

東京大学大学院新領域創成科学研究科

環境システム学専攻

平成 28 年度

修士論文

# 偏差応力下における泥岩の透水性変化

2017 年 2 月 23 日 提出

指導教員：徳永 朋祥 教授

47156678 野口真未

## 目次

目次.....	i
図目次 .....	iii
表目次 .....	iv
1. 序論 .....	1
1.1. 研究背景.....	1
1.1.1. 石油の一次移動.....	2
1.1.2. 泥岩と亀裂.....	3
1.1.3. 含有鉱物と泥岩の変形.....	3
1.2. 本研究の目的.....	3
1.3. 本論文の構成.....	4
2. 岩石試料の選定 .....	5
2.1. 女川層 .....	5
2.3 岩石の整形方法.....	9
3. 岩石物性の計測 .....	11
3.1 間隙率の測定 .....	11
3.1.1. 測定方法.....	11
3.1.2. 測定結果.....	11
3.2. 含有鉱物の推定 .....	12
3.2.1. 測定機器.....	12
3.2.2. 測定方法.....	13
3.2.3. 測定結果.....	20
3.3. 岩石強度測定.....	22
3.3.1. 測定機器.....	22
3.3.2. 測定方法.....	22
3.3.3. 測定条件.....	24
3.3.4. 測定結果.....	25
4. トランジェントパルス試験.....	28
4.1. 実験装置及び試料の概要 .....	28
4.2. 実験方法.....	30
4.3. 解析方法.....	30
4.3.1. Hsieh の解析方法(Hsieh et al, 1981) .....	30

4.3.2. マクロによる解析プログラム.....	32
4.4. フィッティングの誤差に関して .....	33
4.5. 実験条件.....	34
5. 実験結果.....	35
6. 考察 .....	42
6.1. 来待砂岩による偏差応力下の透水係数と比貯留係数の挙動.....	42
6.2. 女川層の三軸試験結果から推定される変形の違い .....	45
6.3. 女川層の透水係数と比貯留係数の挙動と変形 .....	46
7. まとめ.....	48
謝辞.....	50
参考文献 .....	51
<b>Appendix A</b>	
<b>Appendix B</b>	
<b>Appendix C</b>	

## 図目次

図 1.1	シェールオイル開発と従来の石油生成の仕組みの概要図.....	1
図 1.2	石油生成時の根源岩中の微小亀裂と炭化水素の侵入(Tissot and Welte,1984) ....	2
図 2.1	矢島地域及び周辺地域の地質略図 (大沢、1988) .....	6
図 2.2	秋田地域含油第三系標準層序表 (大沢、1988) .....	7
図 2.3	秋田県由利本荘市地図 (★が採取地図) .....	7
図 2.4	女川層採取場所 .....	8
図 2.5	採取した女川層泥岩 .....	8
図 2.6	コアリングマシン (諫早砂岩のブロックをコア抜き中の様子) .....	9
図 2.7	岩石カッター .....	10
図 2.8	平面研削機.....	10
図 3.1	水中重量を測定する様子.....	11
図 3.2	女川層の間隙率測定試料 (飽和状態) .....	12
図 3.3	女川層の間隙率測定試料 (乾燥状態) .....	12
図 3.4	XRD で用いた装置.....	13
図 3.5	XRF で用いた装置 .....	13
図 3.6	XRD と XRF で使用した試料粉末(75 $\mu$ m) .....	15
図 3.7	XRD で使用した試料.....	15
図 3.8	試料を XRD 装置に設置した時の様子.....	15
図 3.9	XRF 用の薄膜試料製作前 .....	16
図 3.10	XRF 用の薄膜試料製作後 (この写真ではアルミ製のリングを使用している) .....	16
図 3.11	実際に試験に使用した女川層の XRF 薄膜試料.....	16
図 3.12	XRF 薄膜試料のホルダー作成 .....	17
図 3.13	XRF 装置へのホルダー設置の様子.....	17
図 3.14	8 時間後の混濁液.....	18
図 3.15	チューブによる採取の様子 .....	18
図 3.16	採取した混濁液.....	19
図 3.17	乾燥後の分析試料.....	19
図 3.18	各種粘土鉱物の定方位 X 線回折パターン(吉村、2001).....	20
図 3.19	不定方位法での女川層の XRD 結果 .....	21
図 3.20	定方位法での女川層の XRD 結果.....	22
図 3.21	三軸圧縮試験機概略図.....	23
図 3.22	ゴムスリーブに入れた試料の装置への設置途中の状態 (左) と三軸試験機設置後の状態(右).....	23
図 3.23	TEST1 の時間経過周圧と軸圧の制御.....	24

図 3.24	TEST2 の時間経過周圧と軸圧の制御.....	25
図 3.25	三軸圧縮試験 (TEST1、TEST2) のひずみ応力線図.....	26
図 3.26	試験後の試料 (左 : TEST1、右 : TEST2) .....	27
図 4.1	トランジェントパルス試験機概要図.....	29
図 4.2	トランジェントパルス試験機.....	29
図 4.3	Hsieh の理論解を用いた実験値解析の流れ .....	32
図 4.4	諫早砂岩による実験シミュレーションの結果.....	33
図 5.1	女川層での透水試験の圧力拡散の様子 (等圧 23 MPa のとき) .....	36
図 5.2	フィッティング時のデータ (20 MPa 時) .....	36
図 5.3	フィッティングの度合いが悪い時の例(30 MPa 時).....	37
図 5.4	等圧条件下での女川層の透水係数と比貯留係数の挙動 .....	38
図 5.5	偏差応力下に女川層における透水係数と比貯留係数の挙動.....	39
図 5.6	実験後の試料の様子 .....	40
図 5.9	様々な封圧下での Wombeyan 大理石の破壊あるいは流動の形式 (Paterson,1958) .....	41
図 6.1	来待砂岩の偏差応力下における透水係数の挙動.....	44
図 6.2	来待砂岩の偏差応力下における比貯留係数の挙動.....	44
図 6.3	来待砂岩の偏差応力下における体積弾性率の挙動.....	45
図 6.4	TEST1 と TEST2 の応力パス .....	45
図 6.5	女川層の透水試験と変形の割合との関係 .....	47

## 表目次

表 3.1	間隙率測定結果 .....	11
表 3.2	不定方位法での女川層の XRF 結果.....	21
表 4.1	水圧測定間隔のシステム.....	30

# 1. 序論

## 1.1. 研究背景

近年、二酸化炭素地中貯留や放射性廃棄物の地層処分、シェールオイル、シェールガス開発などといった、地下利用が注目されている。これらの地下利用において、重要な役割を果たすものの1つが泥岩である。泥岩は、主要な構成好物が  $62.5 \mu\text{m}$  以下の粒径で出来ており、二酸化炭素地中貯留でのシールや、石油システムからみれば、根源岩やシェールガスの貯留層などといった様々な役割を果たしている (Andrew and Joe (2011))。

例えば、シェールオイル開発について考えてみる。シェールオイル開発と従来の石油生成の仕組みの概要図を図 1 に示す。普段、我々が使用しているような石油は、有機物が堆積物と共に長い年月をかけ、埋没していく際に、油やガスを生成し、埋没した堆積物はやがて隙間が非常に小さい根源岩となり、その根源岩中をゆっくりと移動してキャリアベッドへと移動する。この移動を一次移動という。その後、キャリアベッド中を移動する。これを二次移動という。この 2 つの移動の工程を経て、トラップ構造化の油層に集積した石油を井戸から引き上げることで石油を生成している (石油技術協会(2014))。

しかしながら、シェールオイル開発では、図 1 の中央に示すように、根源岩であるシェール層に対して、直接井戸を掘り、水圧破砕で人工的に亀裂を作ることで、そこから取り出される石油資源を用いるという仕組みである (Howarth, 2011)。しかし、従来の石油生成で述べた移動の工程が起こっている場合、根源岩からの資源は失われ、効率の良いシェールオイル開発が難しくなる。

つまり、隙間の非常に小さい泥岩の透水性について検討することはシェールオイル開発やその他の地下利用によって、泥岩が期待されるような役割を果たせるのかという課題における 1 つの見解となりうる。

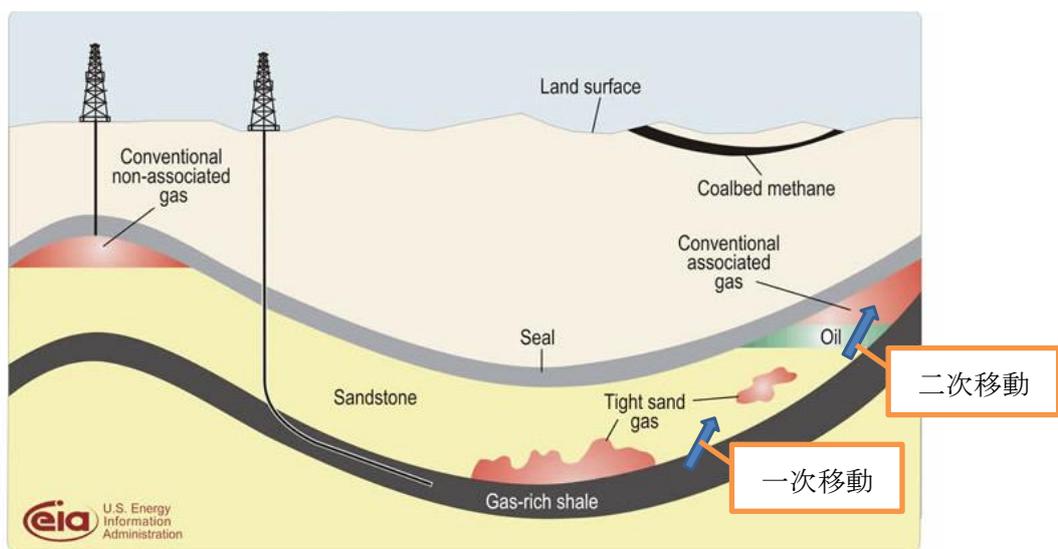


図 1.1 シェールオイル開発と従来の石油生成の仕組みの概要図

1 ([http://www.eia.gov/oil\\_gas/natural\\_gas/special/ngresources/ngresources.html](http://www.eia.gov/oil_gas/natural_gas/special/ngresources/ngresources.html) に加筆)

### 1.1.1. 石油の一次移動

1.1でも述べたように、石油は一次移動と二次移動という地層中の移動を行うことがわかっているが、泥岩中の石油の移動は一次移動にあたるので、この項では、一次移動について詳しく説明をする。

石油の一次移動は、1980年代あたりから原因や効果について検討されてきているが、未だに、科学的な議論がなされており、未知である部分も多い (Mann, 2015)。Tissot and Welte(1984)によれば、一次移動として、根源岩が 1500 m 程度まで沈下した時点で起こる Early migration と 3000 m 以深で起こる Late migration の2つがあるとされている。一般的な石油の生成は、有機物が 1500 m 以深でケロジェンとなり、ケロジェンが熱分解することで石油が生成し、それが地中を移動して生産されるが、Early migration の場合は、このような十分な炭化水素が生成される前に出来た微量な石油が、圧密に伴う間隙水の放出で、間隙水に溶け込んだ状態で石油が移動する。これに対して、石油生成のほとんどは 3000 m 以深での Late migration で行われており、現段階で考えられている原因は圧力駆動流である。3000 m 以深までの圧密でそれまで根源岩中の間隙を満たしていた水に比べて体積が大きいガスや石油が生成され、分離した石油の相が濡れ性の間隙を通過して、移動すると考えられている。しかし、これは、石油の相が間隙の毛管圧を超えなければならない (Tissot and Welte,1984)。

また、Late migration では、間隙圧の上昇などにより、根源岩に亀裂ができ、そこから石油が追い出されるということも言われている(Tissot and Welte,1984) (図 2)。しかし、これに対して、石油生成で発生するような微小亀裂では亀裂が回復することで、石油が移動する通り道にはなりえない(Mann, 2015)とも言われている。

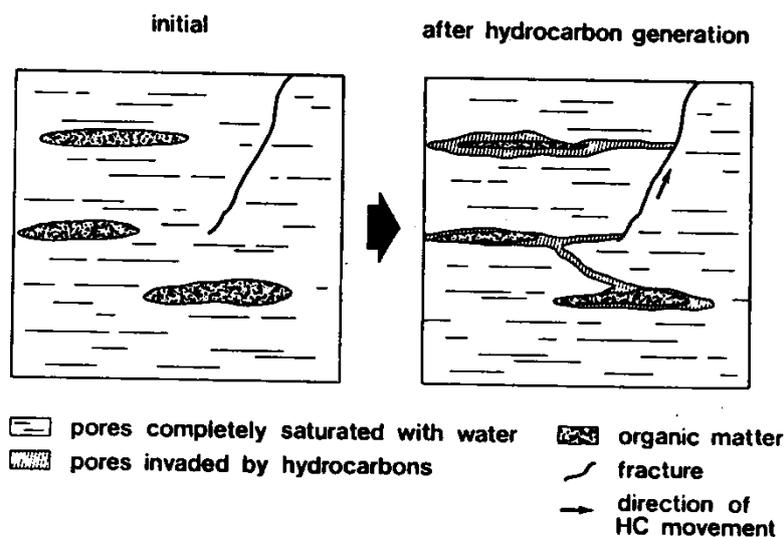


図 1.2 石油生成時の根源岩中の微小亀裂と炭化水素の侵入(Tissot and Welte,1984)

### 1.1.2. 泥岩と亀裂

泥岩の透水性に関しては今まで様々な研究がされているが(例えば、Pierre et al. (2014))、泥岩の無垢な岩石では、 $10^{-9} \sim 10^{-11}$  m/s とかなり透水係数が低い(酒井他 (2009))。そのため、放射性廃棄物の処理などに期待されている地域の泥岩の透水係数に関する研究は特に行われている。その一例として、挙げられるのは、**Boom Clay** である。**Boom Clay** は、ベルギーの北東にある過圧密海洋粘土の厚い堆積物で漸新世にできたと言われている層である (Bouazza et al., 1996)。

Pierre et al.(2014) は **Boom Clay** に関して、三軸圧縮試験と透水試験を行い、更に X 線マイクロトモグラフィーによる分析により、室内実験での偏差応力下における **Boom Clay** の透水性の挙動を明らかにしている。この既存研究によれば、**Boom Clay** は、透水性は平均有効応力に依存し、それは平均応力が 1~32 MPa へ増加した時、1/100 程度まで減少する。しかし、せん断荷重での透水性は本質的に不変で、ひずみ局在化によって影響を受けないと述べており、偏差応力下での透水性の変化がないということが明らかになっている。

また、Till and Klaus(2007)は岩石のダイラタンシーの概念について明らかにするために、**Opalinus clay** による偏差応力下での室内試験を行った。これは微小亀裂の開口の実験には失敗している。この理由として、亀裂の誘発で容積増加が起こったとしても、偏差応力の載荷中であっても地盤の圧密によって重ね合わされてしまうからと考察している。

### 1.1.3. 含有鉱物と泥岩の変形

シェールオイル開発で注目されている地層の 1 つである **Barnett Shale** はテキサス州の **ForthWorth** にあるが、このシェールに関する研究の 1 つで、含有鉱物に着目した泥岩の変形に関する研究がある。Roderick and Kurt(2014)は、岩石の含有鉱物の割合によって、脆性的に変形するか、延性的に変形するかが異なると述べており、この指標を **Brittleness index (BI)** として、**Barnett Shale** に適応して、室内実験で求められる内容をもとに地震波データからの推定を試みた。この既存研究以前から BI は引っ張り強度に対する圧縮強度の割合として示され、これを含有鉱物と関連付けることにより、Qz を石英、Dol をドロマイト、Ca をカルサイト、Cly を粘土鉱物、TOC を total organic carbon のそれぞれの含有量とすると、Javie(2007)では、

$$B = (Qz + Dol) / (Qz + Ca + Cly)$$

Wang and Gale (2009)では、

$$BI = (Qz + Dol) / (Qz + Dol + Ca + Cly + TOC)$$

のよう BI を定めている。

この事例のように、透水性の非常に低いとされる泥岩であっても、条件によっては、脆性破壊が起こる可能性もある。

## 1.2. 本研究の目的

1.1 のように、泥岩の偏差応力下における透水性は、亀裂の回復や延性的な変形によって

上昇することは考えにくい(Mann, 2015)とされる一方で、亀裂による透水性の高まりや脆性破壊への期待もされている(Tissot and Welte,1984)。

本来、泥岩の透水性の上昇の原因となりうる要素（例えば、1.1.3 の含有鉱物のような条件）の違いによって、偏差応力下での透水性がどのような挙動を示すのかを明らかにしたいところだが、そのためには、透水試験と変形試験の細かい関連付けが必要である。

本研究では、今まで力学的な岩石物性などが詳しく分かっておらず、さらに、シェールオイル開発に関連のある岩石を用いて、その泥岩の偏差応力下における透水性の変化と三軸圧縮試験による変形の挙動との関連付けを行うことで、泥岩の透水性の挙動について考察を行うことを目的としている。

### 1.3. 本論文の構成

本論文では、まず 2 章で、選定した岩石試料の特徴と採取場所や様子などを示し、それらを実験試料にするための試料整形の方法について述べる。3 章では、選定した泥岩についての物性として、大気圧下における間隙率測定と XRD、XRF における含有鉱物、三軸圧縮試験による岩石強度測定を行ったので、その方法と結果について述べる。4 章では、本論文の軸となるトランジェントパルス試験で行った透水試験について、実験装置の概要、実験方法と解析方法、実験条件について説明する。また、5 章では 4 章のトランジェントパルス試験から得られた結果について述べ、6 章にて 3 章で得られた情報との関連付けを行いながら、考察を行う。最後に 7 章では、本論文の結論と課題について述べる。

## 2. 岩石試料の選定

この章では、今回実験で使用した2種類の泥岩についての特徴を述べるとともに、実際に採取した場所などについて説明する。また、2.3では、2種の試料を実験に用いるために整形した様子や方法についても説明する。

### 2.1. 女川層

女川層とは、秋田県本荘市鳥田目付近から南に向かって、由利町柴倉山一帯・大砂川一帯・矢島町子吉川東方一帯などを経て、鳥海町子吉川沿いに至る地域に広く分布する(図 2.1)。層厚は200~500 mである。北東端部の東由利町では200~300 mで薄く、そのほかの大部分では、400~550 mである。秋田地域の層序や特徴は図 2.2 のようになっている(大沢、1988)。岩相としては、主として硬質泥岩からなり、全地域にわたって酸性凝灰岩を挟んでいる。非常に珪質で、珪質岩と呼ばれるものが多い。大小の泥灰岩(石灰質-苦灰質)の団塊を有する。ときに、砂岩を挟み、硬質泥岩との互層を示す。本層の最上部は暗灰色泥岩を挟んでおり、いわゆる硬軟互層を示す。ときに海緑石砂岩を伴っている(大沢、1988)。

今回、秋田県由利本荘市鳥海町栗沢小栗沢付近の川底(図 2.3、2.4)から女川層の泥岩を採取した(図 2.5)。この試料について薄片を作り、観察も行った(Appendix A①、②)。この結果から、石油生成に関与しており、シルト質であることがわかる。



図 2.1 矢島地域及び周辺地域の地質略図 (大沢、1988)

地質時代	標準層序(階)	地層名	最大層厚(m)	岩相	BLOW(1969)	浮遊性有孔虫帯	底生有孔虫帯	大形化石	
更新世 鮮新世 MA 1.7 MA 5.1	更	湯西	湯西層	70	砂岩、レキ、粘土	N.23			
		鮎川	鮎川層	300	砂岩、レキ岩、泥岩				
	新	笹岡	笹岡層	700	(砂岩) 砂質シルト岩	N.22	Globigerina pachyderma (sinist.) ~ Globigerina incompta Zone	Cribroelphidium gabei Zone	
		上部天徳寺	上部天徳寺層	700	シルト質泥岩、灰色泥岩				
	鮮	下部天徳寺	北桂浦層、下部天徳寺層	600	砂岩、暗灰色泥岩互層	N.19 N.18	Globigerina pachyderma (sinist.) ~ Globigerina quinqueloba Zone Globigerina pseudopachyderma (dest.) ~ Globorotalia orientalis Zone	Uvigerina subperforata Zone Uvigerina akitaensis ~ Epistominella pulchella Subzone Praeglobobulimina pupoides ~ Martinolletia communis Subzone	
		船川	上部七瀬灰岩、下部七瀬灰岩	1400	①黒色泥岩 ②凝灰岩				
	中	船川	船川層	1400	黒色泥岩	N.17 N.16	Barren Planktonic Foraminifera Zone	Miliammina echigoensis Zone	
		女川	女川層	700	(凝灰岩) 硬質頁岩				
	新	世	西黒沢・台島	西黒沢層	① 800 ② 580 ③ 1000	①暗灰色泥岩、砂岩、レキ岩 ②凝灰岩、凝灰角レキ岩、砂岩、レキ岩、亮岩 ③暗灰色泥岩、凝灰角レキ岩、レキ岩	N.15 N.14 N.13 N.12	Globorotalia pseudopachyderma ~ Globigerina woodi Zone	Spirosguammina compressa Zone Spirosguammina compressa Zone
			西黒沢・台島	西黒沢層	① 800 ② 580 ③ 1000	①暗灰色泥岩、砂岩、レキ岩 ②凝灰岩、凝灰角レキ岩、砂岩、レキ岩、亮岩 ③暗灰色泥岩、凝灰角レキ岩、レキ岩			
漸		門前	門前層		変朽安山岩、凝灰角レキ岩	N.11 N.10 N.9	Globorotalia peripherocuta ~ Globorotalia morimachi Zone Globorotalia peripherocuta ~ Globorotalia morimachi Zone	Hopkinsina morimachiensis Zone	
		赤島	赤島層		凝灰角レキ岩				
先第三紀		(基盤)		花コウ岩、古生層				河内合利植物群 門ノ沢動物群 Miosagmina kotoi Desmostylus japonicus Makiyama chitami 大桑一万願寺動物群 Turritella otukai Turritella andensis	

図 2.2 秋田地域含油第三系標準層序表 (大沢、1988)

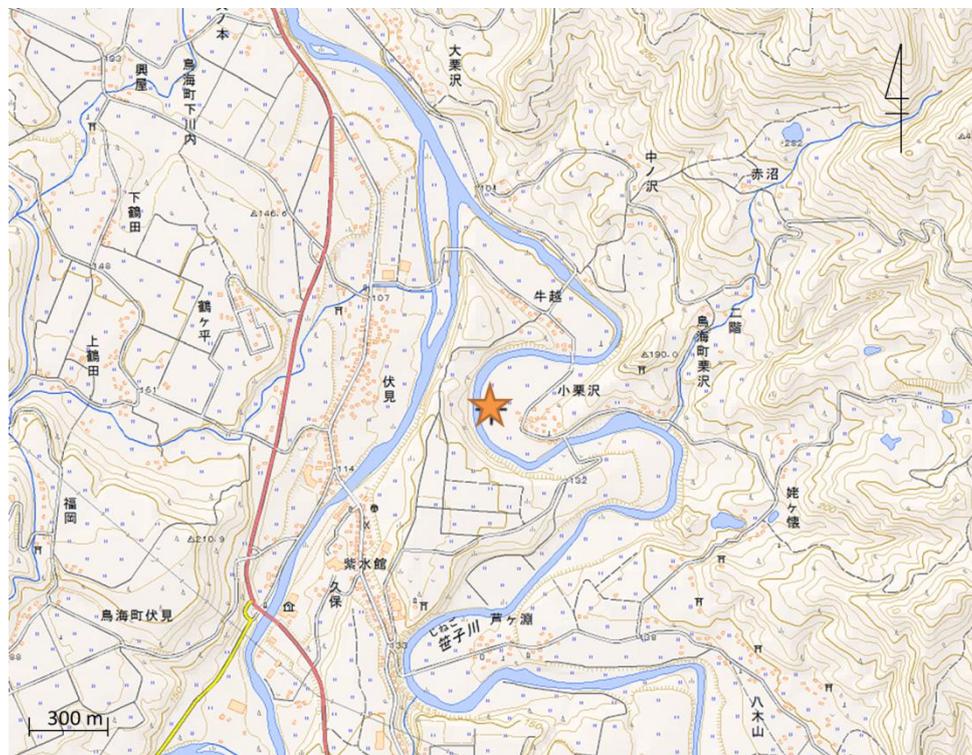


図 2.3 秋田県由利本荘市地図 (★が採取地図)



図 2.4 女川層採取場所



図 2.5 採取した女川層泥岩

### 2.3 岩石の整形方法

実験で使用した試料は、直径 50 mm、高さ 100 mm のものと、直径 50 mm、高さが 50 mm の 2 種類である。試料整形は、東京大学本郷キャンパスにある設備を用いた。

まず、岩石試料を岩石ハンマーで叩いて、層理面の確認を行った。次にコアリングマシンに岩石ブロックをセットし、層理面に対して垂直にコアが抜けるように角度と高さを調整した。岩石ブロックから直径 50 mm のコアを抜き取り（図 2.6）、抜き取ったコアが整形したい試料より 3 mm 程度（約 53 mm、もしくは 103 mm）余裕を持ったものにするために、岩石カッター（図 2.7）を用いて、切り取った。その後、磁石で試料を固定して、試料の両端が平行になるように、平行研削機（図 2.8）で、試料の両端を研磨して、試料の長さが 50 mm もしくは 100 mm になるように研磨した。整形後はラップで覆い、蒸留水を入れた容器に岩石を保存し、湿潤状態を維持できるようにした。



図 2.6 コアリングマシン（諫早砂岩のブロックをコア抜き中の様子）



図 2.7 岩石カッター



図 2.8 平面研削機

### 3. 岩石物性の計測

#### 3.1 間隙率の測定

##### 3.1.1. 測定方法

今回の間隙率測定では、懸吊法という方式で、間隙率を求めた。懸吊法の原理としては、試料を水で満たした状態の重量 ( $W_{wet}$ ) と十分に乾燥させた状態の重量 ( $W_{dry}$ )、更に飽和状態の試料水中に吊って浮力を含めた重量 ( $W_{underwater}$ ) を測定すること (図 3.1) で、間隙率 ( $\phi$ ) を以下のように求めることができる。

$$\phi = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{wet} - W_{underwater}} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

