

## リーン二相系ステンレス鋼の材料特性値に関するデータ分析

櫻井 捷瑛\* 三好 崇夫\*

### Data Analysis on Mechanical Properties of Lean Duplex Stainless Steel

Shoei SAKURAI, Takao MIYOSHI

#### ABSTRACT

Although stainless steel has superior corrosion resistance, its material cost is high compared to structural carbon steel. Structural application of recently developed lean duplex stainless steel (LDSS) is expected to be able to reduce not only construction cost but also maintenance one including repainting, because its nickel content is at least 1.5%. However, variation and plate thickness dependencies of mechanical properties are not always clarified enough. In this study, authors carried out data analysis on mechanical properties of LDSS by adding new material coupon test data to the existing data set. As a main result, slight anisotropy of mechanical properties except for proportion limit was observed depending on the rolling direction. However, difference between tension loading and compression one gives almost no effect on mechanical properties. Variation of material properties decreases with increase of stress. Proportion limit, 0.2% proof stress, 1% proof stress and tensile strength tends to decrease with increase of plate thickness. 0.2% proof stress has high correlation with proportion limit, 1% proof stress, and stress at 10% strain. Furthermore, in case of tensile strength, correlation with material properties is low compared to the case of 0.2% proof stress.

#### 1. はじめに

耐食性の高いステンレス鋼は、その高材料コストにより、わが国では厳しい腐食環境下にある水際構造物等で限定的に使用されている。ステンレス鋼の材料コストはニッケル含有量に依存し、一般的なオースナイト系ステンレス鋼 SUS304 では8~10%のニッケルを含み、それが材料コストを引き上げている。しかし、近年開発されたリーン二相系ステンレス鋼（以下、LDSS と略称する）は、ニッケル含有量が最少1.5%まで削減されており、材料コストも縮減できるとされている。LDSS の耐食性は、ニッケル含有量の削減にも関わらず SUS304 と同等であり、土木構造物への活用によるミニマムメンテナンス化、長寿命化やLCC 縮減が期待されている<sup>1)</sup>。我が国では、LDSS として SUS821L1 が2015年9月に JIS 規格化されている<sup>2)</sup>。

LDSS の土木構造物への活用に向けて、著者らは同鋼からなる溶接部材の残留応力分布や終局強度特性について明らかにしてきた<sup>3)~5)</sup>。しかし、一般的に、鋼材の材料特性値はばらつきや板厚依存性も示す<sup>6)</sup>。特に、ステンレス鋼の応力-ひずみ曲線はラウンドハウス形であるため、材料特性値のばらつきが同鋼構造物の終局強度に及ぼす影響は、炭素鋼構造物の場合に比べて大きいと予想される。また、ステンレス鋼の材料特性値には、圧延方向による若干の異方性や引張、圧縮の非対称性も認められており、それらが終局強度に影響を及ぼすことも考えられる。さらに、著者らは MRO 曲線と称するステンレス鋼の構成式を提案しているが<sup>3)</sup>、同構成式の記述には、弾性係数、比例限界（本研究では、0.01%耐力と定義する）、0.2%耐力、1%耐力と10%ひずみ時応力が必要となる。しかし、一般的に、

\*都市システム工学科

0.2%耐力や引張強度はミルシートから容易に把握できるが、弾性係数や比例限界は把握できないため、0.2%耐力や引張強度から構成式の記述に必要なそれらの材料特性値が推定できる手法の確立が望まれる。

著者らは、先行研究<sup>7)</sup>において、LDSSとしてEN 1.4162を対象に、引張試験を実施するとともに、既往の文献に報告されている材料試験結果も収集、分析し、材料特性値のばらつきや板厚依存性について明らかにした。しかし、詳細な分析結果が報告できていないことや、新たに得られたLDSSの材料試験結果<sup>8)</sup>も反映できていない。

本研究では、先行研究<sup>7)</sup>で取得、収集したLDSSの材料試験結果に新たな結果も追加し、弾性係数、比例限界、0.2%耐力や引張強度等の材料特性値の試験条件ごとのばらつき、それらの板厚との関係についても明確にする。また、0.2%耐力と引張強度の材料特性値との関係についても明確にする。

