことは含水飽和に伴う剛性率の変化は、孔隙率の大小によつて異なることを示しているものと考えられる。剛性率の変化を吟味するについては、目下横波速度を観測する装置を研究中なので後日実験を続けたいと思つている。

柔い堆積物の弾性的性質について、もう少し考察を続けてみよう。ポアソン比  $\sigma$  を  $\mu/k$  で表わすと

$$\sigma = \frac{3-2\mu/k}{6+2\mu/k}$$

となり  $\sigma$  と  $\mu/k$  の関係を図示すると、第2図のようになる。

柔い堆積物の framework のポアソン比は、飯田波事の実験<sup>7)</sup> を参照すれば、0.25~0.3 程度と考えられ、



第2図 ポアソン比と  $\mu/k$  との関係  
Poisson's Ratio as a Function of  $\mu/k$

したがつて  $\mu/\bar{k}=0.6$  ( $\sigma=0.25$ ) 程度と考えられる。含水飽和の状態になると、体積弾性率  $k$  は水と構成弾性粒子との混合物としての影響が加わつて大きくなり、framework の体積弾性率  $\bar{k}$  が小さいので、その比  $\bar{k}/k$  は非常に小さくなる。今回のサンプルには、 $\bar{k}/k=0.07$  となる。一方剛性率について、もし、含水飽和状態においても framework のそれと変わらない。すなわち  $\mu=\bar{\mu}$  と仮定すれば、飽和状態の  $\mu$  は  $k$  に較べて非常に小さくなるので、 $\mu/k$  はまた非常に小さくなり、今回のサンプルについては  $\mu/k=0.04$  となる。したがつて飽和状態のポアソン比は第2図からみられるように 0.5 に近い値をもつことになる。今回のサンプルについては、 $\sigma=0.48$  となる。すなわちポアソン比 0.25 の framework が、含水飽和状態ではポアソン比 0.5 に近づいていく。水と弾性粒子との混合物モデルについての計算値が実験値に較べて少し小さいがかなり合っていることは、このサンプルの飽和状態におけるポアソン比が、0.5 に近いためと考えられる。

もし剛性率の含水による変化が、体積弾性率の変化と同じ程度であると仮定すれば、計算値が、実験値に較べて非常に大きくなることは第2表に示している通りである。したがつて、剛性率の含水飽和による変化についてはまだ実験的に充分には確かめられてはいないが、これらの考察によつて framework の剛性率と含水飽和状態のそれとはそれほど大きい変化はないことが推定される。

以上の考察を要約すると孔隙率の大きい siltstone についても i) Gassmann の粒状物体のモデルが適合すること、ii) Framework の剛性率と飽和状態のそれとは、ほぼ同程度であること、iii) したがつて 0.25~0.3 程度の framework のポアソン比が飽和状態ではポア

第3表 実験に用いたコアサンプルと、観測値と実験値との比較

Rock Specimens used in the Experiment and Comparison of Observed Value with Theoretical Value

コアの番号 number of specimen	岩石の種類 description	最大含水状態の見掛比重 density (saturation)	有効孔隙率 effective porosity (%)	縦波速度の観測値 (observed value) longitudinal wave velocity			F. Gassmann 理論による計算値	
				飽和状態 (saturation) (km/sec)	乾燥状態 (dry) (km/sec)	最低速度 (minimum) (km/sec)	$\mu = \bar{\mu}$ (km/sec)	$\sigma = \bar{\sigma}$ (km/sec)
C-1	中・粗粒砂岩	2.58	7.2	3.66	2.79	2.43	3.09	3.70
C-3		2.52	8.1	3.69	2.94	2.63	3.15	3.70
C-5		2.45	10.9	3.78	2.73	2.41	3.02	3.55
C-6		2.60	6.2	3.33	1.91	1.67	2.97	3.70
C-8		2.58	6.5	3.86	2.56	2.30	3.20	2.82
C-10		2.54	8.3	3.70	2.46	2.29	3.10	3.62
B-14	古第三系	2.52	7.8	3.70	2.59	2.17	2.95	3.58
B-15		2.44	12.8	2.98	1.81	1.30	2.45	3.00
B-16		2.52	6.4	3.76	2.68	2.68	3.35	3.85
B-20		2.42	13.1	2.84	2.14	2.00	2.73	3.25
B-25		2.46	11.8	3.43	2.74	2.61	3.10	3.48

