小型圧縮コイルばねの温間へたりに関する共同研究報告

圧縮コイルばねの温間へたりに関する研究委員会

Report on High-Temperature Spring Set of Compact Compression Coil Springs

Research Committee on High-Temperature Spring Set of Compression Coil Springs

This committee aimed to provide technical information (commentary) that can predict high-temperature spring set (residual shearing strain “ γ value”) when designing and manufacturing compact coil springs for engine valve. The committee was divided into “Literature WG (Working Group)” and “Test WG”, and Literature WG gathered and organized technical literatures related to “ γ value” at higher temperature. Test WG used test springs of which the wire diameter ϕ 1.0, 4.0 mm of 3 steel types (SWP - A, SWOSC - V, SUS 304 - WPB), including with processing or without processing(non) of shot peening and setting. Test temperature was set from 100 to 450 °C, clamping time was set from 24 to 312 h, and the high-temperature spring set (calculated to “ γ value”) was measured after clamping test at higher temperature. Various data of “ γ value” obtained with less variance, and the influence of loaded stress, temperature and time on “ γ value” with reasonable tendency for each test element. We confirmed that the obtained data generally agreed with various data in past technical literatures. So, we think that the obtained data will be able to provide useful database. However, in this activity, we cannot reconsider using the obtained data about highly practical calculation formula to express the difference at the temperature range (low temperature: around 200 °C, high temperature: around 350 °C). In the future, it is necessary to verify the high-temperature spring set mechanism at higher temperature and re-examination of highly practical calculation formulas.

Key Words: High-temperature spring set Residual shearing strain “value” Compact coil spring Valve spring Clamping test

1. 緒 言

1.1 活動概要

圧縮コイルばねの「へたり」は、弁ばね用などの小型コイルばねにおいてもサスペンション用の比較的大きなコイルばねにおいても、歴史的にばね製品使用上の重要特性として注目され、古くから「へたり」に関する試験研究が多く行われ、日本ばね学会(前身のばね技術研究会を含む)ではへたりに関する研究委員会をくり返し組織して積極的に研究され、多くの貴重なデータ、情報が提供されてきた。その中で、弁ばねのへたりに、高温のエンジン内で使用されることから「(200℃前後の)温間へたり」が重要特性となり、か

つ使用材料も炭素鋼、ばね鋼、ステンレス鋼など多岐にわたるため過去から幅広く研究されてきた。

今回の「圧縮コイルばねの温間へたりに関する研究委員会(温間へたり委員会)」は、日本ばね工業会の委嘱により、2014年9月から「ばねメーカーが小型コイルばねを設計・製作する時に、“温間へたり量”をある程度予測できるような技術情報(解説)を作成すること」を目指して活動した。

まず全体委員会にて過去の同主旨の研究委員会活動報告などの文献を参考にしながら温間へたり測定試験計画を立案した後、試験WGと文献WGに分かれて各種調査試験準備を進めた。文献WGでは、温間へたりに関連するキーワー

下群を設定し、ばね論文集はじめ広範囲に文献情報を収集整理した。試験WGでは、(一般社団法人)日本ばね工業会発行の「(JSMA SD010)圧縮コイルばね耐熱性試験方法」に準拠し、3鋼種(標準的なSWP-A及びSWOSC-V、へたり情報ニーズが大きいSUS304-WPB)の小型コイルばね(線径 ϕ 1.0, 4.0mm)を供試ばねとして、ショットピーニング(以下ではSP)及びセッチング(以下ではSE)の有無も含め、鋼種によるが締付試験の温度を100~450℃、時間を24~312hとして負荷応力を変化させた温間締付試験を行って「へたり(残留せん断ひずみ“ γ 値”」に換算。以下では γ 値」を測定し、関連特性調査を実施した。なお、評価対象は静的へたりながら、動的へたりとの比較も検討できるように、ばね諸元は(2015年)ばね論文集で報告された「圧縮コイルばねの疲労限度線図に関する共同研究報告」¹⁾のばね仕様を参照した。