## 2. 材料試験結果

公称板厚6mmのLDSSを用いた5体の圧延方向引張試験、4体の同直角方向引張試験結果<sup>7)</sup>、公称板厚6, 8, 10, 12mmのLDSSを用いた各板厚につき2体ずつの圧延方向引張試験結果(合計8体)<sup>9)</sup>、各々の板厚につき2体ずつの圧延方向と同直角方向圧縮試験結果(合計16体)<sup>9)</sup>、公称板厚4, 6, 8, 10, 12, 16, 20mmのLDSSを用いた各板厚につき1体ずつの圧延方向と

同直角方向引張、圧縮試験結果(合計28体)<sup>10)</sup>、公称板厚6mmのLDSSを用いた3体の圧延方向引張試験結果<sup>8)</sup>から、結果に不備のあった公称板厚8, 20mmの圧延方向圧縮試験結果を除いた、合計62体の材料試験結果を分析した。

## 3. 分析結果

### 3・1 材料特性値のばらつき

試験条件(圧延方向引張試験、同直角方向引張試験、圧延方向圧縮試験と同直角方向圧縮試験)別に、弾性係数、比例限界、0.2%耐力、1%耐力、10%ひずみ時応力と引張強度について、それぞれの分布傾向を定性的に把握するために頻度分布をそれぞれ図-1~6に示す。また、各図中には、その適用には検討の余地があるが、それぞれの分布状況を定量的に把握するため、さしあたり試験条件別ならびに全データに関する正規分布(ND)を示す。なお、10%ひずみ時応力と引張強度については引張試験結果のみを示した。

図-1より、圧延方向引張試験による弾性係数のばらつきが他に比べて大きい。引張、圧縮の別を問わず、圧延方向よりも直角方向の弾性係数が若干大きい傾向が見受けられる。圧延方向については、圧縮と引張とで平均値が概ね一致している。

