

## 海洋部材に対する新素材を利用した表面処理の解析

後藤, 謙吾  
九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/2558975>

---

出版情報 : 九州大学, 2018, 修士, 修士  
バージョン :  
権利関係 :

平成 30 年度  
九州大学大学院総合理工学府  
大気海洋環境システム学専攻修士論文

海洋部材に対する  
新素材を利用した表面処理の解析

氏 名 後藤 謙吾  
指導教員 月岡 哲 教授  
百留 忠洋 准教授

# 目次

第1章 緒言	3
1.1 研究の背景	3
1.2 研究の目的	6
1.3 研究対象	7
1.3.1 アルミニウム合金 (A7075)	7
1.3.2 ナノテクト	8
第2章 プレート実験 (先行研究)	9
2.1 試験対象	9
2.2 性能試験	10
2.3 性能試験結果	11
2.4 圧力試験	14
第3章 研究方法	15
3.1 耐圧容器の図面	15
3.2 理論値の計算	17
3.3 シミュレーション解析	19
第4章 ナノテクト耐圧容器の圧力実験	22
4.1 実験手順	22
4.2 圧力条件	22
4.3 実験結果	26
4.4 考察	27
第5章 結言	32
参考文献	33
謝辞	34

# 第 1 章 緒言

## 1.1 研究の背景

地球の表面はおよそ 70%が海であるとされている。世界最大深度はマリアナ海溝の 10,911mとされ、全海洋の平均深度は 3,800mとされている。このように、地球上の多くを占める海中や海底には生物の進化や地球の成り立ちを解明できる可能性や貴重な資源が存在していることから、様々な研究要素があり、日々世界中で研究開発が進められている。

近年、深海生物の生態系や海底資源、海底地震に関する研究や調査のために、人が乗船し作業をする有人潜水船、支援船とケーブルを繋げることで水上から操縦可能な遠隔操作型の無人潜水機 (ROV : Remotely Operated Vehicle)、無索で自走可能な自律型無人潜水機 (AUV : Autonomous Underwater Vehicle)、海洋観測機器等が多く使用されている。これら潜水機等は電子機器によって制御されている。電子機器は海水中、また深海域における高水圧環境において、陸上と同様に使用するために耐水圧能力の高い容器に搭載する必要がある。ここで、有人潜水船や無人潜水機はバッテリーを機体内に搭載しており、限られたエネルギーで稼働している。Fig1.1, Table1.1 に JAMSTEC で実際に使用された自律型無人探査機 MR-X1 の機体と各重量を示す。これらの中で、主耐圧容器は浮力材の次に多くの重量を占めている。加えて、ピカソトラポン、DVL、補推器ドライバ容器、主推進器ドライバ容器、電源遮断容器、ABISMO 高度計、深度計、TV カメラ、アルゴス、フラッシュ、SSS 制御部は耐圧容器と機器の合わせた重量である。また、耐圧容器の軽量化により、搭載する浮力材も必然的に減少する。故に潜水機の構成要素の中でも重量の大部分を占める耐圧容器の重量を減らすことで、運動のために必要なエネルギーを削減することが可能である。そのため、でき

るだけ軽量かつ高強度な素材で耐圧容器を作製する必要がある。

現在、このような高強度な耐圧容器用の素材としては、チタン合金、アルミニウム合金、高張力鋼が広く使用されている。これらの中でも、アルミニウム合金がコストパフォーマンスの観点から特に深海用の潜水機等で使用されることが多い。

そこで本研究では、耐圧容器に使用される素材の中でアルミニウム合金に着目し、さらなる軽量化について研究を行った。



Fig1.1 自律型無人探査機 MR-X1 (出典：JAMSTEC)

Table1.1 自律型無人探査機 MR-X1 各重量 (出典: JAMSTEC)

機器名称	数量	重量 (kg)	合計重量
スプーラ	1	3.6	3.6
ピカソトラポン	1	6.2	6.2
前部リチウム電池	1	42.55	42.55
後部リチウム電池	1	42.55	42.55
D V L	1	13.1	13.1
主推進器カバー	1	2.55	2.55
主推進器	1	10	10
プロペラ	1	1.42	1.42
垂直スラスタ	2	3.5	7
前部水平スラスタ	1	3.5	3.5
後部水平スラスタ	1	3.5	3.5
主耐圧容器	1	77.86	77.86
光通信装置	1	17.58	17.58
ジャイロ	1	22.6	22.6
その他	1	7	7
水中ケーブル	1	10	10
フレーム	1	48.4	48.4
F R Pカバー	1	51.7	51.7
吊金具 (Tiプレート)	1	7.398	7.398
浮力材	1	254.409	254.409
サポート	1	29.723	29.723
浮力材埋込金具	1	2.9	2.9
補推進器ドライバ容器	1	8.21	8.21
主推進器ドライバ容器	1	6.62	6.62
電源遮断容器	1	7.14	7.14
バラスト電池BOX	1	6.58	6.58
バラストシステム	1	15	15
ABSIMO高度計	1	4.35	4.35
深度計	1	3.42	3.42
水中ライト	2	0.6	1.2
T Vカメラ	1	6.96	6.96
アルゴス	1	2.6	2.6
フラッシュ	1	1.18	1.18
嵌合金物	1	5.98	5.98
SSS制御部	1	2.2	2.2
2分岐容器	1	1.8	1.8
3分岐容器	1	1.8	1.8
カウンターウェイト	2	10	20

## 1.2 研究の目的

アルミニウム合金には、1000系から7000系と多くの種類があり、海洋部材には耐食性や強度の観点から5000系、6000系、7000系が主に使用される。アルミニウム合金は、海中で使用するためには腐食や電蝕を防止するために表面処理を施す必要がある。このための表面処理としてタフラム処理（陽極酸化皮膜の多孔質皮膜にフッ素樹脂（テフロン）を含浸させ平滑性、耐摩耗性を高めたもの）を施して使用する。この処理はアルミニウム合金の種類により適正があり、アルミニウム合金中最も高い比強度をもつA7075材には成膜性と硬さでやや劣り、処理適正もやや難しいとされている。現在では、これらタフラム処理における特性的要因から5000系、6000系が主に使用され、7000系は使用されなくなった。しかしながら、軽量化を考えると比強度がアルミニウム合金中で最も高いA7075材を使用できることが望ましい。

そこで本研究では、タフラム処理に比肩し剥がれがたく耐摩耗性、耐衝撃性、耐折曲性、硬度、潤滑性、防食性に優れるナノカーボン材を使用した表面処理をA7075材に施し、その有用性を確かめることで機体の軽量化に寄与することを目的とする。

## 1.3 研究対象

### 1.3.1 アルミニウム合金 (A7075)

アルミニウム合金には様々な種類があり，7000系はアルミニウム合金の中で最も高強度をもつAl-Zn-Mg-Cu系合金と，Cuを含まない熱処理可能な溶接構造用材Al-Zn-Mg合金に分類できる．Al-Zn-Mg-Cu系合金の代表的なものはA7075合金で，航空機，スポーツ用具類に使用されている．

アルミニウム合金は，加工処理によって質別記号がある．本研究では従来，海洋構造物に使用されていたA7075-T6を選定した．T6とは，液体化処理後人工時効硬化処理したものである．

アルミニウム合金 (A7075) の化学成分について，Table1.2に機械的性質についてTable1.3に示す．

Table1.2 アルミニウム合金 (A7075) の化学成分

合金番号	化学成分 (%)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	その他
A7075	0.4以下	0.5以下	1.2~2.0	0.30以下	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~6.1	0.20以下	残部	Zr+Ti:0.25