活動期間は2014年9月~2018年1月で、以下に活動内容を報告する。

1.2 研究委員会構成

研究委員会の委員は下記の通りで、途中で一部交代はあったが、委員(12名)+アドバイザー(2名)+事務局(1名)の計15名で文献WGと試験WGに分かれて活動した。

委員長	川崎一博(高周波熱錬(株))
副委員長(試験WG長)	岡本貴幸(中央発條(株))
副委員長(文献WG長)	岡田文徳(住友電工(株)) (荻原寛之(住友電工(株)~2017/3))
委員(試験WG)	島 恵吾(三菱製鋼(株)) 中野淳一(日本発条(株)) 細田洋平(日鉄住金SGW(株)) 福田尚悟(中央発條(株)) 横井隆樹(株東郷製作所)
(文献WG)	北原洋一(株アドバネクス) 酒井信吾(株パイオラックス) (濱田 剛~2016/4) 津山貴昭(後藤工業(株)) 山先祥太(新日鐵住金ステンレス(株))
アドバイザー	丹下 彰(日本発条(株)) 井上信彦(日本ばね工業会)
事務局	磯貝一秀(日本ばね学会) (押田 守~2016/6)

2. 文献調査結果 (文献WG)

2.1 文献の抽出方法と主要文献

全体委員会にて、今回の温間へたり研究委員会の対象鋼種をSWP-A, SWOSC-V, SUS304-WPBと決定し、文献WGでは、まず1952年から2015年までのばね論文集掲載の論文、解説、研究委員会報告など計728文献を各委員が分担調査して、温間へたり関連情報が得られそうな文献を絞り込み、各種キーワード(たとえば、鋼種、線径、線材特性、コイルばね諸元、一次焼鈍条件、窒化処理の有無、SPの有無、二

次焼鈍条件、SEの有無、及びへたり測定のための締付試験条件(方法、温度、時間、負荷応力など))を読み出して一覧表に整理した。次にその中から、Table 2-1に示す主要キーワードを元に「へたり量(γ 値)」を数値として又はグラフから読み取れる値として入手可能で、かつへたり試験条件などの具体的な記述がある主要文献を対象として18文献に絞り込んだ^{2~19)}。他に、線径は10.5mmながら「ばね論文集 第30号(1985)共同研究:熱間成形コイルばねのへたり試験法に関する研究/神原広司委員長」²⁰⁾、又、へたり挙動に関する解析を進めた「ばね論文集 第59号(2014)共同研究:圧縮コイルばねのへたりに関する研究委員会報告/新谷紀雄委員長」²¹⁾も参考にした。

Table 2-2~2-4に最終的に抽出した18文献のばね論文集の号(発行年)、タイトル、対象鋼種、結言(抜粋)を示す。

Table 2-1 Keywords to extract the relevant literatures.

Survey target literatures: "Transaction of JSSE"(1952~2015) 728 items	
Items	Contents
Steels	SWP-A, SWOSC-V, SUS304-WPB
Spring shape	Compression coil spring (out of wire data only)
Residual shearing strain " γ value"	Actual data, readable data in the graph
Related parameter of γ (in Clamping test)	Temperature, Time, Load(stress)
Others	Micro-structure, Hardness, Residual stress Specification of spring Heat-treatment condition (stress relief annealing) Setting (with processing/condition or without (non)) Shot peening (with processing/condition or non)

Table 2-2 Literatures mainly extracted. (1/3)

Index No.	Paper No. (year)	Title	Steel type	Conclusion (overview)
①	No.9 (1963)	High temperature static loading test of cold formed coil spring (Report 1) ※Author's translation. Because of no English title	SWP-A SWOSC-V SWOC-VV	SWOC-VV is one of the most excellent steel for higher spring set resistance (lower height reduction).
②	No.10 (1964)	On the heat resisting and Fatigue Properties of Oil Tempered Si-Cr Spring Steel Wire	SWOSC-V SWOCV-V	SWOSC-V is superior to SWOCV-V in tensile property, spring set, fatigue property as heat resistant spring.
③	No.10 (1964)	On the Spring Properties of Oil Tempered Cr-Si Spring Steel Wire	SWOSC-V SWOCV-V	SWOSC-V is superior to SWOCV-V in heat resistance and has excellent spring set resistance.
④	No.11 (1966)	Report of the Co-operated Experiment on Stainless Steel Spring Wires	SUS27, others	In the clamping test, the influence of temperature is greater than clamping stress and time.
⑤	No.12 (1967)	The Influence of Elevated Temperature on the Set of Coil Springs made of Oil Tempered Si-Cr, Cr-V Spring Steel Wire	SWOSC-V SWOCV-V	Spring set appears at relatively early stage of clamping test, and the amount of spring set varies depending on the manufacturing process and steel type.
⑥	No.12 (1967) ※No.12,13 (both in 1967)	Improvement of Spring made of Si-Cr Steel Oil Tempered Wire by means of Low Temperature Cyaniding	SWOSC-V	To reduce high-temperature spring set in both static, dynamic loading, low-temperature Cyaniding (carbonitriding) are effective.

