

小型圧力素子部品を用いた健全性・安全性評価法の研究

Research of the soundness and the safeness appraisal method using small pressure element parts

鈴木裕士¹⁾ 鴨志田武²⁾ 鈴木睦男²⁾ 皆川宣明²⁾ 東海林昭³⁾ 富永亮³⁾

Hiroshi Suzuki Takeshi Kamoshida Mutuo Suzuki Nobuaki Minakawa Akira Tokairin Ryo Tominaga

¹⁾原子力機構

²⁾ひたちなかテクノセンター

³⁾青山製作所

母材、ダイヤモンド材共、ステンレス材で製作された小型部品を圧接した圧力素子の、母材及びダイヤモンド材各々の内部応力分布を中性子回折法により分離して測定し、残留応力値、応力分布から安全性及び健全性の検討を行い、原子力機構が開発した同種材料を混同することなしに測定する技術を本測定で立証すると共に、安全性、健全性評価方法の研究を行い、良好な結果を得た。

キーワード：内部残留応力、中性子回折法、圧力センサ、圧接法、ひずみ・応力分布、安全性・健全性評価

1、目的 マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403 (BCC 構造体) を母材とし、析出効果系ステンレス鋼 SUS630 (BCC 構造体) をダイヤモンドとした体心立方格子部品を圧接により接合させた圧力センサの、同種材料圧接部近傍残留応力測定を行い、圧力センサの安全性、健全性評価法の検討を行う。

2、測定方法 JRR-3 中性子導管室 T2-1 ポート 残留応力解析用中性子回折装置 (RESA) を用い中性子回折法による、内部残留応力を測定した。測定試料は、小型試料であり、圧接部母材 SUS403 及び圧力センサ部 SUS630 の内部応力分布を知るために測定間隔も 0.75mm と狭い範囲の測定を行った。試料取付は、以前にマーキングした上部ラインを原点に取り付け、測定位置を決定した。第 1 図に試料寸法ならびに測定位置を示す。16 箇所の測定位置における三軸方向ひずみを測定し、合計 48 のデータを得た。

入射スリットと、散乱側スリットで作られる測定容積 (Gauge volume) が散乱角度により異なることを利用し、SUS403 の測定では、SUS630 への中性子入射が無い様な測定指数 (h, k, l) を次の様に選択し、測定を行った。RADIAL 方向の測定では、SUS403 及び SUS630 共、(110) 回折を用い、HOOP 方向の測定には両材料共 (211) 回折を使用した。測定時間は、RESA 装置の S/N が優れていることから、回折ピーク角度で 50 カウント以上となる測定時間を各測定位置の浸入深さに合わせ設定した。測定は平成 18 年 4 月 20 日より 24 日まで実施され、次の手順で遂行された。

- ① 装置に対するビーム位置調整
- ② 使用ビーム寸法における波長検定
- ③ 試料取付位置調整
- ④ 測定
- ⑤ データ整理
- ⑥ データ解析・まとめ

2-1、測定条件 RESA 装置の条件は、以下の通りである。

単色化結晶：曲げ応力負荷 Si (311) × 5 枚による垂直方向集光

単色化波長：0.207361 nm 波長検定結果を第 1 表に示す。

ビームコリメーション：入射ビーム (単色化結晶から試料) 0.35° 散乱側 0.33°

中性子ビームは、入射側に (W) 1mm × (H) 1mm の Cd スリットで作られるビームを用い、散乱側には、回折デバイリングの取込み範囲を多くし、強度増強のために、(W) 1mm × (H) 10mm のスリットを使用した。試料の微小部分測定であるため、位置設定精度が重要であるため、トランシットを用い測定原点を決定し、駆動・設定精度が 1/100 mm の X, Y, Z 三軸ゴニメーター上に、水平位置微小調整機構を取り付け、その上部に試料をセットし測定を行った。第 2 図及び第 3 図、に測定の様子を示す。

2-2、データ解析 全 48 測定データの Gauss fitting 結果を、第 4 図に示す。Gaussian fitting で得られた回折角ピーク位置から格子面間隔 $d(hkl)$ を求め、SUS403 及び SUS630 材料を粉末化しマクロひずみを開放した試料による回折パターンから求めた無ひずみ格子面間隔 $d_0(hkl)$ を用い、各位置における三方向ひずみ $\epsilon(R, H, A)$ を求

めた。第2表に SUS403 及び SUS630 の無ひずみ格子面間隔を示す。応力換算には、フックの法則より得られる次式 (9-1) を用い演算し求めた。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_R &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\varepsilon_R(1-\nu) + \nu(\varepsilon_H + \varepsilon_A)] \\ \sigma_H &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\varepsilon_H(1-\nu) + \nu(\varepsilon_R + \varepsilon_A)] \\ \sigma_A &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\varepsilon_A(1-\nu) + \nu(\varepsilon_H + \varepsilon_R)] \end{aligned} \right\} \quad (9-1)$$

ここで、弾性定数 E (hkl) とポアソン比 ν については、次に示す Kröner モデルにより得られたフェライト系鉄鋼材料の各回折面弾性定数を用いた。

回折面	110	200	211
縦弾性係数 E (GPa)	224	174	224
ポアソン比	0.28	0.33	0.28
面間隔	0.202685	0.143320	0.117020

2-3、応力換算結果

9-1 式を用いて、三軸ひずみより換算された各位置における応力値を第3表に示し、各方向毎の残留応力分布を第5図に示す。

3、考察

今回の測定は、第1図に示す様に、垂直断面内における対称な位置の応力を測定し、第5図に示す分布となった。ダイヤフラム SUS630 材の、左右の分布では勾配の傾向は類似しているものの各軸応力共 100MPa から 300MPa の差が観察され対称ではない。

母材である SUS403 についても、各軸方向共 100MPa から 200MPa の差異がある。SUS403 下方にあつては対称である。この結果から予想されることは、圧接時の不均一な圧縮加工、あるいはダイヤフラムの動きが考察される。再現性を見るために、前回測定 (H17-5C) で測定した結果と比較した。第4表比較のための表を示す。前回は対称位置測定を行っていないため、今回の測定位置から 90° の関係位置の測定である。