Table1.3 アルミニウム合金 (A7075) の機械的性質

合金番号	質別	肉厚a(mm)	引張強さ(N/mm <sup>2</sup> )	耐力(N/mm <sup>2</sup> )	伸び	
					A%	A50%
A7075	T6	6 < a ≤ 10	520以上	440以上	7以上	7以上



### 1.3.2 ナノテクト®

ナノテクト®はカーボンナノチューブと樹脂塗料の複合被膜である。カーボンナノチューブは非常に大きな引張強さを持ち、誘電性が高いという特徴を持つ炭素素材である。従来、カーボンナノチューブは樹脂に混ざることなく、誘電性が腐食の原因となることから防食目的の塗料には適さないものであった。しかし、グラフト化技術により、誘電性を遮断させ、高濃度かつ均一に分散させることが可能になった。その結果、耐摩耗性、耐衝撃性、耐折曲性、硬度、潤滑性、耐食性に優れた性質を示した。

ナノテクト®の物性値を Table1.4 に示す。ナノテクト®A は高温用イミド系樹脂を主成分とし、ナノテクト®C はフェノール系樹脂を主成分としている。

Table1.4 ナノテクト®の物性値（出典：GSI クレオス）

項目	ナノテクト®A	ナノテクト®C
膜硬度	HK（ヌーブ硬さ）70～80	HK（ヌーブ硬さ）30～50
耐衝撃性	Φ1.6mm	Φ1.6mm
耐食性	複合サイクル腐食試験 1000 時間以上	複合サイクル腐食試験 3000 時間以上
曲げ特性	Φ2mm	Φ2mm
耐熱性	240℃	220℃
トルク係数	0.01	0.08

## 2章 プレート実験（先行研究）

先行研究では平板における実験を行うことで、費用を抑えて多くの表面処理剤と施工方法を試行錯誤的に選定した。

### 2.1 試験対象

プレート実験で使用された A7075 試験用プレートの例を Fig2.1 に示す。アルミニウム合金のサイズは 100mm×100mm×4mm で、Fig2.1 はすでにナノテクト®施工しているものである。



Fig2.1 A7075 試験用プレート

## 2.2 性能試験

Fig2.1 のプレートを対象に様々な性能試験を行い、タフラム、ナノテクト<sup>®</sup>A、ナノテクト<sup>®</sup>C の有用性を比較，考察した。実施された各試験を以下に示す。

### (1) 塩水噴霧試験

JIS 規格に規定される試験で，35℃雰囲気内で 5%塩水の噴霧で腐食を確認する。24 時間連続で実施。

### (2) 複合サイクル腐食試験

塩水噴霧 2 時間→乾燥 (50℃, 25%RH) 4 時間→湿潤 (50℃, 95%RH) 2 時間を 1 サイクルとした腐食試験。実際に海洋機器を使用する環境に近い。

### (3) ヌーブ硬さ試験

JIS 規格に規定される試験で，底面が菱形のダイヤモンド圧子を数十グラムの荷重を付加させて被膜のくぼみで硬さを調べる。

### (4) DuPont 衝撃試験

JIS 規格に規定される試験で，50cm の高さから 1kg の錘を落下させて被膜のくぼみ部の被膜破壊を観察する。

### (5) 表面粗さ

表面の粗さを専用測定器で測定する。

### (6) 回転式摩耗試験

JIS 規格に準拠するもので，1kg の荷重を付加させて，500rpm の回転速度で被膜の摩耗を調査する。試験前後に重量を測定して，被膜減量を測定して，評価の一部とする。

## 2.3 性能試験結果

実施された各試験の結果を以下に示す.

### (1) 塩水噴霧試験

ナノテクト<sup>®</sup>A と C のどちらも異常なし. タフラムは微小な黒点の変色が発生.

### (2) 複合サイクル腐食試験

ナノテクト<sup>®</sup>A と C のどちらも異常なし. タフラムは微小な黒点の変色が発生.

### (3) ヌーブ硬さ試験

プレート測定箇所を Fig2.2 に示す. 測定結果を Table2.1 に示す. タフラムの硬さに対し, ナノテクト<sup>®</sup>A は約 25.4%, ナノテクト<sup>®</sup>C は約 19.6%である.

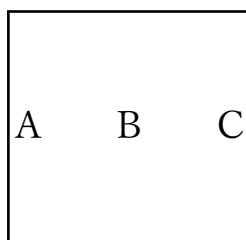


Fig2.2 プレート測定箇所

Table2.1 ヌーブ硬さ試験測定結果

試験体	測定データ			平均値
	A	B	C	
A7075 タフラム	275.1	288.1	304.8	289.3
A7075 ナノテクト <sup>®</sup> A	69.7	77.5	73.6	73.6
A7075 ナノテクト <sup>®</sup> C	54.8	60.5	55.1	56.8

(4) DuPont 衝撃試験

測定結果を Table2.2 に示す。タフラムについては、ポンチの径に平行に幾重もの被膜の割れを観察し、一部に被膜の剥離を確認された。ポンチ先端部の被膜も微細な割れが発生した。被膜硬度が高いため、脆性が脆くなった。

ナノテクト®A とナノテクト®C については、被膜の割れ・剥離は確認されなかった。被膜硬度はタフラムに比べて低い、延性は十分に認められるものである。

Table2.2 DuPont 衝撃試験測定結果

試験体	衝撃先端ポンチ径 (インチ : mm)			
	R1/4 (12.656)	R3/16 (9.568)	R1/8 (6.393)	R1/16 (3.249)
A7075 タフラム	割れ・剥離	割れ	割れ・剥離	割れ・剥離
A7075 ナノテクト®A	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
A7075 ナノテクト®C	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし

(5) 表面粗さ

測定結果を Table2.3 に示す。ナノテクト®A とナノテクト®C での表面粗さの差異は微小である。

Table2.3 表面粗さ測定結果

試験体	測定 Ra 値			
	A	B	C	平均値
A7075 タフラム	0.4323	0.5116	0.4139	0.4526
A7075 ナノテクト®A	0.9337	1.0541	1.0763	1.0214
A7075 ナノテクト®C	0.9285	0.9650	0.9173	0.9369

#### (6) 回転摩耗試験結果

タフラムは、回転摩耗痕において著しく被膜厚さが減少し、摩耗痕全域で約 15～20  $\mu\text{m}$ の被膜（約 40%程度）の消失が確認された。

ナノテクト<sup>®</sup>A とナノテクト<sup>®</sup>C においては、タフラムのような摩耗痕全域の被膜消失という現象は起こらず、1, 2 箇所約 15  $\mu\text{m}$ 程度の傷のような深さの減少が確認された。

上記性能試験からナノテクト<sup>®</sup>A, ナノテクト<sup>®</sup>C ともに性能上の問題はないとされた。最も重要視される耐食性においては、ナノテクト<sup>®</sup>C がナノテクト<sup>®</sup>A よりも優れている。以後圧力試験ではナノテクト<sup>®</sup>C を中心として試験する。

## 2.4 圧力試験

下地処理や膜厚，ミストコートの有無について複数種の試験プレートを作製した。深海 10,000m でも使用可能にするために最大圧力 100MPa の圧力試験を行った。圧力試験後に性能試験も行い，使用環境における各種下地処理のナノテクト<sup>®</sup>A，ナノテクト<sup>®</sup>C の成膜性や耐食性を比較，考察した。しかしながら，従来のナノテクト<sup>®</sup>A の樹脂種の吸水性を低くすることでナノテクト<sup>®</sup>C よりも優れた耐食性を示したため，ナノテクト<sup>®</sup>改良 A を選定し，他選定結果を以下に示す。

