

## Cr-Ni 系ステンレス鋼製厚板のシャルピー吸収エネルギー

### The Charpy absorption energy made of Cr-Ni type stainless steel thick plates

○山田 悠作<sup>\*1</sup>

宮崎 靖大<sup>\*2</sup>

志村保美<sup>\*3</sup>

Yusaku YAMADA <sup>\*1</sup>

Yasuhiro MIYAZAKI <sup>\*2</sup>

Yasumi SHIMURA <sup>\*3</sup>

**ABSTRACT** In this study, the effect of tensile pre-strain on Charpy impact value was clarified experimentally for the use of stainless steel as the bridge structural members. The stainless steels in this study are austenitic stainless steel SUS316 and duplex (lean) stainless steel SUS821L1 specified for JIS. From the results of the experiments, it was found that the Charpy impact values of SUS316 and SUS821L1 changed little and slightly with decreasing temperature. And the Charpy impact value with pre-strain decreased with increasing pre-strain for both stainless steel grades. The Charpy impact value of SUS316 and SUS821L1 was found to be sufficiently better than carbon steel for JIS, indicating that it has a good energy absorption capacity.

**Keywords:** シャルピー吸収エネルギー, SUS316, SUS821L1, 材料特性値  
Charpy absorption energy, SUS316, SUS821L1, material property values

#### 1. はじめに

建設から 50 年が経過する我が国における供用中の橋梁は、2019 年時点で 27%であり、2029 年には 52%になることが示されている[1]。これら多くの橋梁は、経年に伴う損傷が見られ、今後も継続して供用するためには、適切な維持管理を行っていくことが必要不可欠である。維持管理においては、従来の材料に比べて高性能な材料を用いることにより、ライフサイクルコストの低減や構造物の安全性の向上が期待できる。その方法として、高耐久性材料の使用が考えられる。ステンレス鋼は、鉄に Cr を 10.5% 以上含有することにより、耐食性を向上させており、上記課題解決に適した材料であるといえる。その実用方法として、橋梁の桁端部、ガセット部および二次部材等の腐食損傷や維持管理が困難な箇所を使用[2,3]することが有効であるといえる。なお、ステンレス鋼は地球希少元素を含有するため、従来の炭素

鋼に比べて材料価格の変動や高価となることが否めないものの、長期的な観点を重視した場合、ステンレス鋼の活用が合理的な構造物の設計に結びつくものと考えられる。

鋼橋部材に用いる冷間加工材は、加工時にひずみ時効による靱性の低下が懸念されるため、道路橋示方書[4]において、シャルピー値に応じた曲げ半径が規定されている。一方、ステンレス鋼は高靱性を示すため、この規定以上の曲げ加工を許容できることが考えられる。そこで、ステンレス鋼を橋梁に用いるためには、炭素鋼[5]と同様に、ひずみを受けた部分の靱性値の変化を把握しておくことが重要である。

本研究は、Cr-Ni 系ステンレス鋼である SUS316 および SUS821L1 を対象として、予ひずみを与える材料試験から材料特性値の変化を、シャルピー衝撃試験から温度および予ひずみ量の変化によるシャルピー吸収エネルギーの変化を明らかにすることを目的とする。まず、ステンレス鋼厚板に予ひずみを与える材料試験を実施し、塑性ひずみの進展による材料特性値の変化を調べる。つぎに、予ひずみを与える材料試験を実施した厚板試験体からシャルピー衝撃試験用の試験片を切り出すとともにシャルピー衝撃試験を実施し、シャルピー吸収エネルギーを調べる。そして、実験で得られたシャルピー吸収エネルギーと溶接構造用鋼材の JIS[6,7]で規定される炭素鋼のシャルピー吸収エネルギーを比較し、対象としたス

<sup>\*1</sup> 準会員 (学生)

長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻  
(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

<sup>\*2</sup> 第 2 種正会員

博士(工学) 長岡工業高等専門学校 環境都市  
工学科 准教授

(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

<sup>\*3</sup> 第 1 種正会員

工博 一般社団法人日本鋼構造協会  
(〒103-0027 東京都中央区日本橋 3-15-8)

表 1 対象材料の化学成分および機械的性質

鋼種	機械的性質			化学成分(%)									
	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	引張強さ $\sigma_u$ (MPa)	伸び $\delta$ (%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
SUS316	295	585	60	0.020	0.47	0.83	0.029	0.001	10.5	16.62	2.08	-	-
SUS821L1	559	731	38	0.022	0.35	3.21	0.024	0.000	2.22	20.84	0.50	1.06	0.16