註：中・粗粒砂岩 (sandstone)；北九州 Miocene；深度 (depth) 200~600 m

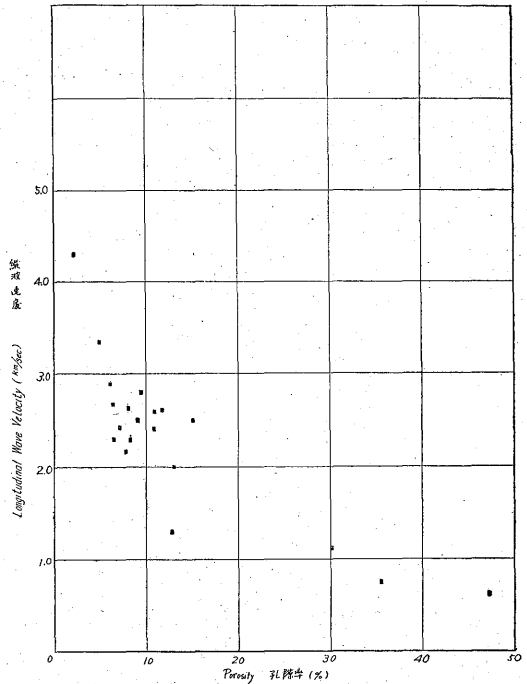
ソニ比 0.5 に近づいてゆくことが推定される。

### 3. Framework の強さと孔隙率との関係について

前回の砂岩についての含水実験において部分的含水状態の最低速度から含水飽和状態への速度増加量が、Gassmann のいわゆる Porous medium の理論によつて良く説明されることがわかった。すなわち飽和状態の速度が framework の体積弾性率  $\bar{k}$ 、孔隙率  $n$ 、液体の体積弾性率  $\bar{k}_l$  によつて支配され、最低速度が、framework の  $\bar{k}$  に対応していると考え、実験値と理論値が非常に良く一致することがわかった。それで今回、lithofication に伴う速度の変化を調べるために、さらに多くのサンプルについて、前回と同様な含水実験を行いその縦波速度——含水率曲線から最低速度を求め、framework の発達と孔隙率との関係を調べてみた。含水実験に用いたサンプルは、第3表に示した通りである。

最低速度と孔隙率との関係を第3図に示した。

第3図から framework の速度は孔隙率が小さくなるほど大きくなるという一般的傾向が見受けられる。しかし細かにみると framework の速度の変動はかなり大きく、孔隙率が5~15%の間では framework の速度と孔隙率との関係は、むしろ無関係と考えた方が良くと思われる。framework の速度が、孔隙率が小さくなるほど大きくなるという一般的傾向は compaction, cementation が発達するとともに、framework が形



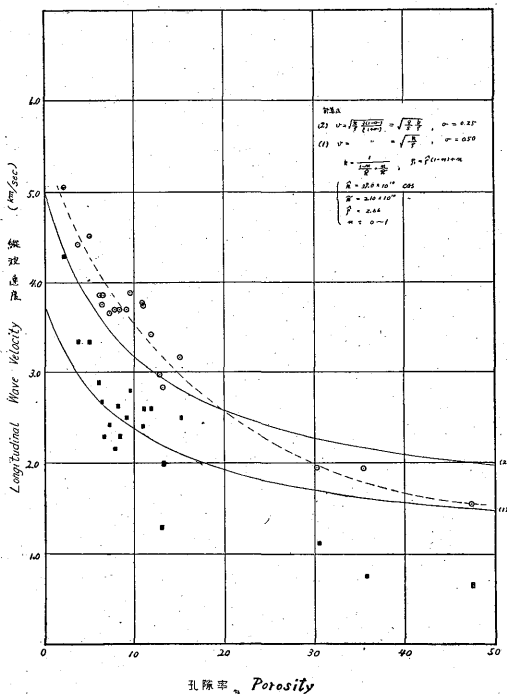
第3図 Framework を伝わる縦波速度と孔隙率との関係  
Longitudinal Wave Velocity in Framework versus Effective Porosity

成されているという傾向を示しているものと考えられる。孔隙率に対する framework の速度の変動はかなり大きく、またある程度孔隙率が小さくなると、framework の速度が孔隙率と無関係になるということは fra-

mework の速度というものが, cementation の質と量とに大きく依存するためであろうと思われる。すなわち, 砂岩のセメント物質が calcalious であるか silicious であるということは, その孔隙率に対しては, 大きな差異を持たないが framework の強さに対しては, 大きな差異がでてくるというようなことを意味しているのであろう。