### (1) 下地処理

自然酸化被膜や表面汚染物質は塗膜との密着性を阻害するため，一般にはこれらの除去と耐食性や密着性の向上のため下地処理を行う。化成処理と Zn 下地を使用し，従来下地とは異なる改良した下地を選定した。

### (2) 膜厚

高分子系塗膜において，透水性を無くすことは困難であるが，膜厚を標準膜厚から最大厚にすることで，錆の要因となる透水性の低減を図る。標準膜厚である 30~40  $\mu\text{m}$  と最大膜厚である 80~100  $\mu\text{m}$  を試験したが，標準膜厚でも問題が見られなかったため軽量化を考慮し標準膜厚を選定した。

### (3) ミストコート

封孔処理の 1 つで霧状になった細かな塗料粒子が空気穴に侵入し，部分的に弱くシールすることで問題を回避する方法である。有無については無しで選定した。

### 3 章 研究方法

本研究では平板で選定された表面処理剤，施工方法を用いて，実際の耐圧容器の形状においても性能上問題がないかを確認する．

#### 3.1 耐圧容器の図面

Under Pressure ソフトを用いて水深 1,0000m (100MPa) で耐えうることが可能な耐圧容器の寸法を簡易的に計算した．その寸法を用いて図面を作図した．耐圧容器胴体の図面を Fig3.1 に，耐圧容器蓋部の図面を Fig3.2 に示す．

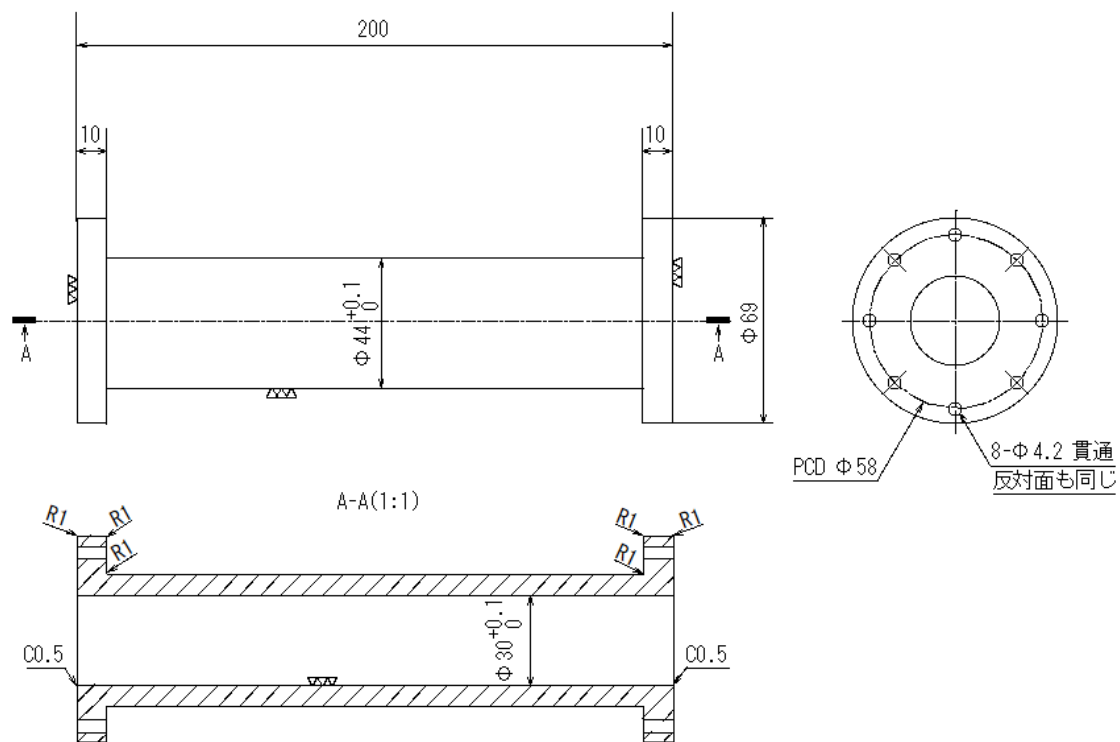


Fig3.1 耐圧容器胴体の図面



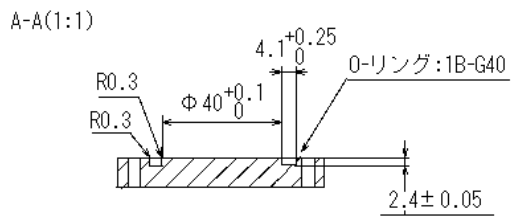
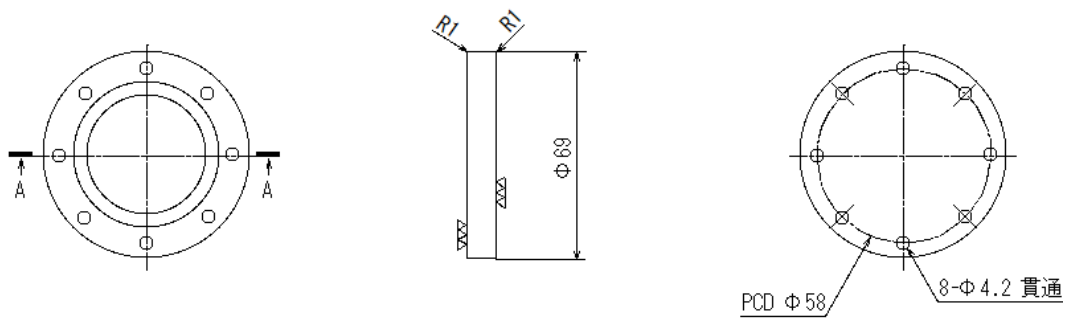


Fig3.2 耐圧容器蓋部の図面

### 3.2 理論値の計算

まず本実験で使用する円筒が薄肉円筒，厚肉円筒のどちらに相当するのか Fig3.1 をもとに検討する．(3.1)式は薄肉円筒，(3.2)式は厚肉円筒の条件式である．

$$\frac{D_0}{(t-\alpha)} \geq 10 \quad (3.1)$$

$$\frac{D_0}{(t-\alpha)} < 10 \quad (3.2)$$

$D_0$  : 円筒胴体部の腐れ後の外径

$t$  : 外圧に対して必要とする円筒胴体部の厚さ

$\alpha$  : 腐れ代

本円筒はナノテクト<sup>®</sup>による表面処理を施すため，プレート実験結果から耐食性は充分であると考えられる．従って本計算においては $\alpha = 0$ とする． $D_0 = 44\text{mm}$ ， $t = 7\text{mm}$ であるので，

$$\begin{aligned} \frac{D_0}{(t-\alpha)} &= \frac{44}{(7-0)} \\ &= 6.29 < 10 \end{aligned}$$

これは(3.2)式を満たすため，本円筒は厚肉円筒である．

次に外圧を受ける厚肉円筒の応力計算を行う．

$$\sigma_t = -\frac{pr_2^2 \left(1 + \frac{r_1^2}{r_2^2}\right)}{(r_2^2 - r_1^2)} \quad (3.3)$$

$$\sigma_z = -\frac{pr_2^2}{(r_2^2 - r_1^2)} \quad (3.4)$$

$\sigma_t$  : 円周方向応力

$\sigma_z$  : 軸方向応力

$p$  : 外圧

$r$  : 円筒中心からの距離

$r_1$  : 内半径

$r_2$  : 外半径

外圧は水深 10,000m における水圧を想定する為、 $p = 100\text{MPa}$ とする。円筒中心からの距離は円筒表面の応力を求めたいので、 $r = 22\text{mm}$ とする。 $r_1 = 15\text{mm}$ 、 $r_2 = 22\text{mm}$ であるので、(3.3)式と(3.4)式にそれぞれ代入すると、

$$\begin{aligned}\sigma_t &= -\frac{100 \times 22^2 \left(1 + \frac{15^2}{22^2}\right)}{(22^2 - 15^2)} \\ &= -273.75(\text{MPa})\end{aligned}\tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}\sigma_z &= -\frac{100 \times 22^2}{(22^2 - 15^2)} \\ &= -186.87(\text{MPa})\end{aligned}\tag{3.6}$$