テンレス鋼の材料特性値を明らかにする。

## 2. 材料試験方法

### 2.1 対象材料

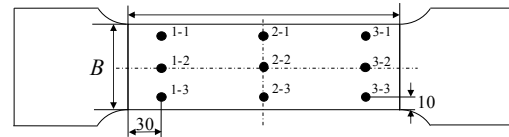
本研究は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 および二相系(リレーン型)ステンレス鋼 SUS821L1 を対象とする。SUS316 は、一般的なステンレス鋼である SUS304 に比べて高耐食性を有する。また、SUS821L1 は SUS304 と同等の耐食性を有しており、2015 年に JIS 化[8]された鋼種である。この鋼種は、汎用的な二相系ステンレス鋼(SUS329J4L など)に比べて Ni および Mo の含有量を低減させ、低コスト化を実現している。表 1 は、本研究で対象とした上記 2 種類のステンレス鋼(板厚はいずれも 12mm)の化学成分および機械的性質を示す。以降で説明する各試験体は、それぞれの鋼種から圧延方向 L および圧延直角方向 C を採取して製作している。

### 2.2 予ひずみを与えるための材料試験

図 1 は、予ひずみを与えるための材料試験に用いた試験体の形状を示す。同図の黒い印は、試験時にひずみを測定するためのひずみゲージの貼り付け位置を意味している。表 2 は、予ひずみを与えるための材料試験時のデータは、単軸塑性ひずみゲージ(共和電業製: KFEM-5-120-C1L3M2R)および試験機付属のロードセルより、図 1 に示した測定位置でのひずみおよび荷重を測定した。予ひずみを与えるための材料試験における負荷方法は、万能試験機(東京試験機製: 油圧式万能試験機 RU1000D)により、クロスヘッド変位を静的な速度で与えた。予ひずみを与える負荷条件は、荷重が完全に除荷された状態での試験体平行部のひずみが 5%および 10%となるよう実施した。

### 2.3 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験用の試験片は、2.2 で述べた予ひずみを与えた材料試験体の負荷方向と平行となる方向の長さが 55mm となるようにして、予ひずみを与えた材料試験体の平行部から 1 試験体当たり 15 試験片を採取した。図 2 は、このようにしてシャルピー衝撃試験用の試験片を切り出す状況およびシャ



●: ひずみゲージの貼り付け位置

図 1 予ひずみを与えるための材料試験用試験体

表 2 予ひずみを与えるための材料試験用試験体の実測寸法

試験体名	平行部 $L_0$ (mm)	板厚 $t$ (mm)	板幅 $B$ (mm)	断面積 $A$ (mm <sup>2</sup> )
316-5%-L	291	11.9	80	951
316-5%-C	292	12.0	80	957
316-10%-L	291	12.0	80	956
316-10%-C	291	12.0	80	956
821L1-5%-L	292	12.2	80	978
821L1-5%-C	291	12.1	80	971
821L1-10%-L	291	12.2	80	976
821L1-10%-C	291	12.1	80	970

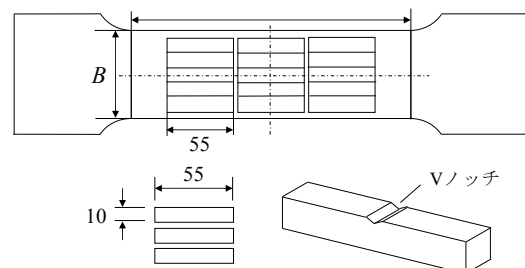


図 2 シャルピー衝撃試験用試験片

ルピー衝撃試験用の試験片寸法を示す。シャルピー衝撃試験用の試験片は、JIS Z 2242[9]に従う形状として V ノッチを設け、250℃で 1 時間の時効処理を行った。シャルピー衝撃試験は、-60℃~20℃の範囲で 20℃刻みの各温度で 3 体の試験片を用いて行った。本研究では比較用として、予ひずみゼロの試験片も同様にして行った。表 3 は、本研究で対象とするシャルピー衝撃試験用試験片名を示す。同表中の試験

