

エポキシ樹脂注入による亀裂開口幅の測定について

1997年3月

動力炉・核燃料開発事業団
東 海 事 業 所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

技術開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and
Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu,
Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation) 1997

Iボキシ樹脂注入による亀裂開口幅の測定について

赤堀邦晃^{*1} 内田雅大^{*1}

要旨

高レベル廃棄物を地層処分する場合に想定される地下水汨りにおいて、結晶質岩盤の場合には、岩盤中の亀裂が主要な物質移行経路であると考えられている。地下数百メートルの地下深部に存在する亀裂性岩盤は、高岩圧下にあると考えられ、この亀裂性岩盤中を流れる地下水を模擬した室内試験を行う場合には、垂直荷重を負荷しなければならない。そして、この室内試験で用いる単一亀裂中の亀裂開口幅を測定する場合においては、垂直荷重を負荷した時の亀裂開口幅を測定しなければならない。筆者らは、垂直荷重を1辺50cmの立方体の人工単一割裂岩体に負荷した後、Iボキシ樹脂を単一亀裂中に注入し、Iボキシ樹脂が固化した後、試験岩体をスライス片に切断して、その切断面を拡大して直接的に亀裂開口幅の測定を行った。この結果、Iボキシ樹脂は、亀裂開口幅の測定可能な下限である約0.016mmの亀裂にも浸透しており、垂直荷重を負荷した際の亀裂開口幅の測定手法として有効な手法であることが確認された。

また、亀裂開口幅の測定に先立って同一の試験岩体を用いて、亀裂性媒体水理試験設備(LABROCK)を用いた水理試験を行い、単一亀裂の透水性と垂直応力の関係について調査した。さらに、亀裂ネットワークモデルの単一亀裂面の開口幅の不均質モデルを用いて水理解析を行った。この結果、Witherspoonら^⑨が提案する修正三乗則について、水理試験からは、抵抗係数 $f_C=6$ 、水理解析からは、抵抗係数 $f_C=37$ が求まった。水理試験結果と水理解析の結果について、Witherspoonらが提案する修正三乗則の抵抗係数が異なることは、今回、スライス片の内部の亀裂開口幅の測定が不可能であったため、亀裂の閉塞領域を示すために十分な測定点がなかったためであると考えられた。このことは、測定された開口幅データにおいても、わずかしか閉塞したデータが、取得されていないことからも示唆される。しかし、今後亀裂面の全面にわたり亀裂開口幅を測定すれば、亀裂開口幅分布のモルヒが可能であると考えられ、今後、亀裂面の全面にわたり亀裂開口幅を測定する手法について確立する予定である。

*1 環境技術開発部 地層処分開発室

目 次

1.	はじめに	1
2.	珠 ^珠 樹脂注入試験	2
3.	亀裂開口幅の測定結果と亀裂開口幅の特徴	5
4.	水理試験と水理解析による修正三乗則を用いた検討	10
4. 1	水理試験概要	10
4. 2	修正三乗則の適応について	10
4. 3	水理解析	12
4. 3. 1	解析概要	12
4. 3. 2	解析結果および考察	14
4. 4	水理試験と水理解析についての考察	16
5.	まとめ	18
6.	参考文献	19
APPENDIX A	岩石カッターによる欠損幅とスライス片の厚さ	20
APPENDIX B	岩石カッターにて切断したスライス片の切断面	22
APPENDIX C	レジン注入による亀裂面測定結果	38

1. はじめに

高レベル廃棄物を地層処分する際に想定されている地下水シナリオでは、結晶質岩盤を流れる地下水の主要な物質の移行経路は岩盤中の亀裂であると考えられている。亀裂内を流れる地下水は、チャンネリングと呼ばれるチャンネル状に流れる場合がある。このチャンネリングは、亀裂面内の亀裂開口幅の不均質性に起因して生じると考えられている。また国内外の知見では、三乗則に基づく亀裂開口幅である水理学的開口幅と物質移行に関する開口幅との関係は、物質移行に関する開口幅が水理学的開口幅より約1オーダー大きいことが知られている¹⁾。単一亀裂中のチャンネリングを理解し、かつ物質移行に関する開口幅と水理学的開口幅の関係を理解するためには、亀裂面での亀裂開口幅分布をモデル化する必要がある。また亀裂開口幅分布をモデル化するためには、亀裂面内の亀裂開口幅分布を取得する必要がある。さらに、高レベル廃棄物が地下数100mの地下深部に処分されることを考えた場合、廃棄物周辺の岩盤は、高岩圧下にあると考えられる。このため、筆者らの行っている亀裂性岩体を使用した水理試験では、垂直荷重を負荷した場合の透水性を調べることを目的としている。それゆえ、亀裂開口幅分布を取得する際には、垂直荷重を負荷した際の亀裂開口幅分布を取得する必要がある。しかし従来垂直荷重を負荷した際の亀裂開口幅分布の取得は、非常に困難であった。

Hakami²⁾は、亀裂開口幅分布の取得の方法を3種類に分類している。Hakamiが分類した亀裂開口幅分布の取得法の概念図を図-1に示す。Hakamiの分類によれば、下記の①～③の亀裂開口幅の測定法に分類される。

- ① 試験岩体の亀裂面の上下面の凹凸を測定し、測定された亀裂面の上下面の凹凸形状から亀裂開口幅を算出する方法。
- ② エポキシ樹脂や低融点金属などの充填物を亀裂内に注入し、充填物が固化した後、試験岩体をスライス状に切断し、切断したスライス片の亀裂面の充填物の厚さを測定する方法。
- ③ シリコンラバーなどの充填物を亀裂内に注入し、充填物が固化した後、充填物を試験岩体から取り出し、取り出した充填物の厚さを測定する方法。

①～③の亀裂開口幅の測定法の中で、①は垂直荷重を負荷した際の亀裂開口幅を測定することは困難である。また亀裂面の凹凸を測定するために亀裂を1度開ける必要があり、測定した亀裂開口幅の確認を得ることが非常に困難である。また③の手法は、亀裂面の全面にわたって亀裂開口幅を測定することが可能であり最も有望な手法と考えられるが、垂直荷重を負荷した状態で充填物を注入した例がなく、その測定法については未だ課題が残されている。新見ら³⁾は、釜石鉱山原位置試験場においてエポキシ樹脂を用い、エポキシ樹脂を單一

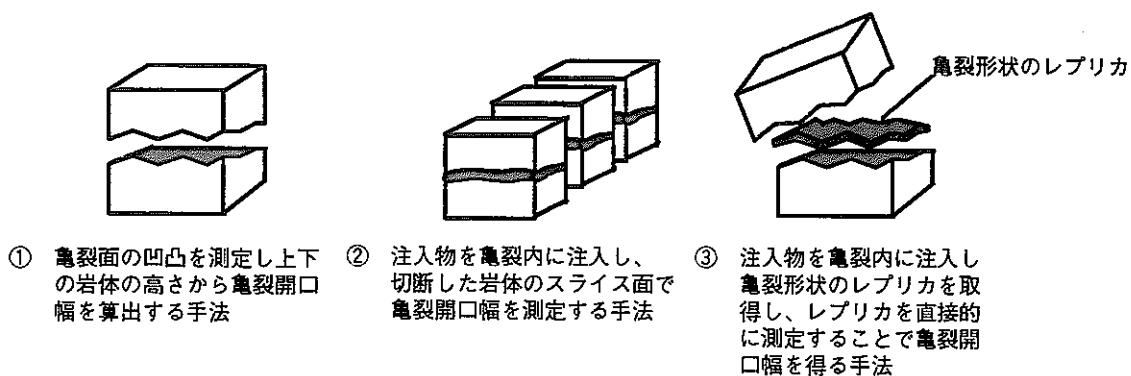


図-1 亀裂開口幅の取得法

亀裂内に注入し、樹脂が固化した後、亀裂面をはさむ岩盤の片方を切り出して樹脂の厚さを測定した。しかし新見らの行った流路の厚さの測定は、2cm 間隔で測定しており、測定間隔を粗くとっている。また、新見らは、流路の厚さが 0.2~2mm である流路については、流路の厚さを測定できたが、それより厚さが薄い流路については、流路の厚さを測定できなかった部分がある。Hakami⁴⁾は、花崗岩のボーリングコアの天然亀裂中にエポキシ樹脂を注入した後、コアを切断し、切断面における樹脂の厚さを測定することによって亀裂開口幅を測定している。Hakami が用いたボーリングコアは、直径が 190mm で長さが 410mm のものであり、さらに大きな岩体を用いた場合の測定を行っていない。また 2 軸の圧縮装置によって封圧をかけているのみであり、地下数百メートルの静岩圧を模擬する様な垂直荷重をかけているわけではない。そこで筆者らは、垂直荷重を負荷した状態で、1 辺が 50cm の立方体の単一亀裂岩体の亀裂開口幅を取得するため、蛍光剤を混合したエポキシ樹脂を亀裂中に注入して、エポキシ樹脂が固化した後スライス状に切断したスライス片の切断面でエポキシ樹脂の厚さを測定した(以下エポキシ樹脂注入試験と呼ぶ)。

本資料では、エポキシ樹脂注入試験による亀裂開口幅の測定法、および亀裂開口幅の測定結果について述べるとともに、同一の割裂亀裂岩体を用いて行った水理試験について水理解析を行ったので、その結果について報告する。

2. エポキシ樹脂注入試験

本試験で用いたエポキシ樹脂は、A 剤と B 剤の 2 種混合剤である。このエポキシ樹脂は、混合した後時間の経過とともに流動性が変化する。亀裂内にエポキシ樹脂を注入する前に室内試験によって経過時間に対するエポキシ樹脂の流動性の変化を確認した。図-2 にエポキシ樹脂の流動性確認試験の概略図を示す。確認方法として A 剤と B 剤を混合したエポキシ樹脂を充填して、水平な面より高さ 10cm に設置した注射器から真下に 5ml づつ 15 分毎に滴下して、滴下後 10 分経過した時のエポキシ樹脂の広がりを直交する 2 方向について測定した。

図-3 に経過時間とエポキシ樹脂の広がりの関係を示す。この結果から A, B 剤混合後 100 分までは、2 方向の広がりは値にばらつきはあるものの、広がりの平均値は徐々に減少している。100 分経過後では、広がりの平均値もばらつき始め 165~180 分で 2 方向ともエポキシ樹脂の広がりが急激に低下していることがわかる。流動性が著しく低下する経過時間は、混合後 165~180 分であるが、約 100 分経過後でも広がりの平均値は低下している。このため、エポキシ樹脂の注入時間を 100 分以内とすることを目標として設定した。

試験岩体にエポキシ樹脂を注入し、亀裂開口幅を得るまでの手順を図-4 に示す。エポキシ樹

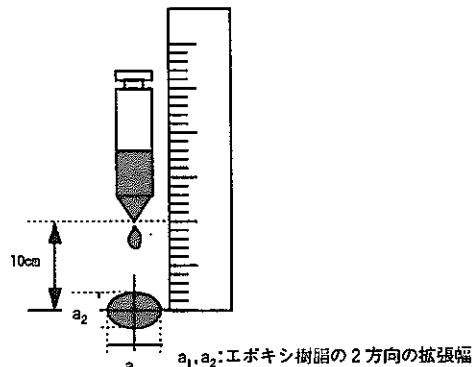


図-2 エポキシ樹脂の流動性確認試験概略図

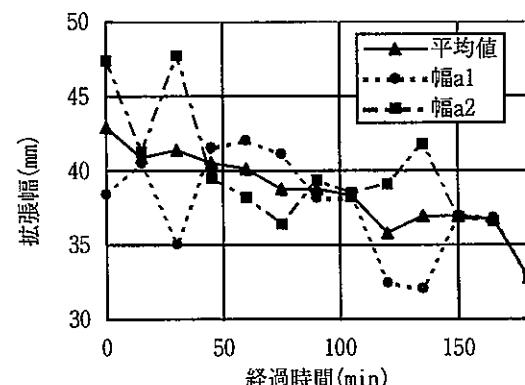
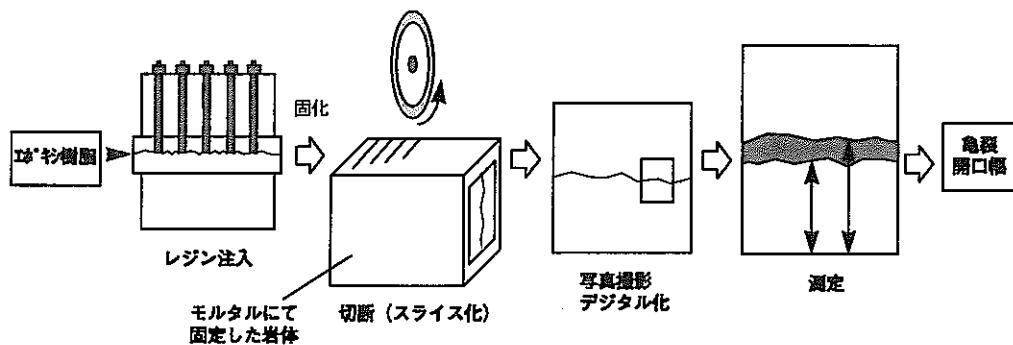


図-3 経過時間とエポキシ樹脂の拡張幅の関係



脂注入試験は下記の手順および試験条件にて行った。

① エポキシ樹脂の亀裂中への圧入

図一5に示す注入装置を使用して、エポキシ樹脂を亀裂中に注入した。注入完了後（90分後）、透水試験と同じ垂直荷重である15tonfで載荷して2週間垂直荷重を保持したまま養生した。

<試験条件>

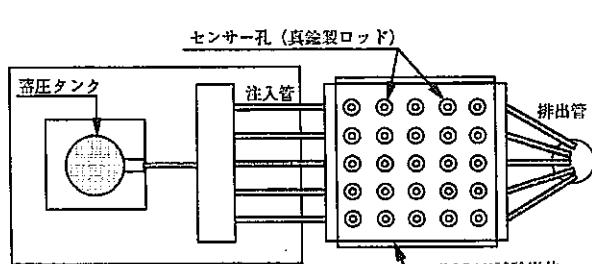
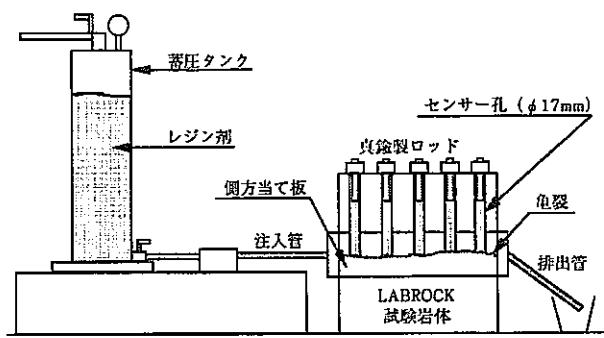
垂直荷重：15tonf（透水試験時に負荷する垂直荷重）。

注入圧：0.2～0.5kgf/cm²（透水試験時の注入圧 0.89 kgf/cm²:垂直荷重 15tonf 時）。

エポキシ樹脂 A剤：B剤=4085g:2047.5g (A剤：B剤=2:1)。

蛍光剤の割合 混合後のエポキシ樹脂：蛍光剤=6132.5g:122.65g

(蛍光剤／混合後のエポキシ樹脂=0.02)。



図一5 エポキシ樹脂注入装置の概略図

② モルタルによる亀裂面の保護

岩石カッターを用いて行う岩体切断時に、亀裂面での岩石片やポリマー樹脂の剥離を防止する目的でショーポント・建設(株)製のモルタルを用いて、試験岩体の周囲を固定した。モルタル部の厚さが8cmになる様に型枠を作成して、岩体と型枠の間にモルタルを注入した。これにより切断する試験岩体の大きさは、L66cm×W66cm×H50cmとなった。

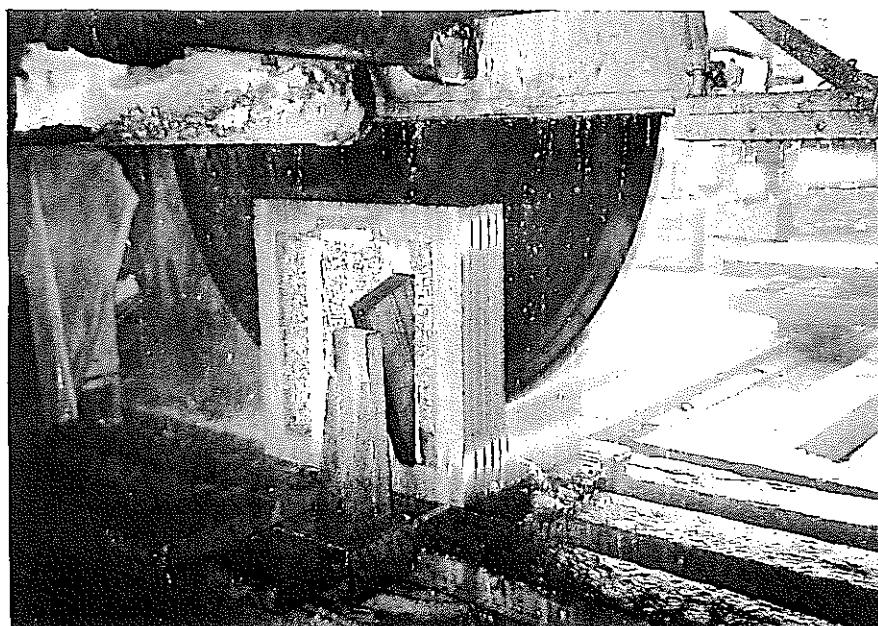
③ 岩石用カッターによる岩体の切断（スライス化）

直径64inch（約163cm）のダイヤモンドカッターを用いて岩体を切断した。切断時の切断状況を図一6に示す。切断位置は、1cm間隔にてマーキングを行い、その後スライス片の厚さを計16枚のスライス片となる様に下記の様に設定した。

両端のスライス片：厚さ4cm×2枚+両端以外のスライス片：厚さ3cm×14枚=50cm

切断した結果幅5~11mmの欠損が生じ、両端のスライス片が約3cm、その他のスライス片が約2cmの厚さをもつスライス片となった。なお切断時の切削速度は、1切断あたり90分で設定した。また切削屑を除去するため、切断時には絶えず注水した。

注) 各スライス面の断面写真を Appendix A に示す。また切断後測定した岩石カッターによる欠損幅を Appendix B に示す。



図一6 モルタルにて固定した試験岩体の岩石カッターによる切断状況

④ 画像処理による亀裂開口幅の測定

切断したスライス片の切断面を倍率50倍のマイクロスコープを使用して拡大し、コンピュータ(マッピング)に取り込んだ。図-7に画像処理した亀裂面の拡大写真を示す。コンピュータに画像を取り込んだ後、画像処理ソフト「NIH IMAGE」を使用して、亀裂面を構成するピクセル数を測定した。1mmあたりのピクセル数は、62~65ピクセルであり、1ピクセルが表現する精度は、約0.016mmとなる。

座標軸は、注水ポート側から見て試験岩体の右下端を原点にとり、透水方向に平行な方向をX軸、透水方向に垂直かつ水平な方向をY軸、鉛直上向き方向をZ軸にとった。座標軸の概略図を図-8に示す。測定は、試験岩体の底面からの亀裂上下面の高さと亀裂開口幅について行い、X軸方向について1mm間隔で、各スライス片の両切断面について行った。

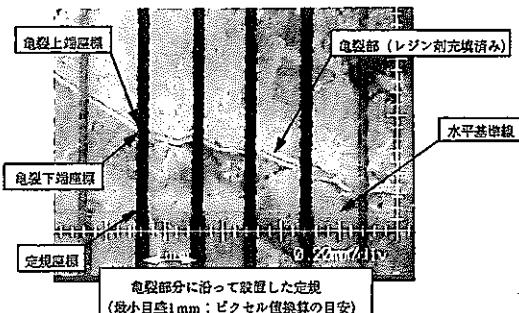


図-7 画像処理した亀裂面の拡大写真

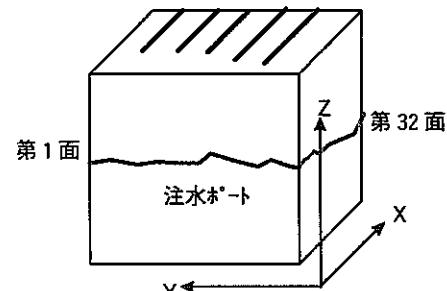


図-8 座標軸の概略図

3. 亀裂開口幅の測定結果と亀裂開口幅の特徴

表-1に今回測定した亀裂開口幅について各切断面毎に統計処理を行った結果を示す。表-1に示す切断面の内1面と32面は試験岩体の両端面の位置である。試験岩体の両端面では、水理試験時に止水板を用いて接着している。止水板を取り除く際に亀裂面が損傷しており、このため今回測定した亀裂開口幅は、真の値を示していないと考えられる。

図-9に1面と32面の測定結果を除外して、横軸に亀裂開口幅の常用対数値、縦軸に亀裂開口幅の頻度を全体に対する百分率でとった図を示す。この結果から常用対数値で-0.7~-0.61(0.2~0.25mm)の範囲をピーグ

にもつ形状の頻度分布が得られた。

また1面と32面の測定結果を除外した場合の亀裂開口幅の全平均値は0.387mm、全中央値は0.22mmである。また図-9から約0.008mmの亀裂開口幅を有する亀裂までエボキシ樹脂が浸透したことがわかる。

図-10にエボキシ樹脂注入試験における測定点と測定点の間を線形補間して亀裂開口幅の大小を色分けした図を示す。図-10に示した①~⑤は、注水ポートと排水ポート

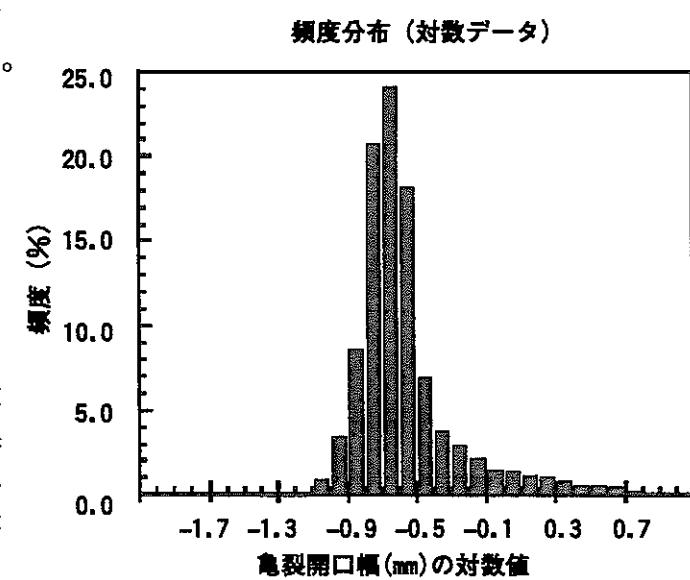


図-9 亀裂開口幅のヒストグラム

表一 エボキシ樹脂注入試験により測定された亀裂開口幅の統計値

スライス面	最大値	最小値	累積値	測定点数	平均値	中央値	標準偏差	分散
1	21.18	0.00	1104.40	469	2.355	1.78	2.644	6.992
2	8.79	0.03	175.62	501	0.351	0.20	0.626	0.392
3	4.45	0.06	143.44	418	0.343	0.21	0.458	0.210
4	5.78	0.02	175.91	496	0.355	0.21	0.503	0.253
5	3.50	0.06	156.47	501	0.312	0.26	0.221	0.049
6	4.44	0.00	149.88	501	0.299	0.22	0.299	0.089
7	4.47	0.04	148.27	501	0.296	0.23	0.271	0.073
8	4.45	0.06	148.90	501	0.297	0.22	0.353	0.125
9	6.81	0.09	163.74	501	0.327	0.21	0.438	0.192
10	6.64	0.08	315.31	476	0.662	0.25	1.026	1.053
11	6.43	0.03	221.80	501	0.443	0.21	0.792	0.628
12	3.44	0.07	140.10	501	0.280	0.19	0.342	0.117
13	5.12	0.07	142.82	501	0.285	0.20	0.388	0.151
14	5.67	0.06	124.50	501	0.249	0.19	0.356	0.127
15	6.17	0.08	144.51	501	0.288	0.19	0.439	0.192
16	4.61	0.11	151.39	414	0.366	0.22	0.480	0.230
17	4.99	0.08	241.41	443	0.545	0.21	0.806	0.650
18	10.05	0.11	154.23	501	0.308	0.23	0.505	0.255
19	5.29	0.09	138.41	501	0.276	0.23	0.285	0.081
20	3.81	0.11	160.94	501	0.321	0.24	0.315	0.099
21	6.94	0.07	188.68	501	0.377	0.23	0.542	0.293
22	7.44	0.06	272.19	501	0.543	0.26	0.811	0.658
23	7.32	0.09	319.61	420	0.761	0.25	1.237	1.531
24	5.82	0.08	214.37	501	0.428	0.18	0.953	0.907
25	6.92	0.09	268.54	501	0.536	0.24	1.129	1.274
26	5.62	0.00	177.00	501	0.353	0.22	0.482	0.232
27	5.86	0.08	186.63	501	0.373	0.23	0.542	0.293
28	3.62	0.11	173.91	501	0.347	0.24	0.361	0.130
29	4.74	0.05	283.20	501	0.565	0.27	0.749	0.561
30	3.91	0.08	240.63	473	0.509	0.28	0.540	0.292
31	5.99	0.08	167.93	501	0.335	0.25	0.456	0.208
32	11.41	0.00	1231.88	444	2.775	2.28	2.465	6.076

亀裂の開口状況平面図

(二股開口部：最大開口部)

