

Table 5-2 Results of the consolidation-permeability measurement experiments.
(a) Results of exp. 1.

No.	圧密圧力 kgf/cm	試料長さ cm	間隙率	間隙比	透水試験時間 分	透水試験温度 ℃	透水係数 cm/s	浸透率 darcy
1	0.70	3.143	0.661	1.95	70	18.6	6.731E-06	6.966E-03
2	0.98	2.987	0.643	1.80	90	17.4	5.025E-06	5.200E-03
3	1.56	2.820	0.622	1.65	120	16.2	3.419E-06	3.538E-03
4	3.87	2.598	0.590	1.44	120	15.5	1.784E-06	1.847E-03
5	21.1	2.390	0.554	1.24	150	16.5	6.877E-07	7.118E-04
6	48.6	2.009	0.469	0.88	180	16.5	6.402E-08	6.626E-05
7	89.1	1.836	0.419	0.72	180	16.3	1.541E-08	1.595E-05
8	151	1.708	0.376	0.60	270	16.0	4.325E-09	4.476E-06
9	253	1.618	0.341	0.52	240	17.1	1.102E-09	1.141E-06
10	332	1.564	0.318	0.47	300	15.7	7.028E-10	7.274E-07

Table 5-2 Continued.
(b) Results of exp. 2.

No.	圧密圧力 kgf/cm	試料長さ cm	間隙率	間隙比	透水試験時間 分	透水試験温度 ℃	透水係数 cm/s	浸透率 darcy
1	0.48	4.258	0.681	2.13	90	14.5	8.502E-06	8.800E-03
2	0.98	3.603	0.623	1.65	120	14.8	3.106E-06	3.215E-03
3	3.72	3.247	0.581	1.39	150	14.3	1.478E-06	1.530E-03
4	32.4	2.763	0.508	1.03	55	13.9	2.223E-07	2.301E-04
5	59.1	2.547	0.466	0.87	100	13.2	6.963E-08	7.207E-05
6	84.2	2.427	0.440	0.79	120	12.8	3.500E-08	3.623E-05
7	126	2.315	0.413	0.70	150	12.6	1.476E-08	1.528E-05
8	170	2.242	0.394	0.65	150	14.6	7.035E-09	7.281E-06
9	238	2.156	0.370	0.59	180	14.2	3.039E-09	3.135E-06
10	316	2.096	0.352	0.54	300	14.9	1.365E-09	1.413E-06
11	374	2.071	0.344	0.52	300	14.6	9.917E-10	1.026E-06

Table 5-2 Continued.
(c) Results of exp. 3.

No.	圧密圧力 kgf/cm	試料長さ cm	間隙率	間隙比	透水試験時間 分	透水試験温度 ℃	透水係数 cm/s	浸透率 darcy
1	0.55	2.317	0.641	1.79	34	13.5	2.775E-07	2.873E-04
2	0.84	2.211	0.624	1.66	50	12.9	1.964E-07	2.033E-04
3	1.42	2.115	0.606	1.54	60	14.0	1.482E-07	1.534E-04
4	2.57	2.007	0.585	1.41	90	13.8	9.669E-08	1.001E-04
5	3.72	1.932	0.569	1.32	100	13.1	7.395E-08	7.654E-05
6	20.3	1.797	0.537	1.16	90	14.7	3.989E-08	4.129E-05
7	32.4	1.536	0.458	0.85	120	15.0	1.011E-08	1.047E-05
8	48.6	1.378	0.396	0.66	120	15.4	2.857E-09	2.957E-06
9	87.5	1.276	0.348	0.53	120	15.0	1.600E-09	1.656E-06
10	162	1.205	0.309	0.45	270	14.4	3.382E-10	3.501E-07
11	348	1.132	0.265	0.36				

Table 5-2 Continued.
(d) Results of exp. 4.

No.	圧密圧力 kgf/cm	試料長さ cm	間隙率	間隙比	透水試験時間 分	透水試験温度 ℃	透水係数 cm/s	浸透率 darcy
1	0.48	1.750	0.617	1.61	185	18.1	1.335E-07	1.138E-04
2	1.00	1.668	0.598	1.49	119	17.3	1.782E-07	1.844E-04
3	4.44	1.463	0.542	1.18	90	15.2	1.221E-07	1.264E-04
4	24.3	1.337	0.499	1.00	120	15.4	4.737E-08	4.903E-05
5	34.8	1.232	0.456	0.84	120	17.2	2.041E-08	2.112E-05
6	64.8	1.111	0.397	0.66	150	17.4	4.707E-09	4.871E-06
7	130	1.039	0.355	0.55	180	18.8	1.263E-09	1.307E-06
8	211	0.988	0.322	0.47	300	15.6	2.584E-10	2.674E-07
9	394	0.944	0.290	0.41	400	15.1	9.702E-11	1.004E-07

Table 5-2 Continued.
(e) Results of exp. 5.

No.	圧密圧力 kgf/cm	試料長さ cm	間隙率	間隙比	透水試験時間 分	透水試験温度 ℃	透水係数 cm/s	浸透率 darcy
1	0.84	4.530	0.606	1.54	260	15.8	5.914E-07	6.121E-04
2	1.42	4.289	0.584	1.40	140	16.0	3.723E-07	3.854E-04
3	2.57	4.104	0.565	1.30	120	16.8	2.552E-07	2.641E-04
4	24.3	3.559	0.499	1.00	150	17.8	5.828E-08	6.032E-05
5	56.7	3.190	0.441	0.79	180	17.7	1.425E-08	1.475E-05
6	134	2.843	0.373	0.59	300	17.8	2.989E-09	3.093E-06
7	281	2.574	0.307	0.44	300	15.4	5.946E-10	6.154E-07
8	373	2.498	0.286	0.40	300	16.0	2.733E-10	2.829E-07

Table 5-2 Continued.
(f) Results of exp. 6.

No.	圧密圧力 kgf/cm	試料長さ cm	間隙率	間隙比	透水試験時間 分	透水試験温度 ℃	透水係数 cm/s	浸透率 darcy
1	0.84	5.112	0.567	1.31	180	18.6	1.983E-07	2.053E-04
2	1.99	4.703	0.529	1.12	180	18.5	1.124E-07	1.163E-04
3	4.59	4.338	0.489	0.96	180	18.5	6.467E-08	6.693E-05
4	24.3	3.748	0.409	0.69	180	19.9	1.766E-08	1.828E-05
5	64.0	3.345	0.338	0.51	240	20.0	4.937E-09	5.110E-06
6	93.2	3.186	0.305	0.44	300	21.0	2.224E-09	2.302E-06
7	171	2.978	0.261	0.35	367	20.0	9.318E-10	9.644E-07

Table 5-2 Continued.
(g) Results of exp. 7.

N o.	圧密圧力 kgf/cm	試料長さ cm	間隙率	間隙比	透水試験時間 分	透水試験温度 ℃	透水係数 cm/s	浸透率 darcy
1	0.48	6.540	0.780	3.54	15	21.5	8.603E-06	8.904E-03
2	0.70	4.048	0.644	1.81	70	20.7	1.077E-06	1.114E-03
3	1.27	3.633	0.604	1.52	126	21.6	4.642E-07	4.805E-04
4	3.72	3.314	0.565	1.30	180	21.7	2.237E-07	2.315E-04
5	20.3	3.091	0.534	1.15	180	23.1	1.277E-07	1.315E-04
6	50.2	2.760	0.478	0.92	180	23.4	5.017E-08	5.193E-05
7	110	2.519	0.428	0.75	240	21.7	2.247E-08	2.325E-05
8	235	2.274	0.367	0.58	240	21.7	6.508E-09	6.736E-06
9	394	2.133	0.325	0.48	240	21.7	2.698E-09	2.793E-06

Table 5-2 Continued.
(h) Results of exp. 8.

N o.	圧密圧力 kgf/cm	試料長さ cm	間隙率	間隙比	透水試験時間 分	透水試験温度 ℃	透水係数 cm/s	浸透率 darcy
1	0.70	4.129	0.643	1.80	80	23.0	9.554E-07	9.889E-04
2	1.27	3.692	0.601	-1.51	120	23.1	4.615E-07	4.777E-04
3	3.58	3.421	0.570	1.32	120	23.1	2.430E-07	2.515E-04
4	0.48	3.441	0.572	1.34	120	23.4	2.409E-07	2.493E-04
5	18.6	3.267	0.549	1.22	120	23.4	2.229E-07	2.307E-04
6	40.5	3.002	0.509	1.04	120	23.8	6.878E-08	7.119E-05
7	89.1	2.825	0.479	0.92	136	24.2	3.718E-08	3.848E-05
8	0.41	2.829	0.479	-0.92	120	23.8	4.962E-08	5.136E-05
9	58.3	2.733	0.461	0.86	120	23.6	3.454E-08	3.575E-05
10	155	2.493	0.409	0.69	152	22.5	1.599E-08	1.655E-05
11	273	2.321	0.365	0.58	180	22.0	4.631E-09	4.793E-06
12	382	2.209	0.333	0.50	180	22.2	1.667E-09	1.726E-06
13	153	2.218	0.336	0.51	180	22.3	3.008E-09	3.113E-06
14	26.7	2.253	0.346	0.53	180	22.3	4.131E-09	4.275E-06
15	0.48	2.308	0.362	0.57	180	22.5	5.617E-09	5.814E-06
16	26.7	2.297	0.359	0.56	180	22.4	5.211E-09	5.393E-06
17	148	2.260	0.348	0.53	180	21.8	3.692E-09	3.821E-06
18	346	2.193	0.328	0.49	240	21.5	1.015E-09	1.050E-06
19	39.7	2.233	0.340	0.52	180	21.4	2.816E-09	2.914E-06
20	0.48	2.279	0.354	0.55	210	20.4	5.178E-09	5.359E-06

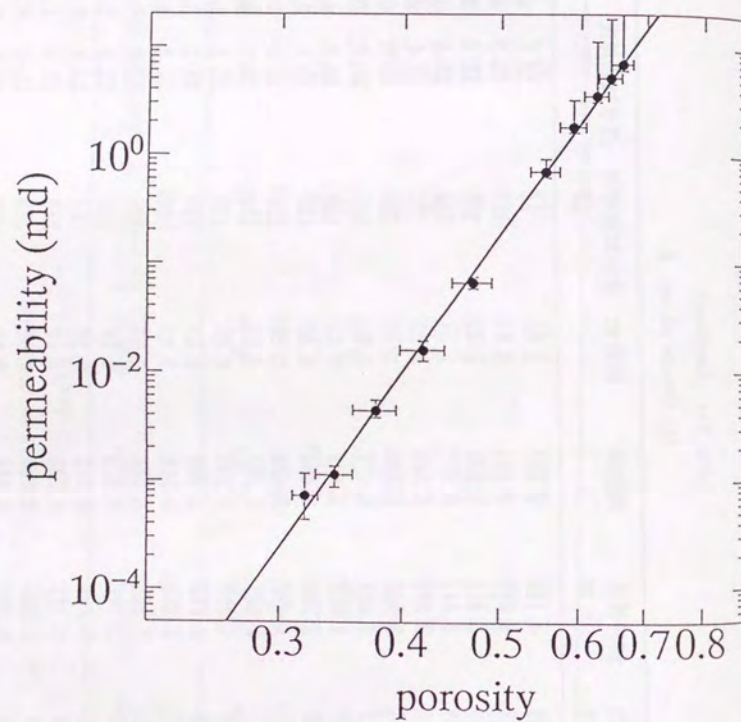


Fig. 5-9 Relationships between permeability and porosity on double logarithmic scales
(a) Results of exp. 1.

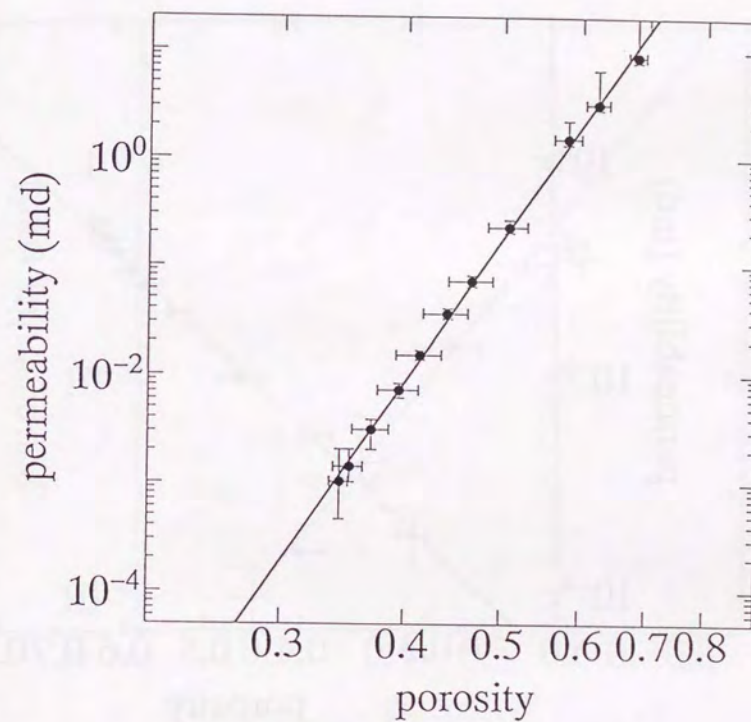


Fig. 5-9 Continued.
(b) Results of exp. 2.

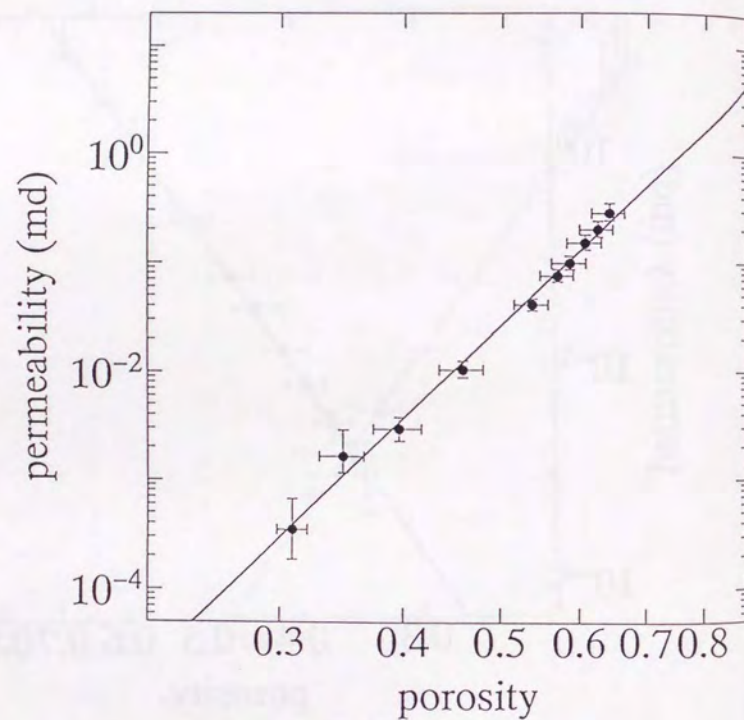


Fig. 5-9 Continued.

(c) Results of exp. 3.

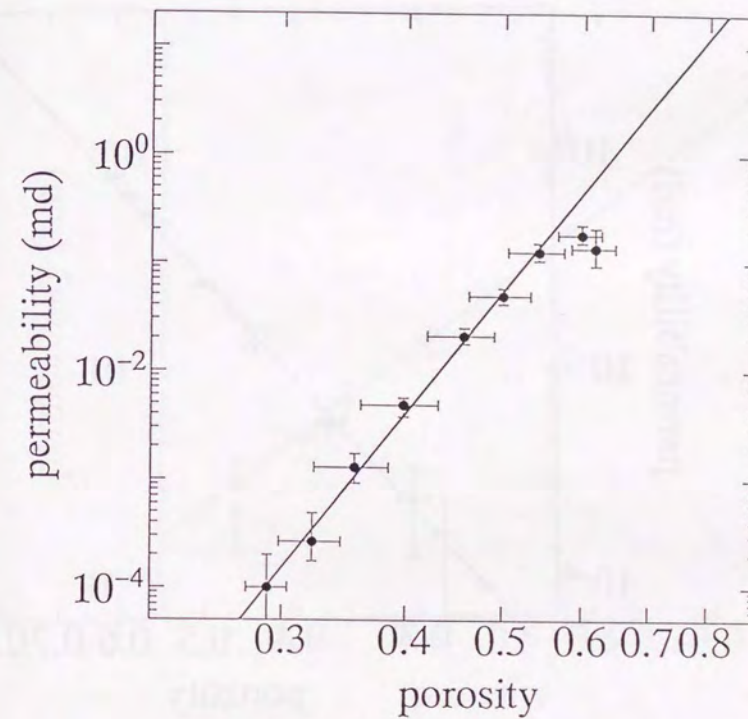


Fig. 5-9 Continued.

(d) Results of exp. 4.

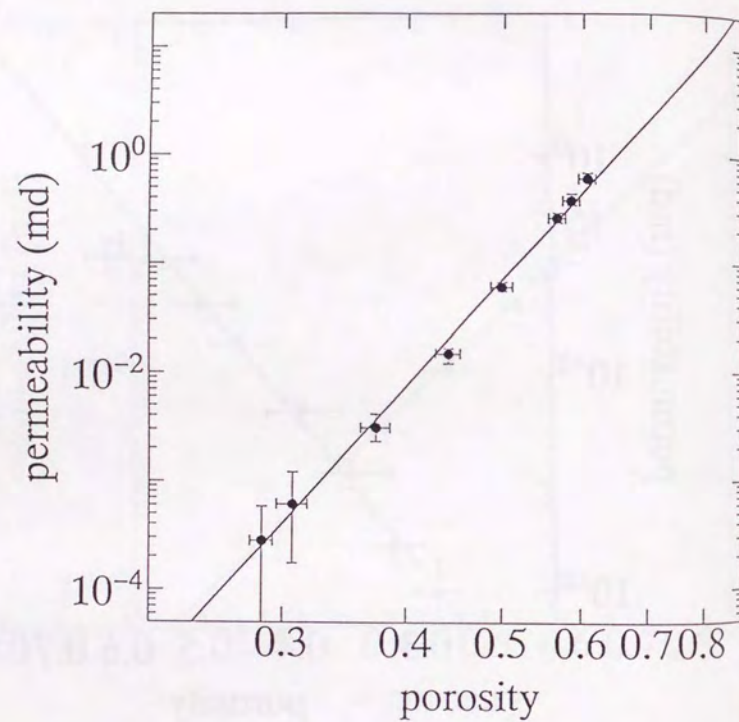


Fig. 5-9 Continued.

(e) Results of exp. 5.

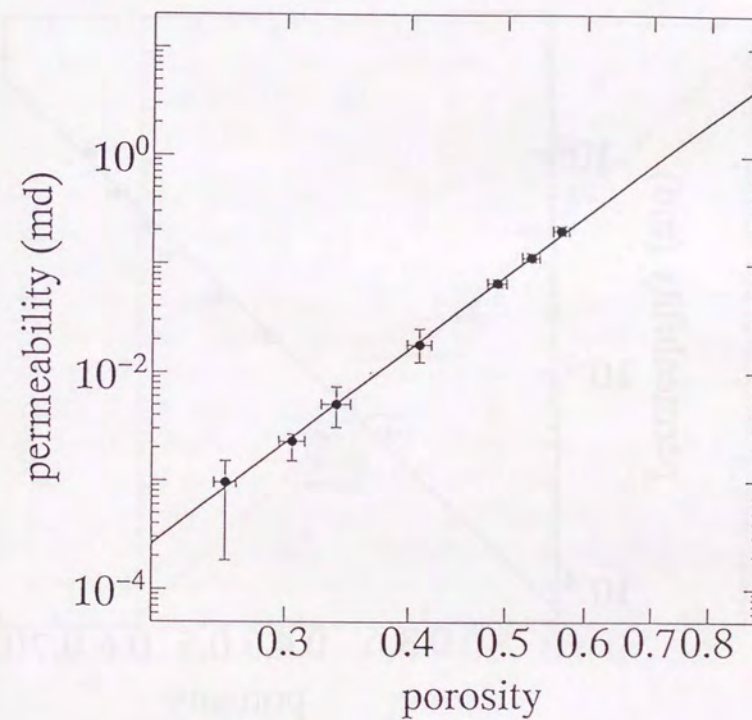


Fig. 5-9 Continued.

(f) Results of exp. 6.

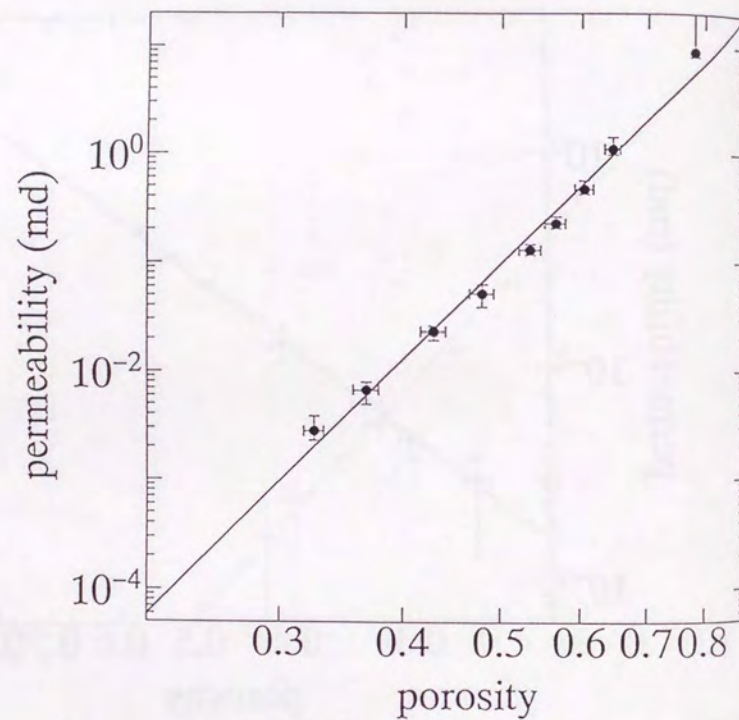


Fig. 5-9 Continued.

(g) Results of exp. 7.

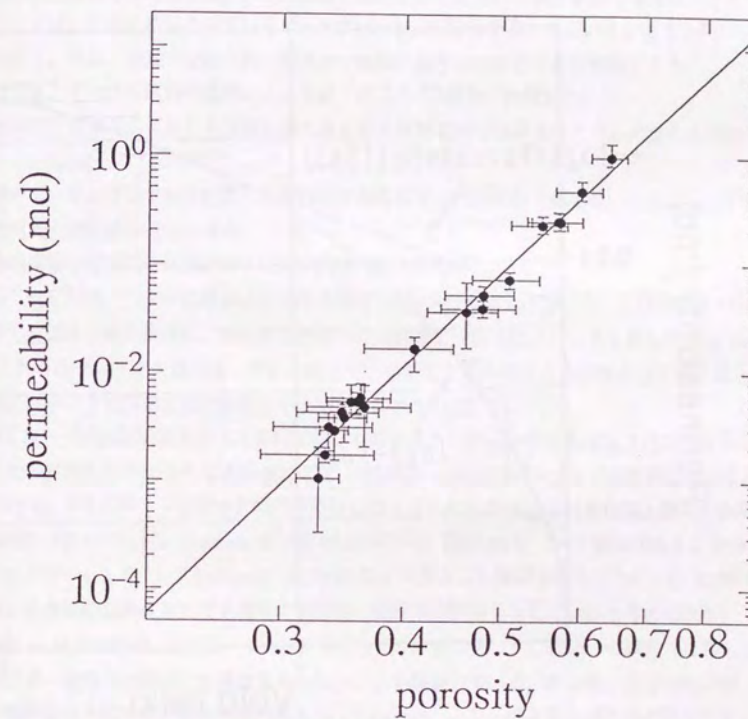


Fig. 5-9 Continued.

(h) Results of exp. 8.

Experiment No.3

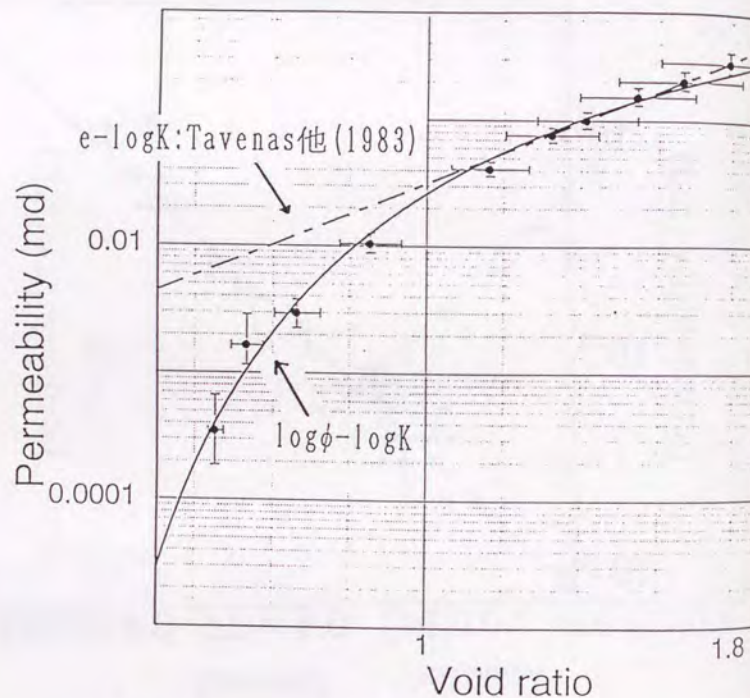


Fig. 5-10 Relationship between logarithms of permeability and void ratio.

$$K = K_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^a \quad (5.20)$$

と表される。ここに、 K_0 :初期浸透率、 ϕ_0 :初期間隙率、 a :定数、である。

5. 3. 6 過去の実験との比較

比較的低上載応力の領域では、今回の実験と同様の手法を用いた検討が多くなされてきている。ここでは、それらに示されているデータが(5.20)式の関係を満たしているかどうかについて検討を行う。即ち、前節で求められた関係が一般的に成り立つかどうかの検討である。

ここでは、データを試料の種類によって以下のように3通りに分類した。

A. 粉末試料や露頭から採取した試料を練り返したり試料室内で沈降させたりした後に圧密試験を行ったもの。

B. 露頭やボーリングコアから採取した試料をできるだけ自然の状態を乱さないようにし、圧密試験機内で圧密試験を行ったもの。

C. 泥質堆積物や泥質岩を圧密させずに透水試験を行ったもの。

これらそれぞれのデータの記載および引用文献はTable 5-3に示されている。これらの各々のデータを前述の方法と同様に、間隙率と浸透率の両対数グラフ上にプロットし直した(Fig. 5-11)。これらのデータの大部分は、文献に載っているグラフ上の測定点を数値として読み取っているために、データにはある程度の誤差がすでに含まれている。

Aのグループの試料の結果のうちの代表的なものをまとめて示した結果(Fig. 5-12)を見ると、それぞれの試料の圧密に伴う浸透率の変化は、間隙率との両対数グラフ上で直線的な傾向を示すと見れる。Bのグループのデータの代表的なものを示した結果(Fig. 5-13)では、測定点の存在する範囲が狭いうえに、Tavenas et al.(1983)のデータを除いてはデータ数は少なく、そのバラつきも大きい。しかし、Tavenas et al.(1983)のデータからも確認できるように、(5.20)式の関係は、未擾乱の試料に対しても適切な浸透率と間隙率の関係を与えていると考えられる。

Lapierre et al.(1990)は、AグループのデータとBグループのデータには同一の試料で比較した場合浸透率-間隙率の関係に差異は見られないことを報告している。彼らは、走査型電子顕微鏡の観察結果と間隙径分布の測定結果も示しているが、これらの差異もほとんど見られず、練り返すことによっても粘土鉱物の団粒構造は破壊されず、透水特性は変化しないことを示している。

このように、過去の文献のデータの検討結果からも、(5.20)式の妥当性は確かめられ、さらに、Fig. 5-13のデータやLapierre et al.(1990)の議論から、自然環境下で力学的圧密が進行した試料に関しても、(5.20)式は適切な見積を与える式であると捉えることができる。

Table 5-3 Summary of compiled data from published articles.
(a) Remolded and/or deposited samples (1).

file name number	location	sample	sample property preparation porosity(%)	method of K-test	a value	remarks	reference
P-1	21	kaolinite	PI=31.9, LL=53.6	50-78	10.87	flow pump	Pane et al. (1983)
XII-2	8 鳥尻層群の与那原層		remolded	21-51	7.11	Terzaghi	新城、小宮(1983)
XII-4	8 鳥尻層群の折里層			21-50	7.26	Terzaghi	新城、小宮(1983)
K-V-2	7 栗和田層			43-56	7.79	Terzaghi	小島ほか(1977)
XL-1	14	kaolinite	CF(<5μ)=65	39-66	7.35	falling head	Michael, Lin(1984)
XX-V-PI	1 Iyosing	bentonite		34			McKelvey et al. (1962)
XX-V-P2	1 Iyosing	bentonite		34			McKelvey et al. (1962)
XX-V-P3	1 Iyosing	bentonite		34			McKelvey et al. (1962)
XX-V-P4	1 Iyosing	bentonite		39			McKelvey et al. (1962)
XX-V-P5	1	shale		24			McKelvey et al. (1962)
XX-V-P6	1	shale		24			McKelvey et al. (1962)
YA-1	4	kaolinite		52-60	8.53		Varner(1964)
YA-2	3	illite		48-67	10.66		Varner(1964)
YA-3	4 Iyosing	bentonite		57-91	19.11		Varner(1964)
XO-K	19	kaolinite	PI=27-31	remolded	10.62 NaCl	Terzaghi	Mesri, Olson(1970)
XO-1	34	illite	PI=31-32	remolded	8.94 NaCl	Terzaghi	Mesri, Olson(1970)
XO-S	36	saectite	PI=31-47	remolded	15.31 NaCl	Terzaghi	Mesri, Olson(1970)
OL-1	2	kaolinite		57-59	6.61	flow pump	Olsen(1966)
OL-2	3	kaolinite		36-55	7.81	flow pump	Olsen(1966)
OL-3	1	kaolinite		22	0.002N-NaCl	flow pump	Olsen(1966)
S-1	6	bentonite	PI=72.2, LL=118.4 deposited	56-67	35.52	falling head	Raymond(1966)
S-2	15 New Liskeard		PI=39.9, LL=68.6 deposited	41-57	9.40	falling head	Raymond(1966)
S-3	16 Leda		PI=17.1, LL=33.4 deposited	35-52	6.47	falling head	Raymond(1966)
S-4	6 Don Vally		PI=22.2, LL=41.2 deposited	41-57	6.96	falling head	Raymond(1966)
S-5	14 Leda		PI=17.1, LL=33.4 deposited	35-47	6.08	falling head	Raymond(1966)
S-6	7 greyish sandy clay		remolded	25-38	7.50	constant head	Samarasinghe et al. (1982)
S-G-2	5 greyish sandy clay		remolded	26-34	6.93	constant head	Samarasinghe et al. (1982)
LWFB-1	3 Bothkennar clay		remolded	55-62	9.30	Terzaghi	Little et al. (1992)
LWFB-2	2 Bothkennar clay		remolded	47-51	8.96	Terzaghi	Little et al. (1992)
Clay-1	7	kaolinite	remolded	22-59		from drainage	Olsen(1960)
Clay-1R	5	kaolinite	remolded	21-37		from drainage	Olsen(1960)

Table 5-3 Continued.