今回は、トランジェントパルス法と力学試験での測定で用いるための試料整形で余った試料を用いて計測を行った。飽和と乾燥の方法としては、試料を水で満たすために、2日間程度脱気を行い、また、乾燥状態にするために、110°Cの炉で1日程度乾燥させた。



図 3.1 水中重量を測定する様子

##### 3.1.2. 測定結果

間隙率測定の結果、女川層の泥岩重量と間隙率は以下のようになった (表 3.1)。また、間隙率測定に用いた試料の湿潤状態と乾燥重量の様子を以下に示す (図 3.2,3.3)。

表 3.1 間隙率測定結果

	湿潤重量 ( $W_{wet}$ )	乾燥重量 ( $W_{dry}$ )	水中重量 ( $W_{underwater}$ )	間隙率 ( $\phi$ )
女川層	94.87(g)	70.61(g)	42.30(g)	46.15(%)



図 3.2 女川層の間隙率測定試料（飽和状態）

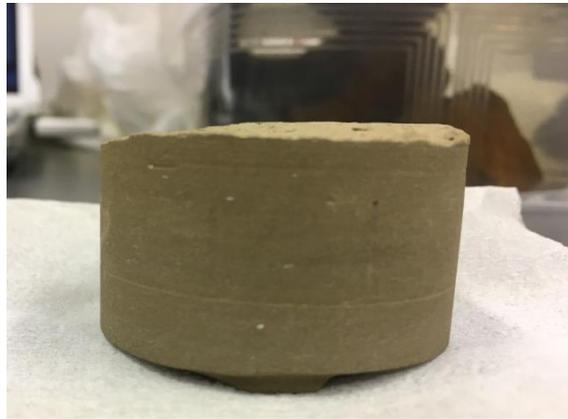


図 3.3 女川層の間隙率測定試料（乾燥状態）

### 3.2. 含有鉱物の推定

試料全体として、どのような鉱物が含まれているか調べる不定位法と呼ばれる XRD と、同じ状態の試料において、XRF を行うことでどのような元素が含まれているかを調べた。その後、特に粘土鉱物についての詳細を知るために XRD にて、粘土鉱物のピークが出やすい  $20^\circ$  までの定方位法を用いて、粘土鉱物の詳細について分析した。測定機器や具体的な測定方法とその結果について以下で説明する。

#### 3.2.1. 測定機器

##### 【XRD】

大成建設技術センターにある BRUKER B52-007（図 3.4）と呼ばれる X 線回折装置を用いて行った。この装置はガラスの試料板の溝に試料を詰めて、その試料板を装置中に設置して測定を行う。

##### 【XRF】

XRF は Rigaku 製 ZSX Primus II（図 3.5）の走査型蛍光 X 線分析装置を用いた。薄膜試料を作るため、今回はポリプロピレンのリングを使用した。



図 3.4 XRD で用いた装置



図 3.5 XRF で用いた装置

### 3.2.2. 測定方法

まず、分析を行うために、全ての試験に共通して、岩石試料を 70℃で 2 日間乾燥させ、75 $\mu$ m の粒子に細かくする作業を行った (図 3.6)。

#### 【XRD-不定方位法】

粉砕した試料を試料板に載せ、試料板の溝に試料が収まる適量をのせ、つぶしながら平らにした。この面が平らになっていないと測定時のピークがずれるので、光に当てながら、

凹凸がないか確認しながら作業を行った。作った試験体を XRD 装置に設置し、 $2\theta$  が  $4\sim 60^\circ$  の広い区間のピークを測定した (図 3.7, 図 3.8)。

#### 【XRF】

粉末状にした試料をポリプロピレンのリングに入れて、 $20\text{ t}$  の力で、押しつぶし固めた (図 3.9, 3.10)。出来上がった薄膜試料が図 3.11 のようなものである。この薄膜試料を分析用のホルダーに入れた (図 3.12)。その後、試料を入れたホルダーを XRF 装置に設置した (図 3.13)。

#### 【XRD—粘土鉱物の測定】

XRD での粘土鉱物の測定を行うためには、粘土粒子 ( $< 2\mu\text{m}$ ) を分離して、定方位法で試験する必要がある。この下準備や同定の方法などは吉村(2001)を参考に行った。

測定準備は次のように行った。不定方位法で用いた既に粉碎してあるものから水ひ法で  $2\mu\text{m}$  以下の粒子を取り出したが、そこから採取できた試料の量はとても少なかったため、追加で試料を乳鉢でつぶして蒸留水を加えながら静かにほぐして分散させたものを前者と同様に水ひ法で分離を行った。

今回行った水ひ法は、図 3.14 のようなシリンダーに蒸留水で分散させた原試料を入れて、よく攪拌した後、8 時間放置し、上から  $10\text{ cm}$  の懸濁液をチューブを使って回収して (図 3.15、3.16)、この懸濁液を遠心分離機にかけることで、粘土粒子を沈殿させた。沈殿させた粘土粒子を自然乾燥させた。この分析用試料は図 3.17 である。

この放置時間はストークスの法則に従っており、 $t$  を沈殿時間 (min)、 $\eta$  を水の粘性率 ( $20^\circ\text{C}$  で  $1.00 \times 10^{-2}\text{ dyne}\cdot\text{sec}/\text{cm}$ )  $h$  を沈下距離 (cm)、 $g$  を重力加速度 ( $980\text{ cm}/\text{sec}^2$ )、 $\sigma$  を粒子の比重、 $\rho$  を水の比重、 $D$  を粒子 (cm) の直径とすると、

$$t = 0.3\eta h / g(\sigma - \rho) D^2 \quad \dots \dots (3.2)$$

のように規定されている。

上記の方法で得た粘土鉱物を XRD に  $2\theta$  が  $20^\circ$  以下の角度でかけた結果から、粘土鉱物の同定を行った。吉村(2001)では、格子面間隔では、カオリン鉱物、蛇紋石、緑泥石を  $7\text{ \AA}$ 、パイロフィライト、タルクを  $9.3\text{ \AA}$ 、雲母粘土鉱物、ハロイサイトを  $10\text{ \AA}$ 、緑泥石、バーミキュライト、スメクタイトを  $14\sim 15\text{ \AA}$  としている (図 3.18)。この各種粘土鉱物の定方位 X 線回折パターンとの実験結果のピークの比較により、同定を行った。

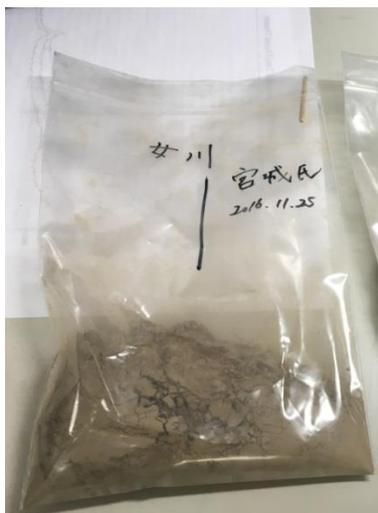


図 3.6 XRD と XRF で使用した試料粉末(75 $\mu$ m)



図 3.7 XRD で使用した試料

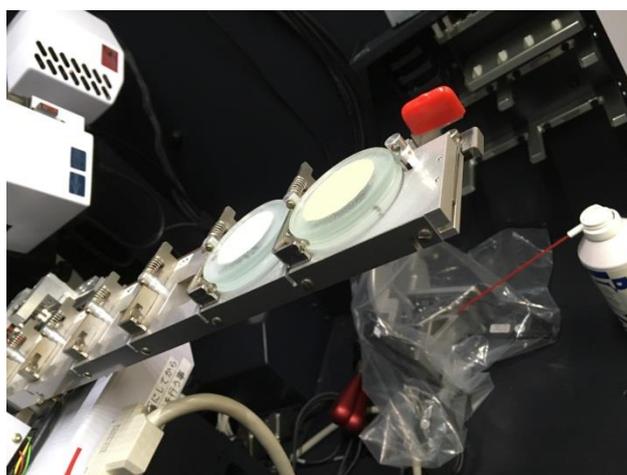


図 3.8 試料を XRD 装置に設置した時の様子



図 3.9 XRF 用の薄膜試料製作前



図 3.10 XRF 用の薄膜試料製作後（この写真ではアルミ製のリングを使用している）



図 3.11 実際に試験に使用した女川層の XRF 薄膜試料



図 3.12 XRF 薄膜試料のホルダー作成



図 3.13 XRF 装置へのホルダー設置の様子

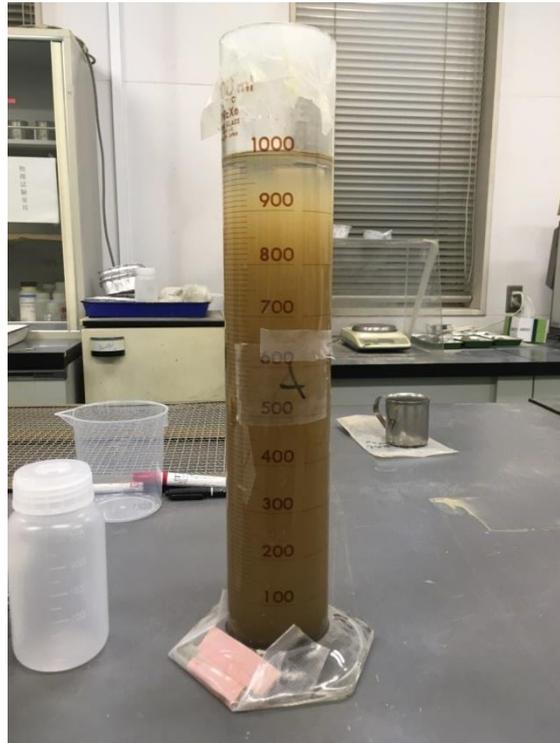


図 3.14 8 時間後の混濁液



図 3.15 チューブによる採取の様子



図 3.16 採取した混濁液



図 3.17 乾燥後の分析試料

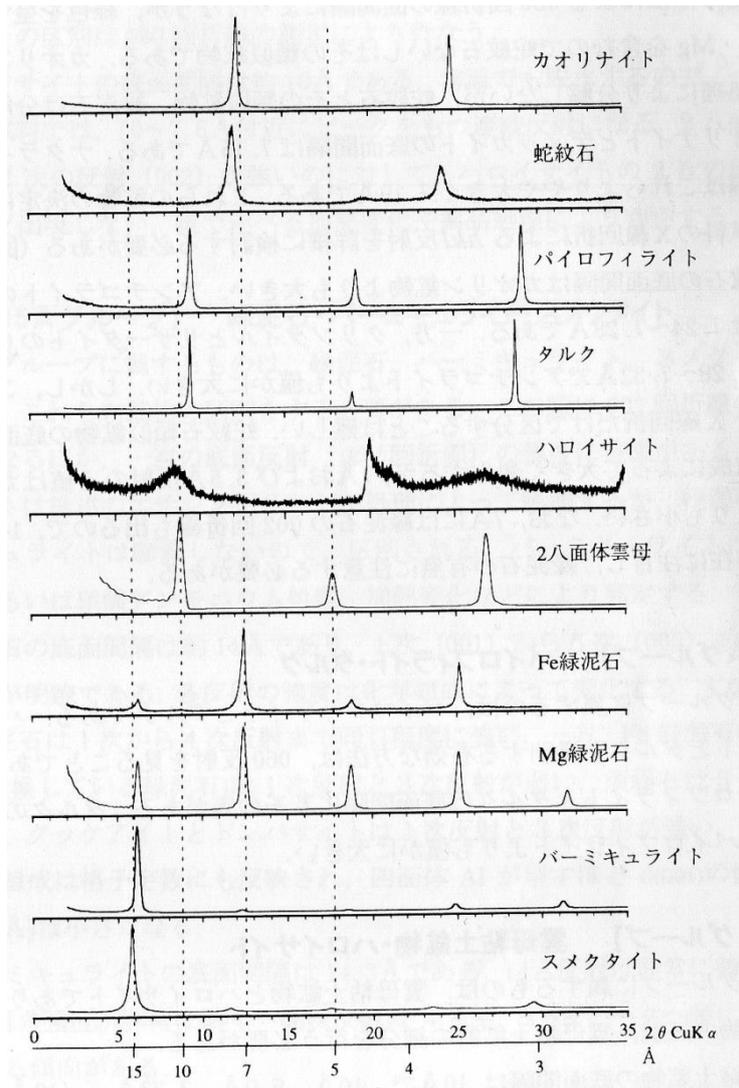


図 3.18 各種粘土鉱物の定方位 X 線回折パターン(吉村、2001)

### 3.2.3. 測定結果

不定方位法による分析結果は図 3.14 のようになっており、ほとんどのピークが石英になってしまい、粘土鉱物などの詳細がわからない。XRF の結果と合わせてみても、石英が特に多く含まれていることがわかる。

定方位法では、 $2\theta$  の 8、10、20 付近で主なピークが見られた。8 と 20 にピークが見られる事から、おそらく、2 八面体雲母であると考えられる。また、10 のピークはパイロフィライトと考えられる。

onnagawa\_161125 (Coupled TwoTheta/Theta)

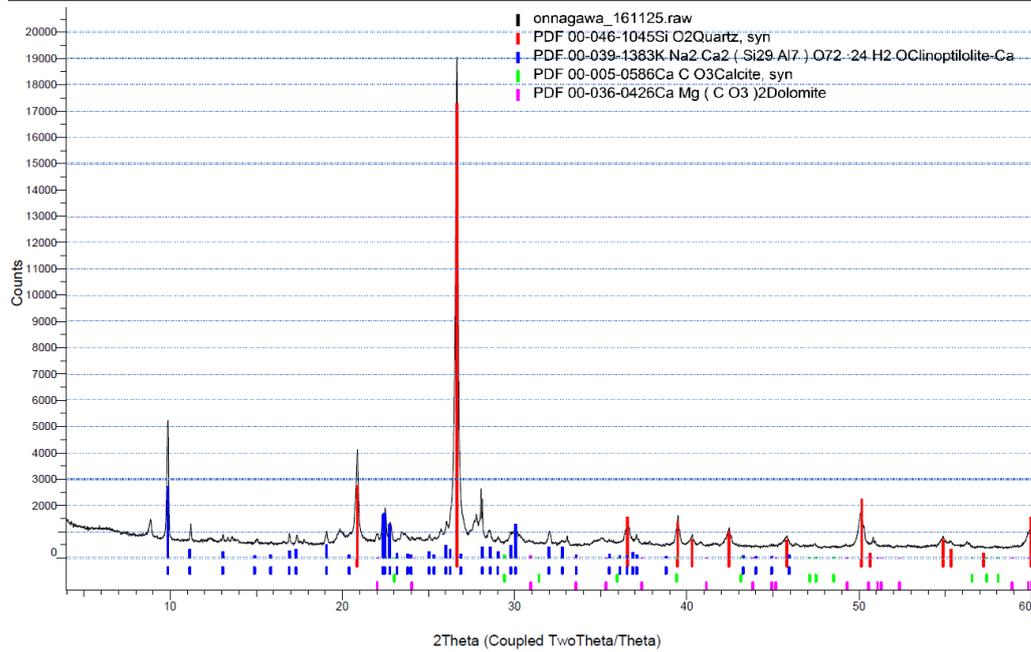


図 3.19 不定方位法での女川層の XRD 結果

表 3.2 不定方位法での女川層の XRF 結果

バルク 成分名	酸化物 分析値(mass%)	バルク 成分名	金属 分析値(mass%)
CO <sub>2</sub>	14.7542	C	3.8556
Na <sub>2</sub> O	0.5128	O	56.073
MgO	0.6458	Na	0.3693
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.3184	Mg	0.377
SiO <sub>2</sub>	68.6596	Al	4.2458
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.2335	Si	30.6818
SO <sub>3</sub>	1.2648	P	0.0956
K <sub>2</sub> O	1.5041	S	0.4748
CaO	1.2799	K	1.1681
TiO <sub>2</sub>	0.3715	Ca	0.8539
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.4225	Ti	0.2074
SrO	0.0215	Fe	1.5732
ZrO <sub>2</sub>	0.0113	Sr	0.0168
		Zr	0.0078

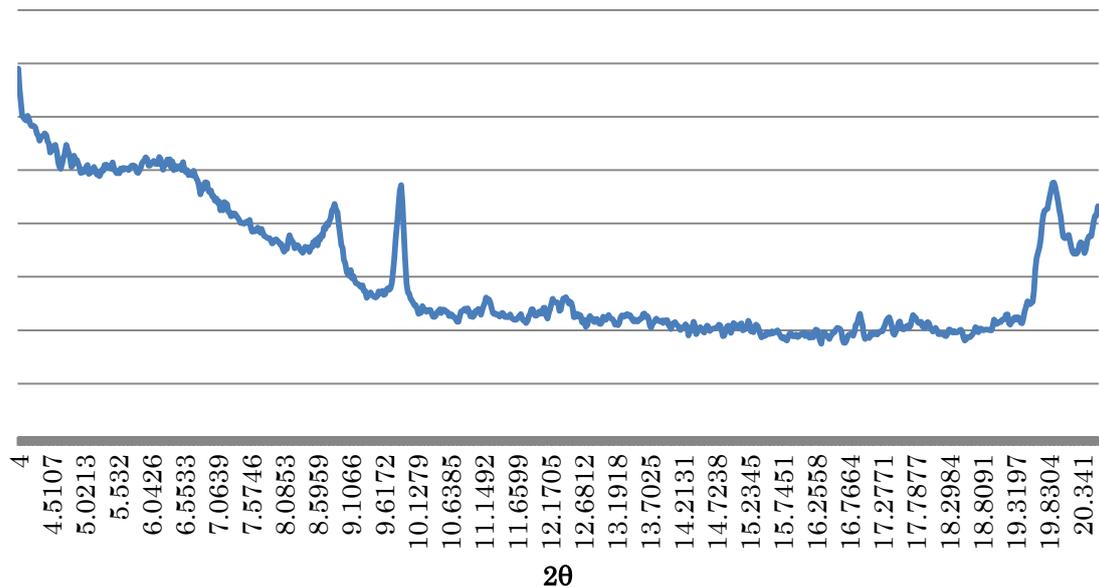


図 3.20 定方位法での女川層の XRD 結果

### 3.3. 岩石強度測定

本研究では、三軸圧縮試験機を用いて異なる方法で女川層での強度測定を行った。

#### 3.3.1. 測定機器

強度測定は同じ測定器機を用いた。使用した試験機は産総研にある油圧式の周圧载荷装置を用いて試験を行った (図 3.21)。荷重は最大 100 t かけることができ、周圧载荷には TELEDYNE ISCO MODEL 260D というシリンジポンプを使用しており、30 MPa まで操作可能である。間隙水圧のシリンジポンプは ISCO MODEL 500D を用いていて、試料の両端にそれぞれシリンジポンプが設置されている。

#### 3.3.2. 測定方法

強度測定で用いる試料は直径 50 mm、高さを 100 mm として整形したものをを用いて、約 2 日間、真空引きを行ったものをを用いた。通常の岩石強度測定では岩石自身にひずみゲージを取り付けることにより、岩石の変形をより正確に調べる方法を用いられる (Paterson, 1978) が、今回用いた泥岩は乾燥によりひび割れる可能性があったため、ひずみゲージの取り付けを避けて圧力容器の外部に設置したロードセルの変位によってひずみの測定を行った。また、周変位については MTS 製のシェーン式周変位計 (632.92-H03) を用いた。ひずみゲージを用いないという点では、軸载荷に用いるロッドと圧力容器とが接する部分における摩擦を含むため、岩石にかかる荷重そのものとは言い切れないが、今回は、軸圧もしくは

周圧が約 30 MPa という固定値での変形の挙動を見たかったので、試験前に亀裂が入ってしまうようなことがないように、試料の乾燥を防ぐ形で試験を行った。岩石はアメゴムのチューブをゴムスリーブとして用いて、岩石の上下に間隙水を通す部品を取り付け、直径 45 mm の O リングを 2 箇所につけた (図 3.22)。

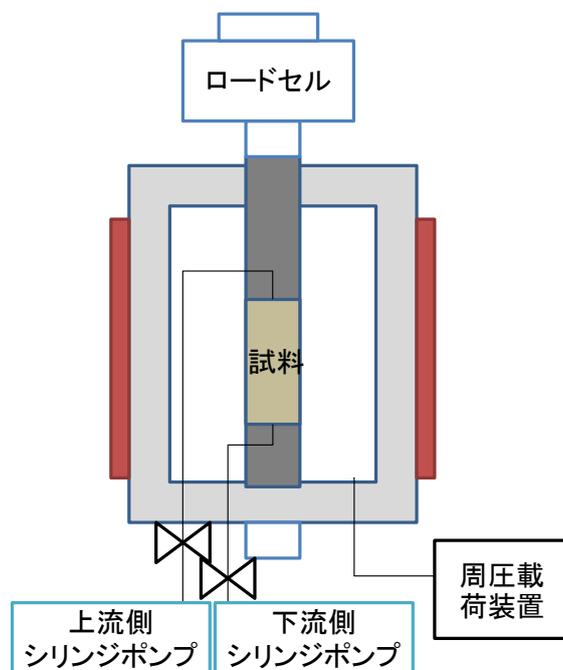


図 3.21 三軸圧縮試験機概略図

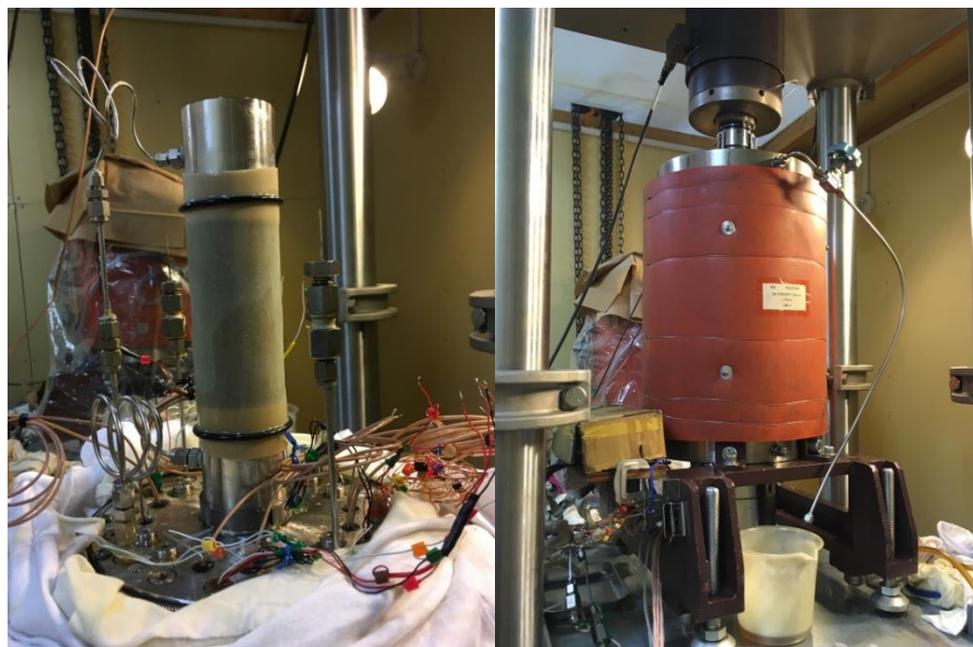


図 3.22 ゴムスリーブに入れた試料の装置への設置途中の状態 (左) と三軸試験機設置後の状態(右)

### 3.3.3. 測定条件

強度試験は変位制御での1回 (TEST1)、周圧制御で2回目 (TEST2) を実施した。

TEST1 では周圧を 30 MPa、背圧を 2 MPa まで載荷した。その後 20 時間毎に 6mm の変位制御で試験を行った。

TEST2 に関しては、TEST1 と異なる圧力制御での試験を行った。これは、トランジェントパルス試験での条件に合わせて、岩石の周圧を 30 MPa に設定し、背圧を 2 MPa にして、18 時間程度周変位が落ち着くのを待った後に周圧の制御を行った。6.5 時間で 4 MPa まで除荷する圧力の制御を行った。