4. Lithofication (石化) に伴う  
弾性的性質の変化について

いままで含水実験を行った砂岩, 柔い siltstone について, 孔隙率に対する 含水飽和状態の縦波速度, framework に対応する最低速度の関係をまとめて図示したものが第4図である。



第4図 砂質碎屑岩について, 最大体積含水率(孔隙率)と縦波速度との関係  
■ Framework ○ 飽和状態 (Saturation state)  
Longitudinal Wave Velocity Versus Effective Porosity in Sandy Clastic Rock

孔隙率 0~20% のコアサンプルは, 古第三系の中・粗粒砂岩であり孔隙率約30%のサンプルは, 新第三紀頭城層群の silty sand であり, 孔隙率約50%のサンプルは滝川層の siltstone である。

縦波速度を体積弾性率  $k$ , ポアソン比  $\sigma$  で表わすと,

$$V = \sqrt{\frac{k}{\rho} \frac{3(1-\sigma)}{1+\sigma}} \quad (1)$$

$$k = \bar{k} \frac{\bar{k} + Q}{\bar{k} + Q}, \quad Q = \frac{\tilde{k}(\bar{k} - \tilde{k})}{n(\bar{k} - \tilde{k})} \quad (\text{Gassmann}) \quad (2)$$

$$k \approx \bar{k} + \frac{1}{\frac{1-n}{\bar{k}} + \frac{n}{\tilde{k}}} \quad (\text{White}) \quad (3)$$

$$\rho = \bar{\rho}(1-n) + n$$

- : Framework
- △ : Material
- ~ : Water

となる。体積弾性率  $k$  については Gassmann の porous medium の理論によれば (2) 式のようになり, 近似的には White<sup>21)</sup> が示したように (3) 式となる。

(3) の第2項は圧縮率の加法定理の成り立ついわゆる mixture model に相当するものである。水と弾性粒子との mixture model について, 孔隙率と縦波速度との関係を計算したものが, 第4図の曲線(1)である。次に framework が発達してくると, 粒状物体のポアソン比が, 0.5からだんだん小さくなって行くと考えられるので, その mixture model からの偏倚を見易くするために, mixture model においてポアソン比が0.25の場合, すなわち剛性率が体積弾性率と同程度に発達した場合について計算したものが, 第4図の曲線(2)である。

さて含水飽和状態の縦波速度の実験値とこれらの曲線との関係をみてみると, 孔隙率50%程度では曲線(1)に近い値となっているが, 孔隙率が小さくなるにつれて, 次第に曲線(1)から離れて行く。そして孔隙率が20%以下になると, 曲線よりさらに大きくなってきている。この孔隙率の変化に伴う弾性的性質の変化を碎屑岩の石化 (lithofication) という観点から少しく考察してみよう。

沈積 (deposition) 後の非常に稚い堆積物については Hamilton et al<sup>2)</sup> の海底の堆積物に関する研究に報告されているように, 液体と弾性粒子との mixture model が成り立っているようである。次に少しく compaction を受けて, 孔隙率が50%程度になってくると, 飯田汲事<sup>22)</sup>の沖積土に関する実験, R.A. Paterson<sup>18)</sup>の実験, 第2章の soft siltstone についての実験で示されるように, framework が発生してくる。その含水飽和状態における弾性的性質を考えると, framework の体積弾性率がまだ小さいため, 液体と構成弾性粒との混合物による体積弾性率は framework のそれよりも大きくなっている。(3)式でいえば, 第1項に較べて第(2)項の方が大きくなっている。また剛性率を考えると, framework 自身は, 飯田汲事の実験からわかるように, ポアソン比0.25~0.3程度の剛性率をもっていると思われるが, 含水飽和状態ではその剛性率は framework のそれと同程度 ( $\mu = \bar{\mu}$ ) と考えられる (第2章参照)。



第4表 石化に伴なう砂質砕屑岩の弾性的性質の変化  
Progress Change of Elastic Property Through Lithofication in  
Sandy Clastic Rock