(b) Remolded and/or deposited samples (2).

file name number	location	sample	sample property preparation porosity(%)	method of K-test	a value	remarks	reference
Al-1	25	kaolinite	PI=38, LL=69	remolded	49-69	falling head	Al-Tabbaa, Foad(1987)
Al-2	10	kaolinite	PI=38, LL=69	remolded	49-57	falling head	Al-Tabbaa, Foad(1987)
Al-2R	5	kaolinite	PI=38, LL=69	remolded	52-57	falling head	Al-Tabbaa, Foad(1987)
Nag-1	6 Red soil		remolded	35-51	8.99	falling head	Nagaraj et al. (1993)
Nag-2	6 Brown soil		remolded	39-57	10.21	falling head	Nagaraj et al. (1993)
Nag-3	5 Black cotton soil		remolded	56-67	16.36	falling head	Nagaraj et al. (1993)
Nag-4	6	bentonite	remolded	77-89	29.95	falling head	Nagaraj et al. (1993)
O-T-1	7 Tokyo			53-72	12.68	measured	Olson, Daniel(1981)
O-T-2	6 Tokyo			57-72	13.50	Terzaghi	Olson, Daniel(1981)
O-S-1	9 San Francisco			38-62	11.12	measured	Olson, Daniel(1981)
O-S-2	9 San Francisco			41-62	11.75	Terzaghi	Olson, Daniel(1981)
XS-S1	North Central Pacific *		remolded			constant head	Morinl, Silva(1984)
XS-S2	North Central Pacific *		remolded			constant head	Morinl, Silva(1984)
XS-S3	North Central Pacific *		remolded			constant head	Morinl, Silva(1984)
XS-S4	North Central Pacific *		remolded			constant head	Morinl, Silva(1984)

Table 5-3 Continued.

(c) Initially undisturbed samples (1).

file name number	location	sample	sample property preparation porosity(%)	method of K-test	a value	remarks	reference
LLHP-3V1	4 Bothkennar		45-55	falling head	7.73		Leroueil et al. (1992)
LLHP-6V1	4 Bothkennar		56-66	falling head	10.97		Leroueil et al. (1992)
LLHP-6V2	3 Bothkennar		56-63	constant head	8.46		Leroueil et al. (1992)
LLHP-8V1	6 Bothkennar		53-68	falling head	11.26		Leroueil et al. (1992)
LLHP-8V2	3 Bothkennar		61-65	constant head	12.71		Leroueil et al. (1992)
LLHP-CV1	3 Bothkennar		45-63	falling head	5.24		Leroueil et al. (1992)
LLHP-CV2	3 Bothkennar		54-65	constant head	10.70		Leroueil et al. (1992)
LLHP-FV1	5 Bothkennar		55-63	falling head	10.64		Leroueil et al. (1992)
LX-10B	8 Bothkennar		56-62	flow pump	23.54		Little et al. (1992)
LX-1A	8 Bothkennar		51-61	flow pump	10.12		Little et al. (1992)
LX-15A	12 Bothkennar		60-66	flow pump	19.26		Little et al. (1992)
LX-15B	8 Bothkennar		53-69	flow pump	12.24		Little et al. (1992)
LX-19B	9 Bothkennar		52-66	flow pump	16.20		Little et al. (1992)
LX-26B	9 Bothkennar		50-62	flow pump	9.66		Little et al. (1992)
ST-34V	4 Saint-Esprit	PI-48	60-70	falling head	10.85		Leroueil et al. (1990)
ST-59V	4 Saint-Esprit	PI-36	58-68	falling head	10.03		Leroueil et al. (1990)
ST-92V	5 Saint-Esprit	PI-23	56-68	falling head	10.10		Leroueil et al. (1990)
ST-43V	4 Backebol	PI-56	58-69	falling head	10.82		Leroueil et al. (1990)
STL-92V	5 Louiseville	PI-38	48-66	falling head	9.05		Leroueil et al. (1990)
V-P1	15 Northwest	PI-38	56-71	falling head	6.71	sea water	Clukey, Silva (1981)
V-P2	7 Atlantic deep-sea	PI-49	52-72	falling head	7.05	sea water	Clukey, Silva (1981)
V-P3	8 Atlantic deep-sea	PI-68	89-79	falling head	16.76	sea water	Clukey, Silva (1981)
V-P4	12 Atlantic deep-sea	PI-48	53-73	falling head	11.74	sea water	Clukey, Silva (1981)
V-P5	14 Atlantic deep-sea	PI-69	71-79	falling head	15.12		Clukey, Silva (1981)
VAL-15	5 Leda		50-65	falling head	10.08		Walker, Raymond (1968)
VAL-30	5 Leda	PI-23-37	53-64	falling head	11.84		Walker, Raymond (1968)
VAL-70	8 Leda	PI-10-13	45-59	falling head	8.76		Walker, Raymond (1968)
T-V-P1	22 Louiseville	PI-34-44	50-66	falling head	9.38		Tavenas et al. (1983)
T-V-P2	5 Louiseville		56-69	OEFD test	10.39		Tavenas et al. (1983)
T-V-P3	5 Louiseville		55-68	falling head	9.75		Tavenas et al. (1983)

Table 5-3 Continued.

(d) Initially undisturbed samples (2).

file name number	location	sample	sample property preparation porosity(%)	method of K-test	a value	remarks	reference
CLT-VV	4 London	PI-53-64	40-47	constant head	7.35		Chandler et al. (1990)
CLT-V1	1 London		46	constant head			Chandler et al. (1990)
CLT-V2	1 London		45	constant head			Chandler et al. (1990)
CLT-V3	1 London		45	constant head			Chandler et al. (1990)
XS-S01				constant head		22°C	Morin, Silva (1984)
XS-S02				constant head		80°C	Morin, Silva (1984)
XS-S03				constant head		150°C	Morin, Silva (1984)
XS-S04				constant head		220°C	Morin, Silva (1984)
XS-C01				constant head		22°C	Morin, Silva (1984)
XS-C02				constant head		80°C	Morin, Silva (1984)
XS-C03				constant head		150°C	Morin, Silva (1984)
XS-C04				constant head		220°C	Morin, Silva (1984)
XS-I1				constant head		22°C	Morin, Silva (1984)
XS-I2				constant head		80°C	Morin, Silva (1984)
XS-I3				constant head		150°C	Morin, Silva (1984)
XS-I4				constant head		220°C	Morin, Silva (1984)
Y-V-P1	5		73-75	constant head			山内ほか (1971)
Y-V-P2	4		72-74	falling head			山内ほか (1971)

Table 5-3 Continued.
(c) Natural samples.

file name number	location	sample	sample property preparation porosity(%)	method of k-test	a value	remarks	reference
X-V-P1	Obuchi	mudstone	13-25	Terzaghi			Magara(1978)
X-V-P2	Kambara	mudstone	15-31	Terzaghi			Magara(1978)
X-V-P3	Kambara	mudstone	8-43	Terzaghi			Magara(1978)
X-V-P4	Yuza	mudstone	15-38	Terzaghi			Magara(1978)
X-V-P5	Yuza	mudstone	16-18	Terzaghi			Magara(1978)
X-V-P6	Strathmore	shale	20-21	Terzaghi			Magara(1978)
XII-1	鳥兒島群の与那原層	mudstone	P1-38-71				新井、小宮(1983)
XII-3	鳥兒島群の与那原層	mudstone	P1-28-43				新井、小宮(1983)
KEN-2	Pierre	shale	22-51	Terzaghi			Kemper(1961)
KATSUBE	Scottian Shelf	mudstone	21	transient pulse			Katsube et al.(1991)
DUTTA	Japan and Canada	mudstone		direct			Dutta(1988)
Sand	Gulf of Mexico			Terzaghi	10.07		Bryant et al.(1975)
Silt	Gulf of Mexico			Terzaghi	9.95		Bryant et al.(1975)
60%Clay	Gulf of Mexico			Terzaghi	8.08		Bryant et al.(1975)
80%Clay	Gulf of Mexico			Terzaghi	8.67		Bryant et al.(1975)

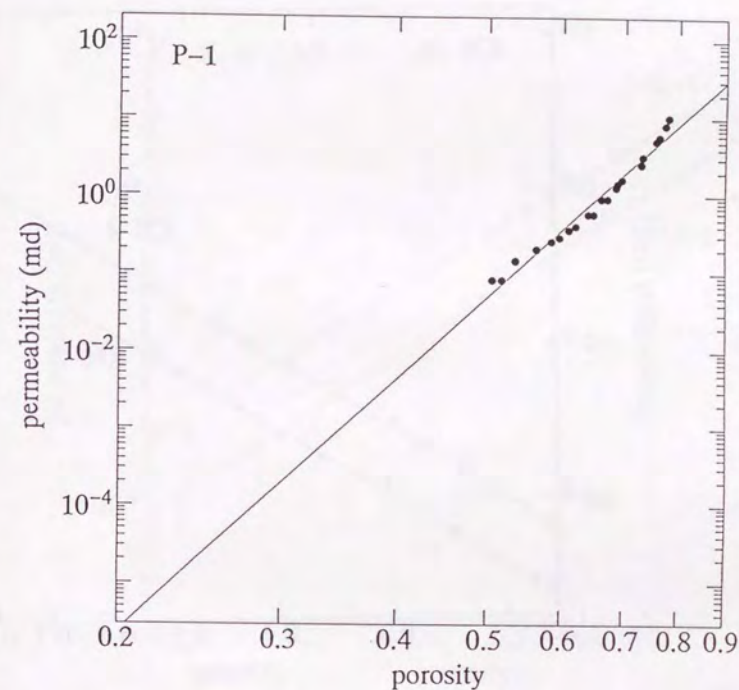


Fig. 5-11 Relationships between permeability and porosity on double logarithmic scales obtained from published articles.

(a) Sample P-1. Data source is presented in Table 5-3(a).

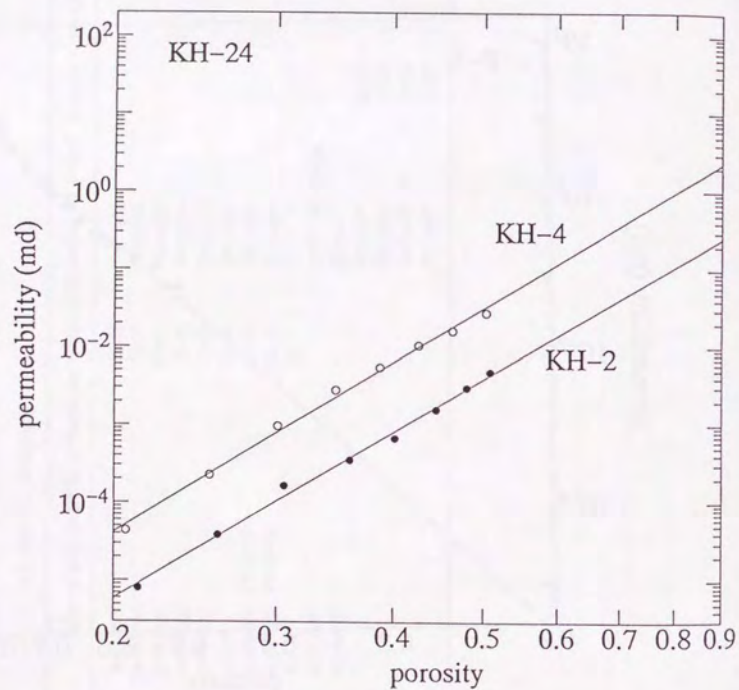


Fig. 5-11 Continued.

(b) Sample KH-2 and KH-4. Data source is presented in Table 5-3(a).

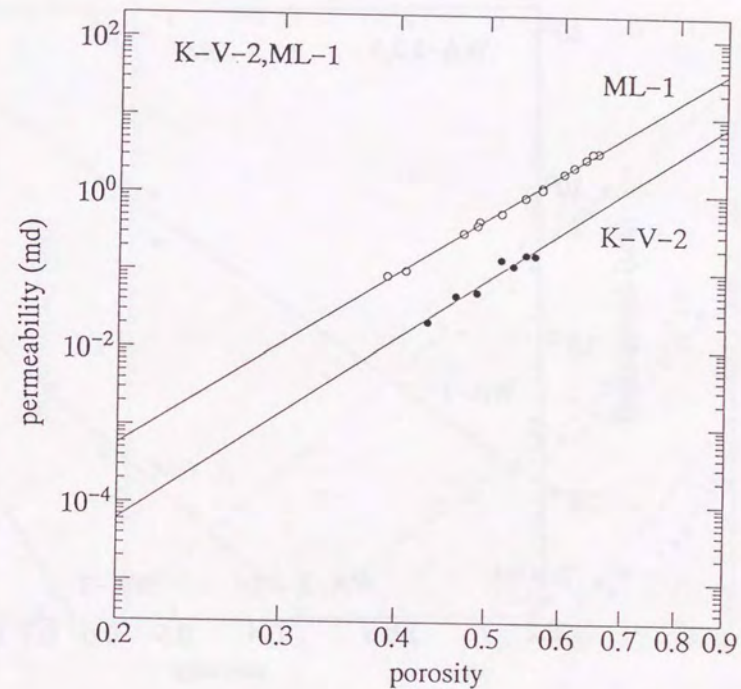


Fig. 5-11 Continued.

(c) Sample K-V-2 and ML-1. Data sources are presented in Table 5-3(a).

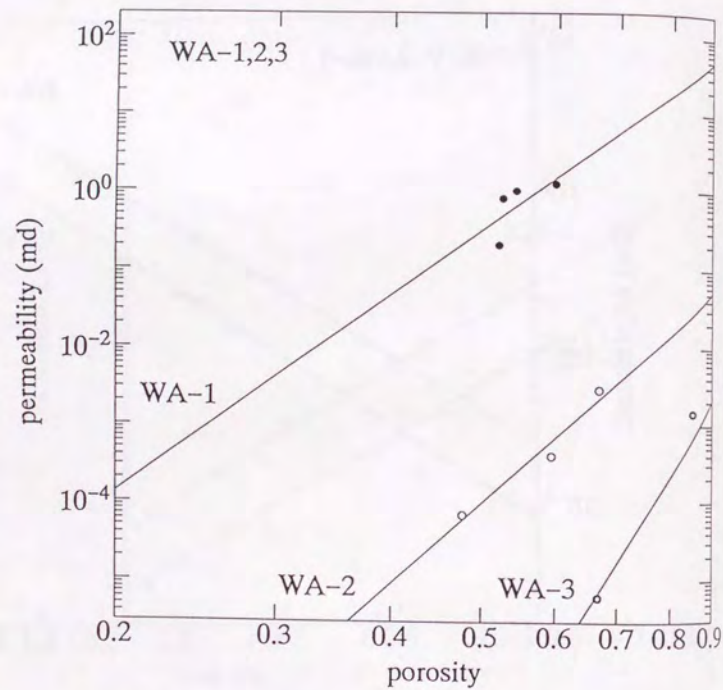


Fig. 5-11 Continued.

(d) Sample WA-1, WA-2 and WA-3. Data source is presented in Table 5-3(a).

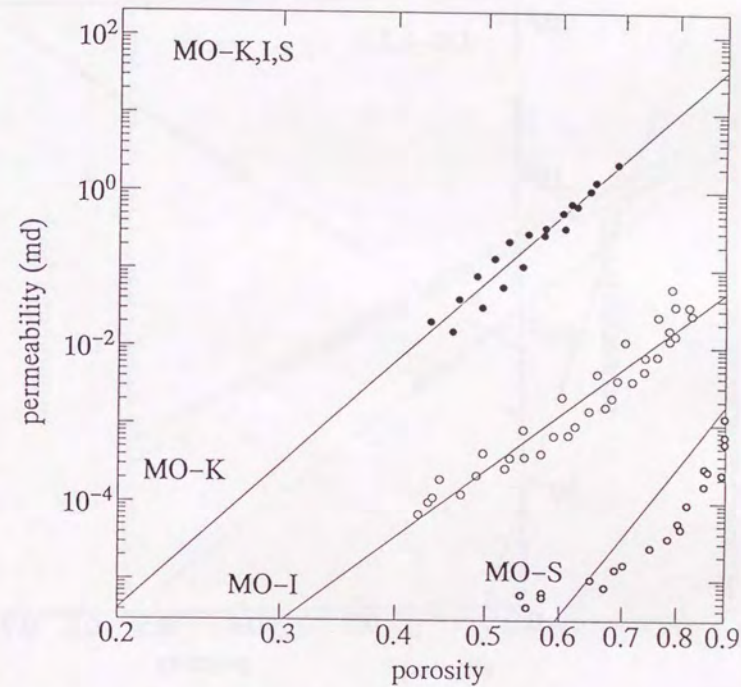


Fig. 5-11 Continued.

(e) Sample MO-K, MO-I, and MO-S. Data source is presented in Table 5-3(a).

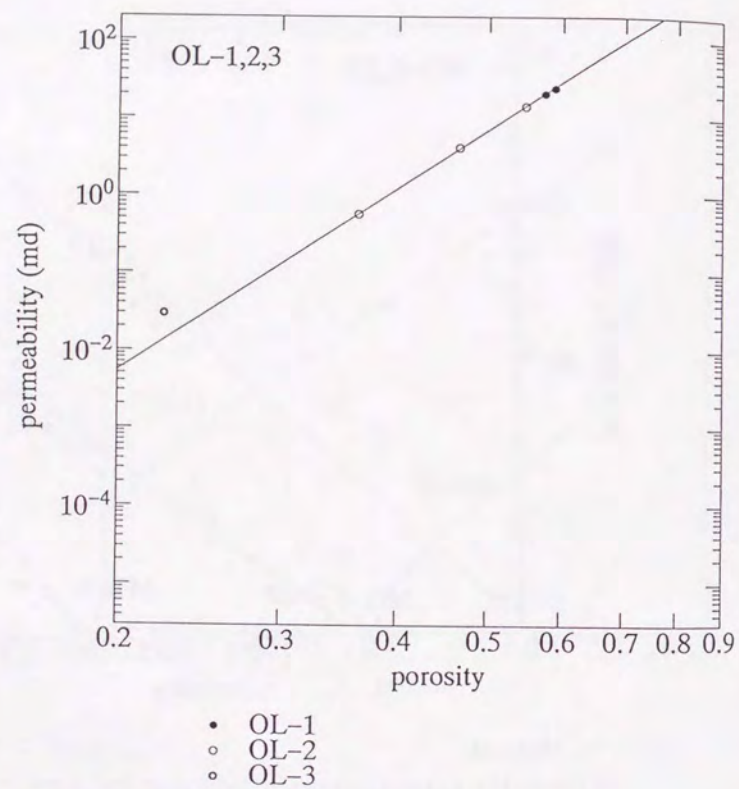


Fig. 5-11 Continued.

(f) Sample OL-1, OL-2, and OL-3. Data source is presented in Table 5-3(a).

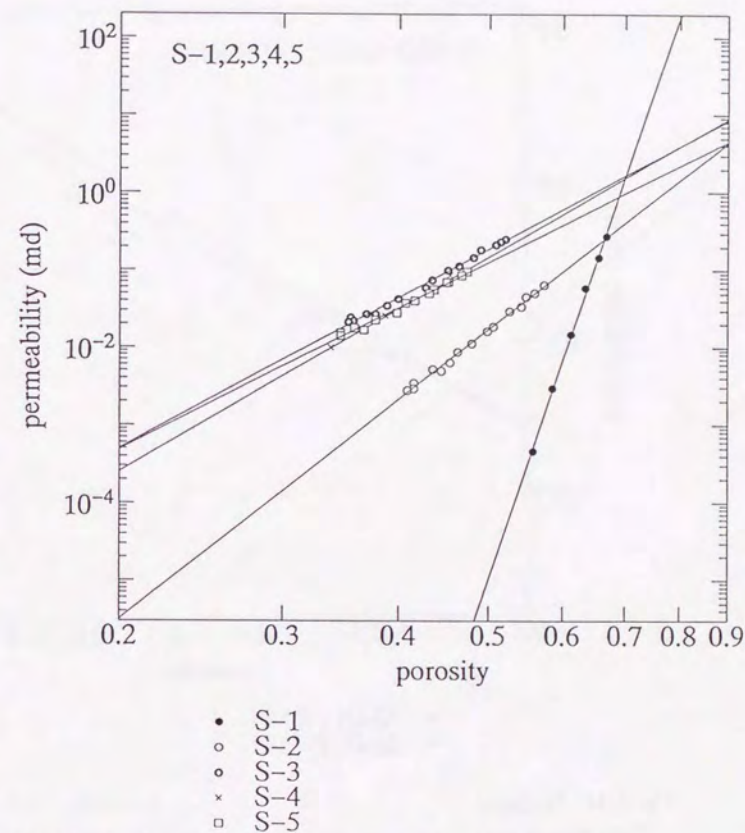


Fig. 5-11 Continued.

(g) Sample S-1, S-2, S-3, S-4, and S-5. Data source is presented in Table 5-3(a).

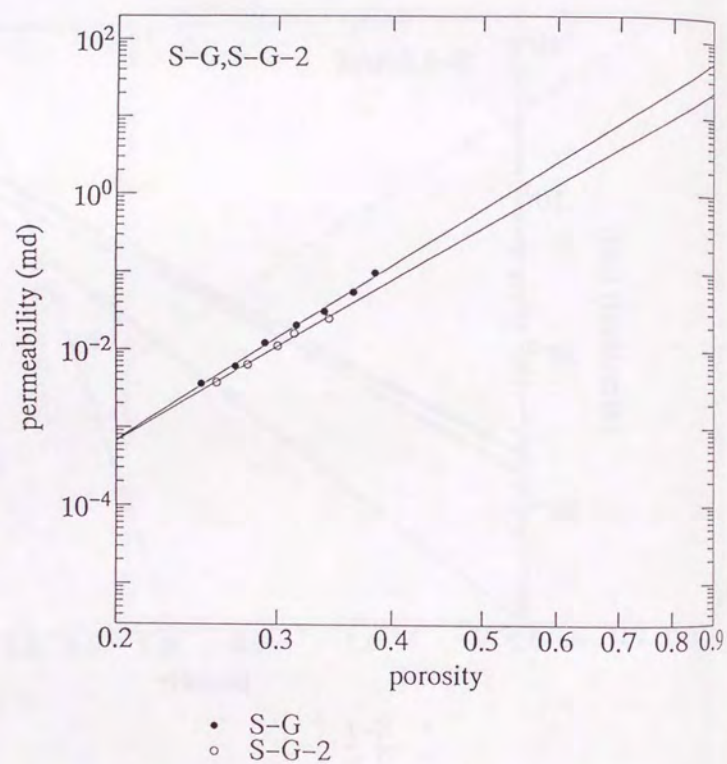


Fig. 5-11 Continued.

(h) Sample S-G and S-G-2. Data source is presented in Table 5-3(a).

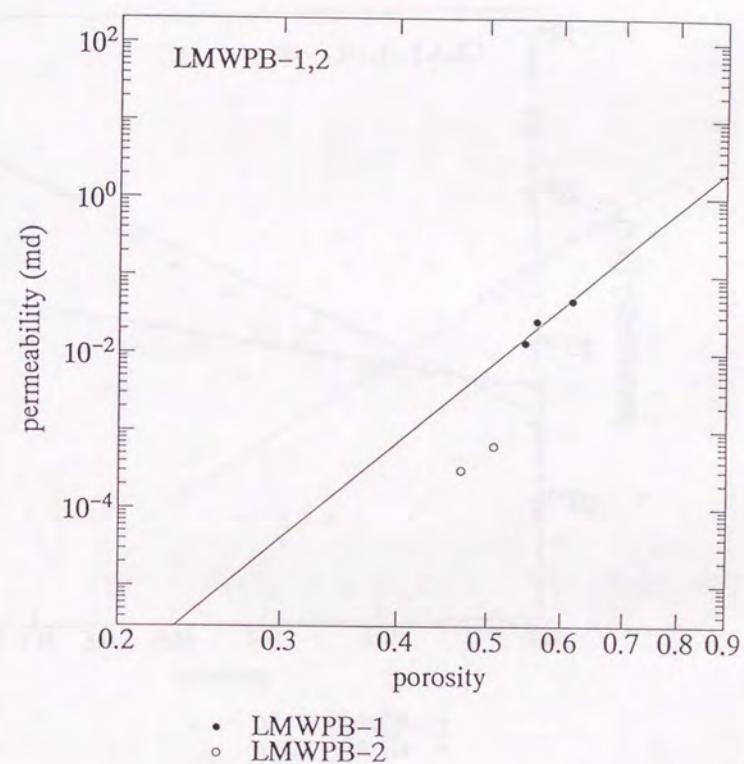


Fig. 5-11 Continued.

(i) Sample LMWPB-1 and LMWPB-2. Data source is presented in Table 5-3(a).

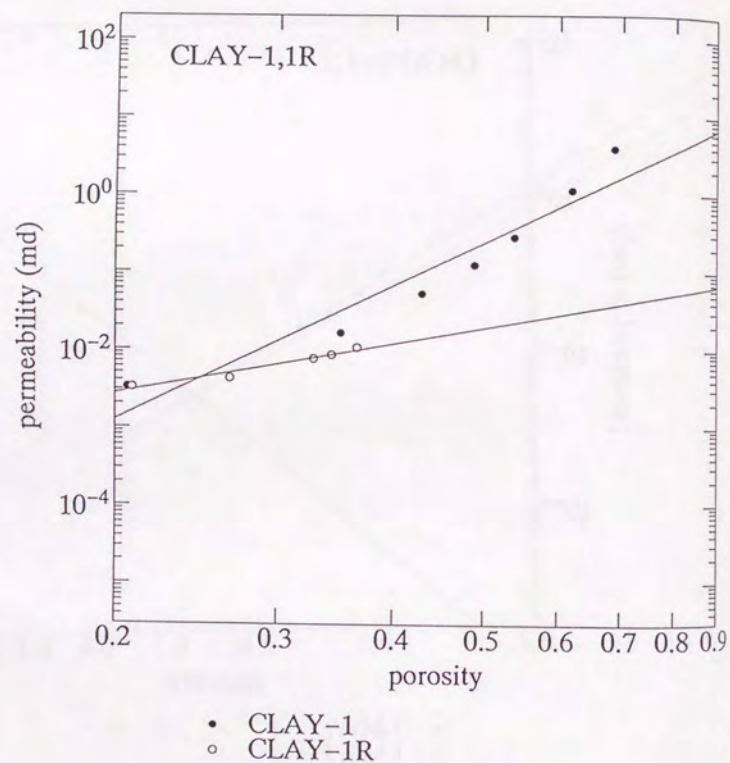


Fig. 5-11 Continued.

(j) Sample CLAY-1 and CLAY-1R. Data source is presented in Table 5-3(a).

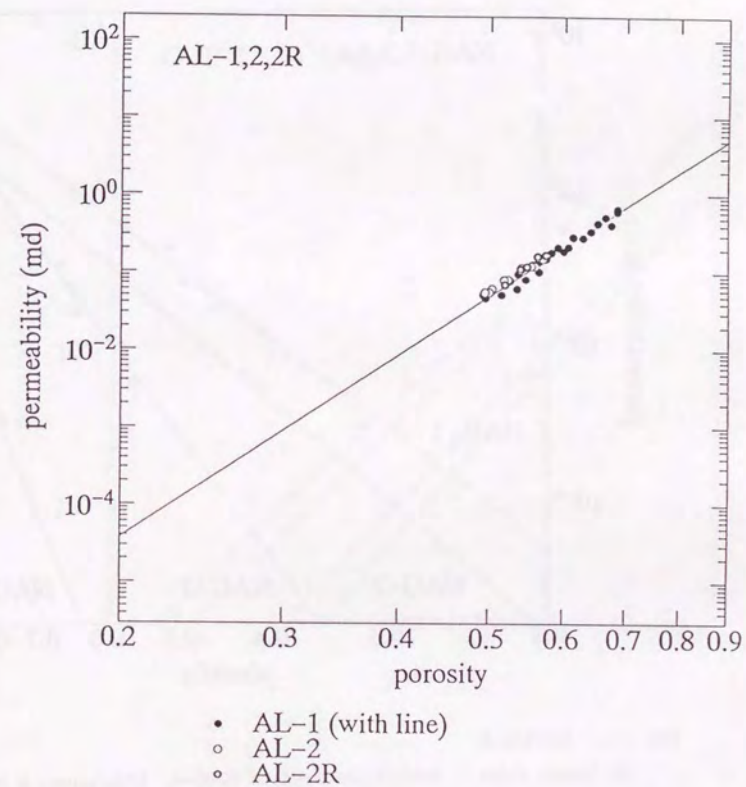


Fig. 5-11 Continued.

(k) Sample AL-1, AL-2 and AL-2R. Data source is presented in Table 5-3(b).

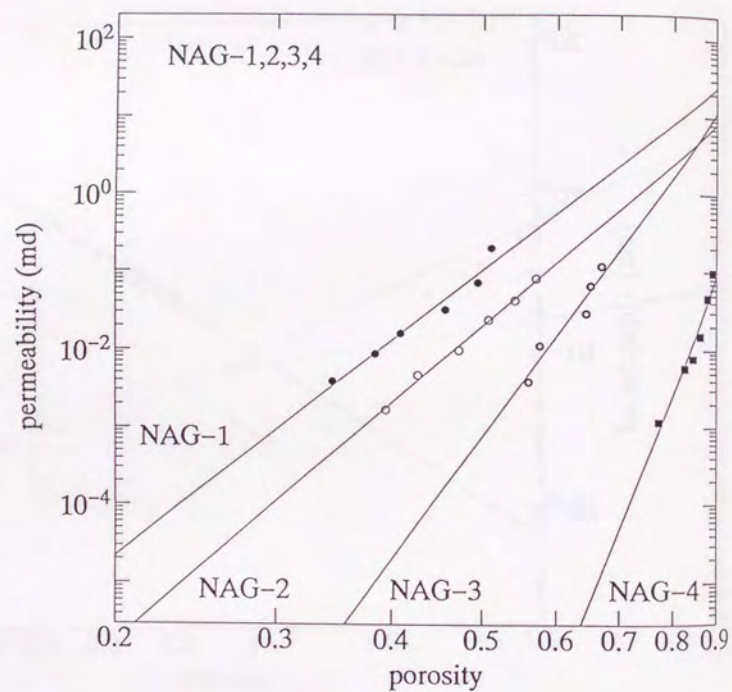
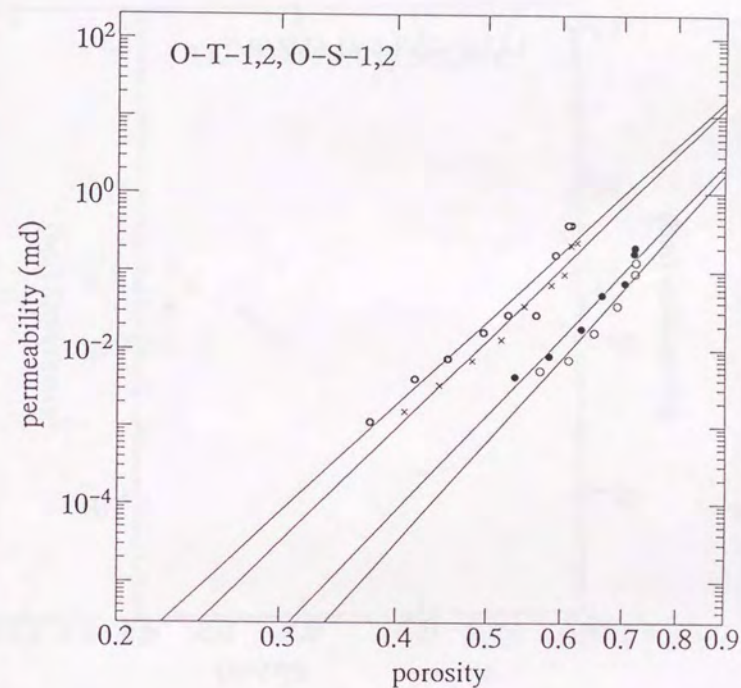


Fig. 5-11 Continued.