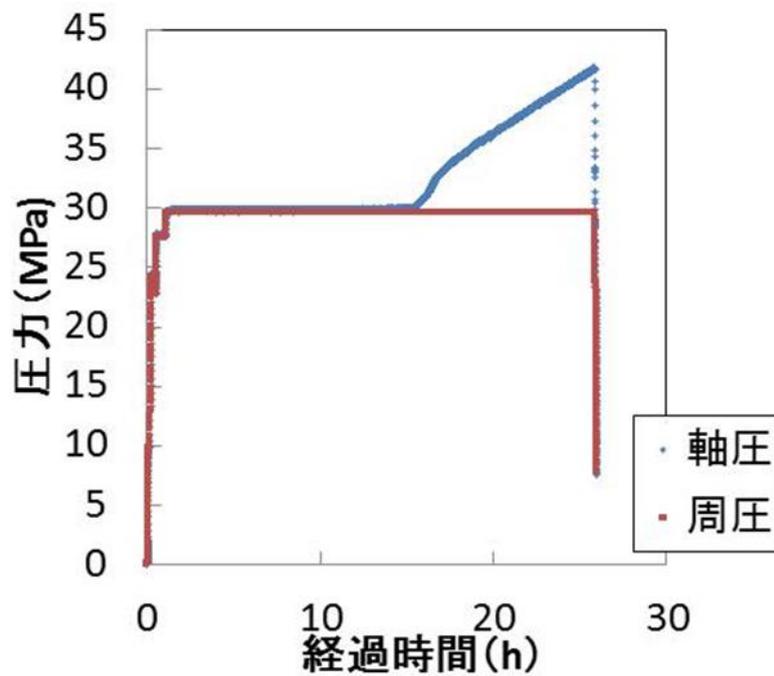


図 3.23 TEST1 の時間経過周圧と軸圧の制御

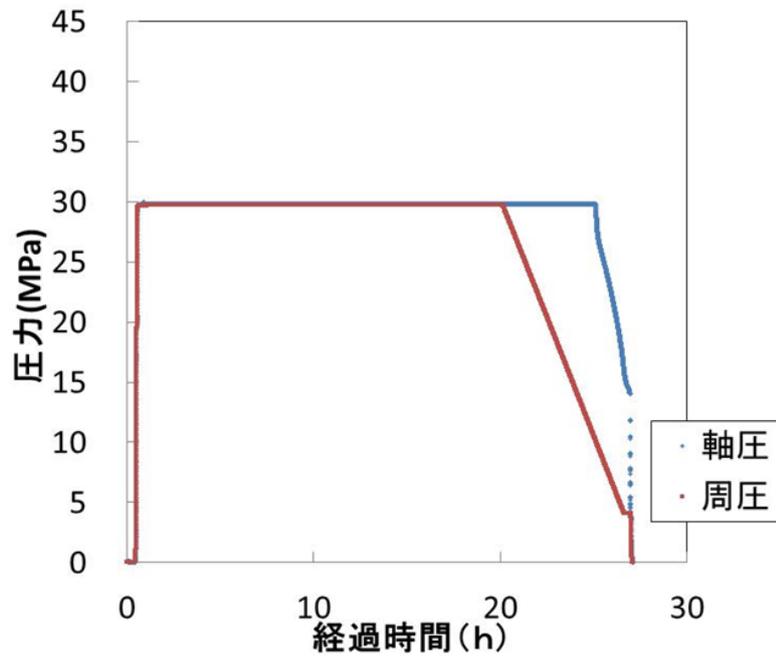


図 3.24 TEST2 の時間経過周圧と軸圧の制御

#### 3.3.4. 測定結果

TEST1 と TEST2 とでは、差応力の与え方のオペレーションが異なっており、TEST1 では差応力約 10MPa 程度、TEST2 では 20MPa 程度の結果が得られた試験後の試料の高さは TEST1 では 97.09 mm、TEST2 では 93.35 mm まで縮んでいたが、巨視的な破壊は見られず、さらに TEST2 で示されるようなひずみ-応力線図の軸ひずみの挙動からも延性的な変形をしていることがわかる。TEST1 と TEST2 の異なる点は、TEST2 では 4 MPa あたりに変曲点がみられるという点である。

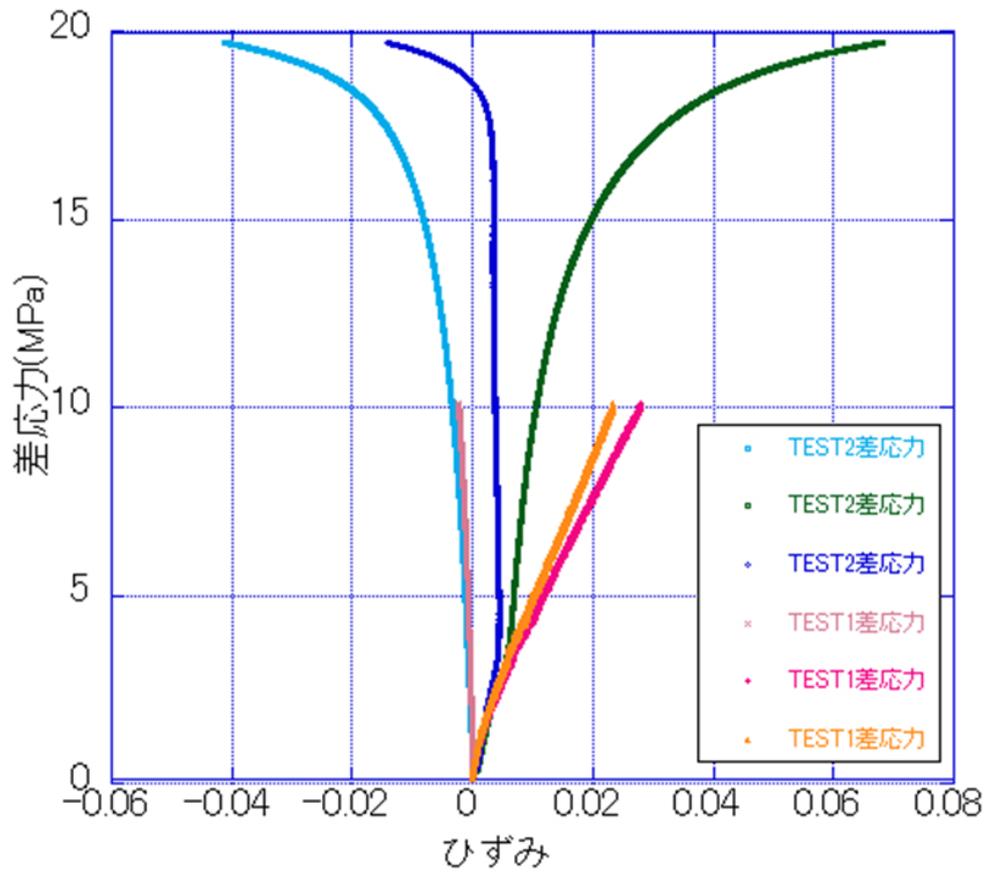


図 3.25 三軸圧縮試験 (TEST1、TEST2) のひずみ応力線図  
暖色が TEST1、寒色が TEST2 を示す



図 3.26 試験後の試料 (左: TEST1、右: TEST2)

#### 4. トランジェントパルス試験

トランジェントパルス試験とは、岩石試料の両端に貯留槽を設け、圧力差を与えることで試料内に水の流れが生じ、圧力が平衡状態に向かうという圧力変化から岩石試料の透水係数を求める方法である（杉本、1989）。この手法は、主に、難透水性の岩石に用いられ、短時間で実験が行えるという利点がある。また、解析方法によっては、透水係数だけでなく、比貯留係数を求めることも可能である。

##### 4.1. 実験装置及び試料の概要

本研究では㈱サム電子機械製のトランジェントパルス試験機を使用した。本試験装置の概要図と写真を図 4.1、図 4.2 に示す。本試験機は、軸圧 50 MPa、側圧 50 MPa、間隙水圧 50 MPa まで載荷することが可能で、上下ともに貯留槽の容積は 400 cm<sup>3</sup> となっている。全ての載荷の操作を 50 MPa に対応した手動水圧ポンプで行う。試験機内への気泡の進入や温度変化に大きく影響を受ける試験であることから、水中での作業が可能となるように工夫がされている。また、水を扱う試験であることから、ステンレス製にすることで試験装置の耐久性を高くしている。この試験機では軸圧、側圧、配管圧の 3 つは、共和電業製ひずみゲージ型圧力変換器 PG-500KU を用いており、これの定格容量は 50 MPa であるが、上下流貯留槽に取り付けられている圧力変換器は DATA INSTRUMENTS の Model AB High Performance Pressure Transducer で、定格容量が 34 MPa である。軸圧、側圧、配管圧、更に温度計 2 本（気温、水温）の測定記録を㈱東京測器研究所製の PORTABLE DATA LOGGER TES-302 によって出力し、貯留槽の圧力に関しては、上流貯留槽は、TEAC 製 SA-54 DC AMPLIFER、下流貯留槽では、TEAC 製 STRAIN AMPLIFER SA-570ST によって出力している。

三軸セル内では、高さ 50 mm、直径 50 mm の岩石試料をポーラスメタルで上下を挟み、ゴムスリーブで被覆する。ゴムスリーブはバイトンを使用した。三軸セル内に軸圧ピストンが組み込まれており、側圧は試料周囲から水圧で与えられる。

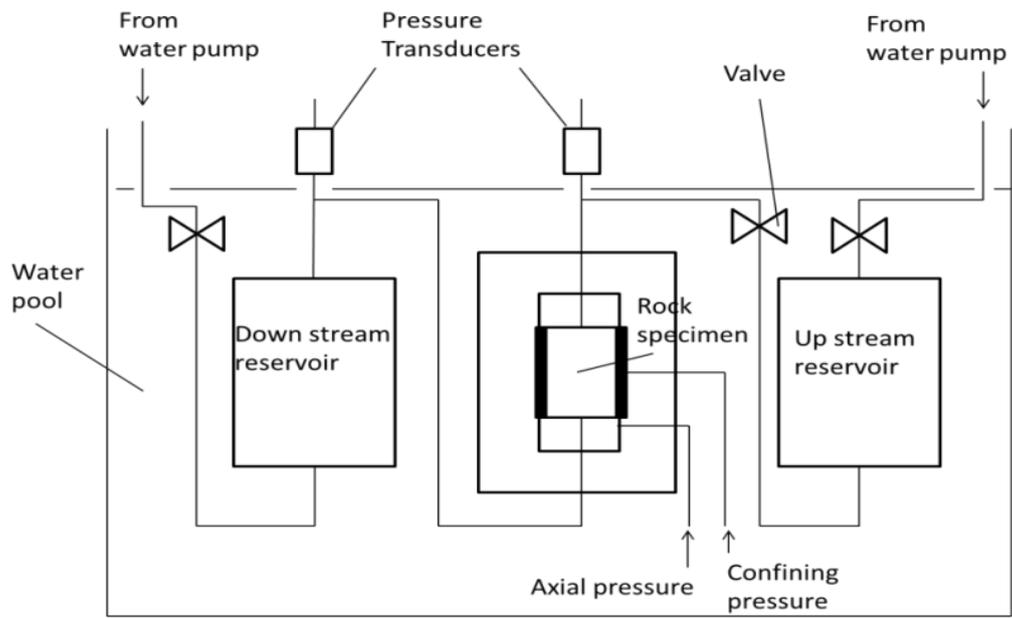


図 4.1 トランジェントパルス試験機概要図



図 4.2 トランジェントパルス試験機

## 4.2. 実験方法

実験で使用する試料の脱気を1日行い、水を満たした状態で、トランジェントパルス試験機の三軸セル内に設置した。この時にあらかじめ試験機内にポンプから水を送って、三軸セルのゴムスリーブ内まで水を満たしておくことで、試験機内に空気が入る事を最小限にした。また、試料設置後の組立の際にも各配管のエア抜きを行うために、一度、バルブのネジを緩め、ポンプで水を送り、水で満たされていることを確認した上で、組立を行った。その後、岩石試料に軸圧、側圧を加え、更に上下貯留槽へのバルブを開けた状態で、上下貯留槽や試料内に同じ圧力を与えた。上下貯留槽の圧力が落ち着くのを待ち、一様になったところで、下流側と配管圧制御の間のバルブと三軸セルと上流側の間にあるバルブを閉め、上流側貯留槽にのみ、0.5 MPa 前後のパルス圧を追加した。再度、試料から下流貯留槽内の圧力が一様になるのを待ち、一様になったところで、上流側のバルブを開け、上下流側の水圧の経時変化を記録した。水圧の測定間隔は、以下のようなステップで測定した(表 4.1)

表 4.1 水圧測定間隔のシステム

ステップ	計測間隔	継続時間	ステップ	計測間隔	継続時間
1	3 (sec)	3 (min)	6	10 (min)	10 (hour)
2	10 (sec)	10 (min)	7	30 (min)	20 (hour)
3	30 (sec)	30 (min)	8	1 (hour)	40 (hour)
4	1 (min)	1 (hour)	9	3 (hour)	60 (hour)
5	5 (min)	5 (hour)	10	5 (hour)	80 (hour)

## 4.3. 解析方法

トランジェントパルス試験における解析方法は、貯留性を無視して上下貯留槽の水圧差の経時変化を対数軸上にプロットして、その直線の傾きから透水係数を求める Brace の方法 (Brace et al., 1968) と、上下貯留槽の水圧差の経時変化のプロットと理論解とのカーブフィッティングにより、透水係数と比貯留係数を求める Hsieh の方法(Hsieh et al, 1981)の2つがあるが、今回は透水係数の変化とともに、比貯留係数の変化を求めるため、Hsieh の解析方法を用いて、マクロ解析によってフィッティングを行った。以下、Hsieh の解析方法とそれを利用したマクロ解析のプログラムについて説明する。

### 4.3.1. Hsieh の解析方法(Hsieh et al, 1981)

Hsieh の理論は、トランジェントパルス試験で得られるような試料の水頭変化  $h(x,t)$  について以下の式(1)~(8)からなる数学モデルを用いる。

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (0 < x < l, t > 0) \quad \dots (4.1)$$

$$h(x,0) = 0 \quad (0 < x < l) \quad \dots (4.2)$$

$$h(0, t) = hd(t) \quad (t \geq 0) \quad \dots (4.3)$$

$$h(l, t) = hu(t) \quad (t \geq 0) \quad \dots (4.4)$$

$$\frac{S_s}{KA} \frac{dh_d}{dt} - \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{x=0} = 0 \quad (t > 0) \quad \dots (4.5)$$

$$h_d(0) = 0 \quad \dots (4.6)$$

$$\frac{S_u}{KA} \frac{dh_u}{dt} - \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{x=l} = 0 \quad (t > 0) \quad \dots (4.7)$$

$$h_u(0) = H \quad \dots (4.8)$$

このとき、下流側の水頭を  $h_d$ 、上流側の水頭を  $h_u$ 、下流側からの距離を  $x$ 、実験開始からの時間を  $t$ 、 $t=0$  の時の上流側の水頭増加量を  $H$ 、試料の断面積を  $A$ 、試料の長さを  $l$ 、試料の比貯留係数を  $S_s$ 、上流側の圧縮性貯留量を  $S_u$ 、下流側の圧縮性貯留量を  $S_d$ 、試料の透水係数を  $K$  とした。(4.1)は  $K$  と  $S_s$  が一定である水で満たされた多孔質媒体中の圧縮性流体の一次元流れの式を表す。(4.2)は実験開始時、試料中の水頭分布が均一であり、それを  $0$  と定義している。(4.3)(4.4)は試料の上下流面に直接貯留槽が接続していることを示している。(4.5)(4.7)は試料から貯留槽内の質量保存則を表し、(4.6)は実験開始時、下流側の水頭がサンプル中の水頭に等しいことを、また、(4.8)は実験開始時の上流側の水頭を十分増加させていることを示している。この 8 つの式をラプラス変換と無次元化を行うことによって次の式(4.9)、(4.10)を求めることができる。

$$\frac{h_u}{H} = \frac{1}{1+\beta+\gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \varphi_m^2) (\beta + \gamma^2 + \frac{\varphi_m^2}{\beta})}{(\frac{\gamma^2 \varphi_m^4}{\beta^2} + \frac{(\gamma\beta + \gamma^2 + \gamma + \beta)\varphi_m^2}{\beta} + (\beta^2 + \gamma\beta + \beta))} \quad \dots (4.9)$$

$$\frac{h_d}{H} = \frac{1}{1+\beta+\gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \varphi_m^2) (\beta - \gamma^2 + \frac{\varphi_m^2}{\beta})}{(\frac{\gamma^2 \varphi_m^4}{\beta^2} + \frac{(\gamma\beta + \gamma^2 + \gamma + \beta)\varphi_m^2}{\beta} + (\beta^2 + \gamma\beta + \beta)) \cos \varphi_m} \quad \dots (4.10)$$

この(4.9)(4.10)において、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  は次のように表される。

$$\alpha = \frac{K \cdot t}{l^2 \cdot S_s} \quad \dots (4.11)$$

$$\beta = \frac{S_s \cdot A \cdot l}{S_u} \quad \dots (4.12)$$

$$\gamma = \frac{S_d}{S_u} \quad \dots (4.13)$$

また、 $\varphi_m$  は次式の根とする。

$$\tan \varphi = \frac{(1+\gamma)\varphi}{\frac{\gamma\varphi^2}{\beta} - \beta} \quad \dots (4.14)$$

この理論解を用いた解析の流れを図 4.3 に示す。図 4.3 左上のように、実験で得られる水頭の経時変化について、 $t$  と  $h_u H$ 、 $h_d H$  とのグラフにプロットし、Hsieh の理論解については、実験条件で得られる貯留槽の値から  $\gamma$  を決め、 $\alpha \beta^2$  と  $h_u H$ 、 $h_d H$  のグラフにプロットし、二つのグラフのフィッティングにより、 $\alpha$  と  $\beta$  を決め、そこから  $S_s$  と  $K$  を決定することができる。

きる。

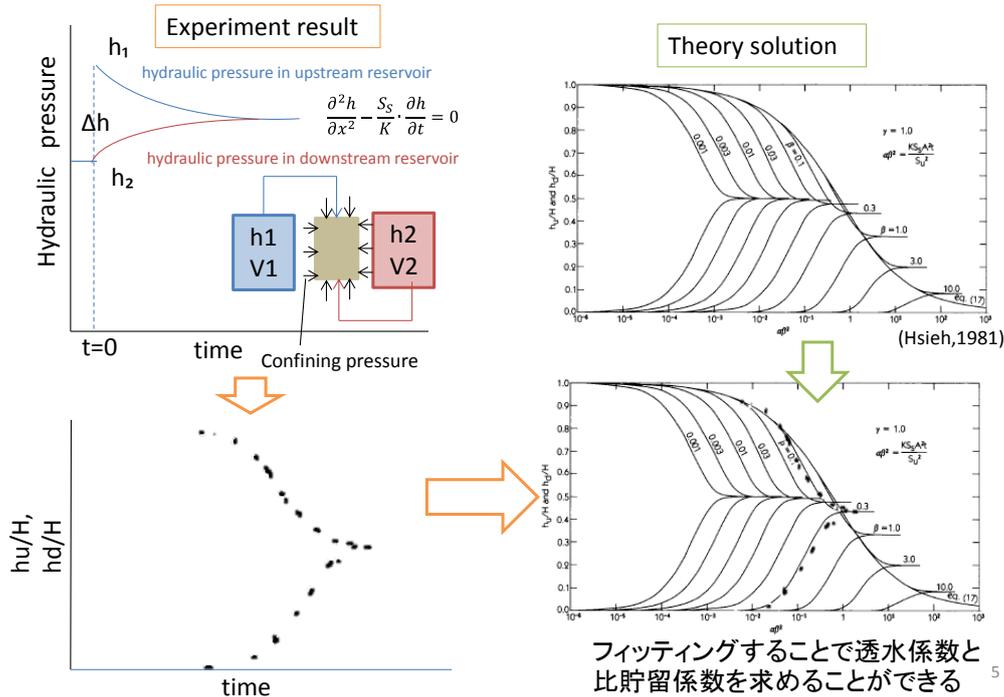


図 4.3 Hsieh の理論解を用いた実験値解析の流れ

#### 4.3.2. マクロによる解析プログラム

本実験での解析は上記の Hsieh の理論解に関して  $\gamma, \beta$  を入力し、 $h_u/H, h_d/H$  の曲線を描き、実験で得られるデータをフィッティングすることで  $\alpha$  を求めるという方法で解析を行った。ここでは、Hsieh の理論解を出力するためのプログラムの仕組みについて記述する。

本プログラムを作成するために、第一段階として、あらかじめ  $S_s$  と  $K$  がわかっている諫早砂岩を用いて、水頭の経時変化を正しく描写できるかを確認できるようなプログラムを作成した後、それを応用して、 $\alpha, \beta, \gamma$  の指定から  $h_u/H, h_d/H$  のグラフ表示をできるようにした。今回使用した諫早砂岩の物性値は  $S_s = 2.3E-6(1/m), K = 2.1E-11(m/s)$  である (Tokunaga et al., 2002)。

まず、諫早砂岩での式(4.9)(4.10)の  $h_u/H, h_d/H$  と  $t$  のグラフを書き出すためには既知である  $S_s, K$  と、今回使用するトランジェントパルス試験機の条件から決定できる  $S_u$  と  $S_d$  を用いて、指定する  $\beta, \gamma$  を決定した。この  $\beta, \gamma$  を用いて、 $\varphi_m$  を計算するために、式(4.14)についてニュートン法を用いて  $\varphi_m$  を求めた。この時、初期値は  $\tan \varphi$  のグラフを実際に書いてみて、0 に近づくような値を 20 個程度用意してループさせて解を求めた。 $\alpha$  には、 $t$  の変数が含まれているため、 $t$  以外の部分を  $aa$  として、既知の値で求め、ある  $t$  の時の  $h_u/H, h_d/H$  を求めるようなプログラムを作った。 $t$  は 10 秒刻みで 1200 秒までで計算を行ってみたところ、 $t$  と  $h_u/H, h_d/H$  のグラフを作ることができ、諫早砂岩を本実験機器で透水試験した際にかかる時間がだいたい 3 時間程度ということがわかった(図 4.4)。このプログラムが正しいかどうか

を確かめるために、実際に諫早砂岩でのトランジェントパルス試験を等圧条件 10 MPa、上流 5.5 MPa、下流側 5 MPa で行ったところ、実験時間は 1 時間程度で異なったが、 $k=3.20E-11$ 、 $S_S=1.98E-06$  と妥当な値が得られた。既存研究との実験時間などに若干の差がみられた理由としては、実験で用いた岩石が既存研究と全く同じブロックではないことなどからであると考えられる。

このプログラムを応用して、 $\alpha\beta^2$  と  $hu/H,hd/H$  のグラフを作成した (Appendix B)。この段階では、 $\gamma$  は前回と同じように実験条件から決定でき、 $\beta$  を適当だと予想する値を入力してプログラムを回し、実験値とのフィッティングから正しい  $\beta$  を求め、 $\beta$  から  $\alpha$  を求めるようなプログラムを作成した。

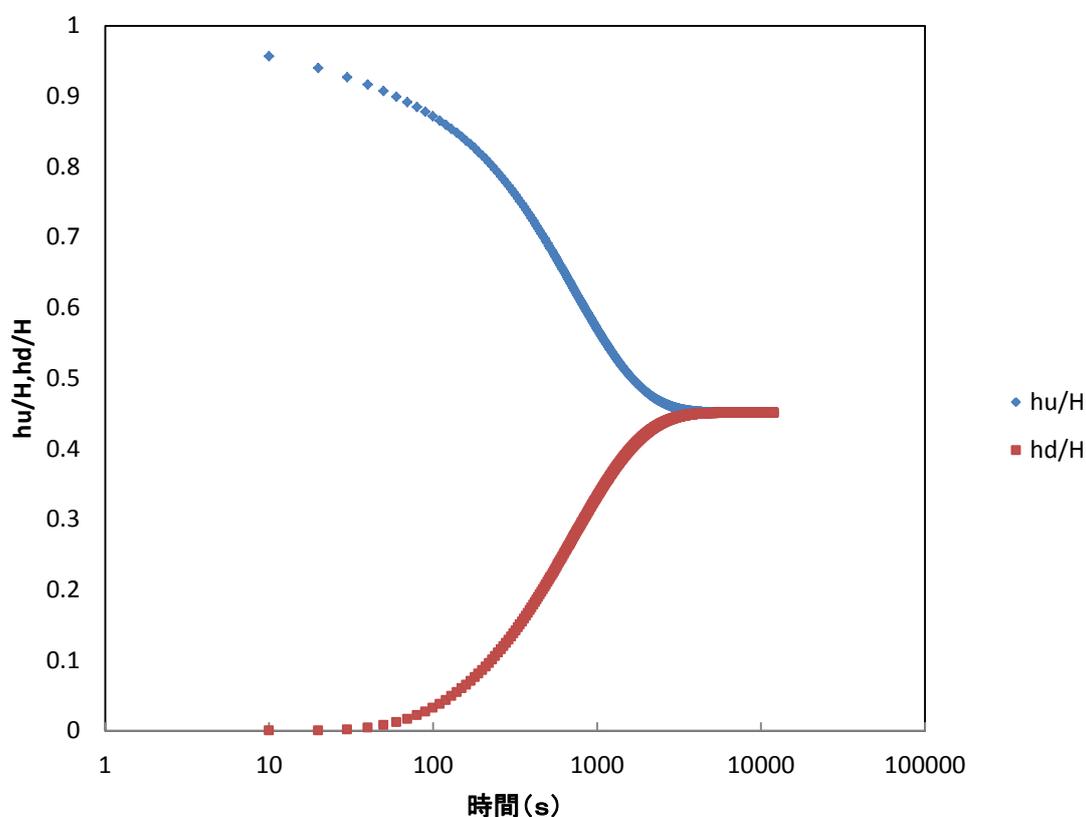


図 4.4 諫早砂岩による実験シミュレーションの結果

#### 4.4. フィッティングの誤差に関して

本実験でのフィッティングでは、4.3 で説明したプログラムを用いて、理論値と実験値とのフィッティングを行ったが、実験値は、実験室の温度変化や実験時の圧力の安定による影響を受けるため、理論値とのフィッティングを全実験について正確に行うことは難しい。また、フィッティングについては、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  のパラメータを変更しながら目視でフィッティングを行ったため、この 2 つの事項からフィッティング精度が落ちてくる。透水係数

と比貯留係数の結果は上流側と下流側の水頭の変化の両者を考慮したフィッティングを行った結果について述べた。これに対して、上流側を考慮したフィッティングと下流側を考慮したフィッティングをそれぞれ行い、それらと実験結果（上下流の両者を考慮したもの）との差を求めたものをエラーバーによって示した。つまり、実験結果（5章の図 5.4、図 5.5）でのエラーバーは、実験条件における誤差とフィッティング時に起こっている誤差の両者を含んでいることに注意すべきである。

#### 4.5. 実験条件

本研究では、岩石に等圧をかけた後、偏差応力を与えるという工程での実験を行った。まず、等圧で 32 MPa 以上まで載荷した。載荷時の 10, 13, 15, 20, 23, 25, 28, 30, 32 MPa で透水試験を行い、その後、軸圧を 32 MPa で固定した状態で、側圧を除荷して、4 MPa 程度まで除荷した。側圧除荷時には、側圧が 28, 26, 24, 22, 20, 18, 14, 12, 10, 8, 6, 4 MPa で透水試験を行った。また、常に、背圧を 3 MPa、パルス圧 0.5 MPa を与えた。

## 5. 実験結果

まず、一回の透水試験で得られるデータとそれに対するフィッティングについて述べる。女川層での実験は、実験開始するまでの上流下流の貯留槽の圧力が安定するまでにかかなり時間がかかった（例えば 20 時間程度）。しかし、実験自体は短い時間（例えば 40 分程度）で圧力拡散が完了した（図 5.1）。これは、周圧載荷における岩石の変形量が大きかったのに対して間隙率が高い泥岩であるからと考えられる。この結果のフィッティングは図 5.2 のようになる。図 5.1、5.2 のような実験は室内の温度変化や岩石の圧縮などの影響を受けずに良いフィッティングができたものの結果である。逆に試験機のアンプの調節がうまくいっていなかった場合、フィッティングはうまくいかなかった。その時の一例が図 5.3 である。フィッティングはの良しあしはそれぞれ結果に影響を与えている可能性が大きい。