表3 シャルピー衝撃試験の試験条件

鋼種	予ひずみ	採取方向	試験温度	試験片数	試験片名	鋼種	予ひずみ	採取方向	試験温度	試験片数	試験片名
SUS316	0%	圧延方向L	20	3	316-0-L-20-(1,2,3)	SUS821L1	0%	圧延方向L	20	3	821L1-0-L-20-(1,2,3)
			0	3	316-0-L-0-(1,2,3)				0	3	821L1-0-L-0-(1,2,3)
			-20	3	316-0-L--20-(1,2,3)				-20	3	821L1-0-L--20-(1,2,3)
			-40	3	316-0-L--40-(1,2,3)				-40	3	821L1-0-L--40-(1,2,3)
			-60	3	316-0-L--60-(1,2,3)				-60	3	821L1-0-L--60-(1,2,3)
		圧延直角方向C	20	3	316-0-C-20-(1,2,3)			圧延直角方向C	20	3	821L1-0-C-20-(1,2,3)
			0	3	316-0-C-0-(1,2,3)				0	3	821L1-0-C-0-(1,2,3)
			-20	3	316-0-C--20-(1,2,3)				-20	3	821L1-0-C--20-(1,2,3)
			-40	3	316-0-C--40-(1,2,3)				-40	3	821L1-0-C--40-(1,2,3)
			-60	3	316-0-C--60-(1,2,3)				-60	3	821L1-0-C--60-(1,2,3)
	5%	圧延方向L	20	3	316-5-L-20-(1,2,3)		5%	圧延方向L	20	3	821L1-5-L-20-(1,2,3)
			0	3	316-5-L-0-(1,2,3)				0	3	821L1-5-L-0-(1,2,3)
			-20	3	316-5-L--20-(1,2,3)				-20	3	821L1-5-L--20-(1,2,3)
			-40	3	316-5-L--40-(1,2,3)				-40	3	821L1-5-L--40-(1,2,3)
			-60	3	316-5-L--60-(1,2,3)				-60	3	821L1-5-L--60-(1,2,3)
		圧延直角方向C	20	3	316-5-C-20-(1,2,3)			圧延直角方向C	20	3	821L1-5-C-20-(1,2,3)
			0	3	316-5-C-0-(1,2,3)				0	3	821L1-5-C-0-(1,2,3)
			-20	3	316-5-C--20-(1,2,3)				-20	3	821L1-5-C--20-(1,2,3)
			-40	3	316-5-C--40-(1,2,3)				-40	3	821L1-5-C--40-(1,2,3)
			-60	3	316-5-C--60-(1,2,3)				-60	3	821L1-5-C--60-(1,2,3)
	10%	圧延方向L	20	3	316-10-L-20-(1,2,3)		10%	圧延方向L	20	3	821L1-10-L-20-(1,2,3)
			0	3	316-10-L-0-(1,2,3)				0	3	821L1-10-L-0-(1,2,3)
			-20	3	316-10-L--20-(1,2,3)				-20	3	821L1-10-L--20-(1,2,3)
			-40	3	316-10-L--40-(1,2,3)				-40	3	821L1-10-L--40-(1,2,3)
			-60	3	316-10-L--60-(1,2,3)				-60	3	821L1-10-L--60-(1,2,3)
		圧延直角方向C	20	3	316-10-C-20-(1,2,3)			圧延直角方向C	20	3	821L1-10-C-20-(1,2,3)
			0	3	316-10-C-0-(1,2,3)				0	3	821L1-10-C-0-(1,2,3)
			-20	3	316-10-C--20-(1,2,3)				-20	3	821L1-10-C--20-(1,2,3)
			-40	3	316-10-C--40-(1,2,3)				-40	3	821L1-10-C--40-(1,2,3)
			-60	3	316-10-C--60-(1,2,3)				-60	3	821L1-10-C--60-(1,2,3)

片名は、鋼種-予ひずみ-試験体の採取方向-シャルピー衝撃試験の試験温度-同じ試験条件内での試験片 No.を表している。例えば、316-10-L-20-3 は、鋼種が SUS316、完全除荷時のひずみが 10%、試験体の採取方向が圧延方向、シャルピー衝撃試験の試験温度が 20°C、同じ試験条件内での試験片 No.が 3 を意味する。

### 3. 実験結果

#### 3.1 予ひずみを与える材料試験結果

##### 3.1.1 応力ひずみ関係

図3は、予ひずみを与える材料試験により得られた応力ひずみ関係を示す。同図の縦軸はロードセルより得られた荷重を表2に示した予ひずみを与える材料試験体の平行部の断面積  $A$  で除した応力を、横軸は図1に示した予ひずみを与える材料試験体の平行部に貼り付けた9枚のひずみゲージから得られたひずみの値を平均して表している。図3より、対象としたステンレス鋼の応力ひずみ関係は、ラウンドハウス型を示すことがわかる。また、SUS316 と SUS821L1 の応力ひずみ関係を比較してみると、SUS821L1 は、SUS316 に比べて高強度を示すことも

に、圧延方向と圧延直角方向の耐力に差異が生じており、圧延直角方向の方がやや高い耐力を示す異方が確認できる。

表4は、除荷が完全に行えた時点での各試験体の予ひずみの値を示す。同表中の予ひずみの記号は、図1に示したひずみゲージの位置を意味している。同表より、各試験体の予ひずみの値は、シャルピー衝撃試験用の目標値である予ひずみ 5%および 10%に対して、0.9 倍から 1.18 倍となることが確認できる。また、平行部に貼り付けた9枚のひずみゲージの標準偏差は、0.20 から 1.05 程度となる。これらの予ひずみを導入した試験体からシャルピー衝撃試験用の試験片を製作した。

##### 3.1.2 材料特性値

表5は、予ひずみを与える材料試験により得られた SUS316 および SUS821L1 の材料特性値を示す。本研究では、ステンレス鋼の弾性限界点を 0.01%耐力として、オフセット法により材料特性値を求めた。図4は、本研究で扱う材料特性値の算出方法を示す。除荷時の材料特性値は、図4の応力ひずみ関係のひずみが最大となる点を折り返し点（原点）とした赤い座標軸より求めることとする。表5および図4中