これら理論値をもとに、表面処理を施さない無垢 A7075 材の耐圧容器のシミュレーション解析を行った。

### 3.3 シミュレーション解析

本シミュレーションでは、FEM 解析ソフト「Fusion360」を使用した。Fig3.1 をもとに無垢耐圧容器のシミュレーションモデルを作製した。実際に作製されるナノテクト耐圧容器と同様に、ねじの材質をステンレス鋼，その他部分の材質を A7075 とした。シミュレーションモデルを Fig3.3 に示す。

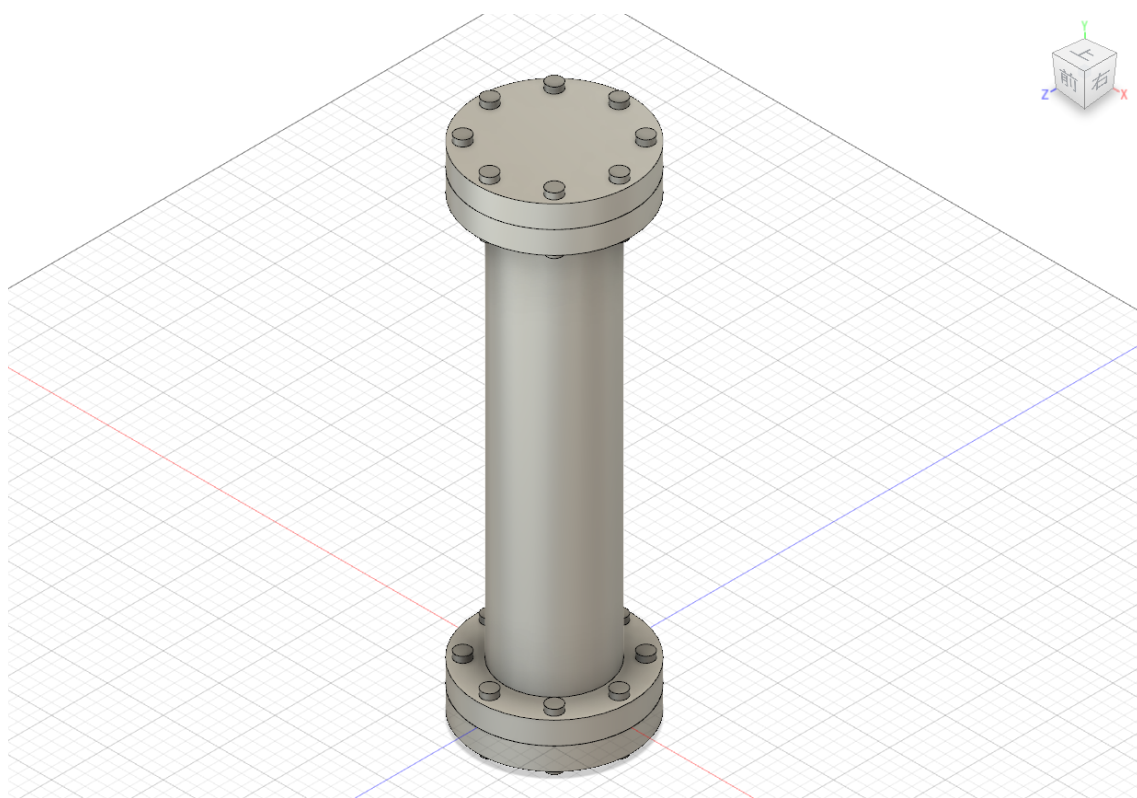


Fig3.3 シミュレーションモデル

このモデルに対して外圧 100MPa を作用させる。円周方向応力の結果を Fig3.4，軸方向応力の結果を Fig3.5 に示す。

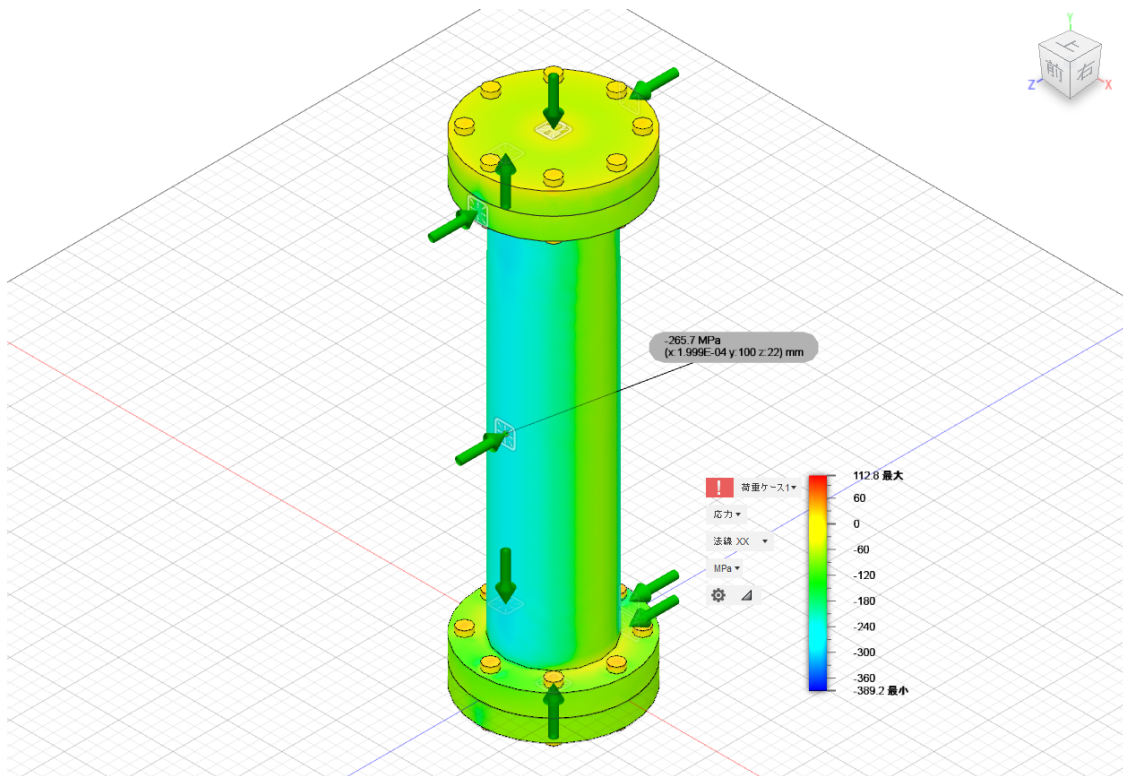


Fig3.4 円周方向応力シミュレーション

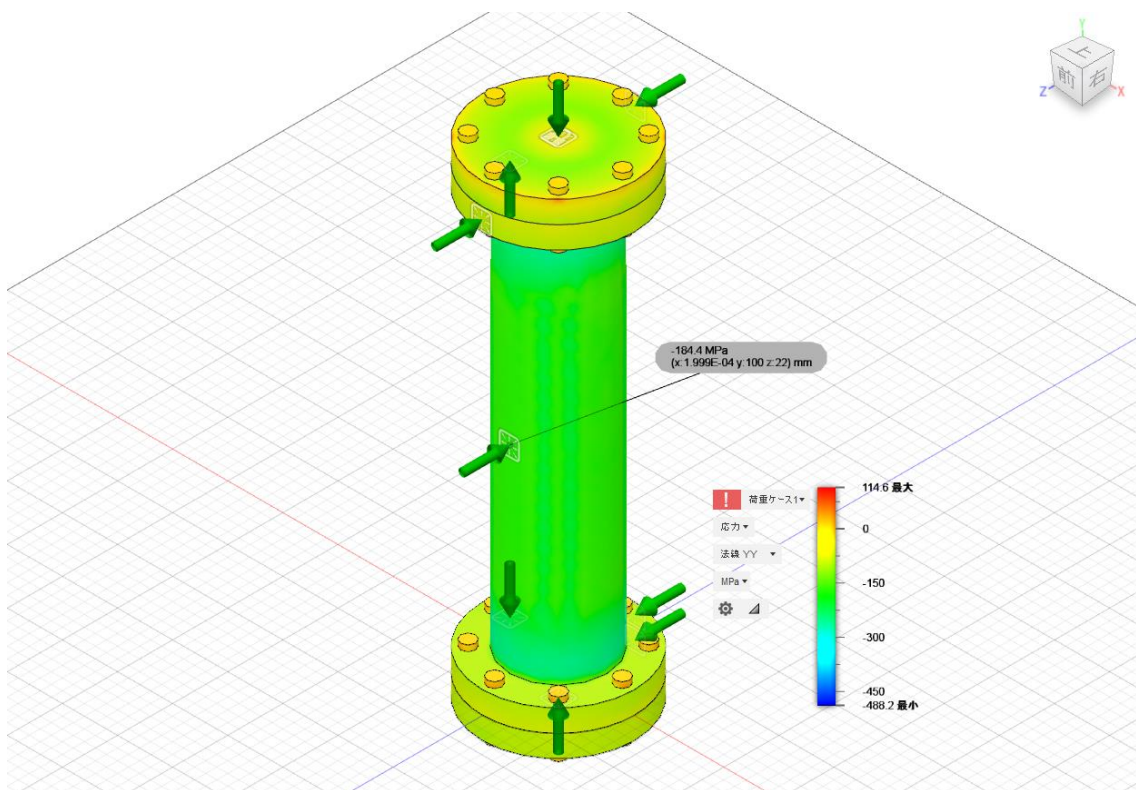


Fig3.5 軸方向応力シミュレーション

Fig3.4, Fig3.5において円筒中心部表面の円周方向応力は-265.7MPa, 軸方向応力は-184.4MPaとなった. 理論値(3.5), (3.6)と比較しても適切なシミュレーションであると考えられる.

このシミュレーション結果から軸方向応力の分布はおおよそ一様であるが, 円周方向応力の分布は90度間隔に渡って広がっていることが分かる. これを踏まえて, ナノテクト®耐圧容器による圧力実験の際の歪みゲージ取り付け箇所をFig3.8に示す. 円筒中心の任意の点, そこから円周方向に90度移動させた点, さらに円筒中心と蓋の間に円周方向用歪みゲージ(赤), 軸方向用歪みゲージ(白)を取り付ける.