(l) Sample NAG-1, NAG-2, NAG-3 and NAG-4. Data source is presented in Table 5-3(b).



- O-T-1
- O-T-2
- O-S-1
- × O-S-2

Fig. 5-11 Continued.

(m) Sample O-T-1, O-T-2, O-S-1 and O-S-2. Data source is presented in Table 5-3(b).

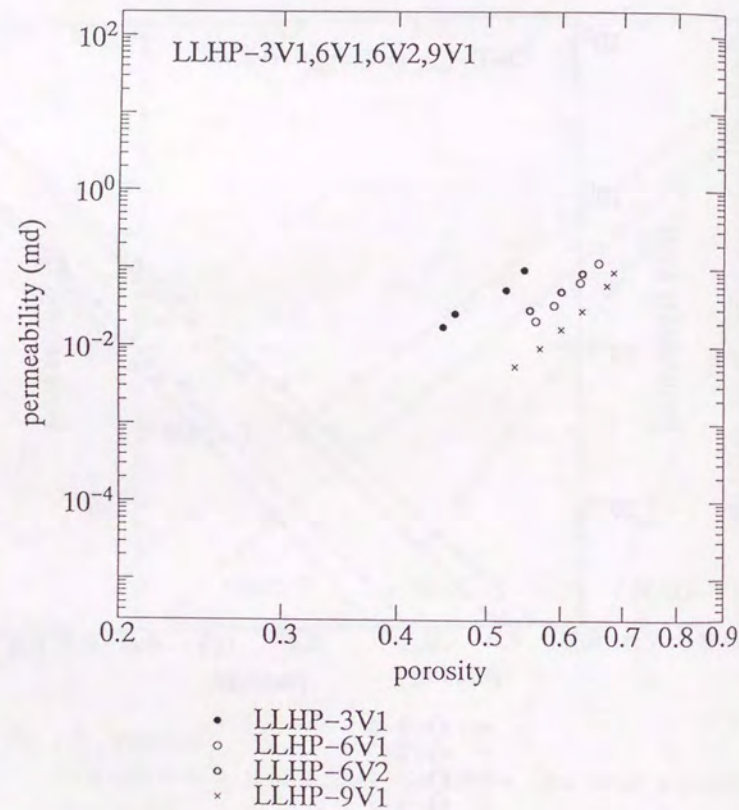


Fig. 5-11 Continued.

(n) Sample LLHP-3V1, LLHP-6V1, LLHP-6V2 and LLHP-9V1. Data source is presented in Table 5-3(c).

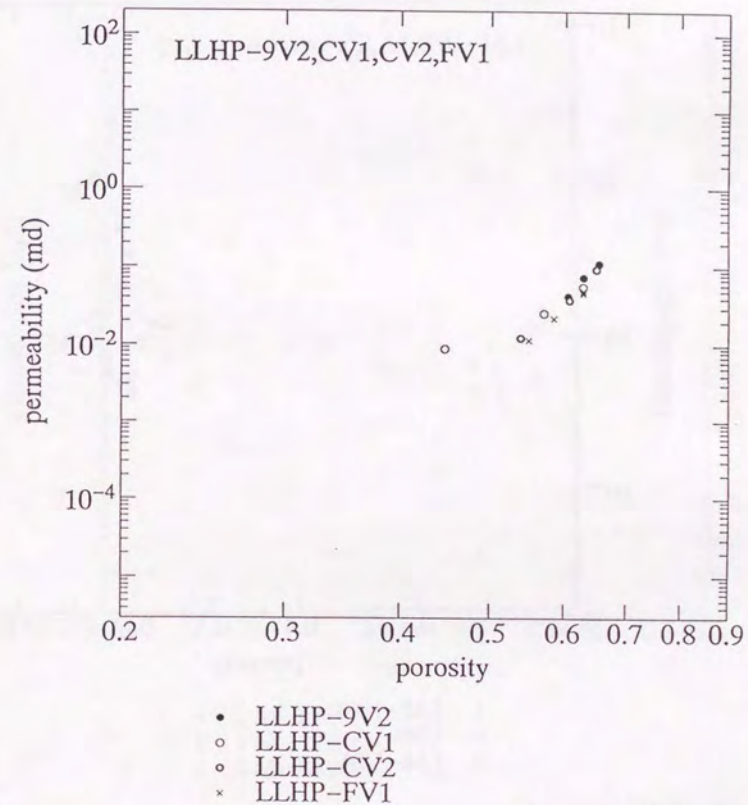


Fig. 5-11 Continued.

(o) Sample LLHP-9V2, LLHP-CV1, LLHP-CV2 and LLHP-FV1. Data source is presented in Table 5-3(c).

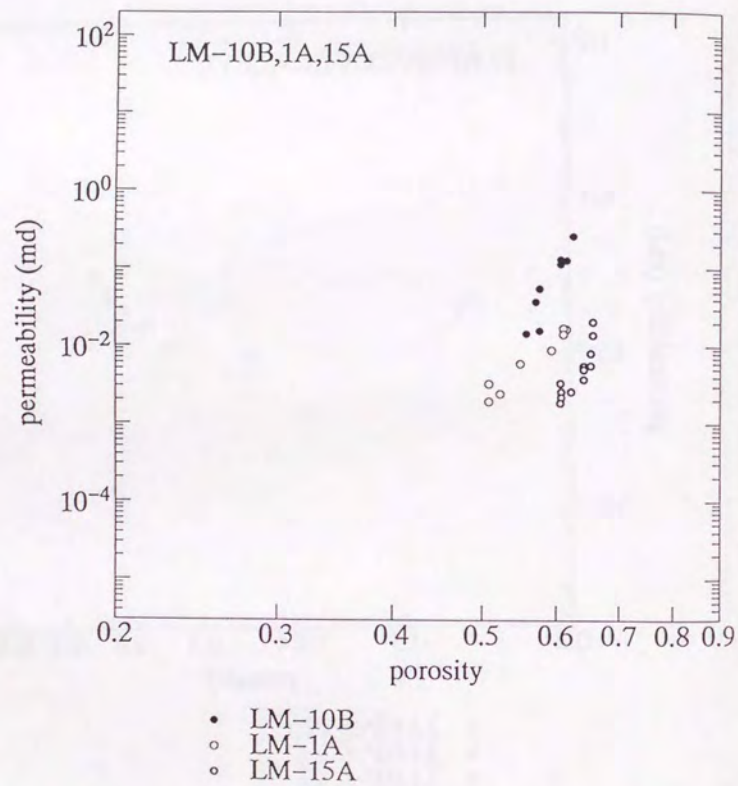


Fig. 5-11 Continued.

(p) Sample LM-10B, LM-1A and LM-15A. Data source is presented in Table 5-3(c).

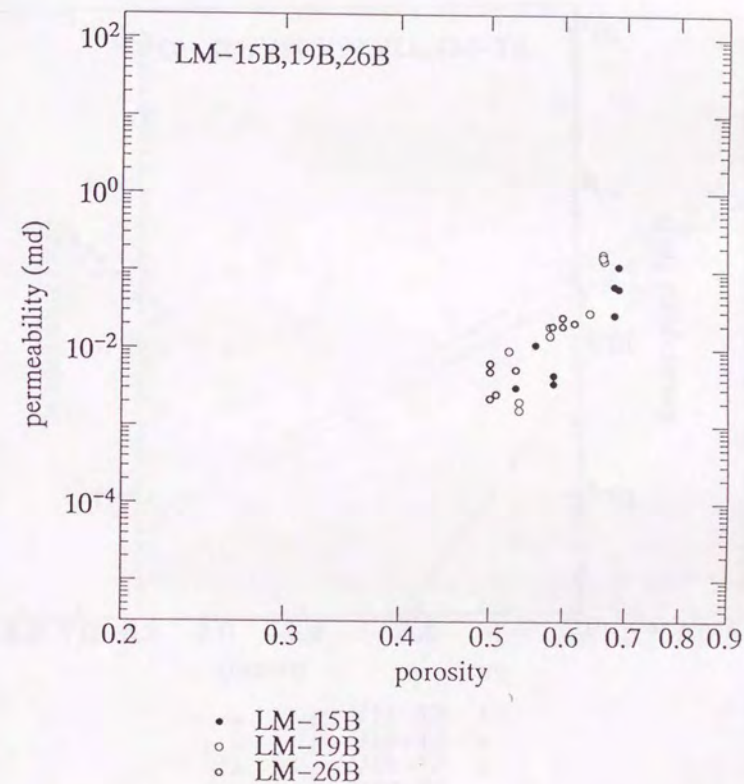


Fig. 5-11 Continued.

(q) Sample LM-15B, LM-19B and LM-26B. Data source is presented in Table 5-3(c).

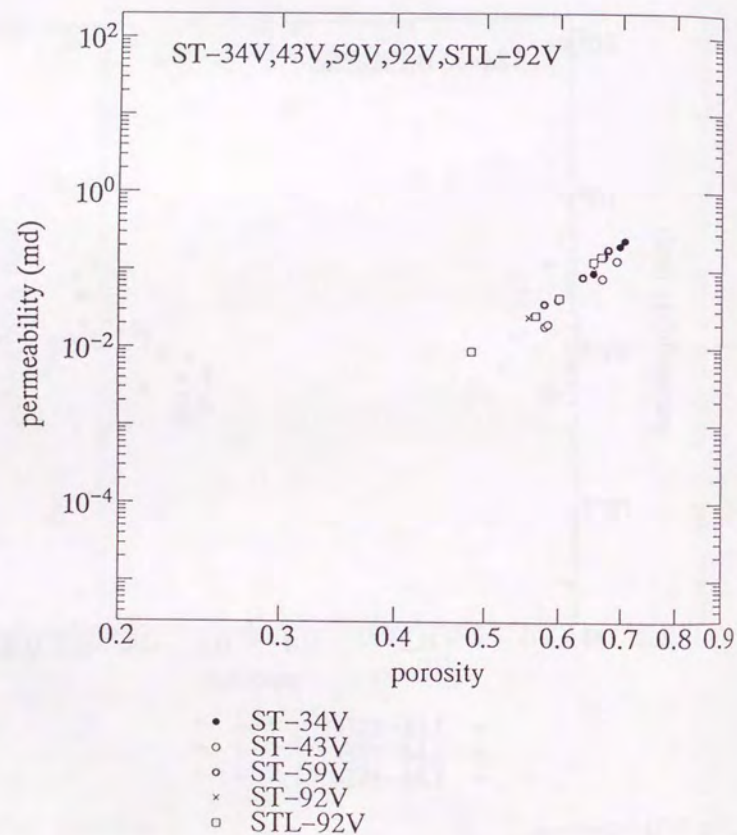


Fig. 5-11 Continued.

(r) Sample ST-34V, ST-43V, ST-59V, ST-92V and STL-92V. Data source is presented in Table 5-3(c).

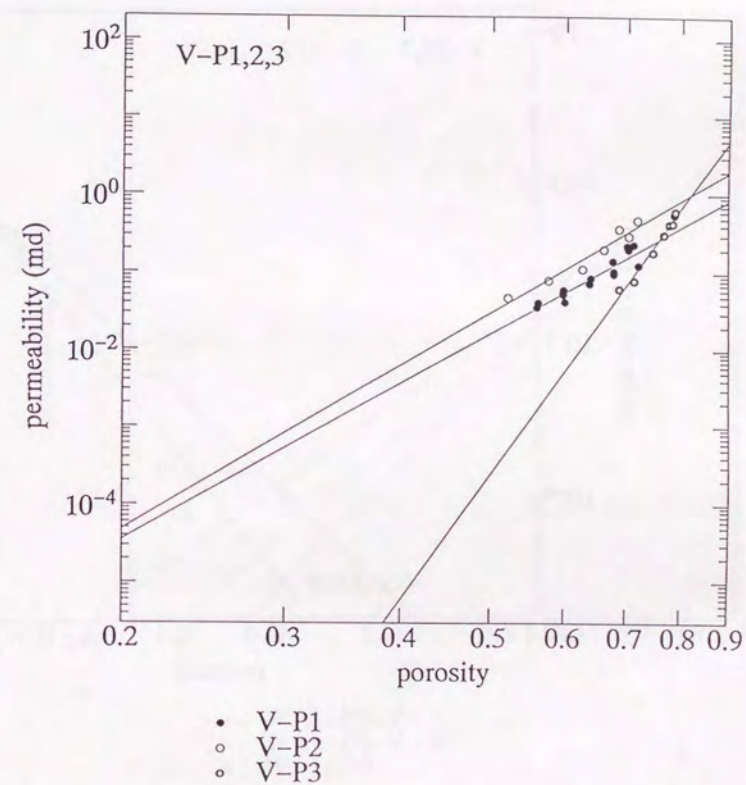


Fig. 5-11 Continued.

(s) Sample V-P1, V-P2 and V-P3. Data source is presented in Table 5-3(c).

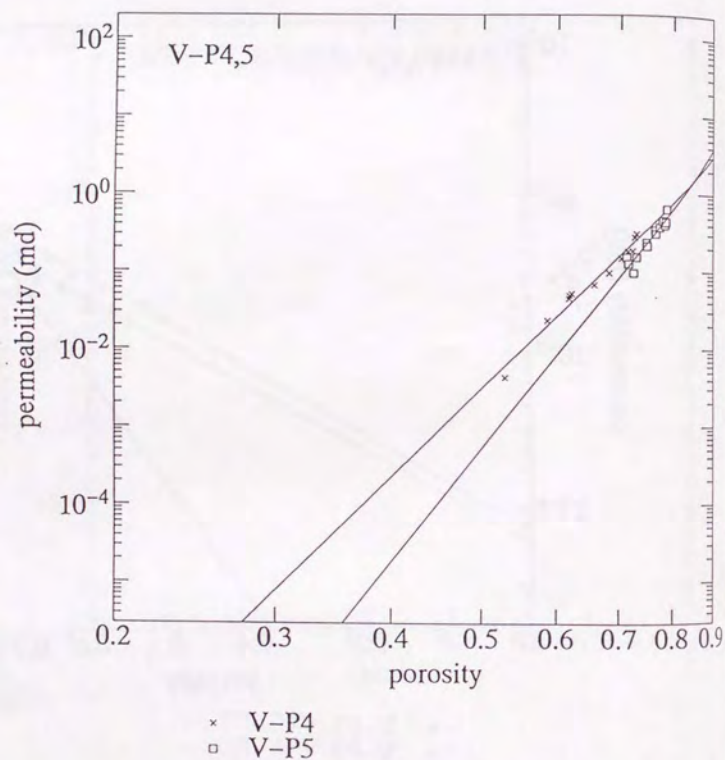


Fig. 5-11 Continued.

(t) Sample V-P4 and V-P5. Data source is presented in Table 5-3(c).

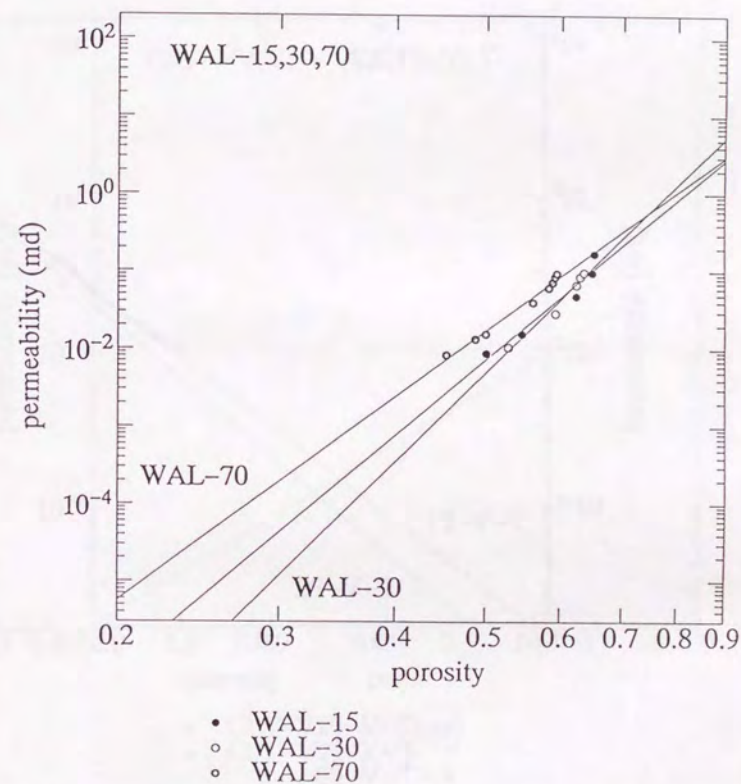


Fig. 5-11 Continued.

(u) Sample WAL-15, WAL-30 and WAL-70. Data source is presented in Table 5-3(c).

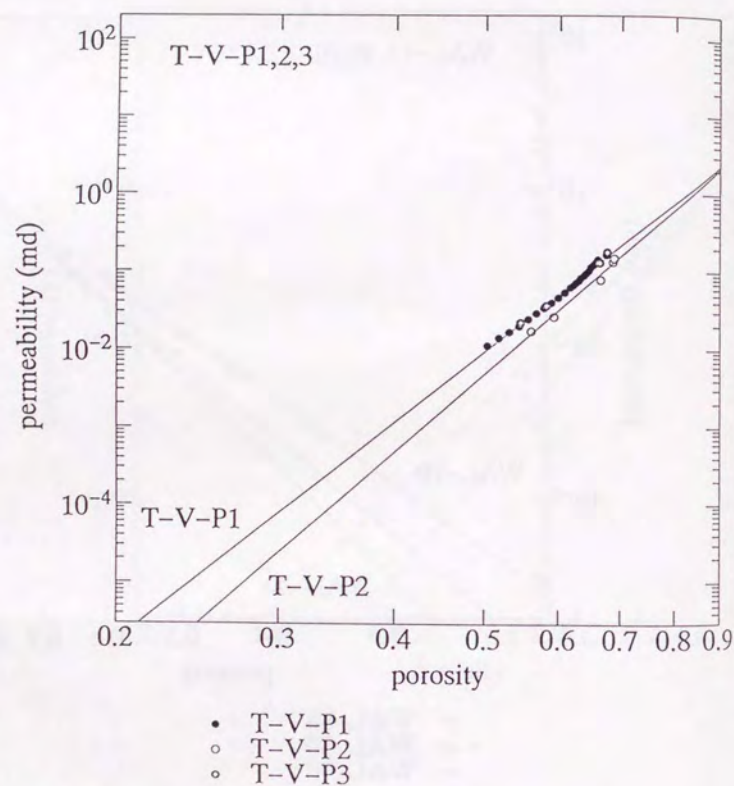


Fig. 5-11 Continued.

(v) Sample T-V-P1, T-V-P2 and T-V-P3. Data source is presented in Table 5-3(c).

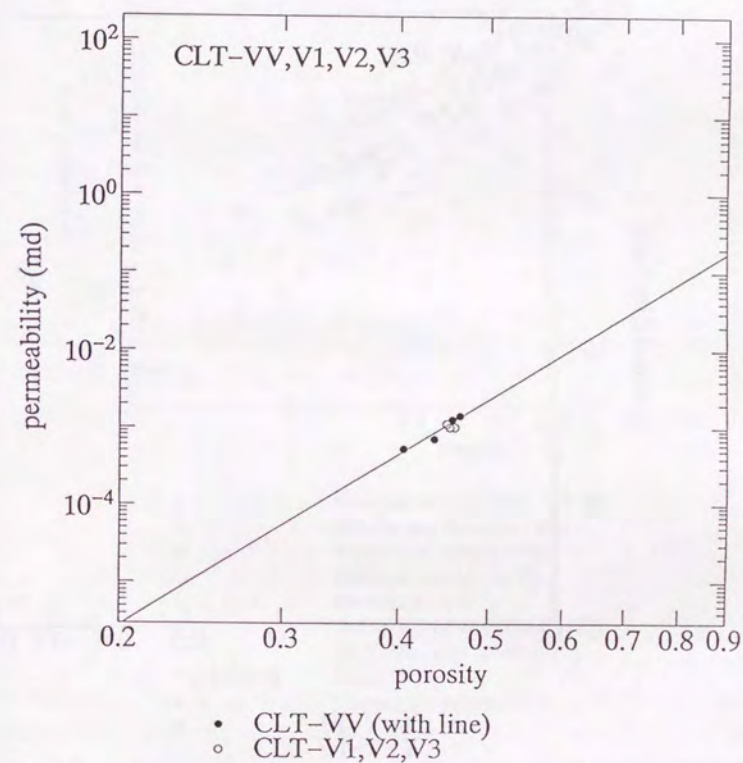


Fig. 5-11 Continued.

(w) Sample CLT-VV, CLT-V1, CLT-V2 and CLT-V3. Data source is presented in Table 5-3(d).

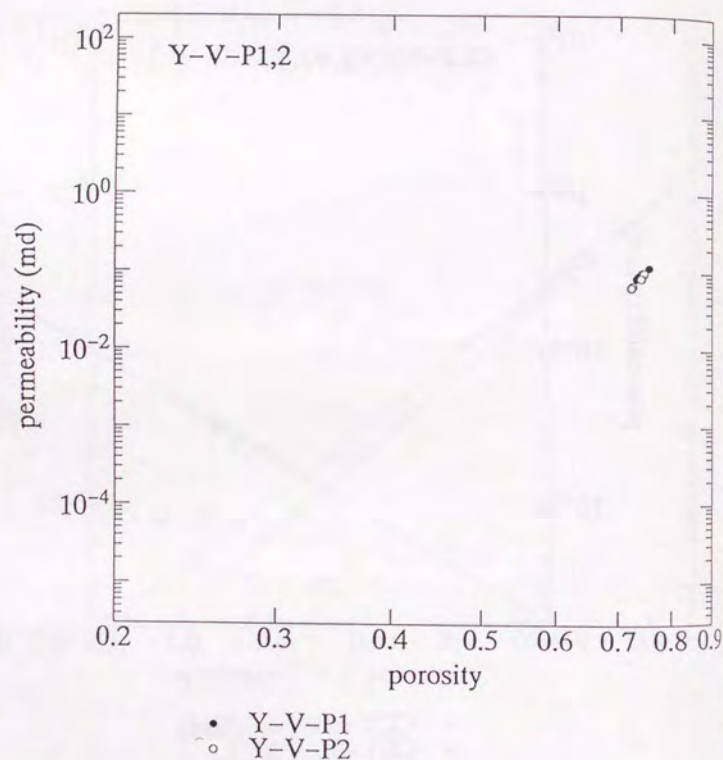


Fig. 5-11 Continued.

(x) Sample Y-V-P1 and Y-V-P2. Data source is presented in Table 5-3(d).

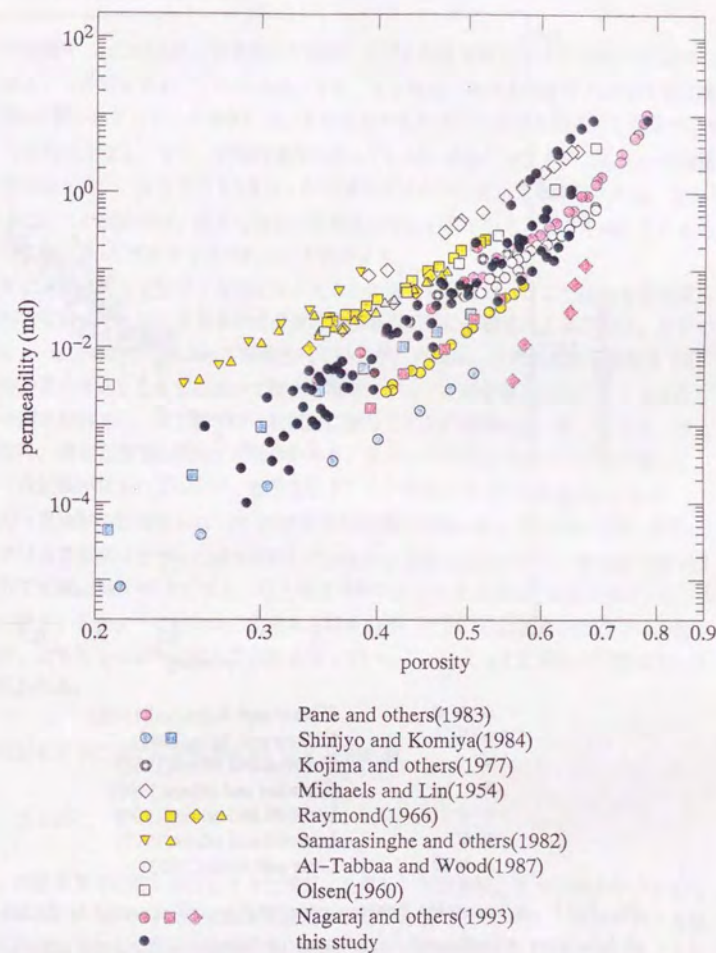


Fig. 5-12 Relationships between permeability and porosity on double logarithmic scales of laboratory consolidated experiments of remolded and/or deposited samples rearranged from published data.

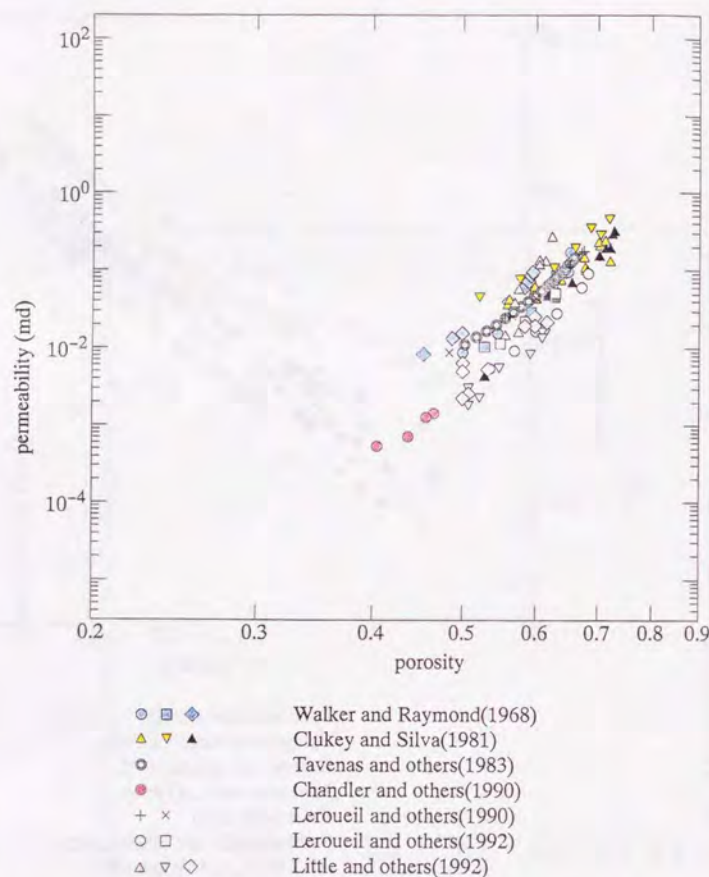


Fig. 5-13 Relationships between permeability and porosity on double logarithmic scale of laboratory consolidated experiments of initially undisturbed samples rearranged from published data.

5. 3. 7 粘土含有率による浸透率減少を表す式の定数の推定

前節までの議論で、(5.20)式は、力学的圧密過程における泥質堆積物の浸透率減少を適切に表現する式であることが示された。この式を用いると、ある時点における間隙率と浸透率を計測すれば、定数 a の値がわかっている場合には、その試料の圧密過程における浸透率と間隙率の関係を知らることが可能となる。もし、定数の値がわかっていない場合には、対象としている試料に対して圧密試験を行い、少なくとも2点以上の間隙率と浸透率を決定する必要がある。ところで、前節までに行った実験では、様々な種類の泥質岩が用いられている。ここでは、これらの違いを利用して、定数 a を推定する方法について検討する。

間隙率以外にも浸透率を支配する要素は様々なものが考えられるが、ここでは粘土含有率を指標とした検討を行った。粘土含有率が浸透率と間隙率の係数に影響を与えることは、今までもTavenas et al.(1983)などによって指摘されているが、今回は、圧密前期から後期までの広い範囲の浸透率の変化を表す式において粘土含有率によってその定数を推測しようとするものである。今回の検討では、本実験で行った試料に関するみの検討を行った。これは、粘土含有率の測定は、測定方法等に依存する場合がありますが、また、今までに行われた実験に関して、それほど多くの記載がなされておらず、整理を行うことが困難になるからである。Fig. 5-14は、今回行った実験の結果得られた(5.20)式の定数の値と試料の粘土含有率の関係である。各々のデータはある程度バラついた分布を示しているが、全体としてみると、粘土含有率が多くなるに連れて定数 a の値が小さくなり、粘土含有率が小さくなるに連れて定数の値が大きくなる傾向が見られる。このような検討から定量的な関係を見いだすことは現在の時点では困難であるが、今後、より多くの試料に関して実験を行っていくことによって定式化が可能になっていくものと思われる。

5. 4. 泥質岩による三軸圧縮試験機を用いた K_0 圧密試験

5. 4. 1. はじめに

本節では、自然状態で圧密が進行してきた泥質岩を用い、圧密試験と透水試験を組み合わせた実験を行うことにより、力学的圧密による浸透率の変化を検討した。特に、前節で行った泥質スラリーを出発物質として行った実験結果から得られた浸透率の変化との比較を行うことを目的とした。また、その過程で、除荷に伴う浸透率の変化の評価も行った。実験は、三軸圧縮試験機内で泥質堆積物を一次的に圧密させるものであり、各圧密段階でトランジェントバルス法を用いた浸透率計測を含んでいる。さらに、この実験過程では、泥質岩の圧密・除荷過程における K_0 値の計測も可能であり、それについての検討も行う。

5. 4. 2. 実験装置および実験法

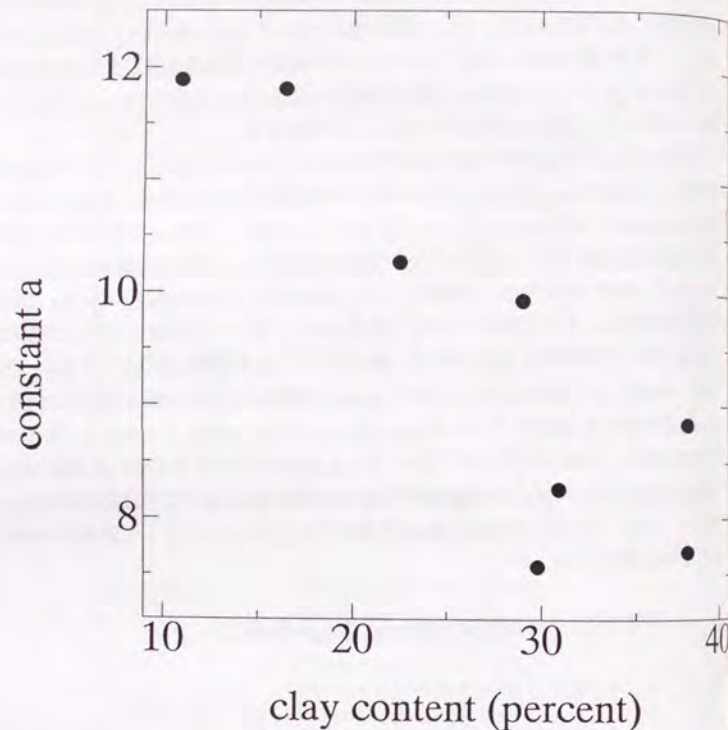


Fig. 5-14 Plots of the relationship between constant 'a' of equation (5.20) and clay content of the samples used in one-dimensional consolidation experiments.