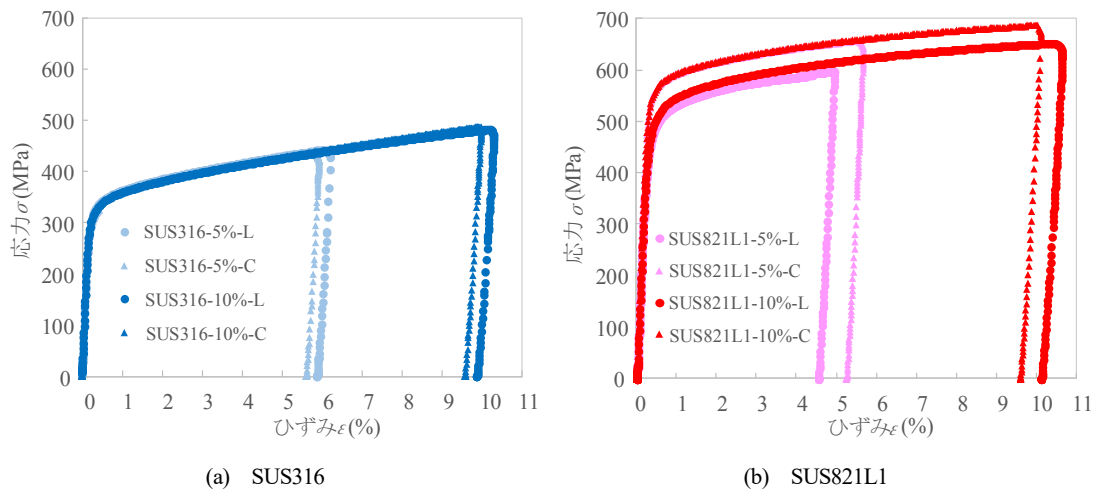


図3 応力ひずみ関係

表4 予ひずみの実測値

鋼種	採取方向	予ひずみ(%)										目標値
		1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	平均	
SUS316	圧延方向L	5.4	6.0	5.7	5.9	6.1	6.1	5.9	6.0	5.7	5.9	5.0
		9.6	9.7	9.5	10.0	10.2	10.2	9.6	10.2	9.8	9.9	10.0
	圧延直角方向C	5.9	6.1	6.0	5.5	5.6	5.7	5.3	5.4	5.1	5.6	5.0
		9.9	10.4	9.5	6.7	10.2	10.3	9.6	9.7	9.8	9.6	10.0
SUS821L1	圧延方向L	4.3	4.7	4.4	4.7	4.8	4.7	4.3	4.8	4.2	4.5	5.0
		9.7	10.3	9.8	10.6	10.4	10.6	9.8	10.3	9.8	10.1	10.0
	圧延直角方向C	5.3	6.0	5.2	5.2	5.3	5.4	4.7	5.4	4.6	5.3	5.0
		9.9	10.6	9.5	10.3	10.2	10.3	9.1	7.3	9.2	9.6	10.0

の記号は、 $E_0$ および $E_1$ がヤング係数およびみかけのヤング係数を、 $\sigma_{0.01}$ 、 $\sigma_{0.01,0}$ 、 $\sigma_{0.01,1}$ が0.01%耐力を意味する。なお、 $E$ の添え字0および1は引張負荷時および除荷時の応力ひずみ関係の線形域の勾配を、 $\sigma_{0.01}$ の添え字0、および1は、図4に示すように、ヤング係数 $E_0$ および $E_1$ を用いて求めた場合を意味する。図5は、表5の $E_0$ を、 $E_1$ で無次元化した結果を示す。同図の横軸は、塑性ひずみ $\varepsilon^p$ を意味する。

$$\varepsilon^p = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{0.01} \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_{max}$ および $\varepsilon_{0.01}$ は、応力ひずみ関係の折り返し点のひずみおよび $\sigma_{0.01}$ のひずみを意味する。図5より、除荷時のみかけのヤング係数 $E_1$ の値は、ヤング係数 $E_0$ に比べて、SUS316で約0.59倍から約0.74倍、SUS821L1で約0.67倍から0.88倍となる。既往の研究[10]より、ステンレス鋼のみかけのヤング係数は、塑性ひずみの進展に伴い減少することが明らかになっており、本研究でも同様の傾向がみられた。

図6および図7は、表5に示す $\sigma_{0.01,0}$ および $\sigma_{0.01,1}$ を、 $\sigma_{0.01}$ で無次元化した結果を示す。同図の横軸は、図5と同様に式(1)を用いて算出した塑性ひずみ $\varepsilon^p$ である。図6より、 $E_0$ を用いて求めた除荷時の $\sigma_{0.01,0}$ は、 $\sigma_{0.01}$ に比べて、SUS316で約0.29倍から約0.37

表5 材料特性値

試験体名	負荷		除荷		
	$E_0$ (GPa)	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	$E_1$ (GPa)	$\sigma_{0.01,0}$ (MPa)	$\sigma_{0.01,1}$ (MPa)
316-5%-L	205	210	144	60	338
316-5%-C	190	230	140	72	385
316-10%-L	222	160	130	59	338
316-10%-C	208	202	138	44	245
821L1-5%-L	197	336	174	160	373
821L1-5%-C	212	388	172	170	469
821L1-10%-L	191	379	142	87	365
821L1-10%-C	219	375	147	81	463