Table 2-3 Literatures mainly extracted. (2/3)

Index No.	Paper No. (year)	Title	Steel type	Conclusion (overview)
⑦	No.13 (1967)	Study on the Endurance Properties of Valve Springs for Automobile	SWP-V SWO-V SWOSC-V	The deformation limit does not have fixed relationship with the high temperature elastic limit, and it is greatly affected by the steel type.
⑧	No.14 (1969)	Study on the Stainless Steel Wire for Spring	SUS27WH-C	The static and dynamic heat resistance characteristics of SUS 27WH-C are equal to or slightly better than that of SWO - SC.
⑨	No.17 (1972)	Study on the Stainless Steel Wire for Spring (part 2)	SUS27WH-B SUS27WH-C	The residual shearing strain of SUS27WH are affected by the difference in wire drawing process. The transverse elastic modulus slightly increases after the clamping test.
⑩	No.20 (1975)	Stainless Steel Spring Wire Resistance to pitting Corrosion (1st Reports)	SUS316 SUS304 SUS304+Mo	When Mo is added to SUS 304, the spring set resistance is improved.
⑪	No.25 (1980)	Study on the Fatigue Strength of High Strength Wires for Spring	SWC SWP-A SWO-V,others	The spring set resistance of high-strength steel wire of carbon steel type can not be expected to be effective even if it is made high strength.
⑫	No.28 (1983)	Study of the High Strength Stainless Steel Wires for Spring	SUS304-WPB SUS631-WPC	The spring set resistance : austenitic type> subzero processing > precipitation hardening type.

Table 2-4 Literatures mainly extracted. (3/3)

Index No.	Paper No. (year)	Title	Steel type	Conclusion (overview)
⑬	No.29 (1984)	Improved High Tensile Strength Stainless Steel	SUS304-WPB SWP-B	Residual shearing strain of spring at high temperature clearly differs among steel types.
⑭	No.32 (1987)	Effect of Spring Index on Set at High Temperature of Coil Spring	SWP-A SWOSC-V SUS304-WPB	The influence of the spring index and the pitch angle (within 8.5° to 12°) on high-temperature spring set is small.
⑮	No.34 (1989)	Long-Term Elevated Temperature Setting Properties of Oil Tempered Cr-Si Steel Wire (SWOSC-V) and Stainless Steel Wire (SUS304-WPB) Springs	SWOSC-V SUS304-WPB	By the analysis, the temperature dependency of the coefficients was different from the temperature region (the boundary temperature / about 200~250°C). Future task to consider.
⑯	No.40 (1995)	Studies on High-Strength Oil-Tempered Chromium-Silicon Alloy Steel Wire for Valve Springs	SWOSC-V High strength SWOSC-V	When the spring wire becomes stronger, the spring set resistance descends. (some conditions are excluded)
⑰	No.46 (2001)	Governing Factors in the Fatigue Endurance of Austenitic Stainless Steel Wire	SUS302 SUS304	The spring set at 300, 400 °C is not so good to get higher tensile strength of wire. (the reason is unknown)
⑱	No.58 (2013)	The Annealing Conditions of Coil Spring	SWP-B SWOSC-V SUS304-WPB	SWOSC-V: 360 to 420 °C SUS 304-WPB: 350 to 450°C. Annealing at these temperature range reduce the spring set.

2.2 抽出文献の解析と考察

2.2.1 抽出文献（18種類）の精読調査

γ 値の記載がある抽出文献の各鋼種について、締付試験での温度と負荷応力を読み取り、当該文献番号も記入して試験条件分布表を作成した。Table 2-5にSWOSC-V (SP無, SE有)の例を示す。試験WGでは文献WGが作成したこのような条件分布を参考にして、へたり測定試験でのコイルばねのSP, SEの有無、締付試験での温度、負荷応力、時間などの試験条件を設定した。

γ 値が記載されている抽出文献情報からSPとSEの有無を読み出した結果、Table 2-6に示すように、SPとSEの有無については、様々な組合わせのデータがあることが判明したが、今回の文献調査では、各鋼種とも、SP無, SE有のコイルばねを主体にした。

Table 2-5 Test condition distribution table, temperature and clamping stress in the high-temperature spring set test of extracted literatures. (SWOSC-V / SP non, with SE, number such as ⑮ is the reference literature number in Table 2-2 to 2-4)