図-2より、比例限界については、試験条件によってその平均値は異なっているが、全データに対する平

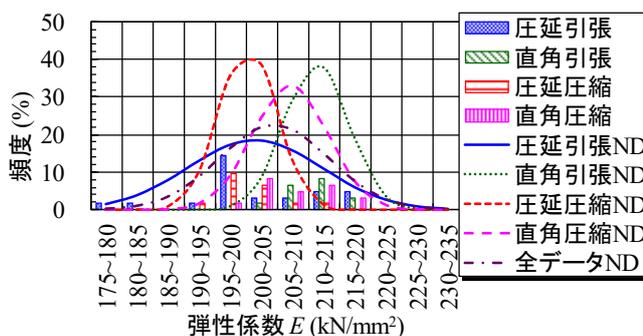


図-1 弾性係数の頻度分布

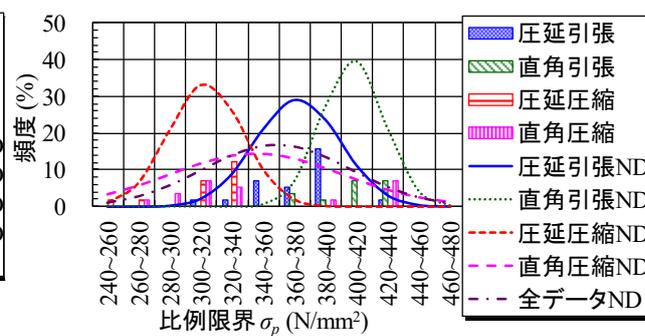


図-2 比例限界の頻度分布

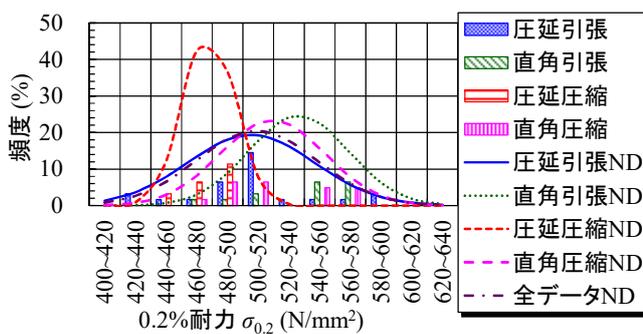


図-3 0.2%耐力の頻度分布

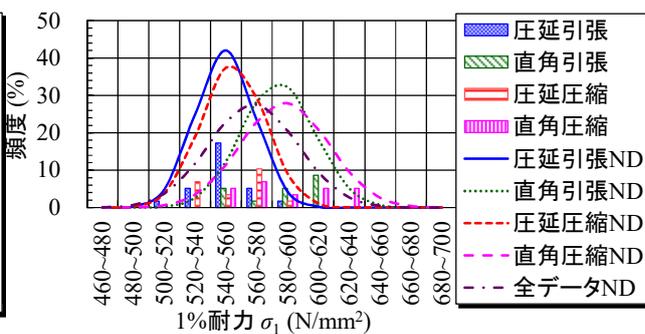


図-4 1%耐力の頻度分布

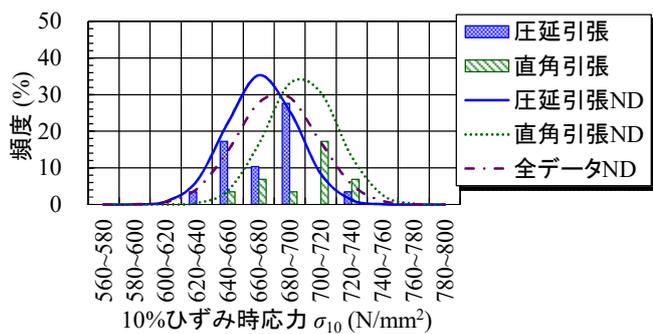


図-5 10%ひずみ時応力の頻度分布

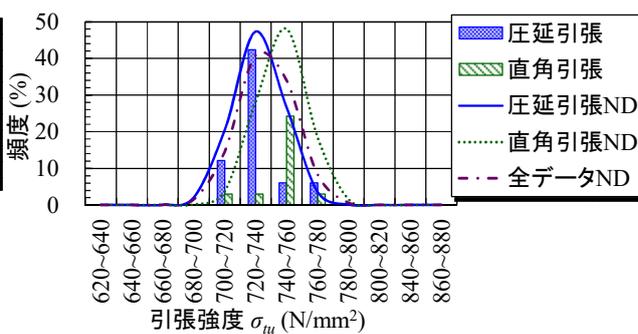


図-6 引張強度の頻度分布

表-1 機械的特性値の統計値

材料特性値		サンプル数	平均値 (N/mm²)	全データとの比	標準偏差 (N/mm²)	変動係数	最大値 (N/mm²)	最小値 (N/mm²)	95パーセンタイル (N/mm²)	5パーセンタイル (N/mm²)
弾性係数 E	圧延引張	22	201446	0.98	10661	0.0529	218000	176050	217850	182010
	直角引張	12	211380	1.03	4912	0.0232	219500	204000	218675	204550
	圧延圧縮	13	200331	0.98	4409	0.0220	212000	194800	208100	194920
	直角圧縮	15	207153	1.01	5857	0.0283	215800	196300	215240	199380
	全データ	62	204516		8672	0.0424	219500	176050	217890	194810
比例限界 σp	圧延引張	19	372	1.04	27	0.0722	422	305	398	329