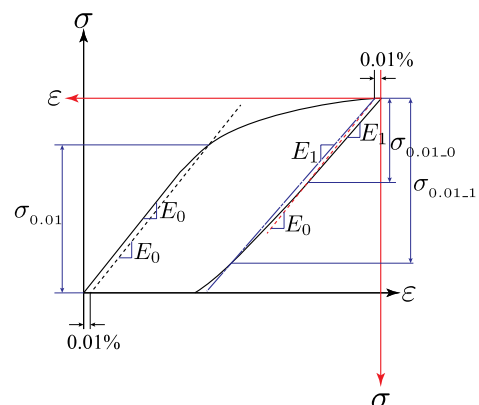


図4 ヤング係数、みかけのヤング係数および0.01%耐力

倍, SUS821L1 で約 0.28 倍から約 0.48 倍となる. また, 図 7 より,  $E_1$  を用いて求めた除荷時の  $\sigma_{0.01\_1}$  は,  $\sigma_{0.01}$  に比べて, SUS316 で約 1.21 倍から約 2.11 倍, SUS821L1 で約 1.05 倍から約 1.23 倍となる. これらの値の変化は,  $E_0$  に比べて  $E_1$  が減少したことによる

ものである.

### 3.2 シャルピー衝撃試験結果

図 8 および図 9 は, SUS316 および SUS821L1 のシャルピー吸収エネルギーと試験温度の関係を示す. これら図中のプロットは全試験片の結果を, 実線は