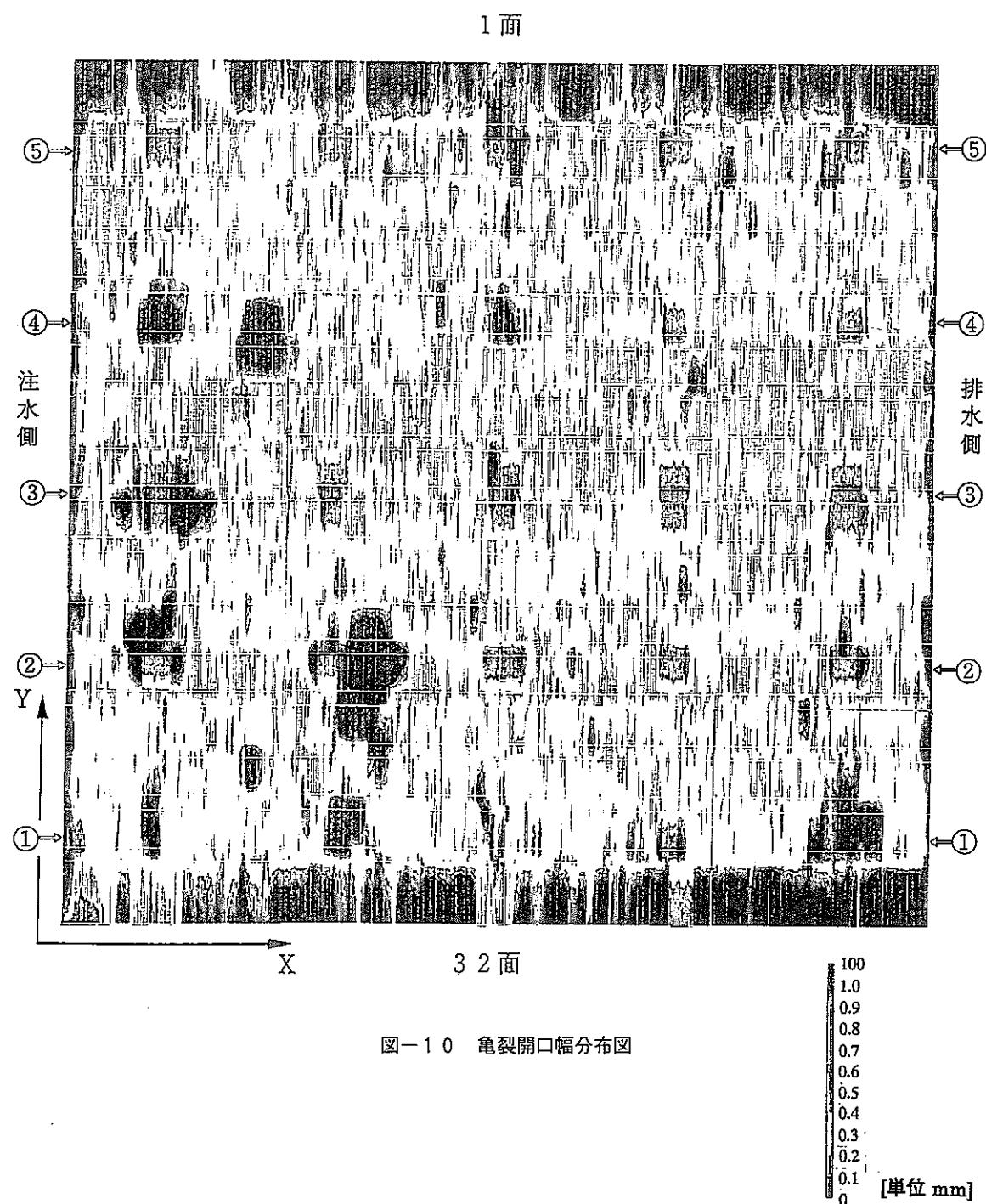


図-10 亀裂開口幅分布図

亀裂面凹凸状況（上端面）

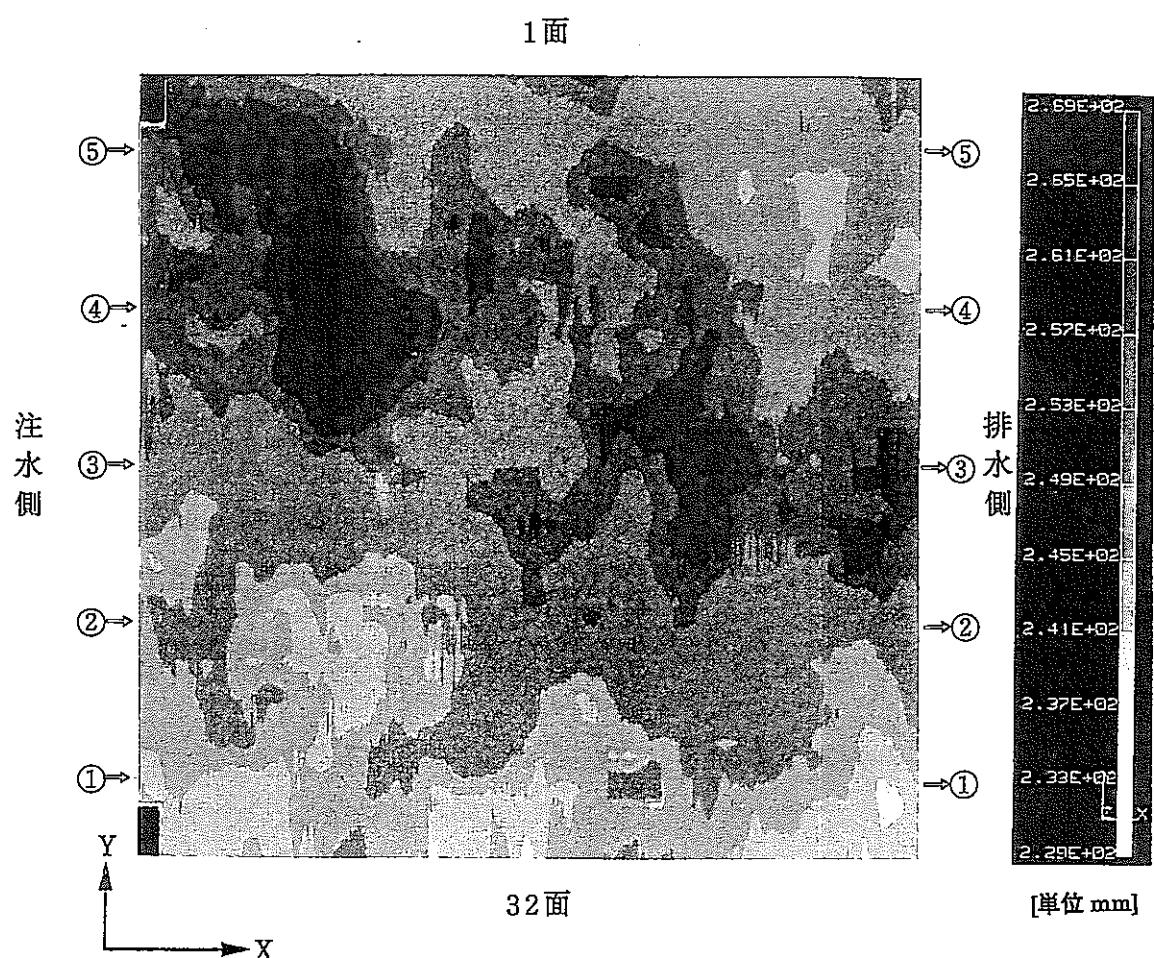


図-11 亀裂上面の凹凸の分布図

亀裂面凹凸状況（下端面）

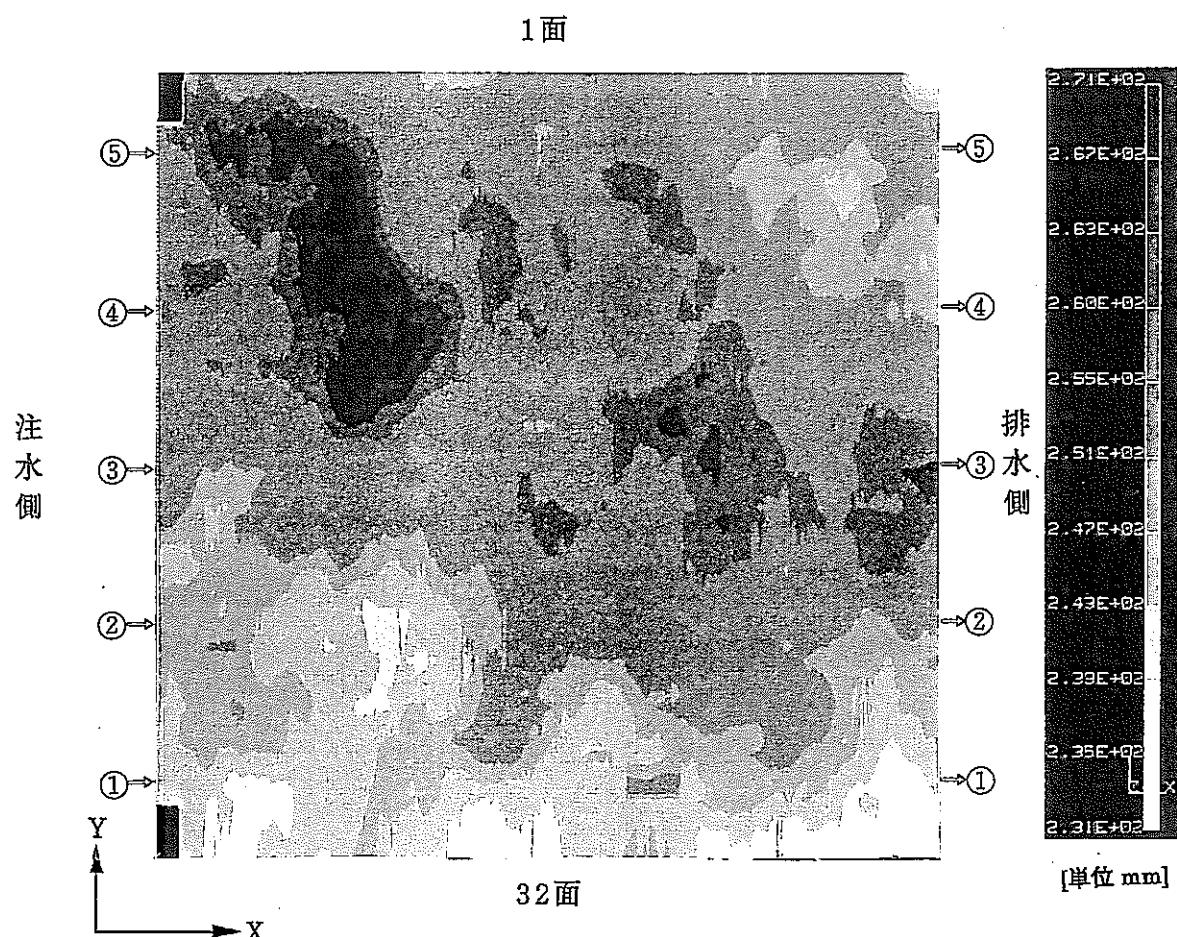


図-12 亀裂下面の凹凸の分布図

一トの番号である。この結果から①、②側の亀裂開口幅が大きく、透水性が高いことが推定される。図-11、12にEポジ樹脂注入試験で得られた亀裂上下面の凹凸の平面分布図を示す。この結果から、注水ポート①～②の範囲では下に凸、注水ポート③を境に④～⑤付近で注水ポートよりの亀裂面が上に凸になっていることがわかる。

注) Eポジ樹脂注入試験で亀裂開口幅を測定した各断面での亀裂面形状を Appendix C に示す。

4. 水理試験と水理解析による修正三乗則を用いた検討

4.1 水理試験概要

Eポジ樹脂注入試験で使用した試験岩体の透水性を調べるために亀裂性媒体水理試験装置(LABROCK 試験装置)を用いて水理試験を行った。図-13に LABROCK 試験装置の概略図を示す。LABROCK 試験装置においては、50cm 立方の試験岩体を用い、5 個に分割された注水ポートから注水し、試験岩体内部に設置された計 25 カ所のセンサーにより圧力および濃度を測定可能である。排水ポートは、注水ポートと同じく 5 個に分割されており、電子天秤により各排水ポートからの流量が自動的に計測可能である。また、最大 15MPa の地圧を模擬した 375tonf の垂直荷重が載荷可能である。

透水試験は、単一割裂亀裂の透水性と垂直応力の依存性の関係を調べるために、垂直荷重を 5, 10, 15, 20tonf と段階的に昇圧させた後に降圧し各垂直荷重において透水試験を行った。各注入ポートの圧力は一定となる様に各ポートの流量を調整した。また試験岩体への垂直荷重の傾きを少なくするため、今回アクチュエータと試験岩体の間にフラットジャッキを追加した。フラットジャッキは、薄い袋状の装置であり、袋内に負荷する油圧により袋を膨張させ試験岩体を持ち上げる装置である。試験条件として与えた注水ポートの流量を表-2 に示す。

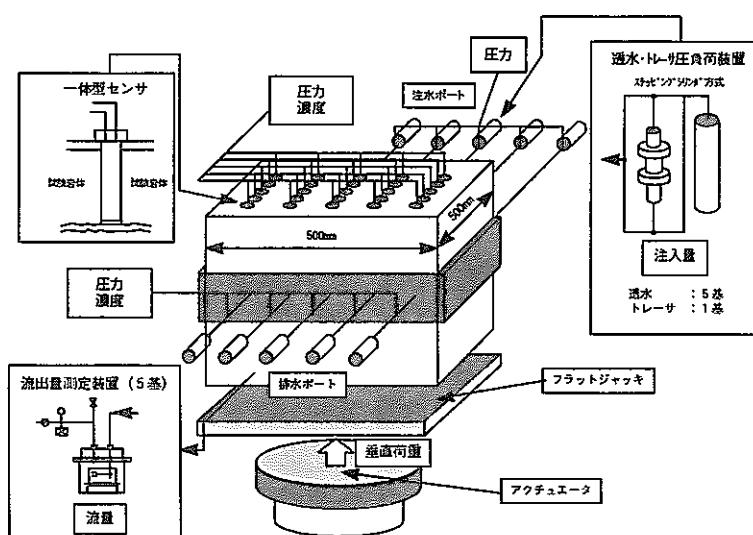


図-13 LABROCK 試験装置概略図

表-2 各注入ポートの流量

注水ポート番号	流量 (m^3/s)
1	1.167E-06
2	1.000E-06
3	3.333E-07
4	1.000E-07
5	6.667E-08

4.2 修正三乗則の適応について

単一の平行平板亀裂の透水性を示す式として、一般的に「透水量係数が、亀裂開口幅の三乗に比例する」という三乗則が知られている。しかし三乗則は、亀裂面の滑らかな平行平板亀裂の透水性を示す式であるため、亀裂面に凹凸を有する単一亀裂では成り立たない。

Witherspoon ら⁵⁾は、亀裂面の凹凸による抵抗を三乗則に加味した式として次式を提案している。

$$\frac{Q}{\Delta h} = \frac{C}{f_c} (2b_0 - d)^3 \cdots (1)$$

Q : 流量(m^3/s), Δh : 圧力水頭差(m), $2b_0$: 初期開口幅(m),

d : 亀裂閉合量(m), f_c : 抵抗係数,

C : 流体の粘性, 密度に関する定数($m^{-1}s^{-1}$)

また、(1)式に関する妥当性の検討は、野田ら⁶⁾によって検討されている。

今回水理試験によって取得された試験結果から(1)式に最小2乗法を用いてフィッティングし、抵抗係数 f_c と初期開口幅 $2b_0$ を算出することを試みた。

野田らが行った時と同じ人工割裂亀裂岩体を用いて行った水理試験結果と、前回野田らによって行われた水理試験結果について垂直荷重と透水量係数の関係を比較した図を図-14に示す。図-14から前回の水理試験と比較して、今回の透水試験によって取得された透水量係数は、すべての垂直荷重において増加している。また垂直荷重が昇圧した場合と降圧した場合には、垂直荷重と透水量係数の関係にはヒステリシスが存在する様に見受けられる。また、今回の透水試験結果で降圧 10tonf から 5tonf に向かう時の透水量係数の変化は、同じ垂直荷重で比較した場合に、昇圧時の透水量係数と降圧時の透水量係数のずれが大きい。図-14に前回の水理試験結果と今回の水理試験結果で、昇圧 5tonf および降圧 5tonf の時の透水量係数を 1 とした時の昇圧 10tonf および降圧 10tonf の時の透水量係数の比を併記する。この結果から前回の水理試験では、昇圧 5tonf と昇圧 10tonf の透水量係数の比、および降圧 5tonf と降圧 10tonf の透水量係数の比は、ほぼ等しく約 0.6 となっている。しかし今回の水理試験結果では、昇圧 5tonf と昇圧 10tonf の透水量係数の比は、約 0.6 となっているが、降圧 5tonf と降圧 10tonf の透水量係数の比は、0.79 と異なっている。この結果から、昇圧 5tonf から昇圧 10tonf に変化させた時より降圧 10tonf から降圧 5tonf に変化させた時に、垂直荷重と透水量係数の関係におけるヒステリシスを変化させる様な誤差を含んでいるものと考えられる。よって降圧 5tonf の時の水理試験結果を除外して考えることは妥当であると考えられる。なお、降圧 5tonf 時にヒステリシスを変化させる様な誤差が生じた原因については、透水量係数が低い値を示していること、また垂直荷重を除荷していることから、止水板と試験岩体を接着しているボンドの塑性変形が考えられる。

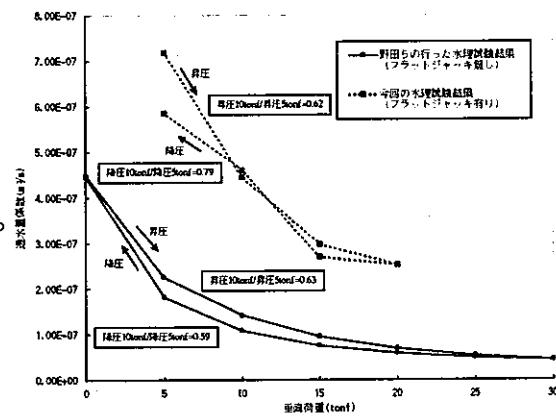


図-14 垂直荷重と透水量係数の関係についての前回と今回の透水試験結果の比較

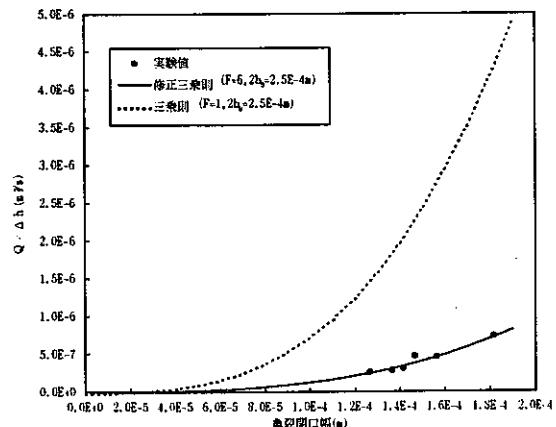


図-15 フィッティングした結果
($f_c=6, 2b_0=0.25mm$)

図-15に最小2乗法を用いて(1)式にフィッティングした結果を示す。フィッティングした結果、抵抗係数 $f_c=6$ 、初期開口幅 $2b_0=0.25\text{mm}$ となった。

4. 3 水理解析

4. 3. 1 解析概要

I部キシ樹脂注入試験により取得された亀裂開口幅の測定結果から亀裂開口幅分布のモデル化を行い、水理解析を行った。解析コードは、メッシュの各要素に異なった物性値を割り当てることが可能な亀裂ネットワーク解析コードFracMan/Maficを使用した。またメッシュは、L50cm×W50cmの亀裂平面を各辺の長さが5mmの直角二等辺三角形の要素に分割した。I部キシ樹脂注入試験で取得された亀裂開口幅は、透水方向に平行な方向には1mm間隔にて測定されているが、透水方向に垂直な方向には、2~3cm間隔で測定されている。このため測定されなかった部分の亀裂開口幅を推定する必要がある。本解析では、次式を用いてメッシュの各要素に亀裂開口幅を平均化して割り当てた。

$$A_G = \frac{\sum_{i=1}^n A_{Gi} D^{-1}}{\sum_{i=1}^n D^{-1}} \cdots (2)$$

A_G ：各要素の亀裂開口幅、

A_{Gi} ：測定点での亀裂開口幅

D ：メッシュの各要素の重心より測定点までの距離

(2)式は距離に重み付けをした平均の式であり、要素に近い3点を平均化した。また亀裂開口幅と透水量係数の関係は、(1)式を変形して

$$T = X_0 \times A_G^{-3} = \frac{C}{f_G} \times A_G^{-3} \cdots (3)$$

T ：透水量係数、 X_0 ：定数、 f_G ：幾何学的な開口幅を使用した場合の抵抗係数

により付与した。表-3に解析ケースの一覧表を示す。また図-16にメッシュの各要素に亀裂開口幅を割り当てた後の亀裂開口幅分布図を示す。

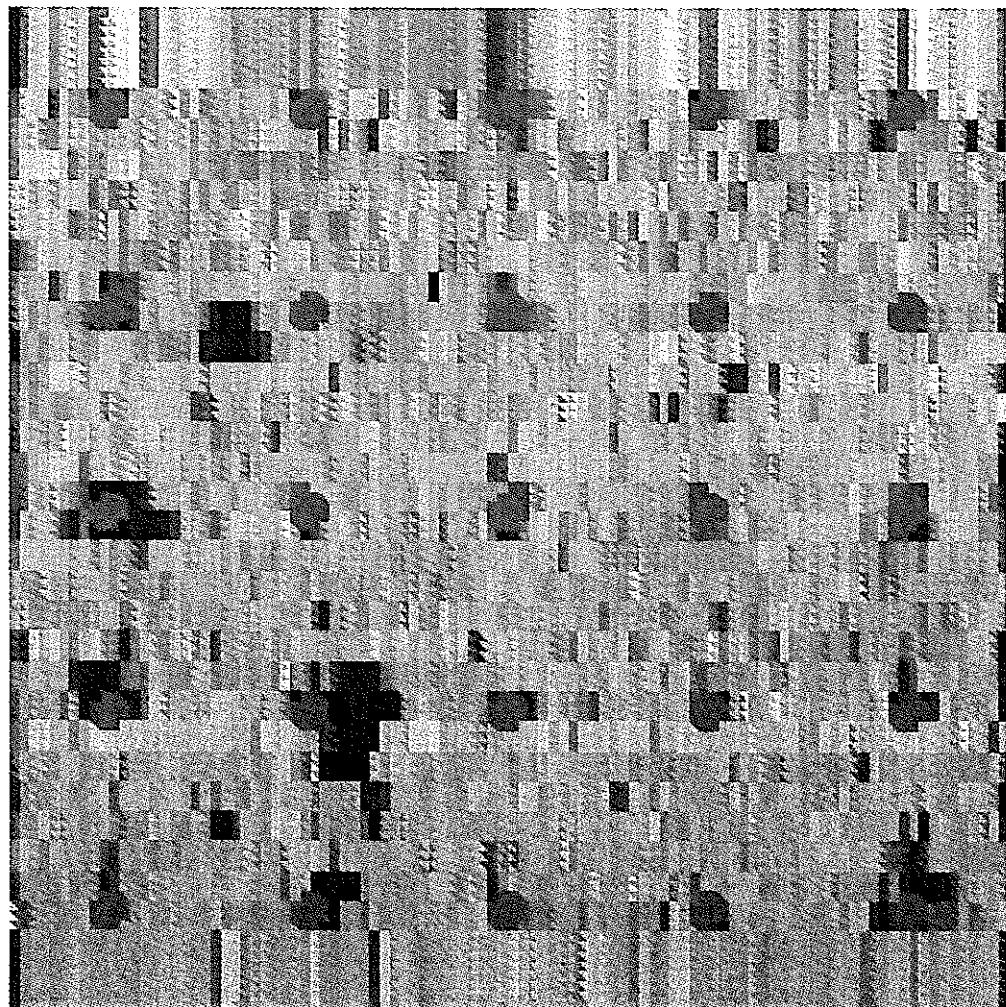
I部キシ樹脂注入試験時の垂直荷重は、15tonfである。このため、垂直荷重15tonf時の水理試験時の水理的境界条件を下記の様に設定した(基本ケース)。

注水側境界条件：全水頭8.9m 固定境界。

排水側境界条件：全水頭0.0m 固定境界。

その他の境界：不透水境界。

Injection side



Log (Aperture) [unit:m]



-4.40 -3.84 -3.29 -2.73 -2.18

図一16 メッシュに亀裂開口幅データを割り当てた後の亀裂開口幅分布

表-3 解析ケース一覧表

解析ケース	X_0	注水側境界条件	排水側境界条件	備考
1 (基本ケース)	Cubic Law	全水頭 8.9m 水頭固定境界	全水頭 0m 水頭固定境界	
2	1/37Cubic Law			
3	Cubic Law			亀裂開口幅：一様に平均値 0.387mm を与えた
4	Cubic Law	流量固定境界	全水頭 0m 水頭固定境界	
5	1/10 Cubic Law			
6	1/37 Cubic Law			
7	1/50 Cubic Law			

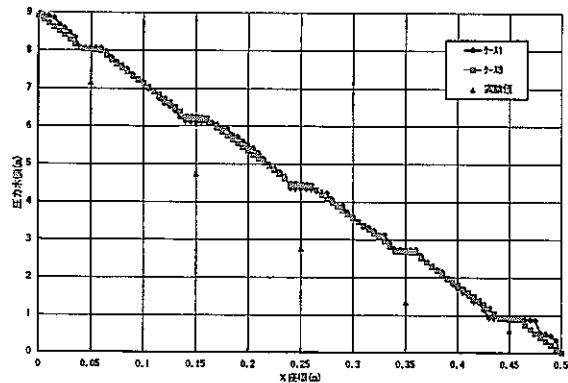
また計 25 カ所のセンサー孔では、センサー下面が亀裂下面より 1mm 上方に設置していること、およびセンサー孔の直径が 20mm であることからセンサー孔の中心から直径 20mm 以内に要素の重心が入る要素に亀裂開口幅 1mm を設定した。

4. 3. 2 解析結果および考察

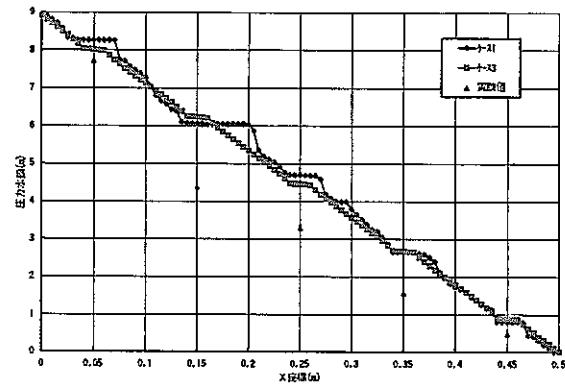
図-17 に基本ケースにおける各センサー孔の位置で圧力水頭を実験値と解析値で比較した図を示す。この結果から解析値が実験値より高く評価されていることがわかる。図-17 にセンサー孔の部分を除いて要素全体に一様に平均開口幅 0.387mm の亀裂開口幅を割り当てたケース(ケース3)の圧力水頭の分布を併記する。この結果から、解析値の圧力水頭分布は、実験値よりケース3 の圧力水頭分布に近い形状を示している。このことから、今回の基本ケースに割り当てた亀裂開口幅分布は、実験時に比べ、均一な亀裂開口幅を有する平行平板亀裂に近い亀裂開口幅分布であることが考えられる。注水側境界を全水頭 8.9m 固定境界とした場合に、(3)式の X_0 の値を変化させた場合の注水ポートの全流量を表-4 に示す。この結果、(3)式における X_0 を三乗則と等しくすると、注水ポートの全流量の解析値は、実験値と比較して大きくなる。この注水ポートの全流量について、解析値と実測値を一致させるためには、(3)式における X_0 を三乗則の 1/37 倍にする必要があった。