本研究での圧密試験は、三軸室内で試料を一次元圧密させる三軸 K_0 圧密試験であり、従来行われていた側方拘束型の一次元圧密試験に比べて以下のような利点がある。一つには、試料側面の摩擦がほとんどないために、試料にかかっている鉛直応力が正確に計測できる点であり、また、拘束圧として水平応力が計測できるという点である。即ち、三軸 K_0 圧密試験では、一次元圧密過程の試料での応力状態が正確に計測できることになる。

ところが、現実には泥質岩の圧密試験は、高圧を載荷する必要があるため、低圧を載荷する土の圧密試験より側面の摩擦の影響が大きくなるにもかかわらず、従来の実験装置では試料を一次元的に変形させる制御方法等が困難であったために、今回行った実験のような数百 kgf/cm^2 程度の高圧を載荷した三軸 K_0 圧密試験は行われていない。そこで、今回はFig. 5-15に示した岩石用の三軸圧縮試験機を用いて泥質岩の三軸 K_0 圧密を行った。

実験の手順は以下のとおりである。直径30mm、高さ60mmの円柱形に成形された試料を脱気水中におき、減圧し水で飽和させる。その後、周方向の歪を計測するために、試料の側面中央に周方向に2枚で一周するような形で歪ゲージ(共和電業製KFG-30-120-C12-11115D2R)を貼る。圧密時、透水試験時の排水、注水は、試料の長軸の両端から行うので、試料の上下端にはステンレス製の分水板、エンドピースを密着させる。拘束圧を与える油と試料を隔離するために、側面にシリコンゴムを塗る。このシリコンゴムは、透水試験時に試料の側面に添った流れを防ぐ効果もある。シリコンゴムが十分に乾燥するのを待ち、エンドピースまでを固定した試料を球座に取付け、三軸室内に静置する。

このようにして三軸室に試料をセットした後、配管をすべて接続し、配管内を減圧し脱気水を注入する。さらに、背圧を 40kgf/cm^2 負荷し、配管内を完全に水で飽和させる。背圧の値は、試料が完全に飽和するであろう最小の値として経験的に設定した。この状態を初期状態とし、載荷時にはベッセル下部からピストンを上昇させて軸力を与える。これによって生じる試料の周方向の歪を、これを打ち消す程度の拘束圧をハンドポンプによって加圧し、試料を一次元的に変形させていく。試料からの排水にともなって背圧が上昇するので、 $\pm 3\text{kgf/cm}^2$ の範囲で、適宜配管系からの排水を行う。ピストンは常に一定応力値を保つように自動で制御されるが、拘束圧と背圧の制御は、圧密終了までの間試料の変形に応じて手動で行う。この方法で、試料の周方向の歪は0.05%以下に抑えられる。圧密終了は、軸変位が30分あたり0.01mm以下になった時点とし、ピストンを固定し、以下に説明するような方法で透水試験を行う。透水試験終了後は、再び載荷を行い、この繰り返しにより各圧密終了段階で応力状態、軸変位、浸透率を測定する。なお、間隙率は、試料中の固体粒子が非圧縮性であると仮定し、軸変位から算出した。除荷の方法は圧力と試料の変形方向を載荷時と逆にするだけで、基本的には載荷時と同様である。最終の除荷の後に装置を解体し、試料を取りだし、かさ密度、間隙率を測定した。

なお、軸力の測定はベッセル上部のロードセルによって行われ、その分解能は0.01tfであり、軸変位はピストンに取付けた分解能が0.001mmであるギャップセンサーによって計測した。また、拘束圧は分解能が0.1 kgf/cm^2 のセンサーで計測した。なお、実験中は、温度変化が間隙水圧および拘束圧の変化につながるために、これを防ぐために室温を制御した。その結果、一時的

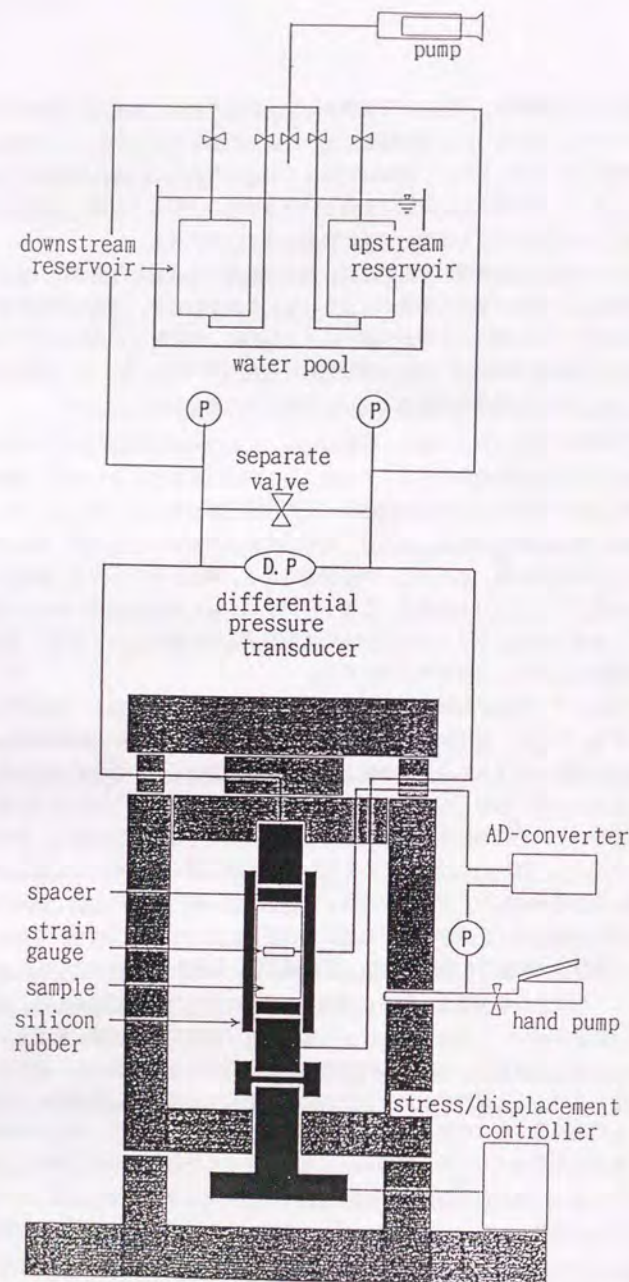


Fig. 5-15 Schematic diagram of triaxial compression apparatus with transient pulse permeability measurement system used in this study.

な振れを除いて、250時間程度に亘る実験期間中室温は $26 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に制御された。

本実験では、透水試験法としてトランジェントパルス法を用いた。トランジェントパルス法は、非定常状態での圧力減衰を用いて浸透率が得られるために、定水位試験や変水位試験に比べて難透水性の岩石の浸透率を計測するうえで有利であるからである(高橋ほか, 1991参照)。

ここでは、はじめにトランジェントパルス法の原理について整理し、その後、今回用いた実験システムにおいてトランジェントパルス法による透水試験を行う場合の手法をまとめる。

トランジェントパルス法は、従来の試験法では測定が困難であった難透水性の試料の浸透率を計測するためにBrace et al.(1968)によって開発された室内試験法である。この方法は、試料の一端にパルス状の水圧を与え、このパルス圧の時間変化を測定することにより、試料の浸透率を求める方法である。

ここでは、一次元の非定常流体流動方程式の解に実験結果をあてはめ、そこから浸透率を得ることになる。この方程式は、Brace et al.(1968)によって導かれている。彼らのまとめによると、一次元の試料内の流れは、

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \left(\frac{\mu\beta}{K} \right) \left[\frac{\beta_{eff} - \beta_s}{\beta} + \phi \left(1 - \frac{\beta_s}{\beta} \right) \right] \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) \quad (5.21)$$

となる。ここに、 P :間隙水圧、 x :距離、 μ :流体の粘性係数、 β :流体の圧縮率、 K :浸透率、 β_{eff} :多孔質媒体の圧縮率、 β_s :構成鉱物の圧縮率、 ϕ :間隙率、 t :時間、である。この解を求める一つの方法としてBrace et al.(1968)の近似解法がある。ここでは、岩石の間隙率が十分に小さく無視できるとし、また、多孔質媒体の圧縮率と構成鉱物の圧縮率は流体の圧縮率に比べて十分に小さい、という二つの仮定をおいている。このような仮定が成り立つ場合、(5.21)式は、

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = 0 \quad (5.22)$$

と表せ、これを圧力について解くと、

$$P_1 - P_f = \Delta P \left[\left(\frac{V_2}{V_1} \right) + V_2 \right] e^{-\alpha x} \quad (5.23)$$

となる。ここに、 P_1 :上流側の貯留槽の圧力、 P_f :最終的な平衡状態での圧力、 ΔP :パルス圧、 V_1 :上流側の貯留槽の体積、 V_2 :下流側の貯留槽の体積、である。また、 α は、

$$\alpha = \left(\frac{KA}{\mu\beta L} \right) \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right) \quad (5.24)$$

である。従って、時間を横軸に取り、 P_1-P_2 の対数を縦軸にプロットし、その傾き λ から浸透率が求められる。即ち、

$$K = \left(\frac{\mu \beta L}{A} \right) \left(\frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \right) \lambda \quad (5.25)$$

となる。この方法は、解析が簡単であるためにトランジェントパルス法を用いて浸透率を求める場合には、広く用いられている。

しかし、堆積岩類のように、間隙率が無視できないほど大きな岩石の様な場合については、Brace et al.(1968)が設けた仮定がなり立たない。杉本ほか(1985)は、(5.21)式を差分近似を用いて計算し、(5.25)式を用いて得られた浸透率の値は、彼らの計測した岩石においては、間隙率と圧縮率を考慮した場合の値の24%となり、浸透率を過小評価することになることを示している。

Hsigh et al.(1981)は、(5.21)式の厳密解を導出している。ここで、彼らの定式化は以下のとおりである。

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{S_s}{k} \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad 0 < x < l, \quad t > 0 \quad (5.26)$$

ここで、 h :試料内部での水頭、 x :試料の下流側端面からの距離、 S_s :試料の比貯留量、 k :透水係数、 t :時間、であり、 S_s と k はそれぞれ、

$$S_s = \gamma_w \{ \phi \beta_w + \beta_{eff} - (1 + \phi) \beta_s \} \quad (5.27)$$

$$k = \frac{\mu}{\gamma_w} K \quad (5.28)$$

で定義される。(5.26)式は、(5.27)式および(5.28)式を代入し、水頭を圧力と読みかえらると(5.21)式と全く同じである。なお、Brace et al.(1968)らによる近似解法では、(5.26)式中の S_s を0と考えていたことになる。さて、(5.26)式を解析するうえでの初期条件、境界条件は以下のように記される。

$$h(x, 0) = 0 \quad 0 < x < l \quad (5.29)$$

$$h(0, t) = h_u(t) \quad t \geq 0 \quad (5.30)$$

$$h(l, t) = h_d(t) \quad t \geq 0 \quad (5.31)$$

$$\frac{S_d}{kA} \frac{dh_d}{dt} - \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{x=l} = 0 \quad t > 0 \quad (5.32)$$

$$h_d(0) = 0 \quad (5.33)$$

$$\frac{S_u}{kA} \frac{dh_u}{dt} + \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{x=0} = 0 \quad t > 0 \quad (5.34)$$

$$h_u(0) = H \quad (5.35)$$

ここに、 h_d :下流側の貯留槽の水頭、 h_u :上流側の貯留槽の水頭、 A :試料の断面積、 S_u :上流側貯留槽の貯留量(水頭の単位変化に対する流体の体積変化)、 S_d :下流側貯留槽の貯留量、 H :パルス圧、である。以上の条件のもとに、(5.26)式がラプラス変換を用いて解かれ、

$$\alpha = \frac{kt}{l^2 S_s} \quad (5.36)$$

$$\eta = \frac{S_d A l}{S_u} \quad (5.37)$$

$$\gamma = \frac{S_d}{S_u} \quad (5.38)$$

という3つの無次元数を用いて、

$$\frac{h_u}{H} = \frac{1}{1 + \eta + \gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp \left(-\alpha \mu_m^2 \left(\eta + \gamma^2 \frac{\mu_m^2}{\eta} \right) \right)}{\left\{ \gamma^2 \frac{\mu_m^4}{\eta^2} + \frac{(\gamma^2 \eta + \gamma^2 + \gamma + \eta) \mu_m^2}{\eta} + (\eta^2 + \gamma \eta + \eta) \right\}} \quad (5.39)$$

$$\frac{h_d}{H} = \frac{1}{1+\eta+\gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp\left(-\alpha \mu_m^2\right) \left(\eta - \gamma^2 \frac{\mu_m^2}{\eta}\right)}{\left\{ \gamma^2 \frac{\mu_m^4}{\eta^2} + \frac{(\gamma^2 \eta + \gamma^2 + \gamma + \eta) \mu_m^2}{\eta} + (\eta^2 + \gamma \eta + \eta) \right\} \cos \mu_m} \quad (5.40)$$

と求められる。ここに、

$$\tan \mu = \frac{(1+\gamma)\mu}{\gamma \mu^2 - \eta} \quad (5.41)$$

である。この厳密解を用いて浸透率を決定する場合、あらかじめ貯留槽の貯留量の比から求められる γ を代入した厳密解を様々な η に対して求めておき、タイプカーブを作っておく。タイプカーブを用いた浸透率の決定法についてはNeuzil et al.(1981)に詳しく説明されている。

しかし、厳密解は、計算が複雑で時間がかかり、しかもタイプカーブで示された解に合うように測定結果を重ね合わせ、試行錯誤によって浸透率を決定しなければならない。また、厳密解を用いるためには、圧力そのものを十分に精度で計測する必要がある。今回用いた実験系では、温度変化によって間隙水圧が若干変動するために厳密解を用いることは困難であることがわかっている。

これらの困難を克服し、間隙率が大きな試料の浸透率を正確に求める方法について、石島ほか(1993)は以下の方法を推奨している。即ち、上流側と下流側の貯留槽の貯留量が等しい系においては、十分に大きな経過時間での厳密解を求めると、両貯留槽間の差圧と時間の関係は、

$$\log \left(\frac{h_u - h_d}{H} \right) = \log \delta - \lambda t \quad (5.42)$$

の形におくことができる。ここに、

$$\log \delta = \log \left(\frac{1}{\eta + 1} \right) \quad (5.43)$$

であり、また、

$$\lambda = \frac{\eta + 2}{2.303} \frac{k}{T} \frac{A}{\beta_w \gamma V_u} \quad (5.44)$$

である。従って、測定結果を $\log \{(h_u - h_d)/H\} - t$ 座標にプロットすると、時間 t の小さいデータを

除けば、ある直線にあてはまるはずである。その直線の傾きの絶対値が λ になり、切片が $\log \delta$ となる。従って、あてはめた直線の切片から(5.43)式を用いて η を求め、(5.44)式を変形した式、

$$K = \frac{2.303 \mu \beta_w V_u \lambda}{2A(1+0.5\eta)} \quad (5.45)$$

から浸透率が求められる。ところで、(5.45)式と、Brace et al.(1968)の近似解から求められる浸透率(5.25)式を比較すると、

$$\frac{K_{anal}}{K_{Brace}} = 1 + 0.5\eta \quad (5.46)$$

となる。ここに、 K_{anal} :解析解によって求められた浸透率、 K_{Brace} :Brace et al.(1968)の方法で求めた浸透率、である。従って、Brace et al.(1968)の近似解と厳密解の差は、 η が大きいほど大きくなることがわかる。 η は、(5.37)式で導入されている。ここで、 S_u は、

$$S_u = \beta_w \gamma V_u \quad (5.47)$$

であり、また、(5.27)式と組み合わせることにより、

$$\eta = \frac{Al \left[\phi \left(1 - \frac{\beta_s}{\beta_w} \right) + \frac{\beta_{eff} - \beta_s}{\beta_w} \right]}{V_u} \quad (5.48)$$

という形で η は求められる。仮に、 $\beta_w \gg \beta_{eff}$ 、 $\beta_w \gg \beta_s$ と仮定すると、

$$\eta = \frac{\phi Al}{V_u} \quad (5.49)$$

となる。つまり、上流側の貯留槽の体積に対する試料内の間隙体積の比となる。従って、たとえ試料の間隙率が大きくても、上流側の貯留槽の体積が十分大きければ η は十分に小さくなり、Brace et al.(1968)の近似式を用いても差しつかえないことがわかる。Birch(1966)は、いくつかの岩石・鉱物の圧縮率を整理している(Table 5-4)。これらのデータを見ると、 $\beta_w \gg \beta_s$ はほぼ成り立つと考えてよいが、 $\beta_w \gg \beta_{eff}$ は必ずしも成り立たないことがわかる。しかし、この場合でも、

Table 5-4 Compressibility of water, rocks and minerals. Data after Birch(1966).

material	water	shale	granite	albite	calcite	mica	quartz
compressibility (GPa ⁻¹)	0.45	0.17-0.23	0.033	0.020	0.014	0.012-0.023	0.027

Table 5-5 Specs of the systems and properties of the samples used in this study.

Volume of reservoirs (cm ³)	Cross-sectional area of the sample (cm ²)	Length of the sample (cm)	Porosity of the sample η
1000.0	7.07	6.0	0.425
			0.018

Table 5-6 Pressure values used in the experiments and the specs of the differential pressure transducer used in this study.

Pore pressure (kgf/cm ²)	Step increase in pressure (kgf/cm ²)	Capacity of D.P.T. (kgf/cm ²)	Resolution of D.P.T. (kgf/cm ²)
40	c.a. 0.9	2.0	0.25

$$\eta = \frac{A(\phi + \frac{\beta_{eff}}{\beta_w})}{V_u}$$

(5.50)

となり、上流側の貯留槽の体積が十分に大きければ η は十分小さくなり、Brace et al.(1968)の近似式を用いても差いつかえないことがわかる。

本実験における実験装置の様々な値(Table 5-5)を用いて評価すると、 $\eta=0.018$ となり、この場合は、Brace et al.(1968)の近似式を用いても得られる値は厳密解とほとんど変わらない。従って、本実験では、十分長時間の計測を行うことと、貯留槽の体積に比べて試料の体積は十分に小さい、いう2点が満たされることを確認し、Brace et al.(1968)の近似解を用いて、浸透率を圧力減衰曲線から算出した。

本実験では、上述の原理に基づいて、Fig. 5-15に模式的に示したようなシステムを用いて計測を行った。計測の手法は以下のとおりである。まず、配管内の圧力分布を完全に一定に保つ。その後、両貯留槽間のバルブを閉じ、両貯留槽を独立させる。この状態で貯留槽間の差圧の変化がないことを確認し、上流側のニードルバルブを少しだけ閉める。この場合、完全にニードルバルブを閉めないように注意する。ニードルバルブを閉めることによって上流側の体積がわずかに減少し、そのために上流側の圧力が上昇する。この後は、生じた圧力勾配による試料内の流れに伴う両貯留槽間の差圧の減少を差圧計で計測する。実験時の設定はTable 5-6に示されている。計測されたデータは、Fig. 5-16に示すようにBrace et al.(1968)の近似式を用いた評価ができるように、横軸に時間を取り、縦軸に差圧の対数を取ったグラフ上にプロットする。浸透率はこのグラフで十分に時間が経過した部分の傾きから(5.25)式を用いて算出する。

トランジェントパルス法を用いて精度の良い結果を得るために注意する事項に関しては、高橋・薛(1989)、高橋ほか(1991)、木山・高橋(1992)、石島ほか(1993)にまとめられている。以下では、試料に難透水性岩石を用いた試験に特有な問題点についてまとめる。

トランジェントパルス法を用いて試料の浸透率の計測を行う場合には、パルス圧は極力小さくする必要があるが、小さすぎても差圧計の能力の問題から精度良く計測できないことが起こりうるので、両者のバランスを考えて設定する必要がある。ここで、パルス圧を小さくすることは、以下の理由からである。

- 1) ダルシー流れが成立する層流条件を保つため
- 2) 間隙水圧を設定値から大きく変化させないため
- 3) 断熱圧縮に伴う温度変化をできるだけ小さくするため

Walder and Nur(1986)は、パルス圧を様々に変化させて浸透率を計測する実験を行い、パルス圧は設定間隙水圧の10%以下にしなければならないと結論している。本実験の設定(Table 5-6)は、この条件の範囲内である。

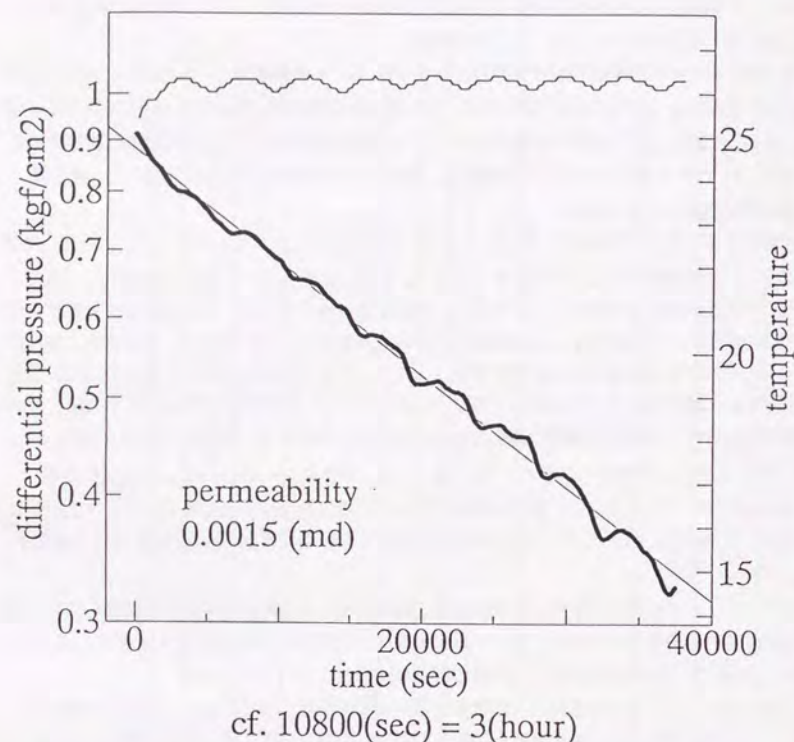


Fig. 5-16 Time versus logarithms of differential pressure relationship for transient pulse permeability experiments. Temperature data during the experiments are also presented.

実験時の差圧はFig. 5-16に見られるように周期的な変動を示す。今回の実験におけるこの変動は、室温の変動によるものであると考え、これらの影響をできるだけ少なくする努力を行った。具体的には、温度変化自体を最小限にするために、透水試験は夜間に行い、室内の空気の対流を抑えるために透水試験中は実験室内は無人とした。また、温度変化が生じて差圧の変化が起こらないようにするために、実験系を上流側と下流側で対称にするように設計した。

このような検討の結果、Fig. 5-16に見られるように、温度変化による差圧の変動も見られるが、直線として傾きを求められる程度の測定が可能となった。Fig. 5-17は今回用いた実験系の測定精度と測定限界を示している。この図から、6時間程度の計測で 10^{-7} ダルシー程度の浸透率は十分に計測可能であることがわかる。

5. 4. 3. 実験に用いた試料

実験に用いた試料は、千葉県市原市折津付近の養老川の露頭で採取した上総層群梅方瀬層のブロックサンプルから成形したものを用了。試料の物理的性質、粒径分布はTable 5-7に示されている。初期間隙率は試料としたものでは直接測定できないので、同一ブロックの試料近傍の岩石を用いて炉乾燥をすることにより湿潤重量・乾燥重量から求めた。

5. 4. 4. 実験結果の整理と比較

5. 4. 4. 1 浸透率-間隙率の関係

今回の一連の実験における透水試験の結果は、Table 5-8にまとめられている。また、5. 3. 5節で得られた関係に基づき、Fig. 5-18に間隙率と浸透率の両対数グラフ上にこれらの結果を示した。ここで、実験2における透水試験10と透水試験20は時間-対数差圧曲線での相関が良くないので、これらは実験上のエラーがどこかにあったものと思われる。

Fig. 5-19は、実験3のうち、透水試験11のデータを除いて浸透率を有効応力との関係で表したものである。ここで、透水試験11のデータを除いたのは、一連の载荷-除荷-载荷サイクルとして簡潔に描くためである。石島ほか(1991)は、等方圧で载荷-除荷を行う実験から、除荷時の透水係数の値が载荷過程での同等の応力下での透水係数よりも小さくなることを指摘していたが、今回の一次元圧密試験でもこのような傾向は認められた。即ち、除荷時の浸透率の回復は、圧密時の浸透率の減少に比べて非常に小さい。これは、ほぼ弾性的であると考えられている過圧密領域での変形量が圧密時の変形量に比べて小さいことによると考えられる。そこで、間隙率との関係で浸透率を見るとFig. 5-20の様になる。この図は、5. 3. 5節の結果に基づき、両対数グラフで表示されており、このグラフ上での直線関係は(5.20)式の関係を示す。この図では、正規圧密過程での試験結果は直線的にプロットされている。即ち、泥質岩を力学的に圧密した場合も(5.20)式を用いて浸透率の評価が可能であると考えられる。また、過圧密領域の

試験番号 TEST#.DAT	試験日	有効軸応力 kgf/cm ²	有効封圧 kgf/cm ²	間隙圧 kgf/cm ²	パルス圧 kgf/cm ²	供試体長さ cm	間隙率	延度曲線傾斜 cm/cm	相対保数	透水係数 cm/sec
14	7-28	114.24	108.73	39.5	0.9584	5.826	0.3709	1.959E-05	9.97	1.17E-09
16	7-29	168.85	122.78	41.0	0.9147	5.811	0.3693	1.672E-05	9.98	9.93E-10
18	7-30	243.57	145.80	40.2	0.9098	5.782	0.3661	1.386E-05	9.96	8.19E-10

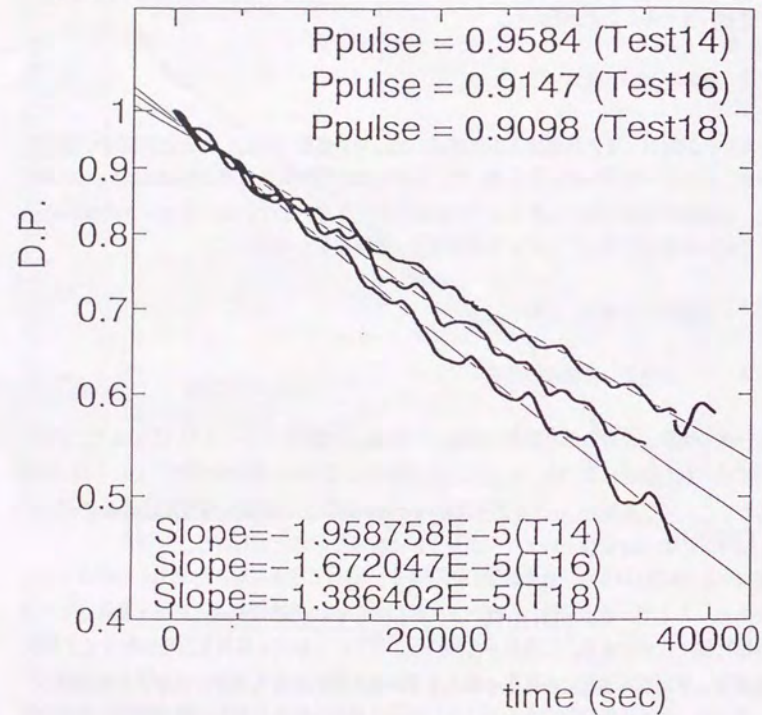


Fig. 5-17 Time versus logarithms of differential pressure relationship for transient pulse permeability experiments.

Table 5-7 Physical properties and grain size distribution of the sample used for consolidation experiments with transient pulse permeability measurements.

bulk density (g/cm ³)	grain density (g/cm ³)	uniaxial strength (kgf/cm ²)	initial porosity	clay content (%)	silt content (%)	sand content (%)
1.94	2.62	166.0	0.425	15.6	77.8	6.6

Table 5-8 Results of the consolidation-permeability measurement experiments.
(a) Results of run 1.

試験番号 TEST#. DAT	試験日	有効軸応力 kgf/cm ²	有効封圧 kgf/cm ²	間隙圧 kgf/cm ²	パルス圧 kgf/cm ²	供試体長さ cm	間隙率	減衰曲線傾き	相関係数	透水係数 cm/sec.
0	6-16	30	30	48	0.9551	6.140	0.425	1.114E-04	*. **	7.0E-09
3	6-17	174	105	52	0.8294	5.832	0.394	4.874E-05	*. **	2.9E-09
5	6-18	204	125	51	0.9102	5.719	0.382	2.786E-05	*. **	1.6E-09
7	6-20	247	150	50	0.8523	5.576	0.366	1.607E-05	*. **	9.2E-10
9	6-21	324	193	47	0.9008	5.395	0.345	9.176E-05	*. **	5.1E-10

Table 5-8 Continued.

(b) Results of run 2.

試験番号 TEST#. DAT	試験日	有効軸応力 kgf/cm ²	有効封圧 kgf/cm ²	間隙圧 kgf/cm ²	パルス圧 kgf/cm ²	供試体長さ cm	間隙率	減衰曲線傾き	相関係数	透水係数 cm/sec
0	7-21	37.50	37.50	43.7	0.8014	6.370	0.4225	1.206E-04	9.99	7.85E-09
2	7-22	113.36	44.15	40.4	0.9274	6.301	0.4183	1.057E-04	9.98	6.81E-09
4	7-23	138.82	63.41	41.5	0.9463	6.235	0.4122	8.383E-05	9.94	5.34E-09
6	7-24	168.67	86.90	41.2	0.9217	6.131	0.4022	6.827E-05	9.97	4.28E-09
8	7-25	216.03	151.16	41.1	0.9089	5.911	0.3800	3.471E-05	9.97	2.10E-09
10	7-26	257.41	160.66	41.1	0.9599	5.790	0.3670	6.333E-05	9.91	3.75E-09
12	7-27	172.52	125.89	40.3	0.9123	5.805	0.3686	2.567E-05	9.97	1.52E-09
14	7-28	114.24	108.73	39.5	0.9584	5.826	0.3709	1.959E-05	9.97	1.17E-09
16	7-29	168.85	122.78	41.0	0.9147	5.811	0.3693	1.672E-05	9.98	9.93E-10
18	7-30	243.57	145.80	40.2	0.9098	5.782	0.3661	1.386E-05	9.96	8.19E-10
20	7-31	299.55	177.82	40.4	0.9515	5.694	0.3563	6.108E-05	9.87	3.56E-09

Table 5-8 Continued.
(c) Results of run 3.