孔隙率 porosity	Framework の弾性 elasticity of framework	含水飽和状態の弾性 elasticity in water saturation state
100%	$\bar{k}=0, \bar{\mu}=0; \bar{\sigma}=0.5$ $\bar{k}>0, \bar{\mu}>0; \bar{\sigma}<0.5$ $\bar{k}\gg 0, \bar{\mu}\gg 0; \bar{\sigma}\approx 0.25$	$k = \frac{1}{\frac{1-n}{\bar{k}} + \frac{n}{\bar{k}}}, \mu=0; \sigma=0.5$
50%		$k \approx \bar{k} + \frac{1}{\frac{1-n}{\bar{k}} + \frac{n}{\bar{k}}}, \mu = \bar{\mu}; \sigma \leq 0.5$
20%		$k = \bar{k} \frac{\bar{k}+Q}{\bar{k}+Q}, \mu > \bar{\mu}, \sigma = \bar{\sigma} \approx 0.25$
0%		$Q = \frac{\bar{k}(\bar{k}-\bar{k})}{n(\bar{k}-\bar{k})}$

備考 A: Material ~: Liquid -: Framework

すなわち砕屑岩の内部に飽和した液体は、体積弾性率に対しては、mixture (混合物)として非常に大きく寄与するが、剛性率に対してはあまり影響を及ぼさないと考えられる。したがって framework が発生してきてもまだ弱い状態では、含水飽和におけるポアソン比は、混合物状態 ( $\sigma=0.5$ ) からそれほど大きく偏倚しないと考えられる。したがって縦波速度は、mixture model の曲線 (1) にそつて、曲線 (1) よりやゝ大きい速度をもつて compaction を受けて行くであろう。そして compaction を受けて孔隙率が小さくなるにつれて、framework の発達も強くなり、飽和状態のポアソン比も 0.5 から離れ、次第に曲線 (1) から上の方へ離れて行くのであろう。

次にある程度 compaction, cementation が発達して、孔隙率が約 20% 以下になると、第4図の framework に対応する最低速度 (第4図■印) の実験値にみられるように framework の体積弾性率、剛性率が大きくなり、混合物によるそれらと同程度になってくる。そしてさらに前回の報告 (第I部 4.) に述べたように飽和状態においても、ポアソン比は framework のそれと変化せず ( $\sigma=\bar{\sigma}$ ), 0.25 程度になり、飽和された液体は混合物モデルにしたがつて、体積弾性率を増加させるとともに、剛性率についても体積弾性率と同程度に増加するようである。したがつて含水飽和状態の縦波速度は、ポアソン比を 0.25 とした mixture model (曲線 2) にさらに framework の弾性的性質が加わつて、曲線 (2) より大きい値をとつてくる。以上のことを要約して表現すると、第4表のようになる。

### 5. 地震探鉱への考察

以上、弾性波速度の含有水分に伴なう変化を手懸かりにして、砕屑岩を伝わる弾性波速度を支配している因子や、石化に伴なう弾性的性質の変化について研究を行つてきたが、そこに得られた諸結果が、地震探鉱の調査技術や、解釈などにどのように関係するか、少しく考察を加えてみたいと思う。

#### (1) 表面低速度層の性質

沖積平原の第1層を形成している柔い堆積物は、framework が僅かに形成された弾性粒子と水との混合物として考えられる。それを伝わる縦波の速度は、含水飽和状態では、構成している粒子の弾性的性質と孔隙率とに大きく依存している。部分的含水の状態では framework によつて決る速度まで変動する。一方横波の速度は含有水分の飽和と否とに無関係であり、framework の強さに依存している。したがつてポアソン比は部分的含水の状態では 0.25~0.3 程度であつても、飽和状態では、0.5 に近い値となつてくる。

柔い堆積物についてのこれらの弾性的性質は、反射法において良い S-N 比をうるために、爆発方法や、受振器の設置法などを制御する際に、充分考慮される必要があると思われる。例えば弾性波の発生において媒質のポアソン比が、発生する弾性波の波形に大きい役割をしめていることを最近 C. W. Dix<sup>9)</sup> が指摘している。また noise の 1 つをなしている表面波について、多孔爆発法や群設置法などによつて除去して行く色々の操作が研究されてきているが、その際表面波の性質を支配している横波の速度および速度境界を充分注意しなければならぬ

いと思う。筆者はこれまで、縦波速度から安易に、ポアソン比を 0.3程度として横波の速度を推定したり、縦波の速度境界をそのまま横波の境界と考えたりしていたが、これらは非常に不確かであると思われる。