図-18 に基本ケースにおける各注排水ポートの流量を実験値と解析値で比較した図を示す。この結果からわかる様に、実験値と解析値の流量は一致していない。特に注水ポート④では、注水ポート③および⑤に対し流量の大小が逆転する結果となっている。また排水ポートでは、排水ポート④および⑤の流量が、実験値と比較して解析値の方が過大に評価された結果となっている。この結果は、(2)式で割り当てられた亀裂開口幅の分布は、水理試験時の流路の不均質性を正確に再現していないことを示している。

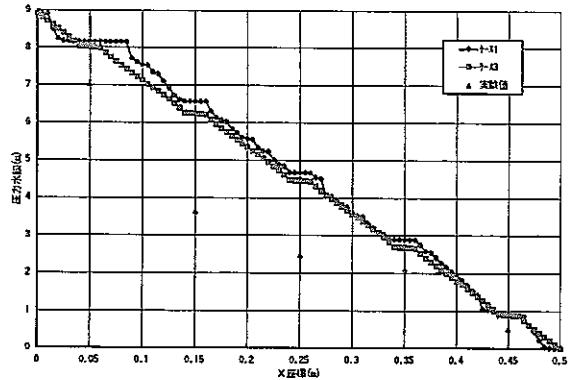
注水側の境界条件を全水頭 8.9m にて固定した場合、注水ポートの流量および排水ポートの流量の両方が実験値と一致しないため、亀裂開口幅分布のどの部分が原因で流路の不均質性が再現できていないのか明確ではない。このため、注水側の境界条件に各注水ポートでの流



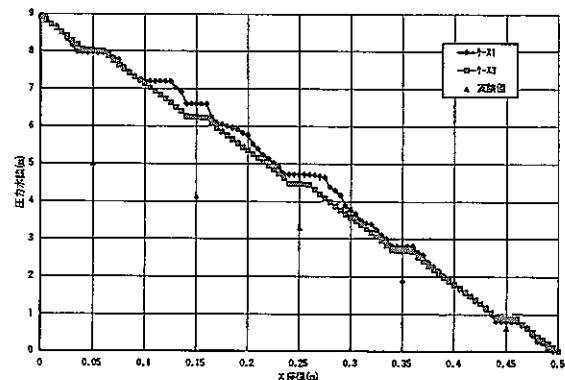
注排水ホースト①



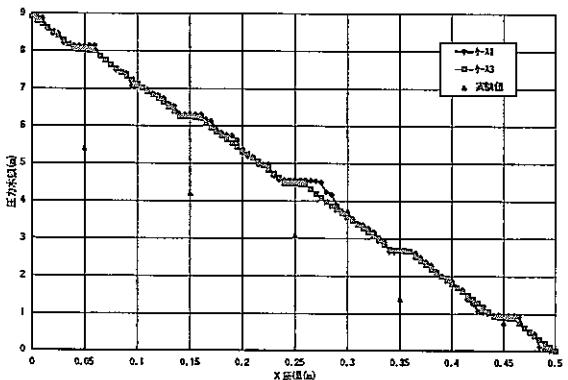
注排水ホースト②



注排水ホースト③



注排水ホースト④



注排水ホースト⑤

図一 17 ケース1（基本ケース）とケース3の圧力水頭分布の比較

量の実験値を設定して、センサー孔の位置での圧力水頭、および各排水ポートでの流量について実験値と解析値を比較した。

図-1 9に各センサー孔の位置で圧力水頭を実験値と解析値について比較した図を示す。この結果から、注水側境界条件を各注水ポートでの流量の実験値で固定した時、注水ポートの実験条件である圧力水頭8.9mに近づくのは、(3)式の f_G が、 $f_G=37$ となる時である。また、各センサー孔の位置で圧力水頭を実験値と圧力水頭を比較した結果、図-1 9中の↓にマーキングした圧力水頭の低下を表現できていないことがわかる。この結果は、水理試験を行った

時、↓でマーキングした位置の上流側で、今回亀裂開口幅を平均化し割り当てた亀裂開口幅分布より、亀裂が閉塞していたことを示している。また、図-2 0に注水側境界条件を各注水ポートでの流量の実験値で固定した場合に各注水ポートおよび排水ポートでの流量について実験値と解析値を比較した結果を示す。この結果から、今回モデル化した亀裂開口幅分布は、本来排水ポート②および③に流れるべき流路が表現されておらず、排水ポート④および⑤の方に向かって流れ、排水ポート④および⑤の流量を過大に評価していることがわかる。このことは、圧力水頭の比較から排水ポート④の上流側にあると考えられる亀裂の閉塞部がモデルに表現されていないことから、排水ポート④および⑤に向かう流路が卓越し、流量を過大に評価しているものと考えられる。

以上の結果から、今回モデル化した亀裂開口幅分布は、局所的に亀裂の閉塞部を表現しておらず、このため各センサー孔での圧力水頭および各注排水ポートでの流量が一致しなかったものと考えられる。

4. 4 水理試験と水理解析についての考察

図-1 0に示す亀裂開口幅の分布図および図-1 6の亀裂開口幅分布図からわかる様に亀裂の閉塞部が亀裂開口幅分布に表現されていない。また図-1 9に示した水理解析における圧力水頭の比較から、実際の亀裂開口幅分布は、モデル化した亀裂開口幅分布と比較して、局所的に亀裂が閉塞していたと考えられる結果となっている。さらに、図-1 5に示した(1)式へのフィッティングの結果では、垂直荷重 15tonf における亀裂開口幅は、0.137～0.142mm である。この結果は、3. に示した亀裂開口幅の平均値 0.387mm と比較して 0.35～0.37 倍小さい値である。以上の結果から、今回モデル化した亀裂開口幅分布は、亀裂の閉

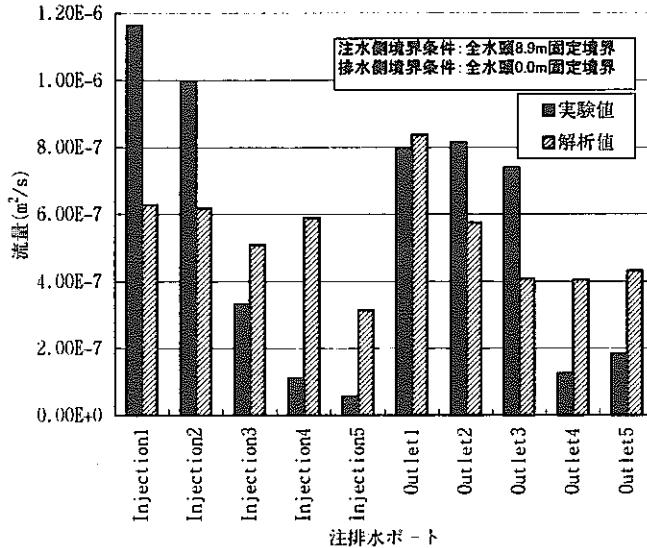
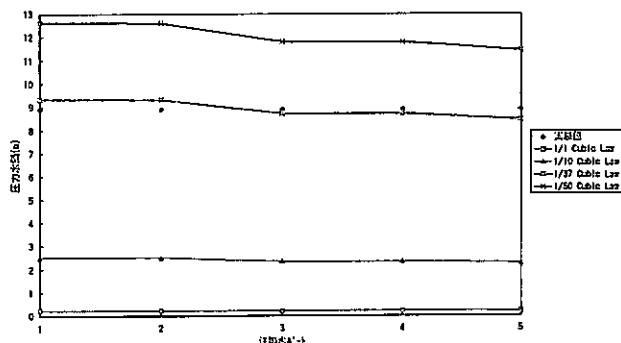
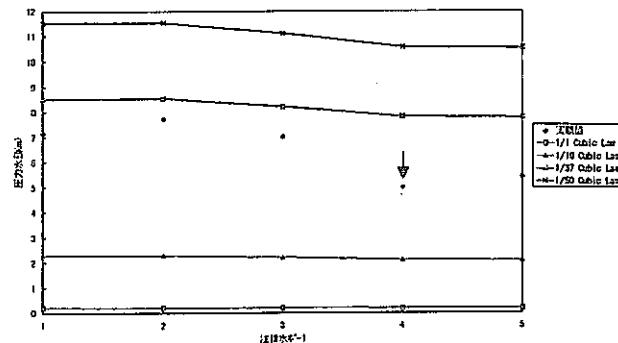


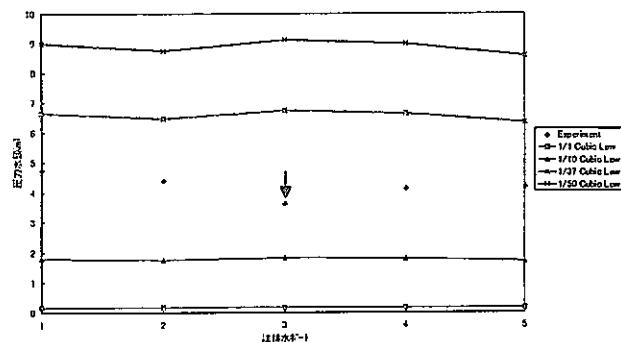
図-1 8 基本ケースにおける各注排水ポートの流量についての解析値と実測値の比較



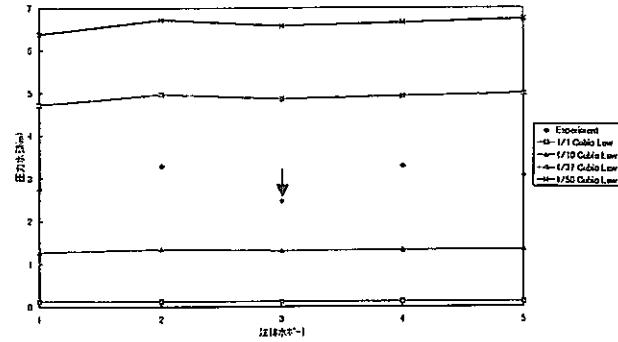
注水ポート (X : 0mm)



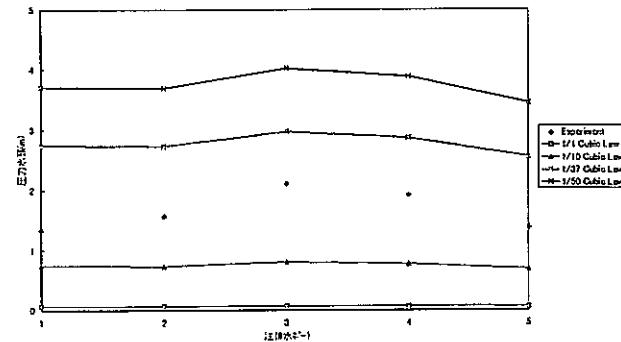
注水ポートより 50mm 排水側 (X : 50mm)



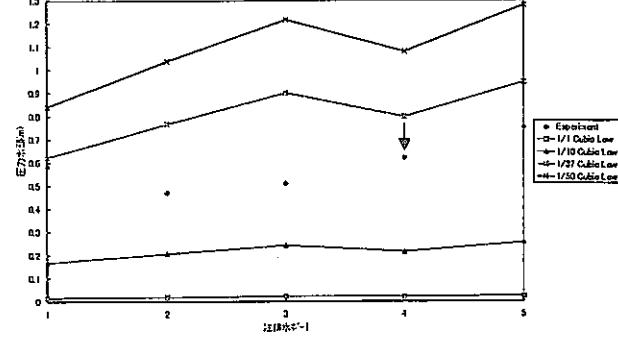
注水ポートより 150mm 排水側 (X : 150mm)



注水ポートより 250mm 排水側 (X : 250mm)



注水ポートより 350mm 排水側 (X : 350mm)



注水ポートより 450mm 排水側 (X : 450mm)

図-1-9 注水側境界条件に各注水ポートでの流量の実験値を与えた場合の各センサ孔の位置
での圧力水頭の比較（排水ポートより注水ポートを見た場合）

塞部が表現されていないことが考えられる。今回 I^{p} キシ樹脂注入試験で取得した亀裂開口幅分布は、スライス片の内部まで亀裂開口幅を測定しなかった。このため亀裂の閉塞部を正確にモデル化できなかったものと考えられる。

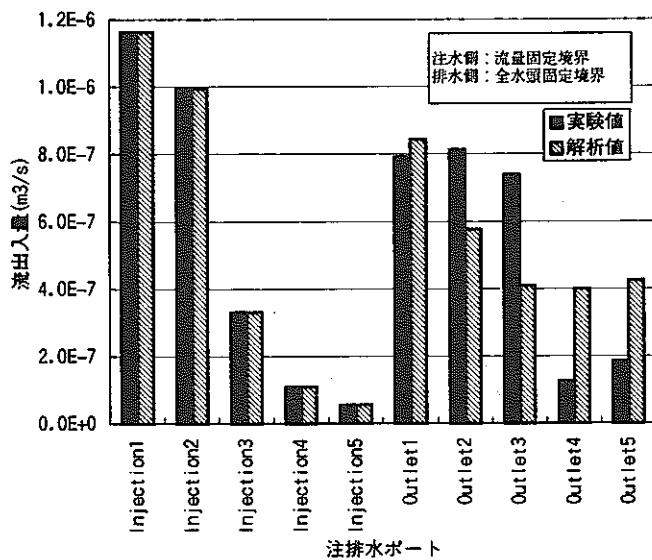


図-20 注水側境界条件に実験値の流量を与えた場合の各注排水ポートの流量

水理解析で使用した亀裂開口幅 A_G は、基本的に幾何学的な開口幅である。また、(1)式で得られる A_C は、亀裂面の凹凸の影響は考慮しているものの、均一な開口幅での平行平板亀裂を考えている。 A_G と A_C と透水量係数 T の関係には次の様な関係が成立する。

$$T = \frac{C}{f_c} A_C^3 = \frac{C}{f_G} A_G^3 \cdots (4)$$

(4)式において、 $f_c=6$ 、 $f_G=37$ である。 f_G の方が f_c より大きな値となった理由は、 f_c は、(1)式において基本的に均一開口幅の平行平板亀裂を仮定しているため開口幅 A_C が小さく評価されたのに伴い、低く評価されたのに対し、 f_G については、水理解析を行った際に、上記の様に亀裂中の閉塞部の開口幅が十分に取得されていないため、 A_G が実際より大きく評価され、これに伴い f_G が大きくなつたものと考えられる。

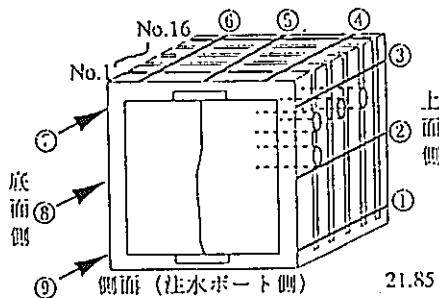
5. まとめ

I^{p} キシ樹脂を注入することによる亀裂開口幅の測定法は、 I^{p} キシ樹脂剤が微細な間隙まで浸透し、室内試験における垂直荷重を負荷した状態でも、亀裂開口幅の測定が可能であることを確認した。しかし、今回の亀裂開口幅の測定では、スライス片内の亀裂開口幅が取得できなかつたため、スライス片内の亀裂の開口幅分布を推定した。このため、亀裂の閉塞部を正確に表現していない結果となつたと考えられる。今後は、亀裂面全体の亀裂開口幅の測定が可能な手法を開発し、水理試験を行つた後、単一亀裂の亀裂開口幅分布の取得と、そのモデル化を行い、亀裂の透水性と亀裂開口幅の関係を確認していく予定である。試験岩体については、人工割裂岩体についての試験終了後、天然の単一亀裂岩体に移行していく予定である。

6. 参考文献

- 1) 内田雅大・澤田 淳：亀裂ネットワーク水理物質移行モデルの開発, PNC TN8410, pp.7-9
- 2) Eva Hakami 他: Characterisation of Fracture apertures-Method and parameters, Proc.8th ISRM Congr., Tokyo, In press, 1995
- 3) 新見 健・野口義文・堀田政国：花崗岩における割れ目内流れに関する基礎的研究, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.21~25, 1992
- 4) Eva Hakami 他: Aperture Measurements and Flow Experiments on a Single Natural Fracture, Aperture Distribution of Rock Fractures(Doctoral Thesis), Division of Engineering Geology Department of Civil and Environment Engineering Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 1995
- 5) P.A.Witherspoon 他: Validity of Cubic Law for Fluid Flow in a Deformable Rock Fracture, Water Resour. Res., Vol.16, No.6, pp.1016~1024, 1980.
- 6) 内田雅大・野田賢司・丸山 誠・須藤 賢：亀裂性媒体水理試験装置による単一亀裂岩体の透水・トレーサー試験, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.156~160, 1995.

Appendix A 岩石カッターによる欠損幅とスライス片の厚さ



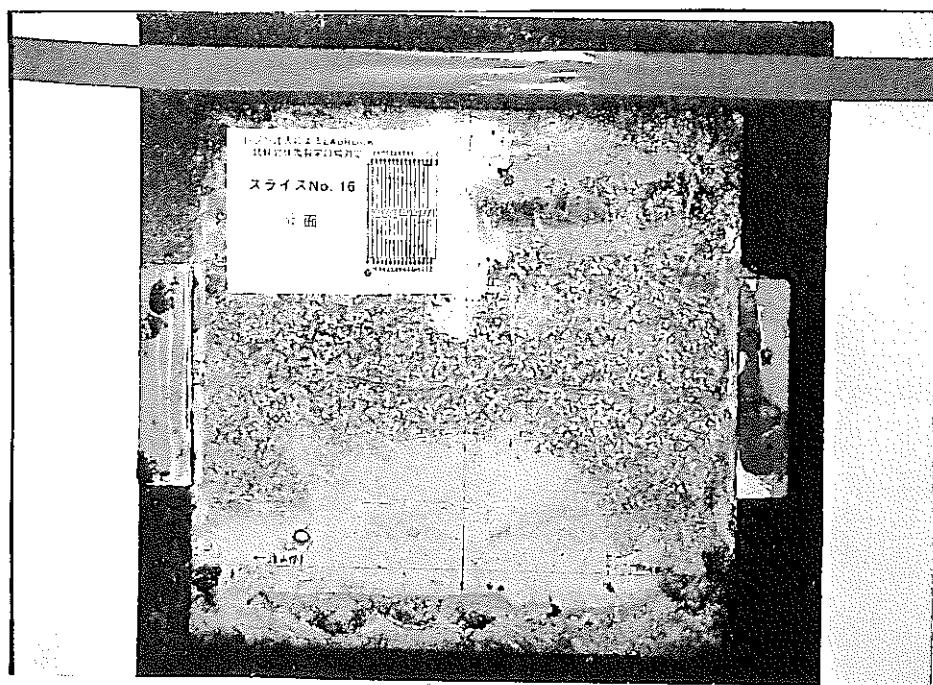
測線位置	測線No.	スライス No.														
		1	欠損	2	欠損	3	欠損	4	欠損	5	欠損	6	欠損	7	欠損	
上面側 No.16~No.1	①	38.26	8.15	23.10	8.45	21.79	8.45	20.13	8.35	21.72	8.20	21.40	8.35	22.05	8.25	21.66
	②	36.80	6.90	22.52	8.60	21.79	8.30	20.30	8.80	21.65	8.20	21.20	8.35	22.02	8.10	21.65
	③	35.73	5.40	22.15	8.60	21.77	8.45	20.34	8.40	21.68	10.40	21.09	8.60	21.75	8.20	21.63
側面側 No.16-No.1	④	35.73	5.40	22.22	8.80	22.15	8.70	20.28	8.60	22.23	10.65	21.16	9.05	21.68	8.15	21.73
	⑤	35.74	5.20	22.20	8.70	21.78	8.40	20.26	8.60	22.40	10.00	21.19	8.35	21.68	8.10	21.70
	⑥	36.12	5.25	22.07	8.60	21.69	8.35	20.05	8.75	22.26	10.00	20.93	8.25	21.70	8.10	21.64
底面側 No.16~No.1	⑦	36.88	5.70	22.24	8.60	21.71	8.40	20.27	8.85	22.20	8.80	20.90	8.35	21.73	8.35	21.63
	⑧	37.10	6.50	22.00	8.85	21.75	8.35	20.25	8.60	21.94	9.25	21.25	8.40	21.36	8.20	21.80
	⑨	40.33	8.00	22.36	8.40	21.81	8.40	19.95	8.35	21.43	8.35	21.53	8.35	21.86	8.35	21.86

(単位 : mm)

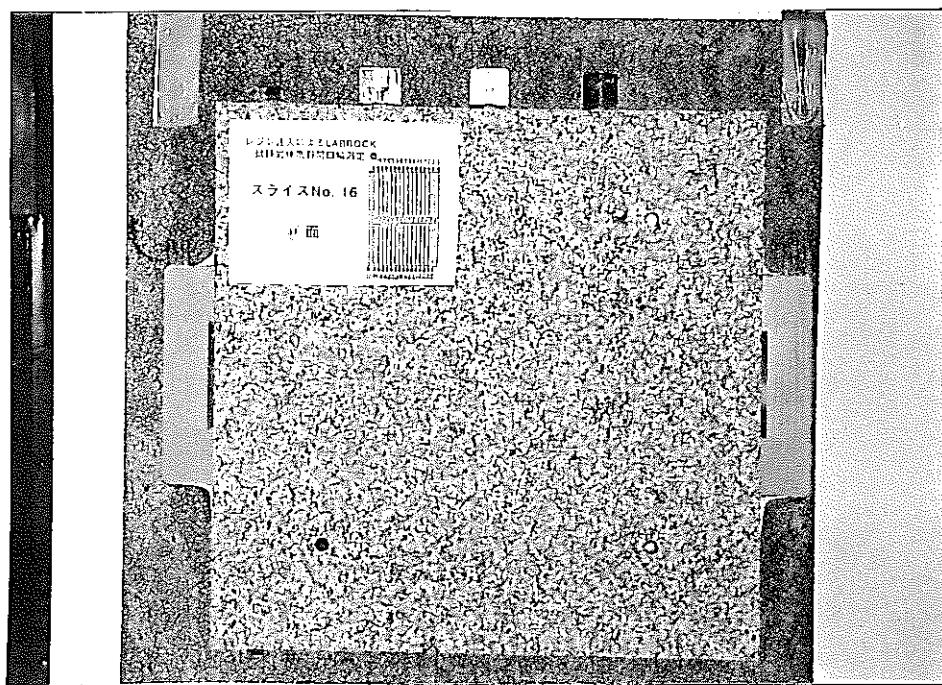
測線位置	測線No.	スライスNo.														計測値合計	
		9	欠損	10	欠損	11	欠損	12	欠損	13	欠損	14	欠損	15	欠損		
側面(1)	(1)	21.28	8.15	22.14	8.20	21.77	8.20	22.58	8.35	21.18	8.55	21.33	8.45	21.23	8.30	27.82	
		21.21	8.05	22.15	8.50	21.21	8.25	22.33	8.40	21.25	8.25	21.53	8.70	21.60	8.30	29.01	495.5
		21.09	8.45	21.78	8.60	21.62	8.80	21.40	8.60	21.36	8.45	21.40	8.05	21.49	8.70	28.21	
上面	(4)	21.15	8.50	21.73	8.85	21.65	8.80	21.50	8.55	21.45	8.35	21.53	8.00	21.72	9.00	25.99	
		21.06	8.45	21.70	8.65	21.63	8.60	21.50	8.25	21.40	8.20	21.62	8.00	21.66	8.75	30.00	493.15
		21.14	8.20	21.67	8.60	21.74	8.70	21.40	8.40	21.30	8.25	21.59	8.10	21.78	8.85	31.73	
側面(2)	(7)	21.10	8.50	21.72	8.60	21.61	8.65	21.74	8.30	21.08	8.40	21.59	8.35	21.62	8.80	30.74	
		21.13	8.40	22.00	8.50	21.94	8.45	21.80	8.35	21.35	8.25	21.50	8.25	21.55	8.40	26.00	490.7
		21.22	8.35	22.03	8.40	20.93	8.35	22.10	8.35	21.08	8.40	21.30	8.40	21.24	8.40	27.40	

(単位 : mm)