試験番号 TEST No. DAT	試験日	有効軸応力 kgf/cm ²	有効封圧 kgf/cm ²	間隙圧 kgf/cm ²	パルス圧 kgf/cm ²	供試体長さ cm	間隙率	減衰曲線傾き	相関係数	透水係数 cm/sec
1	8-2	37.50	37.50	41.00	0.9045	6.349	0.4227	1.545E-04	9.62	1.000E-08
3	8-3	124.74	68.01	40.79	0.9320	6.255	0.4141	9.556E-05	9.90	6.110E-09
5	8-4	155.33	92.04	39.76	0.9420	6.139	0.4030	6.512E-05	9.97	4.090E-09
7	8-5	195.45	118.17	41.03	0.9324	5.974	0.3865	4.088E-05	9.92	2.500E-09
9	8-6	270.17	159.59	40.21	0.9203	5.696	0.3566	2.035E-05	9.93	1.190E-09
11	8-7	214.93	126.02	39.28	0.9314	5.705	0.3575	1.754E-05	9.37	1.020E-09
13	8-8	369.97	215.59	40.91	0.9536	5.449	0.3274	6.787E-06	9.16	3.780E-10
15	8-9	227.78	173.19	41.21	0.9479	5.468	0.3298	9.783E-06	9.88	5.470E-10
17	8-9	139.11	143.10	41.20	0.9304	5.495	0.3330	8.659E-06	9.75	4.860E-10
19	8-10	225.98	162.54	40.06	0.9287	5.480	0.3313	1.203E-05	9.92	6.740E-10
21	8-10	356.22	206.02	39.88	0.9278	5.442	0.3265	6.200E-06	9.83	3.450E-10

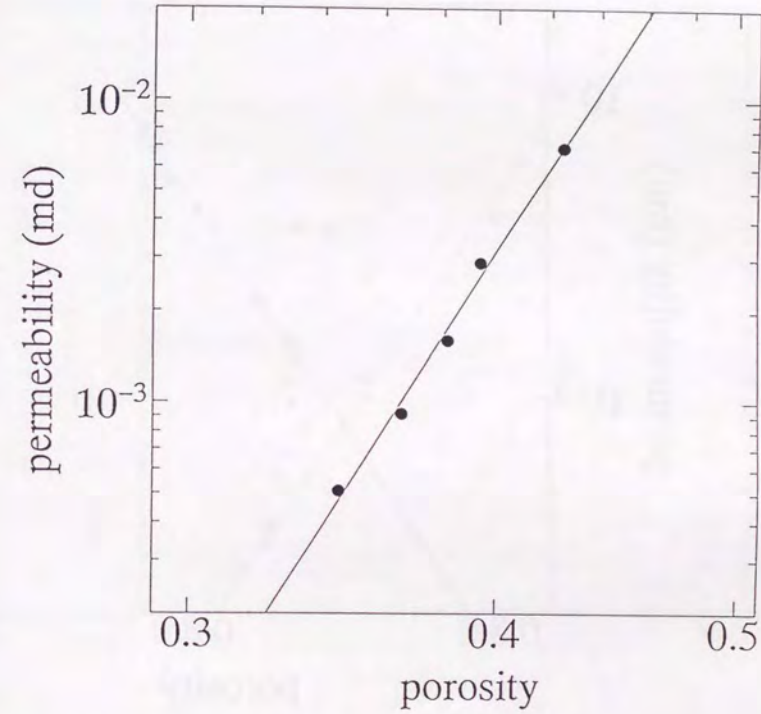
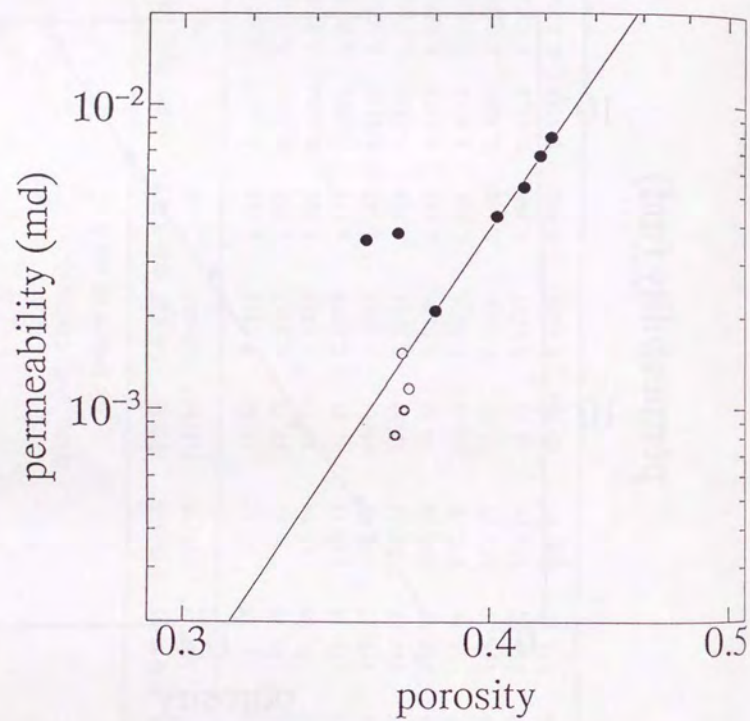


Fig. 5-18 Porosity versus permeability relationships obtained from consolidation experiments with transient pulse permeability measurements.

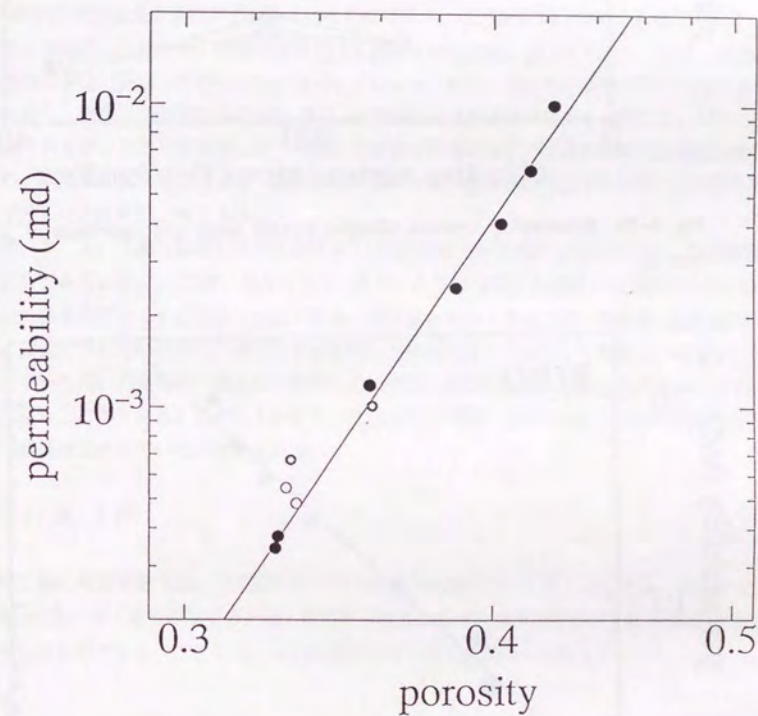
(a) Results of run 1.



Normal consolidation •
 Unloading ○
 Reloading ◐

Fig. 5-18 Continued.

(b) Results of run 2.



Normal consolidation •
 Unloading ○
 Reloading ◐

Fig. 5-18 Continued.

(c) Results of run 3.

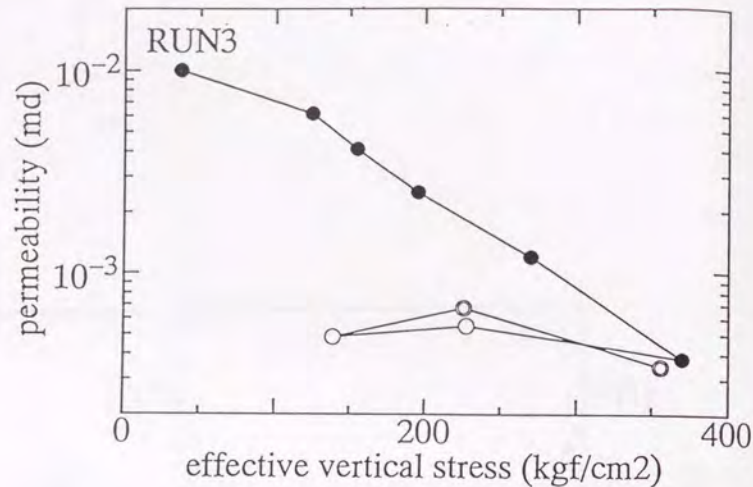


Fig. 5-19 Relationship between effective vertical stress and logarithms of permeability (run 3).

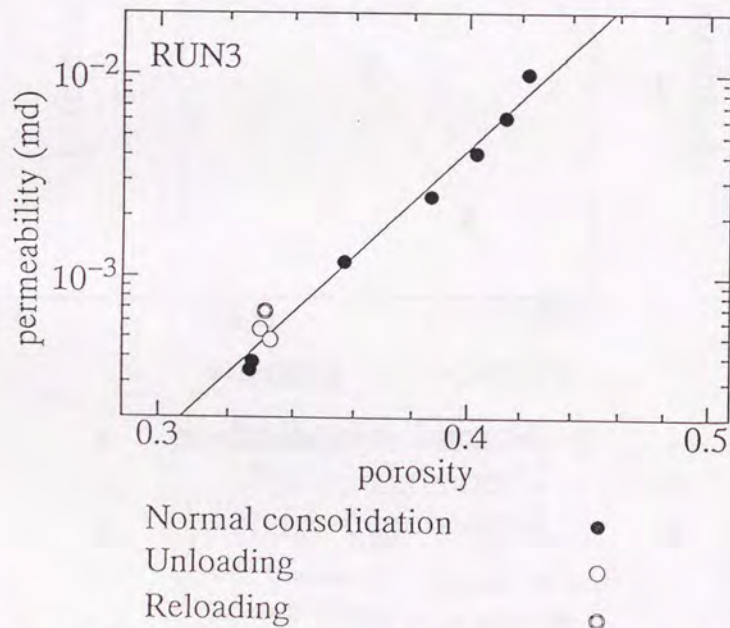


Fig. 5-20 Relationship between porosity and permeability on double logarithmic scales (run 3).

試験結果は浸透率の変化も小さいが、間隙率の変化も小さいため、結果的にほぼこの直線に沿ってプロットされている。正規圧密時の塑性的な変形と過圧密領域の弾性的な変形は変形の様式が異なると考えられるにもかかわらず、浸透率・間隙率の変化量が過圧密領域では正規圧密領域に比べて小さいために、このような傾向が見られると考えられる。このように、過圧密領域のデータが正規圧密領域のデータと同様の位置にプロットされる傾向はほかの実験においても見られる。

さらに、Fig. 5-21は、今回の実験結果とは応力レベルの異なるAl-Tabbaa and Wood(1987)の実験結果を重ねてプロットしたものである。この図においても、大局的に見ると、除荷・再載荷時の浸透率・間隙率の変化は正規圧密時の変化に比べて小さく、除荷・再載荷時の浸透率もほぼ正規圧密時の傾向に沿ってプロットされる。過圧密領域での試料の変形量は微量であり、実験上の測定誤差の範囲に近いので変形量と浸透率の関係を明瞭に見出すことは困難であるが、正規圧密領域に比べて過圧密領域の間隙率および浸透率の変化は極めて小さいため、間隙率の変化幅の大きな大変形の圧密問題を扱う場合には(5.20)式を用いて浸透率を評価して差しつかえないと考えられる。

ここで、5. 3. 7節で議論した粘土含有率と(5.20)式の定数の関係を泥質岩を用いた実験結果で検討してみる。Fig. 5-22は、泥質スラリーを用いた実験結果から求められた傾向を示す図に、今回の結果のプロットを重ねたものである。泥質岩を用いた実験では、間隙率の変化幅がそれほど大きく取れないために、傾きを求める時に誤差が大きくなることを考慮にいれると、泥質スラリーを用いた実験から得られた傾向の上に今回の泥質岩を用いて求められた結果がのっていると見ることができる。このことから、(5.20)式の定数を、試料の粘土含有率から求めることの可能性が示されていると考えられる。

5. 4. 4. 2. K_0 値

今回の三軸 K_0 圧密試験では、拘束圧という形で水平方向の応力が計測されている。Fig. 5-23は実験1の各圧密・除荷段階での圧密・除荷終了時点における水平有効応力と鉛直有効応力の関係を示したものである。ここでは、正規圧密過程での測定結果は一直線上に並び、

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (5.51)$$

の形で定義される K_0 値を用いると、正規圧密過程では K_0 値はほぼ一定値を取ると言い換えることができる。Fig. 5-24とFig. 5-25はそれぞれ実験2と実験3の測定結果であり、さらに、Fig. 5-26は3回の結果をまとめて示したものである。Fig. 5-26からは今回の実験では再現性がかなり良いことが認められ、また、今回の試料に対しては正規圧密過程では鉛直応力約750kgf/cm²まで K_0 値が一定値0.6をとることがわかる。

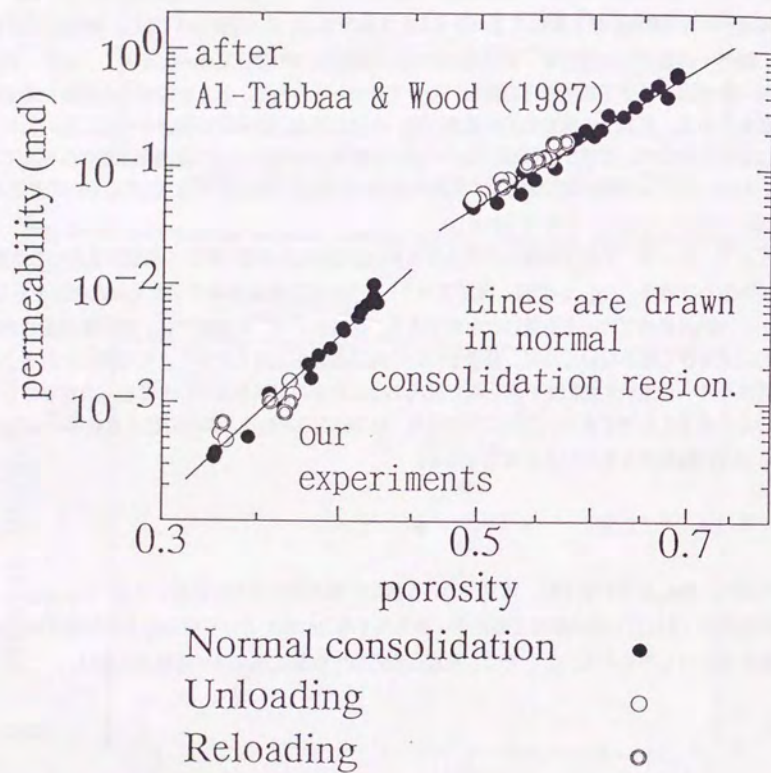


Fig. 5-21 Relationships between porosity and permeability on double logarithmic scales.

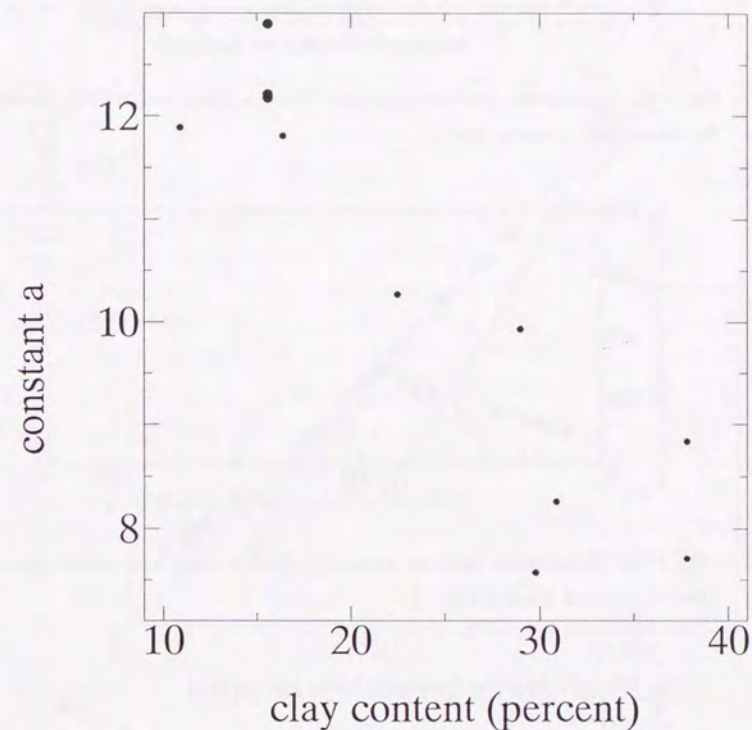


Fig. 5-22 Plots of the relationship between constant 'a' of equation (5.20) and clay content of the samples. Small dots are samples used in one-dimensional consolidation apparatus, and large dots are those used in triaxial compression apparatus.

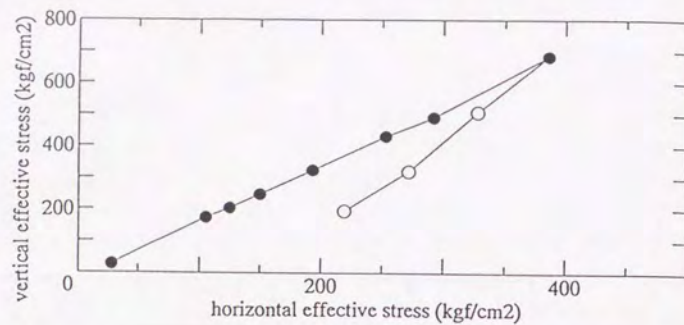


Fig. 5-23 Relationship between horizontal effective stress and vertical effective stress of the consolidated samples (run 1).

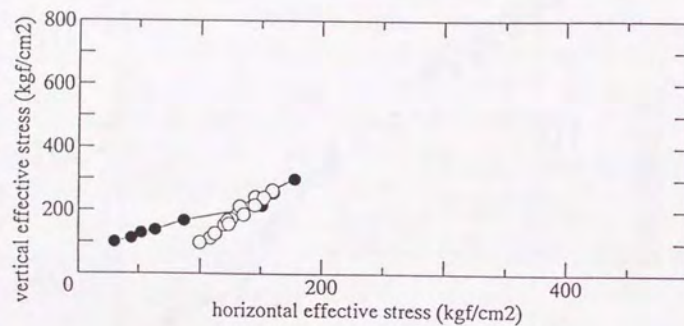


Fig. 5-24 Relationship between horizontal effective stress and vertical effective stress of the consolidated samples (run 2).

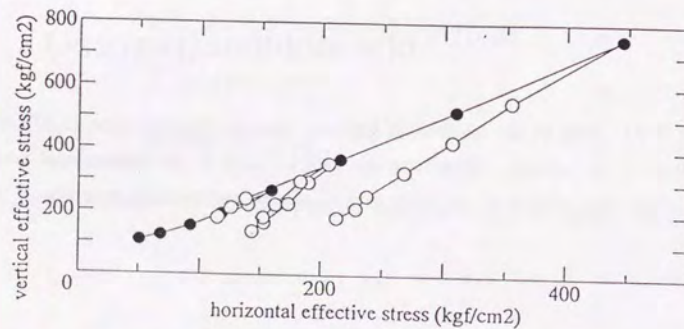
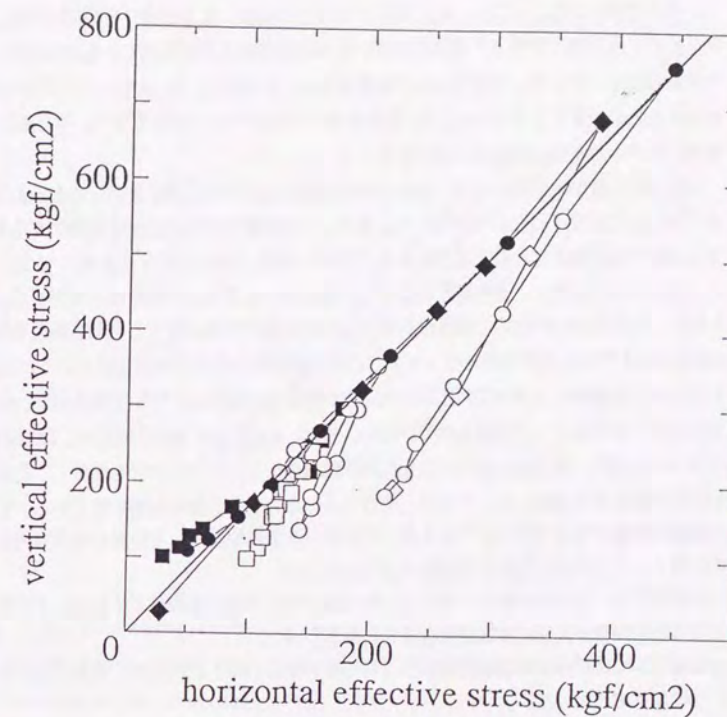


Fig. 5-25 Relationship between horizontal effective stress and vertical effective stress of the consolidated samples (run 3).



run	1	2	3
normal consolidation	◆	■	●
overconsolidation	◇	□	○

Fig. 5-26 Relationships between horizontal effective stress and vertical effective stress of the consolidated samples (all runs).

ところで過圧密領域における K_0 値に関しては、Alpan(1967)の粘性土に関する経験式がある。これは、

$$K_{0e} = K_{0n} (OCR)^m \quad (5.52)$$

という形で表される。ここに、 K_{0e} :過圧密領域での K_0 値、 K_{0n} :正規圧密領域での K_0 値、OCR:過圧密比、 m :定数、である。過圧密比は、圧密降伏応力と現在受けている有効応力との比として求められる。ここで、今回行った実験結果をFig. 5-27のように示すと、ある程度のバラつきは示すものの全体としては(5.52)式の関係を用いて整理することができる。ちなみに今回の試料を用いて求めた定数 m の値は0.54である。

今までに土質工学の分野では、解析の初期条件として水平応力を求める必要があることから多くの K_0 圧密試験が行われてきている。また、この実験を行ううえでの制御方法も低圧を載荷する実験では近年確立されてきつつある(大河内・龍岡, 1983; 小田・三田地, 1992)。しかし、これも浸透率と同様に、より高压の領域での値についてはその特性がほとんど明らかにされていない。岩本ほか(1990)は、過圧密領域における K_0 値の変化に着目し、最大鉛直有効応力が約80kgf/cm²までの K_0 圧密試験を行っており、今回の実験と同様の結果を得ている。しかし、実験に用いた上総層群のシルト岩の圧密降伏応力が50から70kgf/cm²であり(岩本ほか, 1990)、正規圧密領域におけるデータを得られていない。また、Karig and Hou(1992)は、試料として泥質スラリーを用い、側方拘束型の一次元圧密試験機のシリンダに圧力計を埋設し、約350kgf/cm²程度まで載荷する実験を行っており、やはり今回の実験と同様の結論を得ている。しかし、側方摩擦の影響が考えられることおよび、スラリーを出発物質とした実験が実地盤内の応力状態を再現できているかどうかの問題が残っていた。

本実験では、実際の泥質岩を用いて、約750kgf/cm²の高压を載荷している。その結果、低圧で得られた知見が高压まで延長できることがわかった。

なお、本実験では24時間程度の圧密を行っているために、二次圧密、遅延圧密の影響については評価できていない。

5. 5. 実験結果の堆積盆シミュレータへの適用に関する検討

5. 5. 1. はじめに

前節まででは、泥質スラリーおよび泥質岩を出発試料として力学的圧密に伴い浸透率がどのように減少していくかに関して、室内実験に基づいた検討を行った。さらに、未擾乱の試料を用いた過去の実験結果との比較も行い、今回実験的に明らかになった関係が、そのような試料の力学的圧密に伴う浸透率の変化にも適用できることを示した。本節では、堆積盆シミュレータに用いる物性として、前節までの議論から得られた関係を用いることが適切であるかど

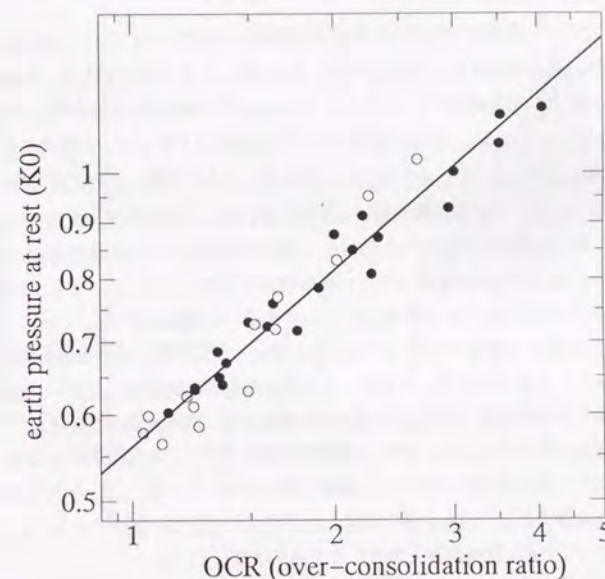


Fig. 5-27 Relationship between overconsolidation ratio and K_0 values on double logarithmic scales. Open circles indicate data of reloading stages and dots indicate those of unloading stages, respectively.

うかについての検討を行う。

5. 5. 2. 浸透率-間隙率の関係の自然状態の試料への適用可能性

5. 5. 2. 1 坑井から採取されたコアデータとの比較

現在までに、泥質岩の浸透率と間隙率の関係を求めている研究は、Bryant et al.(1975)、Magara(1978)、Dutta(1988)、Katsube et al.(1991)がある。Bryant et al.(1975)は、メキシコ湾内の泥質岩コアサンプルを、Terzaghiの方法(石原,1988参照)を用いて求めており、また、Magara(1978)は、日本およびカナダの泥質岩コアサンプルの浸透率を計測している。Dutta(1988)とKatsube et al.(1991)は、それぞれメキシコ湾、カナダ東方沖の泥質岩コアサンプルをトランジェントパルス法を用いて計測している。これらのデータのうち、Magara(1978)のものは、計測方法が明かでないうえに、他の実験結果に比べて浸透率がかなり大きく求められており、実験上の問題があった可能性が否定できない。従って、ここでの議論では、Magara(1978)のデータは用いず、それ以外のデータを用いた議論を行う。

Fig. 5-28は、前節までで行ってきたのと同様に、浸透率と間隙率の関係を両対数グラフ上にプロットしたものである。さらに、室内圧密実験の結果得られたデータも同じ図上にのせている。多くの自然状態で圧密した試料の計測結果は、室内実験の結果得られたデータと同様の位置にプロットされており、また、浸透率の減少パターンも間隙率が0.3よりも大きな領域では、室内実験から求められたパターンと同様な傾向を示している。これらのことは、間隙率が0.3よりも大きな場合には、自然状態で圧密した泥質岩の浸透率の減少パターンは、室内実験の結果得られた(5.20)式で説明可能であることを強く示唆している。

しかし、間隙率が0.3よりも小さい領域では、浸透率と間隙率の関係は、(5.20)式で示される関係とは違ってきている。即ち、自然状態で圧密が進行したサンプルは、同じ間隙率で見た場合、力学的圧密の傾向を外挿したものに比べて浸透率が大きくなる傾向を示す。

この現象は、以下に示す理由によるものであると考えられる。

一つには、セメンテーションや圧力溶解-沈殿現象などの所謂化学的圧密作用の影響が間隙率が小さい領域では重要になり、その結果、力学的圧密過程での変化と違ってくると思われることが可能である。しかし、この説明では、所謂化学的圧密作用の結果が、浸透率の減少に比べて間隙率の減少をより速く起こすというメカニズムを説明しなければならない。

ところで、井波・星野(1974)は、泥質岩の圧縮率の計測を行っている。彼らの結果(Fig. 5-29)を見ると、圧縮率の変化の仕方も、今回の整理の結果(浸透率の減少)と同様に、間隙率が0.3の部分を境に大きく変化している。井波・星野(1974)は、これを間隙率が0.3より大きい場合には、試料が粘性流体に近い変形特性を示すが、間隙率が0.3より小さくなった場合には、塑性固体に近い変形特性を示すためであり、試料の変形特性自体が間隙率0.3を境に変化することを示

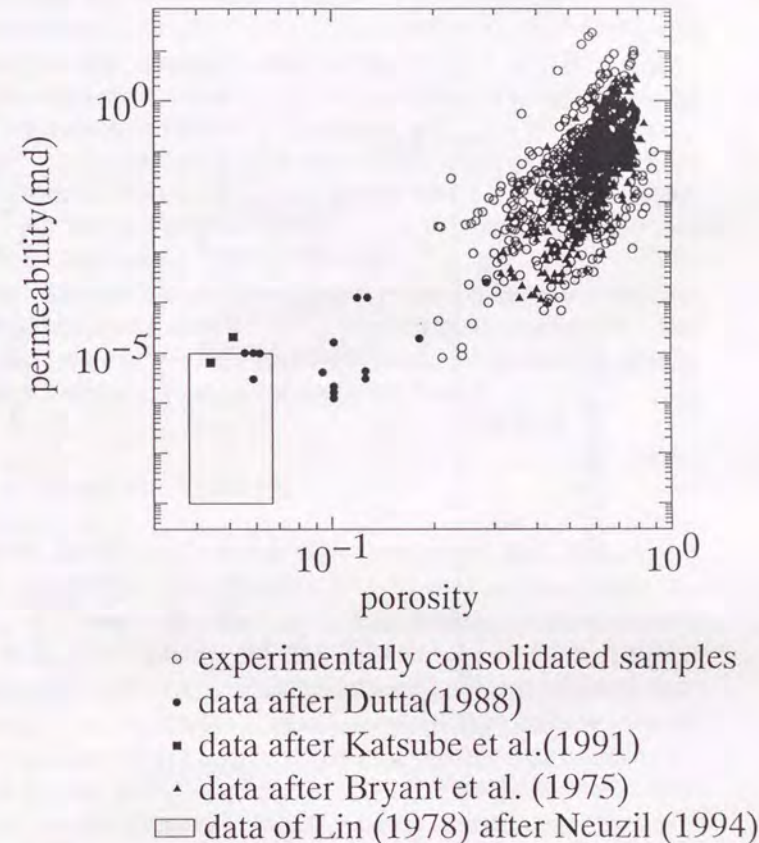


Fig. 5-28 Plots of porosity versus permeability of published data and results of our experiments. Data sources are presented in Table 5-3.