封圧 32 MPa まで等圧条件で昇圧した時の透水試験結果について説明する。等圧条件下での透水係数の挙動（図 5.4）は有効応力による違いは見られなかった。図 5.5 に比貯留係数の挙動も示すが、こちらは、多少のばらつきは見られるが、規則性がなく、実験もしくはフィッティングの正確性が影響していると考えられる。

偏差応力下での透水試験結果を図 5.6 に示す。透水係数は徐々に増加が見られるが 2 倍程度だった。また、大きな増加が見られたのが差応力約 24 MPa だった。比貯留係数は 4 MPa で一度落ち込んだ後、10 MPa まで大きく増加し、その後、17 MPa まであまり変化が見られなかった後に再度大きな変化が見られた。2 つの変化の傾向を見てみると、比貯留係数が上下に変化した後に、大きく増加し、それに遅れて透水係数が大きく変化したといえる。

また、実験で使用した試料を実験後に取り出した結果、図 5.7 のように巨視的な亀裂が見られ、少し触れた程度で、ぼろぼろと崩れた。1 つの破断面の角度は約 45°で、いくつもの破断面が交差するような亀裂が見られた。Appendix A に示すように、透水試験後の岩石についての薄片観察では、明らかに人工的にできた亀裂が多く見られた。このような亀裂は、Paterson (1978) が示す共役なせん断破壊面に似ている（図 5.8 の c）。

Paterson (1978) によれば、このような破壊面が発生するのは、脆性領域にある岩石であっても封圧が高くなると、時々見られ、特に、脆性領域の上限に近づくと、せん断破壊領域の拡大が起こり、シャープなせん断破壊亀裂面から、延性断層と呼ばれる集中的に変形が生じる狭い領域の形成による破壊へと変化するとされている。本研究の三軸試験 (TEST2) でも分かる通り、30 MPa では女川層は脆性領域の限界を超えており、おそらく、共役なせん断破壊がせん断領域拡大と共に行ったのではないかと考えられる。また、この試料の長さは約 46.3 mm まで縮んでいた。

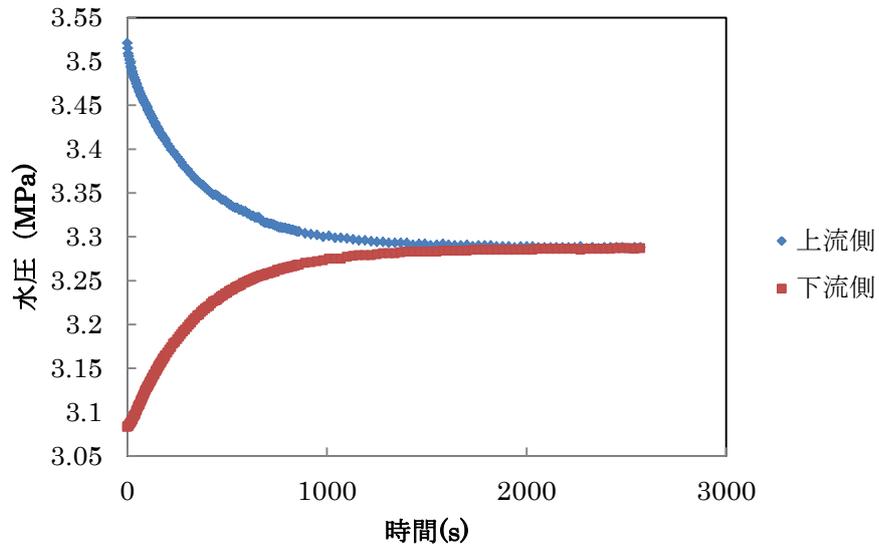


図 5.1 女川層での透水試験の圧力拡散の様子 (等圧 23 MPa のとき)

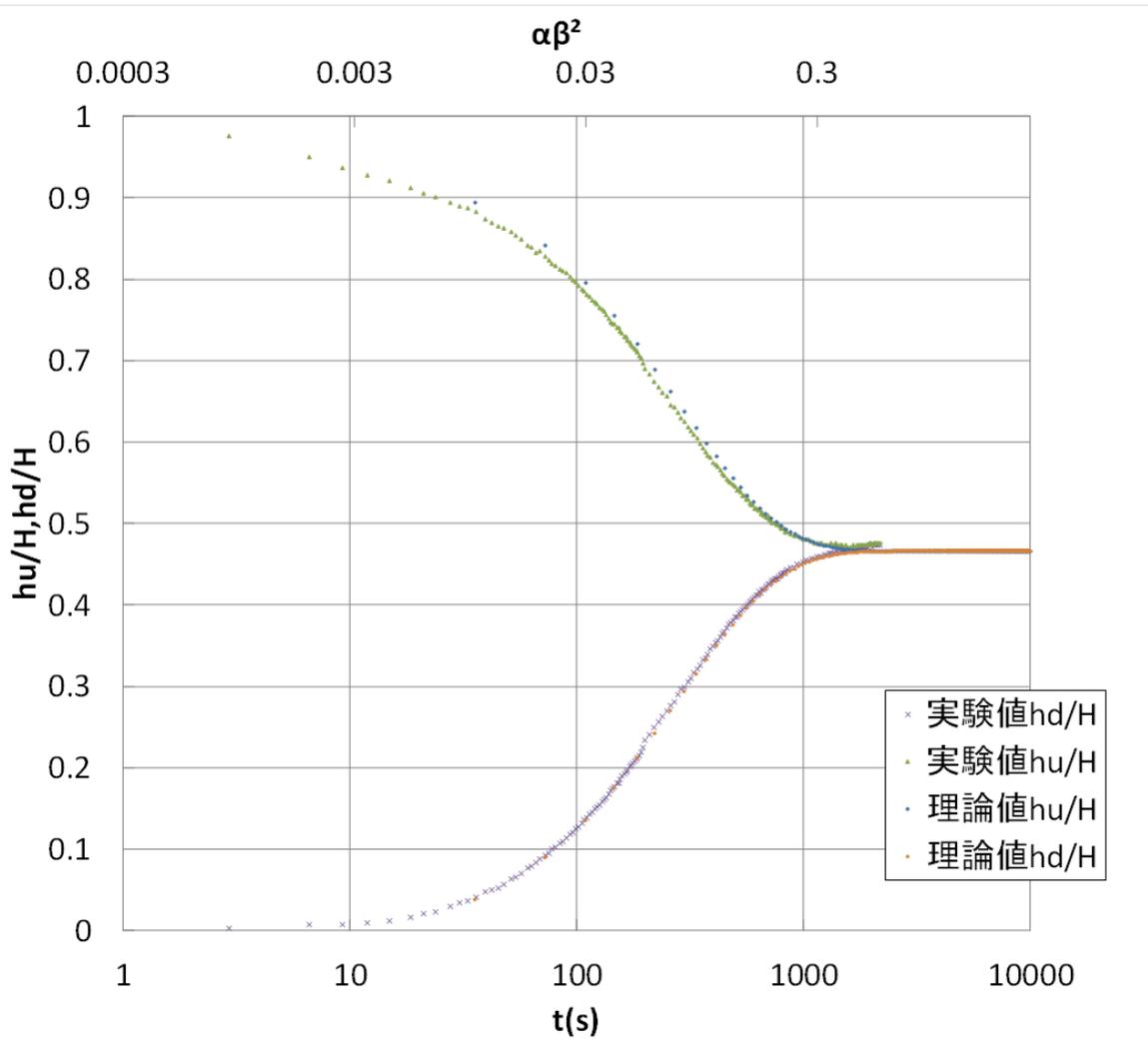


図 5.2 フィッティング時のデータ (20 MPa 時)

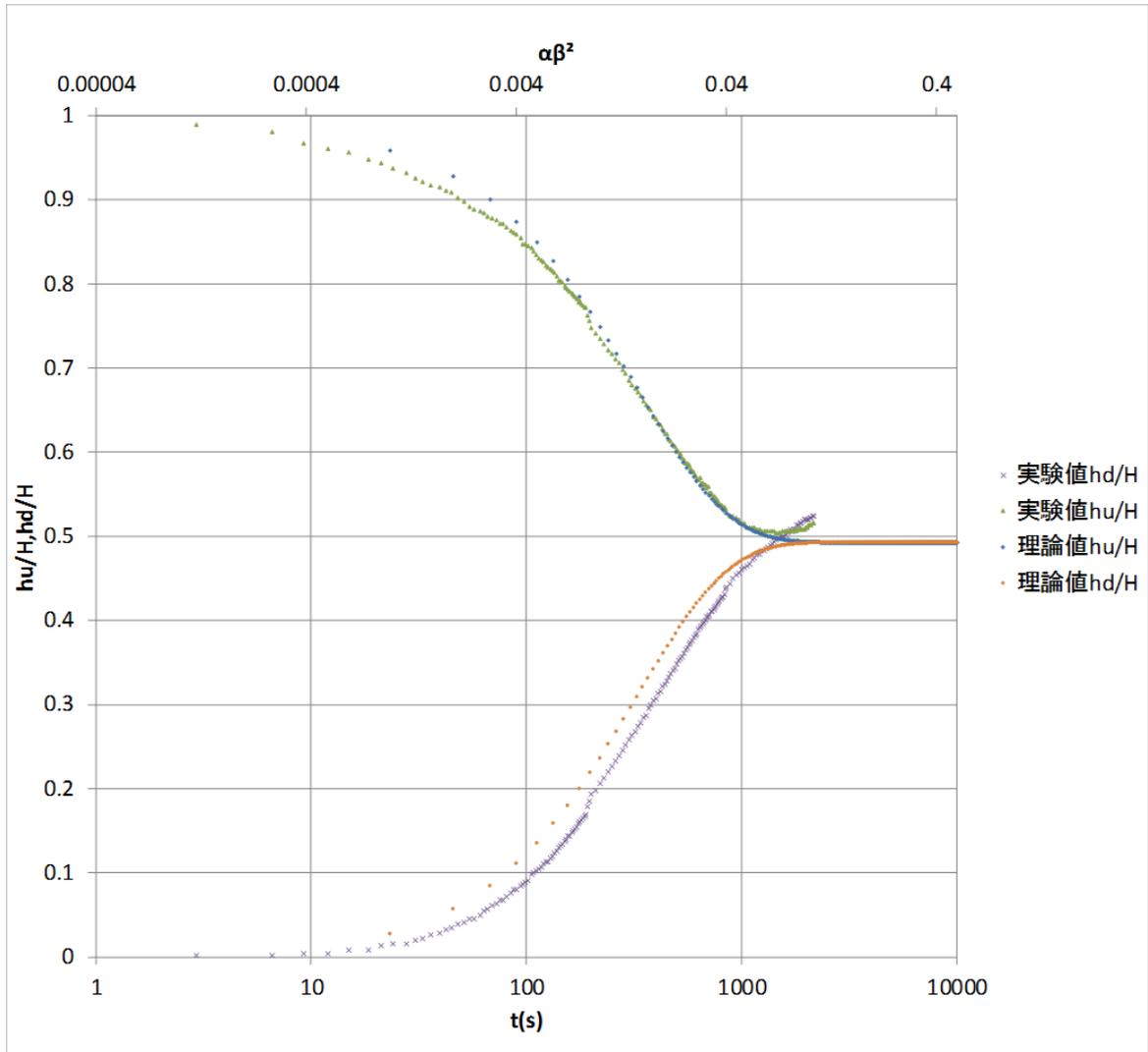


図 5.3 フィッティングの度合いが悪い時の例(30 MPa 時)

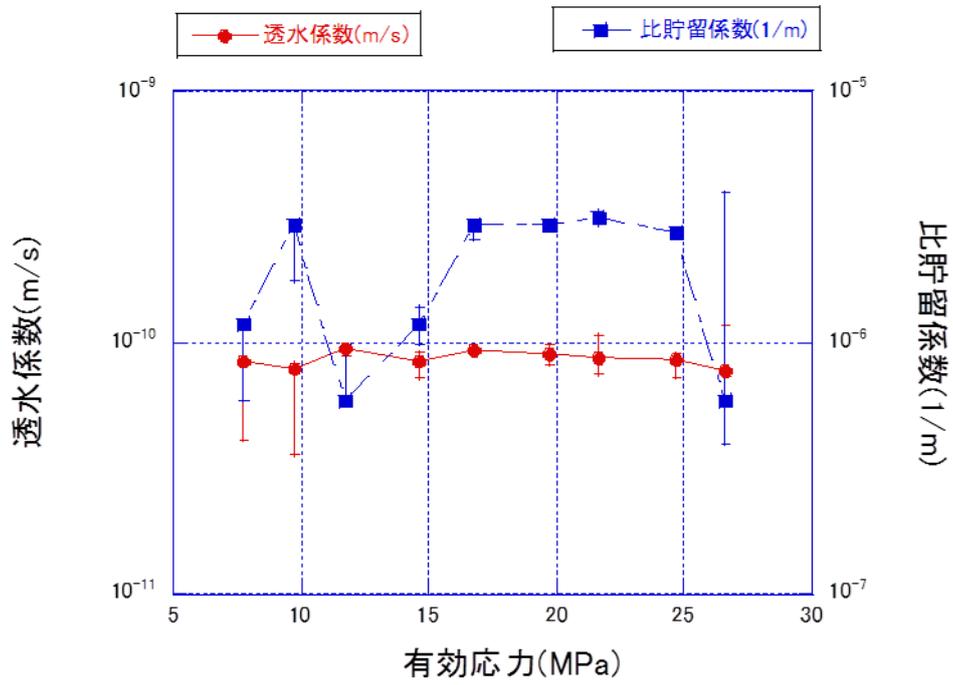


図 5.4 等圧条件下での女川層の透水係数と比貯留係数の挙動

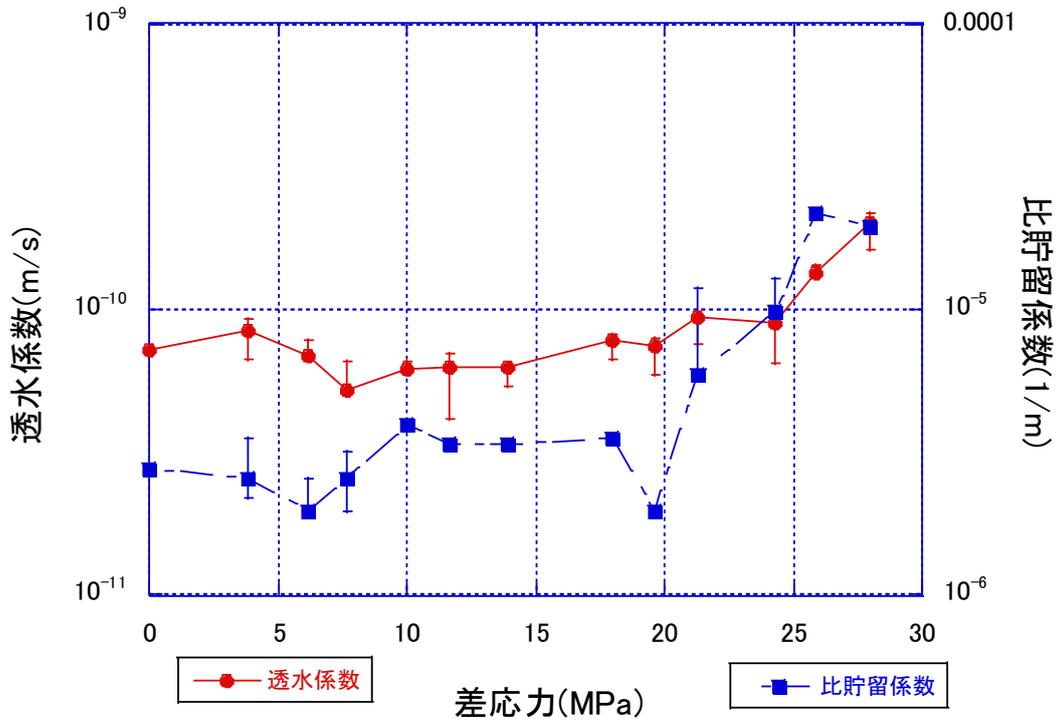


図 5.5 偏差応力下に女川層における透水係数と比貯留係数の挙動



図 5.6 実験後の試料の様子

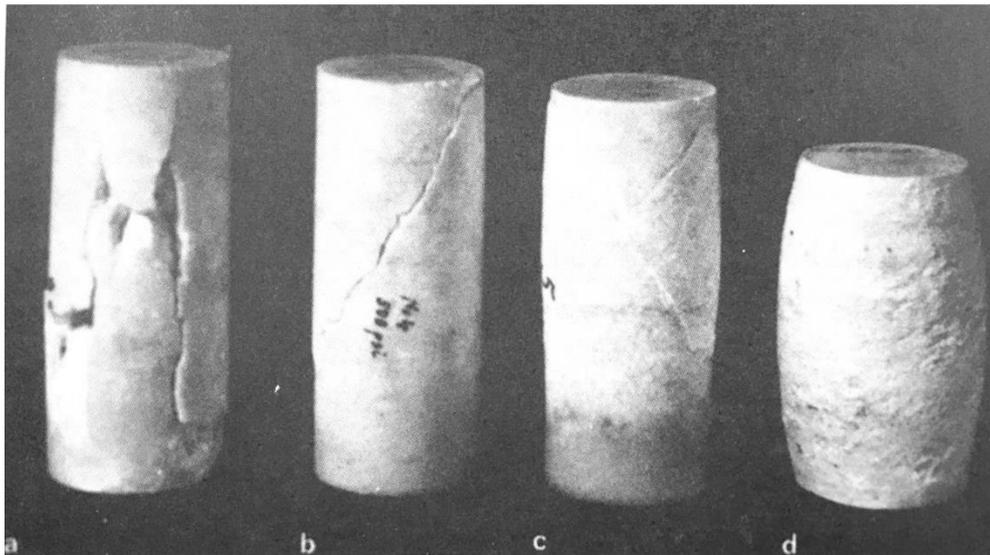


図 5.7 様々な封圧下での Wombeyan 大理石の破壊あるいは流動の形式 (Paterson,1958)  
a: 一軸応力状態での縦割れ破壊、 b : 3.5 MPa の封圧下での一面のせん断破壊面の形成、  
c : 35 MPa の場合の共役なせん断破壊面、 d : 100 MPa での延性挙動

## 6. 考察

### 6.1. 来待砂岩による偏差応力下の透水係数と比貯留係数の挙動

高田・藤井(2009)は、偏差応力下での来待砂岩の透水性について、微小亀裂の影響により来待砂岩の透水性が上昇する可能性があることを述べている。また、非濡れ性流体の侵入により、来待砂岩を破壊させる実験を行った後藤ほか(2013)では、破壊に近い偏差応力下での非濡れ性流体の侵入により、脆性的な破壊が起こることを示している。これらの既存研究を踏まえて、微小亀裂を原因とする透水性の上昇が見られる来待砂岩がトランジェントパルス試験での比貯留係数と透水係数がどのような挙動を示すのかということをも明らかにしておく。

今回は、後藤ほか(2013)で既に明らかになっている来待砂岩の Mohr-Coulomb の破壊規準 ( $\tau(\text{MPa})=0.5\sigma(\text{MPa})+3.7$ ) を用いて、周圧を 20 MPa、間隙圧 3 MPa、パルス圧 0.5 MPa とし、側圧を落としていく方法で偏差応力を与え、おそらく、側圧 5 MPa 程度で、破壊規準に達するという予想のもと、トランジェントパルス透水試験を行った。この実験で得られた透水係数と比貯留係数の挙動が図 6.1、6.2 である。透水係数は差応力 14 MPa 程度からの大きな上昇が見られた。比貯留係数は 4 MPa までは減少し、6 MPa まで上昇した後、8 MPa までは減少したあと、12 MPa まではあまり変化がなくなり、その後、増加するという小さな変動がみられたが全体的な傾向としては小さい差応力時から徐々に比貯留係数が増加していた。来待砂岩の透水試験でも女川層と同様に比貯留係数が上下に変動した後大きく増加し、それに遅れる形で大きく変化した。透水試験後の来待砂岩の試料を取り出したところ、巨視的な破壊は見られなかったが、透水係数が上がったことからおそらく内部に微小亀裂が発生していると考えられる。透水試験で同じ傾向が見られた女川層についても内部で微小亀裂の発生が起こり、それが透水係数に影響を及ぼしている可能性が考えられる。

来待砂岩の透水性や貯留性の上昇と変形との関係を位置づけるために、実験結果の比貯留係数挙動から来待砂岩の体積弾性率について考察しておきたい。徳永(1998)は、多孔質弾性論的な観点から比貯留係数を定義し、様々な境界条件や物性の仮定から比貯留係数の導出を行っており、平均応力が変化しない場合の比貯留係数は次のように表している。

$$S_s = \rho_f g \left[ \left( \frac{1}{K} - \frac{1}{K_s} \right) + \varphi \left( \frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_\varphi} \right) \right] \quad \dots (6.1)$$

ここで、 $\rho_f$  は間隙流体の密度、 $g$  は重力加速度、 $K$  は排水条件における多孔質材料の体積弾性率、 $K_s$  は固体粒子部分の体積弾性率、 $\varphi$  は間隙率、 $K_f$  は流体の体積弾性率、 $K_\varphi$  は間隙の体積弾性率とする。この時、岩石の固体部分と間隙部分が十分に硬いと仮定すると  $K_s$  と  $K_\varphi$  は  $\infty$  となり、

$$S_s = \rho_f g \left( \frac{1}{K} + \varphi \frac{1}{K_f} \right) \quad \dots (6.2)$$

と、表される。これを変形すると、

$$K = \frac{K_f}{K_f \cdot S_S - \varphi} \quad \dots (6.3)$$

と、表すことができる。この時、 $K_f$ は2.3 GPaとした。また、間隙率は、岩石全体の体積を  $V$ 、固体部分の体積を  $V_S$ 、間隙部分の体積を  $V_p$  とすると、

$$V = V_S + V_p \quad \dots (6.4)$$

つまり、岩石の体積変化  $dV$  は、次のように表される。

$$dV = dV_S + dV_p \quad \dots (6.5)$$

ここで、岩石の固体部分は十分に固いと仮定すると、岩石の体積変化は間隙部分の体積変化に等しい。また、岩石の体積変化は体積ひずみと次の関係にある。

$$\varepsilon_V = \frac{dV}{V} \quad \dots (6.6)$$

つまり、

$$dV = V\varepsilon_V = dV_p \quad \dots (6.7)$$

また、間隙率は

$$\varphi = \frac{V_p}{V} = \frac{V_p}{V_S + V_p} \quad \dots (6.8)$$

体積変化後の間隙率は

$$\varphi' = \frac{V_p + dV_p}{V + dV_p} \quad \dots (6.9)$$

(6.9) に (6.7) を代入して整理すると、

$$\varphi' = \frac{\varphi - \varepsilon_V}{(1 - \varepsilon_V)} \quad \dots (6.10)$$

のように表すことができるので、既存研究(後藤ほか(2013))の大気圧下の間隙率(24.65%)とひずみ差応力線図のデータを用いてトランジェントパルス試験で与えた差応力時の間隙率を算出し、その時の体積弾性率を求めた。この結果が図 6.3 である。差応力に伴って、体積弾性率が小さくなっているのが分かる。このことから、偏差応力を大きくしていくことで、岩石が柔らかくなっていることが明らかで、小さい応力で岩石が変形しやすい状態になっておりことがわかる。