「SWOSC-V」 [SP (X/non:without processing), SE (O with processing)]								
Clamping Stress τ_0 (MPa)	20°C	100°C	150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C
900								
800		⑭	⑭	⑭⑮		⑭		
700		⑭⑮	⑭⑮	⑭⑮		⑭		
600		⑭⑮	⑭⑮	⑭⑮	⑮	⑭⑮	⑮	⑮
500		⑦⑭⑮	⑦⑭⑮	⑤⑦⑭⑮	⑤⑦⑮	⑤⑭⑮	⑮	⑮
400		⑦⑮	⑦⑮	⑤⑦⑮	⑤⑦⑮	⑤⑮	⑮	⑮
300		⑦	⑦	⑦	⑦⑮	⑮	⑮	⑮
200								

Table 2-6 Combination of with processing and without processing (non) of SP and SE of coil spring in extracted literatures.

[Number of data indicating residual shear strain “ γ value”]				
(SP: Shot Peening, SE: Setting)				
Steel type	(X) SP		(O) SP	
	(X) SE	(O) SE	(X) SE	(O) SE
SWP-A	40	36	0	72
SWOSC-V	281	658	0	448
SUS304-WPB	71	1656	3	12

○ : with processing
X/non : without processing

2.2.2 各鋼種の γ 値の整理・解析

2.2.2.1 SWP-A鋼の γ 値

SWP-Aについては、締付試験での温度250°C, SP無, SE無での負荷応力及び時間と γ 実測値との関係を読み取って図にプロットした結果、Fig. 2-1に示すように、 γ 値は締付初期に急速に増加し、時間が長くなると増加率は低下し、負荷応力が大きくなると絶対値が大きくなるという納得性のある傾向が確認できた。

Fig. 2-1 Relationship between time, clamping stress and residual shearing strain “ γ value” in high-temperature spring set test at 250℃. [SWP-A] (literature ①)

2.2.2.2 γ 値の構成 (計算) 式

SWOSC-VとSUS304-WPBについては、SWP-Aと同様に締付試験での温度、SP及びSEの有無をベースに、負荷応力及び時間と γ 値との関係を図にプロットし、さらに「Table 2-4の文献⑮、ばね論文集 第34号(1989): 共同研究「SWOSC-V及びSUS304-WPB耐熱ばねの長時間へたり特性/田中千秋委員長」¹⁶⁾で報告されたTable 2-7の(1)式に示す“ γ 値の構成式(予測計算式)”を用いて γ 値を計算して文献から読み取った実測値と比較した。

Table 2-7 Calculation formula of γ value (composition formula) in the past literature ⑮.

Steel type	Temperature (℃)	γ (Residual shearing strain/calculated %)					
		D	m	a	b	c	Correlation coefficient
SWOSC-V	100~200	8.344×10^{-4}	1.039×10^{-1}	1.124×10^{-1}	-6.036×10^2	-1.769×10^4	0.957
	250~400	1.152×10^0	1.534×10^{-1}	-1.131×10^{-1}	-1.092×10^4	9.012×10^4	0.979
SUS304-WPB	150~250	7.165×10^{-5}	7.980×10^{-2}	1.283×10^{-1}	1.165×10^3	3.137×10^4	0.915
	300~400	1.198×10^0	1.280×10^{-1}	-1.223×10^{-1}	-1.007×10^4	1.024×10^5	0.981

$$\gamma = Dt^m \exp(a\tau_0) \exp[(b + c\tau_0)/(T + 273)] \dots (1)$$

ここで温度域が違う場合に予測計算式内の各係数の値が異なるが、これは、文献⑮では、多くのデータを元に統計的手法を用いた直線回帰式からの帰納法によりTable 2-7に示す構成式(1)を求め、各定数(D, m, a, b, c)は各温度での γ 実測値を入れて計算すると回帰直線の傾きが2つの温度域(SWOSC-Vでは100~200℃と250~400℃, SUS304-WPBでは150~250℃と300~400℃)で異なり、それぞれの直線の相関係数が高くなる定数を算出して提示したためである。

予測計算式が温度域によって二つに分かれることに関しては、「ばね論文集 第59号(2014): 圧縮コイルばねのへたりに関する研究委員会報告/新谷紀雄委員長」²¹⁾において、