例えば、横波の速度は framework の剛性からのみ決めるとすると、いままで考えられていた値より案外ずつと小さいのではなからうか。そうすると表面波の波長も短いものであり、多孔爆発や群設置の制御に大きく影響してくるものと考えられる。最近横波の測定法が J. E. White<sup>22)</sup>や R. N. Jolly<sup>10)</sup>, E. D. Riggs<sup>19)</sup> などによつて行われているが、まだ現場で簡単に実施するまでに至っていない。したがって、横波の測定を現場で簡単にできるような方法を実用化することによつて、一方では表面波に対する正確な判断を得るとともに、一方ではその対策が行えるよう努めて行かねばならぬと思う。

### (2) 反射面について

地震探鉱反射法によつて得られた反射面が、地質学的に何を意味するかという問題は、地震探鉱結果の解釈や調査計画および良い反射記録を得るといふ技術にとつて、最も重要な問題の1つであり、最近わが国においても多くの石油地質学者の関心を受けてきている。

反射面というものは、物理的には、音響インピーダンスの変化する境界面と考えられる<sup>註2)</sup>。しかし碎屑岩の縦波速度は第4図に示されるように孔隙率が小さくなるほど大きくなり、その値はおもに、孔隙率と framework の弾性によつて支配されている。碎屑岩の密度や孔隙率については L.F. Athy<sup>1)</sup>の研究からも解るように、泥岩については深度に従つて指数函数的に変化するという一般的傾向が認められるが、細かにみると、あるいは、その他の砂質の碎屑岩についてみると、同じ地史 (geological history) を経ていると思われる1つの formation 内部においても密度や孔隙率はかなり変動している。この点については、最近 W.G. Hicks<sup>9)</sup>, M.R. J. Wyllie<sup>23)</sup>らが、速度検層で得られた地層内の速度変動は孔隙率の変動に良く対していることを報告している。弾性波速度がおもに孔隙率や framework によつて支配されることを考えれば、1つの堆積単位 (stratigraphic unit) 内部においても、弾性波速度が水平的に

また垂直的に色々変化しているということは、地質学的にも当然のことと考えられよう。

例えば、新第三系の formation の内部において凝灰質単層が発達したり、あるいは粒度分布の変化が起つたり、あるいはセメント物質が石英質、あるいは石灰質に変化したりすることはありふれたことと考えられている。そして、これらの変化を、地質学的には、岩相 (lithofacies) というものを使つて分類記述している。これらの岩相というものは、孔隙率や framework また texture に密接な関係を持つている。したがって弾性波速度と密度との積である音響インピーダンスの境界に相当する反射面というものは、孔隙率や framework を媒介にして、地質学的な岩相にまず対応してゆくものであろうと考えられる。したがって反射断面図というもののから、層序岩相単元 (Time Rock Unit) あるいは岩相単元 (Rock Unit) についての知識を得ようとする場合には色々の岩相解析 (lithofacies analysis) とそれら単元との関係を再吟味しながら、検討していただきたいと思う。例えば、新潟県二本木地域における地震探査反射法によつて得られた第1反射面は、泥岩層中に発達した安山岩質凝灰岩に対応し、第2反射面は、泥岩質地層から、凝灰色砂岩と泥岩層との互層の地層への境界面に対応していることが、試錐および、試錐コアを用いた速度検層によつて判明してきている<sup>17)</sup>。

### (3) 速度層について

地震探鉱屈折法は地層を速度によつて区別するという性質を持つているため、わが国においては盛んに実施され将来もさらに広く利用されるものと思われる。縦波速度と層序岩相単元との対比は、石炭地域については、飯田<sup>9)</sup>、栗原<sup>13)</sup>によつてまとめられて、屈折断面図の地質的解釈に広く利用されている。しかし最近関東平原下における石油胚胎の可能性を吟味するために、屈折法による地震探鉱が実施されるにあたり、新第三系内の地層区分に対して、上述の対比の概念をそのまま外挿することによつては、地層と速度層との対比がうまく行かないことが、指摘されてきている<sup>15)20)</sup>。

速度層の意味や、その地層との対比の問題点については、金子<sup>14)</sup>が論理的に明快に分析しているが、その速度層についての考察を、今回の実験および最近報告されている種々の資料によつてさらに拡張してみたいと思う。