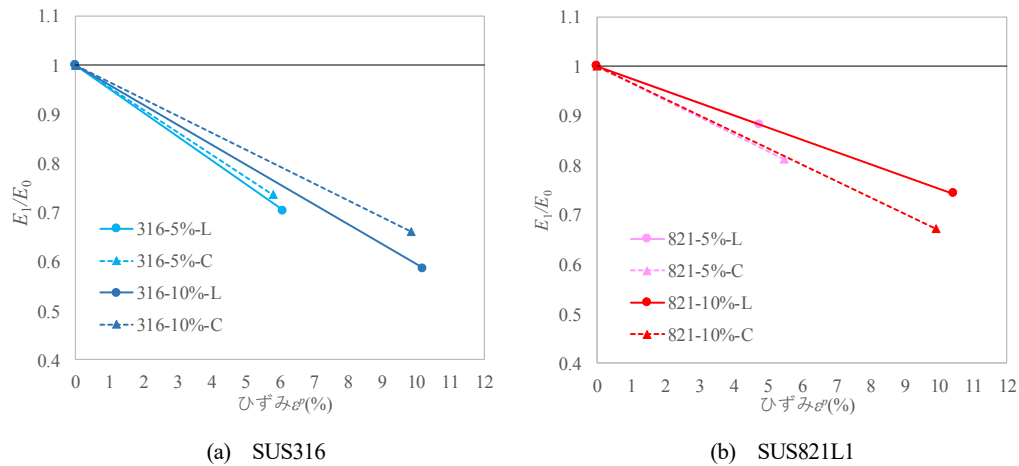


図 5 みかけのヤング係数の変化

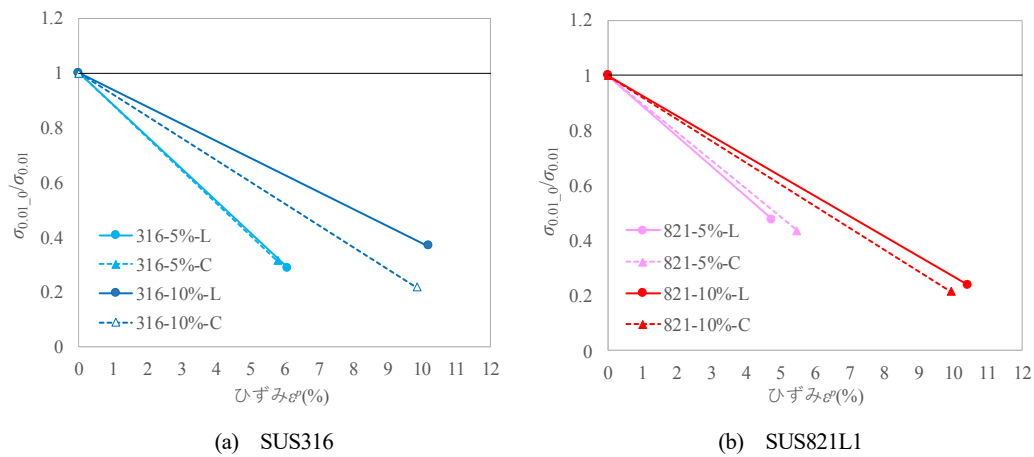


図 6 除荷時の 0.01%耐力  $\sigma_{0.01\_0}$

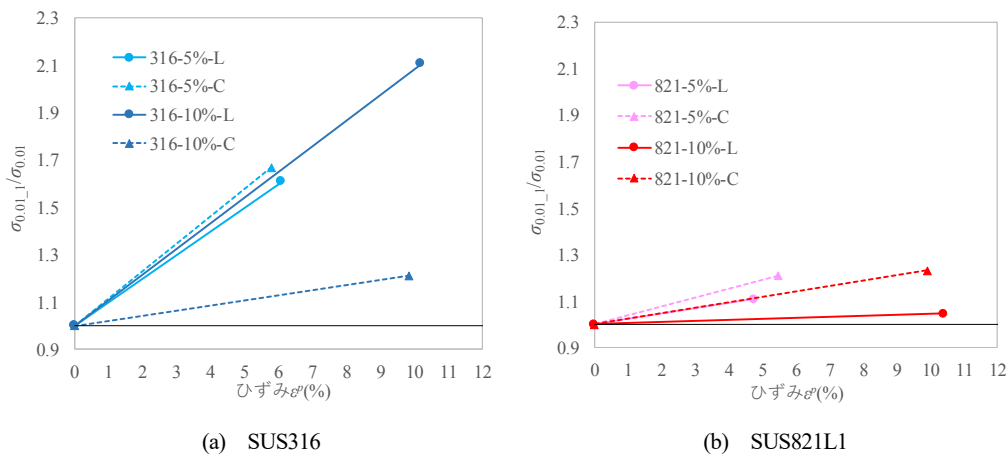


図 7 除荷時の 0.01%耐力  $\sigma_{0.01\_1}$

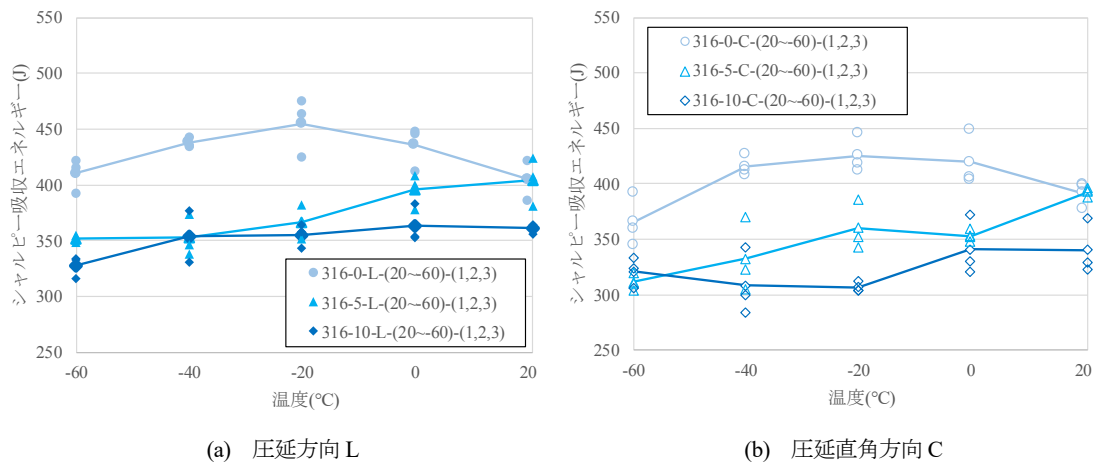


図 8 SUS316 のシャルピー吸収エネルギーと温度の関係

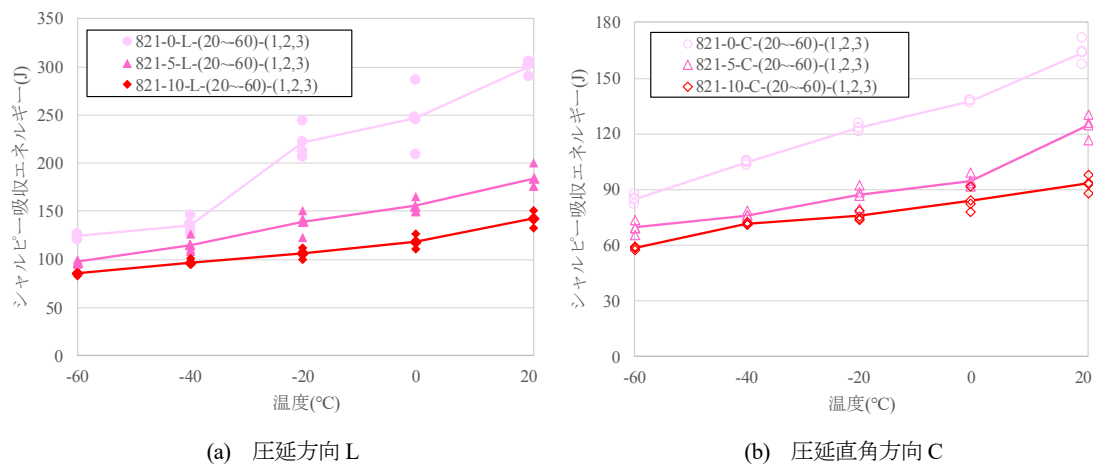


図 9 SUS821L1 のシャルピー吸収エネルギーと温度の関係

各試験条件 3 体の結果の平均を表している。両図中の試験片名は、表 3 で示した通りである。以下では、各試験条件 3 体の結果の平均値について述べる。まず、図 8 より、SUS316 のシャルピー吸収エネルギーは、全ての温度域で 300J を概ね超える値が得られており、試験温度の変化による明確な変化がほとんど見られない。この結果は、オーステナイト系ステンレス鋼が、極低温においても靱性の低下が極めて少ないという特性を有している[11]ためである。また、図 9 より、SUS821L1 のシャルピー吸収エネルギーは、温度低下に伴う減少がわずかに見られ、温度が 20 °C の時に対する -60 °C の時のシャルピー吸収エネルギーが、約 0.41 倍から約 0.63 倍となった。