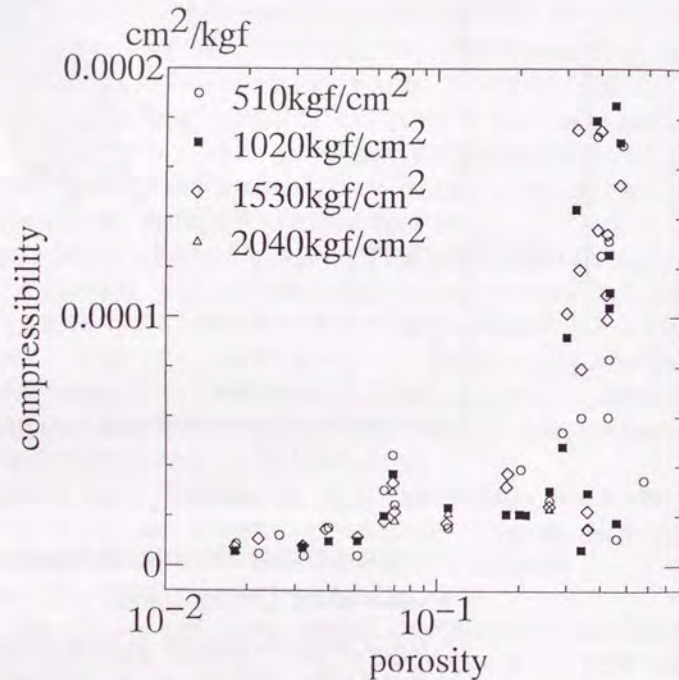


Fig. 5-29 Compressibility of argillaceous rocks at hydrostatic pressure up to 2040 kgf/cm². The abscissa is porosity in logarithmic scale. (Inami and Hoshino, 1974).

していると主張した。このことは、圧密のメカニズムが間隙率0.3を境に変化していることを意味し、浸透率の変化パターンもその結果として違うトレンドを示すようになるのかもしれない。但し、ここで注意しておかなければならないことは、 10^{-3} md程度浸透率を室内実験で正確に計測することは非常に困難であるという点である。一般に、難透水性岩石の浸透率は、トランジェントパルス法で計測するが、今までに最も小さな浸透率を計測することに成功したのは、Trimmer et al.(1980)である。彼らは、 10^{-3} mdオーダーという値を花崗岩・ハンレイ岩のサンプルで計測することに成功しているが、これには、一週間以上の計測が行われている。一般に、このような長時間に亘って実験条件を一定に保っておくことは非常に困難であり、低浸透率の岩石の実測値には、大きな計測誤差が含まれていることを認識しておく必要がある。さらに、一般に、花崗岩・ハンレイ岩等の間隙率の小さい岩石に比べて、泥質岩の様な間隙率の大きな岩石でかつ浸透率が小さい試料をトランジェントパルス法で計測することはより大きな困難を伴う。従って、間隙率が0.3以下の試料の計測結果は、このような計測限界の影響を受けている可能性を考慮しておく必要がある。

いずれにせよ、自然状態で圧密した試料の計測結果と、今回の室内実験の結果との比較から、少なくとも間隙率が0.3よりも大きな領域では、室内実験の結果得られた(5.20)式を用いて間隙率と浸透率の関係を評価することが可能であることが示された。より間隙率の小さい領域に関しては、数値計算の繰り返しによる推定が有効であると考えているが、その詳細は、5. 6節で議論する。

5. 5. 2. 2 塩分濃度の与える影響の評価

今回の実験では、塩分濃度の与える影響の評価を行っていないが、過去に行われたいくつかの実験では、塩分濃度の与える影響の評価が行われている。Mesri and Olson(1970)は、カオリナイト、イライト、スメクタイトの各々について、塩水を浸透流体として浸透率の計測を行っている(Fig.5-11c)。これらの結果では、少なくともカオリナイトとイライトでは、今までに行ってきた浸透率と間隙率の両対数グラフ上で直線関係を示しており、(5.20)式の形自体は、塩水であれ純水であれ成り立つものと考えられる。Cluckey and Silva(1981)も未擾乱のサンプルを出発物質として同様の結果を得ている。しかし、これだけでは、塩分濃度の与える影響がないことを明らかにすることができない。ところで、Olsen(1966)は、圧密実験を行いながら、圧密初期には純水を用いて浸透率の計測を行い、圧密実験の後半では、塩水を用いた浸透率の計算を行っている。その結果(Fig. 5-11f)は、間隙率が0.22の計測結果が浸透率および間隙率の両対数グラフ上で直線からずれているが、それ以外のデータは直線的に並んでいる。このことは、塩分濃度によっては浸透率と間隙率の関係は変化せず、今回の実験結果から得られた経験式(5.20)は、実際の堆積盆地での流体流動を考慮する場合にも適用できるものと考えられる。

5. 5. 2. 3 堆積環境の与える影響の評価

堆積環境が違ふ場所においては、泥質岩の堆積時のファブリックが違ふということは一般に知られている事実である(例えば、Bennett and Hulbert, 1986)。従って、堆積環境が違ふ泥質岩は、その圧密過程において浸透率の変化の様式も違ってくる可能性がある。今回は、堆積環境に関する検討は直接は行っていない。しかし、泥質スラリーを出発物質とした実験において、ほぼ同様の粉末を用いた「沈降」「練返し」の2種類の試料作成法による実験を行っている。5.3.5節で説明された実験結果を見ると、「沈降」「練返し」のどちらにおいても、(5.20)式を満たすような浸透率および間隙率の両対数グラフ上での直線関係が良く成り立っている。このことは、浸透率の絶対値自体は違ってくる可能性があるものの、浸透率の減少パターン自体はこれらの試料作成法の違いによる変化は起きないことを示唆している。また、過去に計測された未擾乱試料の多くは、ロンドン郊外の河口近傍で堆積したと考えられているBothkennar clayの実験結果であるが、それ以外にも、大西洋の深海粘土(Clukey and Silva, 1981)などでも同様の関係が得られており、浸透率の減少を表す式の形は、堆積環境に依存しないと考えられる。実際に(5.20)式を使う場合には、その粘土含有率、間隙率、浸透率を測り、その結果から、浸透率変化過程を見積ることになるので、堆積環境の違いによって式の形自体が変わらないことから、堆積シミュレータで用いる関係式としては(5.20)式は適切なものであるといえる。

5.5.2.4 実験室スケールから堆積盆スケールへのスケール変換

一般に、実験室で行って得られた関係を、実際の自然現象のスケールでの現象に適用する場合には、そのスケールの違いを評価することが必要となってくる。ここでは、本研究で行ったデータを用いてこの評価を行うことはしていないが、Neuzil(1994)が行った検討をもとに、泥質堆積物におけるスケール変換の問題を検討する。Neuzil(1994)は、過去に行われた室内実験の結果をまとめ、泥質堆積物においては、実験データにはかなりのバラツキがあるが、包括的に見ると、それらはある傾向をもって変化していることを示した(Fig. 5-30)。また、Neuzil(1994)は、堆積盆スケールの地下水流動システムを対象とした数値逆解析手法によって求められたいくつかの地域での泥質堆積物の浸透率と間隙率の関係についてもレビューを行った。それらの結果を室内実験の結果から得られた関係と同じ図上にプロットしてやると、データのバラツキが大きい問題はあるが、逆解析の手法を用いて求めた浸透率-間隙率の関係と、室内実験から得られた関係とは同様であることが示された。このことから、Neuzil(1994)は、泥質堆積物の浸透率-間隙率の関係はスケール依存性を持っておらず、室内実験の結果をそのまま堆積盆スケールの問題に適用することは、第一近似的には問題ないという結論を示した。この検討に関しては、堆積盆スケールの逆解析の結果得られた浸透率の値は、ほとんどが砂岩泥岩互層の浸透率の値であることが推定されること、また、もしそのような値を求めた逆解析であった場合には、浸透率異方性をどのように評価しているかという問題があり、今後の検討を要するが、少なくとも、現段階では、これ以上の評価をするデータを持っておらず、スケール依存性に関しては、Neuzil(1994)の主張にしたがってスケール依存性はないものとし、実験室スケールで得られた

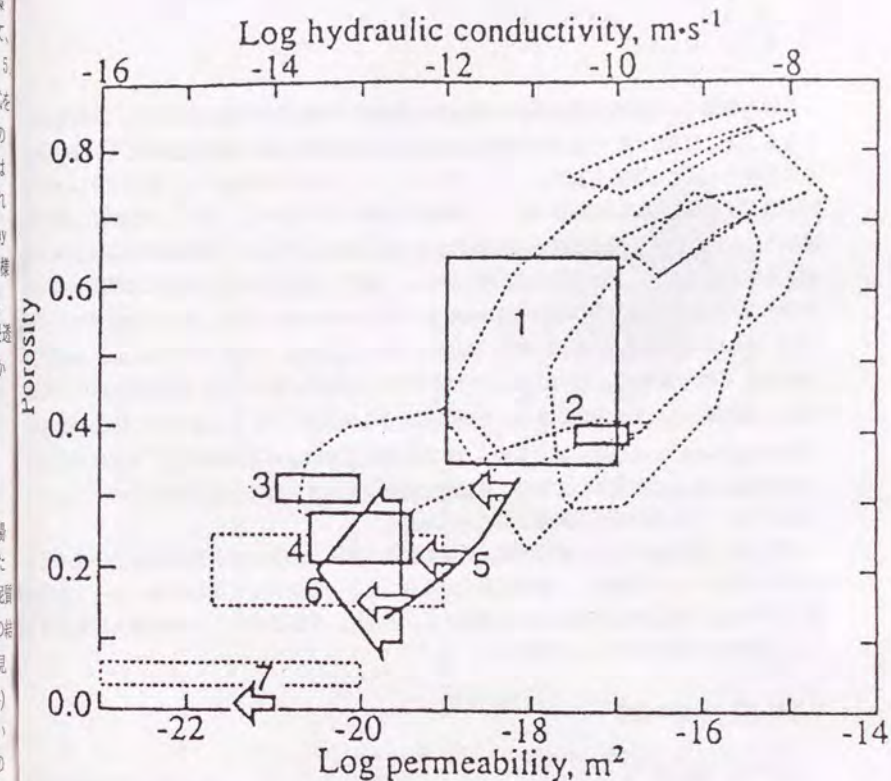


Fig. 5-30 Plot of large-scale permeability versus porosity for a variety of argillaceous units derived from inverse analyses of flow systems. Dotted lines show plot of laboratory-derived permeability versus porosity for a variety of natural argillaceous media. Arrows indicate results which are upper limits for the permeability. Data sources are shown in Neuzil(1994). After Neuzil(1994).

関係を堆積盆スケールの問題にも用いることとする。

5. 6. 泥質岩の圧密に伴う浸透率変化の堆積盆発達過程に与える影響評価

5. 6. 1. はじめに

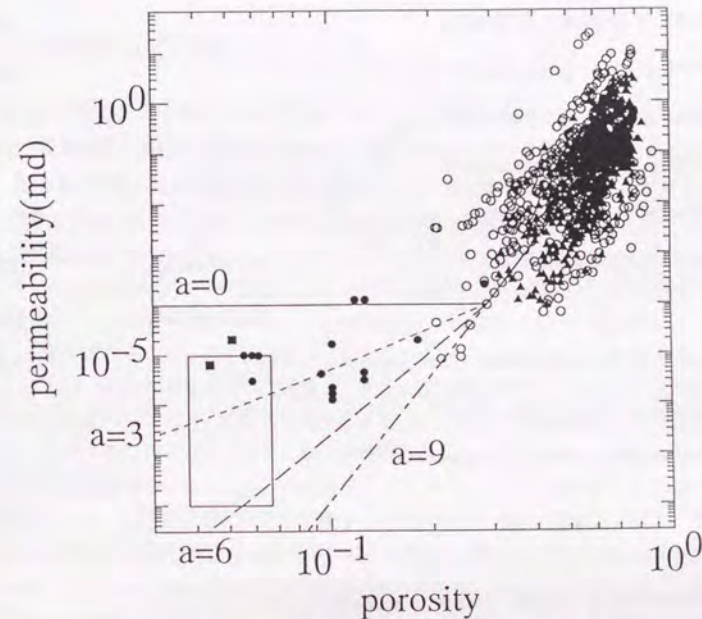
前節の議論で、今回の実験結果から得られた浸透率と間隙率の関係式(5.20)は、間隙率が0.3よりも大きな領域においては自然状態での圧密に伴う浸透率の減少過程を表現していると考えられることが示された。しかし、5. 5. 2. 1節での議論から、間隙率がより小さい領域では、(5.20)式を直接用いることは適切ではないようである。しかし、実験的に浸透率を求めることは、計測精度の問題から困難であると思われる。さらに、間隙構造から浸透率を推測する手法もあるが、この方法にも問題は多い。一般に、泥質岩の間隙構造は水銀圧入式のポロシメータを用いて評価されている(Diamond, 1970; Lawrence, 1978; de Kimpe, 1984; Reed, 1979; Garcia-Bengochea et al., 1979; Delange and Lefebvre, 1984; Griffiths and Joshi, 1989)が、この手法ではインク瓶効果と呼ばれる小さな間隙に囲まれた大きな間隙を小さな間隙径として計測してしまう問題があり、等価間隙径分布を計測しているに過ぎない(Scheidtger, 1974)。Lapierre et al. (1990)は、このような等価間隙径分布から浸透率をモデル化することは一般に困難であることを示しており、理論的に間隙率が小さい領域の浸透率変化パターンを明らかにすることは現時点では困難であると思われる。

本節では、間隙率が小さい領域での浸透率の変化パターンの違いが計算結果にどのような影響を与えるかについて検討し、数値計算の繰返しによって適切な浸透率減少パターンを求めることが可能であるかどうかについて議論する。さらに、その場合に、どの物理量に着目することが効率的であるかについて検討する。

5. 6. 2. 計算の設定

ここでは、間隙率が0.3よりも小さい領域での浸透率の変化パターンの違いによる堆積盆発達史の違いを評価することを目的とした計算を行っている。間隙率が0.3よりも小さい領域での間隙率と浸透率の関係は、前節までの議論からわかるように明らかになっていない。ここでは、間隙率と浸透率の関係の形は(5.20)式と同じであるが、間隙率が0.3よりも小さくなった場合には、定数の値が間隙率が大きな領域とは変化すると仮定した。今回の設定では、間隙率が0.3よりも大きな領域では定数は9であるが、0.3よりも小さくなった場合に a の値がそれぞれ0、3、6、9と違った場合に、どのような計算結果の違いが現われるかについて検討した(Fig. 5-31)。計算は砂岩泥岩互層からなる仮想堆積盆の二次元断面を用いている。今回の計算に用いた入力値はTable 5-9に示されている。本計算における境界条件は以下のとおりである。

1) 流体流動に関して基盤岩との境界は閉境界とし、海底面では、定圧境界(各タイムステップに



- experimentally consolidated samples
- data after Dutta(1988)
- data after Katsube et al.(1991)
- ▲ data after Bryant et al. (1975)
- data of Lin (1978) after Neuzil (1994)

Fig. 5-31 Porosity versus permeability relationships used for this sensitivity study. Plotted data are the same as those in Fig. 5-28.

Table 5-9 Input data for this sensitivity study.

Number of time steps	22
Length of time steps	0.65(m.y.) [*]
Number of grid for X direction	8
Number of grid for Y direction	1
Width of grids for X direction	2000(m) ^{**}
Width of grids for Y direction	1000(m) ^{**}
Initial porosity for mudstone	0.6
Initial porosity for sandstone	0.4
Constant of Athy's equation	
	for mudstone 6.0E-4(1/m)
	for sandstone 3.0E-4(1/m)
Heat flow between basement and sediments	1.9(hfu) ^{***}
Grain size of sandstone	medium ^{****}
Total organic carbon in mudstone	
	for Z=1 & Z=3 5.0(wt%)
	for other grids 1.0(wt%)
Composition of organic matters in mudstone	
	type I kerogen 30.0(%) ^{*****}
	type II kerogen 50.0(%) ^{*****}
	type III kerogen 20.0(%) ^{*****}
Amount of heat generation in sediments	0 ^{*****}

^{*} Length of time step is set to be constant for all time steps.

^{**} Width of grids for X & Y directions is set to be constant for all grids.

^{***} Heat flow is assumed to be constant for all time steps.

^{****} Grain size of sandstone is set to be constant for all sandstone grids.

^{*****} Composition of organic matters in mudstone is assumed to be constant for all grids containing mudstone.

^{*****} Heat generation in sediments is not considered for all time steps.

おける海底面深度における圧力)を表現するためにダミーセルを設ける。

2)熱の移動に関して、海底面は定温境界とし、基盤岩との境界での熱流量を入力値とする。

3)側方境界は、流体流動・熱の移動に関して共に閉境界とする。

また、初期条件として、各タイムステップにおける堆積物に関して、堆積深度に応じた静水圧・海水温度を与え、水飽和率に関しては、初期ピチュメン量が0と考え、初期水飽和率を1、としている。

5. 6. 3. 計算結果の比較と議論

Fig. 5-32は、今回の計算における堆積開始後14.3m.y.の段階における岩質分布を示しており、Fig. 5-33は、背斜頂部における間隙率、間隙水圧、温度の深さ方向の分布を示している。Fig. 5-33から、間隙率と間隙水圧は、浸透率変化のパターンに大きな影響を受けることが見て取れる。特に、間隙水圧は、数十atm程度の変化が(5.20)式の定数の値の違いから見積られ、これは、堆積盆地内での計測精度の範囲内であると考えられる。従って、ある堆積盆地を対象とした場合に、他のパラメータが何らかの方法で適切に決まっている場合には、(5.20)式の定数の値を間隙率が小さい領域でいくつか変化させてやり、その計算結果と、実測値としての間隙水圧もしくは間隙率とを比較してやることにより、適切な定数の値を決定することが可能であると考えられる。但し、このような方法で求められた定数は、考慮しているモデルの枠組みの中で適切な結果を得るために最適な値であり、実際の地質現象として、そのような関係を保って浸透率が減少したことは保証されないことに注意しておく必要がある。

今回の計算結果の水飽和率分布はFig. 5-34に示されているが、間隙率が0.3以下の領域での浸透率の変化パターンは、石油の移動に大きな影響を与えていることが見て取れる。即ち、間隙率が0.3以下では間隙率の減少は起こるが浸透率の減少は起こらないとしたケース(a=0)では、堆積開始後14.3m.y.ですでに、構造頂部に石油の集積が見られるが、それ以外の値を用いた計算では、石油の集積はまだ起こっていない。この理由は以下のように説明される。石油根源岩中に発生する過剰間隙水圧は、根源岩の浸透率および間隙率の減少を遅らせる効果がある。また、BASIN3D2Pでは、根源岩からの石油の排出が起こる数値の水飽和率は、浸透率が大きくなるに連れて小さくなるように設定されている(3. 4. 3. 3節参照)。従って、(5.20)式の定数の値が大きく、過剰間隙水圧が発生している場合には、間隙率が大きいために、同じ量の石油が根源岩内で生成しても、数値の水飽和率までには至らず、さらに、浸透率自体も大きいために保たれるために、数値の水飽和率自体も小さくなり、より飽和率が大きくなりかぎり石油の排出が起きないことになる。その結果、貯留層への石油の排出が遅れ、堆積開始後14.3m.y.の段階では構造頂部にまで石油が移動できていないことになる。しかし、浸透率の減少が十分に早い場合(例えば今回の計算ではa=9の場合)は、非常に大きな過剰間隙水圧が発生するために起こる水圧破砕現象の結果、割れ目を伝った石油の排出が促進されていることも認識される(Fig.

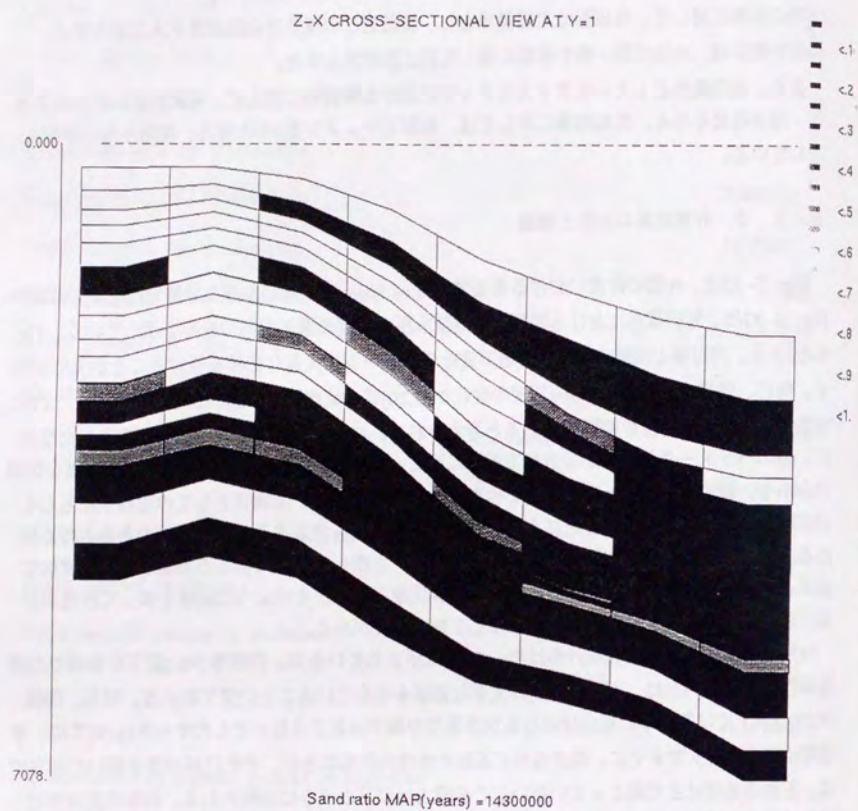


Fig. 5-32 Input lithology distribution (sand ratio map) of an imaginary sedimentary basin 14.3 m.y. after the initial deposition.

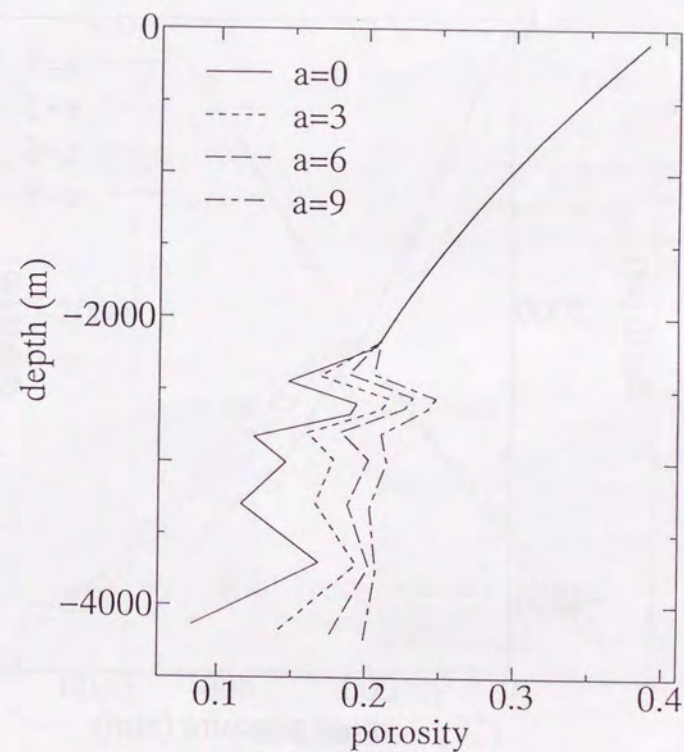


Fig. 5-33 Columnar displays of calculated results at the structural top 14.3 m.y. after the initial deposition.

(a) Calculated porosity distribution.

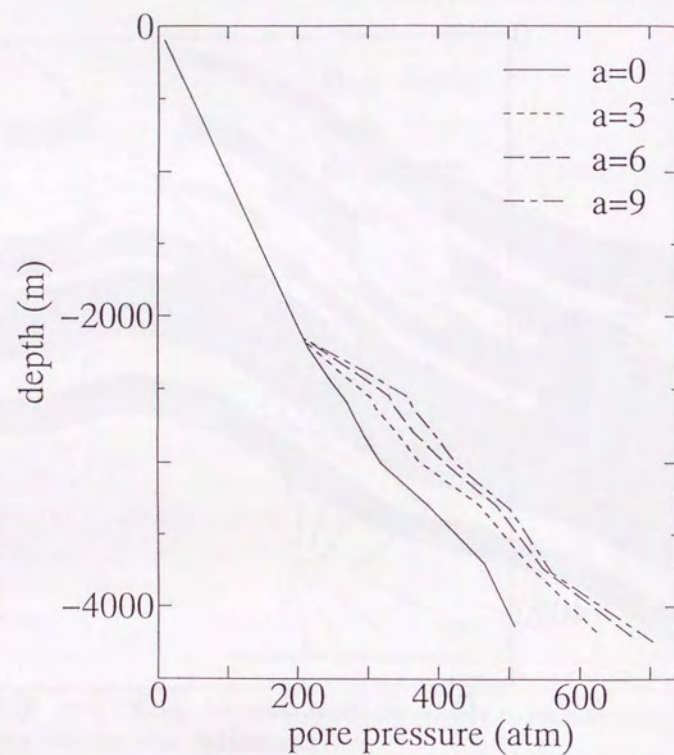


Fig. 5-33 Continued.

(b) Calculated pore pressure distribution.

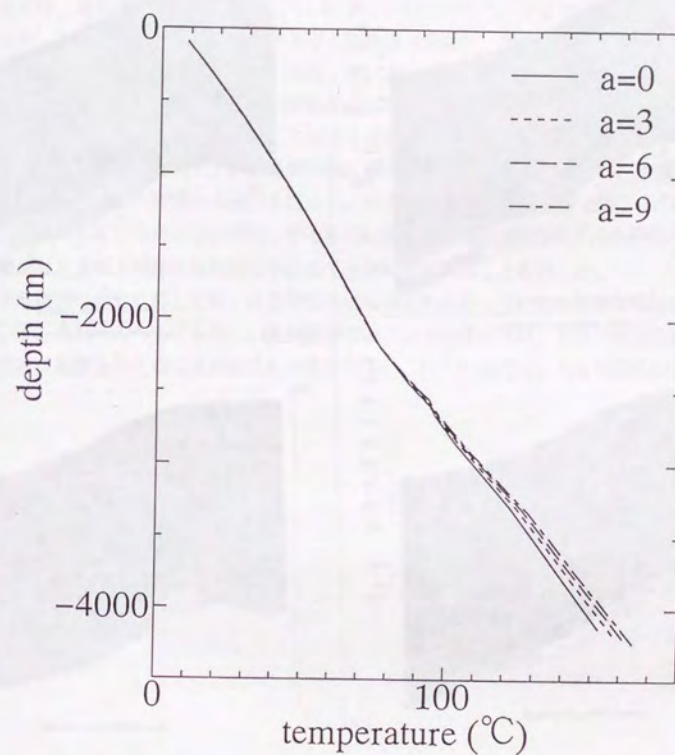


Fig. 5-33 Continued.

(c) Calculated temperature distribution.

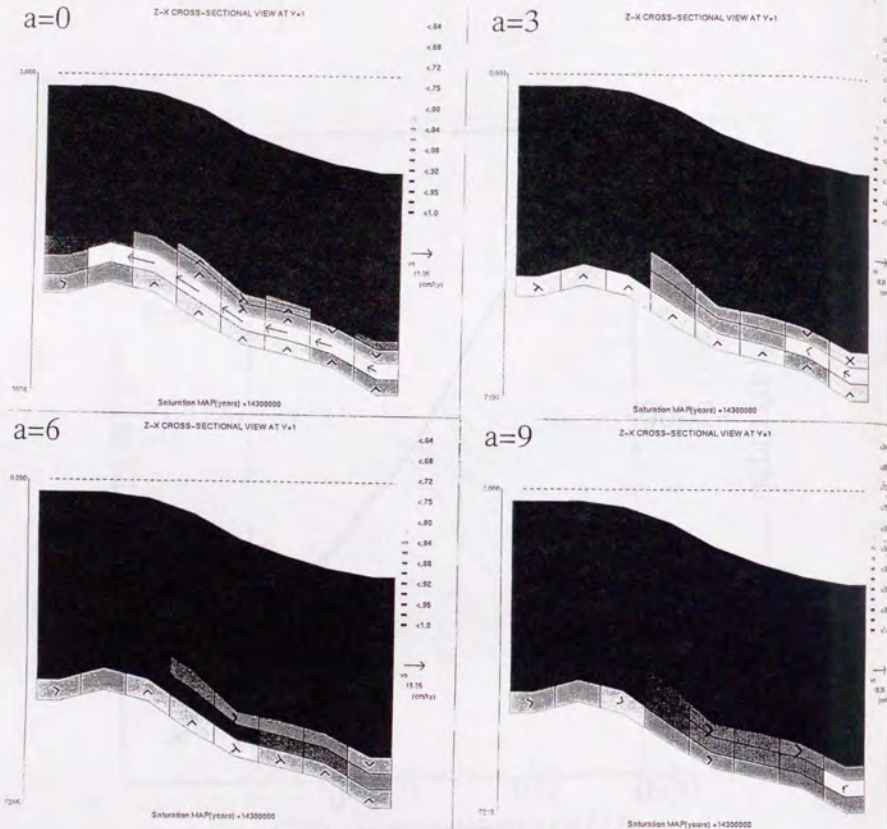


Fig. 5-34 Calculated results of water saturation distribution in the basin 14.3 m.y. after the initial deposition.

5-35)。このように、浸透率と間隙率の関係を表す(5.20)式の間隙率が小さい領域の定数は、石油の移動に大きな影響を与えることが示されており、注意深く決定する必要がある。

5. 7. 本章のまとめ

本章では、堆積盆シミュレータにもちいる多くの物性のうち、今まで包括的な研究がなされていなかった泥質堆積物・泥質岩の浸透率と間隙率の関係を、泥質スラリーおよび泥質岩を初期試料とした室内実験から求めることを行った。さらに、その結果と、今までに公表されている実験結果との比較を行い、今回の実験の結果得られた関係の有効性を確認した。そのうえで、今回の実験では明らかにすることができなかった間隙率が十分に小さくなった領域での間隙率と浸透率の関係について、数値解析的に求めることの可能性について、二次元断面モデルを用いたいくつかの計算から検討を行った。その結果、実際の自然界で起こっている現象をそのまま表現しているかどうかは明らかではないが、BASIN3D2Pのモデルの枠組みの中で、最も適切な浸透率と間隙率の関係を求めることが可能であることを示した。

泥質堆積物の物性に関しては、浸透率以外にも明らかになっていない重要な物性がまだ残されている。それらのうちでも特に、相対浸透率および毛細管圧力は、石油の根源岩からの排出に決定的な影響を与えることが容易に想像される。これらの検討は、今後の重要な課題であろう。

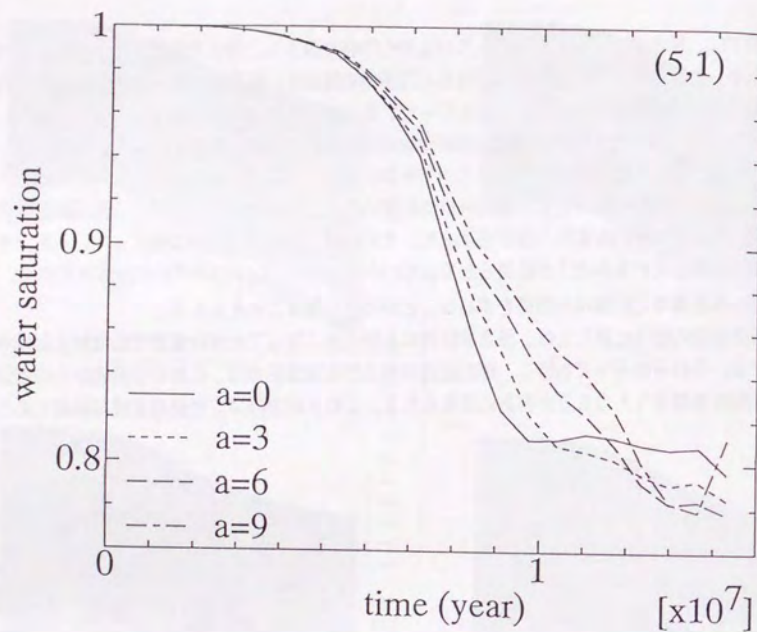


Fig. 5-35 Examples of the history of water saturation in the grids.