つまり、来待砂岩の比貯留係数が上昇する原因は、岩石の微小亀裂による間隙の増加だけでなく、岩石の変形のしやすくなったことの2つが連動して起こっていると考えられる。

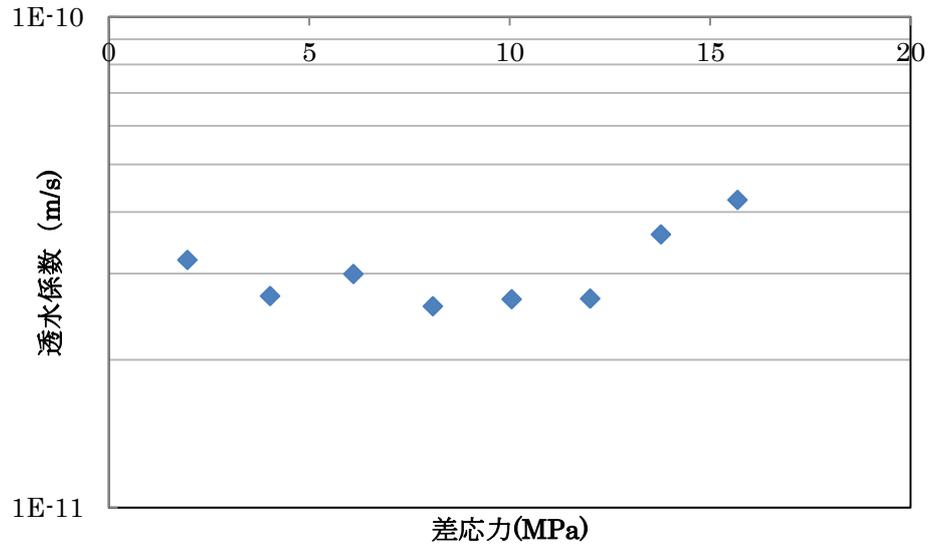


図 6.1 来待砂岩の偏差応力下における透水係数の挙動

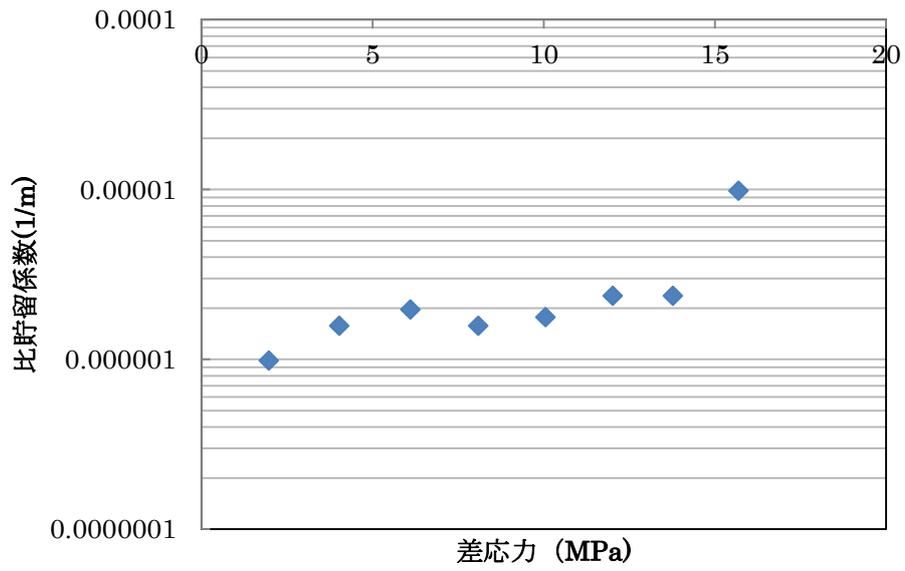


図 6.2 来待砂岩の偏差応力下における比貯留係数の挙動

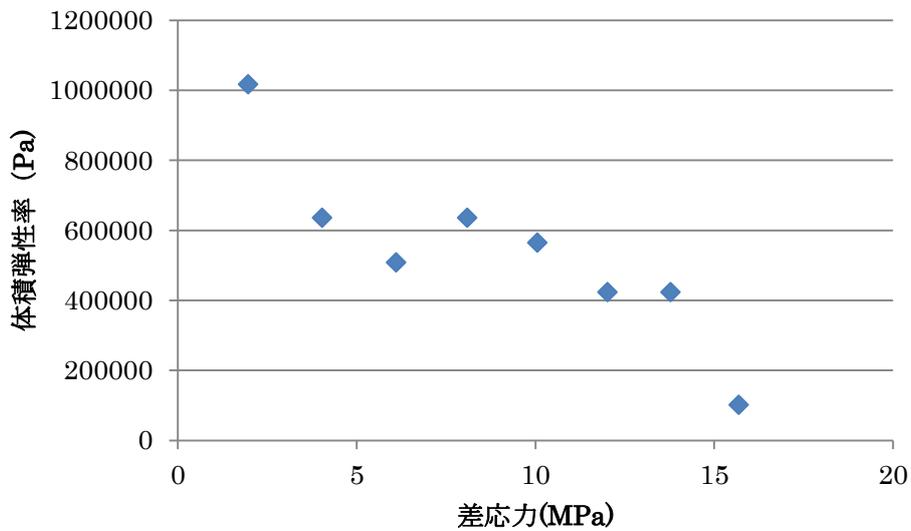


図 6.3 来待砂岩の偏差応力下における体積弾性率の挙動

## 6.2. 女川層の三軸試験結果から推定される変形の違い

女川層の三軸試験 TEST1 と TEST2 では、図 3.26 で見られるような 4 MPa あたりにみられる折れ曲がりがあり、試験結果の挙動が大きく異なっている。この変化は、TEST1 と TEST2 で異なる応力パスで実験を行っていることが結果に影響を及ぼしていると考えられる。例えば、等圧 30 MPa から差応力 10 MPa 与えるとすると、TEST1 の方式では軸圧を 40 MPa に、TEST2 の方式では側圧を 20 MPa にするので、Mohr-Coulomb の破壊規準とともに占めすと、図 6.4 のようになる。つまり、TEST2 では TEST1 に比べて、より破壊規準に近づくような応力パスをしていることになる。この違いが 2 種類の変形の違いの原因になっている可能性がある。

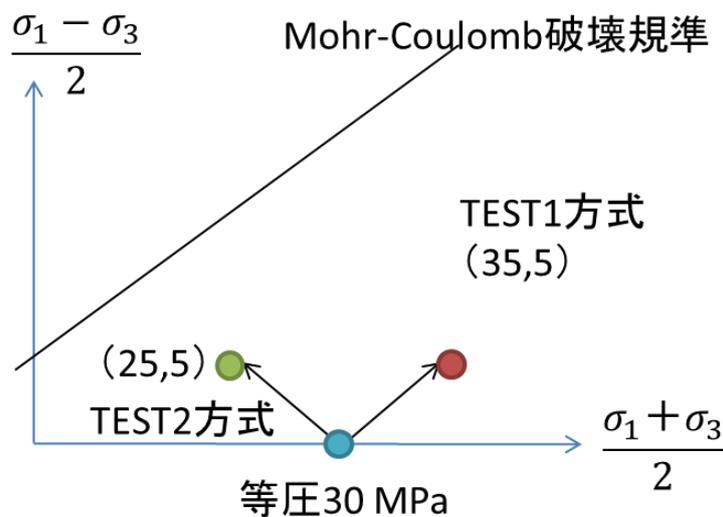


図 6.4 TEST1 と TEST2 の応力パス

### 6.3. 女川層の透水係数と比貯留係数の挙動と変形

本研究で得られた女川層の変形試験 TEST2 の差応力に対する 3 つのひずみの変化量と差応力のグラフをプロットしてみると、軸ひずみの変化量の曲線は、4 段階に分けることができる。さらに、差応力に応じた透水係数と比貯留係数も合わせてプロットしてみると、軸ひずみ変化量の挙動と比貯留係数の挙動が一致する。つまり、岩石の変形がかなり顕著に比貯留係数の変動に反映されている。6.1 で述べたように、岩石にはおそらく内部に微小亀裂が発生しており、おそらくそれが始まりつつあるのが図 6.5 の d 以降だろう。TEST2 のひずみ曲線図（図 3.25）を参照すると、d 段階では非弾性的に大きく変形がみられるからである。また、a,b,c の段階でもひずみ変化の挙動が異なるが、b 以降からは図 3.25 の体積ひずみの曲線を見てわかる通り、わずかなダイラタンシーの開始がみられ、そのことが a と b 以降の違いと考えられる。b,c が異なり原因などは、本実験の段階では明確にすることが難しい。

このことから、本研究での透水試験と変形実験との結果からいえることは、d の段階でひずみは大きく非弾性的に変形し、亀裂が増加することで微小亀裂が水の通り道になった可能性がある。水の流路が出来上がったことで図 6.5 の e 段階で透水係数の増加が見られたと考えられる。

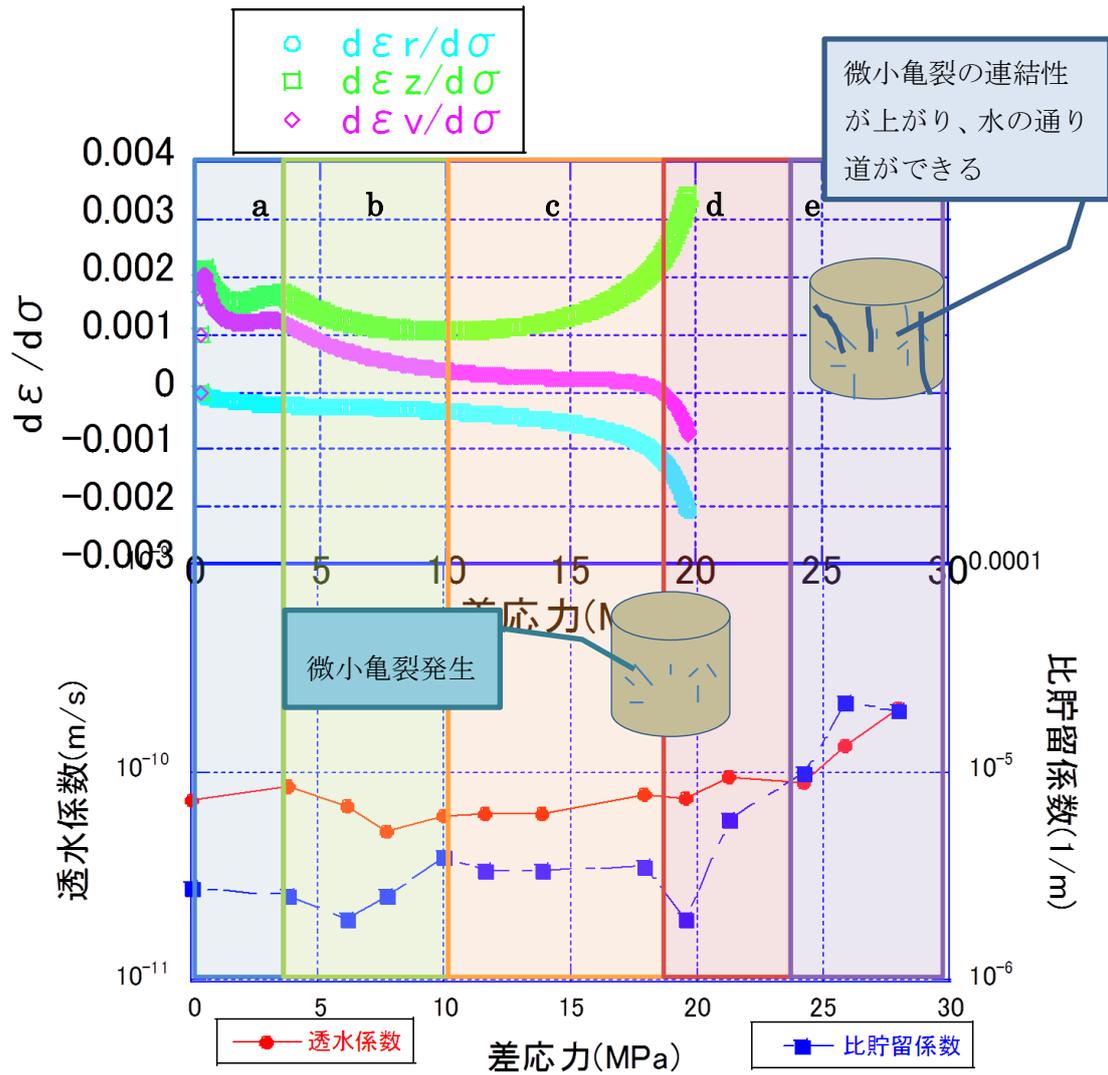


図 6.5 女川層の透水試験と変形の割合との関係

## 7. まとめ

本研究では、偏差応力下における泥岩の透水係数変化について、三軸圧縮試験での強度試験とトランジェントパルス試験による透水試験を行い、変形の挙動から考えられる透水性の変化について検討した。実験では、国内のシェールオイル開発で注目された女川層の泥岩を用いた。

岩石物性として、岩石の間隙率と含有鉱物、三軸圧縮試験による強度試験の測定を行った。この三軸試験では軸応力を増加していく TEST1 と側圧を除荷していく TEST2 を行ったが、ともに延性的な挙動を示した。

トランジェントパルス試験では、等圧条件下では、透水係数、比貯留係数ともに大きな変化は見られなかったが、偏差応力下では、透水係数は 24 MPa あたりから上昇し、比貯留係数については偏差応力が 17 MPa あたりから上昇した。また、試験後の試料は、共役な破断面をいくつも作っており、脆性領域の限界で起こるような変形とよく似ており、破壊が起こらなかったとはいえ、三軸圧縮試験で得られた延性的な挙動と共通する部分がある。

また、女川層の泥岩の透水係数、比貯留係数の議論を行うために、すでに偏差応力下で微小亀裂による透水係数の上昇の可能性が見られる来待砂岩では、偏差応力下での比貯留係数は女川層と同様に偏差応力下が小さい時から比貯留係数の上昇が見られた。また、来待砂岩の透水係数に関しても、比貯留係数に遅れて上昇するような傾向が見られた。このことから、女川層の透水性の変化についても微小亀裂の発生が原因となっているのではないかと考えた。さらに、女川層の変形実験 TEST2 との比較として、差応力増加に対する軸ひずみの増加量の割合を求めたところ、割合の変動は 4 つの段階に分けることができ、それを透水試験の結果と照らし合わせると、比貯留係数の変動とよく一致している。このことから岩石の変形を比貯留係数は非常によく反映する。また、おそらく明らかに非弾積的に岩石が変形しているところでは、おそらく岩石内部中に微小亀裂が発生しており、その微小亀裂が流路となるまで発生し、つながったとき、岩石の透水性が上昇すると考えられる。

今回の実験で泥岩であっても偏差応力下で岩石が破壊して透水性が増加するということが分かった。この結果が実際の地下深くでも起こっていると考えると、シェールオイルの効率の良い開発のためには、根源岩中の一次移動を無視することはできない。

しかし、今回の女川層の変形実験の TEST1 と TEST2 に違いが見られたように、偏差応力のかかり方の違いによって、岩石の変形の仕方も変化するため、貯留性や透水性も変化するだろう。また、既存研究での泥岩の変形による透水性への影響はほとんどないという結果からわかるとおり、女川層での変形が貯留性に変化を与え、透水性に影響を与えたということであって、他の泥岩に適用できるわけではない。岩石による違いで変形の挙動が異なる一つの原因は序論でも述べたような鉱物組成の違いが影響している。今回使用した女川層は非常に珪質であるのに対して、泥岩と亀裂の関係について述べた一例の Opalinus Clay は粘土鉱物を多く含んでいるようである (P.Marschall et al.,2016)。

序論で述べたとおり、泥岩には脆性的に破壊が起こって、透水性に変化が及ぶものもあれば、そうでないものもあり、それを一つの条件（例えば鉱物組成）で判断するのは困難である。そのためにも応力の変化によって、さまざまなタイプの泥岩での変形がどのように起こっているのかを CT スキャンを用いて測定しながら透水性の測定を行うなどの破壊のメカニズムとの透水性変化の綿密な関連付けが必要である。また、微小亀裂の開閉による透水性への影響を実験的に測定するためには、偏差応力を昇圧して亀裂を与えたあとに除荷していく際の透水性を測定することが必要であると考えられる。また、今回のトランジェントパルス試験のフィッティングはあくまで目視によるフィッティングからのパラメータの決定を行っているので、より正確なフィッティングを行うためには最小二乗法を用いたオートマティックなフィッティングが行えるようにすることでより正確な係数決定を行うことが望ましい。

## 謝辞

本研究を進めるにあたっては、多くの方々にご支援いただきました。特に、東京大学大学院新領域創成科学研究科環境システム学専攻徳永朋祥教授には、研究を進めるにあたって多くの有益な助言をいただき、また、十分な実験環境を整えていただきました。同環境システム学専攻多部田茂准教授には、副査として研究の道筋の整理をご指導いただきました。

また、大成建設株式会社技術センターの山本肇、青木智幸、宮城充宏の三氏には、多くの議論に参加していただき、また、実際に実験を行う上でアドバイスをいただきました。大成サービス株式会社の名倉正法氏には、実験装置の使用方法を丁寧に教えていただきました。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻茂木勝郎技術専門職員には、実験器具の準備等、実験のサポートをしていただきました。産業技術総合研究所後藤宏樹氏には、実験のサポートに加えて、多くの有益な助言をいただきました。東京大学大学院新領域創成科学研究科環境システム学専攻の本田博巳氏には、サンプリングや薄片観察に関する有益な助言をいただきました。

末筆ながら、以上の方々に深く感謝いたします。

## 参考文献

- A.Bouazza, W.F. Vanimpe & W.Haegemen (1996), "Some mechanical properties of reconstituted Boom clay." *Geotechnical and Geological Engineering*, 14 pp. 341-352
- Andrew C. Aplin & Joe H. S. Macquaker (2011), "Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems." *AAPG BULLETIN*, v.95, NO. 12, pp. 2031-2059
- B.P.Tissot & D.H.Welte (1984)"Petroleum Formation and Occurrence."
- 後藤宏樹、徳永朋祥、山本肇他 (2013) "圧縮率の高い非濡れ性流体の浸入に伴う岩石の連続的な破壊：破壊条件に近い応力条件下での帽岩のシール能力の急激な低下の可能性" *地学雑誌* 122 巻、5 号
- Howarth, Robert W.,(2011), "Should Fracking Stop?" *Nature* 477, pp. 271–275
- Hsieh P. A., Tracy J. V., Neuzil C. E., Bredehoeft J. D. & Silliman
- S. E. A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of 'tight' rocks--I. Theory. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 18, 245-252 (1980).
- Jarvie, D. M., R. J. Hill, T. E. Ruble, and R. M. Pollastro, 2007, Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of North-Central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment: *AAPG Bulletin*,91, 475–499,doi: 10.1306/12190606068.
- M.S. Paterson(1978),"実験岩石力学—脆性領域の岩石の変形および破壊—"
- 大沢穠(1988),"矢島地域の地質." *地域地質研究報告*
- Pierre Besuelle, Gioacchino Viggiani, Jacques Desrues, Cecile Coll & pascal Charrier(2014),"A Laboratory Experimental Study of the Hydromechanical Behavior of Boom Clay." *Rock Mech Rock Eng* 47: pp. 143-155
- P. Marschall, L. Keller S.B. Giger and J. Becker(2016)" MICROSTRUCTURAL INSIGHTS INTO THE PETROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF INDURATED CLAYS.", *The Clay Minerals Society Workshop Lectures Series*, Vol. 21 (2016), Chapter 14, 191–198
- Roderick Perez Altamar & Kurt Marfut(2014),"Mineralogy-based brilleness prediction from surface seismic data: Application to the Barnett Shale". *Interpretation*, Vol.2, No.4: p. T255-T271
- 酒井隆太郎、宗像雅広、大岡政雄(2009),"広域地下水流動解析モデルの水理パラメータの不確実性評価手法の検討" *JAEA-Research* 2009 p. 038
- 石油技術協会(2014): 石油鉱業便覧：石油技術協会創立 80 周年記念
- 杉本文男、古住光正 (1989) "トランジェント・パルスを用いた岩石の透水試験" *資源・素材学会誌* 105(1989)No.10

- 高田迪彦・藤井義明 (2009) ”差応力下での来待砂岩の透水性に関する研究 “
- Till Popp & Klaus Salzer(2007), ”Anisotropy of seismic and mechanical properties of Opalinus clay during triaxial deformation in a multi-anvil apparatus.” *Physics and Chemistry of the Earth* 32 pp.879-888
- 徳永朋祥(1998)”貯留係数に関する一、二の議論”*応用地質* 1998/12、39 巻 5 号
- Tokunaga Tokunaga, Hiroshi Kameya, Katsuro Mogi and Rika Aoyagi(2002)” 流体圧力・歪の同時計測による透水係数および貯留係数の求め方について.” *応用地質* Vol. 42 (2001-2002) No. 4 P 208-213
- Ulrich Mann(1994), “An integrated approach to the study of primary petroleum migration.” *Geological Society, London, Special Publications*, v. 78, pp. 233-260
- Wang, F. P., and J. F. W. Gale, 2009, Screening criteria for shale-gas systems: Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 59, 779–793.
- W. F. Brace, J. B. Walsh and W. T. Fragon: J. G. R.,” Permeability of Granite under High Pressure” Vol.73, pp 2225-2236 (1968)
- 吉村尚久(2001),”粘土鉱物と変質作用 “

### 【Appendix A】薄片観察

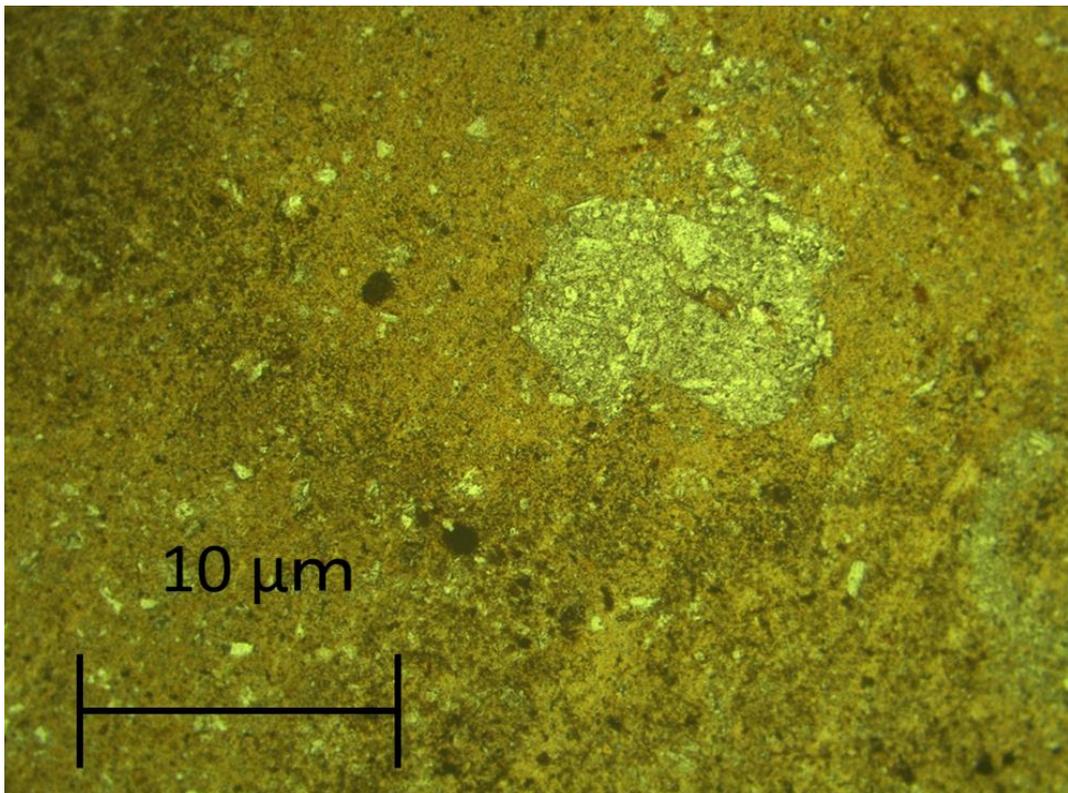
本研究では、女川層の試料について、以下の薄片を作った。

- ① intact 層理面に対して鉛直方向
- ② intact 層理面に対して水平方向
- ③ 変形試験 TEST1 使用後 層理面に対して鉛直方向
- ④ 変形試験 TEST1 使用後 層理面に対して水平方向
- ⑤ 変形試験 TEST2 使用後 層理面に対して鉛直方向
- ⑥ 変形試験 TEST2 使用後 層理面に対して水平方向
- ⑦ トランジェントパルス試験使用後 層理面に対して鉛直方向
- ⑧ トランジェントパルス試験使用後 層理面に対して水平方向