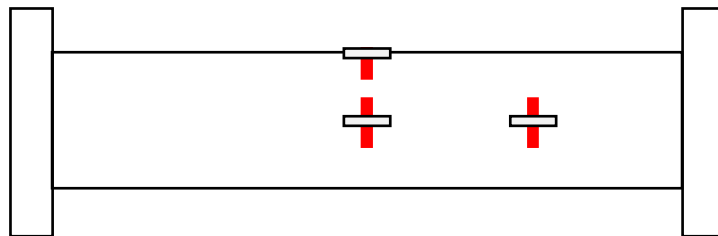


Fig3.8 歪みゲージ取り付け箇所

## 4章 ナノテクト<sup>®</sup>耐圧容器の圧力実験

### 4.1 圧力条件

実際に使用されているビーグルの潜航速度による圧力変化は0.5MPa/minであるため、より厳しい条件下での圧力条件を設定することが望ましい。プレートによる先行研究では、加圧速度4MPa/minは加速試験も兼ねているため、本実験でも同様に設定した。減圧速度においては、1MPa/min、2MPa/min、4MPa/minと変化させた先行研究における歪み値の結果をグラフ化し比較することにより、2MPa/min、4MPa/minにおいて歪み値が0に戻らないでいるヒステリシスを確認した。そのため本実験では減圧速度を1MPa/minで設定した。減圧速度の違いによる歪み値のグラフをFig4.1に示す。

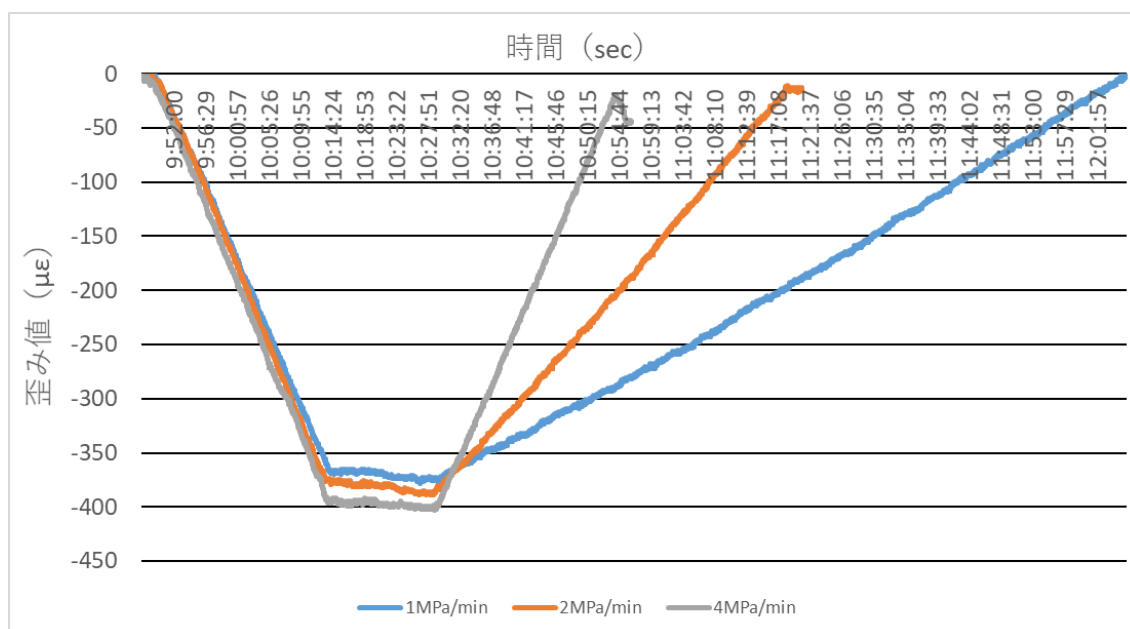


Fig4.1 減圧速度の違いによる歪み値

上記より圧力条件を、加圧速度4MPa/minで100MPaまで加圧し、潜航時間を踏まえ、そのまま15分間維持、減圧速度1MPa/minで0MPaまで減圧と設定した。

## 4.2 実験手順

- (1) 参照用試験プレートと耐圧容器に歪みゲージを張り付け、水と触れないように粘土を用いて保護する.
- (2) 中型高圧実験水槽に投入する前に、歪み測定装置と歪みゲージの接続の確認を行う.
- (3) 参照用試験プレートと耐圧容器を中型高圧実験水槽に投入し、加圧、維持、減圧を行う.
- (4) 実験終了後、参照用試験プレートと耐圧容器を取り出し、得られた歪みデータを評価、考察する.