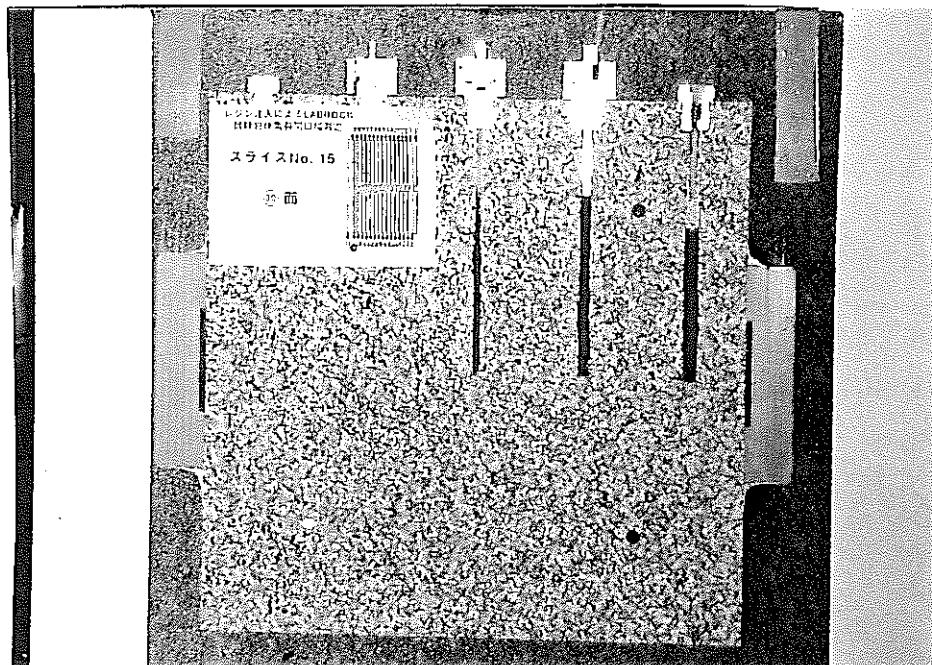
Appendix B 岩石カッターにて切断したスライス片の切断面



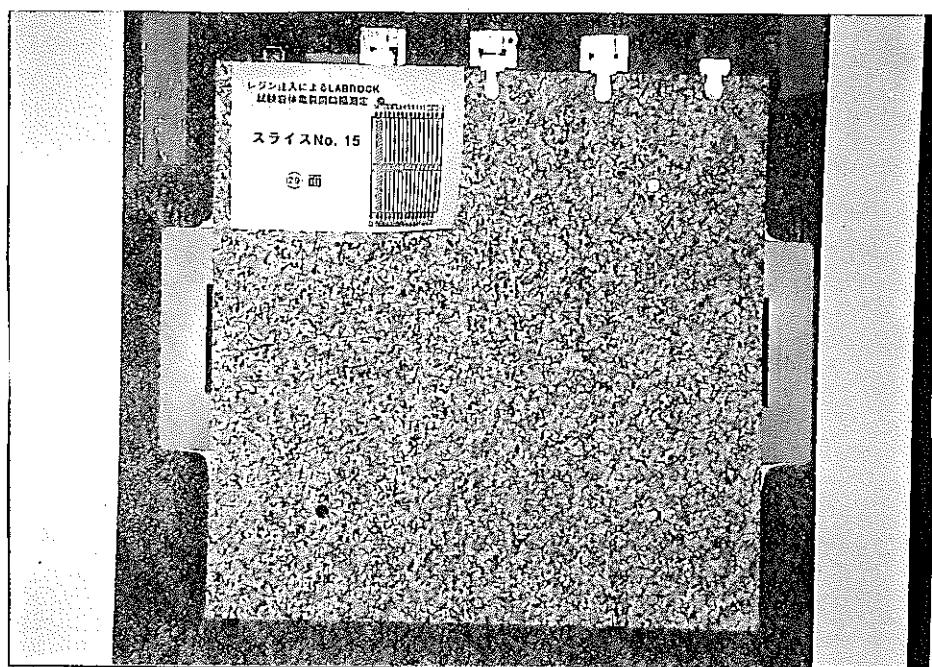
32面 (Y座標 0.00mm)



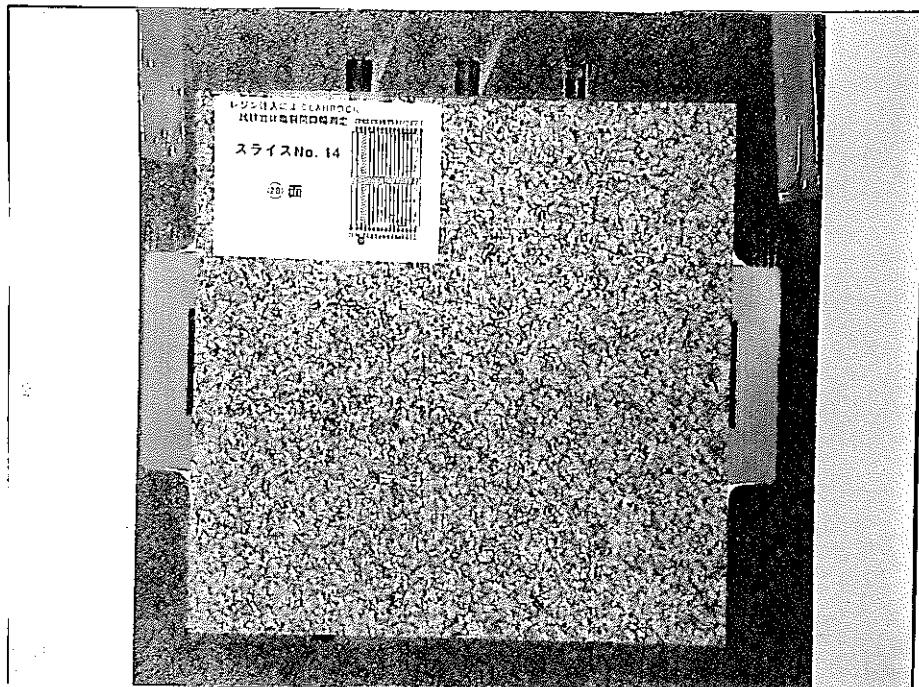
31面 (Y座標 36.03mm)



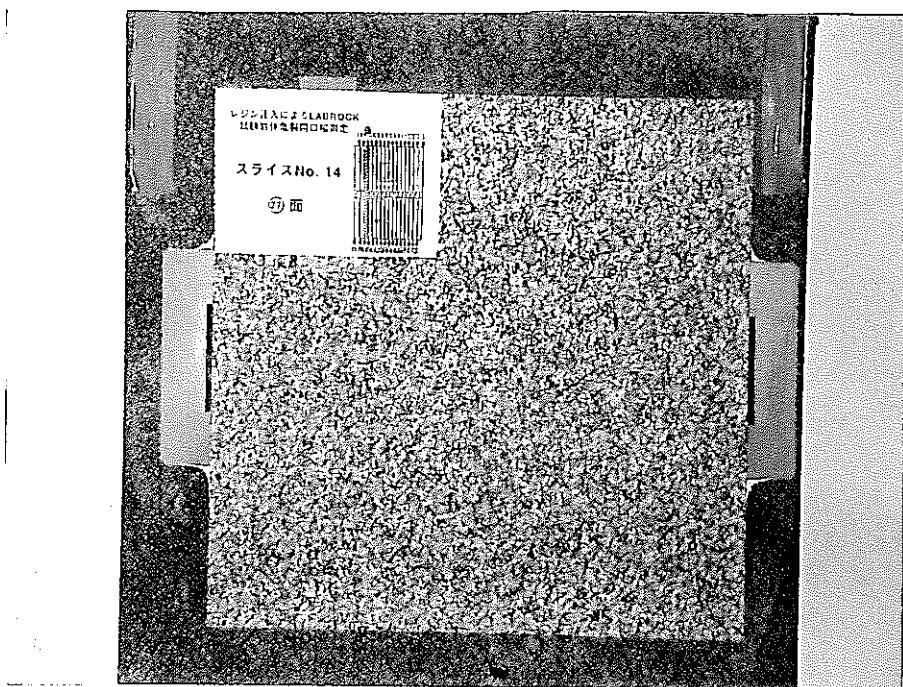
30面 (Y座標 43.83mm)



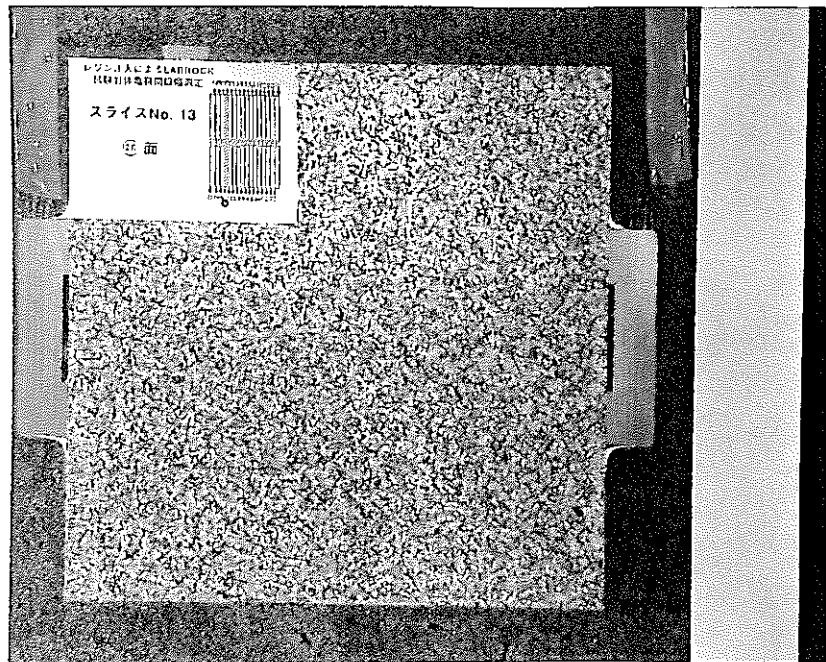
29面 (Y座標 66.19mm)



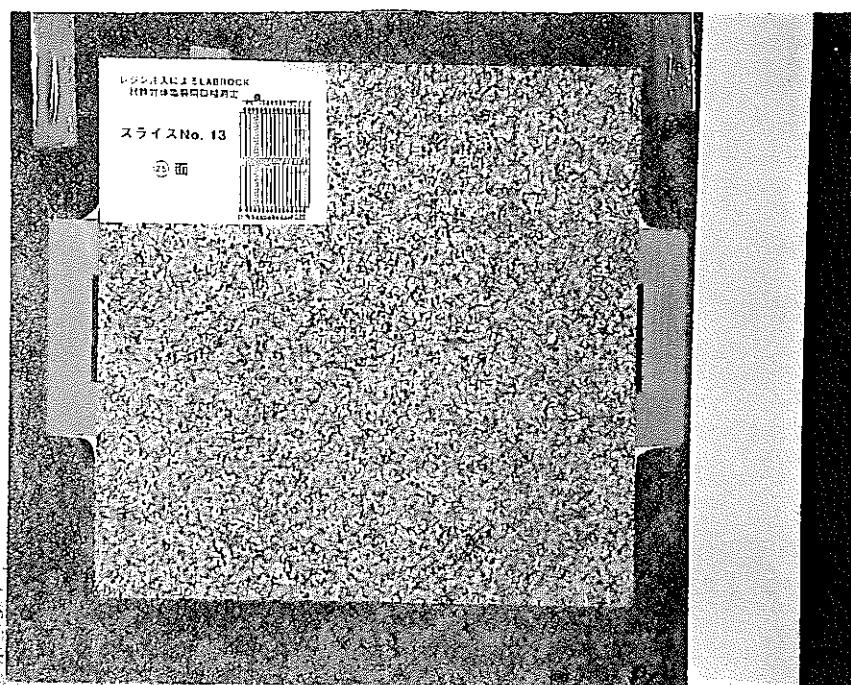
28面 (Y座標 74.75mm)



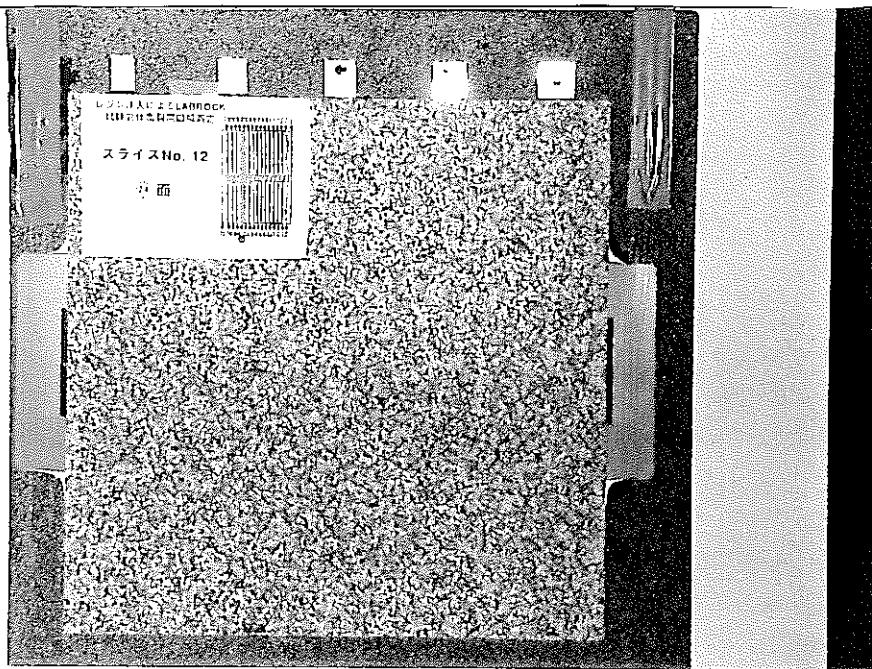
27面 (Y座標 96.15mm)



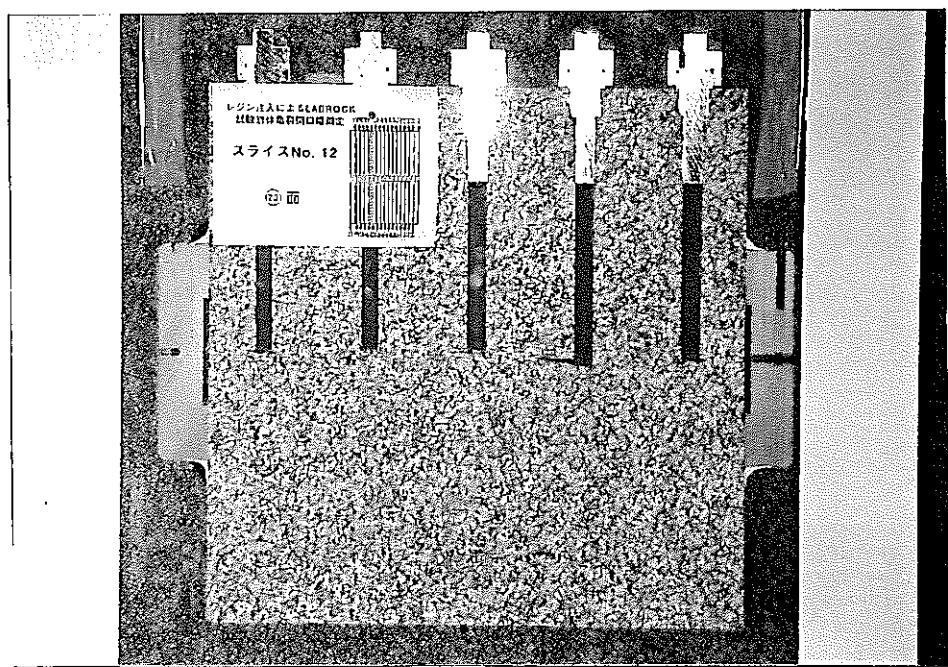
26面 (Y座標 104.3mm)



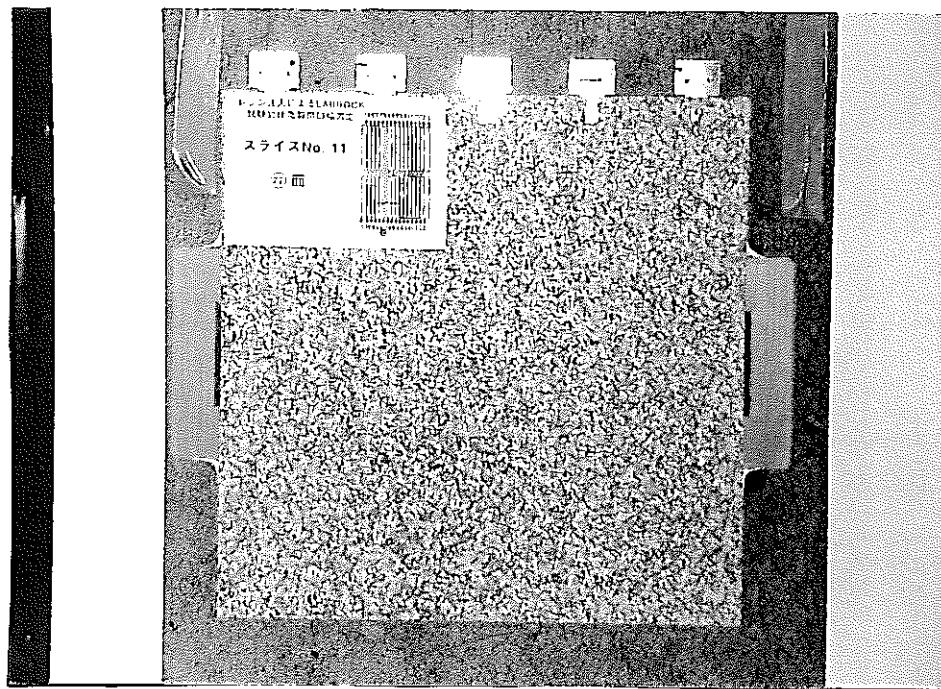
25面 (Y座標 126.02mm)



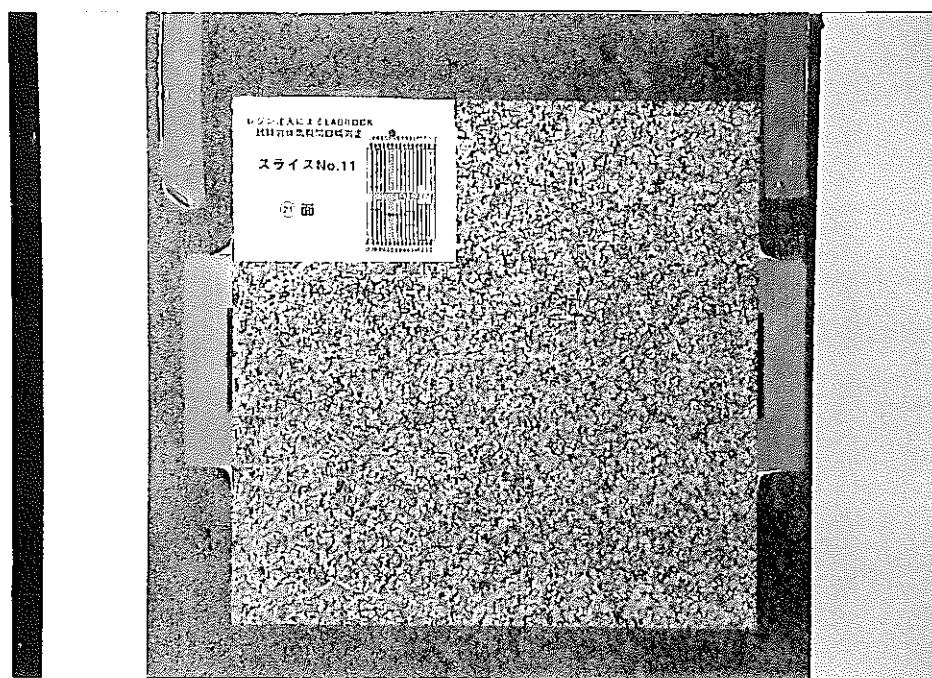
24面 (Y座標 134.62mm)



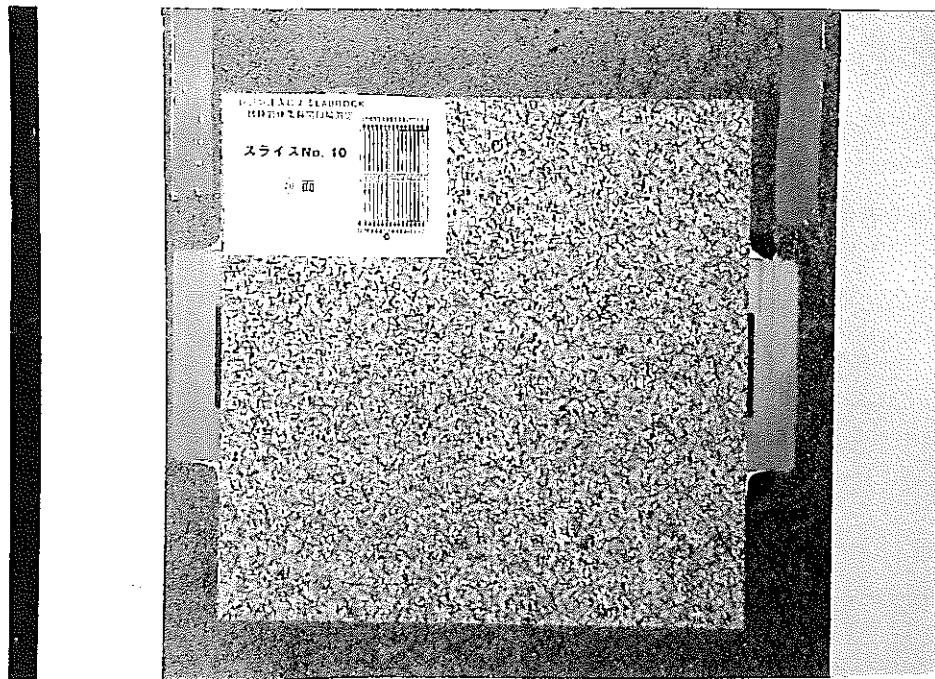
23面 (Y座標 156.32mm)



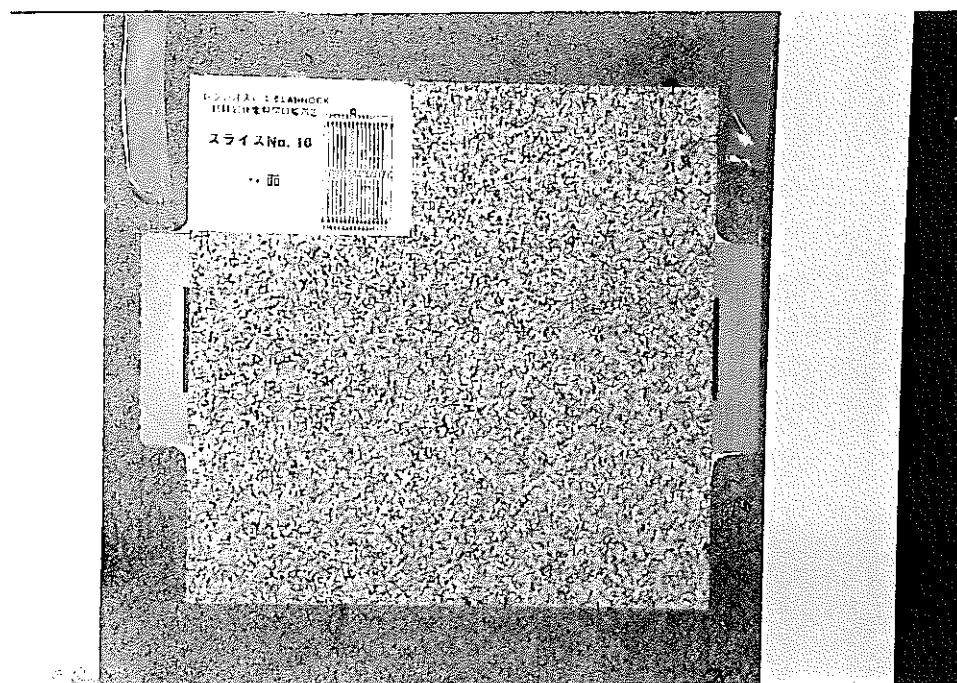
2 2面 (Y座標 164.66mm)



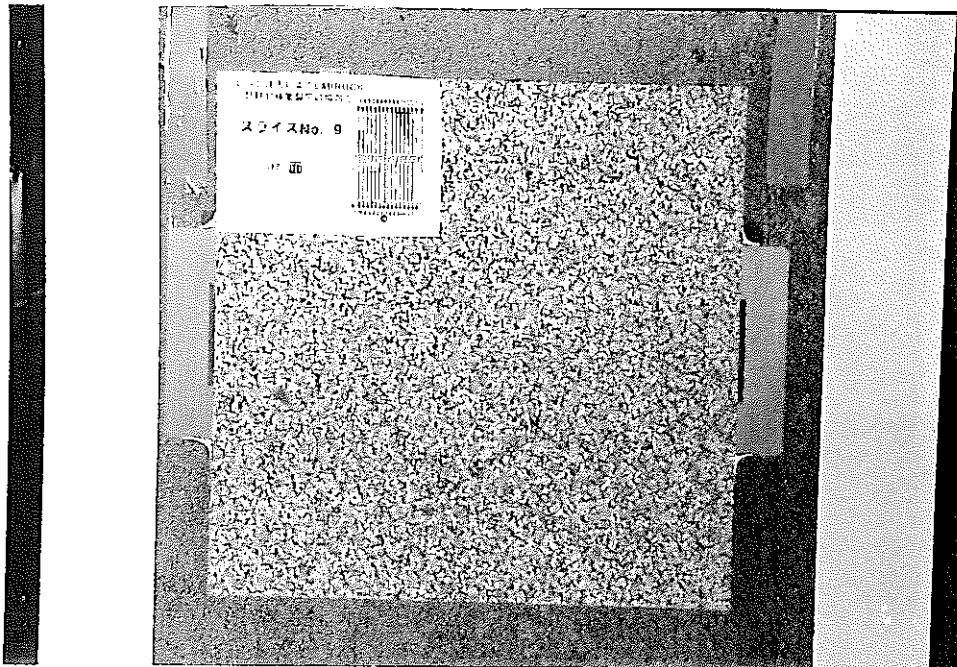
2 1面 (Y座標 185.90mm)



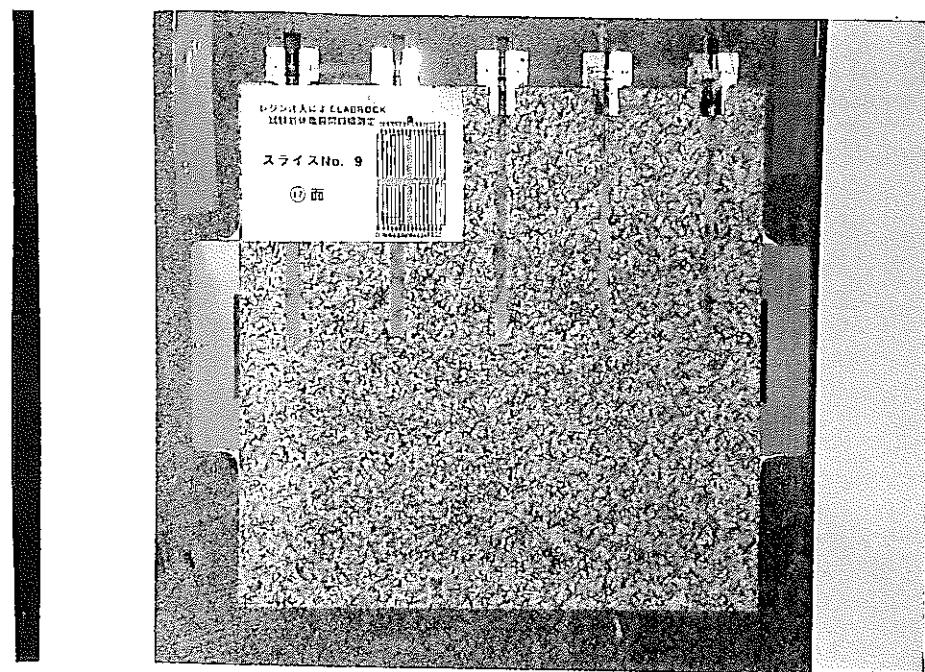
20面 (Y座標 194.46mm)