そのうち、特徴をとらえた④を除く 7 枚の薄片観察についての記載が以下である。

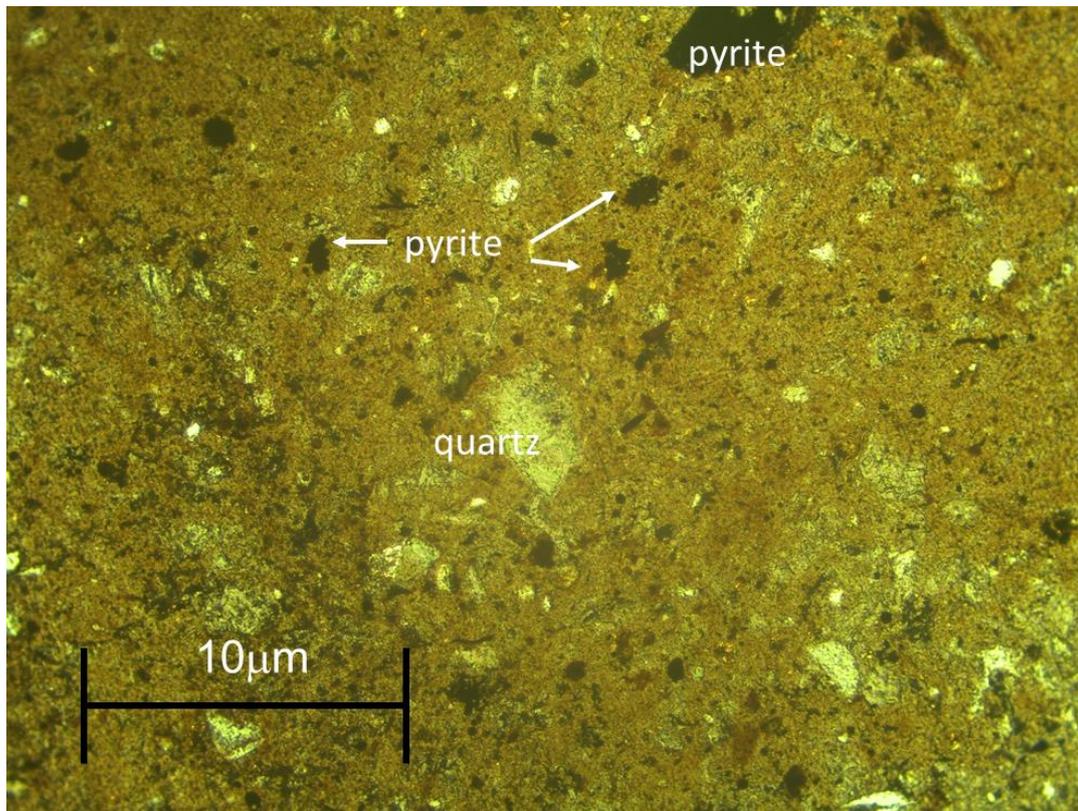
薄片は 40 倍と 100 倍で観察したものを記載している。

- ① intact 層理面に対して鉛直方向

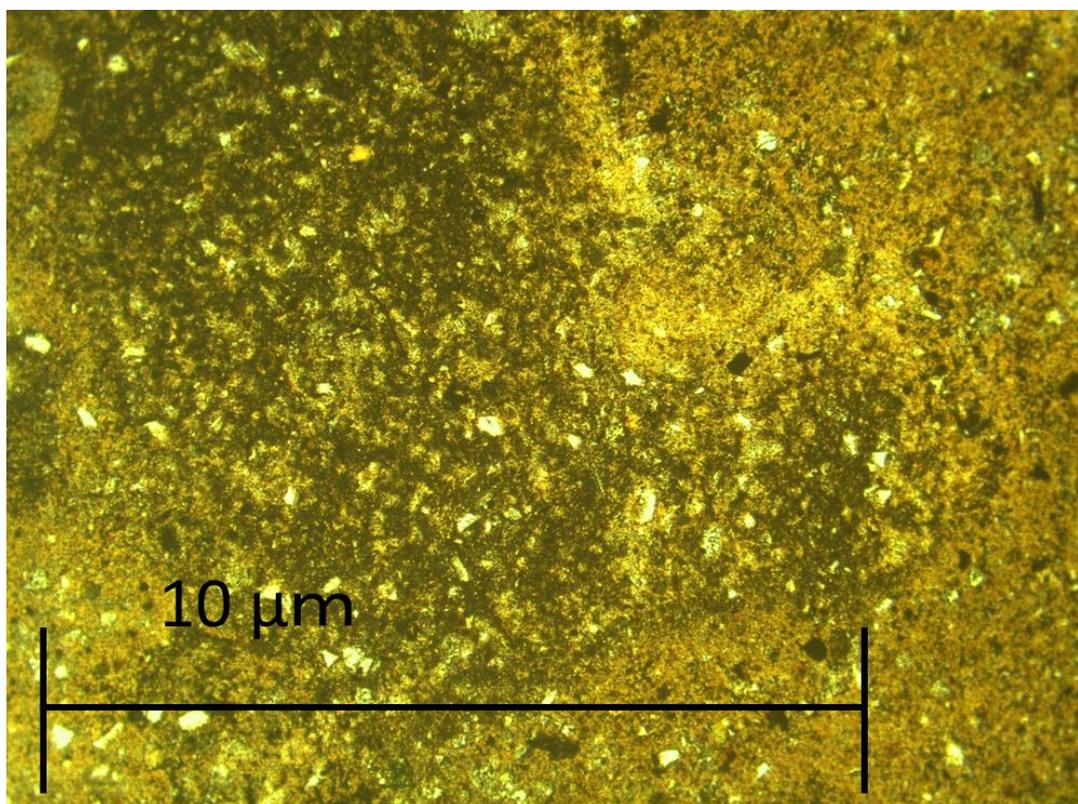


非常にシルト質な泥岩で、シリカを多く含む。褐色がかった灰色。火山性のクォーツのきめ細やかな破片が豊富につくまれている。また、パイライトが含まれている。

② intact 層理面に対して水平方向

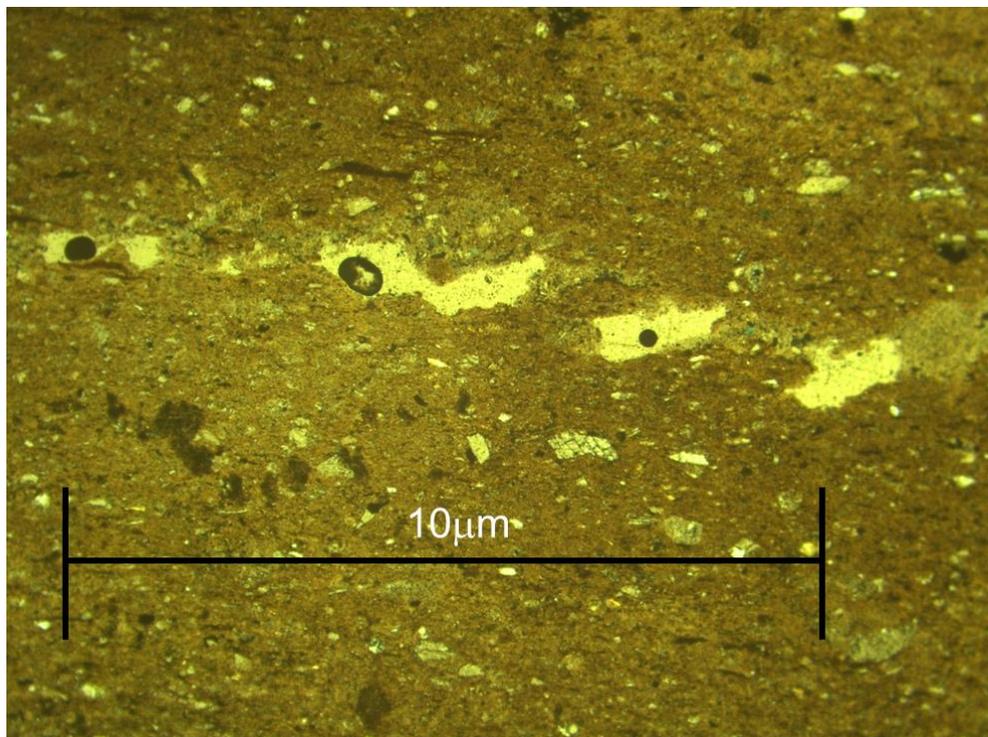


① と同様。

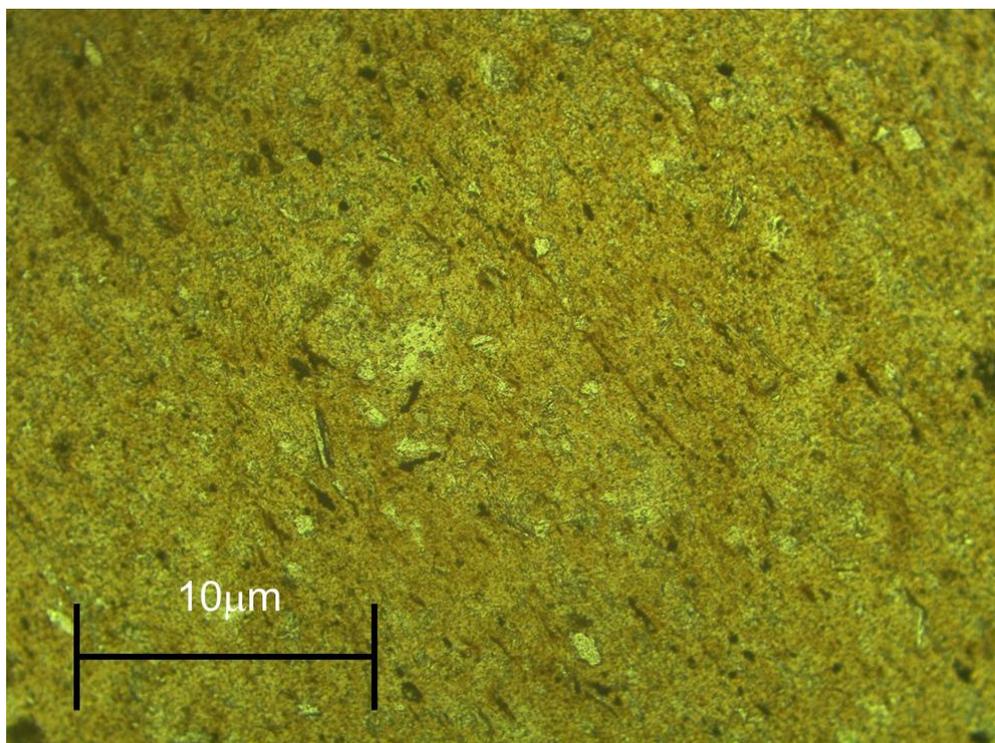


不均質な部分。明るい褐色部分と暗い部分は、マトリックス部分からあふれ出した水によってみられる。

③ 変形試験 TEST1 使用後 層理面に対して鉛直方向



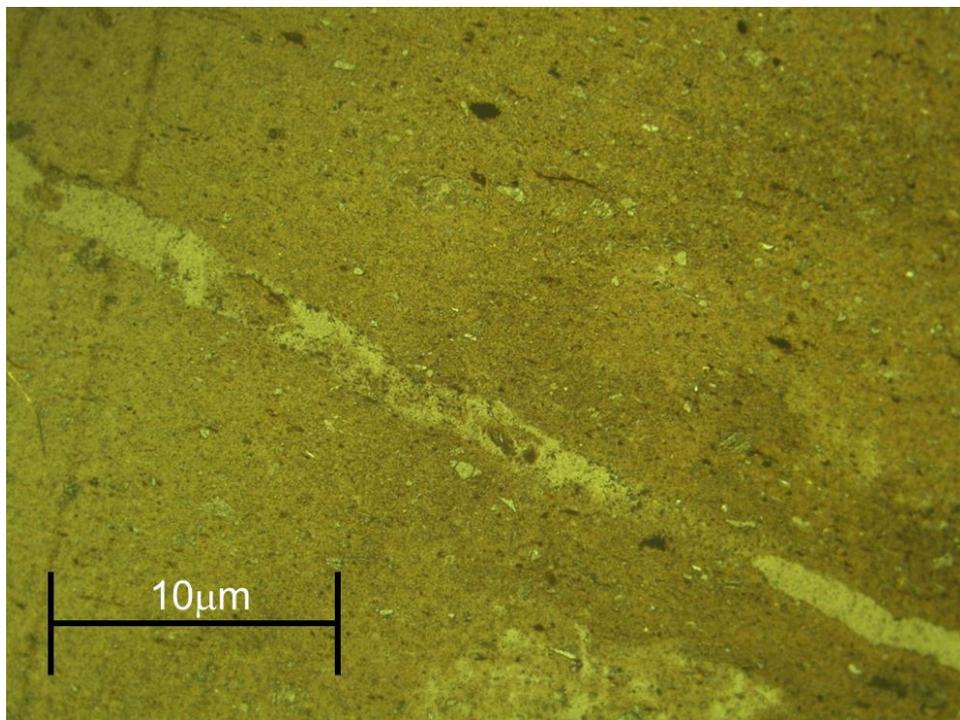
亀裂が開口して変形して明らかに分かれているのがわかる。



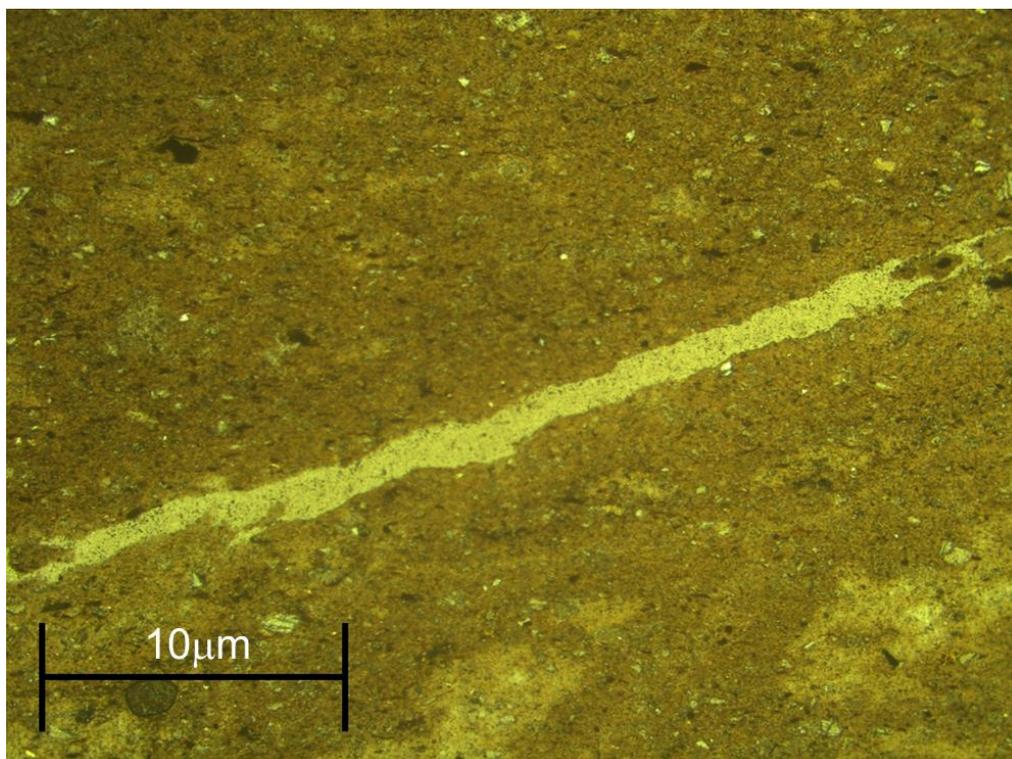
微小亀裂で満たされている。ラミネーションがよく観察できる。

暗い部分：おそらく粗い通常 2 重量%以上の有機材料を含んでいる岩石。

⑤ 変形試験 TEST2 使用後 層理面に対して鉛直方向

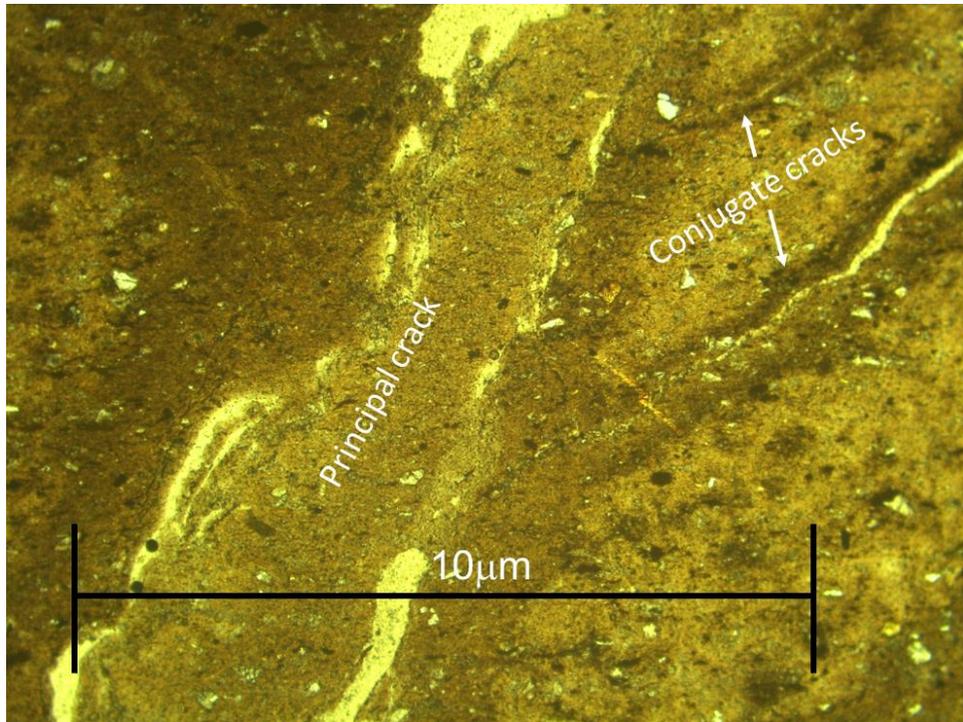


亀裂の開口が明らかで、マトリックスの変形もみられる。マトリックス部分については、他の薄片に比べて、均質である。



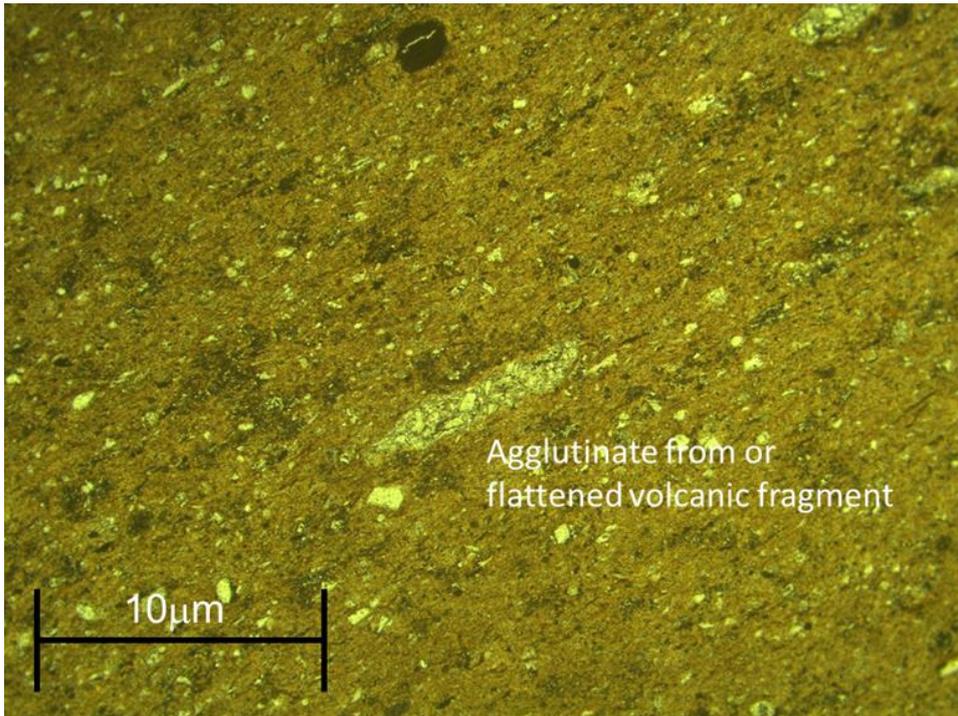
微小亀裂の開口が明らかである。まだらな明るい部分については、おそらく岩石変形エマトリックスから溢れた水によってつくられている。

⑥ 変形試験 TEST2 使用後 層理面に対して水平方向



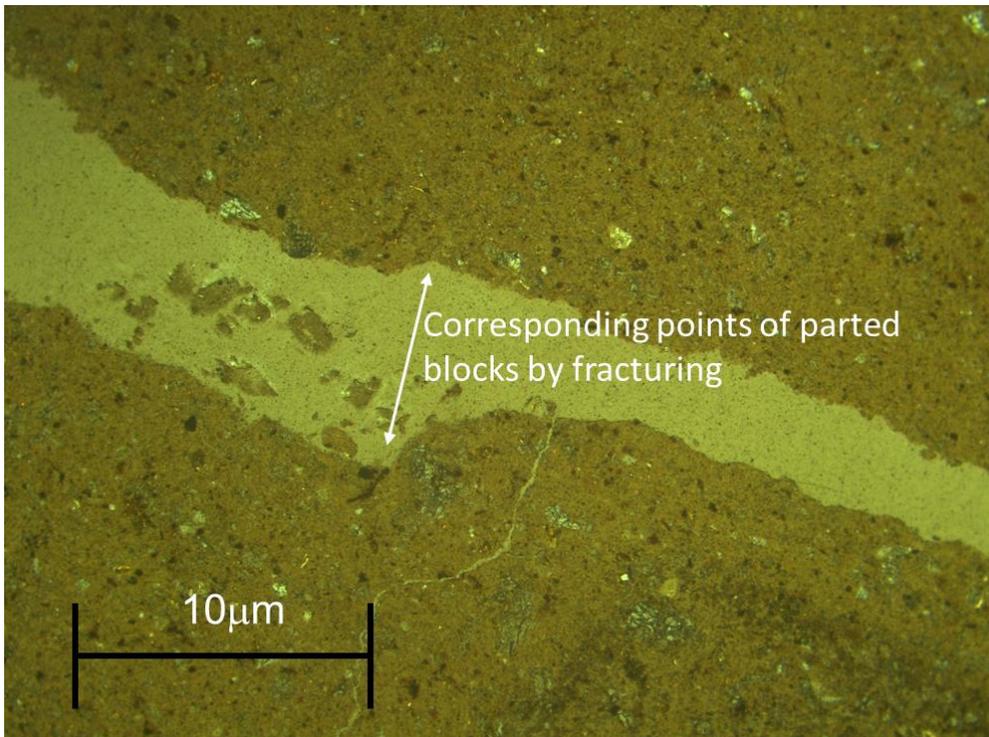
伸張した間隙。マトリックスから溢れだした水によって満たされている。部分的にまだ開いた状態の亀裂が見られ、接合している部分もみられる。

⑦ トランジェントパルス試験使用後 層理面に対して鉛直方向

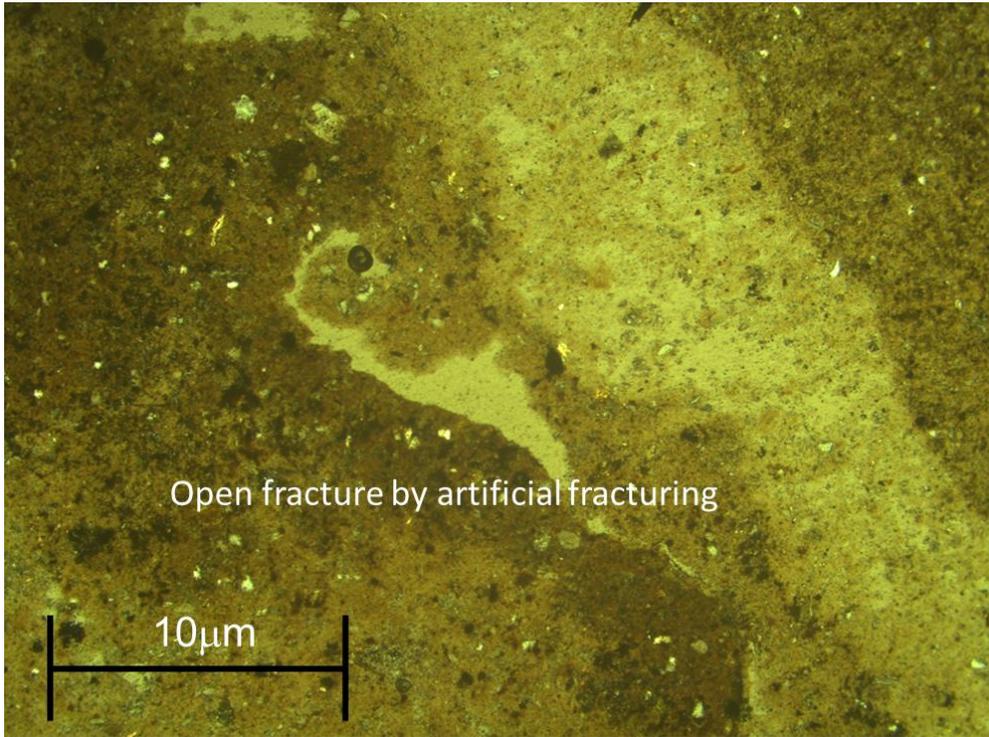


僅かにラミネーションが見られ、有孔虫または火山の断片が見られる。

⑧ トランジェントパルス試験使用後 層理面に対して水平方向



亀裂が見られる。破碎過程で形成された破片群が開放破碎で生じている。



人工的な破碎によって亀裂が開口しているのがわかる。岩石のマトリックスから溢れた水によって亀裂が変形している。

## 【Appendix B】 解析マクロのコード

トランジェントパルス試験での解析に使ったマクロのコードを以下に示す。

Sub fitting()

'変数宣言

Dim eps As Double 'eps:許容誤差

Dim sumU As Double, U As Double, U1 As Double, U2 As Double, sumD As Double,  
D As Double, D1 As Double, D2 As Double, x As Double, h As Double, b As Double, g As  
Double, k As Double, a As Double, ab2 As Double, n As Double

Dim huH As Double, hdH As Double

'許容誤差と初期値の入力

eps = 0.0000001

b = Range("B2").Value

g = Range("B1").Value

k = 1

n = 0

ab2 = Cells(12, 1).Value

a = Cells(12, 2).Value

Do

a = Cells(12 + n, 2).Value

ab = Cells(12 + n, 1).Value

For k = 1 To 20

x = Cells(1 + k, 11).Value

Do

h = F(x, b, g) / DF(x, b, g)

x = x - (1 / 10) \* h

Loop Until Abs(h) < eps

Cells(k + 1, 12).Value = x

U1 = Exp(-a \* x ^ (2)) \* (b + g ^ (2) \* x ^ (2) / b)

U2 = (g ^ (2) \* x ^ (4) / b ^ (2) + (g ^ (2) \* b + g ^ (2) + g + b) \* x ^ (2) / b + (b ^ (2) + g \* b + b))

U = U1 / U2

Cells(k + 1, 13).Value = U

D1 = Exp(-a \* x ^ (2)) \* (b - g \* x ^ (2) / b)

D2 = ((g ^ (2) \* x ^ (4) / b ^ (2) + (g ^ (2) \* b + g ^ (2) + g + b) \* x ^ (2) / b + (b ^ (2) + g \* b + b)) \* Cos(x))

D = D1 / D2

Cells(k + 1, 14).Value = D

Next k

k = 0

With Worksheets("fitting")

.Cells(12 + n, 3).Value = Application.WorksheetFunction.Sum(.Range("m2:m21"))

.Cells(12 + n, 4).Value = Application.WorksheetFunction.Sum(.Range("n2:n21"))

End With

sumU = Cells(12 + n, 3).Value

sumD = Cells(12 + n, 4).Value

huH = (1 / (1 + b + g)) + 2 \* sumU

hdH = (1 / (1 + b + g)) + 2 \* sumD

Cells(12 + n, 7).Value = huH

Cells(12 + n, 8).Value = hdH

```
    If ab2 > 10 Then Exit Do
      ab2 = ab2 + 0.01
      n = n + 1
    Loop
```

End Sub

Function F(x As Double, b As Double, g As Double) As Double

$$F = x * (1 + g) * \text{Cos}(x) - ((g * x ^ (2) / b) - b) * \text{Sin}(x)$$

End Function

Function DF(x As Double, b As Double, g As Double) As Double

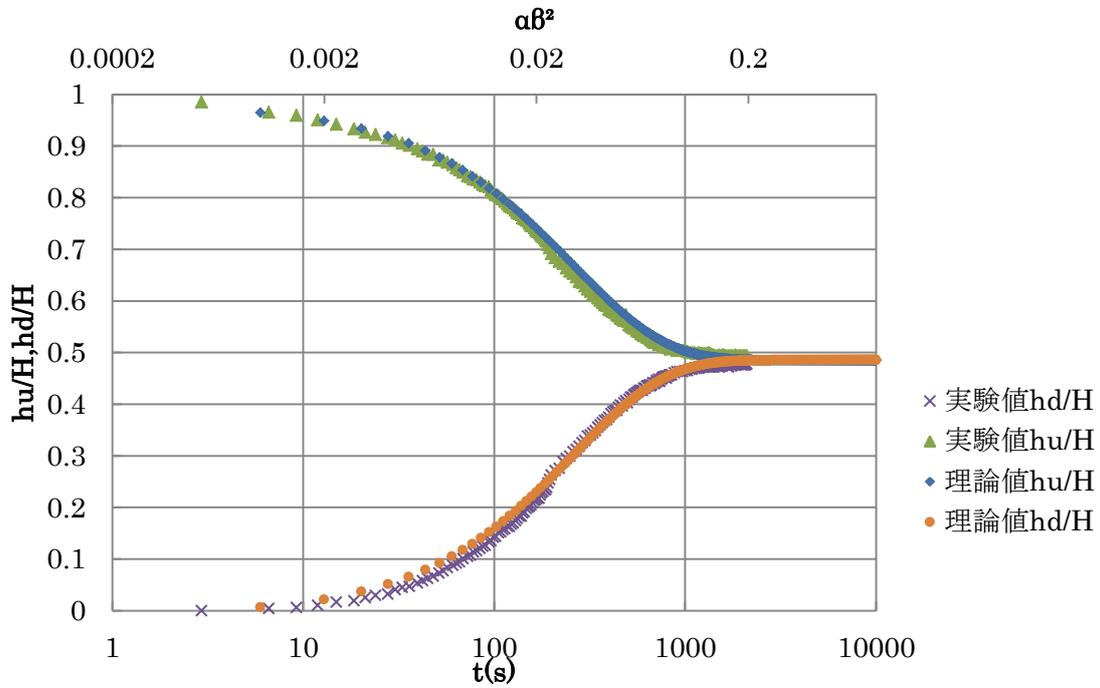
$$DF = x * (-(2 * g / b) - 1 - g) * \text{Sin}(x) + (1 + g + b - g * x ^ (2) / b) * \text{Cos}(x)$$