実験前の参照用プレートを Fig4.2, 実験前の耐圧容器を Fig4.3, 歪み測定装置を Fig4.4, 中型高圧実験水槽を Fig4.5 に示す.



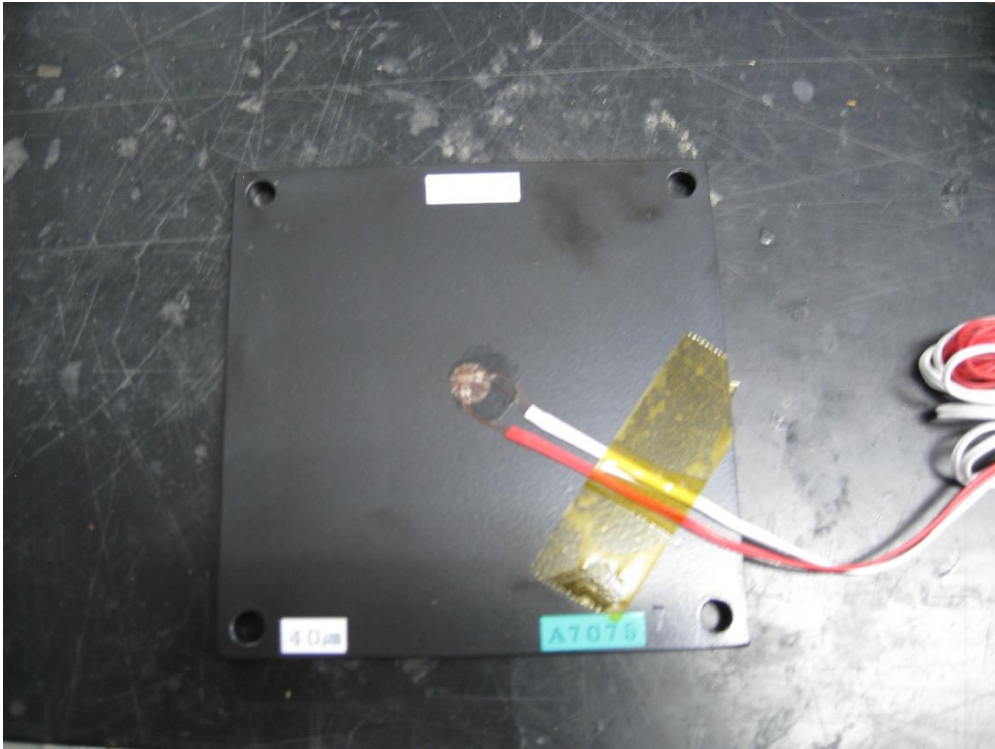


Fig4.2 実験前の参照用プレート



Fig4.3 実験前の耐圧容器



Fig4.4 歪み測定装置

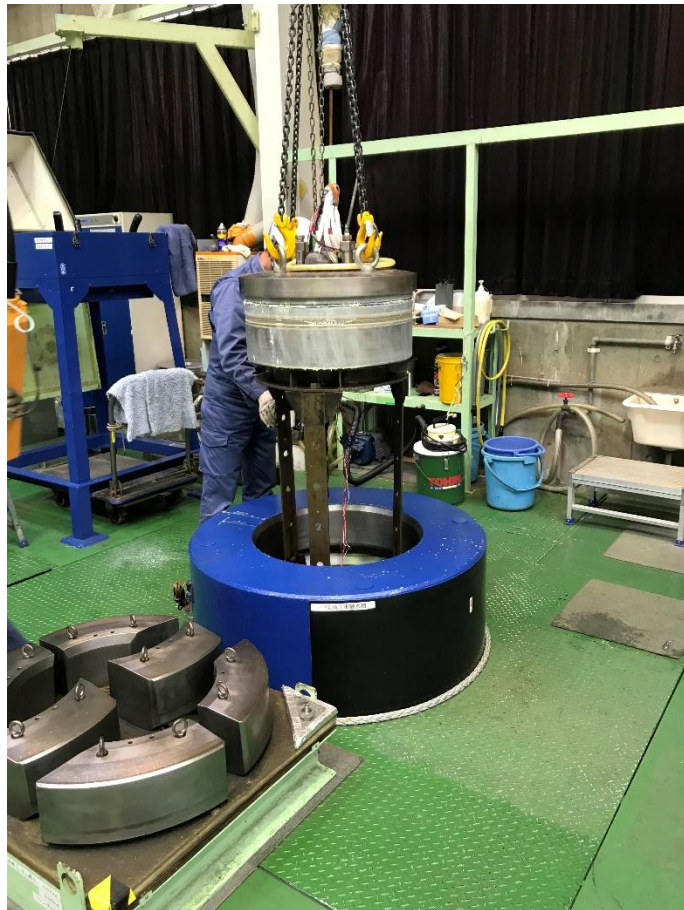


Fig4.5 中型高圧実験水槽



### 4.3 実験結果

歪み測定装置の各チャンネルから得られた歪み値を用いて作成したグラフを Fig4.6 に示す. また, 実験後の参照用プレートと耐圧容器を Fig4.7 に示す.

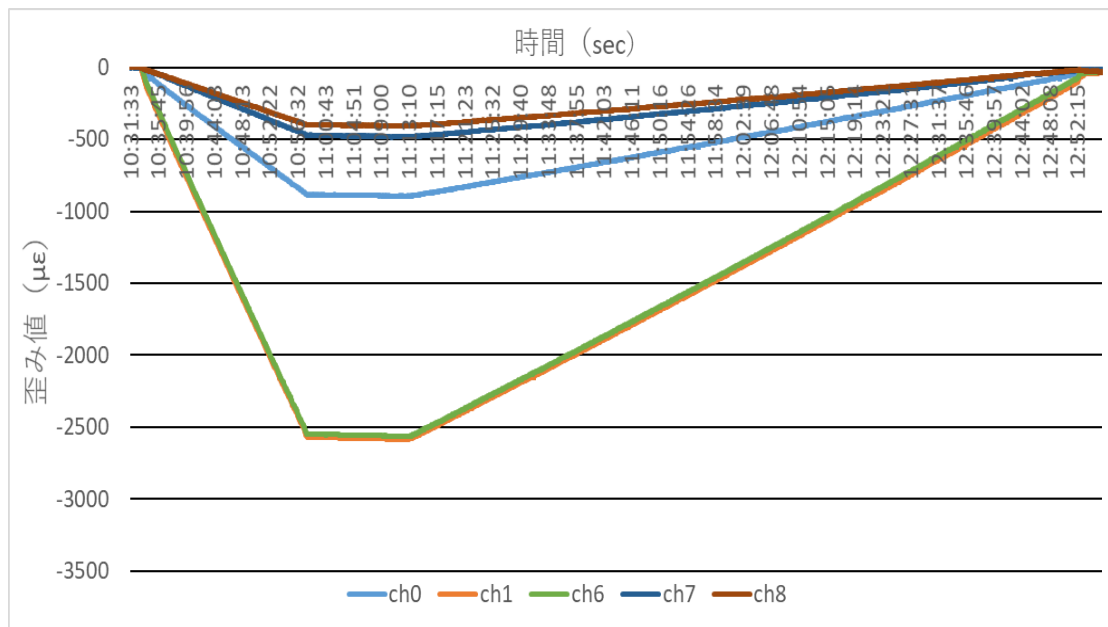


Fig4.6 A7075-T6 歪み値 (加圧速度 4MPa/min, 減圧速度 1MPa/min)