弾性波速度が均質な地層というものが、まず存在しないことは、最近の Wyllie<sup>23)</sup>、Hicks<sup>9)</sup>あるいは、二本木<sup>17)</sup>、伊王島<sup>16)</sup>、奈井江<sup>2)</sup>等の速度検層によつてほぼ問題のないことと考えられる。縦波速度というものが、孔隙率、framework によつて支配されることを考えれば、孔隙率、framework の均質な地層がまず存在しな

註2) 音響インピーダンスとは密度と弾性波速度との積である。したがって縦波速度が等しくとも、密度の異なる境界面からも反射があることが、松沢<sup>14)</sup>によつて指摘されている。またどの程度に薄い異なつた速度層において、現在普通に使われている弾性波の周波数に対して、反射波が期待されるかということについては、きわめて初等的ではあるが1つの考察を加えてみたので文献17を参照されたい。

いということは、堆積学的にも、当然のことと考えられよう。

屈折法の初動走時曲線から得られる縦波速度は、それに対する速度をもつた地層が、存在していることを意味するだけであつて、その厚さについては、下部の速度層の深度計算を行うにあつて計算の便宜上仮定されたものにほかならない。したがつて2つの速度境界に挟まれる区間が1つの速度層として認められるか、またその区間の平均速度が屈折法の初動走時に対応する速度に対応するかどうかは、金子も指摘しているように well shooting あるいは速度検層のような別の測定によつて判定せねばならぬことである。したがつて屈折断面図の地質的解釈に際しては、まず屈折面が地質的な何に対応するかを吟味し、well shooting その他の方法による速度層の判定を行つて、その速度層が岩相的に何に対応するかを吟味し、それから層序岩相単元の対応を吟味すべきであろう。その際、砂泥比や等層厚線図その他種々の堆積相解析 (sedimentary facies analysis) と速度また速度層とを結びつけているものは、孔隙率、密度、framework, texture などの岩石の物理的性質と砕屑岩の岩石学的性質であろうと思われる。

弾性波速度の境界というものが、岩相上からも明瞭に層序岩相単元の境界に対応している場合には、上記の手續をある程度省略しても、たいした問題が起らないと思われるが、対比の手續は充分理解されている必要があると思われる。対比の手續きを模式的に表わしてみると第5図のようになるとと思われる。

筆者はこのような過程をふむことによつて、地震探査の諸結果というものが、堆積学的な探査にも有効に利用されうるものと信じている。

## 6. 要約および結論

含有水分に伴う弾性的速度の変化が、弾性的速度を

control している factor を調べるのに非常に有効であることがわかつたので、この方法によつて石化に伴う砂質砕屑岩の弾性的性質の変化を調べてみた。すなわち、前回の中・粗粒砂岩に引き続き、今回は、新第三系滝川層の柔い siltstone について同様な、含有水分に伴う縦波速度の変化について実験を続けた。

その結果 (1) この程度に柔い (孔隙率、47.8%、飽和状態の縦波速度 1.54km/sec) 砕屑岩についても、固まつた中・粗粒砂岩と同じように、含水飽和状態から乾燥状態への速度変化は、framework と孔隙率と内部圧力とによつて支配されること、(2) その縦波速度は、飽和状態では、おもに構成弾性粒子と水との混合物モデルによつて定まり、部分的含水の状態では framework の速度まで小さくなること、(3) その横波速度は framework によつて定まり、含水の多少に関係しないこと、(4) したがつて飽和状態でのポアソン比は、0.5 に近い値になること等がわかつた。

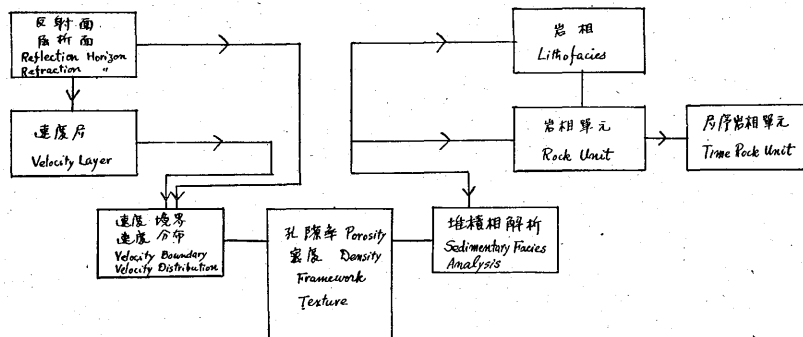
次に縦波速度—含水率曲線から framework が分離されるのでさらに多くの試料についての実験を行い、孔隙率の変化に伴う framework の発達の様子を調べてみた (第3図)。その結果