End Function

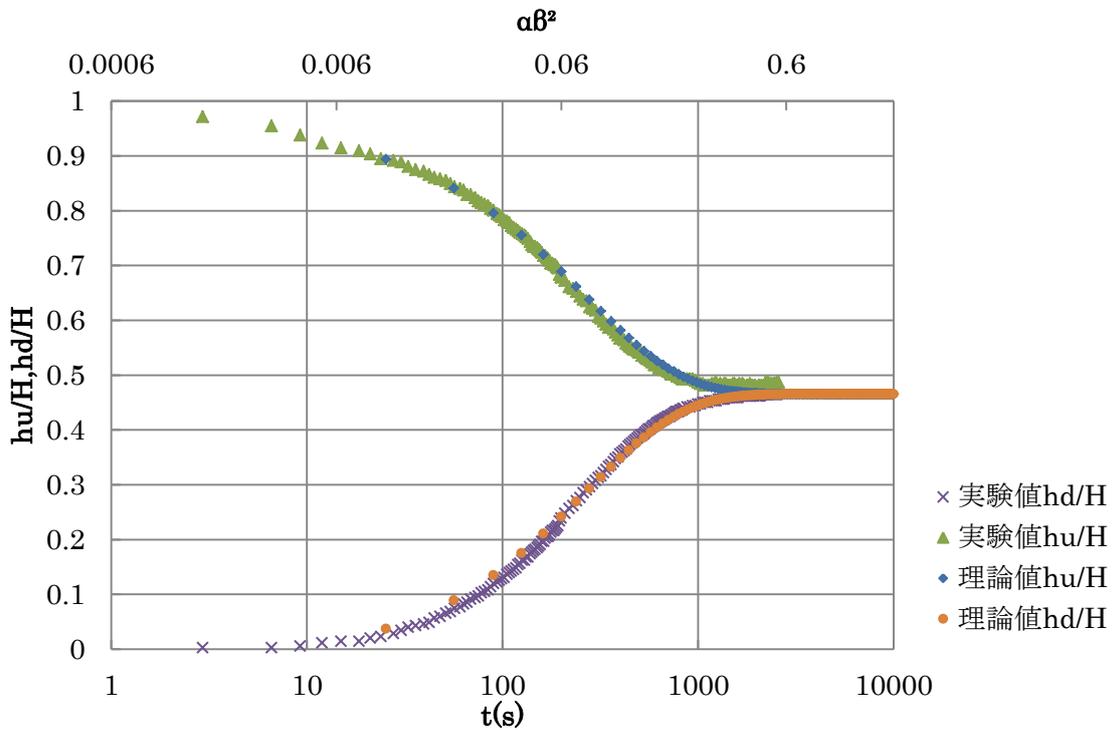
【Appendix C】 トランジェントパルス試験フィッティング結果

【等圧条件】

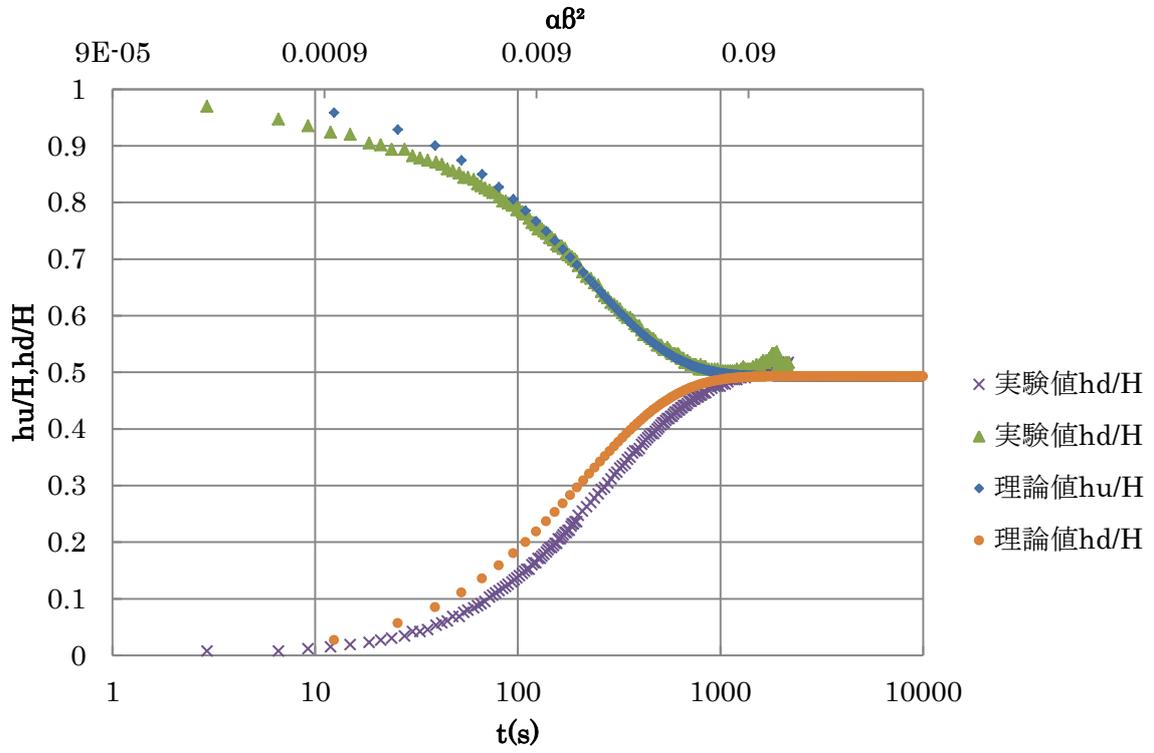
- 10 MPa  $S_s=1.18E-06$ 、 $K=8.39E-11$



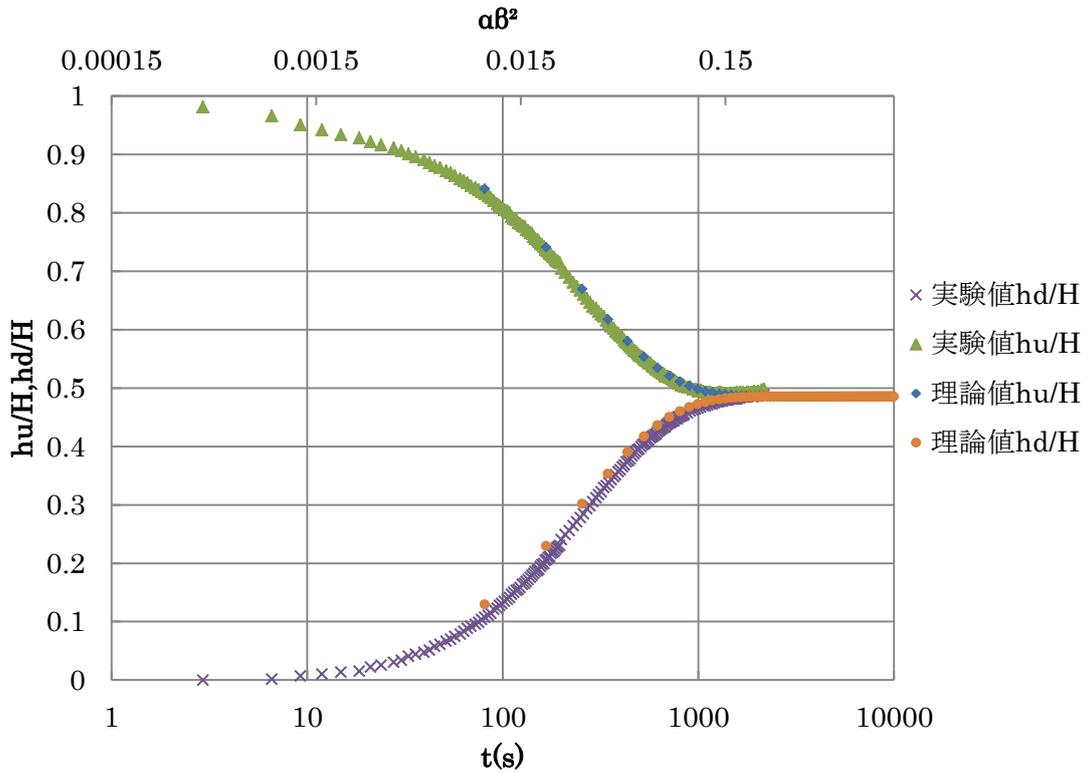
- 13MPa  $S_s=2.95E-06$ 、 $K=7.81E-11$



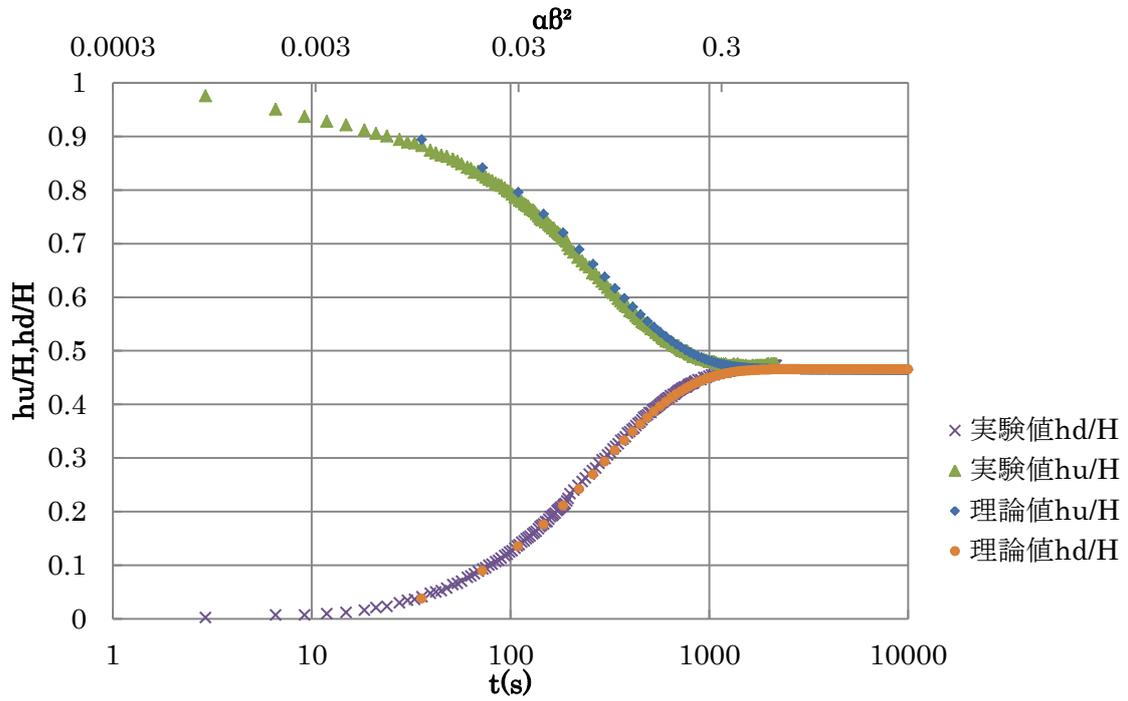
- 15 MPa  $S_s=5.90E-07$ ,  $k=1.10E-10$



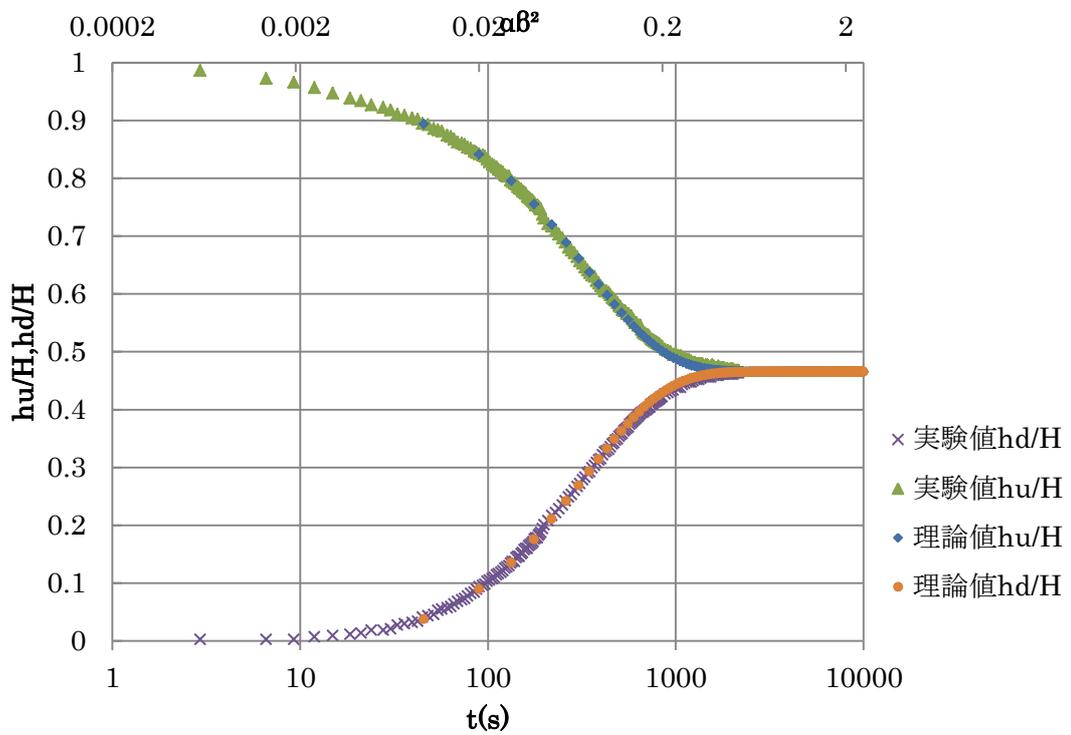
- 18 MPa  $S_s=1.18E-06$ ,  $k=9.94E-11$



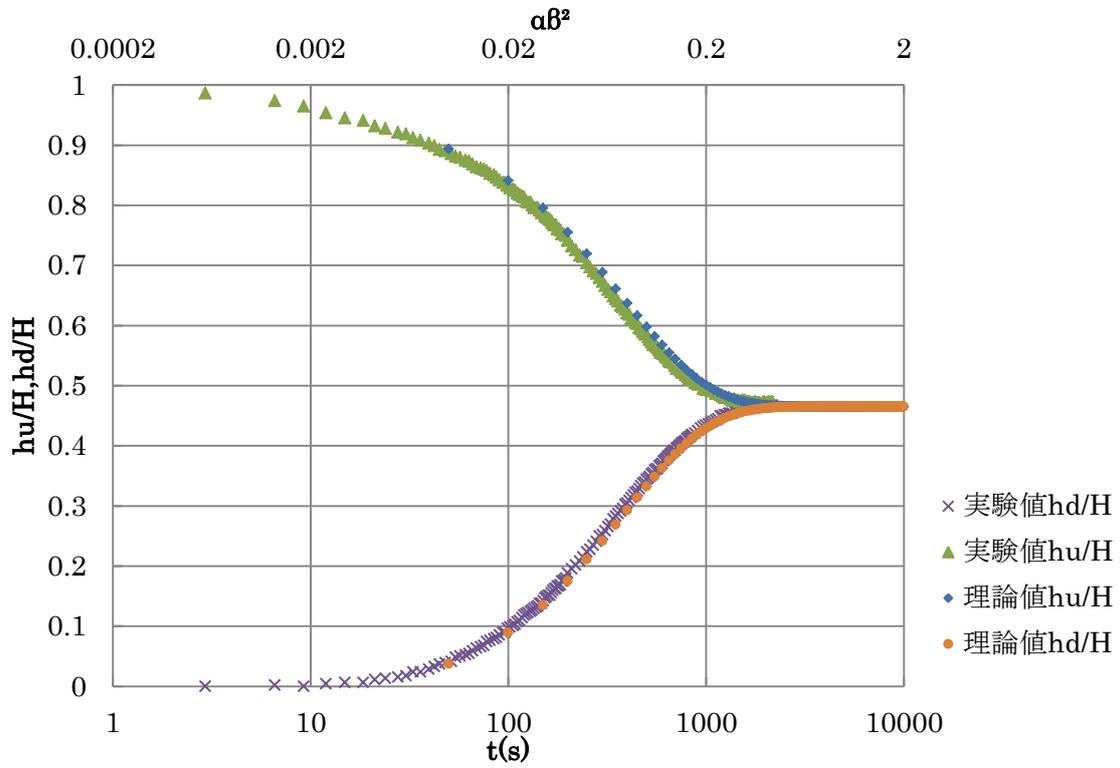
- 20 MPa  $S_S=2.95E-06$ 、 $k=9.30E-11$



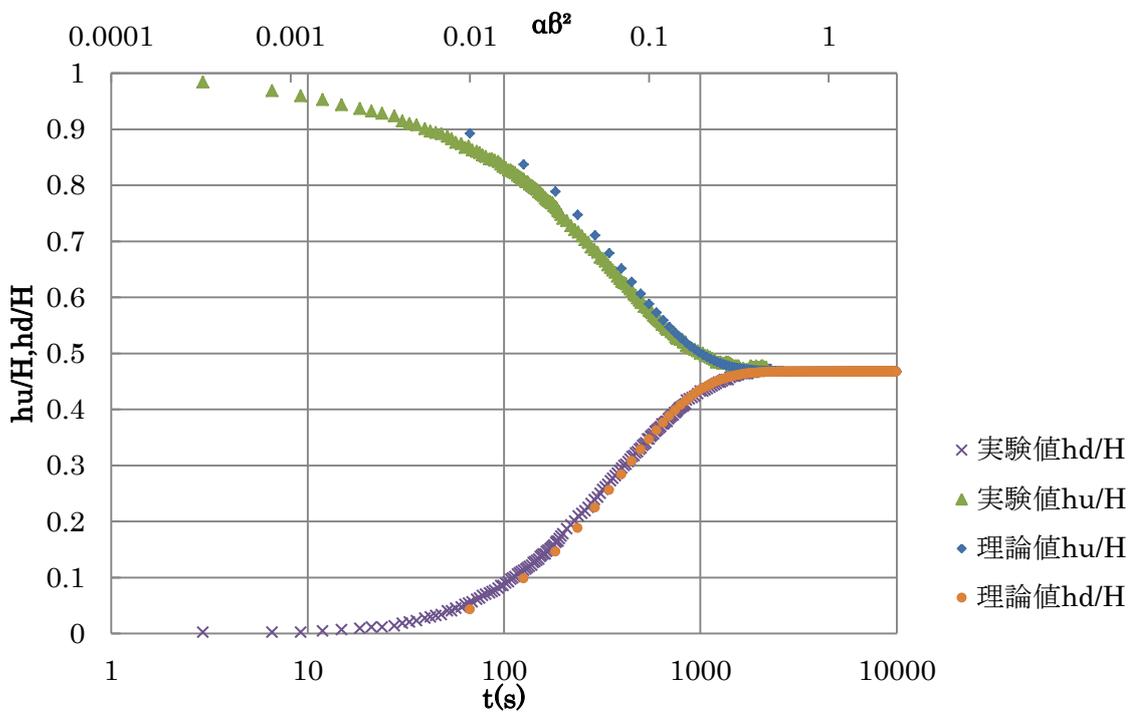
- 23 MPa  $S_S=2.95E-06$ 、 $k=8.99E-11$



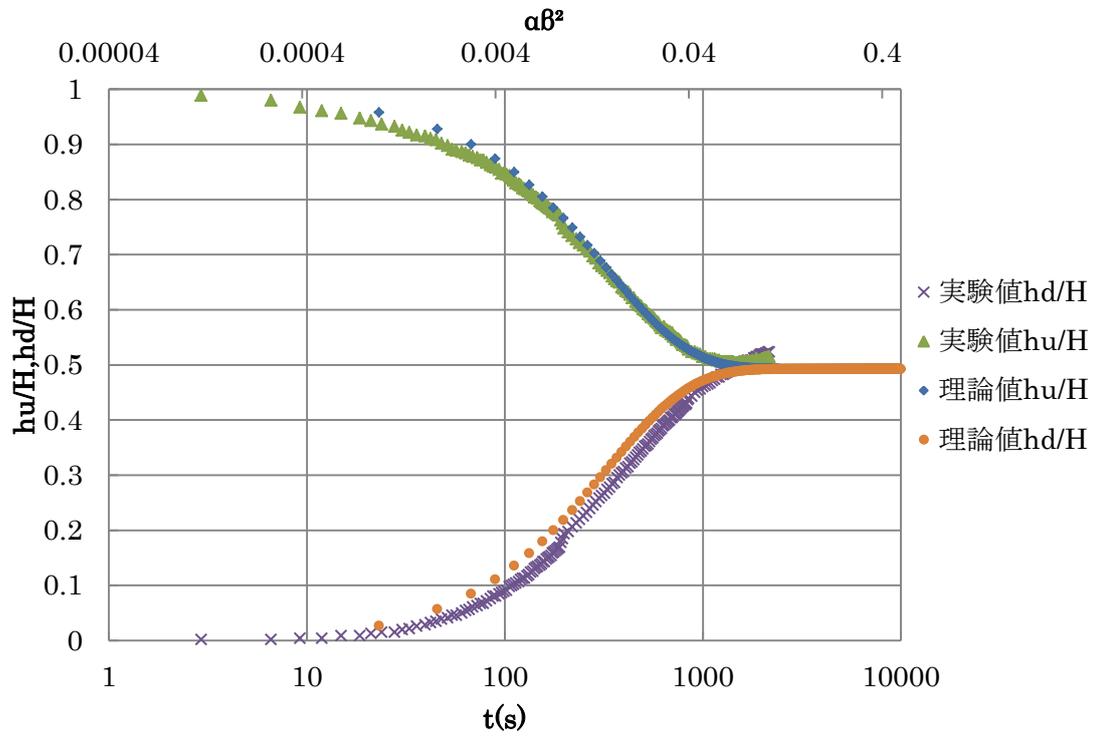
- 25 MPa  $S_s=2.95E-06$ ,  $k=6.70E-11$