また、事前に発注者により予測計算された FEM によるひずみ分布図を第6図に示す。上記した考察があるとなれば、前回の測定結果もほぼ適合していると言える。

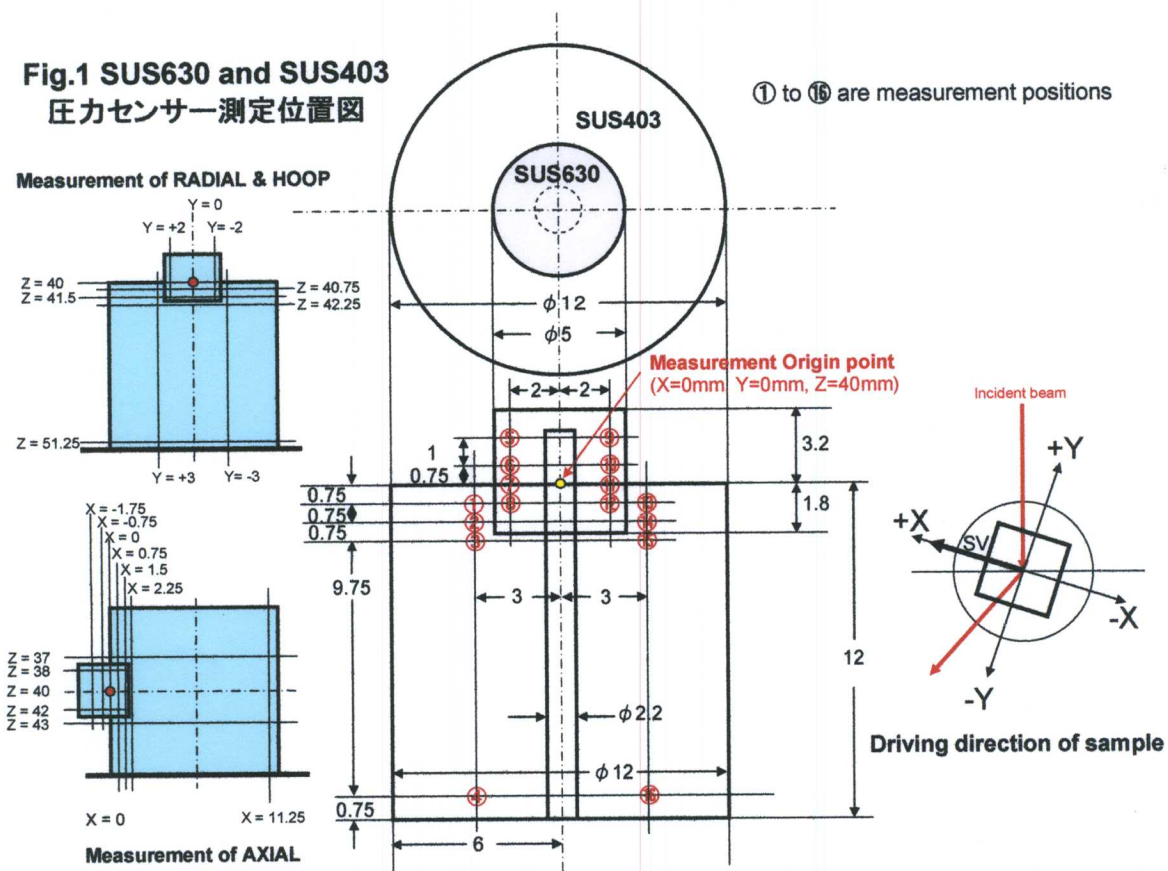
FEM 予測ひずみ分布を参考に測定位置とのゲージボリュームを考慮したひずみ・応力分布傾向比較を行ってみると、母材 SUS403 の①②③位置の傾向は合致している。ダイヤフラム材 SUS630 の⑤⑥⑦⑧についても合致していると言える。指数 (hkl) の選択と Gauge volume の関係により、同種材料を分離測定する手法が立証され、中性子回折法による小型製品の安全性・健全性評価が十分有効であることが判った。

今回の測定経緯を別添表として示す。

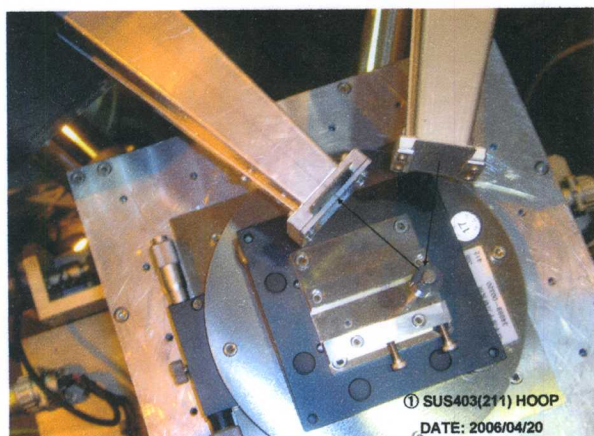
Calculation of RESA Lambda at 2006/04/24 REV									
JRR-3M H18-No.1 Cycle PD Ni used Slit= 1X1 1X10 L1=50mm L2=50mm									
	Ni	a =	3.524022				$\lambda_0 =$	2.072	
		$\Delta_0 =$	-0.0211						
h	k	l	d	2TGFIT	2Theta	Lambda	2Theta cal	1/d*cos θ	Δ 2Theta
1	1	1	2.034595	61.2498	61.2709	2.073553	61.2201	0.571226	0.050820
2	0	0	1.762011	72.07118	72.09228	2.073663	72.0254	0.701921	0.066882
2	2	0	1.245930	112.6198	112.6409	2.073606	112.5078	1.447330	0.133078
						Lambda =	2.073608		

第1表 測定に使用した 1mm×1mm 中性子ビームの波長検定結果

**Fig.1 SUS630 and SUS403
圧力センサー測定位置図**



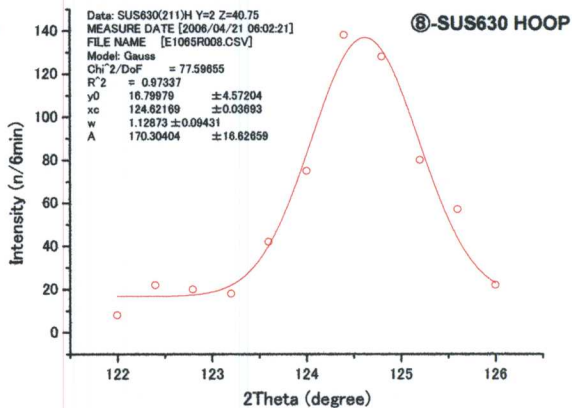
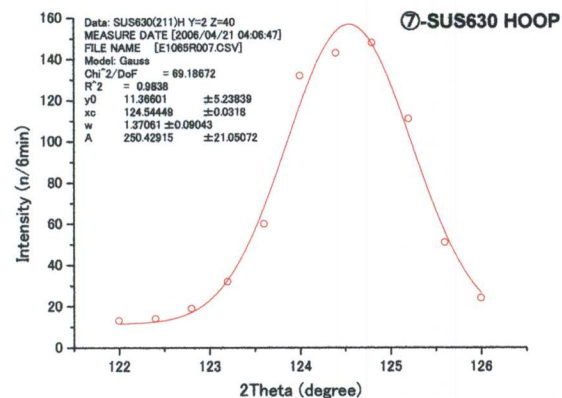
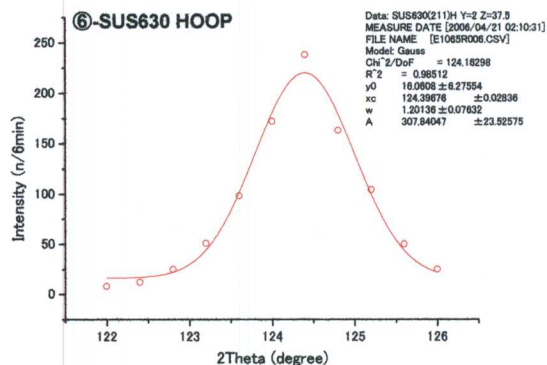
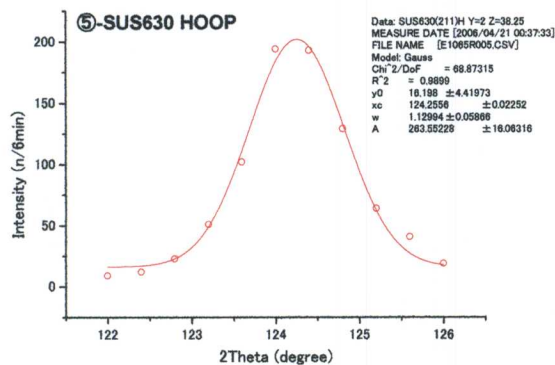
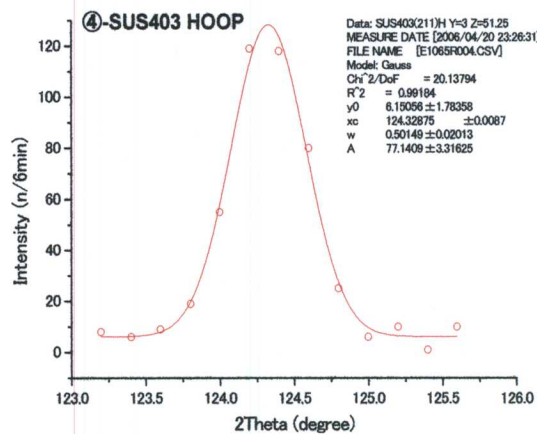
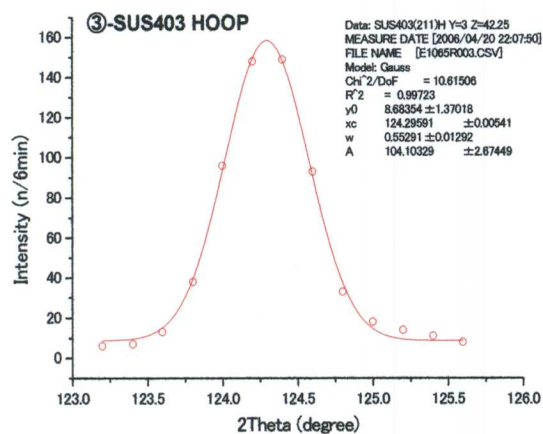
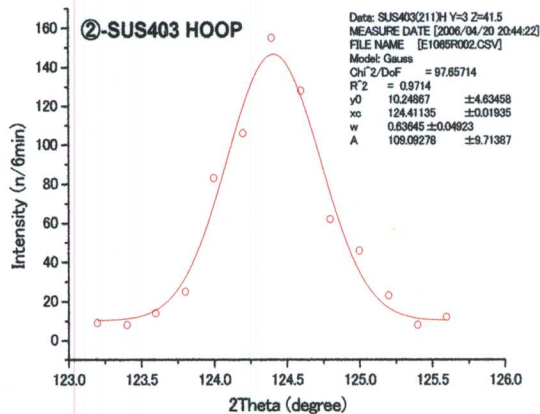
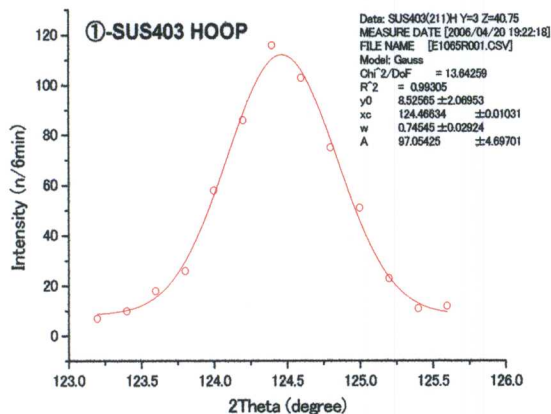
第 1 図 試料寸法と測定位置