(1) 孔隙率と framework の強さとの関係は変動が大きいけれども、一般的に、孔隙率が小さくなるにつれて、framework の強さが大きくなる傾向が認められ、(2) ある程度孔隙率が小さくなると (約20%以下) framework の強さと孔隙率とは無関係になることがわかつた。

前回と今回の資料から石化に伴う砕屑岩の弾性的性質の変化を要約すると、第4表に示すようになる。

以上の諸結果が、地震探査の調査技術や解釈についていかに関係するか考察して、

(1) 反射法における noise の1つになつている表面波について、その性質を決定する横波速度は案外小さ



第5図 地震探査結果の地質的解釈の模式的手続  
Schematic Diagram of Correlation Procedure Between Seismic Units and Stratigraphic Units

いのではなからうか。

(2) 反射面は岩相 (lithofacies) にまず対応するのではなからうか。

(3) 反射面, 屈折面, 速度層等の地震探鉱の結果を地質的に解決する場合には第5図に示されるような過程を通るべきではないか。

というようなことが考えられた。

謝 辞 この稿を終わるにあたり, 終始御指導と御検討をいただいた名古屋大学飯田汲事博士に厚く感謝の意を表わしたい。

#### 文 献

- 1) Athy, L. F.: Density, Porosity and Compaction of Sedimentary Rocks, Vol. 14, No. 1, 1930
- 2) 物理探査部: 奈井江試錐コアを用いた速度検層, 地質調査所, (未発表)
- 3) Dix, C. W.: The Mechanism of Generation of Long Waves from Explosions, Geophys., Vol. 20, No. 1, 1955
- 4) Gassmann, F.: Über der Elastizität Poröser Medien, Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gessellschaft in Zurich, Heft 1, 1951
- 5) Hamilton, E. L., et al.: Acoustic and other Physical Properties of Shallow-water Sediments Off San Diego, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 28, 1956
- 6) Hicks, W. G. & J. E. Berry: Application of Continuous Velocity Logs to Determination of Fluid Saturation of Reservoir Rocks, Geophys., Vol. 21, 1956
- 7) Iida, K.: On the Elastic Property of Soil, Particularly in Relation to its Water Content, 地震研究所彙報, Vol. 18, 1940
- 8) 飯田汲事: 丸ノ内における地表上の弾性と収縮性について, 地震研究所彙報, Vol. 19, 1940
- 9) 飯田汲事外5名: 本邦炭田における地震探鉱調査結果の総括, 物理探鉱, Vol. 4, No. 2, 1954
- 10) Jolly, R. N.: Investigation of Shear Waves, Geophys., Vol. 21, 1956
- 11) 金子徹一: 屈折法の適応性とその限界(3), 物理探鉱, Vol. 7, No. 2, 1954
- 12) Krumbein, W. C.: Some Relation Among Sedimentation, Stratigraphy and Seismic Exploration, Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Vol. 35, No. 7, 1951
- 13) 栗原重利: 宇部海底炭田の地震探査並に炭田の速度層の解釈, 九州鉱山学会誌, Vol. 22, No. 3, 1954; Vol. 22, No. 4, 1954
- 14) 松沢武雄: 弾性波の反射および屈折, 地質鉱床と物理探鉱(下), 1950
- 15) 村岡秀記: 多古茂原地区地震探鉱調査報告, 地質調査所, (未発表)
- 16) 南雲昭三郎: 伊王島試錐コアを用いた速度検層, 地質調査所, (未発表)
- 17) 南雲昭三郎: 二本木R1の試錐コアを用いた速度検層, 地質調査所, (未発表)
- 18) Paterson, N. R.: Seismic Wave Propagation in Porous Granular Media, Geophys., Vol. 21, 1956
- 19) Riggs, E. D.: Seismic Wave Types in a Borehole, Geophys., Vol. 20, 1955
- 20) 品田芳二郎: 関東南部地震探鉱結果の地質的解釈, 地質調査所, (未発表)
- 21) White, J. E. & R. L. Sengbush: Velocity Measurements in Near-Surface Formations, Geophys., Vol. 18, 1953
- 22) White, J. E., S. N. Heaps & P. L. Lawrence: Seismic Waves from a Horizontal Force, Geophys., Vol. 21, 1956
- 23) Wyllie, M. R. J., et al.: Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media, Geophys., Vol. 21, 1956