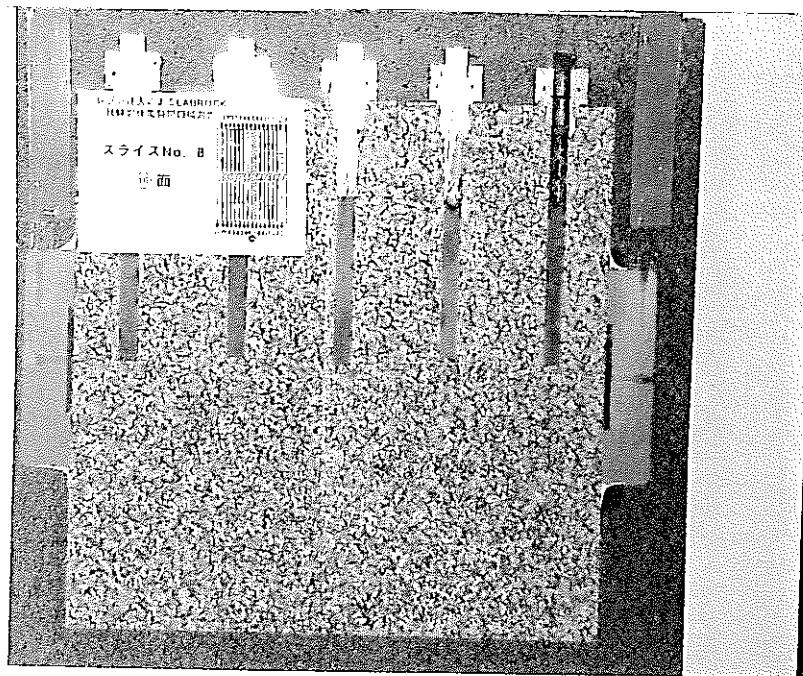
19面 (Y座標 216.01mm)



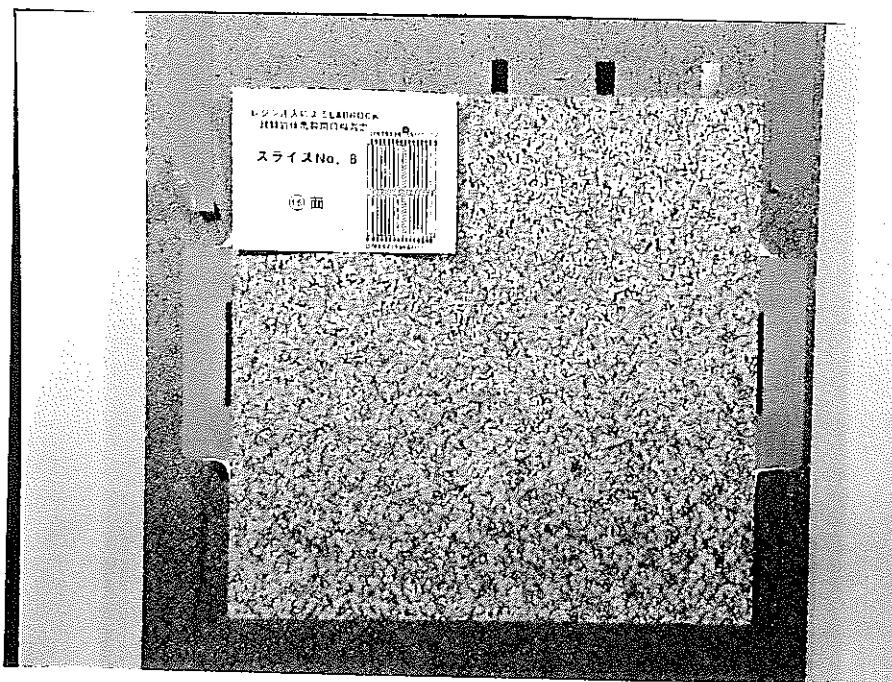
18面 (Y座標 224.43mm)



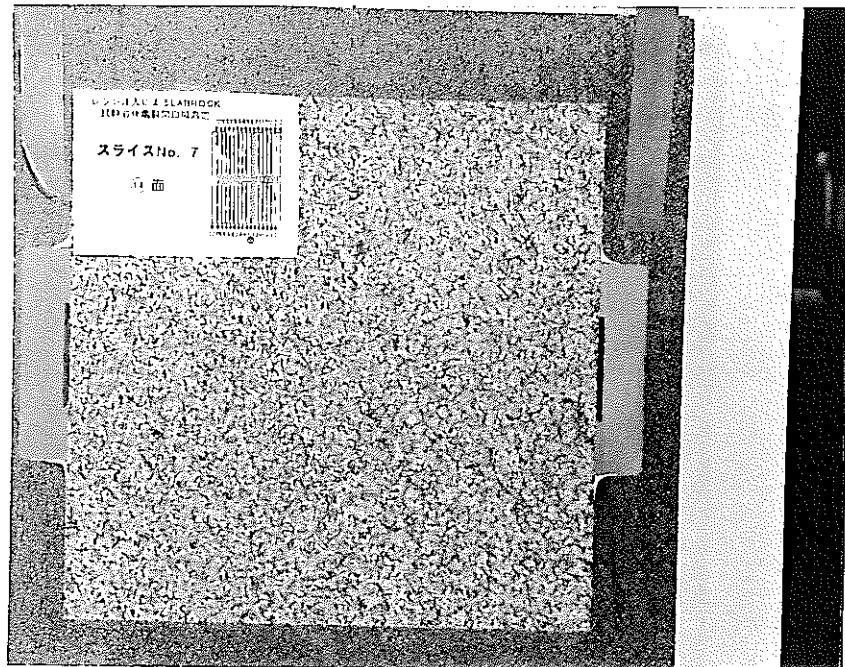
17面 (Y座標 245.66mm)



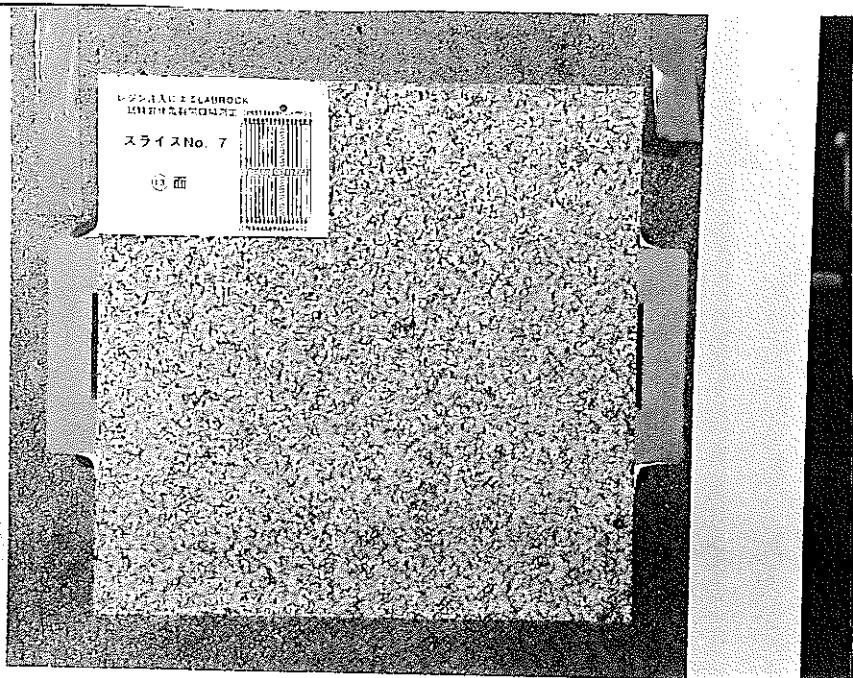
16面 (Y座標 254.08mm)



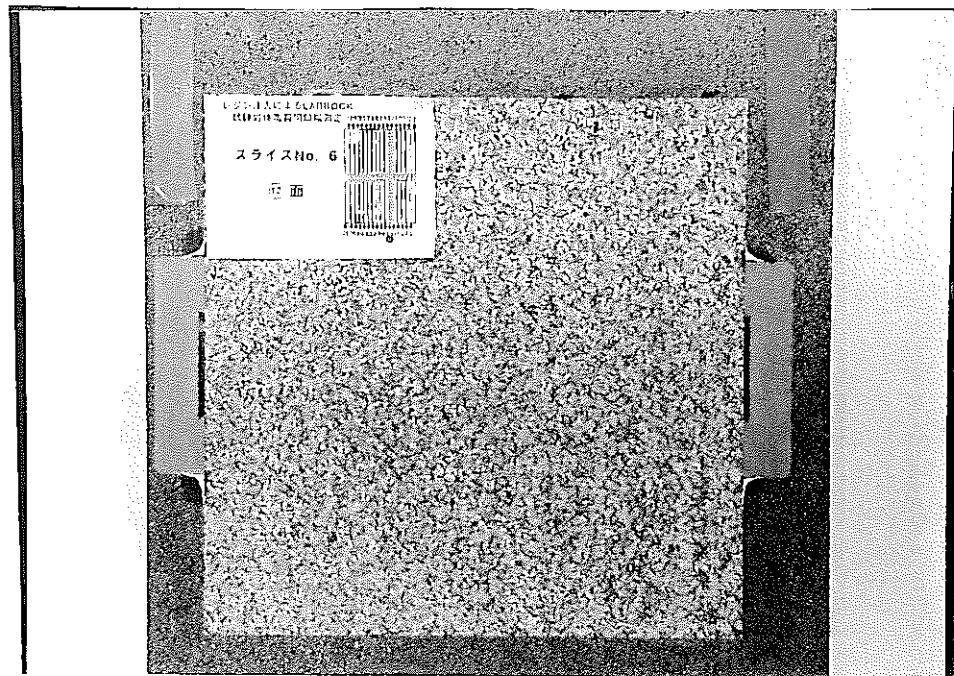
15面 (Y座標 275.54mm)



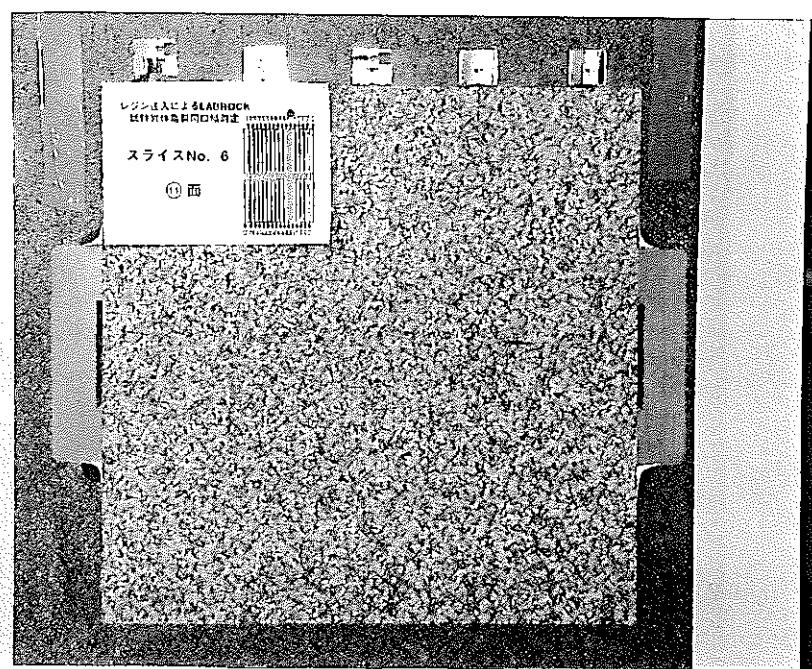
14面 (Y座標 283.90mm)



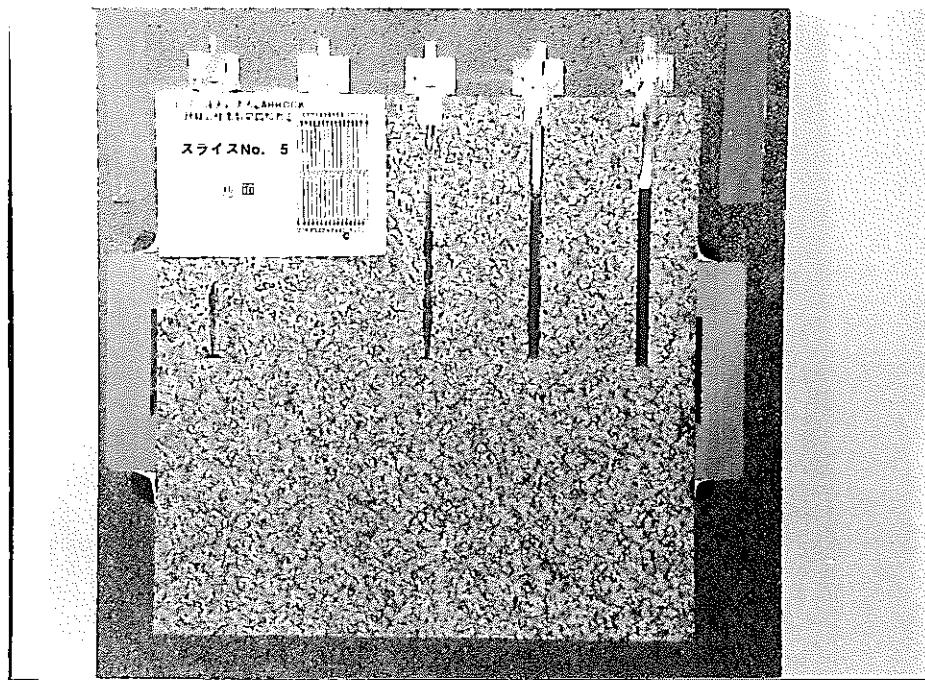
13面 (Y座標 306.14mm)



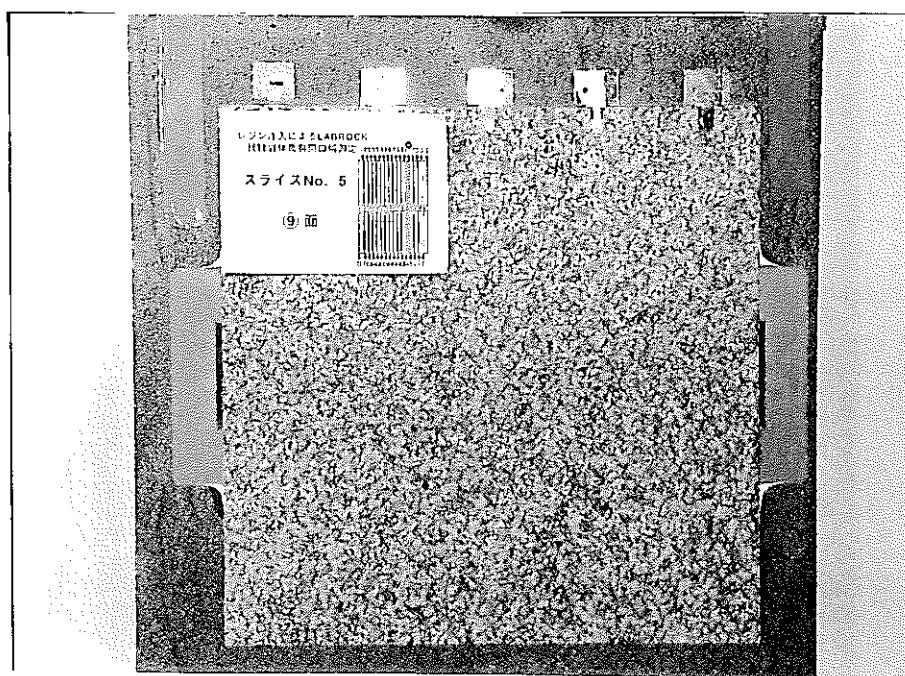
12面 (Y座標 314.87mm)



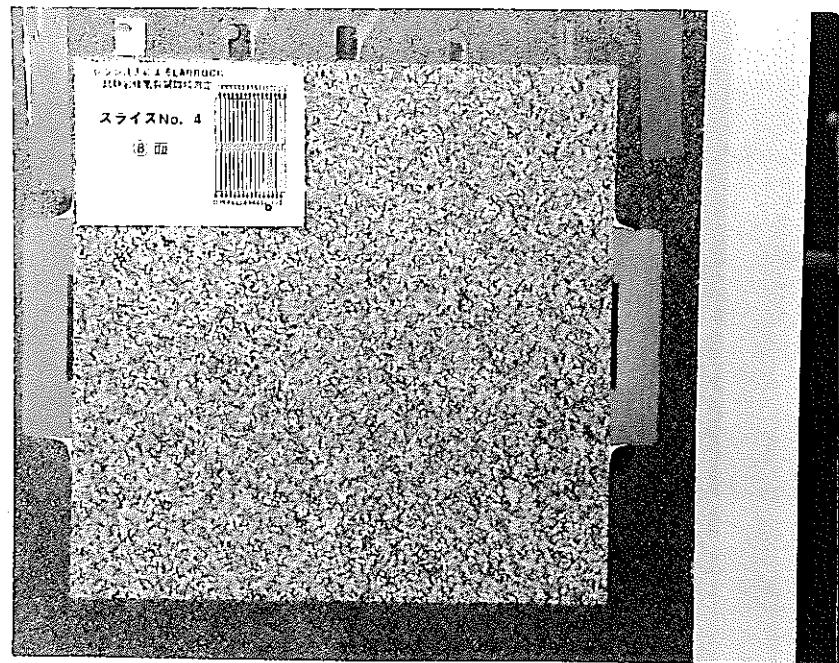
11面 (Y座標 335.37mm)



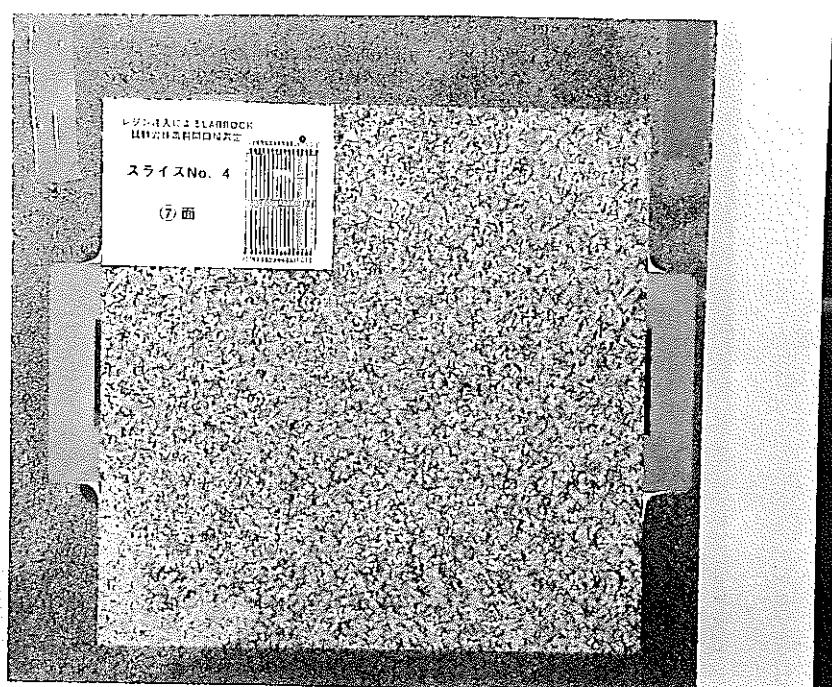
10面 (Y座標 343.87mm)



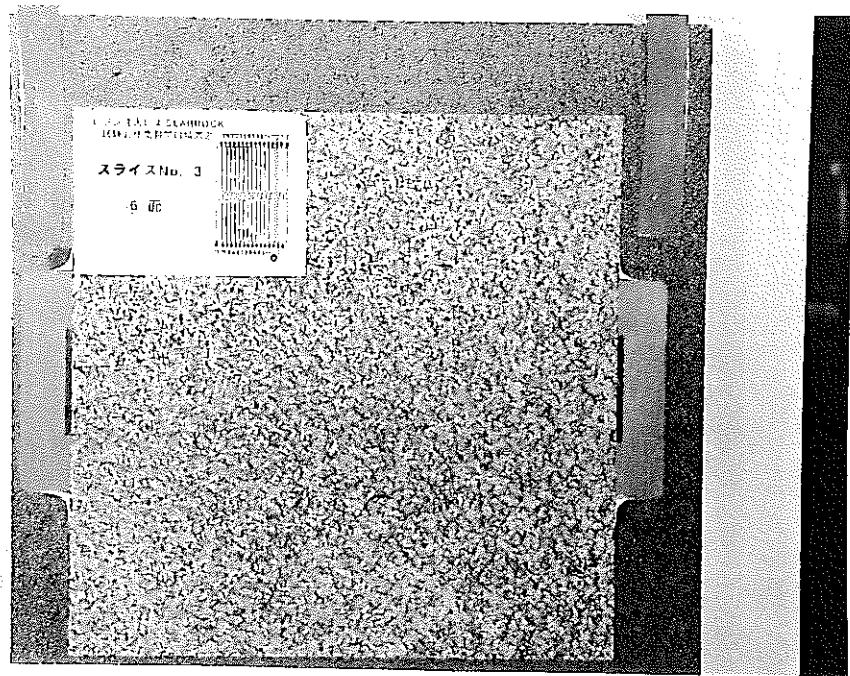
9面 (Y座標 365.82mm)



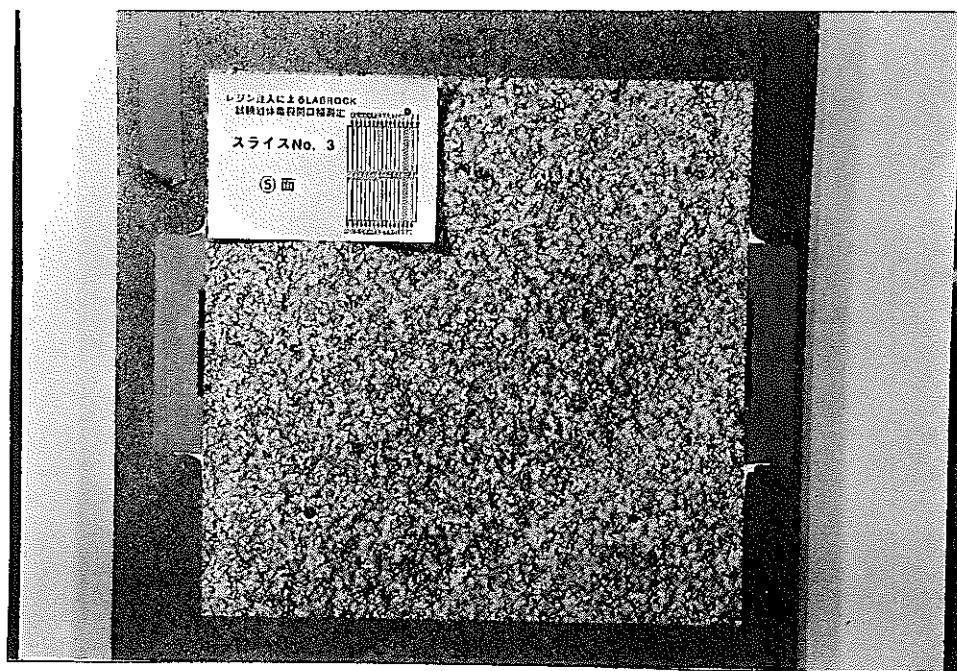
8面 (Y座標 374.79mm)



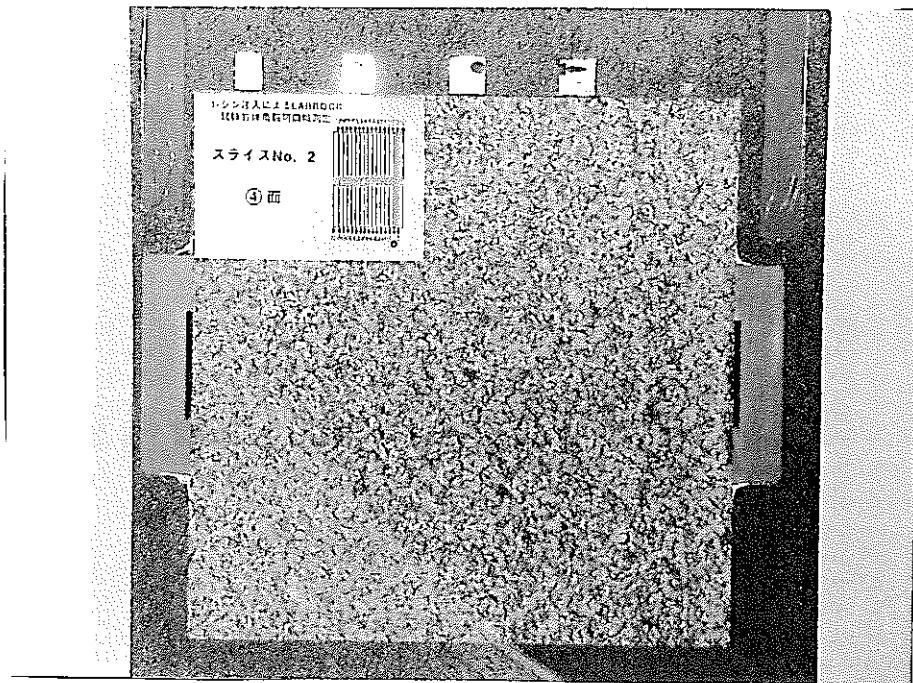
7面 (Y座標 395.20mm)