Fig4.7 実験後の参照用プレートと耐圧容器

## 4.4 考察

Fig4.6においてch2, ch4, ch5については実験途中で歪みゲージが剥がれたため、歪み値を得ることができなかった。得られた歪み値において、加圧開始時の歪み値、最大歪み値、減圧終了時の歪み値を Table4.1 に示す。  $\mu \varepsilon$  は歪み値においての  $10^{-6}$  を表す。

Table4.1 各圧力状態における歪み値比較表

	ch0	ch1	ch6	ch7	ch8
加圧開始時の歪み ( $\mu \varepsilon$ )	-1	2	0	-1	0
最大歪み ( $\mu \varepsilon$ )	-896	-2585	-2565	-485	-409
減圧終了時の歪み ( $\mu \varepsilon$ )	-24	-60	-43	-15	-20

ch0, ch1 は円筒中心の任意の点の軸方向歪み値、円周方向歪み値であり、ch6 は円周方向に 90 度移動させた点の円周方向歪み値である。ch7, ch8 は参照用試験プレートの歪み値である。参照用試験プレートは歪み値が非常に小さく形状がほとんど変化していないことが分かる。

最大歪みにおいて、軸方向よりも円周方向の方が歪みは大きいことが分かる。また、円筒中心の任意の点と円周方向に 90 度移動させた点の円周方向歪みは限りなく同値に近いことが分かる。

減圧終了時の歪みにおいて、歪み値が正の値になっていないことから膨れや剥離が生じていないと考えられる。

耐圧容器の歪み値から参照用プレートの歪み値を差し引いたグラフを Fig4. 8 に示す。参照用プレートの歪み値 ch7, ch8 に関しては方向によるものではないため、それぞれの歪み値を平均化して計算した。

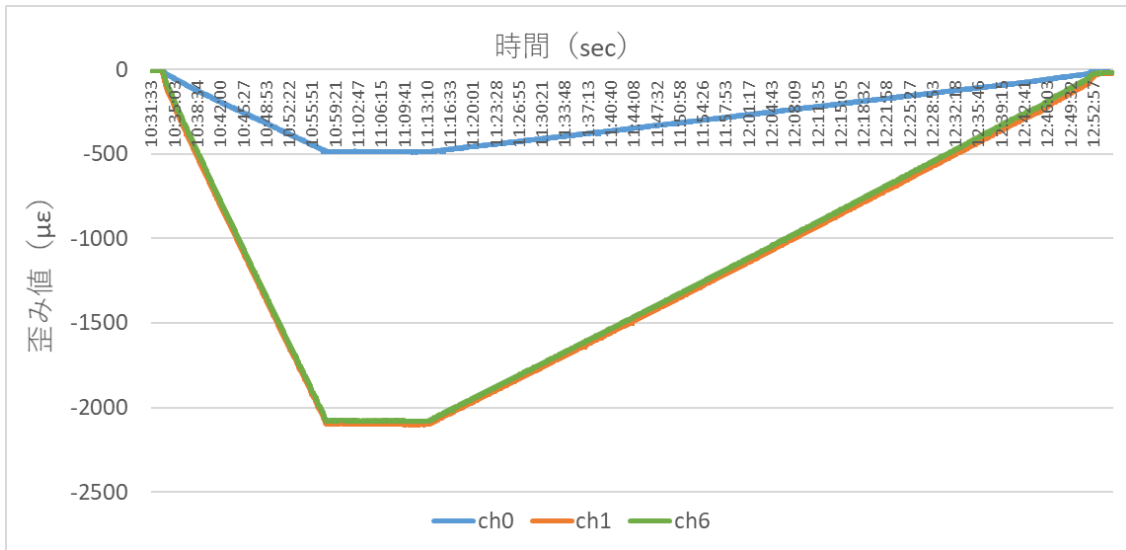


Fig4.8 耐圧容器の歪み値-参照用プレートの歪み値

このグラフから、アルミニウム成分による歪みやナノテクト<sup>®</sup>成分による歪みよりも構造による歪みが大きいことが分かる。

ここで費用の関係上、実験値として得ることができなかった無垢耐圧容器の歪みをシミュレーションにより参照した。外圧 100MPa 作用させた時の無垢耐圧容器の円周方向歪みを Fig4. 9, 軸方向歪みを Fig4. 10 に示す。