	直角引張	11	407	1.14	19	0.0470	428	377	428	377
	圧延圧縮	13	313	0.87	23	0.0738	339	254	338	269
	直角圧縮	15	345	0.96	55	0.1590	434	279	433	284
	全データ	58	359		47	0.1315	434	254	428	285
0.2%耐力 σ0.2	圧延引張	22	505	0.99	41	0.0808	589	431	583	434
	直角引張	12	536	1.05	32	0.0595	566	461	565	480
	圧延圧縮	13	478	0.94	16	0.0332	495	447	494	454
	直角圧縮	15	519	1.02	34	0.0649	563	464	562	481
	全データ	62	509		39	0.0759	589	431	564	448
1%耐力 σ1	圧延引張	18	550	0.97	18	0.0328	582	506	575	520
	直角引張	12	584	1.03	23	0.0397	607	545	606	545
	圧延圧縮	13	555	0.98	20	0.0360	580	521	578	526
	直角圧縮	15	588	1.04	28	0.0475	625	543	624	553
	全データ	58	568		28	0.0500	625	506	619	524
10%ひずみ時応力 σ10	圧延引張	18	672	0.99	22	0.0324	732	639	699	641
	直角引張	11	698	1.02	22	0.0314	722	656	721	663
	全データ	29	682		25	0.0371	732	639	721	645
引張強度 σtu	圧延引張	22	732	0.99	16	0.0214	772	704	764	711
	直角引張	11	747	1.01	15	0.0204	766	714	763	717
	全データ	33	737		17	0.0233	772	704	765	713