SUS821L1 は、オーステナイト相とフェライト相から成る二相系ステンレス鋼であるため、オーステナイト相のみから成る SUS316 に比べて温度低下に伴いシャルピー吸収エネルギーが減少する傾向がみられる。

図 10 および図 11 は、SUS316 および SUS821L1 のシャルピー吸収エネルギーと予ひずみの関係を示す。両図中の試験片名は、表 3 で示した通りである。また、図 11 中には、JIS[6,7]に規定される炭素鋼の B 材および C 材のシャルピー吸収エネルギーである 27J および 47J を線で表している(以下では、この値を規格値と称する。)。図 10 および図 11 より、予ひずみの増加とともにシャルピー吸収エネルギーが低下し、予ひずみが 0% の時に対する 10% の時のシャルピー吸収エネルギーは、SUS316 で約 0.72 倍から約 0.89 倍、SUS821L1 で約 0.47 倍から約 0.72 倍となった。図 10 および図 11 を比較してみると、SUS821L1 のシャルピー吸収エネルギーは、SUS316 に比べて予ひずみの影響が大きくなることが確認できる。この理由としては、前述の温度変化による影響と同様に、鋼種の構造が影響しているものと考えられる。また、図 11 にて、実験で得られたシャルピー吸収エネルギーの最小値が、JIS における B 材及び C 材のシャルピー