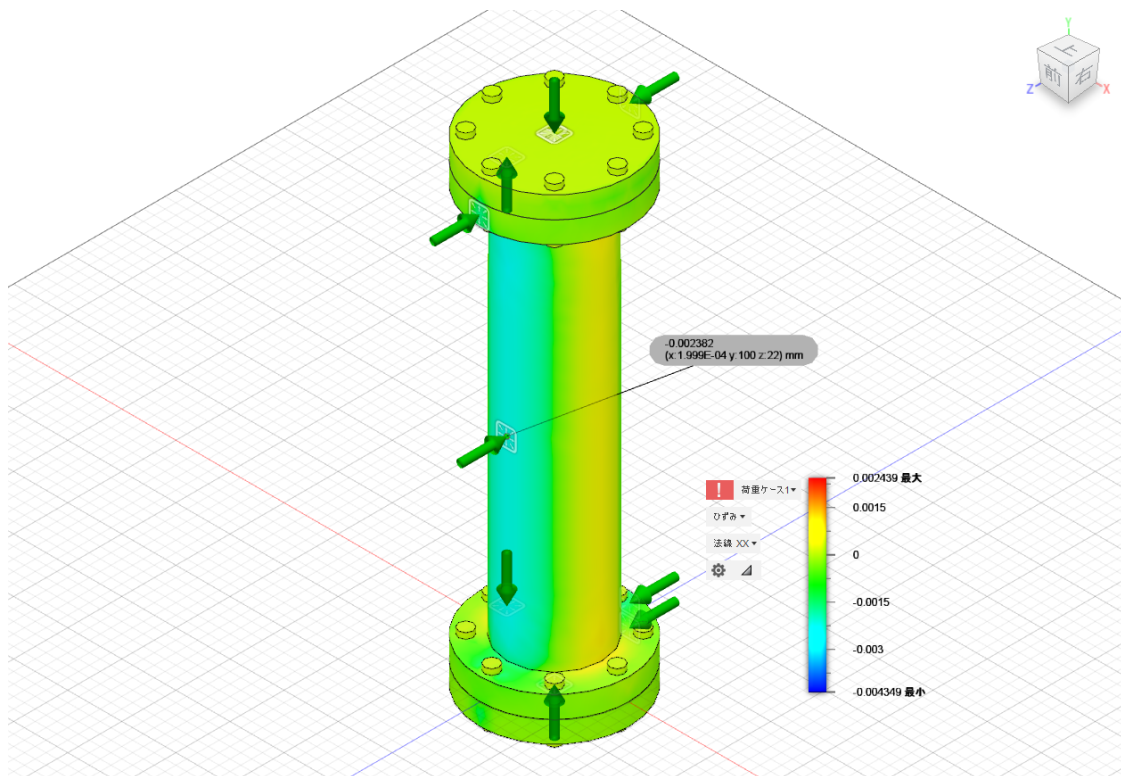


Fig4. 9 無垢耐圧容器の円周方向歪み

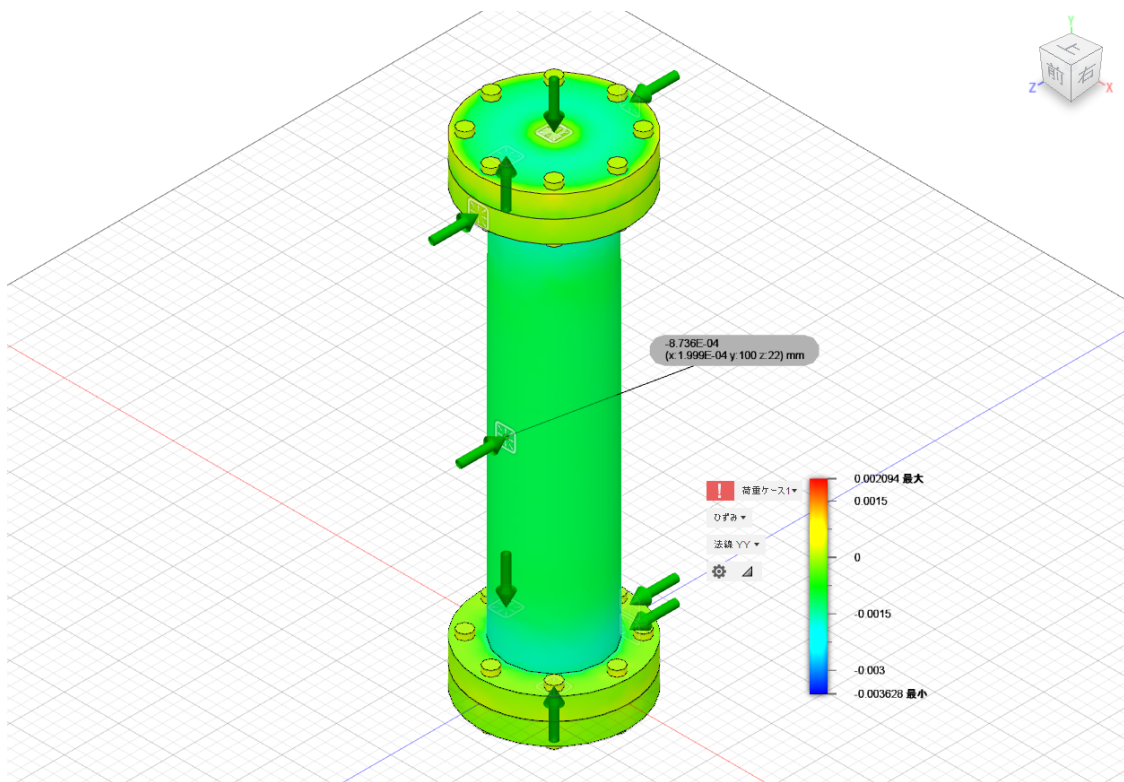


Fig4.10 無垢耐圧容器の軸方向歪み

Fig4.9, Fig4.10 において円筒中心の円周方向歪み値は $-2382(\mu \varepsilon)$ , 軸方向歪み値は $-874(\mu \varepsilon)$ となった.

ナノテクト<sup>®</sup>耐圧容器と無垢耐圧容器の歪み値の比較を Table4.2 に示す.

Table4.2 ナノテクト<sup>®</sup>耐圧容器と無垢耐圧容器の歪み値の比較表

	円周方向歪み ( $\mu \varepsilon$ )	軸方向歪み ( $\mu \varepsilon$ )
ナノテクト <sup>®</sup> 耐圧容器	-2585	-896
無垢耐圧容器	-2382	-874

Table4.2においてナノテクト<sup>®</sup>耐圧容器と無垢耐圧容器は限りなく同値であることが分かる。故に、ナノテクト<sup>®</sup>がアルミニウム合金の歪みに追従して成膜性を保っていると考えられる。

しかし、Fig4.9において90度移動させた円周方向歪みは実験値のような同じ値を示していない。本シミュレーションでは波数を考慮できなかったことが原因であると考えられる。今後の解析において、45度間隔でゲージを取り付けることが望ましいと考える。

Fig4.7において実験後の耐圧容器の様子から、ゲージの取り付け部分以外にも膨れや剥離は確認されなかった。



## 5 章 結言

本研究では「海洋部材に対する新素材を利用した表面処理の解析」と題し、A7075 材耐圧容器に対してナノテクト<sup>®</sup>による表面処理を施し、成膜性の評価、考察を行った。目的としては本表面処理の有用性を判断し、海洋部材の軽量化に寄与する事とした。その結果を以下にまとめる。

- ・プレートによる先行研究の実験から、減圧速度の違いによって歪みに関してヒステリシスを確認した。そこで実験遂行にあたって減圧速度を 1MPa/min にすることが適切であると判断した。

- ・理論値による応力値と実際の加圧状態のシミュレーションから、歪みゲージの取り付け位置を検討した。

- ・ゲージ取り付け部分に関しては、ナノテクト<sup>®</sup>がアルミニウム合金の歪みに対して同じように追従していることが考察できるため、成膜性は良好であると考えられる。故に A7075 に対するナノテクト<sup>®</sup>表面処理は有用であると考えられるため、軽量化に寄与することができた。

- ・ゲージ取り付け部分以外に関しては、外観上は膨れや剥離は確認されなかった。

- ・今後の課題としては、モードによる円周方向歪み値の周期の違いが予想されたため、ゲージの貼り付け位置を 45 度間隔に変えることでさらなる解析に繋がると考えられる。また、無垢耐圧容器の実験値も必要であると考えられる。

## 参考文献

- (1) 日本機械学会：「機械工学便覧 α 基礎編」
- (2) 機械設計便覧編集委員会：第3版「機械設計便覧」 p370 表 7-1 内外圧を受ける厚肉円筒の応力
- (3) Gwyn Griffiths : Ocean Technology Division Southampton Oceanography Centre Empress Dock, Southampton SO14 3ZH, UK : TECHNOLOGY NEEDS FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES
- (4) 日本規格協会：塩水噴霧試験方法, JIS Z 2371, ヌープ硬さ試験—試験方法, JIS Z 2251, 塗料一般試験方法-第5部塗膜の機械的性質-第3節耐おもり落下性, JIS K 5600-5-3, 塗料一般試験方法-第5部塗膜の機械的性質-第8節耐摩耗性 (研磨紙法), JIS K 5600-5-8, アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条, JIS H 4000

## 謝辞

本研究の遂行に際しまして、懇切丁寧な御指導ならびに御教示を賜りました方々に対しまして、心から感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、指導教官である九州大学大学院総合理工学府 月岡 哲教授、百留 忠洋 准教授からは、遠方にも関わらず度々来校して頂き、またメールを通して適切な御指導を頂きました。さらに本研究の実験を行う施設を提供して頂きました。

同じく九州大学大学院総合理工学府 中村 昌彦 准教授、木村 貴子様には指導教官の御不在時にあらゆる面でサポートして頂きました。

また、九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻の就職担当教官である羽田 亨 教授には就職活動において推薦書の作成等の多くの支援を頂き、無事に就職活動と研究を終えることができました。

技官の野田 穰士郎 氏にはパソコンやネットワークの管理をして頂いただけでなく、シミュレーションソフトの本を提供して頂きました。

私が在籍しております海洋機器開発研究室の先輩である片山 享 氏、山之内 啓太 氏、富村 文郎 氏には入学当初からお世話になり、あらゆる面でアドバイスを頂きました。

以上たくさんの方々に支えられ、本論文を完成させることができました。ここに改めて御礼申し上げます。

平成 30 年度 九州大学大学院 総合理工学 大気海洋環境システム学専攻修士論文

「海洋部材に対する新素材を利用した表面処理の解析」

海洋機器開発研究室 後藤 謙吾