均値は圧延方向引張試験によるものと概ね一致している。これは、後述の表-1 に示すように、前者が 359 N/mm² であるのに対して、後者は 372N/mm² であることから確認できる。

図-3 より、0.2%耐力については、圧延方向に比べて直角方向がやや大きい傾向が認められ、直角方向については圧縮、引張による相違は然程見られないが、圧延方向については、引張に比べて圧縮の方が小さい。0.2%耐力については、全データの平均は圧延方向引張試験の場合の平均値と殆ど一致している。

図-4 より、1%耐力は、圧延方向による相違は明確であるが、引張、圧縮による差異は見られない。

図-5, 6 より、10%ひずみ時応力と引張強度いずれも、比例限界や 0.2%耐力に比べてばらつきは小さい。また、圧延方向に比べて直角方向の方がやや大きい傾向が見受けられる。

弾性係数、比例限界、0.2%耐力と1%耐力、10%ひずみ時応力と引張強度について、試験条件別と全データのサンプル数、平均値、試験条件別の全データに対する材料特性値の平均値の比、標準偏差、変動係数、最

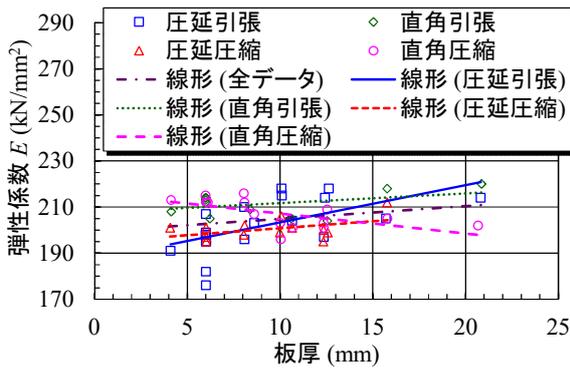


図-7 弾性係数と板厚の関係

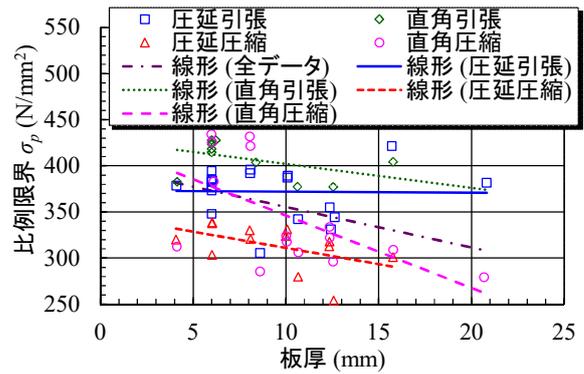


図-8 比例限界と板厚の関係

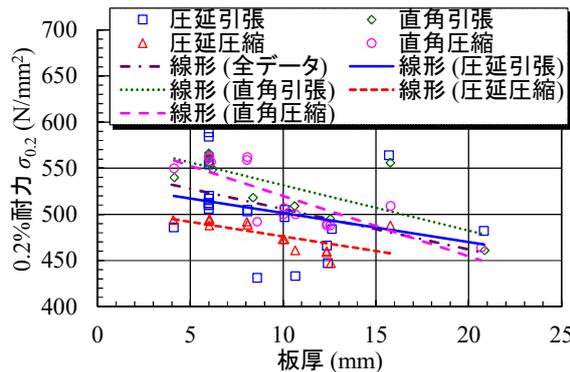


図-9 0.2%耐力と板厚の関係

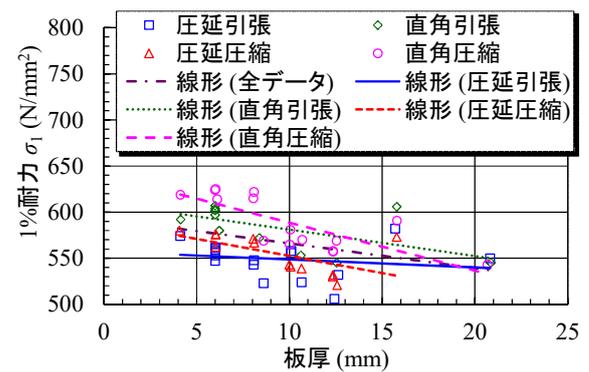


図-10 1%耐力と板厚の関係

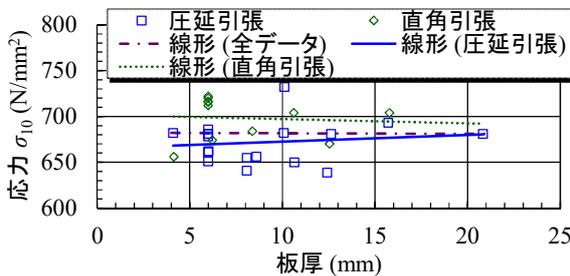


図-11 10%ひずみ時応力と板厚の関係

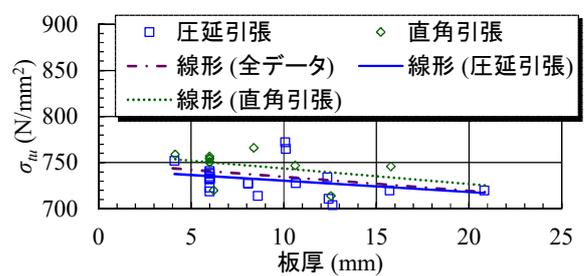


図-12 引張強度と板厚の関係

表-2 板厚と材料特性値の相関係数

	弾性係数	比例限界	0.2%耐力	1%耐力	10%ひずみ時応力	引張強度
圧延引張	0.60	-0.02	-0.30	-0.20	0.13	-0.31
直角引張	0.40	-0.46	-0.74	-0.60	-0.07	-0.37
圧延圧縮	0.44	-0.49	-0.65	-0.60		
直角圧縮	-0.61	-0.59	-0.80	-0.77		
全データ	0.26	-0.36	-0.46	-0.39	-0.01	-0.34

大値と最小値，正規分布を仮定した場合の 95，5 パーセンタイルを表-1 に示す。

これより，弾性係数，0.2%耐力，1%耐力，10%ひずみ時応力と引張強度の平均値は，全データに対して圧延方向では最大 6%ほど小さく，直角方向では最大 5%ほど大きいことから，圧延方向による異方性は見られるが，それに比べて引張，圧縮による差異は小さい。

一方，比例限界の平均値については，試験条件による変動は大きい。全データに関する変動係数は，比例限界，0.2%耐力，1%耐力，10%ひずみ時応力，引張強度の順に変動係数は低下しており，応力の上昇について材料特性値のばらつきは低下することがわかる。