長時間(主に3000h)試験でのへたり量の増加傾向(直線近似した場合の線の傾き)が100~200℃と350~400℃では異なることから、両温度域でのへたりのメカニズム(いわゆるクリープ現象と類似挙動と推定)に違いがあると推察し、国内外の種々の文献を参考にメカニズムを検討した結果、材料学的な検証は行われていないが、低温域では固溶C+Nによるコッテレル効果が、高温域では固溶C+Nと置換型固溶元素(Si, Cr, Mn)との複合雰囲気によるIS(Interstitial-Substitutional Interaction)効果が支配的と推定している。これは γ 値を低温域でも高温域でもより高精度に推定するために貴重な見解である。

2.2.2.3 SWOSC-V鋼の γ 値

文献からSP無、SE有の締付試験での時間と負荷応力と γ 値の実測値を読み取り、計算値を加えてプロットし、Fig. 2-2に200℃の図(文献⑤⑦⑮)を、Fig. 2-3に300℃の図(文献⑤⑮)を示す。

いずれの温度の場合も、SWP-Aと同様に γ 値は締付試験初期に急速に増加し、時間が長くなると増加率は低下し、負荷応力が大きくなると絶対値は大きくなるが、負荷応力686MPaでの値は、SWOSC-V(200℃/300h)がSWP-A(250℃/16h)の0.3倍以下とかなり小さいことが示されている。

200℃, 300℃ともに γ 計算値と γ 実測値の差は、締付試験初期には γ 値の絶対値が小さいこともあり、プロット上はわかりにくいですが、負荷応力が大きくなり、時間が長くなると大きくなる傾向が見られ、200℃では負荷応力785MPa, 時間300hで計算値÷実測値=約1.5になった。300℃では全体に γ 実測値が大きくなり、686MPa, 300hでの300℃の γ 実測値は200℃の約4.0倍になったが、300℃での同条件(686MPa, 300h)の γ 値の計算値÷実測値=約1.3で、その差は比較的少なかった。

【SWOSC-V・200℃・Setting(O)・Shot peening(X/non)】
(O: with processing X/non: without processing)

Fig. 2-2 Relation between time, clamping stress and γ value in high-temperature spring set test at 200℃. (calculated and measured values) [SWOSC-V] (⑤⑦⑮)

Fig. 2-3 Relation between time, clamping stress and γ value in high-temperature spring set test at 300 °C . (calculated and measured values) [SWOSC-V] (⑤⑮)

Fig. 2-5 Relation between time, clamping stress and γ value in high-temperature spring set test at 200 °C . (calculated and measured values) [SUS304-WPB] (⑧⑮)

2.2.2.4 SUS304-WPB鋼の γ 値

同様に文献からSP無, SE有の締付試験での時間と負荷応力と γ 値の実測値を読み取り, Fig. 2-4に200°Cでの実測値のみの図(文献⑧⑮)を, Fig. 2-5に計算値を加えた図を示し, Fig. 2-6に300°Cの図(文献⑨)を示す.

いずれの温度でも, 実測値は, SWP-A, SWOSC-Vと同様に締付試験初期に急速に増加し, 時間が長くなると増加率は低下し, 負荷応力が大きくなると絶対値が大きくなる傾向を示し, 負荷応力約600MPaでの値は, SUS304-WPB (300°C/80h)がSWOSC-V (300°C/300h)の0.7倍程度と少し小さかった.

γ 計算値と γ 実測値の差は, 200°CではFig. 2-5に示すように γ 計算値が異常値となり γ 実測値とは大きく乖離した. 300°CではFig. 2-6に示すようにFig. 2-3に示したSWOSC-Vの300°Cでの傾向と同様に, 各負荷応力で γ 計算値がやや大きく, 負荷が小さくなると, γ 計算値÷ γ 実測値=約1.0とほぼ同等になった.

Fig. 2-6 Relation between time, clamping and γ value in high-temperature spring set test at 300 °C . (calculated and measured values) [SUS304-WPB] (⑨)

Fig. 2-4 Relation between time, clamping stress and γ value in high-temperature spring set test at 200 °C . (measured values) [SUS304-WPB] (⑧⑮)

Fig. 2-2~2-6の原文献から読み取れた各種定性定量情報, γ 計算値と γ 実測値の差をよりわかりやすく明示するために, 各文献のコイルばね製造条件, 締付試験での最長時間における各種条件と γ 値との関係を整理し, γ 値の計算値と γ 実測値の比(γ 計算値/ γ 実測値)を算出した. Table 2-8にSWP-A及びSWOSC-Vの一覧表を, Table 2-9にSUS304-WPBの一覧表を示す.