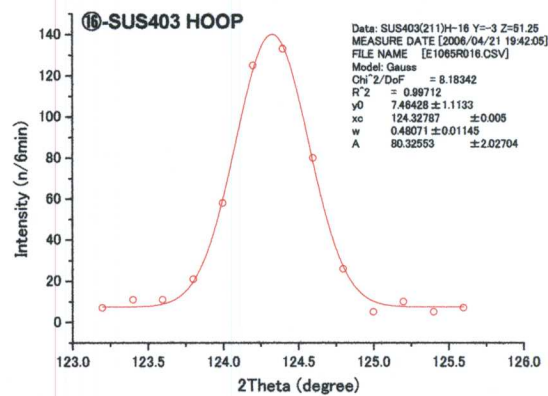
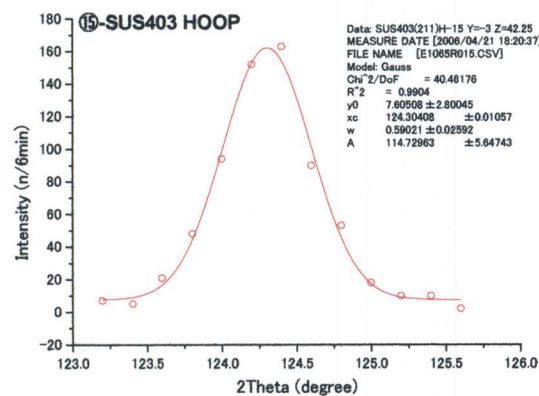
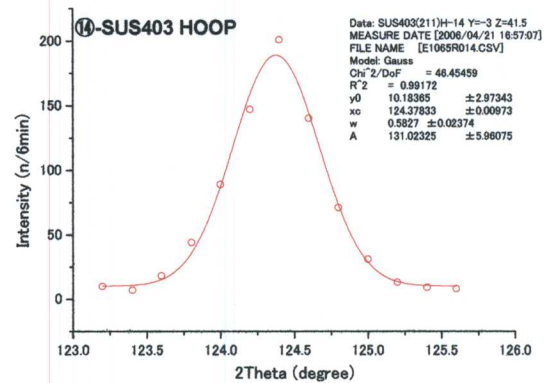
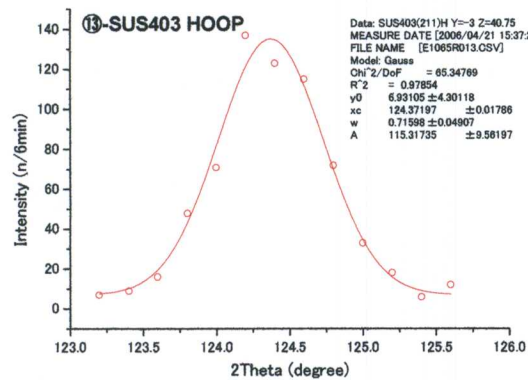
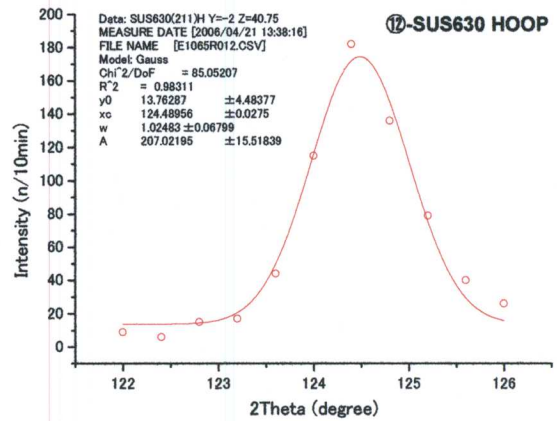
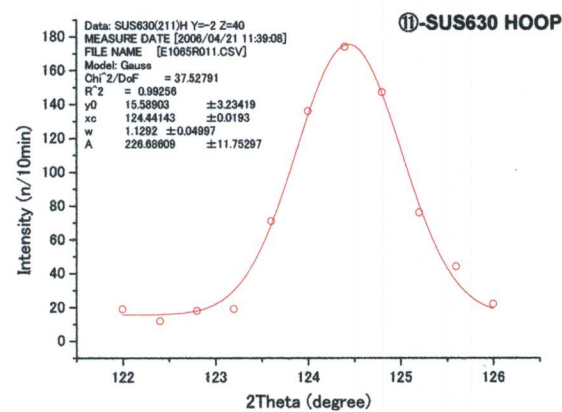
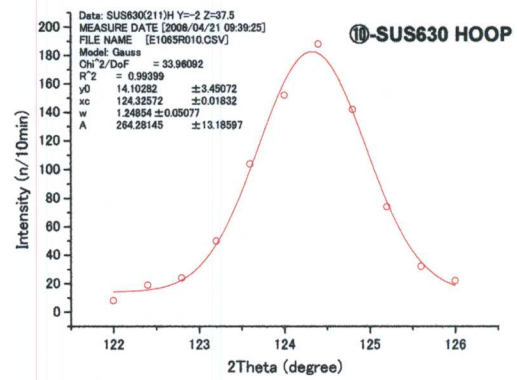
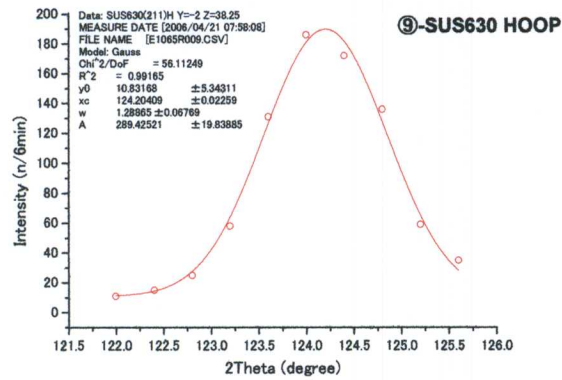