### 3・2 板厚依存性

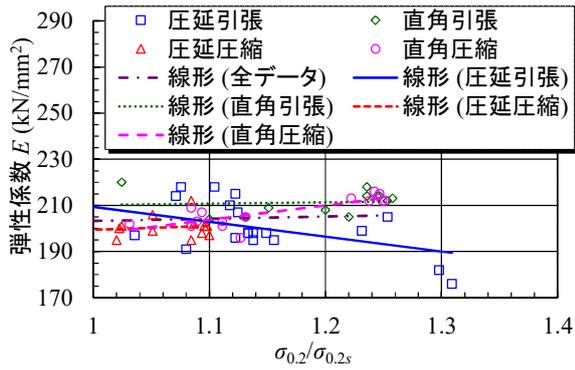


図-13 弾性係数と0.2%耐力の関係

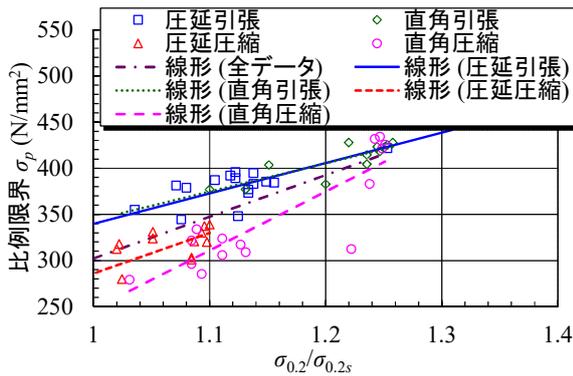


図-14 比例限界と0.2%耐力の関係

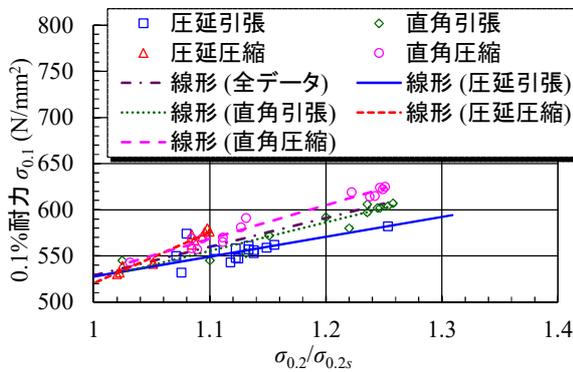


図-15 0.1%耐力と0.2%耐力の関係

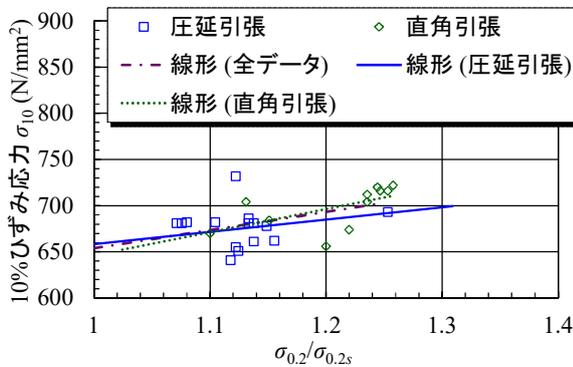


図-16 10%ひずみ時応力と0.2%耐力の関係

弾性係数, 比例限界, 0.2%耐力, 1%耐力, 10%ひずみ時応力, 引張強度と板厚の関係をそれぞれ図-7~12

表-3 0.2%耐力と材料特性値の相関係数

材料特性値	弾性係数	比例限界	1%耐力	10%ひずみ時応力
圧延引張	-0.55	0.86	0.84	0.43
直角引張	0.08	0.84	0.94	0.59
圧延圧縮	0.14	0.67	0.98	
直角圧縮	0.80	0.87	0.98	
全データ	0.09	0.77	0.89	0.63

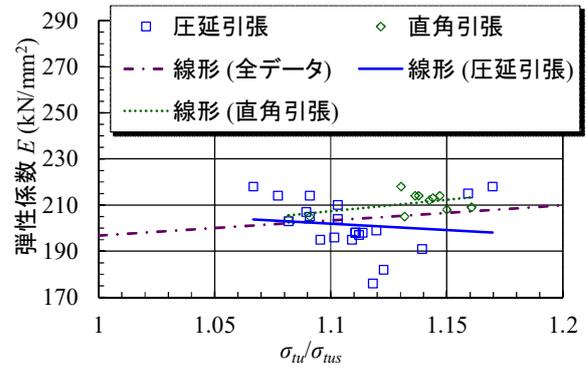


図-17 弾性係数と引張強度の関係

に示す。ただし、同図においては、試験条件別にデータをプロットし、各々に関する回帰線とともに、全データに関する回帰線も示した。回帰線として、曲線のフィッティングも考えられるが、本研究では、必ずしも板厚依存性が論じられるだけの試験結果が十分に得られていないこと、板厚変化による機械的特性値の増減が直感的に把握しやすいことから、直線回帰とした。(以下の図中の凡例では「線形」と示す。) また、各々の回帰線の相関係数を表-2に示す。

図-7より、圧延直角方向圧縮試験を除けば、板厚の増加につれて弾性係数は増大する傾向にある。表-2からも、同試験を除けば、相関係数は0.4から0.6と、両者間にはやや正の相関がみられるが、全データに対する相関は殆ど認められない。

図-8~10より、比例限界, 0.2%耐力と1%耐力については、試験条件を問わず、板厚の増加につれて低下する傾向が認められる。表-2より、回帰線の相関係数を比較すると、圧延方向引張試験では、-0.30~-0.02と殆ど相関が認められないが、それ以外では、いずれも-0.46~-0.80と、やや負の相関がみられる。

図-11, 表-2より、試験条件によらず、10%ひずみ時応力の板厚との相関は殆ど認められない。

図-12より、引張強度は、試験条件によらず板厚の増加につれて低下する傾向にあるが、相関係数は-0.3~-0.4程度と弱い負の相関が認められる。

### 3・3 0.2%耐力, 引張強度と材料特性値の関係

0.2%耐力と弾性係数、比例限界、0.1%耐力と10%ひずみ時応力の関係をそれぞれ図-13~16に示す。ただし、同図中において、0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ は、文献12)に示される材料規格値 $\sigma_{0.2s} = 450 \text{ N/mm}^2$ で無次元化した。また、同図中には試験条件別ならびに全データを対象とした回帰線を示し、両者間の相関係数は表-3に示した。