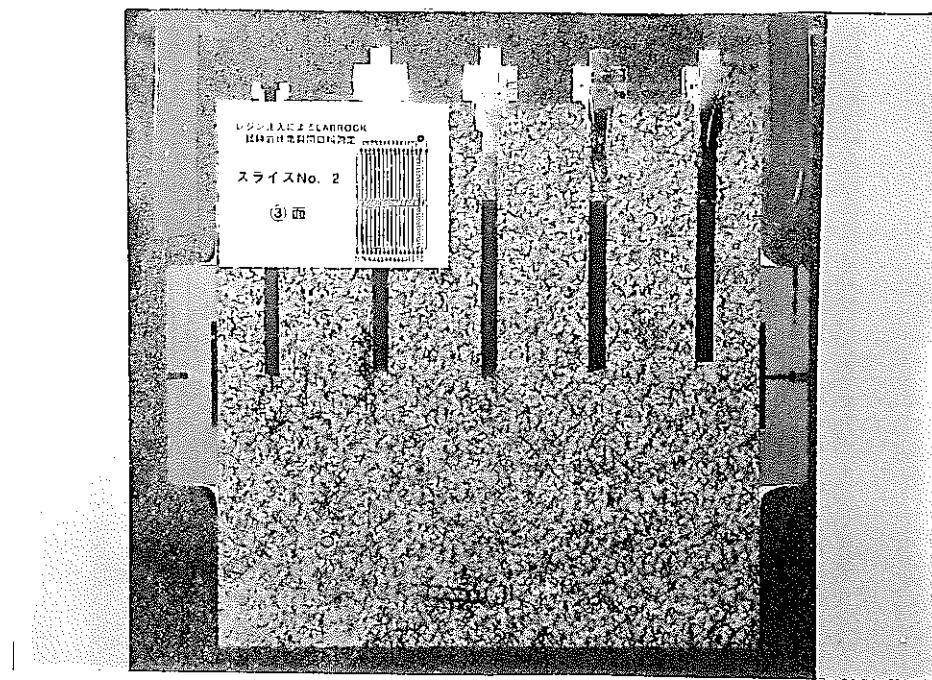
6面（Y座標 402.99mm）



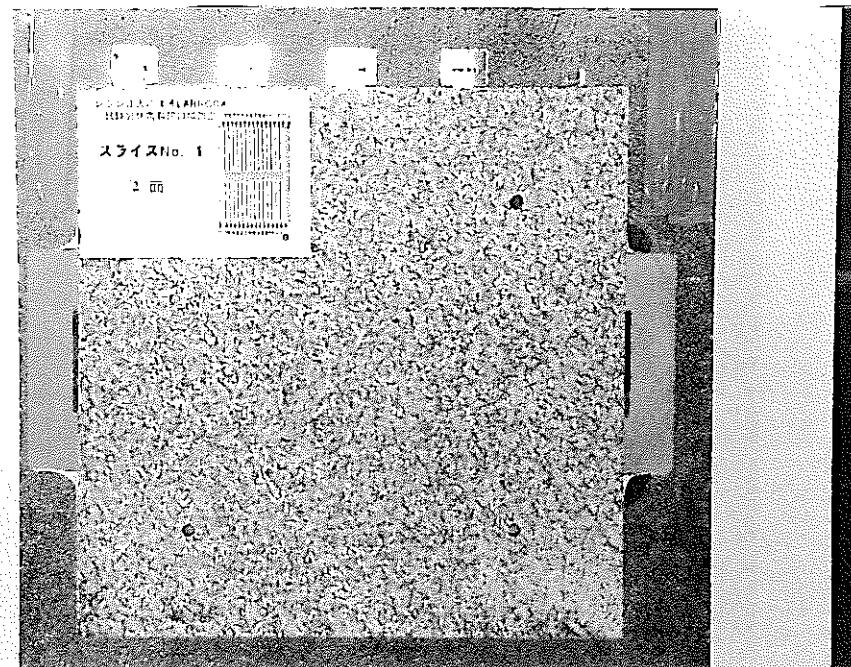
5面（Y座標 426.27mm）



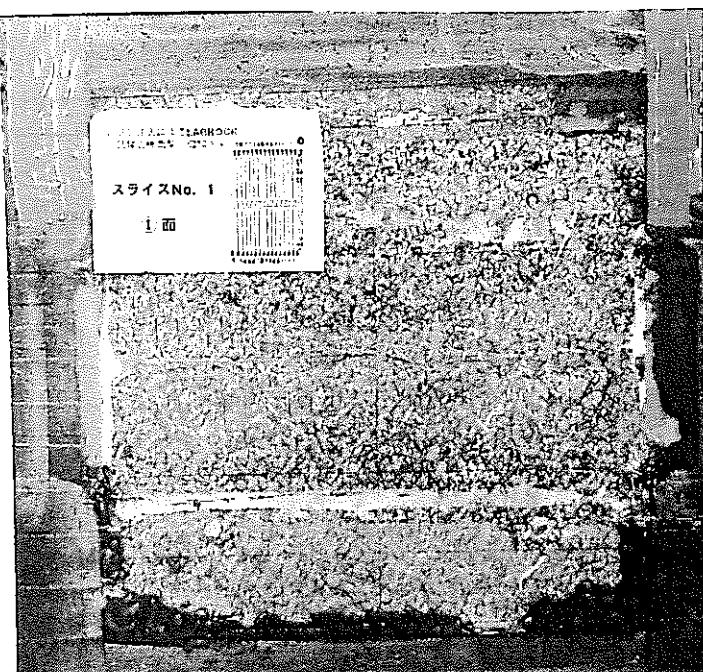
4面 (Y座標 433.89mm)



3面 (Y座標 456.17mm)



2面 (Y座標 464.07mm)

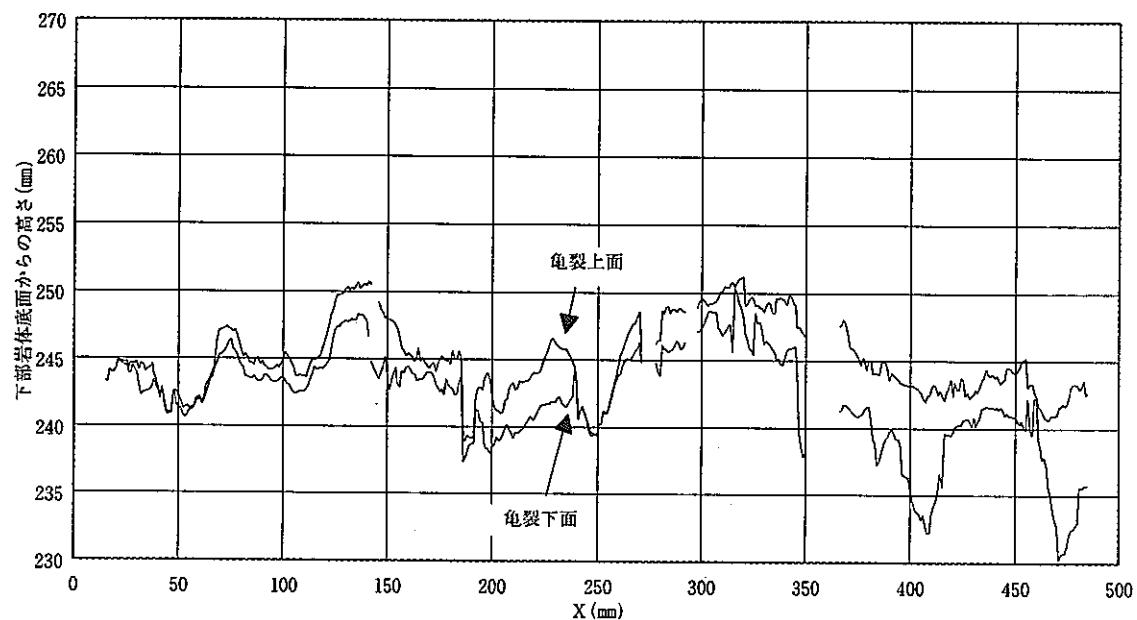


1面 (Y座標 500.00mm)

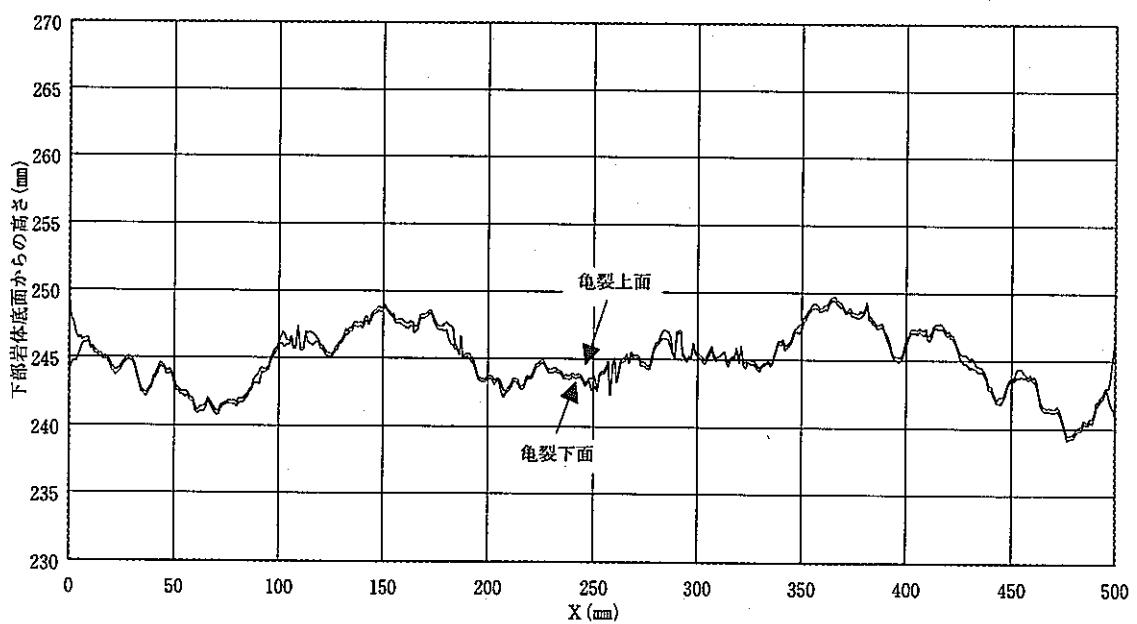
Appendix C レジン注入による亀裂面測定結果

表 スライス面とY座標の対応表

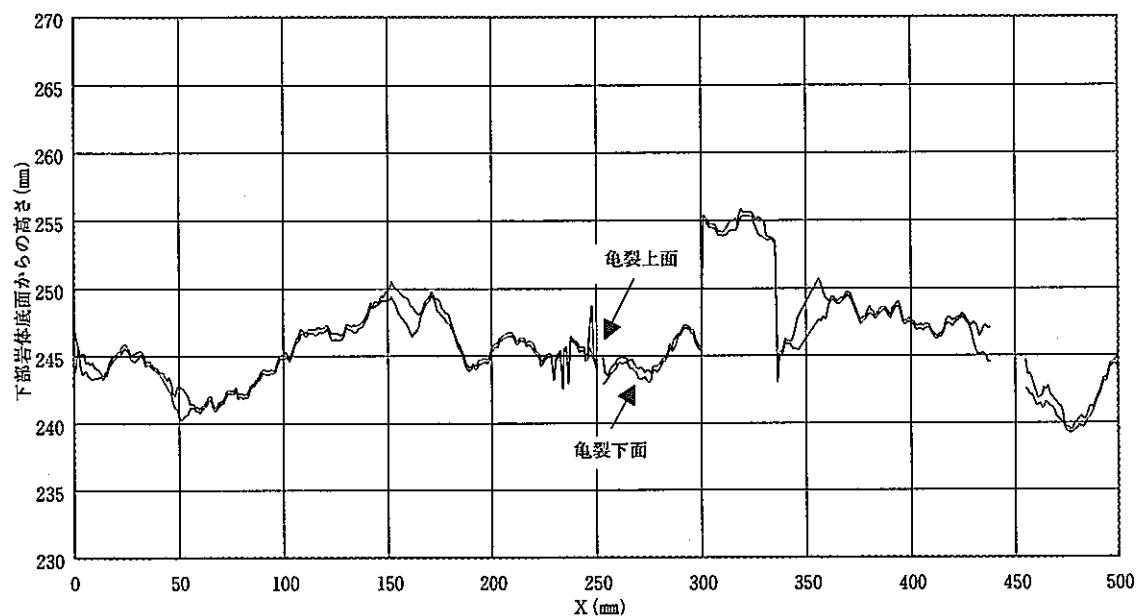
スライス面	Y座標(mm)
1	500.00
2	464.07
3	456.17
4	433.89
5	426.27
6	402.99
7	395.20
8	374.79
9	365.82
10	343.87
11	335.37
12	314.87
13	306.14
14	283.90
15	275.54
16	254.08
17	245.66
18	224.43
19	216.01
20	194.46
21	185.90
22	164.66
23	156.32
24	134.62
25	126.02
26	104.30
27	96.15
28	74.75
29	66.19
30	43.83
31	36.03
32	0.00