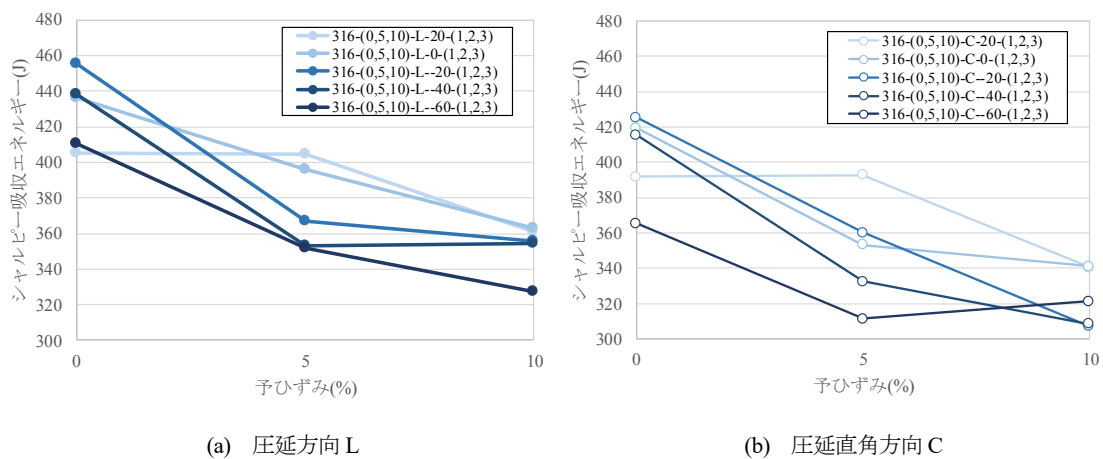


図 10 SUS316 のシャルピー吸収エネルギーと予ひずみの関係

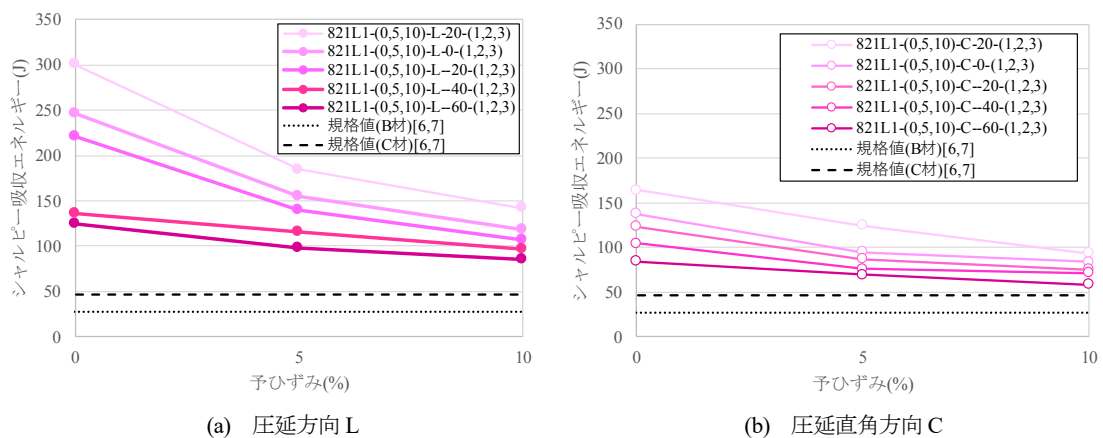


図 11 SUS821L1 のシャルピー吸収エネルギーと予ひずみの関係

一吸収エネルギーの約 2.17 倍および約 1.25 倍となることから、本研究で対象とした SUS316 および SUS821L1 は、予ひずみ 10%でも十分なエネルギー吸収能力を有することがわかる。

#### 4. おわりに

本研究は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 および二相系(リッチ型)ステンレス鋼 SUS821L1 を対象として、予ひずみを与える材料試験を行い、塑性ひずみの進展に伴う材料特性値の変化およびシャルピー吸収エネルギーの変化を明らかにした。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) SUS316 および SUS821L1 のみかけのヤング係数は、塑性ひずみの進展に伴い減少する。
- (2) 対象とした SUS316 および SUS821L1 のヤング係数  $E_0$  を用いて求めた除荷時の 0.01%耐力は、塑性ひずみの進展に伴い、初期の 0.01%耐力に対して、52%から 72%減少する。

- (3) 対象とした SUS316 および SUS821L1 のみかけのヤング係数  $E_1$  を用いて求めた除荷時の 0.01%耐力は、塑性ひずみの進展に伴い、初期の 0.01%耐力に対して、5%から 111%増加する。
- (4) 試験温度によるシャルピー吸収エネルギーの変化は、予ひずみ量の有無に関わらず、SUS316 にてほとんど見られず、SUS821L1 にて試験温度の低下に伴いシャルピー吸収エネルギーがわずかに減少する。
- (5) 予ひずみの影響としては、SUS316 に比べて SUS821L1 のシャルピー吸収エネルギーの変化が、17%から 25%程度大きくなる。
- (6) 予ひずみ 10%を与えた場合においても、SUS316 および SUS821L1 の 0°Cシャルピー吸収エネルギーは、それぞれ 341J および 84J であり、JIS G3106 で規定されるシャルピー吸収エネルギー値(B材(27J)およびC材(47J))に対して、SUS316



で12.6倍および7.3倍, SUS821L1で3.1倍および1.8倍となった.

本研究で対象としたステンレス鋼は, 限られた材料による結果であるため, 今後, 板厚の違い等, より多くのデータを同様にして検証していく必要がある.

## 謝辞

本研究で実施した試験にあたっては, 一般社団法人日本鋼構造協会より, 材料の提供および試験体の製作を頂きました. ここに記して謝意を表します.

## 参考文献

- [1] 国土交通省:国土交通白書, 国土交通省, 2020
- [2] 堀澤英太郎, 宮寄靖大:部材両端をステンレス鋼とした鋼製部材の圧縮および曲げ強度評価法, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.1-14, 2019.
- [3] 井崎茜, 宮寄靖大, 小野潔, 宮下剛:Cr-Ni系ステンレス鋼の材料特性および材料モデルの定式化, 鋼構造年次論文報告集, 第27巻, pp.1-9, 2019.
- [4] 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 II鋼橋・鋼部材編, 日本道路協会, 2017.
- [5] 本間宏二, 三木千壽, 征矢勇夫, 笹尾英弥, 奥村健人, 原修一:冷間加工を受けた構造用鋼材の歪み時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究, 土木学会論文集, No.570, I-40, pp.153-162, 1997.
- [6] 日本産業標準調査会:JIS G3106 溶接構造用圧延鋼材, 日本規格協会, 2015.
- [7] 日本産業標準調査会:JIS G3114 溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材, 日本規格協会, 2016.
- [8] 日本産業標準調査会:JIS G4304 熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯, 日本規格協会, 2015.
- [9] 日本産業標準調査会:JIS Z2242 金属材料のシャルピー衝撃試験方法, 日本規格協会, 2018.
- [10] 高橋政宏, 宮寄靖大:SUS329J3Lの塑性ひずみ増大に伴う弾性係数の変化, 土木学会関東支部新潟会論文集, I-3, 2012.
- [11] 桜井武尊, 井口将秀, 中平昌隆, 斎藤徹, 小泉徳潔:極低温におけるオーステナイト系ステンレス鋼の破壊靱性値とオーステナイト相の安定度との相関, 低温工学, Vol52, No.4, pp.260-267, 2017.