図-13より、圧延方向引張試験については、0.2%耐力の上昇につれて弾性係数が低下する傾向が見られるものの、このほかの試験では0.2%耐力と弾性係数の間に明確な関係は認められない。表-3においても、圧延直角方向圧縮試験については、両者間にかなり強い正の相関が認められるものの、それ以外の試験条件や全データに対して相関は認められない。

図-14~16より、試験条件を問わず、0.2%耐力の上昇につれて比例限界、1%耐力や10%ひずみ時の応力も上昇する様子が右肩上がりの回帰線にも現れ、表-3に示すように、両者間にはかなり強い相関も認められる。しかし、それらに比べて、10%ひずみ時の応力に関しては、弱い相関を示した。

引張強度と弾性係数、比例限界、1%耐力と10%ひずみ時応力の関係について、それぞれ図-17~20に示す。ただし、同図中において、引張強度 $\sigma_{ts}$ は文献12)に示される材料規格値 $\sigma_{ts} = 660 \text{ N/mm}^2$ で無次元化した。また、試験条件別ならびに全データを対象とした両者間の回帰線を同図中に示すとともに、相関係数を表-4に示した。

図-17より、0.2%耐力の場合と同様に、弾性係数に関しては、圧延直角方向引張試験の場合には、引張強度とやや相関が認められるものの、表-4からも、圧延方向引張試験や全データに関しては、両者間に相関は認められない。

図-18~20より、比例限界、1%耐力と10%ひずみ時応力に関しては、弾性係数の場合に比べると、引張強度との相関がみられるものの、表-3と4との比較から、0.2%耐力とそれらの材料特性値の間の相関に比べると弱いことがわかる。

#### 4. まとめ

本研究では、材料試験結果に基づいて、LDSSの材料特性値のばらつき、板厚依存性、0.2%耐力、引張強度と材料特性値との関係について分析した。以下に本研究で得られた成果をまとめる。