(a) Water saturation history of grid (5,1) (source horizon).

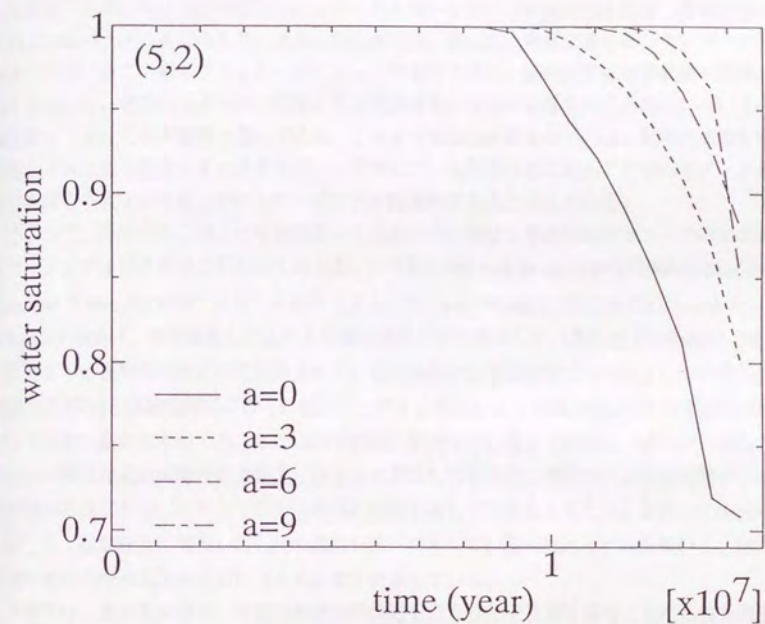


Fig. 5-35 Continued.

(b) Water saturation history of grid (5,2) (carrier horizon).

6 堆積盆シミュレータにおける物性の感度解析

6.1 はじめに

本研究で開発したような堆積盆シミュレータを用いる場合、その計算結果は、数値計算に用いられているパラメータの与え方に大きく左右される。従って、非常に多くのパラメータを入力値として用いるこの種のシミュレータによって堆積盆発達史、炭化水素鉱床形成史の再現を試みる場合には、どのパラメータが対象とする地質現象に大きな影響を与えるのかについての知識を持っておくことが重要となってくる。このような知識を得るためには、比較的単純な設定のもとで入力値を変化させた計算を行い、考慮している地質現象に対してどのパラメータが大きな影響を与えるかを明らかにしていくことが効果的であると考えられる。

ところで、今までにこのような堆積盆シミュレータにおける基礎的なパラメータのセンシティブィスタディはそれほど行われておらず、わずかにShi and Wang(1986)やNakayama(1987)、Luo and Vasseur(1992)に見られるのみである。Shi and Wang(1986)およびLuo and Vasseur(1992)は、今回開発したものと同様の地質現象を考慮した一次元モデルを用い、堆積盆内に発生する過剰間隙水圧の原因とされている堆積物の急激な堆積にともなう圧密の遅れ(流体の排出の遅れ)と堆積盆深部に行くに従って上昇する温度によって引き起こされる間隙水の膨張のどちらが本質的なものであるかについての検討を行っている。その結果、彼らは、共に、間隙水の膨張は過剰間隙水圧の発生にほとんど貢献しておらず、堆積盆内の過剰間隙水圧は、堆積物の急激な堆積にともなう圧密の遅れに起因するものであると考えた。また、Nakayama(1987)は、彼が独自に考案した石油の排出を陽的に考えている一次元モデルを用いて、初期有機物量や地温勾配の石油の排出に与える影響を評価している。

本章では、油田形成過程、堆積盆発達史の検討を行ううえで重要であると考えられる過剰間隙水圧の発生および石油の根源岩からの排出過程に着目し、BASIN3D2Pを用いてパラメータセンシティブィスタディを行った。

6.2 計算の設定

今回の計算において変化させたパラメータは、1)堆積速度、2)泥質岩におけるAthy(1930)の定数、3)初期間隙率、4)初期浸透率、5)浸透率-間隙率の関係式(5.20)式の定数、6)(5.20)式の間隙率が0.3以下の場合の定数(5.6節参照)、7)イライト/スメクタイト混合層鉱物の量、8)初期有機炭素量、9)基盤からの熱流量、の9つであり、また、熱膨張による影響を検討するために、熱膨張を考慮した場合と考慮しない場合の計算も行った。今回の感度解析のための計算は一次元モデルで行い、圧密過程はAthy(1930)の式で表現されるものとする。境界条件は、下方は流体に関しては閉境界、熱に関しては熱流量を入力することとし、上方は定温・定圧条件とす

る。初期条件は、各タイムステップにおける堆積物に関して、堆積深度での温度・静水圧を与える。また、各タイムステップ毎に125mの厚さの堆積物を堆積させており、2ステップ目にキャリアー層として中粒砂岩を堆積させる以外は、泥質堆積物を連続的に堆積させている(Fig. 6-1)。いくつかの固定した計算の設定内容はTable 6-1に示している。60ステップにわたる計算が終わった段階で、各計算と基準とする計算における計算結果との比較を行った。基準とする計算における各々のパラメータの値および今回の計算で変化させた各パラメータの幅は、Table 6-2に示されている。また、排出された石油の量の比較においては、下から2層目の中粒砂岩に排出された石油の体積(V_o)を、

$$V_o = (1 - S_w) \phi \cdot V \quad (6.1)$$

で求めている。ここに、 S_w :下から2層目の地層の水飽和率、 ϕ :下から2層目の地層の間隙率、 V :下から2層目の地層の体積、である。ここで、Table 6-1に示してあるように、今回考慮したケロジェンはタイプIIケロジェンであり、そのカイネティックパラメータはTissot and Welte(1984)に従うものとしている。

6. 3 物性の感度解析

今回行った数値計算による検討の結果は、Table 6-3に示されている。ここでは、特に、その中から過剰間隙水圧の発生、液状炭化水素の排出に対する感度に関して詳細に議論を行う。

6. 3. 1 過剰間隙水圧の発生

Fig. 6-2、Fig. 6-3に今回行った計算結果を示す。Fig. 6-2では、横軸に計算時に与えたパラメータの値と基準として用いた値との比を取り、縦軸には基準値を用いて計算した場合と、パラメータを振った場合の最下層の過剰間隙水圧の大きさの比をとっている。即ち、この図において、正負どちらの場合も、傾きが急なものほどパラメータがセンシティブであることを示している。また、間隙水の膨張に関しては、考慮するか考慮しないかという点の比較であるために、比較の図は、他のものとは別に表現している。これらの図から明らかなように、単相流を考えた場合、過剰間隙水圧の発生にセンシティブなパラメータは、初期間隙率、Athy(1930)の定数、および浸透率-間隙率の関係式の定数、の3つであることがわかる。

ところで、初期間隙率が同じでAthy(1930)の定数を変化させた場合と、Athy(1930)の定数が変化せず、初期間隙率を変化させた場合の図(Fig. 6-4、Fig. 6-5)を見ると、Athy(1930)の定数は、その値が大きくなるにつれて、間隙率の減少が早く起こるようになることが示されており、また、初期間隙率が大きくなると、間隙率の減少が遅くなる傾向が見られる。実際の堆積盆をモデル化する場合を考えると、坑井で得られたデータをフィッティングする場合、我々は、初

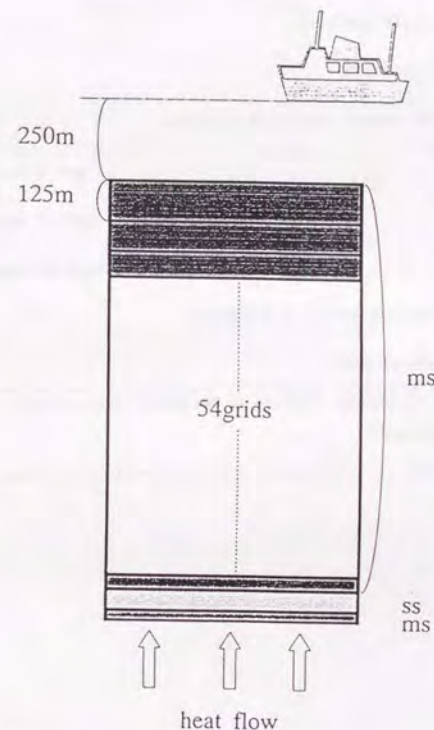


Fig. 6-1 Illustration of the sediment profile assumed in this computation. Abbreviations are ms: mudstone, and ss: sandstone.

Table 6-1 Input values for this calculation.

Number of time steps	60
Number of grid for X direction	1
Number of grid for Y direction	1
Width of grid for X direction	1000.0(m)
Width of grid for Y direction	1000.0(m)
Initial porosity for sandstone	0.4
Grain size of sandstone	medium
Composition of organic matter in mudstone	
type I kerogen	0.0(%) [*]
type II kerogen	100.0(%) [*]
type III kerogen	0.0(%) [*]
Amount of heat generation in sediments	0 ^{**}
Tensile strength of rock	0.0(kgf/cm ²)

^{*} Composition of organic matters in mudstone is assumed to be constant for all grids containing mudstone.

^{**} Heat generation in sediments is not considered for all time steps.

Table 6-2 Varieties of parameters used in this study with their minimum, standard, and maximum values.

parameters	minimum value	standard value	maximum value
depositional rate	250m/m.y.	500m/m.y.	1000m/m.y.
Athy's constant	$3 \times 10^{-4}/\text{m}$	$6 \times 10^{-4}/\text{m}$	$8 \times 10^{-4}/\text{m}$
initial porosity	0.65	0.7	0.8
initial permeability	0.02md	0.1md	1md
constant of ϕ -k	6	9	11.5
constant of ϕ -k at $\phi < 0.3$	0	9	-----
illite/smectite minerals content	0wt%	50wt%	90wt%
initial total organic carbon	1wt%	5wt%	10wt%
heat flow from basement	1hfu	1.5hfu	2hfu

Table 6-3 Qualitative display of sensitivities obtained from this study. Symbols are, +: increase of the calculated amount with the increase of the parameter, -: decrease of the amount with the increase of the parameter, L: little or no change of the amount with the change of the parameter, and N.C.: not conducted. Number of symbols indicates the intensity of sensitivity.

parameters	amount expelled	transformation ratio	depth of burial	temperature	degree of overpressure
depositional rate	-	L	L	L	L
Athy's constant	---	---	---	---	+
initial porosity	---	---	---	---	---
initial permeability	-	-	-	-	-
constant of ϕ -K	--, ++	++	++	++	+++
constant of ϕ -K at $\phi < 0.3$	-	L	L	L	L
illite/smectite minerals content	L	L	L	L	L
initial total organic carbon	+++	L	L	L	L
heat flow from basement	+++	+++	L	+++	L
aquathermal expansion	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	L

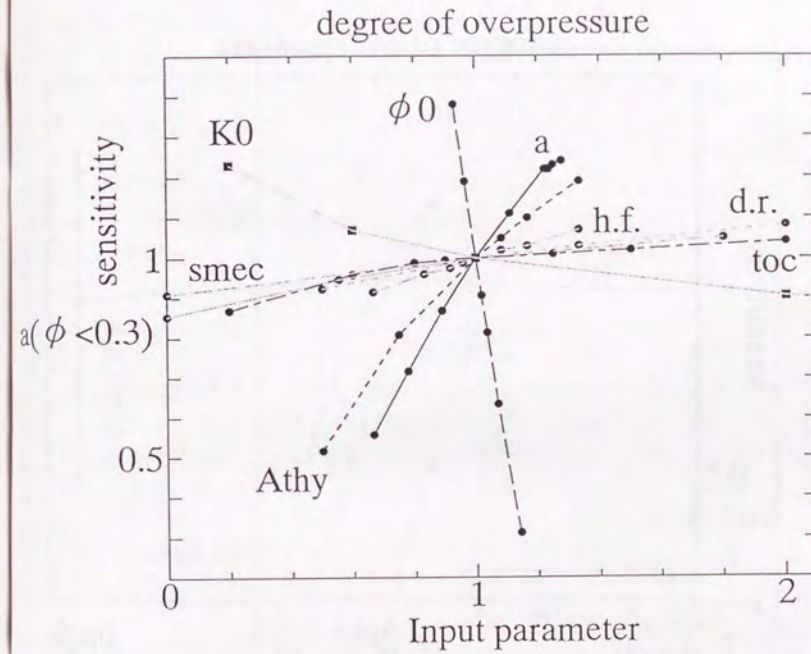


Fig. 6-2 Result from sensitivity analysis on degree of overpressure at the lowest horizon. Abbreviations are, a: constant of equation (5.20), $a(\phi < 0.3)$: constant of equation (5.20) at $\phi < 0.3$ (see section 5.6), Athy: Athy's constant for mudstone, d.r.: depositional rate, h.f.: heat flow from basement, K0: initial permeability of mudstone, smec: illite/smectite minerals constant, toc: initial total organic carbon, and $\phi 0$: initial porosity of mudstone.

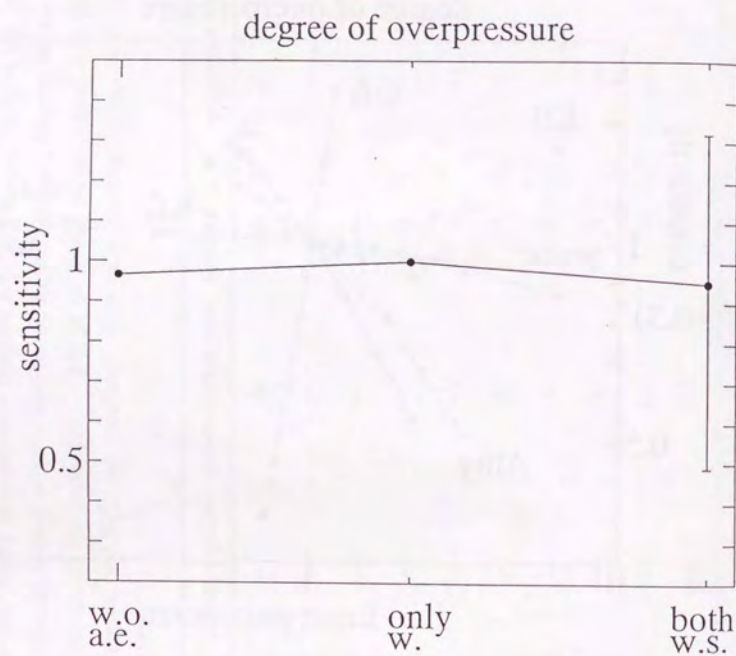


Fig. 6-3 Result from sensitivity analysis on degree of overpressure at the lowest horizon. Abbreviations are, w.o.a.e.: without thermal expansion, only w.: only aquathermal expansion is considered, and both w.s.: thermal expansion of water, solids, and porous media are considered.

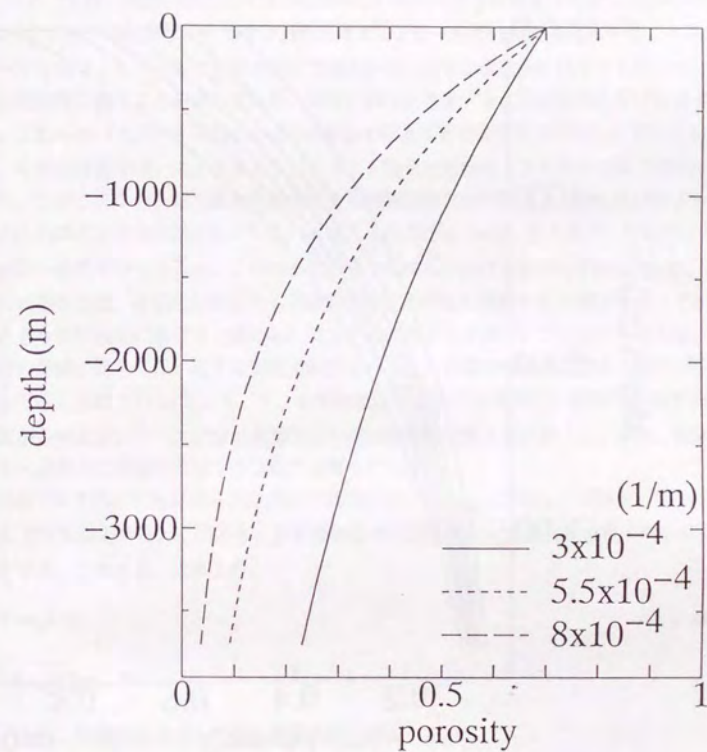


Fig. 6-4 Relationships between porosity and depth of burial for mudstones. Initial porosity is assumed to be 0.7.

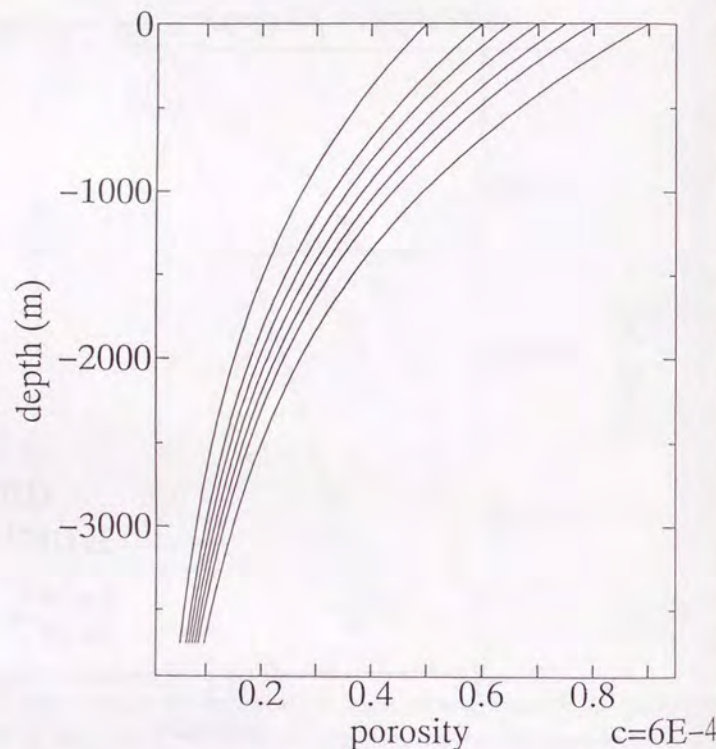


Fig. 6-5 Relationships between porosity and depth of burial for mudstones. Athy's constant is assumed to be $6.0 \times 10^{-4}/\text{m}$.

間隙率とAthy(1930)の定数を変化させることによって最適値を得ることを試みることになる。即ち、初期間隙率を大きくした結果間隙率の減少が遅れるようになった場合には、Athy(1930)の定数を大きくすることによって間隙率の減少を早め、逆に、Athy(1930)の定数を大きくしたことによって間隙率の減少が早まった場合には、初期間隙率を大きくすることによって間隙率-埋没深度曲線を全体的に間隙率の大きくなる方向に移動させるわけである。ところで、これら2つのパラメータは、過剰間隙水圧の発生にはお互いに相反する影響を与えることがわかる。この2つのパラメータは独立に変化させるわけではなく、各々を逆方向に変化させることによって坑井データとのフィッティングさせるわけであるから、影響が逆に現われてくるということは、これらは相補的に働くことを示しており、両者を同時に考慮することを念頭においた場合、実際には、これらのパラメータはFig. 6-2で示されているほどの影響を持たないと考えられる。

また、今回の計算では、スメクタイト/イライト混合層鉱物のイライトへの変化はほぼ完了しており、このことから、粘土鉱物の脱水による過剰間隙水圧の発生も上述したパラメータに比べるとそれほど大きな貢献をしていないと考えられる(Fig. 6-6)。ところで、ケロジェンの液状炭化水素への変化率を見ると、これはまだ全体の30%しか変化しておらず(Fig. 6-7)、より埋没が進んだ場合には、今回の結果よりも過剰間隙水圧の発生に貢献する可能性を持っているが、少なくとも今回の設定における計算においてはそれほどセンシティブではないと言える。

熱膨張の影響に関しては、以下の方法で検討を行った。間隙水の容積係数は、温度・圧力の関数として与えられている(3. 4. 1. 1節参照)が、間隙水の熱膨張の影響を評価するために、熱膨張を考えないケースでは、容積係数を圧力のみの関数として扱った。また、固体粒子および多孔質媒体の熱膨張は以下の方法で見積っている。

かさ体積が V である多孔質媒体が温度 dT の増加によって V_{ncw} に変化し、固体粒子部分は V_s から V_{snw} に変化したとする。このとき、多孔質媒体の熱膨張率を α_v とし、固体粒子部分の熱膨張率を α_s とする。この場合、定義より、

$$V_{\text{ncw}} - V = \alpha_v V dT \quad (6.2)$$

$$V_{\text{snw}} - V_s = \alpha_s V_s dT \quad (6.3)$$

となる。また、熱膨張を考慮した後の間隙率(ϕ_{ncw})は、

$$\phi_{\text{ncw}} = \frac{V_{\text{ncw}} - V_{\text{snw}}}{V_{\text{ncw}}} = 1 - \frac{V_{\text{snw}}}{V_{\text{ncw}}} \quad (6.4)$$

となる。さらに、間隙率の定義より、熱膨張を考慮する前の間隙率(ϕ)は、

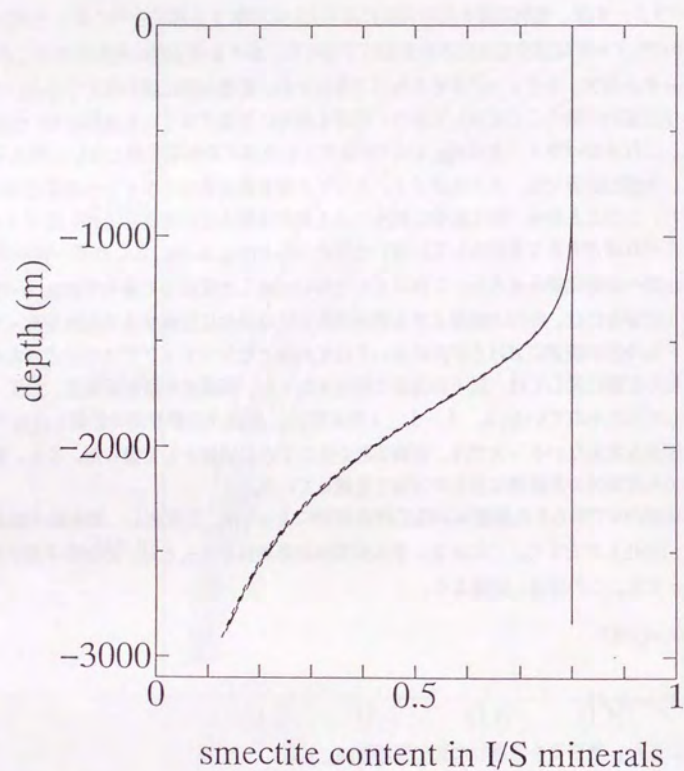


Fig. 6-6 Calculated result of smectite content in illite/smectite minerals.

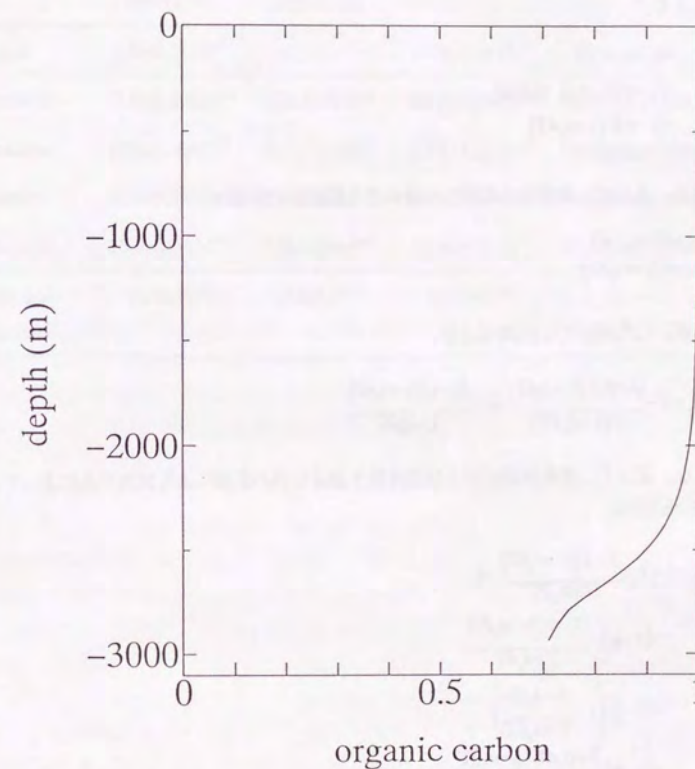


Fig. 6-7 Calculated result of untransformed organic carbon ratio.

$$\phi = \frac{V - V_s}{V} \quad (6.5)$$

となる。これらの式より、多孔質媒体の熱膨張による体積変化に伴う間隙率の変化は、以下の式展開によって求められる。即ち、熱膨張を考慮した後の固体粒子の体積は、(6.3)式および(6.5)式より、

$$\begin{aligned} V_{s\text{new}} &= V_s + \alpha_s V_s dT \\ &= (1-\phi)V + \alpha_s (1-\phi)V dT \\ &= (1-\phi)V(1 + \alpha_s dT) \end{aligned}$$

となる。さらに、熱膨張を考慮した後の多孔質媒体の体積は、

$$\begin{aligned} V_{\text{new}} &= V + \alpha_b V dT \\ &= V(1 + \alpha_b dT) \end{aligned} \quad (6.7)$$

となる。したがって、(6.4)式より、

$$\phi_{\text{new}} = 1 - \frac{(1-\phi)V(1 + \alpha_s dT)}{V(1 + \alpha_b dT)} = 1 - \frac{(1-\phi)(1 + \alpha_s dT)}{1 + \alpha_b dT} \quad (6.8)$$

となる。よって、多孔質媒体および固体粒子部分の熱の影響による体積変化によっておこる間隙率の変化は、

$$\begin{aligned} \phi_{\text{new}} - \phi &= 1 - \frac{(1-\phi)(1 + \alpha_s dT)}{1 + \alpha_b dT} - \phi \\ &= (1-\phi) - \frac{(1-\phi)(1 + \alpha_s dT)}{1 + \alpha_b dT} \\ &= (1-\phi) \left(1 - \frac{1 + \alpha_s dT}{1 + \alpha_b dT} \right) \\ &= (1-\phi) \frac{1 + \alpha_b dT - 1 - \alpha_s dT}{1 + \alpha_b dT} \\ &= (1-\phi) \frac{(\alpha_b - \alpha_s) dT}{1 + \alpha_b dT} \end{aligned} \quad (6.9)$$

となる。ここで、Skinner(1966)による多孔質媒体(岩石)の線膨張率(β)のデータ(Table 6-4)を用いることを考える。多孔質媒体を等方体であると仮定すると、 α と β の関係は、以下のようになる。定義より、

Table 6-4 Coefficient of thermal expansion of rocks and minerals. Symbols are, \perp : vertical, and \parallel : parallel.

minerals/rocks	linear thermal expansion coefficient \perp layer(1/K)	linear thermal expansion coefficient \parallel layer(1/K)	volume expansion coefficient(1/K)	reference
slate	$9.0 \pm 0.1 \times 10^{-6}$	-----	$27.0 \pm 0.3 \times 10^{-6}$	Skinner(1966)
muscovite	$17.8 \pm 0.59 \times 10^{-6}$	$3.5 \pm 1.3 \times 10^{-6}$	$24.8 \pm 3.19 \times 10^{-6}$	McKinstry(1965)
kaolinite	$18.6 \pm 1.4 \times 10^{-6}$	$5.2 \pm 1.7 \times 10^{-6}$	$29.0 \pm 4.8 \times 10^{-6}$	McKinstry(1965)
dickite	$14.9 \pm 0.84 \times 10^{-6}$	$5.9 \pm 0.4 \times 10^{-6}$	$26.7 \pm 1.64 \times 10^{-6}$	McKinstry(1965)
halloysite	$10.0 \pm 1.5 \times 10^{-6}$	$6.0 \pm 2.0 \times 10^{-6}$	$22.0 \pm 5.5 \times 10^{-6}$	McKinstry(1965)
mean clay minerals	15.8×10^{-6}	5.2×10^{-6}	26.2×10^{-6}	-----

$$\alpha = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT} \quad \beta = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dT} \quad (6.10)$$

である。ここで、温度 dT の変化によって、体積が dV 変化し、また、長さが dL 変化したとすると、

$$\begin{aligned} dV &= (L_0 + dL)^3 - L_0^3 \\ &= 3L_0^2 dL + 3L_0 (dL)^2 + (dL)^3 \\ &\approx 3L_0^2 dL \end{aligned} \quad (6.11)$$

という関係が成り立ち、したがって、(6.10)式より、

$$\alpha = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT} = \frac{1}{L_0^3} \frac{3L_0^2 dL}{dT} = 3 \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dT} = 3\beta \quad (6.12)$$

となる。よって、多孔質媒体の熱膨張率は、Table 6-4で示されるようになる。次に、固体粒子部分の熱膨張について検討する。ここでは、最下層の部分を考えていることから、泥質岩の熱膨張率を考慮する。McKinstry(1965)によると、粘土鉱物の線膨張率は、Table 6-4の様な値を取ることが示されている。これらのデータから、多孔質媒体に対して行ったのと同様の考察をすると、粘土鉱物が線膨張率に対して直交異方性をもつと仮定すると、

$$\alpha = 2\beta_p + \beta_v \quad (6.13)$$

と表される(Table 6-4)。ここに、 β_p :粘土鉱物の層方向への線膨張率、 β_v :粘土鉱物の層方向に直交する方向への線膨張率、である。これらのデータを用い、(6.9)式で求められる間隙率の変化が起こったとき、間隙水圧がどれだけ変化するかを考える。ここで、水の圧縮率を η とすると、定義より、

$$\eta = -\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dP} \quad (6.14)$$

であるから、圧力変化は、

$$dP = -\frac{1}{V\eta} (\phi_{new} - \phi) \quad (6.15)$$

で求められる。ここで、固体粒子の熱膨張を考慮する場合として、地層水のみを熱膨張を考慮した圧力に(6.15)式で示される圧力変化を加えた結果がFig. 6-3である。ここに、エラーバーはTable 6-4に示された値の幅を用いている。この図からわかるように、熱膨張率に関するデータ

の幅が非常に大きいために、感度を考察することが困難ではあるが、平均的な膨張率を取った場合には、熱膨張を考慮した場合も考慮しない場合もほとんど過剰間隙水圧の値は変化しない。これは、Shi and Wang(1986)やLuo and Vasseur(1992)の結果と調和的であり、少なくとも間隙水および固体粒子の熱膨張によっては過剰間隙水圧の大きさはそれほど変化しないことになる。

以上のことより、堆積盆内の過剰間隙水圧は、堆積物の堆積にともなう間隙水の脱水の遅れが主たる要因となるが、それを決定づけているのは、泥質岩の浸透率の圧密にともなう減少の早さであり、これを何らかの方法で適切に推定してやることが堆積盆数値シミュレーションにおいては重要になってくる。浸透率の圧密に伴う減少を表現するパラメータの推定の方法については、すでに5章に示された結果が実験的に得られている。

6. 3. 2 液状炭化水素の排出(石油の一次移動)

60ステップにわたる計算の結果下から2層目のキャリアー層に排出された石油の体積を、基準とした計算において排出された体積と比較した図がFig. 6-8である。ここでは、6. 3. 1節で行ったのと同様の表示をしている。即ち、この図において、正負どちらの場合も、傾きが急なもののパラメータがセンシティブであることを示している。この図から、石油の排出量には、堆積速度、初期浸透率、イライト/ス멕タイト混合層鉱物の量、はそれほど大きな影響を与えないが、それ以外のパラメータは比較的大きな影響を与えることがわかる。以下に、センシティブであるパラメータについて個々に検討する。

熱流量、初期間隙率、泥質岩におけるAthy(1930)の定数は、有機物の石油への変化の割合に対して影響が大きくなっている。Fig. 6-9は、最下層の泥質岩中での有機物の石油への変化の割合について同様の整理をしたものである。ここでは、熱流量は、その値が大きくなると有機物の石油への変化も大きくなる傾向を示し、また、初期間隙率、泥質岩におけるAthy(1930)の定数はそれとは逆の傾向を示している。これは、石油の排出量に関する関係(Fig. 6-8)と同様である。即ち、これらの3つのパラメータは、根源岩中での石油の生成量に影響を与えるパラメータであることがわかる。その結果、多くの石油が生成されるような設定になっている場合には、根源岩内での石油飽和率が大きくなりやすく、石油の排出が始まる飽和率に達しやすいうえに、その後生成された石油は容易にキャリアー層に排出されることになる。ここで、熱流量が大きい場合は、考慮している系に対する熱の入力が多くなるために、系全体の温度は当然上がることになる。ところで、Athy(1930)の定数は、その値を変化させるとFig. 6-4に示されるように圧密平衡状態での間隙率-深度曲線が変化する。即ち、Athy(1930)の定数が小さくなると、間隙率の減少がそれほど進まないことになり、同じ量の堆積物が堆積した場合には、地層の埋没深度はより深くなる(Fig. 6-10)。今回の計算の設定においては、海底面温度を一定にし、また、基盤岩からの熱流量の入力を一定量にしている(Fig. 6-1)のために、より深くまで埋没した地層ほどその温度は上昇することになる。そのために、Athy(1930)の定数が小さい場合には温度がよ

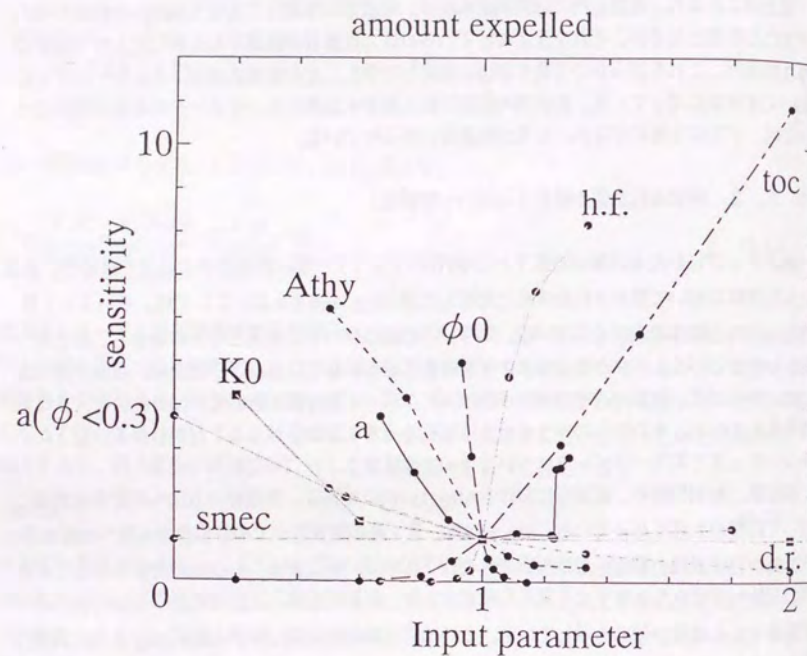


Fig. 6-8 Result from sensitivity analysis on quantities of liquid oil expelled into the carrier horizon. Abbreviations are the same as those in Fig. 6-2.