- 28 MPa  $S_s=2.75E-06$ ,  $k=7.26E-11$

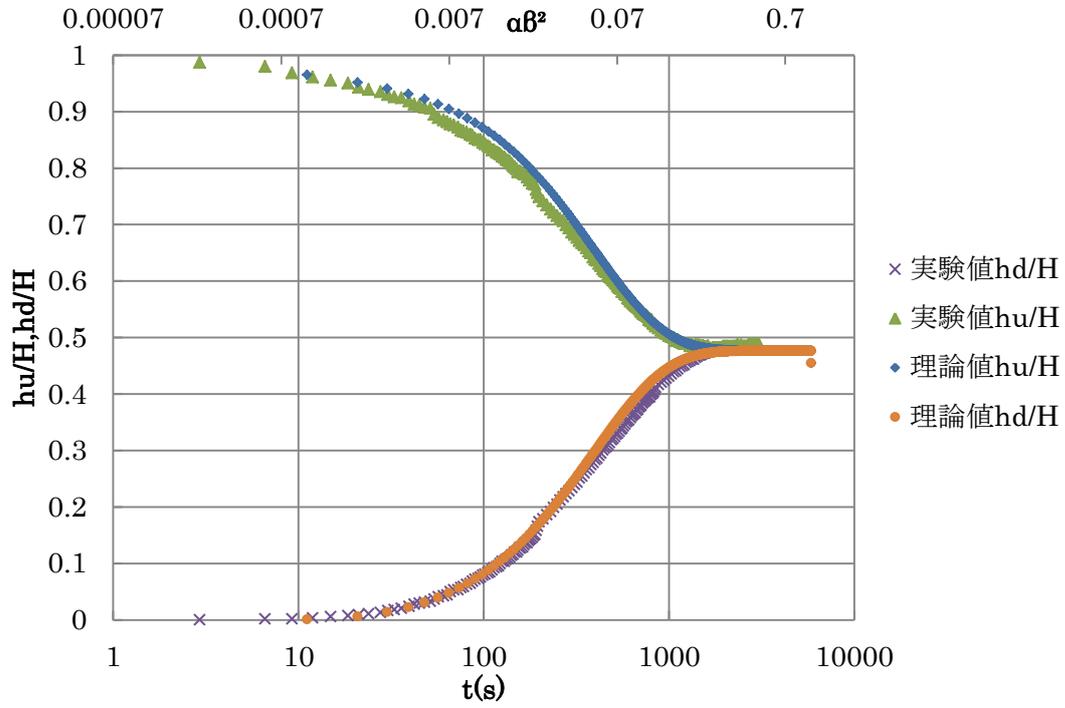


• 30 MPa  $S_s=5.90E-07$ ,  $k=7.71E-11$

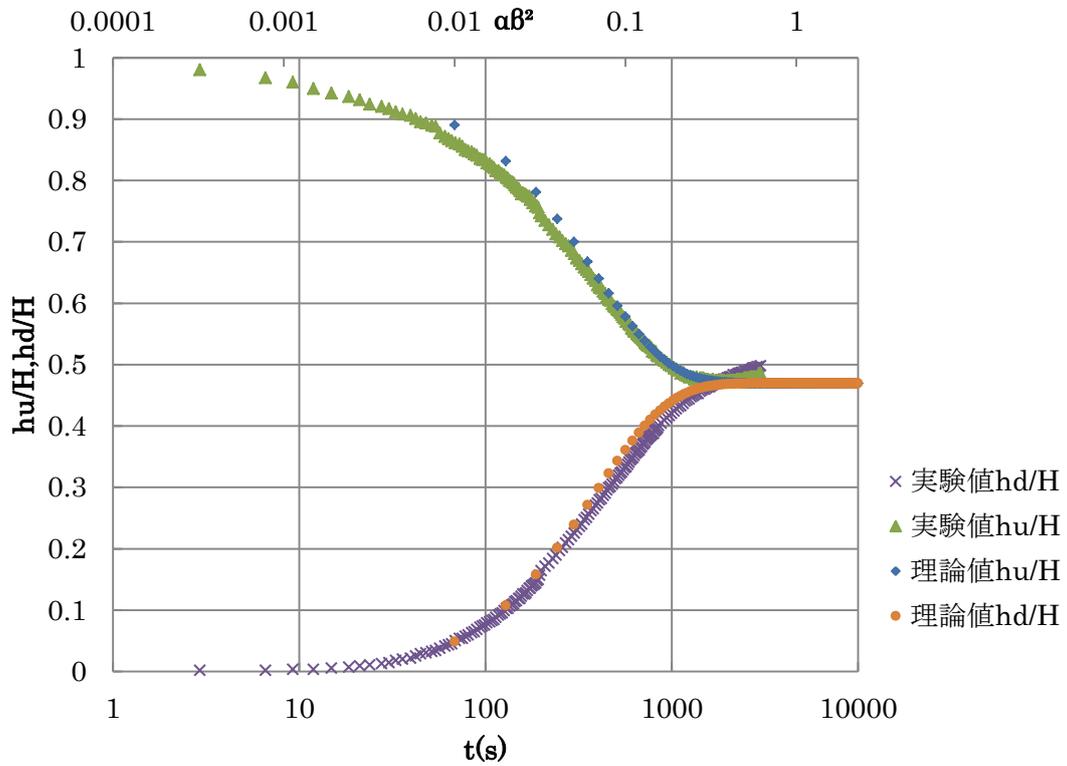


【偏差応力下】

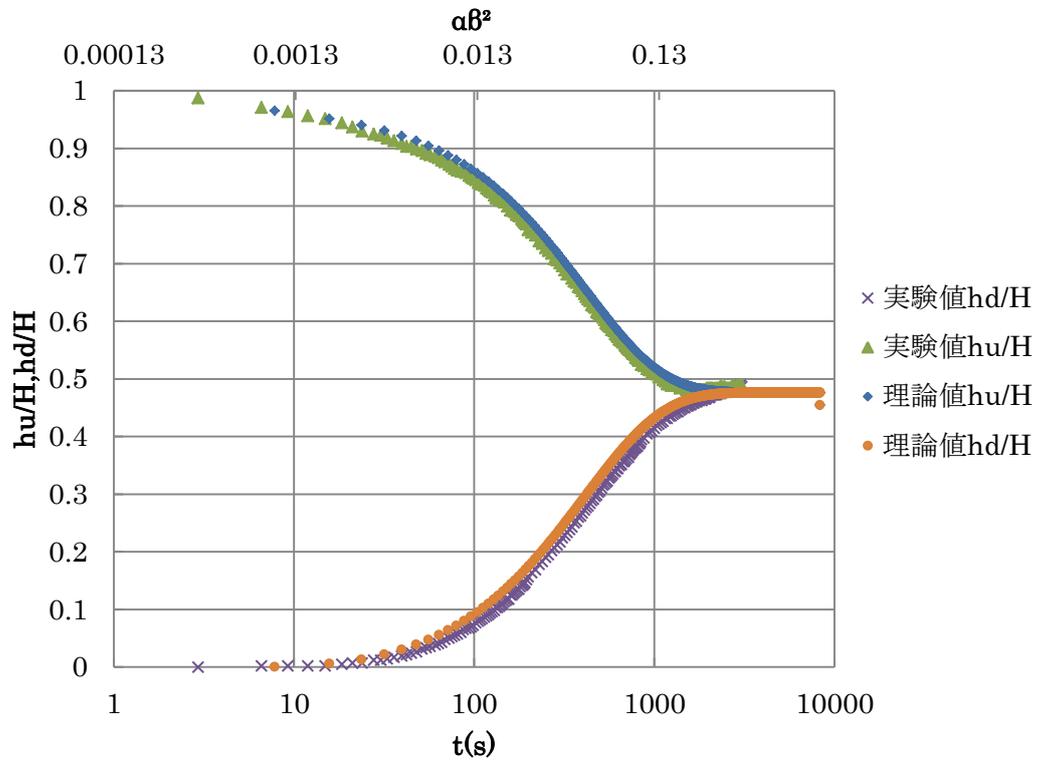
- 差応力 4 MPa  $S_s=1.97E-06$ ,  $k=7.40E-11$



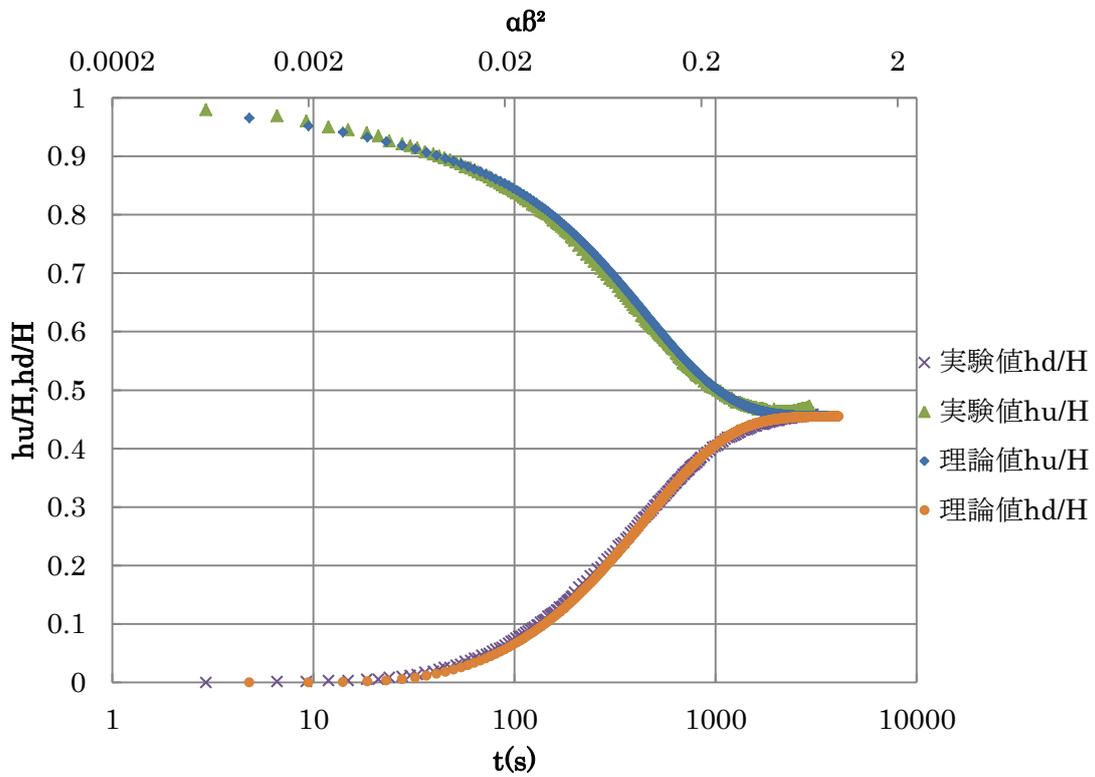
- 差応力 6 MPa  $S_s=2.56E-06$ ,  $k=8.45E-11$



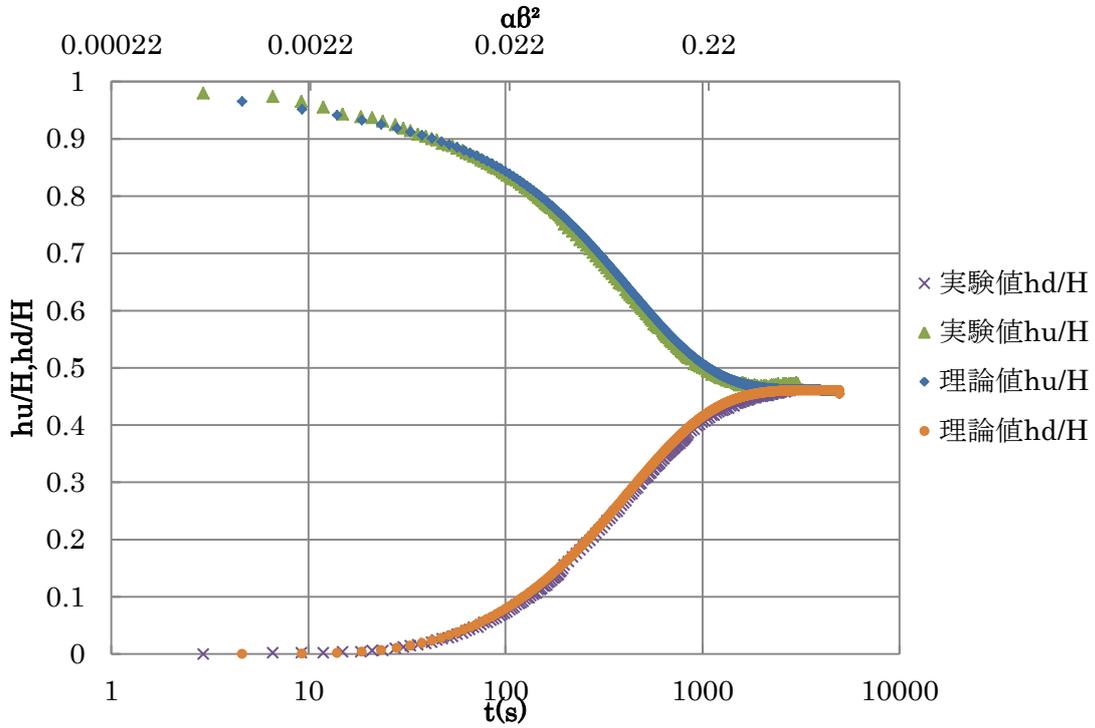
- 差応力 8 MPa  $S_s=1.97E-06$ ,  $k=6.85E-11$



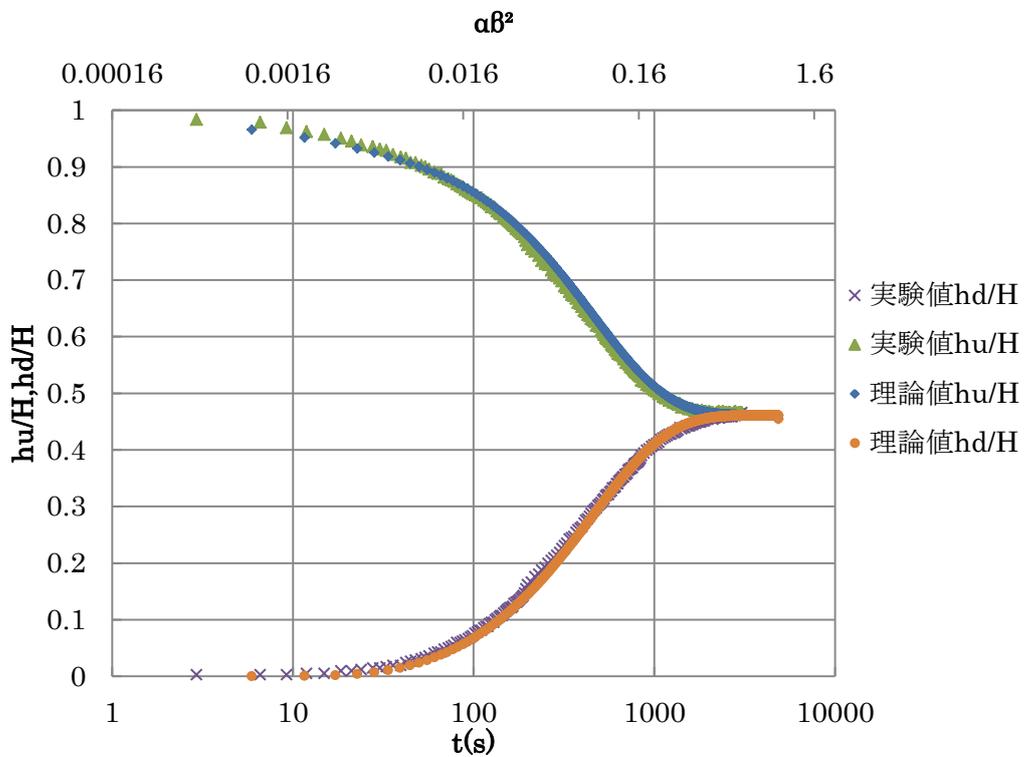
- 差応力 10 MPa  $S_s=3.94E-06$ ,  $k=6.18E-11$



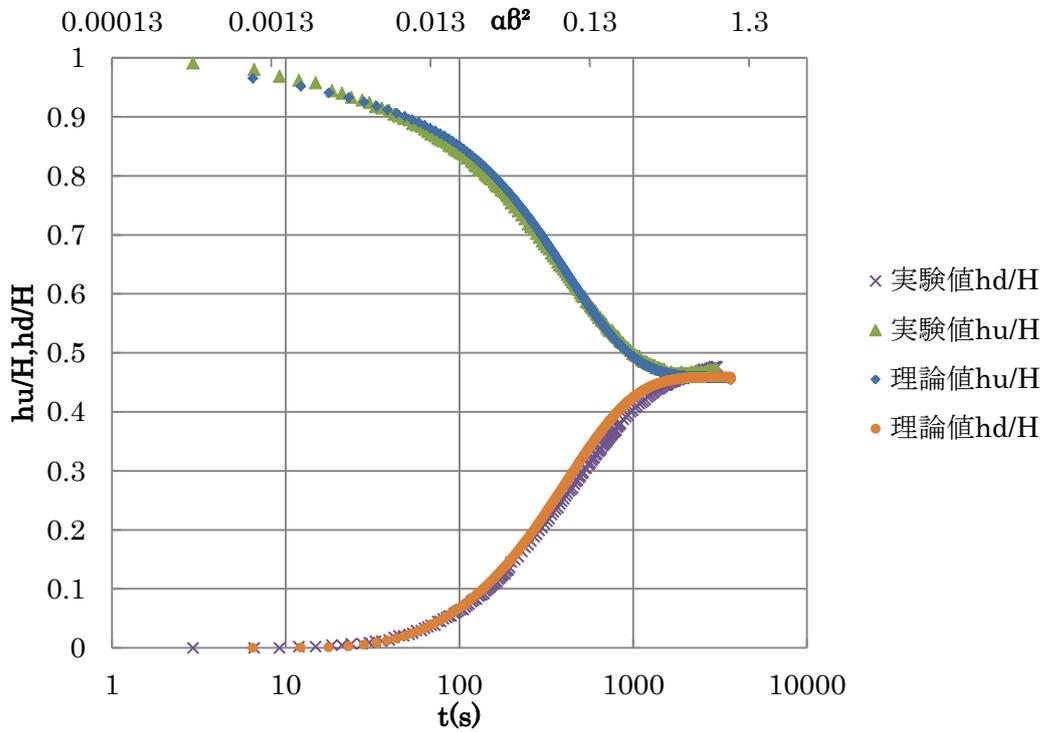
- 差応力 12 MPa  $S_s=3.35E-06$ ,  $k=6.28E-11$



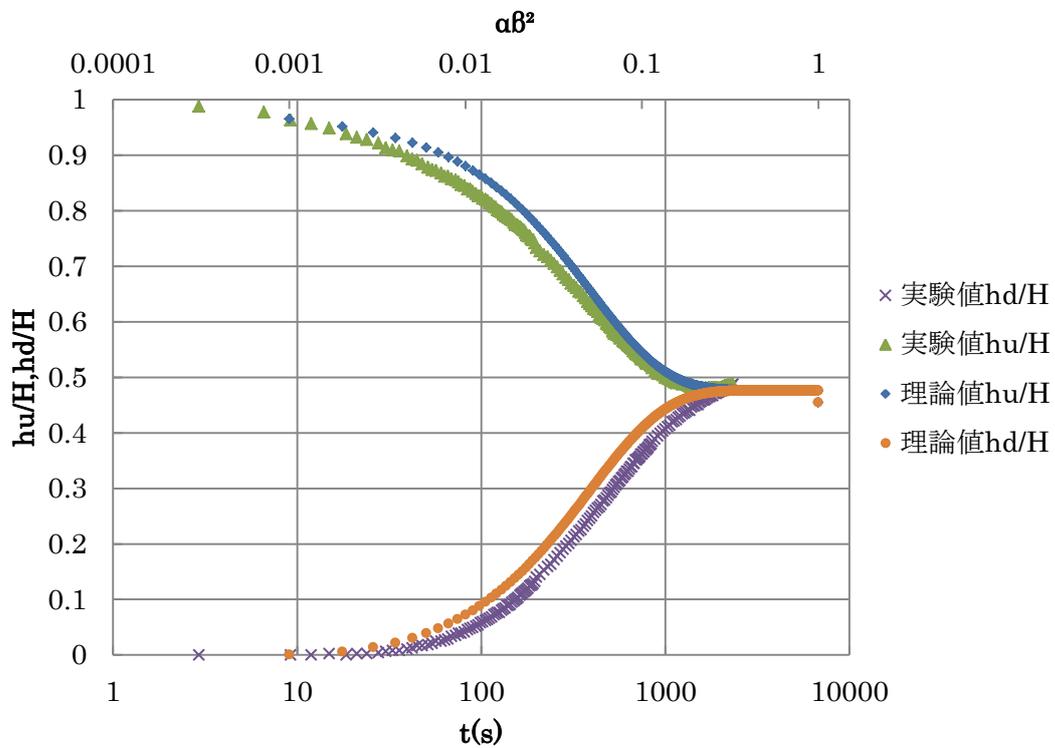
- 差応力 14 MPa  $S_s=3.35E-06$ ,  $k=6.28E-11$



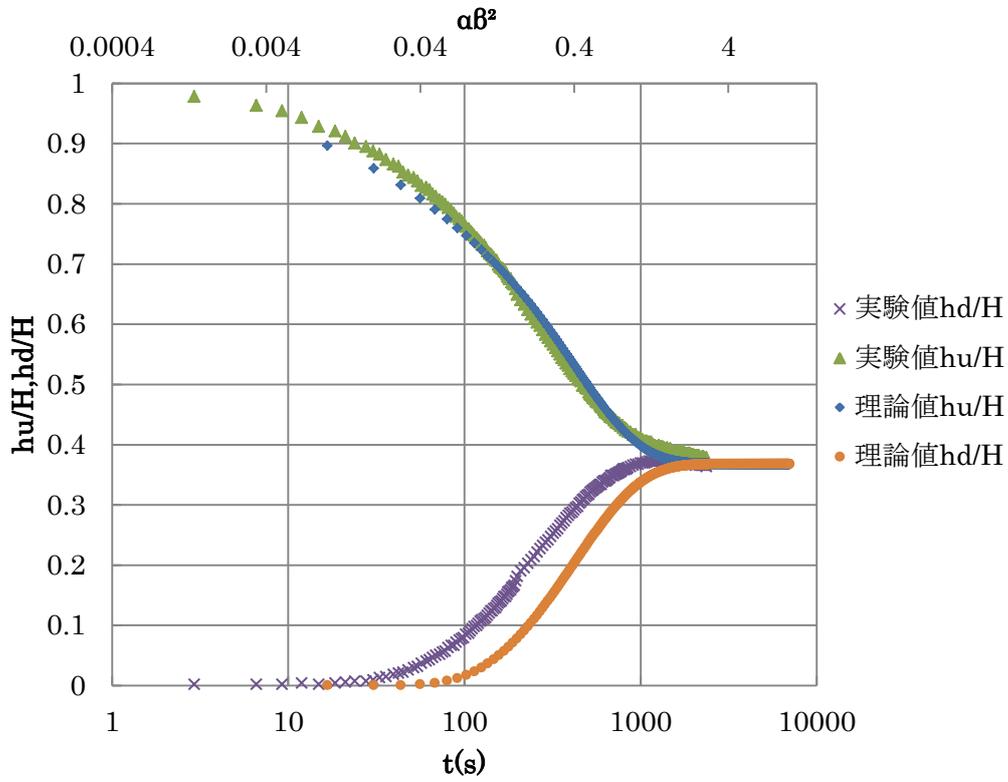
- 18 MPa  $S_s=3.54E-06, k=7.81E-11$



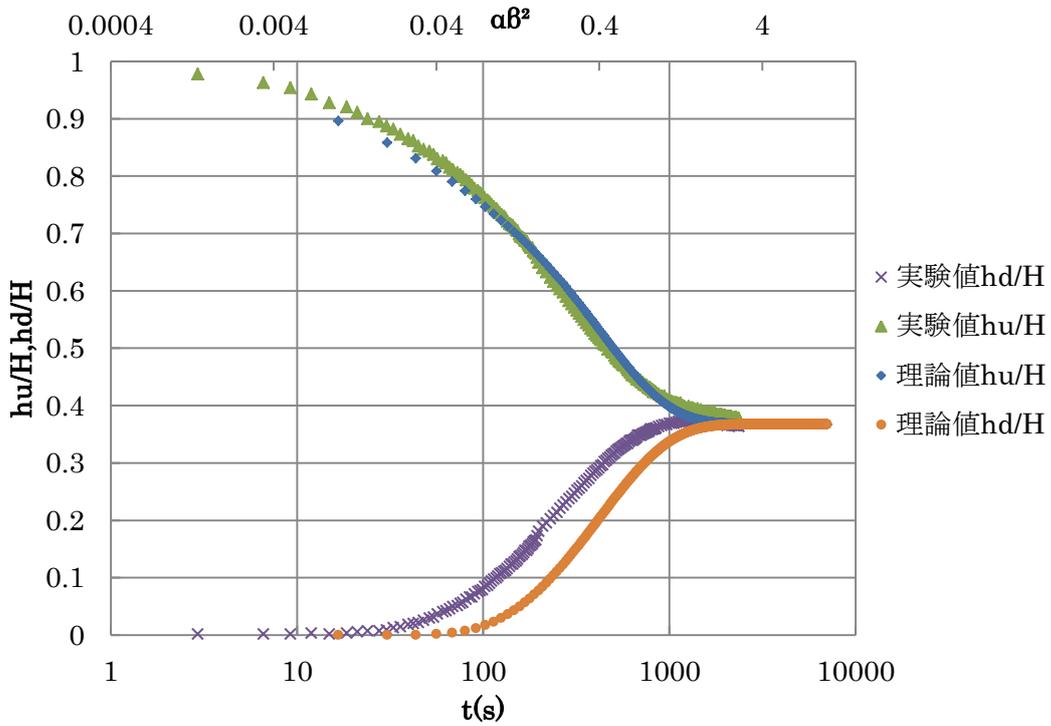
- 差応力 20 MPa  $S_s=1.97E-06, k=7.41E-11$



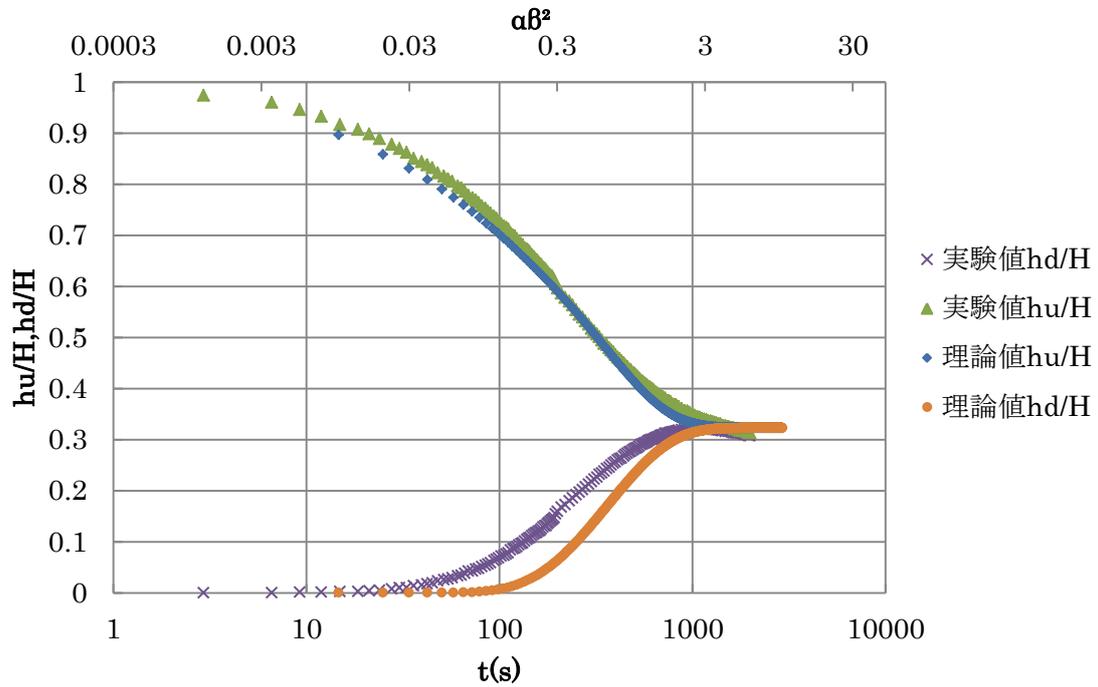
- 差応力 22 MPa  $S_s=1.42E-05, k=9.46E-11$



- 24 MPa  $S_s=9.84E-06, k=8.94E-11$



- 差応力 26 MPa  $S_s=2.16E-05, k=1.35E-10$



- 差応力 28 MPa  $S_s=1.97E-05, k=2.02E-10$