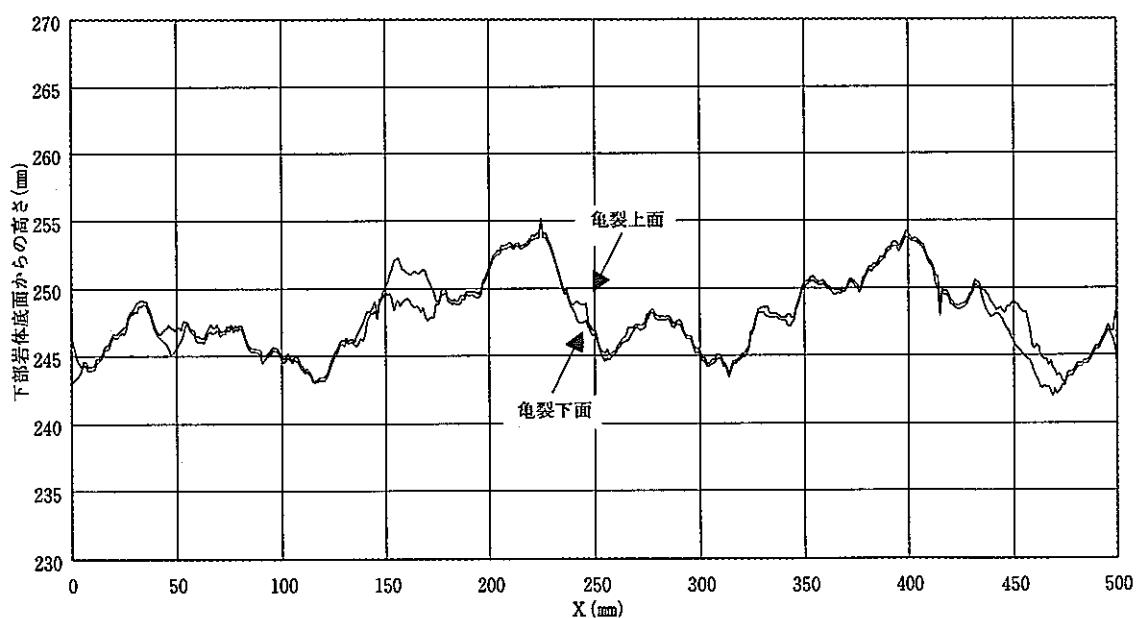
スライス面 32 Y 座標 : 0.00mm



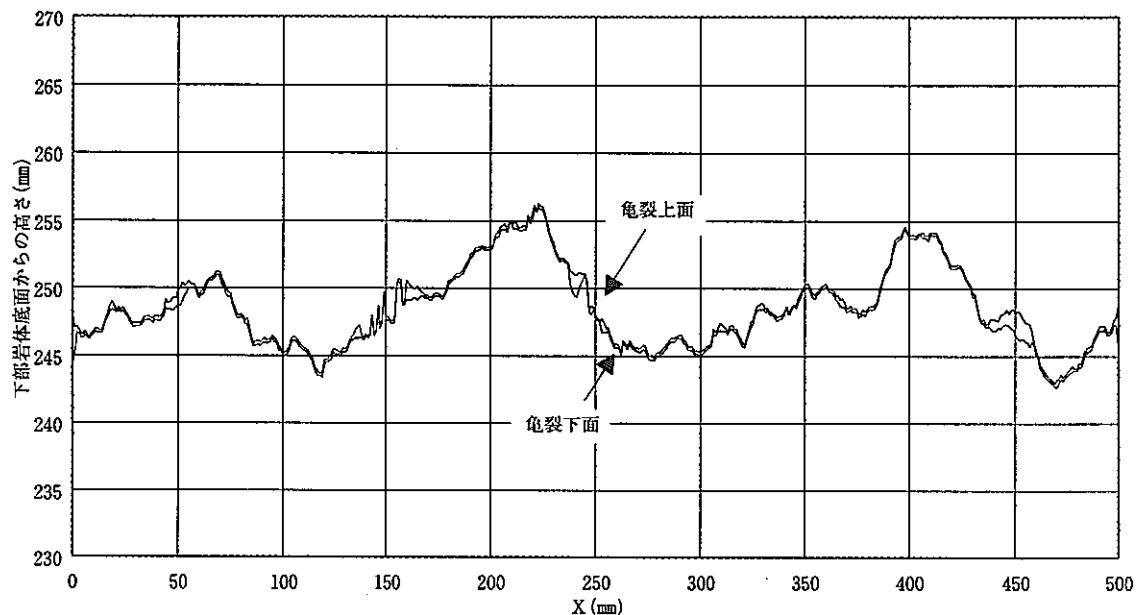
スライス面 31 Y 座標 : 36.03mm



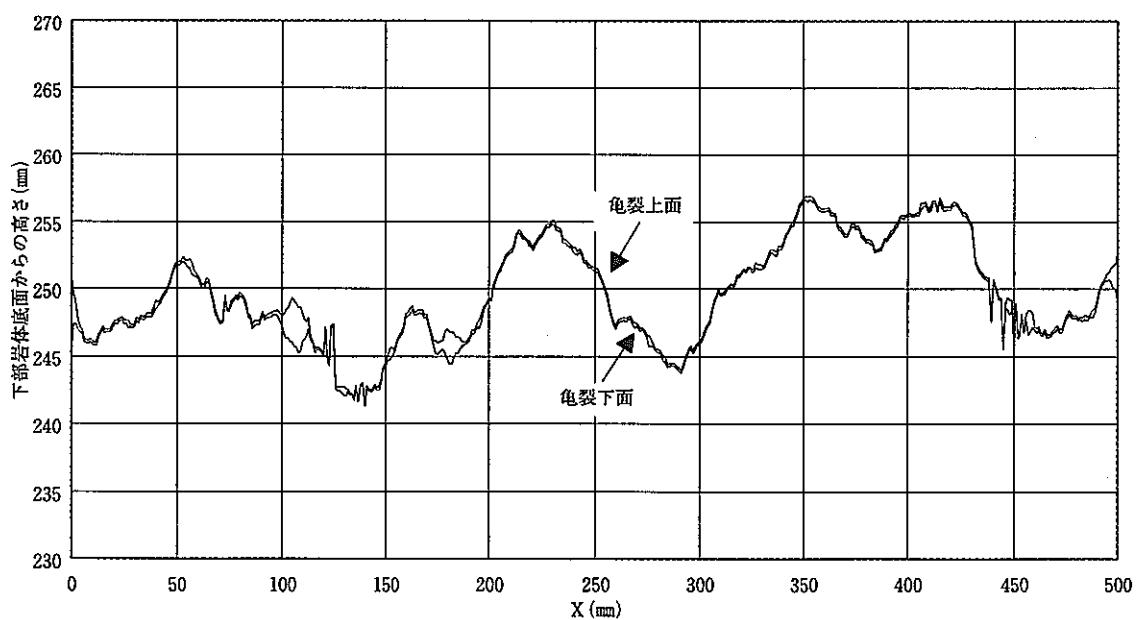
スライス面 30 Y座標 : 43.83mm



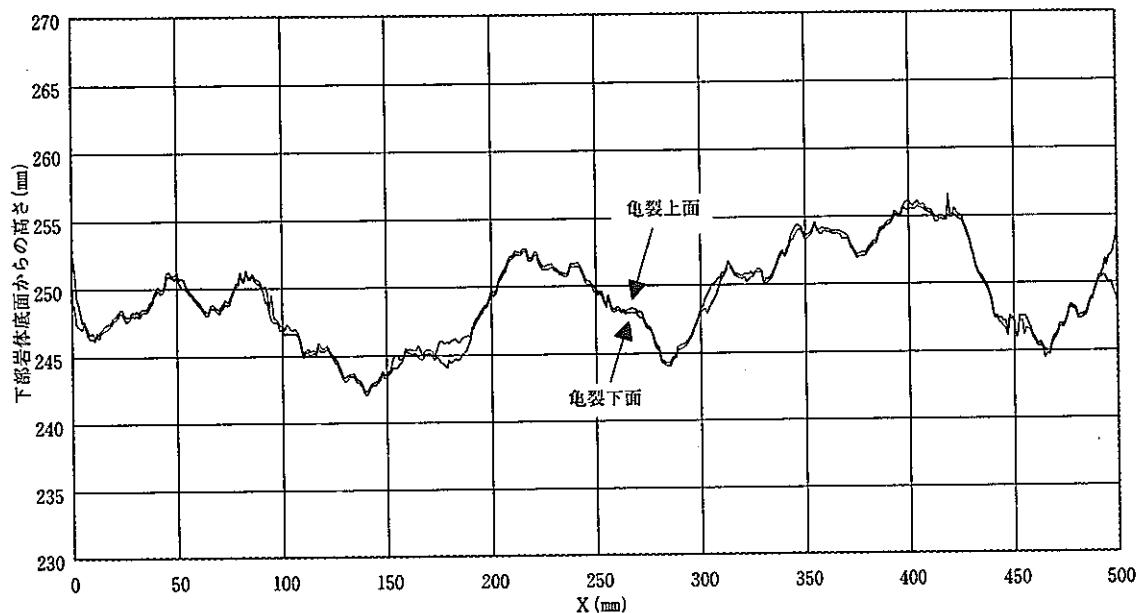
スライス面 29 Y座標 : 66.19mm



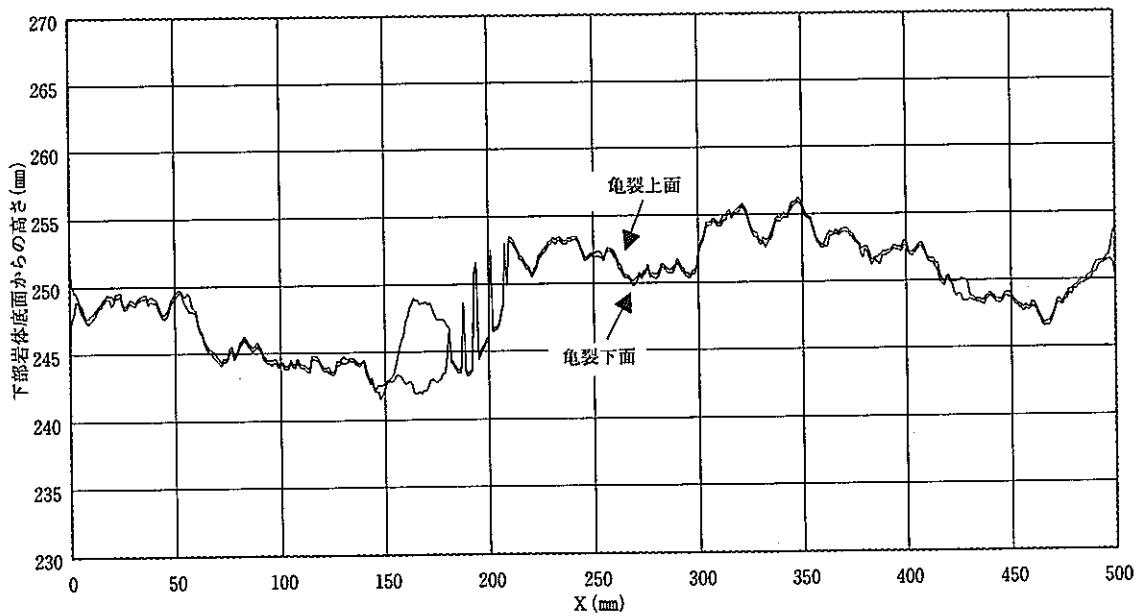
スライス面 28 Y座標 : 74.75mm



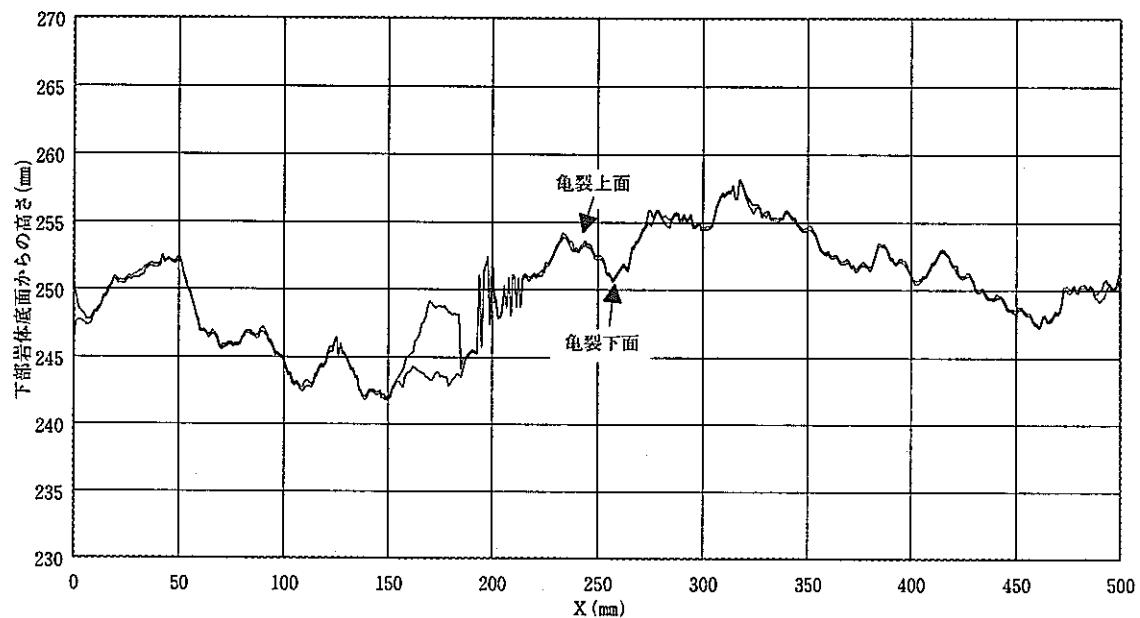
スライス面 27 Y座標 : 96.15mm



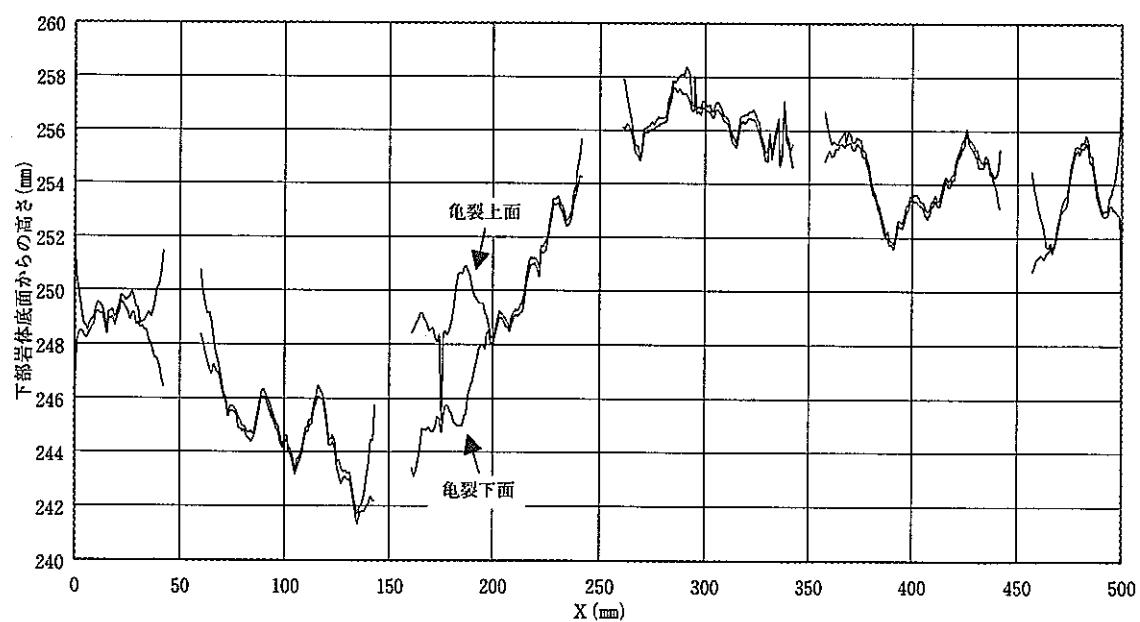
スライス面 26 Y 座標 : 104.3mm



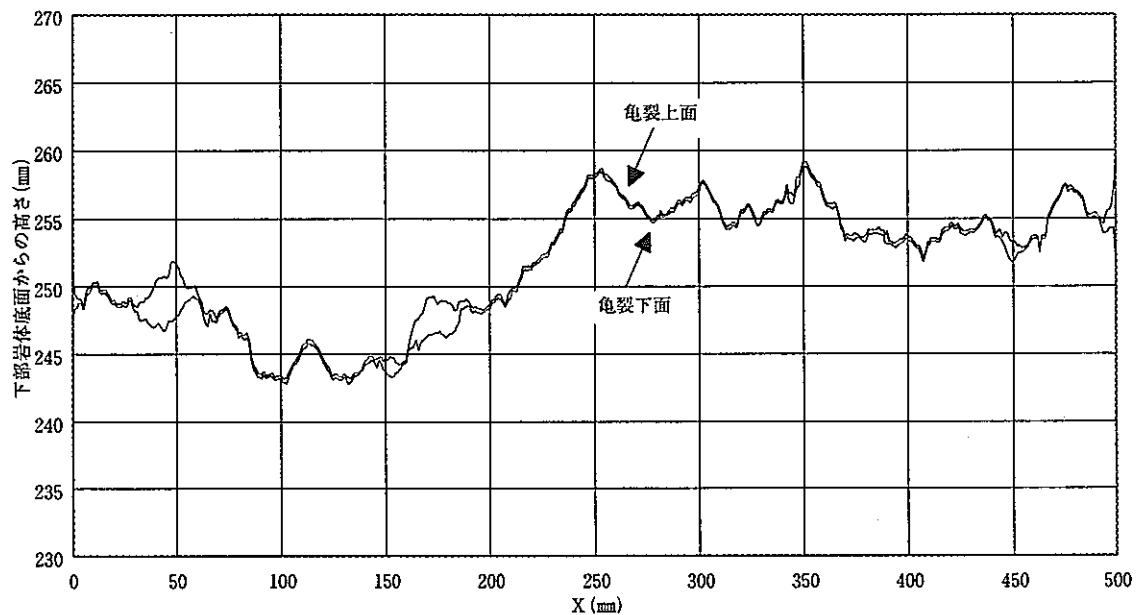
スライス面 25 Y 座標 : 126.02mm



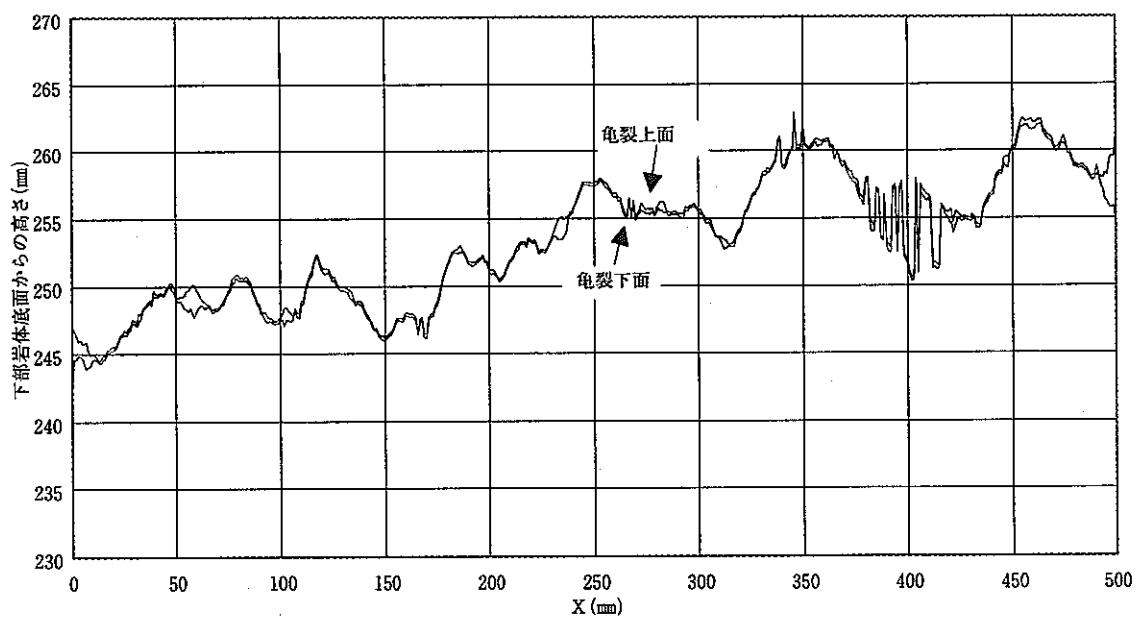
スライス面 24 Y 座標 : 134.62mm



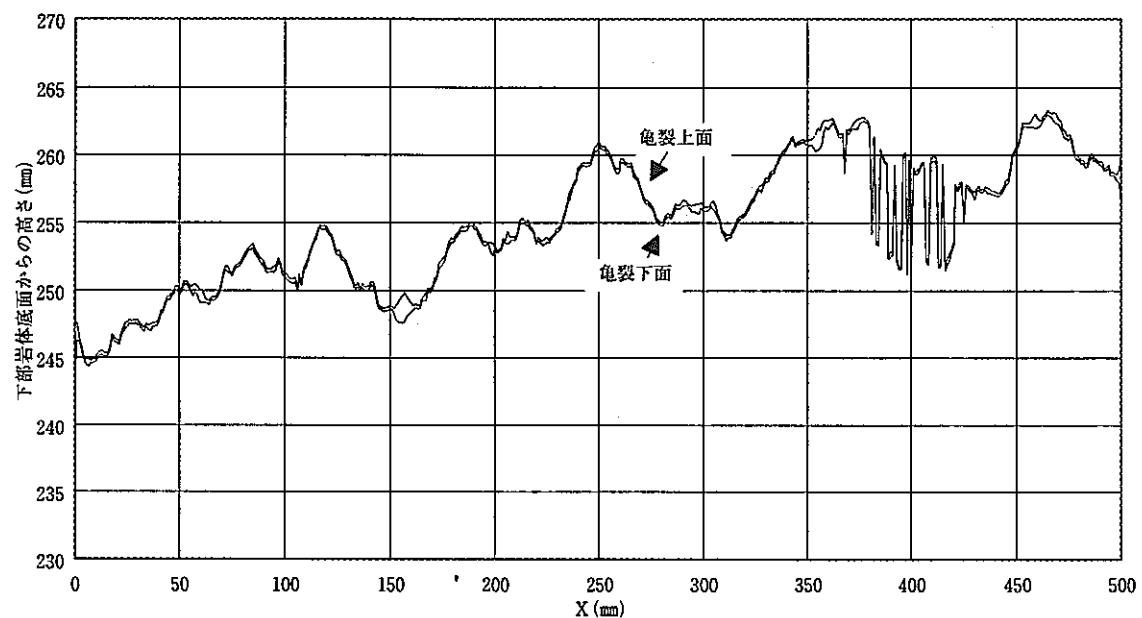
スライス面 23 Y 座標 : 156.32mm



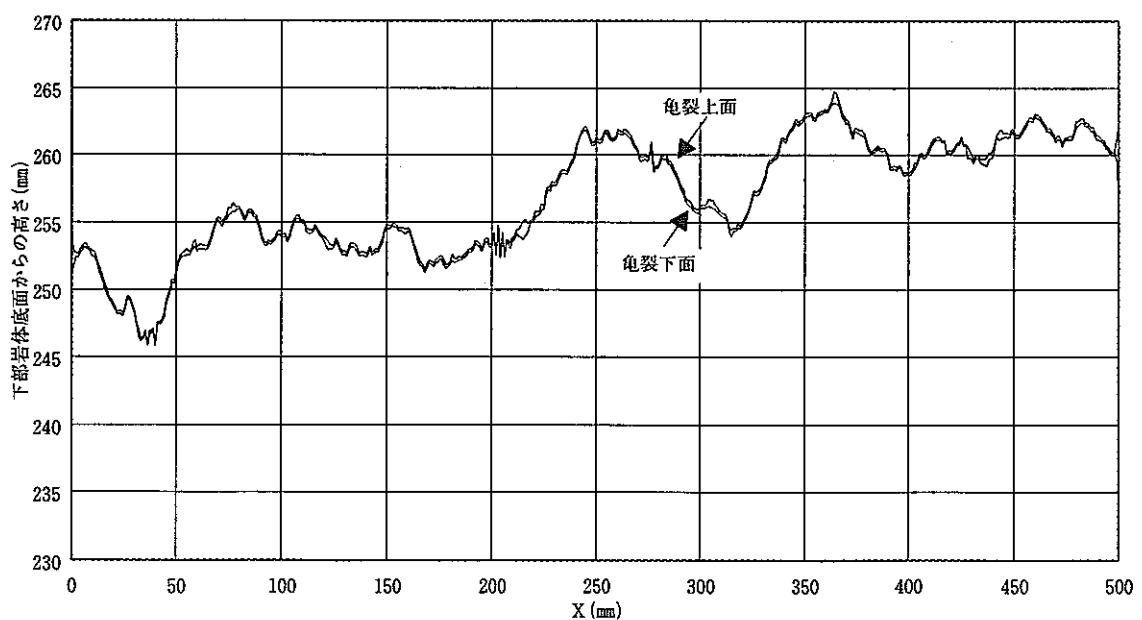
スライス面 22 Y座標 : 164.66mm



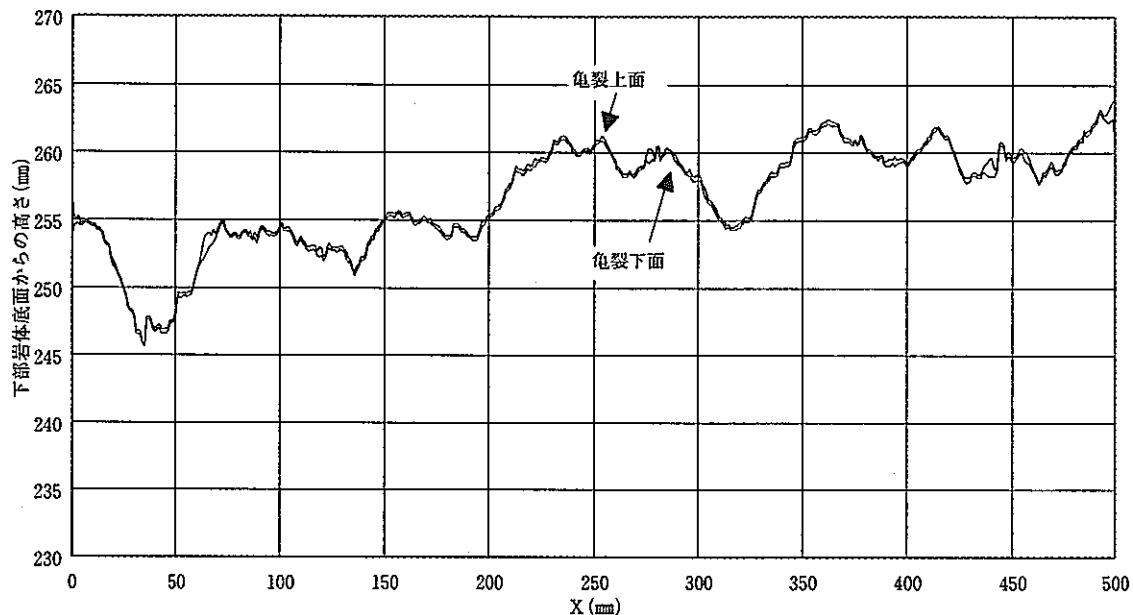
スライス面 21 Y座標 : 185.90mm



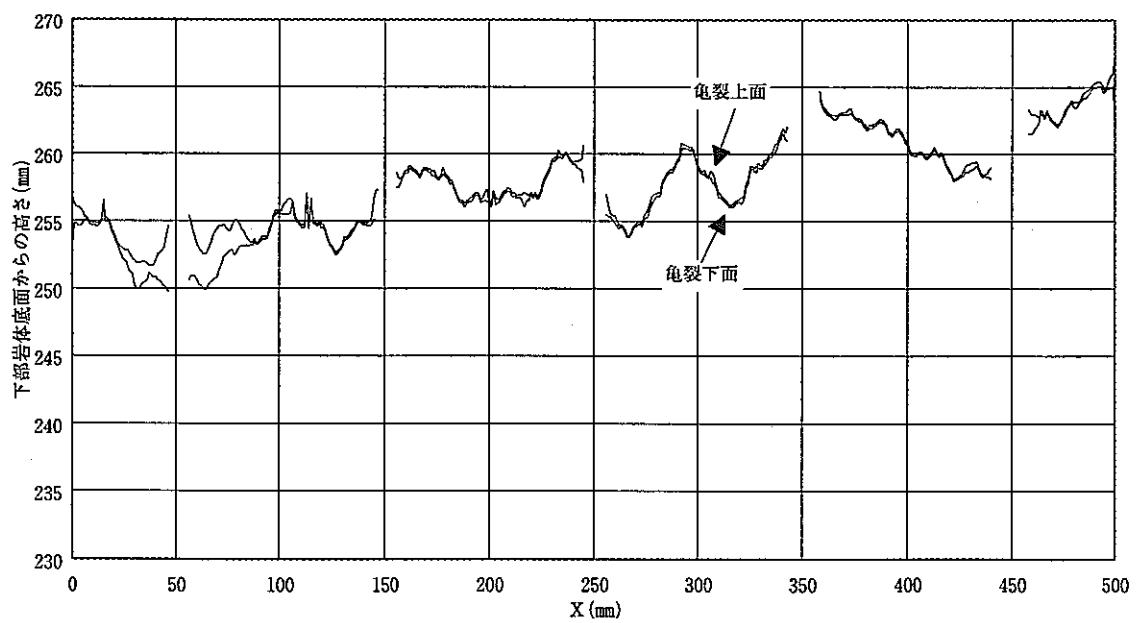
スライス面 20 Y 座標 : 194.46mm



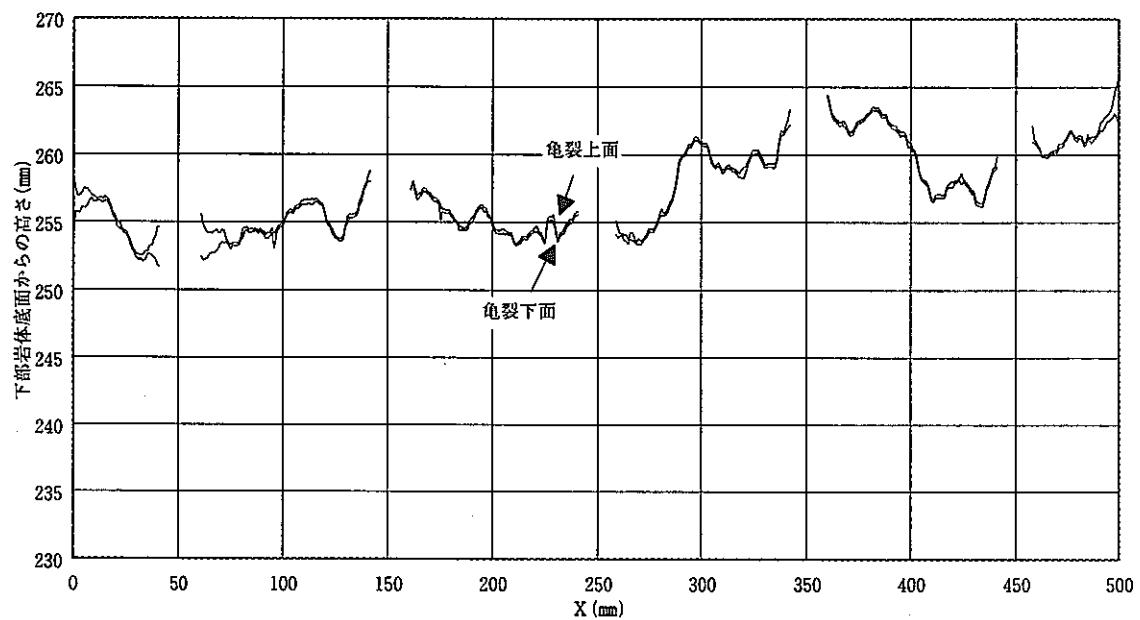
スライス面 19 Y 座標 : 216.01mm



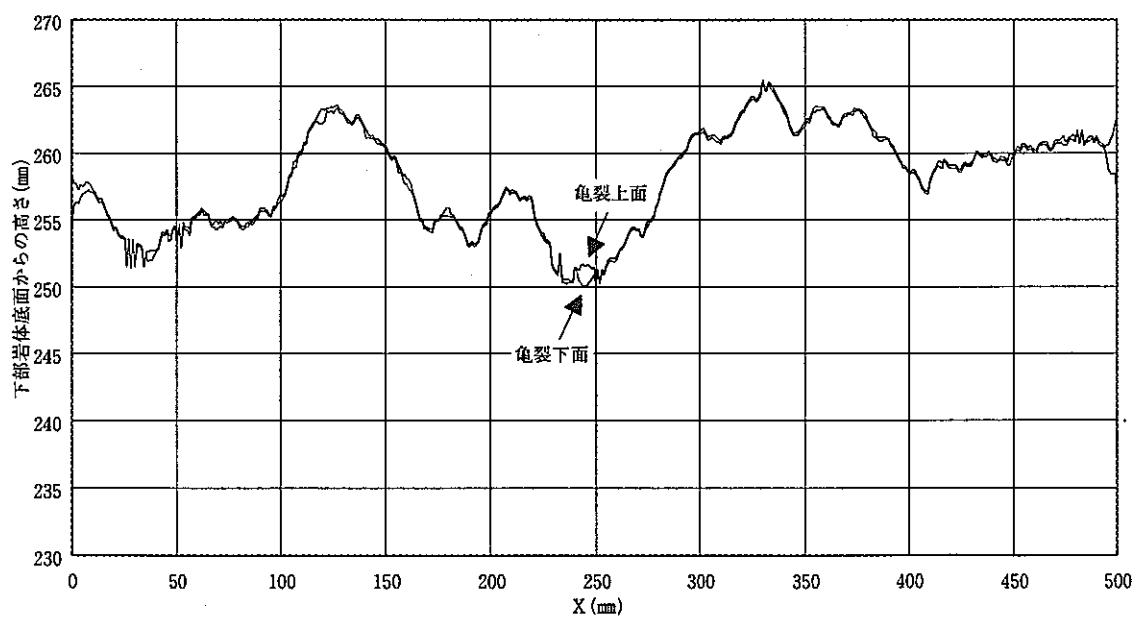
スライス面 18 Y 座標 : 224.43mm