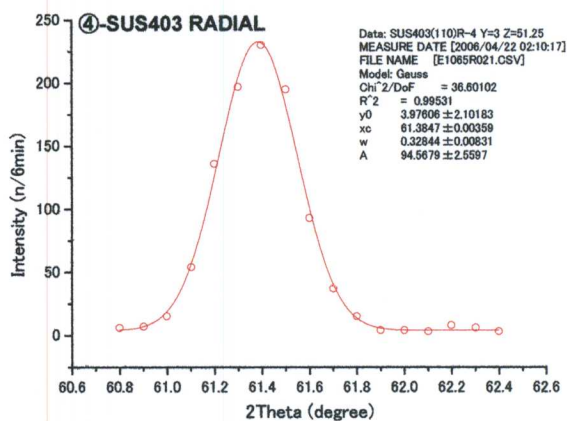
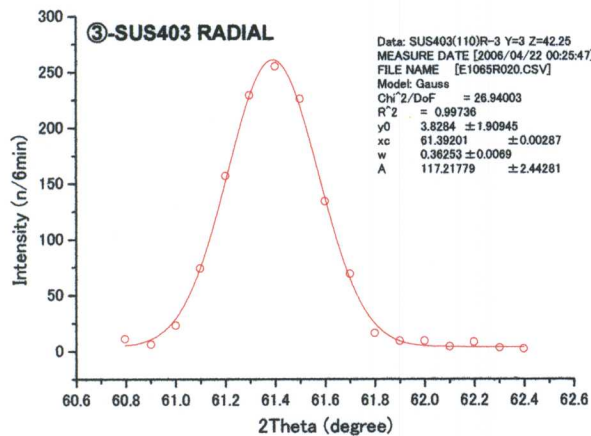
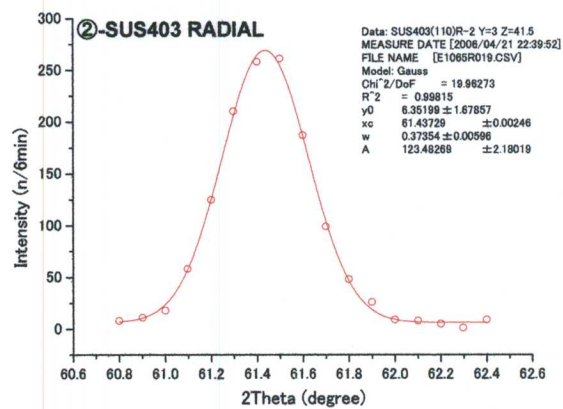
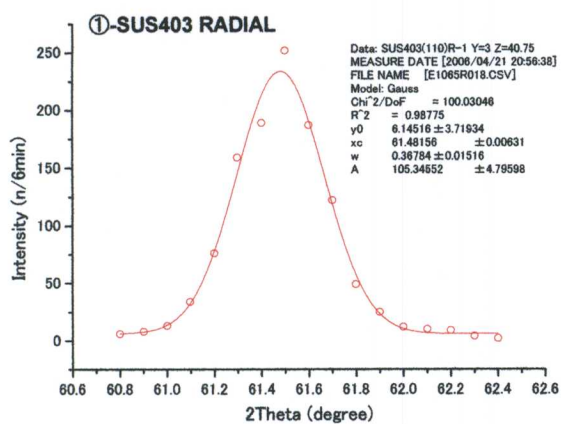
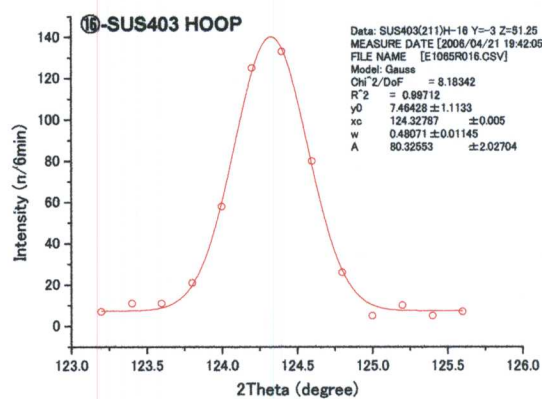
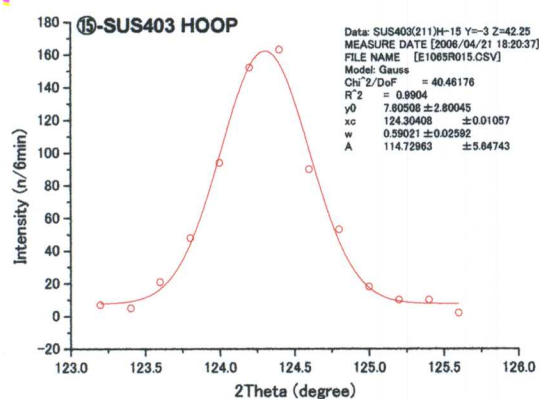
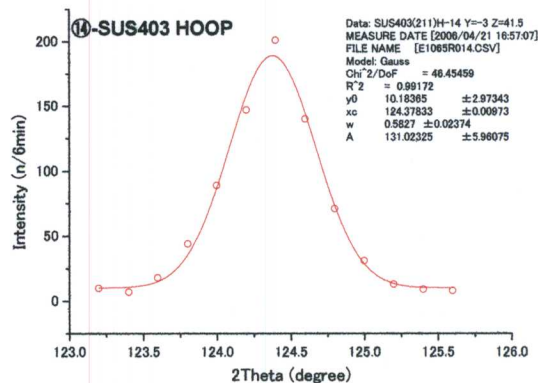
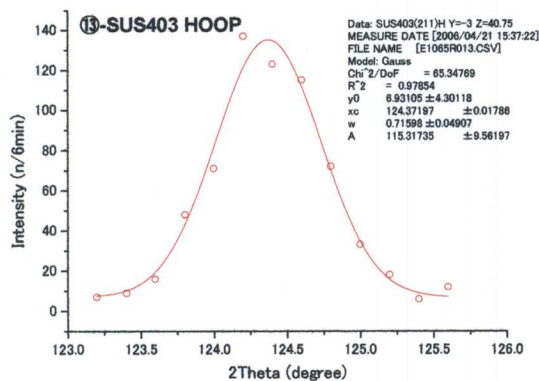
第 2 図 SUS403 部の (211) による HOOP 測定