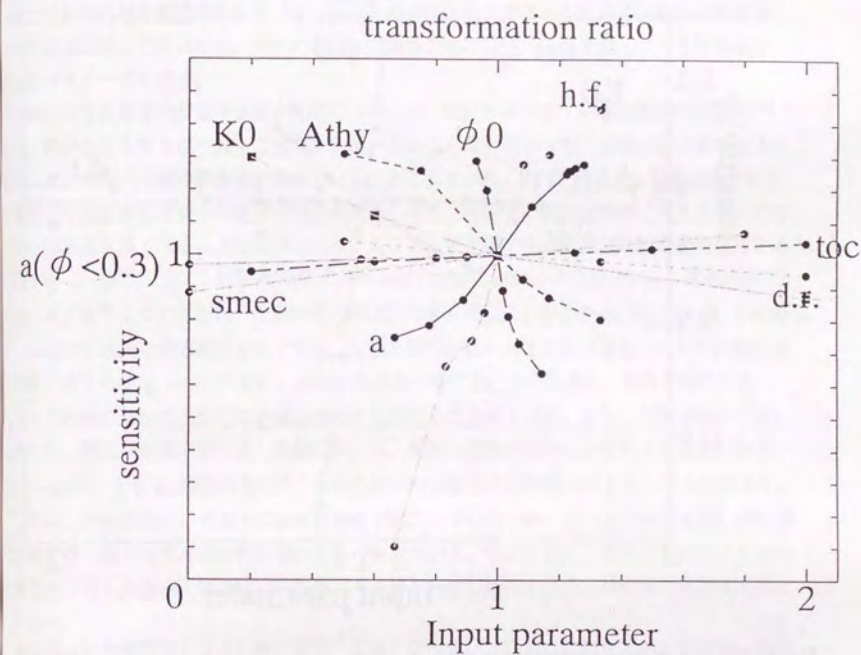


Fig. 6-9 Result from sensitivity analysis on transformation ratio of organic material into liquid oil at the lowest horizon. Abbreviations are the same as those in Fig. 6-2.

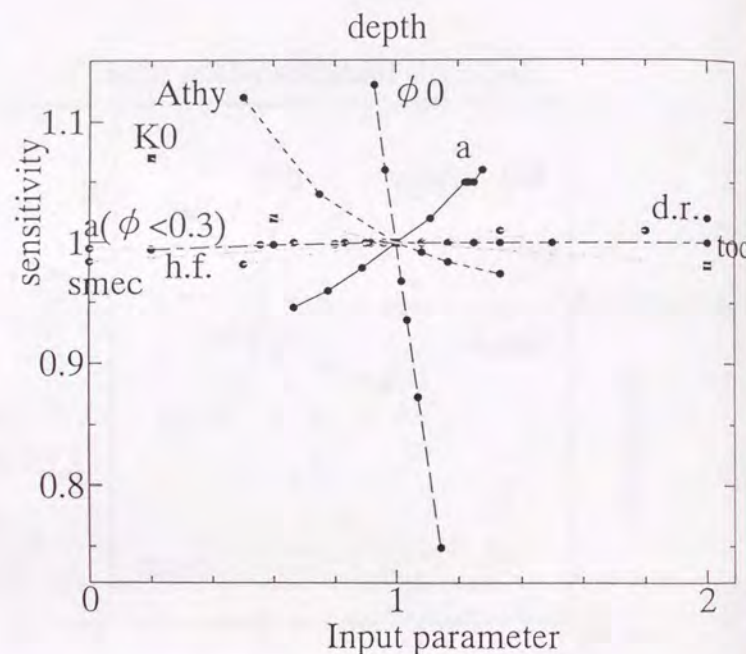


Fig. 6-10 Result from sensitivity analysis on depth of burial of the lowest horizon. Abbreviations are the same as those in Fig. 6-2.

り上昇し、石油の生成量が増えることになる。初期間隙率に関しても同様であり、同じ厚さの堆積物を堆積させた場合、初期間隙率が小さいほど固体粒子部分の量が多くなるために、最終的な埋没深度は深くなっていく(Fig. 6-10)。このために、石油の生成量が増えることになる。これらのことは、最下層における地層温度に関する整理の結果(Fig. 6-11)からも理解される。

有機炭素量は、最下層における有機炭素の石油への変化の割合に関しても、また、地層温度に関してもそれほど影響を与えないが、有機炭素の絶対量が増えるために、石油の生成量もそれにほぼ比例して変化する。そのために、有機炭素量は石油の排出に関して大きな影響を与えるパラメータとなる。

圧密に伴う泥質岩の浸透率を表す定数については、Fig. 6-8では、定数の値が比較的小さい場合、値が小さくなるにつれて石油の排出量が増加する傾向を示すが、定数がある値を越えた場合には、急激に石油の排出量が増えている。ところで、Fig. 6-9を見ると、定数の値が大きくなると有機炭素の石油への変化の割合も大きくなり、今までの議論と同様に考える場合には、石油の排出量も多くなることが期待される。ここで、最下層での過剰間隙水圧の発生に対する影響(Fig. 6-2)(6. 3. 1節参照)を考えてみると、定数の値が小さい場合には、過剰間隙水圧はほとんど発生しないために、圧密の進行が比較的早く進むことがわかる(Fig. 6-12)。その場合は、石油の生成量がある程度少なくても、石油の排出が行われるのに必要なだけの飽和率に早い時期に達する(Fig. 6-13)ために、石油の排出量が増える。そのために、定数の値が小さくなるほど石油の排出量が多くなる傾向を示すと考えることができる。また、定数の値が大きい場合には、浸透率の減少は非常に急激に起こり、大きな過剰間隙水圧が発生することになる。Fig. 6-14は、下から3層目の泥質岩における縦方向の浸透率の時間変化を示したものである。ここでは、定数の値が11の場合には水圧破砕が起こっていないが、11.125の場合には、水圧破砕が起こり、縦方向の浸透率が非常に大きくなっている。そのために、割れ目を伝った石油の排出が下方に向かって効率的に行われ、キャリアー層に排出される石油の量は増加することになる。

今回行った数値計算による検討の結果、石油の排出量には、初期有機炭素量、熱流量、初期間隙率、泥質岩におけるAthy(1930)の定数、圧密に伴う浸透率の減少を表す定数、の5つがセンシティブであることが示された。

これらのパラメータのなかで、初期間隙率、泥質岩におけるAthy(1930)の定数は、坑井データを用いたバックストリッピングによって求められるものであり(3. 6. 2. 2節参照)、間隙率-深度曲線が精度良く得られれば、それらの値を得ることは比較的容易である。また、初期有機炭素量は、直接その値を求めることは困難であるが、地化学的検討によって適切な値を推定することが可能である(例えば、Tissot et al., 1987)。熱流量は、一般にその歴史を復元することは非常に困難であるが、例えばLerche(1990)に示されているようなビトリナイト反射率とのマッチング等によって適当な値を求めることになる。

ところで、圧密に伴う浸透率の減少を表す定数は、石油の排出量に関して大きな影響を与えるのみならず、その与え方によっては、水圧破砕現象のようなカストロフィックな現象を考

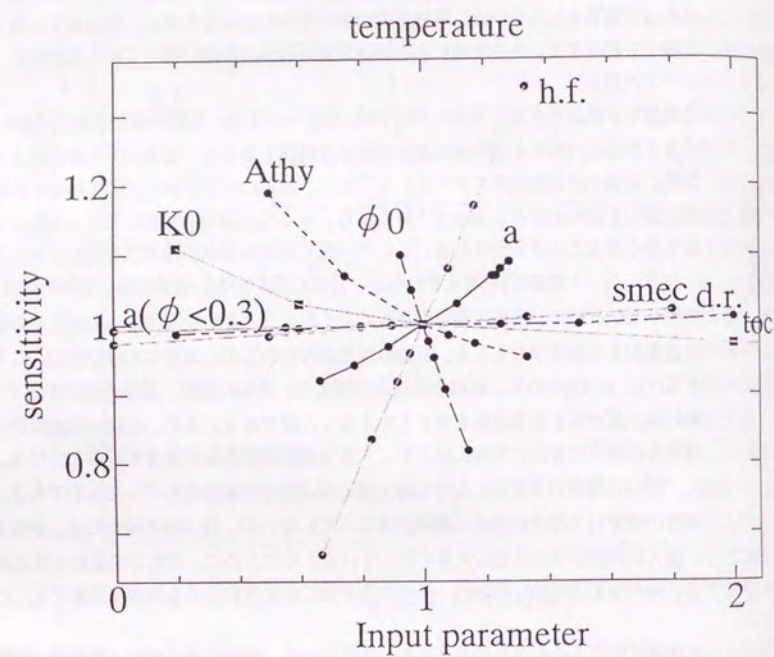


Fig. 6-11 Result from sensitivity analysis on temperature at the lowest horizon. Abbreviations are the same as those in Fig. 6-2.

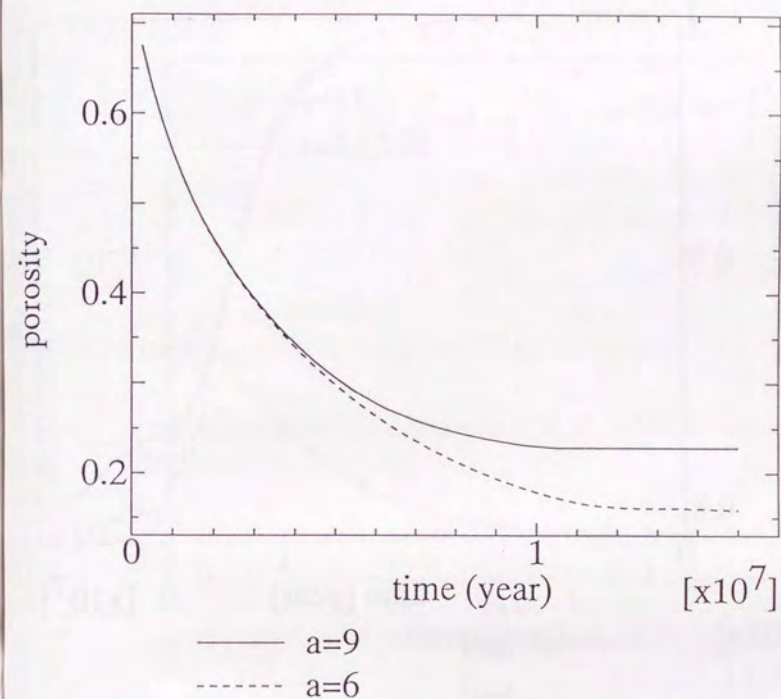


Fig. 6-12 Change of porosity as a function of time at the lowest horizon.

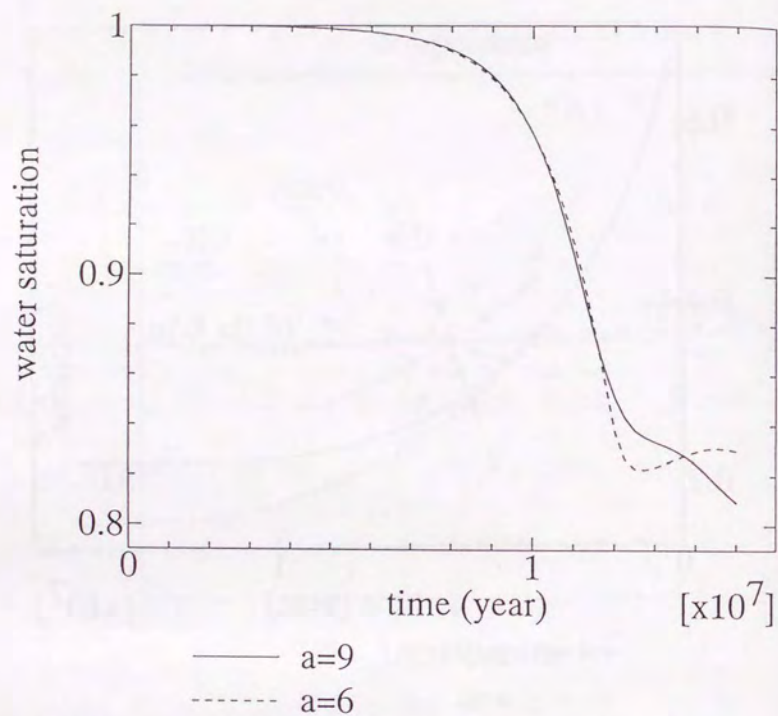


Fig. 6-13 Change of water saturation as a function of time at the lowest horizon.

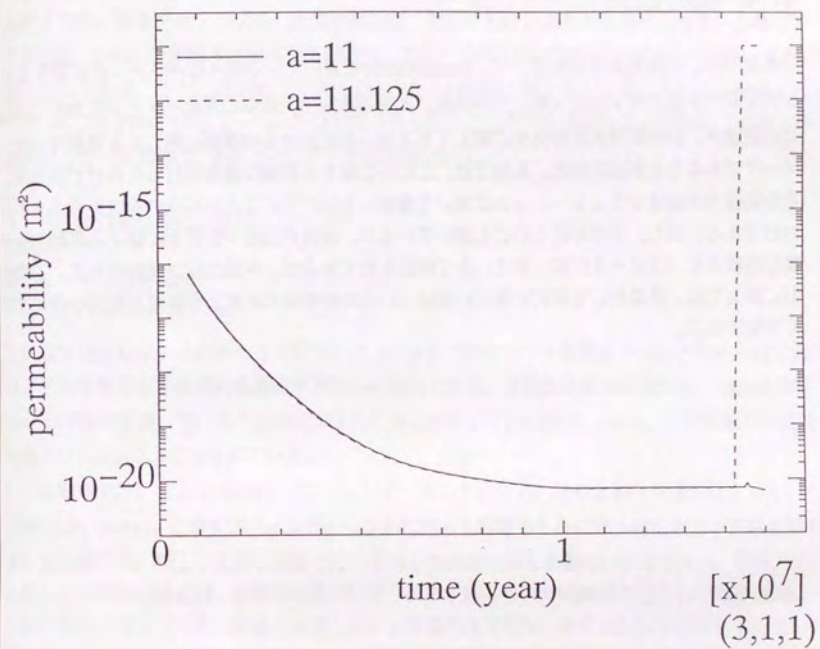


Fig. 6-14 Change of vertical permeability as a function of time at the third lowest horizon. Note that hydraulic fracturing occurred when constant 'a' was set at 11.125 while little permeability increase was recognized when constant 'a' was set at 11.

慮することが必要となってくる。そのために、適切な値を設定することが重要になってくる。しかし、この値を直接的に求めるには非常に多くのコアサンプルの計測を行うことが必要になってくるが、それは技術的にも容易なものではない。そのために、今までデータの蓄積がほとんどなされてこなかったのが現状である。本研究では、この定数を求める方法について実験的に検討を行い、その妥当性の検討を行っている(5章参照)。

6. 4. 本章のまとめ

本章では、一次元モデルを用いて、BASIN3D2Pに用いている様々なパラメータに関するセシティビティスタディを行った。その結果、泥質堆積物の浸透率の変化パターンを決める(5.20)式の定数が、過剰間隙水圧の発生に関しても石油の根源岩からの排出に関しても重要なパラメータであることが示された。5章では、これらに関する詳細な議論を行ったわけであるが、その議論が堆積盆シミュレーションにおいて重要なものであることが本章の検討から示されたわけである。但し、5章のまとめにも書いているが、泥質堆積物・泥質岩に関する多相流体流動を表現するパラメータに関しては、全く検討されておらず、今後の検討課題である。この分野に関しては、世界的にも研究は非常に遅れているのが実体であり、今後鋭意検討を進めていく予定である。

7. 実堆積盆を用いた三次元堆積盆発達史の数値解析

7. 1. はじめに

今回開発された三次元堆積盆シミュレータBASIN3D2Pを用いて実堆積盆を対象とした三次元堆積盆発達史の数値解析を行った。対象とした堆積盆地は、新潟沖の日本海に位置しており、現在までに、阿賀沖油・ガス田、阿賀沖北油田、岩船沖油田が発見され開発されている地域である(Fig. 7-1)。この地域の基本的な構造は、北東-南西方向の軸を持つ緩やかな背斜・向斜の繰り返しであり、また、背斜軸の片側は変位の大きい断層で境されていることから、全体としてはいくつかのハーフグラベン状の堆積盆地と見ることができる(Fig. 7-2)(鈴木, 1989)。今回検討を行った地域は、Fig. 7-3に示された領域である。

7. 2. 新潟堆積盆地の概要

7. 2. 1 地質概要

新潟堆積盆地は、日本海の拡大にともなって形成されたリフト堆積盆地と考えられており、中期中新世以降急速に堆積物が堆積した地域である。堆積盆地の中心部では、7000mを超える堆積物が堆積していることが地震波探査からわかっている(鈴木, 1989)。この地域の模式的な層序はTable 7-1に示されている。

この地域では、18から20Maにリフティングイベントが生じ、堆積盆地の形成が始まっている(馬場ほか, 1994)。このリフティングイベントに伴って溶岩やそれに伴う凝灰岩類が基盤岩類を覆って堆積した。但し、今回の計算では、これらの火山岩類も基盤岩に含めている。数百万年に亘る火山活動の後には、基盤岩の冷却に伴う沈降が起こり、その結果形成された堆積盆地に半遠洋性泥質岩からなる七谷層が堆積した。七谷層の泥質岩は、有孔虫化石を多産する灰色シルト岩および硬質頁岩が主体である。この層準はほぼ新潟堆積盆地全域に分布している。その後、黒色泥岩で代表され、凝灰質砂岩を挟する寺泊層が堆積している。椎谷層が堆積するころになると、堆積盆地の分化が生じ、後背地の隆起が起こり、各所に大規模な海底扇状地が形成された。そこに乱泥流に伴う大量の粗粒堆積物が供給された。その結果、椎谷層は、タービダイト性の砂岩泥岩互層および暗灰色泥岩から形成されている。その後に堆積した西山層も砂岩泥岩互層からなる。西山層の砂岩泥岩互層中の砂岩層は、阿賀沖油・ガス田、阿賀沖北油田、岩船沖油田などの重要な貯留層となっている(天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992)。灰爪層は、西山層の上位にくる地層であるが、この地層は典型的な海退相を示し、灰色シルト岩を主とする地層である。この地域の堆積盆地に最終的に堆積した地層は、魚沼群であり、これも浅海から汽水成もしくは淡水成層に漸移する海退相の堆積物である。これらは、砂質シルトから礫層まで変化する上方粗粒化サイクルを示す。本地域では、一時的に堆積が行

われなかった地域はあるが、大規模な削剥は起こらなかったと考えられている(出光石油開発株式会社, 未公表資料)。

本地域での貯留層となる地層は、椎谷層および西山層の砂岩泥岩互層中の砂岩層である。これらの砂岩層は、主として背斜構造と層位封塞の組み合わせトラップであると考えられている(天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992)。また、七谷層の下位に分布している所謂「グリーンタフ層」も最近の探鉱対象となっている。但し、今回は、以下に説明するように、所謂「グリーンタフ層」に関するデータが得られていないので、七谷層以降の堆積物を対象とした検討を行っている。

7. 2. 2 入力データの作成

入力データの作成は、出光石油開発株式会社が所有している未公表データを主として使用した。さらに、いくつかの公表されているデータ(特に微化石年代)等も活用している。

7. 2. 2. 1 層序(層厚および地質年代、堆積深度)

堆積盆内の地層分布は、出光石油開発株式会社が所有している未公表データのうち、地震波探査における地層境界の等走時線図を用い、坑井での深度-走時時間の関係(Fig. 7-4)から地層境界の三次元的な深度分布を求めた。ここで用いた層序区分は、鈴木(1989)に基本的に従っているが、入手可能なデータとの関係からTable 7-2に示されるような区分を用いている。

各地層境界の絶対年代は、以下の方法で求めている。七谷層は、浮遊性有孔虫化石帯ではBlow(1969)のN.8帯からN.10帯に対比されており、また、石灰質ナノ化石帯ではOkada and Bukry(1980)のCN3からCN5a帯に対比されている(天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992)。これらのデータから、七谷層の基底をBlow(1969)のN.8帯およびOkada and Bukry(1980)のCN3帯中に存在すると考えると、その年代は、ほぼ16.0Maとなる(尾田, 1986)。寺泊層基底は、鈴木(1989)に従って12.6Maとしている。椎谷層基底は、放散虫 *Thecosphaera japonica* の出現に基づき6.0Maとしている(馬場ほか, 1994)。また、椎谷層中に見られる阿賀北タフの年代は、このタフが浮遊性有孔虫 *Globorotalia ikebei* の出現の少し以前であることと、*G. ikebei* の出現がほぼ3.8Maである(尾田, 1986)ことから4.0Maとしている。西山層基底は所謂No.3 *Globorotalia inflata* bedの基底としており、この年代は、3.5Maである(馬場ほか, 1994)。また、No.3 *G. inflata* bedの上限は、馬場ほか(1994)によって3.0Maに設定されている。さらに、No.2 *G. inflata* bedの基底は、佐藤ほか(1987)によって1.36Maよりもわずかに古く1.57Maよりも新しいことが示されているので、ここでは、1.4Maとした。*Globigerina pachyderma* が右巻種から左巻種へ変換する所謂マーカーA(渡辺, 1983)は、Maiya et al.(1976)により1.16Maとされている。灰爪層の基底は、出光石油開発株式会社所有の未公表データ

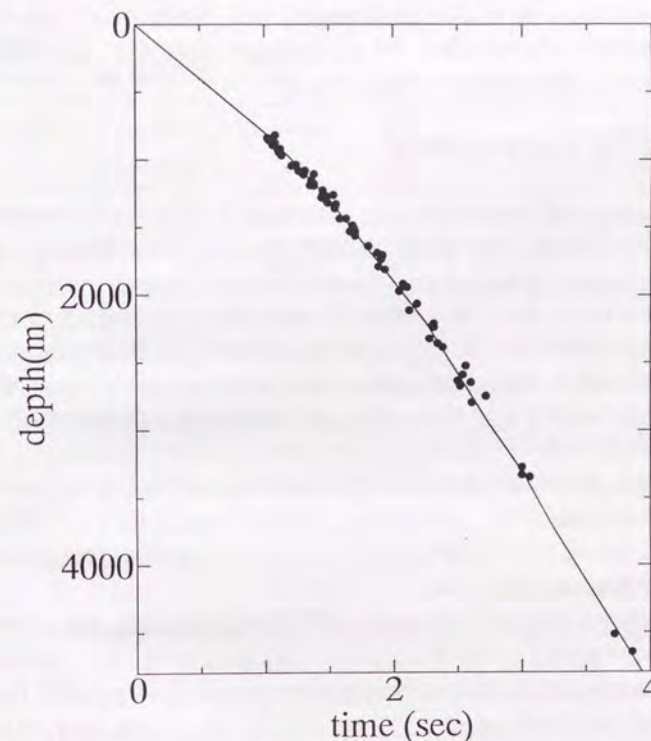


Fig. 7-4 Relationship between two-way travel time of P-wave and depth. Data after unpublished geological reports by Idemitsu Oil Development Co.

タでは、底生有孔虫化石群集の *Criboelphidium yabei* Zone と *Uvigerina subperegrina* Zone の境界とほぼ一致することが示されており、この年代は、新潟地域では 0.98Ma とされている(佐藤ほか, 1988)。また、魚沼層群の基底は、*C. yabei* Zone の上限とほぼ一致すると考えられており、その年代はほぼ 0.7Ma と推定されている(出光石油開発株式会社, 未公表資料)。

堆積深度は、各層準における底生有孔虫群集(出光石油開発株式会社, 未公表データ)を用い、さらに、長谷川ほか(1989)による生息深度の推定と、秋元・長谷川(1989)による各々の深度ゾーンの絶対深度のデータを用いて決定した。但し、魚沼層群の堆積深度は、現在の水深と同じであったと仮定し、現在の水深のデータを用いている。

7. 2. 2. 2 岩質分布および物性値

各地点における岩質分布(砂岩泥岩比)は、以下の方法によって求めている。七谷層、西山層中の Ny-Pc ユニットの(Table 7-2)、灰爪層、魚沼層群に関しては、出光石油開発株式会社所有の未公表の坑井データから、各層準における岩質分布の記載を用い、平均的な砂岩泥岩分布をすべての格子に与えている。即ち、これらの層準では、同様の地層が一樣に堆積したことになる。上記以外の層準に関しては、出光石油開発株式会社所有の古地図(未公表)に見られる海底扇状地の分布を用い、扇頂から扇端に向かって徐々に砂岩優勢の砂岩泥岩互層から泥岩優勢の砂岩泥岩互層へと変化するようにした。また、海底扇状地の末端よりも海側の地域は主として泥岩が堆積しているものとした。例として、Sy-Ik ユニットのモデル化の例を示すと、地層境界の等走時線と、海底扇状地の分布を重ねて描いたものが Fig. 7-5 であるが、これらのデータから、後述の格子分割に応じて、各格子点における深度と、砂泥比を Figs. 7-6、7-7 の様に与える。このような作業をすべての層準について行うことにより、層厚および岩質分布のデータを得ることができる(Figs. 7-8、7-9)。

物性値は以下の方法を用いて求めている。まず、流体物性に関しては、地層水の物性は BASIN3D2P で基準値として用いているものをそのまま利用している。また、液状炭化水素の物性は、阿賀沖北油田から産出する原油の比重が平均で 0.855 g/cm^3 (34°API) である(天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992)ので、この値を用い、3. 4. 1. 2 節で説明した方法で計算している。固体粒子の物性、岩石の熱伝導率、相対浸透率、毛細管圧力は、BASIN3D2P で基準値として用いているものをそのまま利用している。泥質岩の浸透率は、5 章での室内実験で得られた浸透率と間隙率の関係(5.20)式を用い、その定数を、間隙率が 0.3 より大きい場合は $a=9$ 、0.3 より小さい場合は $a=3$ としている。また、間隙率が 0.7 の時の浸透率の値として 1md を与えている。砂岩の浸透率は、出光石油開発株式会社所有の未公表コア試験データを用い、粒径に応じて(3.130)式の定数を変化させている(Fig. 7-10)。

7. 2. 2. 3 海底面温度

Table 7-2 Summary of the stratigraphy and the division of units in the studied area. References are shown in the text.

Age	Absolute age (Ma)	Formation	Unit	Key marker
Pleistocene	0.7	Uonuma		Top of <i>C. yabei</i> zone
		Haizume		Base of <i>C. yabei</i> zone
	0.98	Nishiyama	Ny-Pc	Marker A
			Ny-Pi	Base of No.2 <i>G. inflata</i> bed
Pliocene	1.4		Ny-As	Top of No.3 <i>G. inflata</i> bed
	3.0		Ny-Or	Base of No.3 <i>G. inflata</i> bed
	3.5			
Miocene	4.0	Shiia	Sy-Ik	Aga-Kita tuff
			Sy-Un	First appearance of <i>T. japonica</i>
	6.0			
	12.6	Teradomari		
		Nanatani		
	16.0			
		Basement		