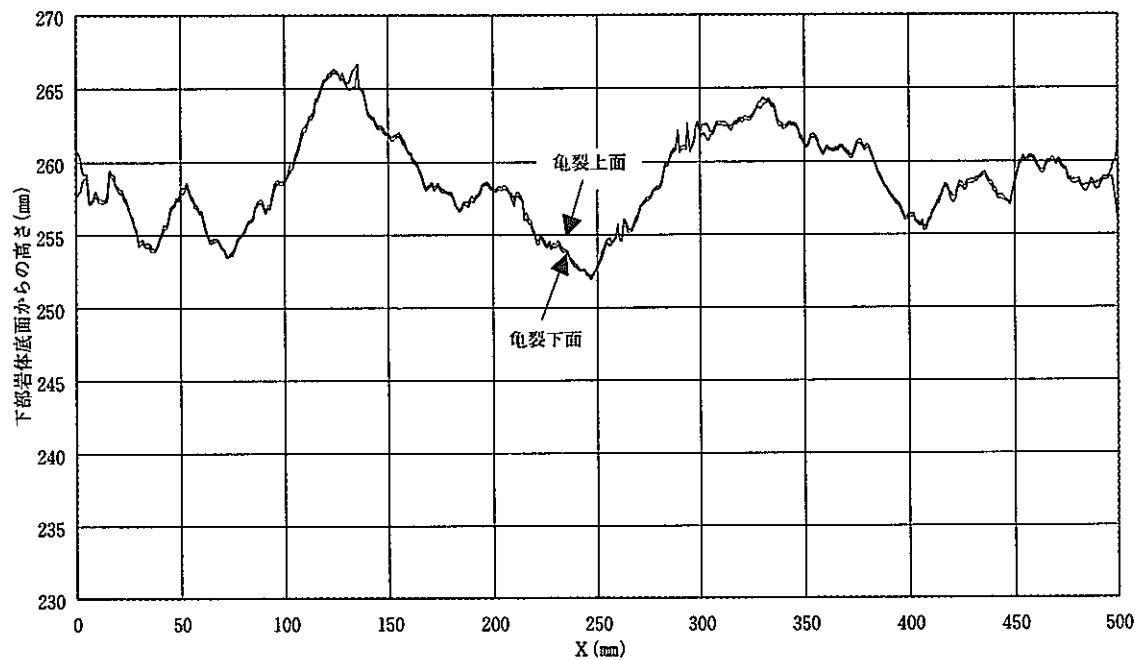
スライス面 17 Y 座標 : 245.66mm



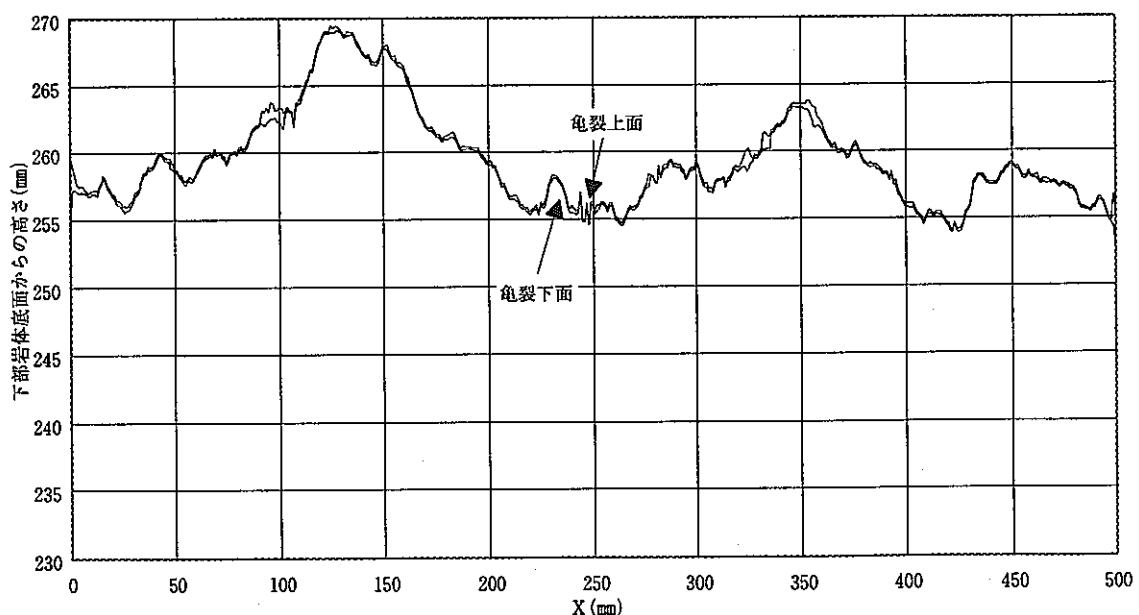
スライス面 16 Y 座標 : 254.08mm



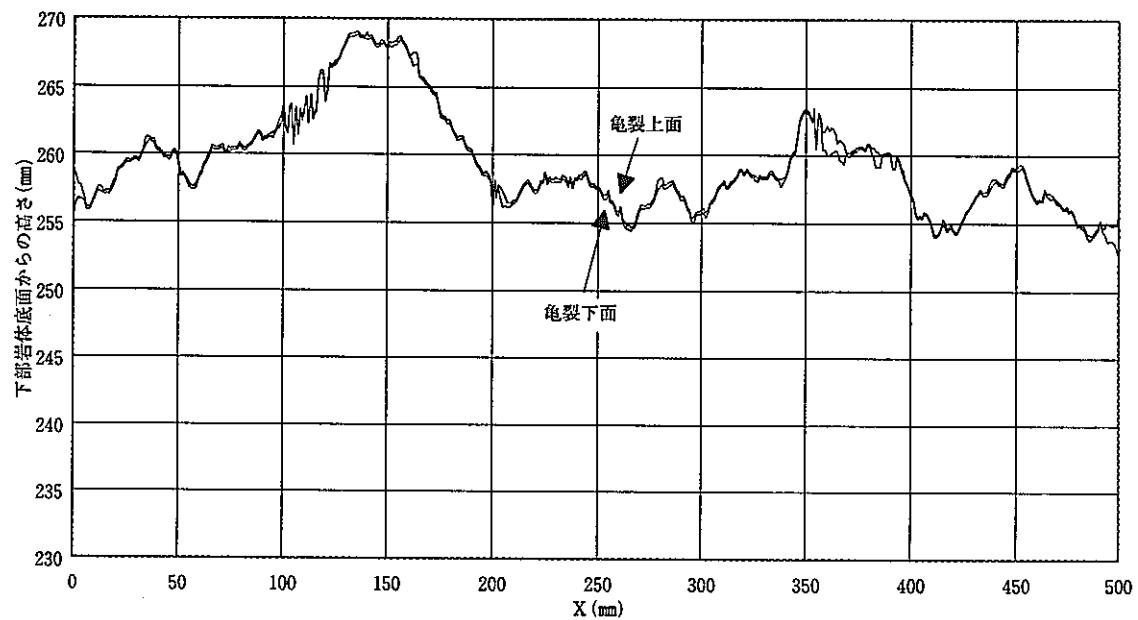
スライス面 15 Y 座標 : 275.54mm



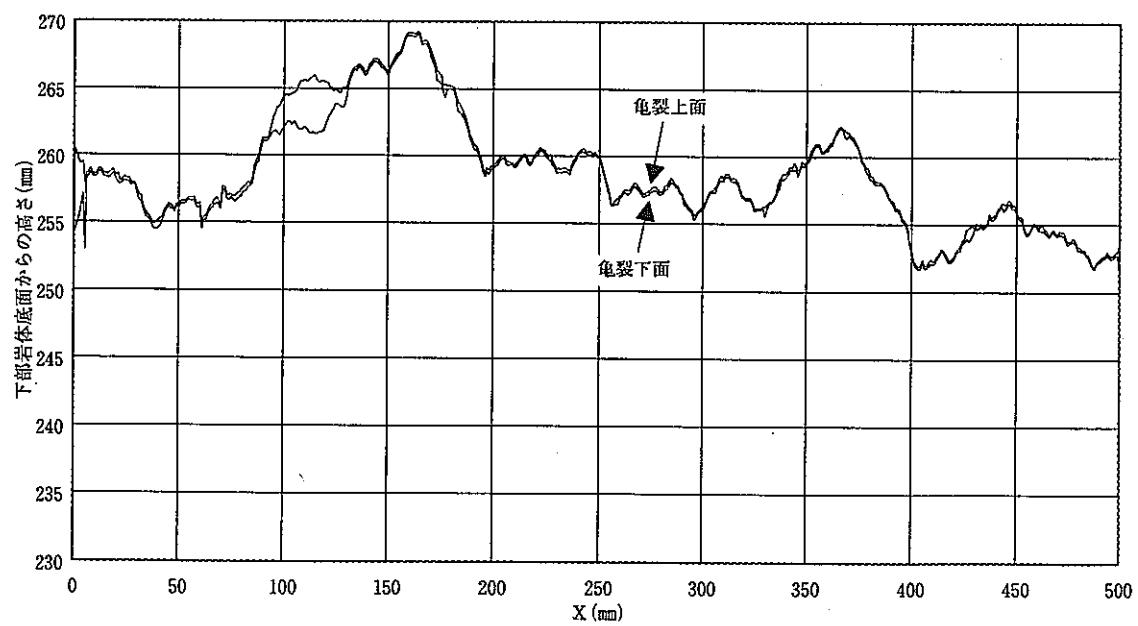
スライス面 14 Y 座標 : 283.90mm



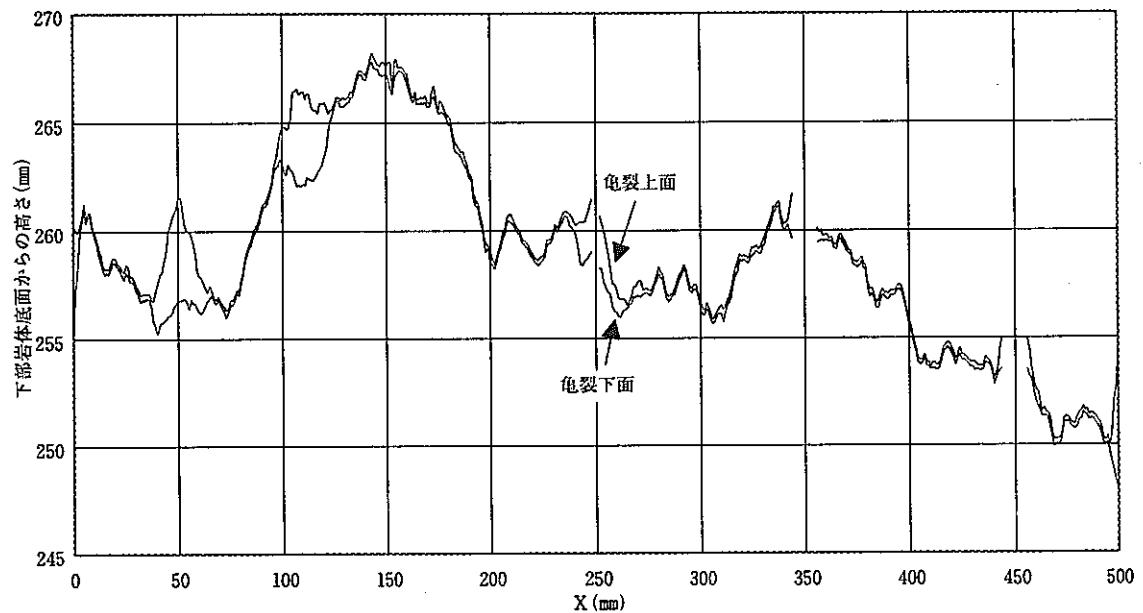
スライス面 13 Y 座標 : 306.14mm



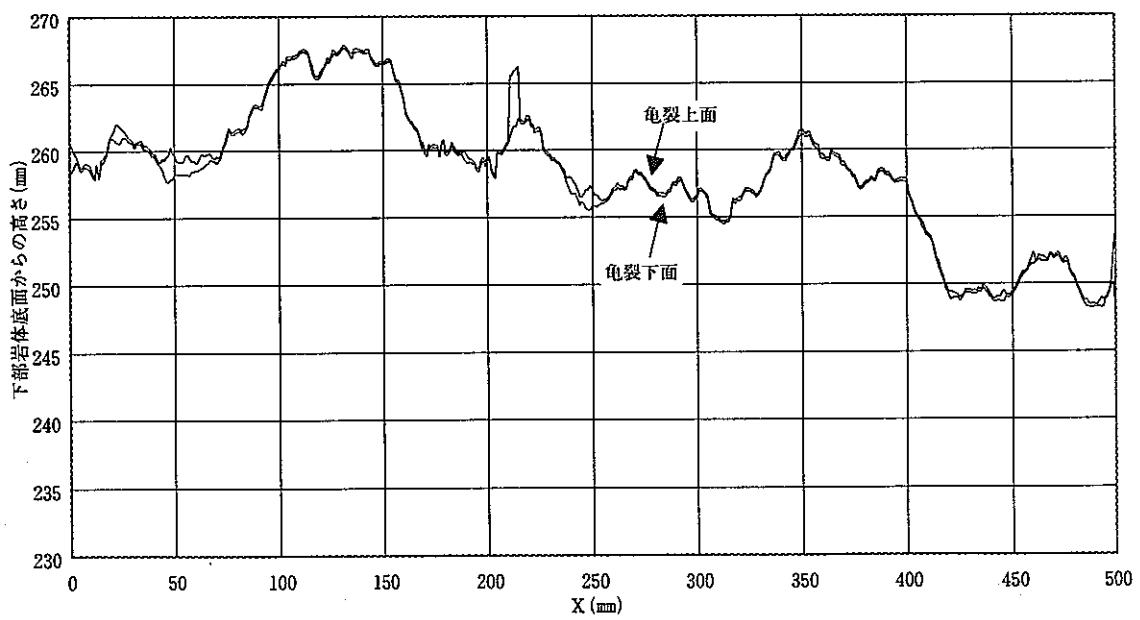
スライス面 12 Y 座標 : 314.87mm



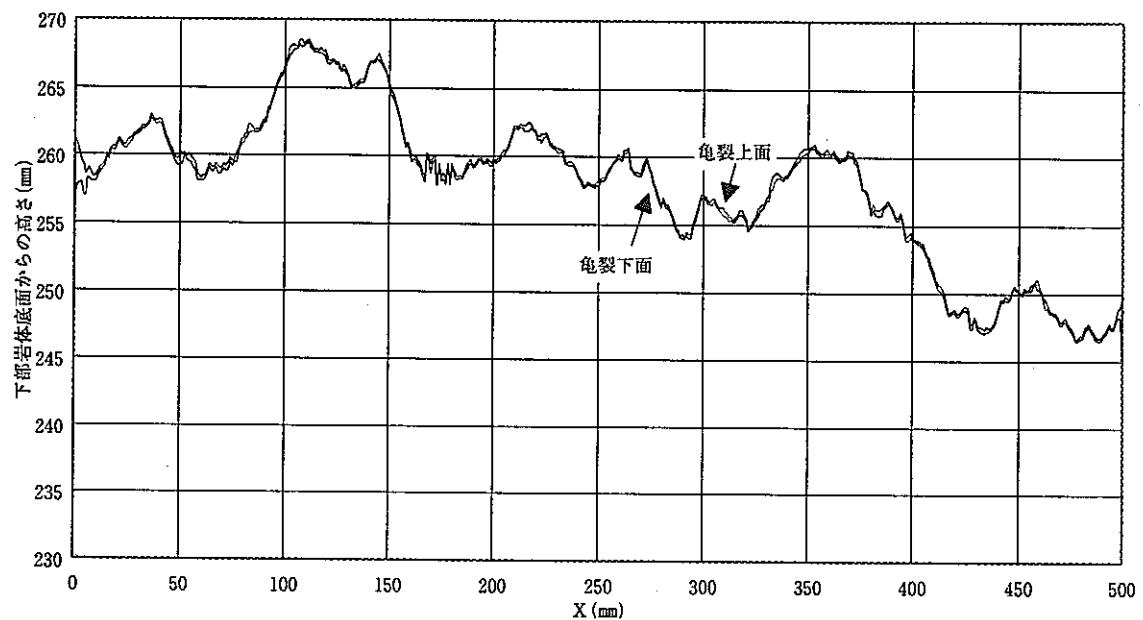
スライス面 11 Y 座標 : 335.37mm



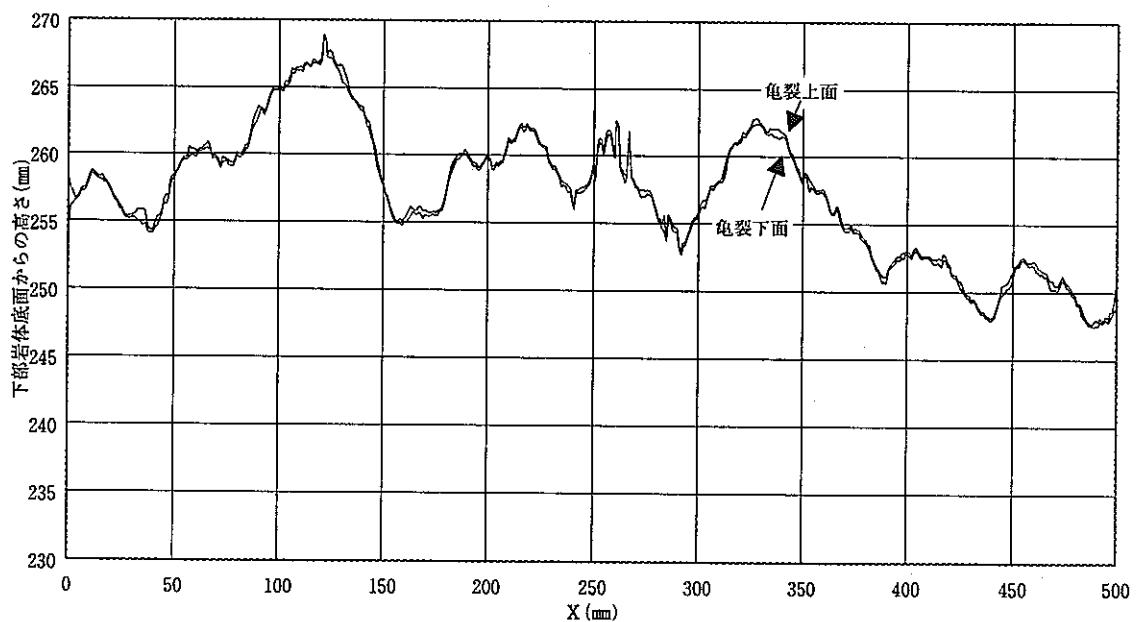
スライス面 10 Y座標 : 343.87mm



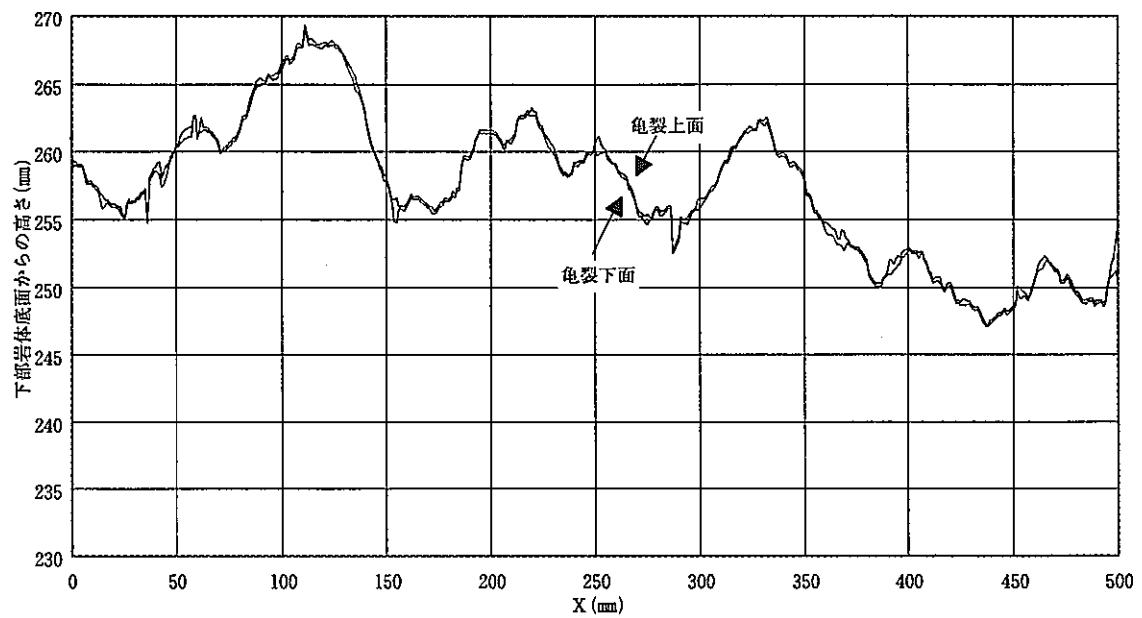
スライス面 9 Y座標 : 365.82mm



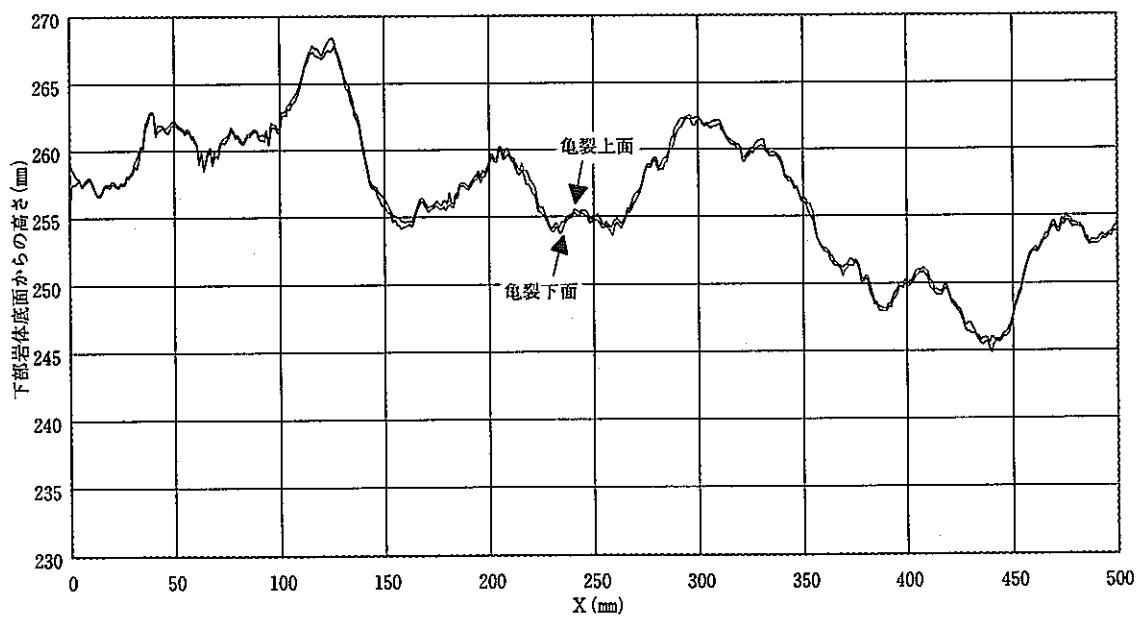
スライス面 8 Y座標 : 374.79mm



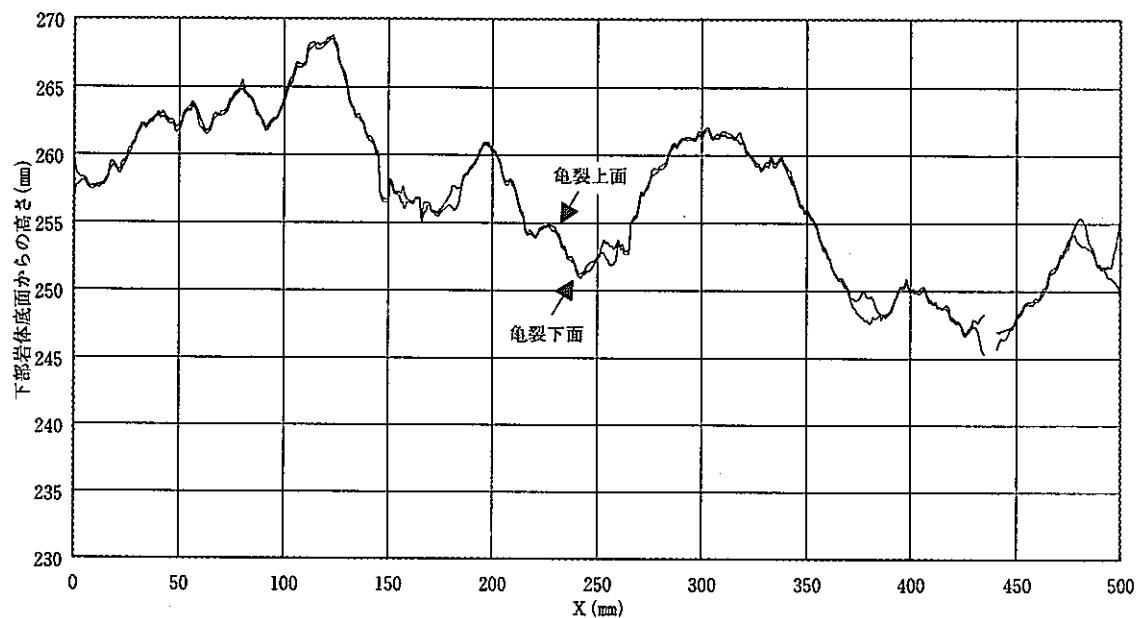
スライス面 7 Y座標 : 395.20mm



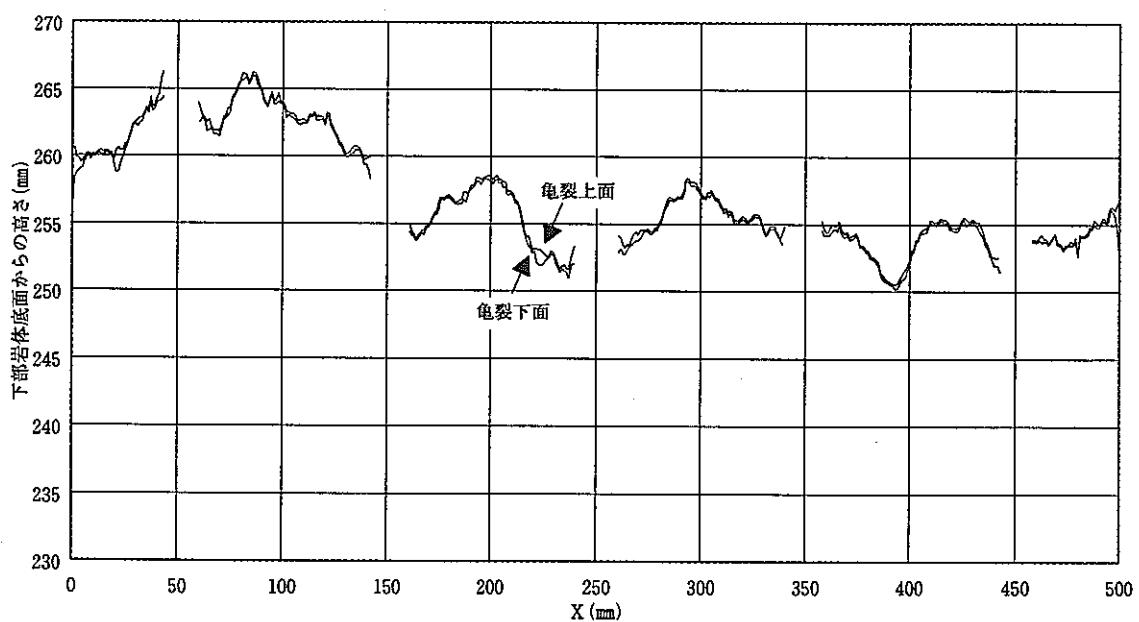
スライス面 6 Y座標 : 402.99mm



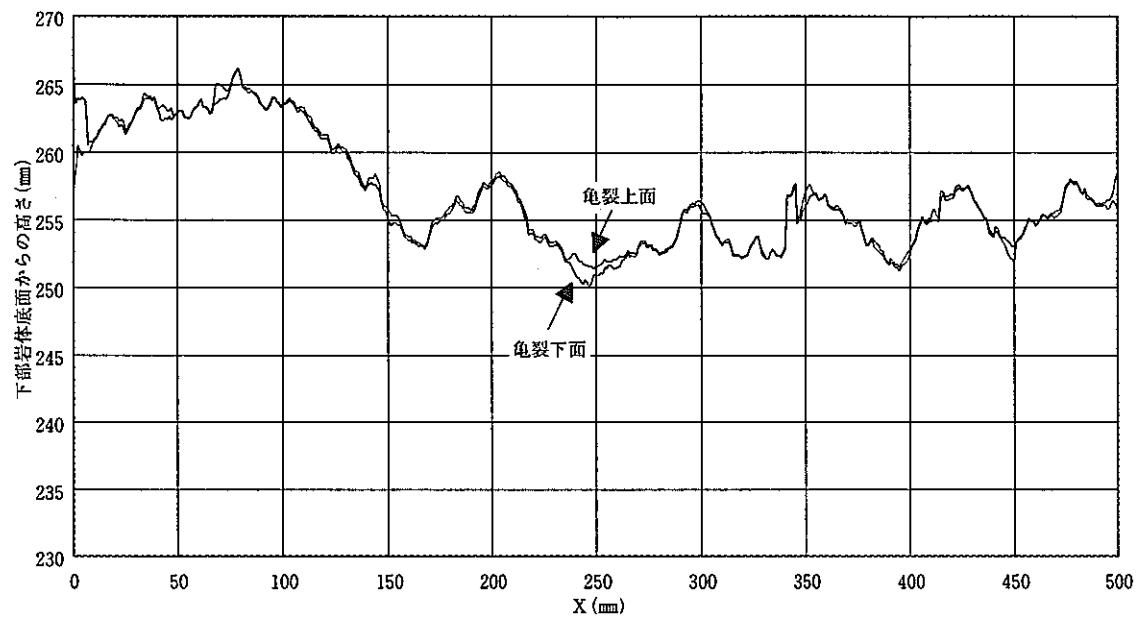
スライス面 5 Y座標 : 426.27mm



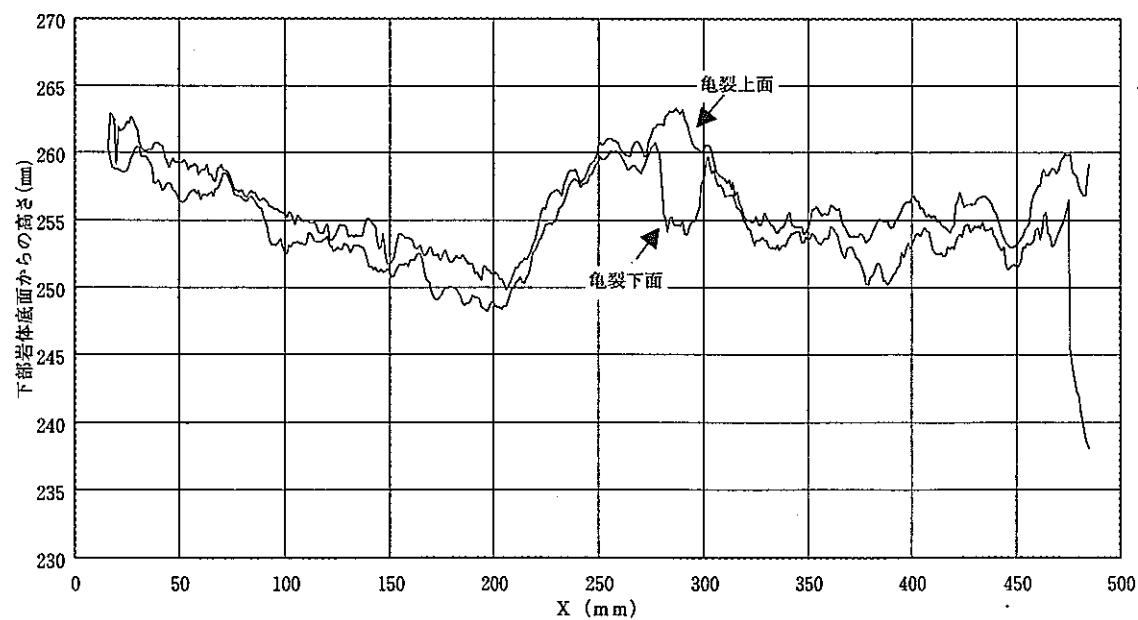
スライス面 4 Y 座標 : 433.89mm



スライス面 3 Y 座標 : 456.17mm



スライス面 2 Y座標 : 464.07mm



スライス面 1 Y座標 : 500.00mm