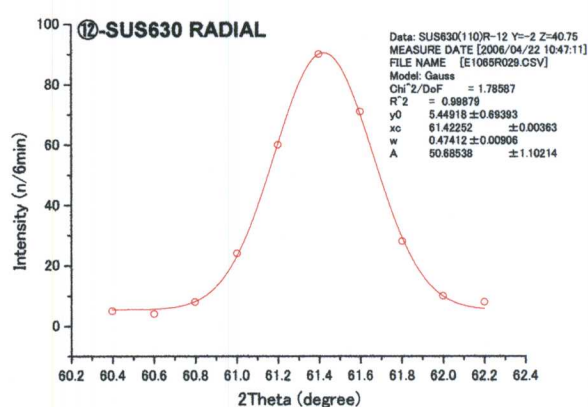
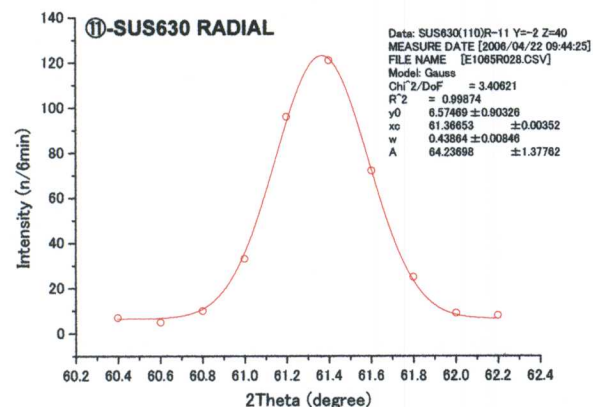
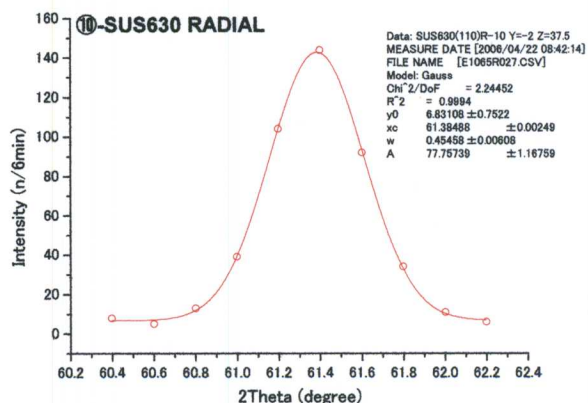
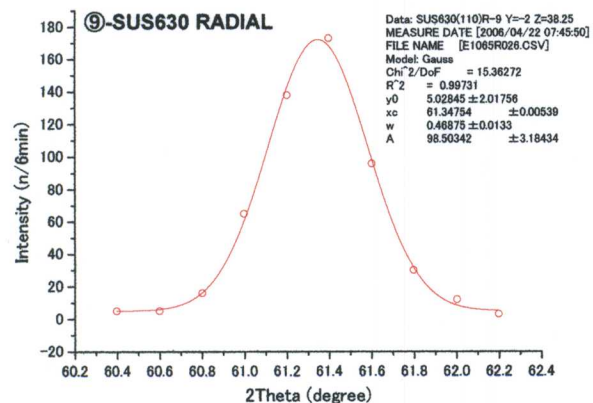
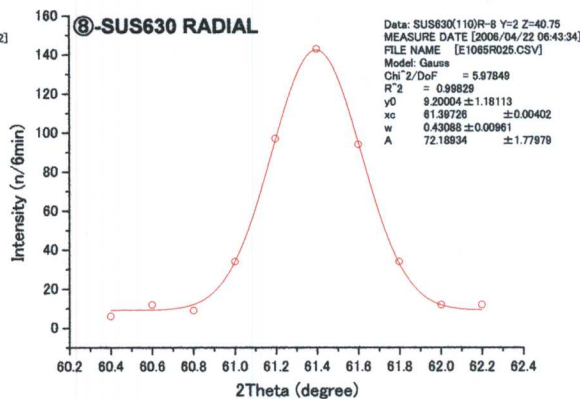
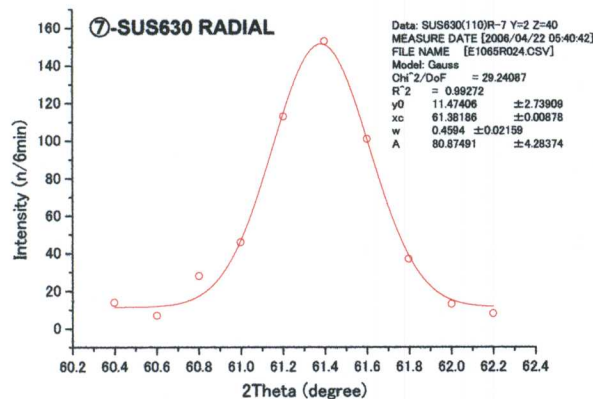
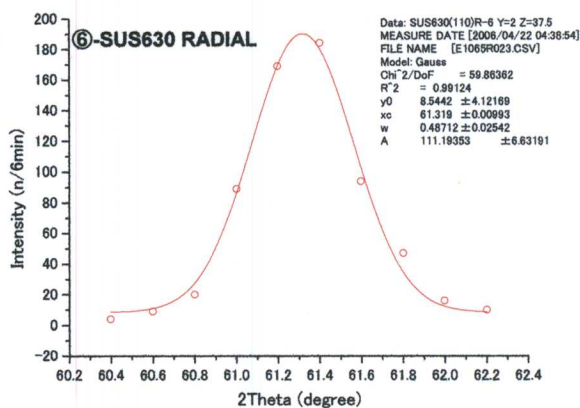
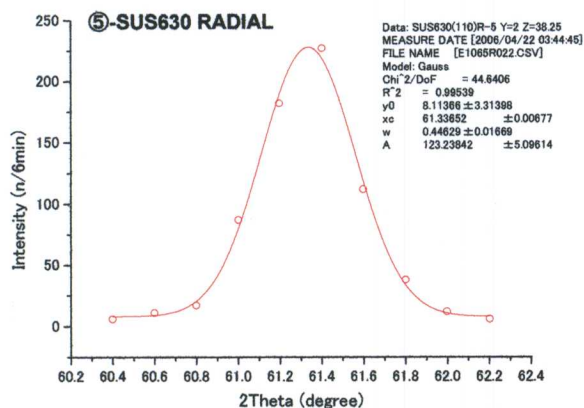


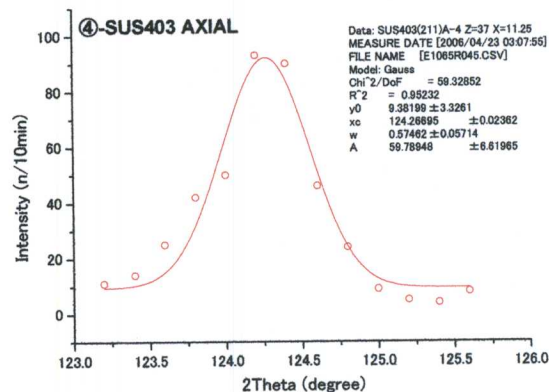
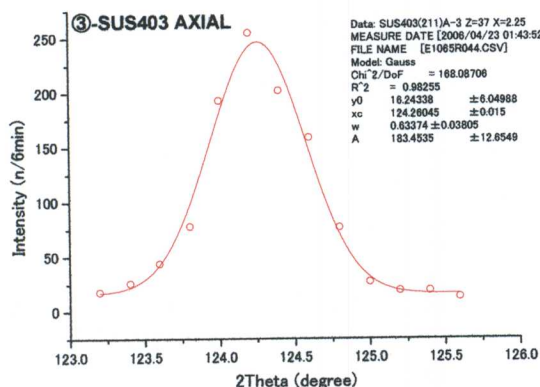
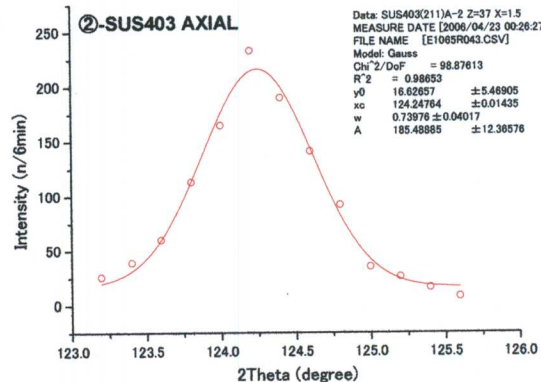
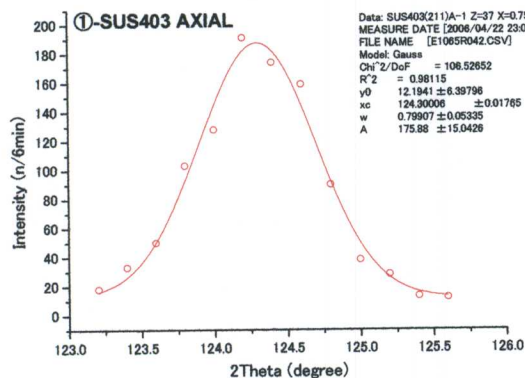
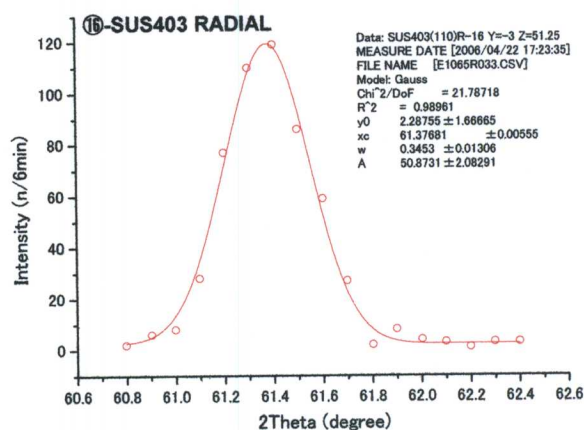
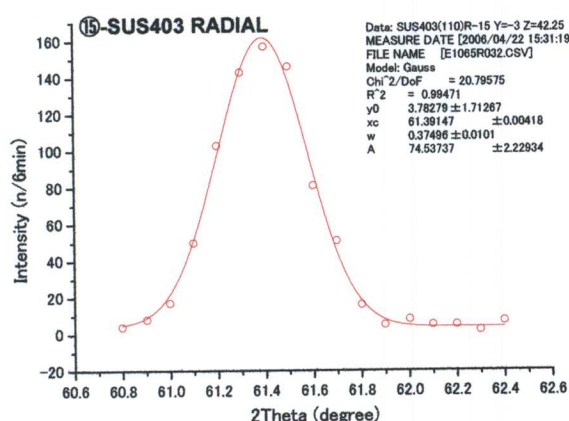
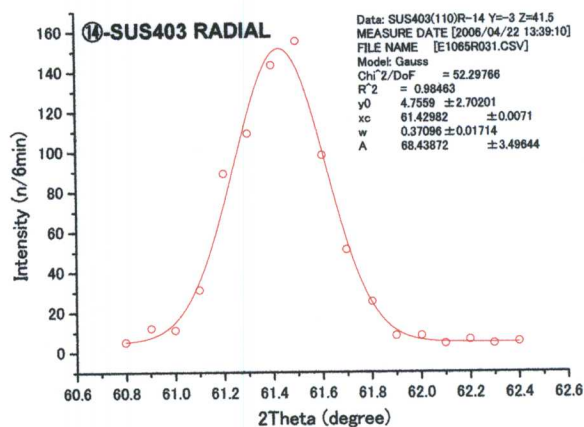
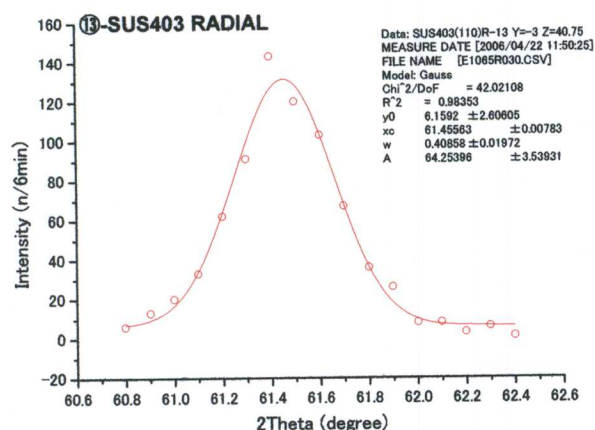
第 3 図 SUS403 部の (211) による AXIAL 測定