- (1) 弾性係数、0.2%耐力、1%耐力、10%ひずみ時応力と引張強度については、圧延方向が直角方向に比べてやや小さく、引張、圧縮による差異は圧延方向に

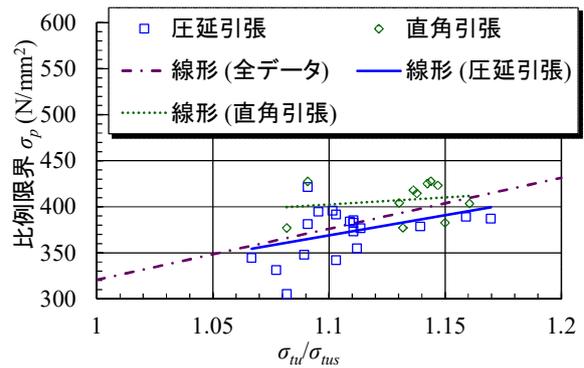


図-18 比例限界と引張強度の関係

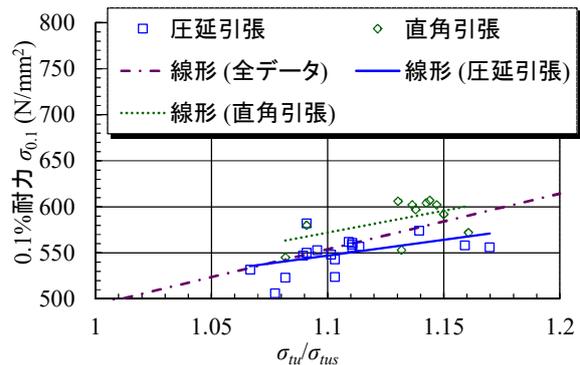


図-19 1%耐力と引張強度の関係

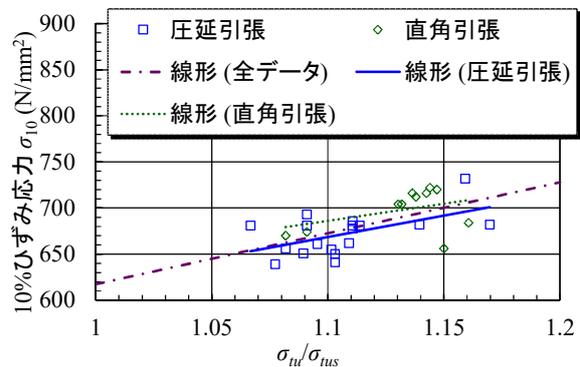


図-20 10%ひずみ時応力と引張強度の関係

表-4 引張強度と材料特性値の相関係数

材料特性値	弾性係数	比例限界	1%耐力	10%ひずみ時応力
圧延引張	-0.12	0.41	0.49	0.55
直角引張	0.52	0.19	0.53	0.39
全データ	0.17	0.51	0.63	0.61

よる差異に比べてさらに小さい傾向を示す。

- (2) 比例限界は、その他の材料定数と比較して、圧延方向と载荷方向の関係や、引張、圧縮負荷による相違が大きい傾向にある。
- (3) 材料特性値のばらつきは、比例限界、0.2%耐力、1%耐力、10%ひずみ時応力、引張強度の順、即ち応

力の上昇につれて低下する.

- (4) 試験条件が同じであれば, 弾性係数と板厚の間にはやや相関がみられるが, 全データに対する相関は殆ど認められない.
- (5) 比例限界, 0.2%耐力, 1%耐力と引張強度については, 試験条件を問わず, 板厚の増加につれて低下する傾向が認められる. 一方, 10%ひずみ時応力の板厚との相関は殆ど認められない.
- (6) 試験条件を問わず, 比例限界, 1%耐力と 10%ひずみ時応力は 0.2%耐力との相関が強いが, 弾性係数と 0.2%耐力の間に明確な関係は認められない.
- (7) 圧延直角方向引張試験では, 引張強度と弾性係数にはやや相関が認められるが, 圧延方向引張試験や全データに関しては両者間に相関は認められない.
- (8) 比例限界, 1%耐力と 10%ひずみ時応力に関しては, 引張強度との相関がみられるが, 0.2%耐力とそれらの間の相関に比べると弱い.

#### 参考文献

- 1) 社団法人 日本鋼構造協会 ステンレス技術標準委員会: 特集 JSSC の”いま” ステンレス鋼のさらなる普及と発展のために ~常設委員会活動の活性化を求めて, JSSC, No.30, pp.9-16, 2017.
- 2) 柘植信二: 汎用ステンレス鋼を代替する省資源型ステンレス鋼の開発と展望, JSSC, No.33, pp.8-11, 2018.
- 3) 三好崇夫: SUS821L1 溶接 I 形断面部材の材料特性値と残留応力, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 卷, pp.305-312, 2016.
- 4) 三好崇夫: リーン二相系ステンレス鋼 H 形短柱の

終局強度に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.67-77, 2017.

- 5) T. Miyoshi: Flexural Behavior of Lean Duplex Stainless Steel Welded I-section, Memoirs of National Institute of Technology, Akashi College, Vol.60, pp.1-8, 2018.
- 6) 奈良 敬, 中村聖三, 安波博道, 川端文丸, 塩飽豊明: 橋梁向け構造用鋼板の板厚および強度に関する統計調査, 土木学会論文集, No.752/I-66, pp.299-310, 2004.
- 7) 細見玄武, 三好崇夫: リーン二相系ステンレス鋼板の機械的特性値と構成式, 明石工業高等専門学校研究紀要, 第 57 号, pp.15-22, 2015.
- 8) 切山貴文, 三好崇夫: リーン二相系ステンレス鋼溶接箱形短柱の初期不整, 明石工業高等専門学校研究紀要, 第 58 号, pp.7-14, 2016.
- 9) N. Saliba, L. Gardner, Cross-section stability of lean duplex stainless steel welded I-sections, Journal of Constructional Steel Research, Vol.80, pp.1-14, 2013.
- 10) N. Saliba, L. Gardner, Experimental study of the shear response of lean duplex stainless steel plate girders, Engineering Structures, Vol.46, pp.375-391, 2013
- 11) European Committee for Standardization: Eurocode 3: - Design of steel structures - Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels, CEN, European Standard, EN 1993-1-4, 2006.
- 12) European Committee for Standardization, CEN: EN 10088-4. Stainless steels—Part 4: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes, 2009.