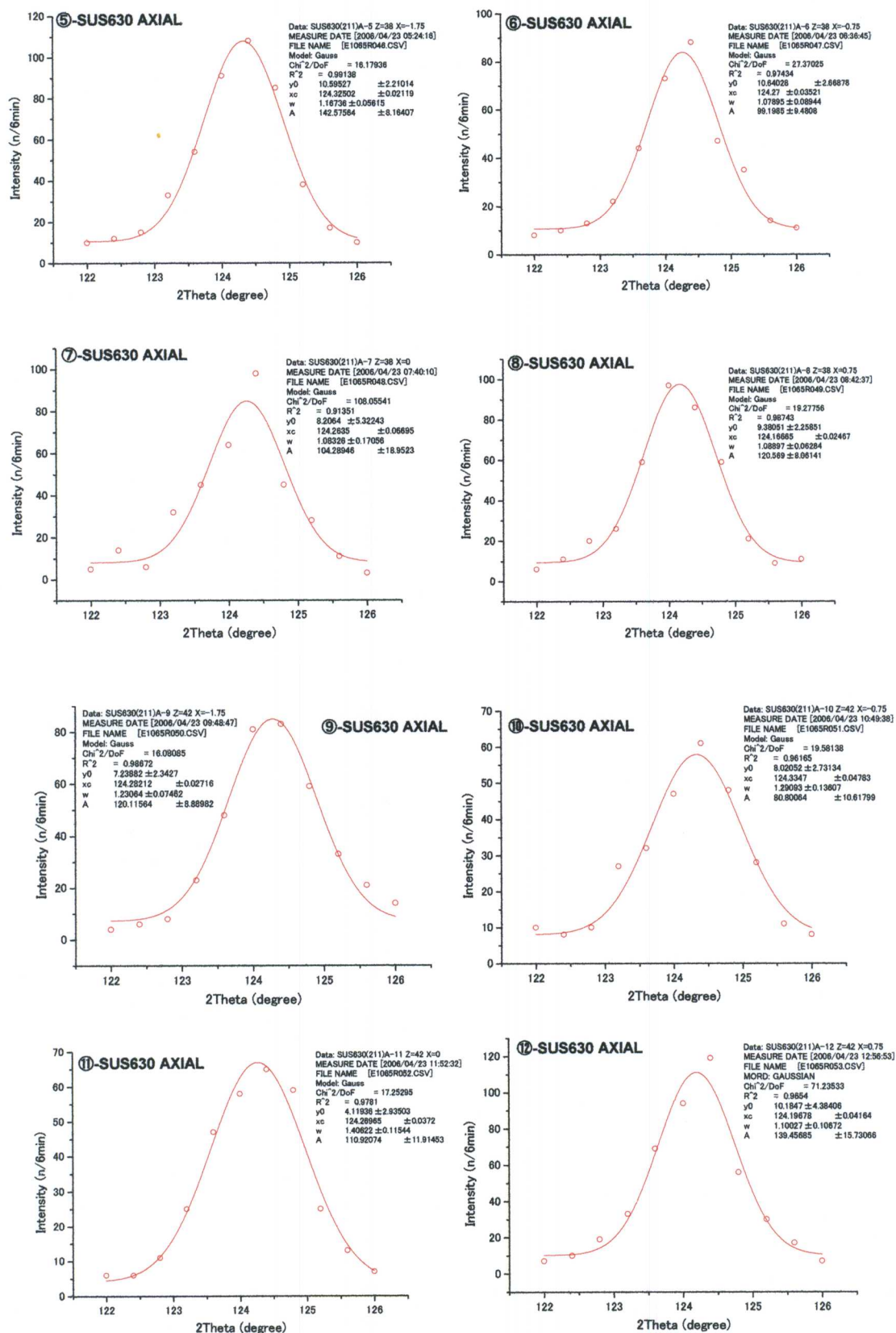












第4図 全データの Gaussian fitting 結果

d ₀ of SUS403 05-09-05					
Lambda =	2.072632				
Δ2Theta =	0.0461			a ₀ (ave) =	2.870865
hkl	2Tcal	2Theta	d	a	d ₀
110	61.43579	61.38969	2.030139	2.871050	2.030008
200	92.48193	92.43583	1.435387	2.870774	1.435433
211	124.36191	124.31581	1.171988	2.870771	1.172026
d ₀ of SUS630(Heat Treatmented) 05-09-05					
Lambda =	2.072632				
Δ2Theta =	0.0461			a ₀ (ave) =	2.872013
hkl	2Tcal	2Theta	d	a	d ₀
110	61.40783	61.36173	2.030974	2.872231	2.030820
200	92.43755	92.39145	1.435920	2.871841	1.436006
211	124.27168	124.22558	1.172476	2.871967	1.172494

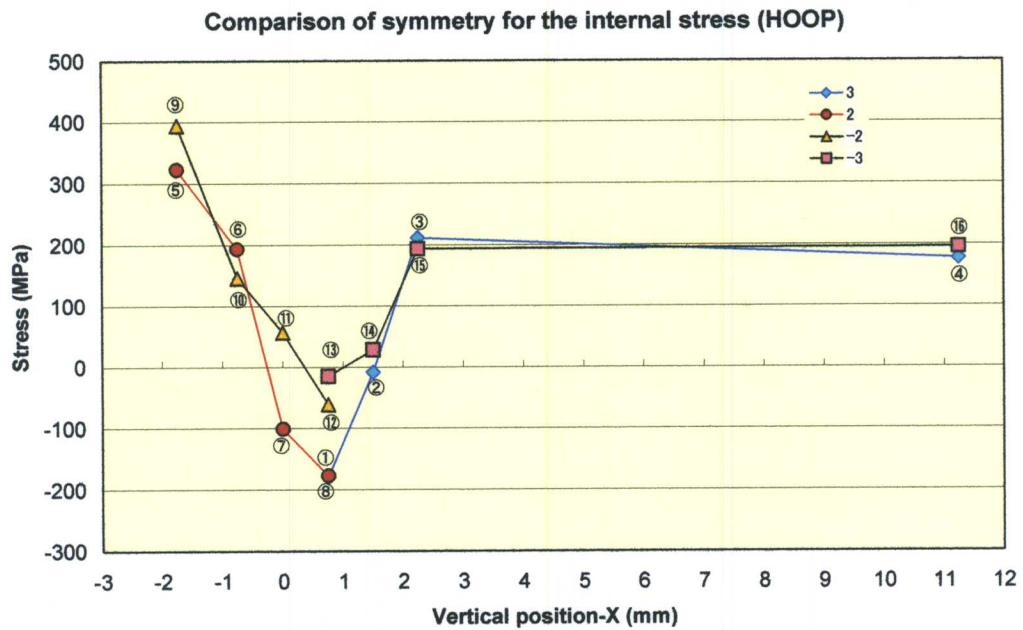
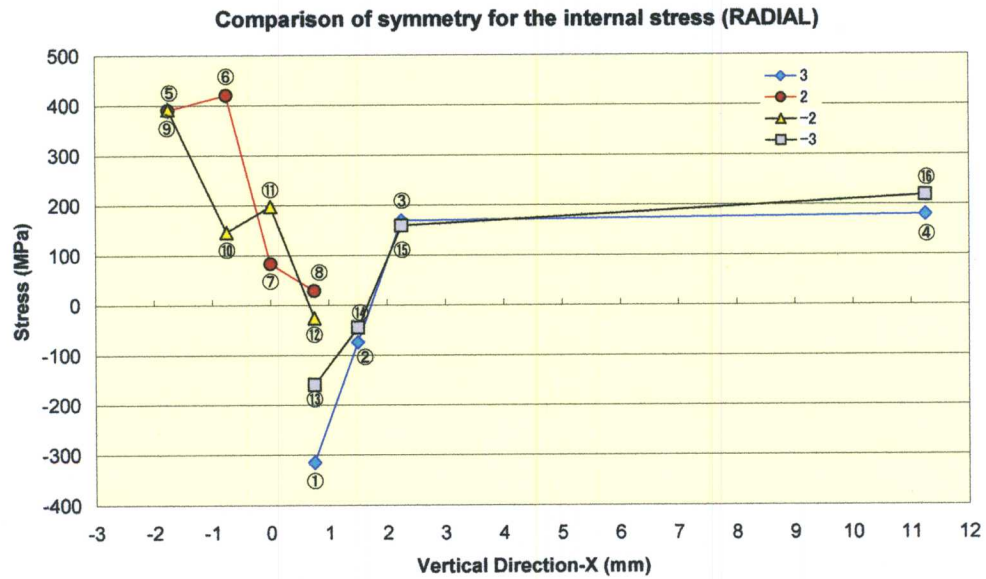
第2表 SUS403 及び SUS630 の無ひずみ格子面間隔

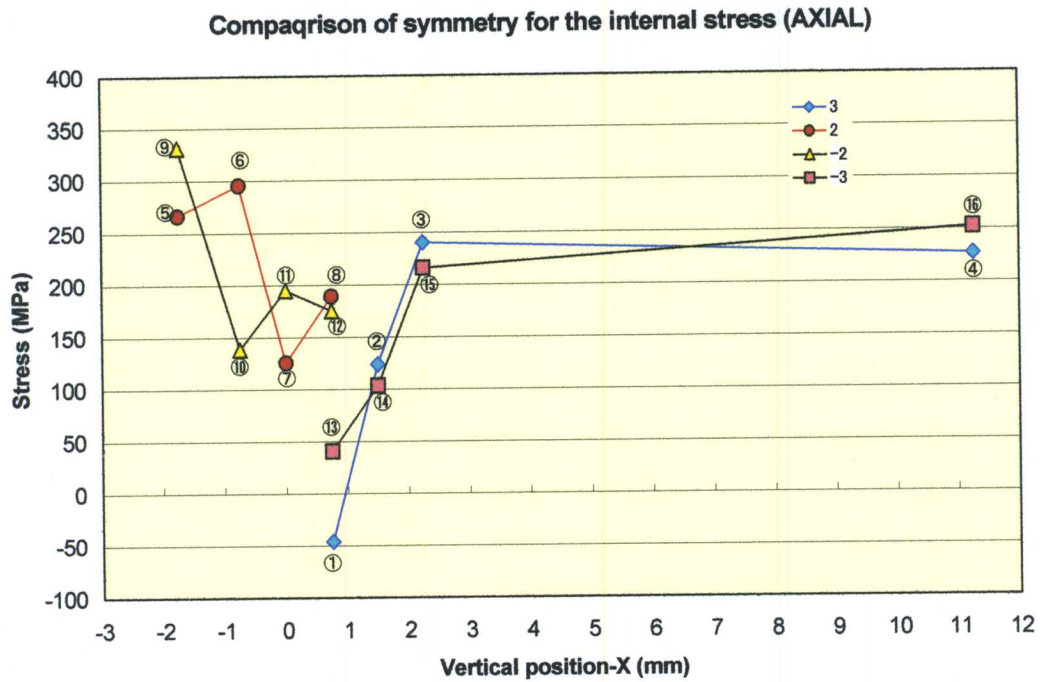
CALCULATION OF STRESS FOR THE PRESSURE GAUGE (SUS403-SUS630)						
DATE: 06-04-20 TO 06-04-24			SLIT: 1mm X 1mm, 1mm X 10mm			
Lambda =	2.073608	Δ ₀ =	-0.0211			
E _{hkl} =	224	ν _{hkl} =	0.28			
X _{FWHM} =	1.177856					
SUS630-SUS403 MEASURED SUS403 STRESS						
RADIAL	SUS403(110)					
POSITION No.	2T(GFIT)	FWHM	2Theta	d	ε _R	σ _R (MPa)
1	61.48156	0.43326	61.50266	2.027728	-1123.308	-314.822
2	61.43729	0.43998	61.45839	2.029046	-474.216	-73.877
3	61.39201	0.42701	61.41311	2.030395	190.713	169.140
4	61.3847	0.38686	61.4058	2.030614	298.157	179.711
13	61.45563	0.48125	61.47673	2.028500	-743.240	-159.248
14	61.42982	0.43694	61.45092	2.029268	-364.592	-44.813
15	61.39147	0.44165	61.41257	2.030412	198.649	159.135
16	61.37681	0.40671	61.39791	2.030849	414.156	218.099
HOOP	SUS403(211)					
POSITION No.	2T(GFIT)	FWHM	2Theta	d	ε _H	σ _H (MPa)
1	124.46634	0.87803	124.48744	1.171614	-351.739	-179.797
2	124.41135	0.74965	124.43245	1.171910	-99.105	-8.233
3	124.29591	0.65125	124.31701	1.172533	432.411	211.438
4	124.32875	0.59068	124.34985	1.172355	281.046	176.717
13	124.37197	0.84332	124.39307	1.172122	82.033	-14.826
14	124.37833	0.68634	124.39943	1.172088	52.766	28.225

15	124.30408	0.69518	124.32518	1.172488	394.742	193.451
16	124.32787	0.56621	124.34897	1.172360	285.101	195.514
AXIAL	SUS403(211)					
POSITION No.	2T(GFIT)	FWHM	2Theta	d	ϵ_A	σ_A (MPa)
1	124.30006	0.94119	124.32116	1.172510	413.276	-45.919
2	124.24764	0.87133	124.26874	1.172794	655.128	123.758
3	124.26045	0.74645	124.28155	1.172724	595.996	240.065
4	124.26695	0.67682	124.28805	1.172689	565.999	226.584
13	124.30312	0.92899	124.32422	1.172494	399.168	40.673
14	124.28508	0.65211	124.30618	1.172591	482.357	103.403
15	124.27618	0.65253	124.29728	1.172639	523.412	215.968
16	124.25777	0.74543	124.27887	1.172739	608.365	252.085
SUS630-SUS403 MEASURED SUS630 STRESS						
SLIT: 1mm X 1mm, 1mm X 10mm						
RADIAL	SUS630(110)					
POSITION No.	2T(GFIT)	FWHM	2Theta	d	ϵ_R	σ_R (MPa)
5	61.33652	0.52567	61.35762	2.032053	1006.995	390.444
6	61.319	0.57376	61.3401	2.032576	1265.047	420.162
7	61.38186	0.54111	61.40296	2.030698	339.907	83.056
8	61.39726	0.50751	61.41836	2.030239	113.564	28.726
9	61.34754	0.55212	61.36864	2.031723	844.761	392.507
10	61.38488	0.53543	61.40598	2.030608	295.511	145.722
11	61.36653	0.51665	61.38763	2.031156	565.340	197.106
12	61.42252	0.55845	61.44362	2.029486	-257.435	-25.635
HOOP	SUS630(211)					
POSITION No.	2T(GFIT)	FWHM	2Theta	d	ϵ_H	σ_H (MPa)
5	124.2556	1.33091	124.2767	1.172751	618.382	322.437
6	124.39676	1.41503	124.41786	1.171988	-32.016	193.176
7	124.54449	1.61438	124.56559	1.171194	-710.158	-100.705
8	124.62169	1.32948	124.64279	1.170779	-1063.512	-177.262
9	124.20409	1.51784	124.22519	1.173029	856.304	394.527
10	124.32572	1.47060	124.34682	1.172372	295.007	145.634
11	124.44143	1.33003	124.46253	1.171748	-237.342	56.636
12	124.48956	1.20710	124.51066	1.171489	-458.308	-60.787
AXIAL	SUS630(211)					
POSITION No.	2T(GFIT)	FWHM	2Theta	d	ϵ_A	σ_A (MPa)
5	124.32502	1.37498	124.34612	1.172375	298.232	266.411
6	124.27	1.27085	124.2911	1.172673	551.925	295.366
7	124.2635	1.27592	124.2846	1.172708	581.920	125.408
8	124.16665	1.28265	124.18775	1.173232	1029.436	189.003

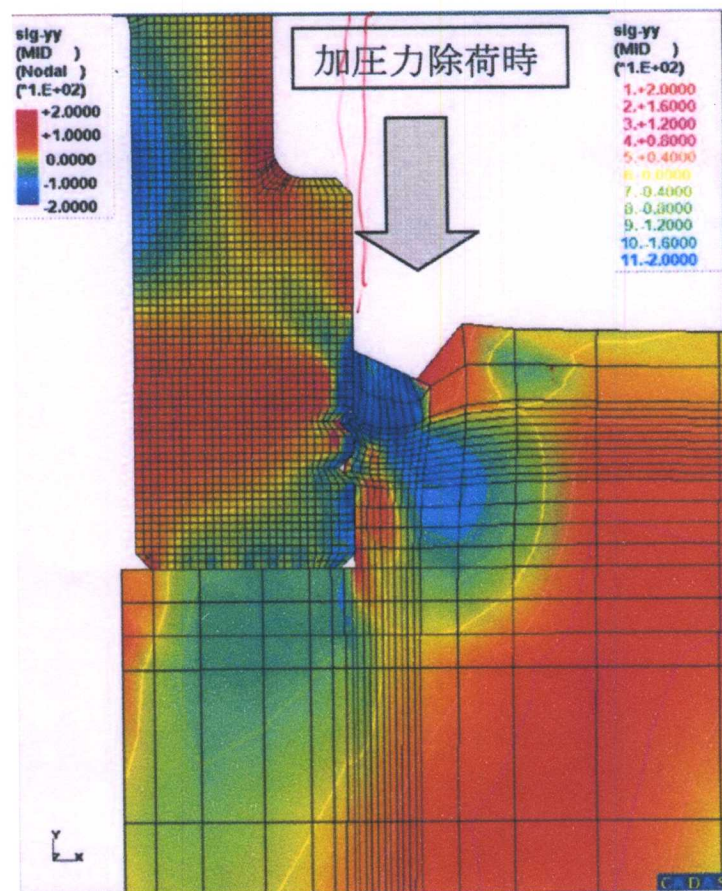
9	124.28212	1.44952	124.30322	1.172607	496.010	331.476
10	124.3347	1.52053	124.3558	1.172323	253.635	138.394
11	124.26965	1.65632	124.29075	1.172675	553.540	195.041
12	124.19678	1.29596	124.21788	1.173069	890.094	175.183

第3表 各位置におけるひずみ及び応力値





第5図 各軸方向の応力分布 (①から⑯は測定位置番号)



第6図 FEMによる圧接後の内部ひずみ予測分布

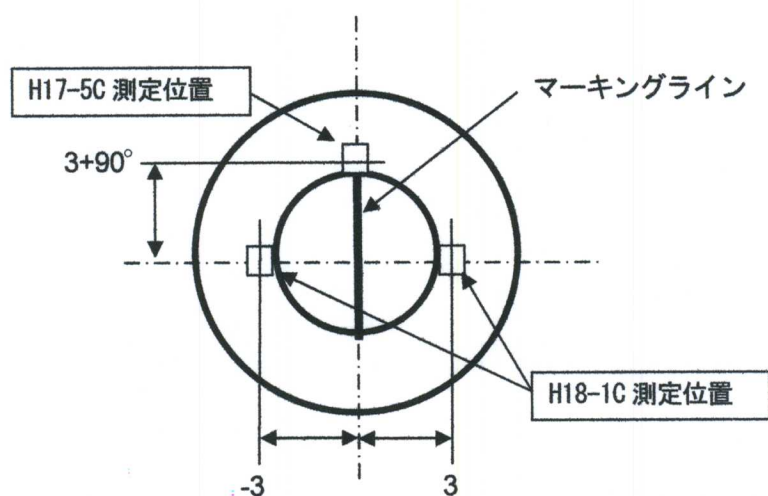
前回(H17-5C)との比較

RADIAL					H17-5C
X-POSITION	3	2	-2	-3	3+90°
-1.75		390.444	392.507		
-0.75		420.162	145.722		
0		83.056	197.106		
0.75	-314.822	28.726	-25.635	-159.248	-271.416
1.5	-73.877			-44.813	-168.547
2.25	169.140			159.135	
11.25	179.711			218.099	

HOOP					H17-5C
	3	2	-2	-3	
-1.75		322.437	394.527		
-0.75		193.176	145.634		
0		-100.705	56.636		
0.75	-179.797	-177.262	-60.787	-14.826	-71.217
1.5	-8.233			28.225	-49.187
2.25	211.438			193.451	
11.25	176.711			195.514	

AXIAL					H17-5C
	3	2	-2	-3	
-1.75		266.411	331.476		
-0.75		295.366	138.394		
0		125.408	195.041		
0.75	-45.919	189.003	175.183	40.673	23.757
1.5	123.758			103.403	49.047
2.25	240.065			215.968	
11.25	226.584			252.085	

第4表 H17-5C 測定結果と今回測定結果の比較



第7図 測定位置の説明