両一覧表から読み取れる傾向は, Fig. 2-2~2-6に関するコメントの通りである.

(参考文献欄に, 参考のため, 和文表記の表を示す)

Table 2-8 List of conditions of high-temperature spring set test, such as the with processing or without processing (non) of SP and SE, temperature, clamping stress, time (longest time), and γ value (calculated / measured value).
[SWP-A (measured only) and SWOSC-V]

Literature No.	Setting	Shot Peening	Temperature (°C)	Clamping (Loading) Stress (MPa)	Clamping (Loading) Time (h)	Residual Shearing Strain " γ Value(%)"
[SWP-A]						
①	X	X	250	687	16	0.37
①	X	X	250	588	16	0.2
[SWOSC-V]						
⑧	○	X	200	785		0.170/0.110=1.5
⑨	○	X	200	686		0.080/0.065=1.2
⑦	○	X	200	567	80	0.027/0.030=0.9
⑤	○	X	200	534	65	0.025/0.020=1.2
⑧	○	X	200	490	300	0.020/0.020=1.0
⑦	○	X	200	397	80	0.015/0.015=1.0
⑧	○	X	300	686		0.320/0.240=1.3
⑨	○	X	300	588		0.205/0.190=1.1
⑧	○	X	300	490	300	0.145/0.135=1.1
⑤	○	X	300	454	65	0.095/0.085=1.1
⑧	○	X	300	392	300	0.090/0.090=1.0

○:with processing
×:without processing (non)

Table 2-9 List of conditions of high-temperature spring set test, such as the with processing or without processing (non) of SP and SE, temperature, clamping stress, time (longest time), and γ value. (calculated / measured value) [SUS304-WPB]

Literature No.	Setting	Shot Peening	Temperature (°C)	Clamping (Loading) Stress (MPa)	Clamping (Loading) Time (h)	Residual Shearing Strain " γ Value(%)"
[SUS304-WPB]						
⑧⑨	○	X	200	686	300	(figure ?) / 0.080 (>10.0)
⑨	○	X	300	600	80	0.175/0.120=1.4
⑨	○	X	300	514	80	0.120/0.090=1.3
⑨	○	X	300	428	80	0.085/0.060=1.4
⑨	○	X	300	343	80	0.040/0.040=1.0
⑨	○	X	300		257	0.020/0.020=1.0

○:with processing
×:without processing (non)

2.3 γ 値構成 (計算) 式から算出した γ 値傾向予測

Fig. 2-7にSWOSC-Vで負荷応力500MPaの場合の締付試験での温度、時間と γ 計算値の関係を示し、Fig. 2-8にSUS304-WPBで負荷応力500MPaの場合の締付試験での300～400℃間の温度、時間と γ 計算値の関係を示す。両図において、例えば1000hは実試験外ではあるが計算で外挿が可能となる。なお、SUS304-WPBの200℃前後の γ 計算値は γ 実測値と大きく乖離し温度依存性も逆傾向(高温になると γ 計算値が減少)になるため、この温度域でのオーステナイト系ステンレス鋼特有の現象かどうかを含めて、 γ 値構成式の精度検証が今後の課題となる。

Fig. 2-7 Relation between γ calculated value and temperature, clamping time in spring set test. [SWOSC-V]

Fig. 2-8 Relation between γ calculated value and temperature, clamping time in spring set test. [SUS304-WPB]

2.4 試験WGとの連携

文献WGで収集整備した文献情報や一覧表化などの整理結果から得られた情報は、全体委員会などの機会に試験WGにも展開し、試験WGでの締付試験条件設定や関連特性調査の参考にした。

2.5 関連規格及び海外文献規格情報

規格としては、前述した(一般社団法人)日本ばね工業会発行の「(JSMA SD010)圧縮コイルばね耐熱性試験方法」を参照した。又、海外文献規格についても、米国のSMI発行の「SPRINGS」誌における「温間へたりに関する記事」を調査した(2010年冬号～2017年冬号まで計30冊)が、参考になる情報が無いことを確認した。

2.6 文献WGのまとめ

- ① γ 実測値の傾向の法則性：同じ文献毎に整理を行うと、一定の相関はあるが、複数の文献での γ 実測値を混合させるとばらつきが大きくなり、法則性は崩れることがわかった。
- ② 計算値との整合性：SWOSC-Vの温度200℃、締付応力が500MPa以下の条件時に γ 実測値と γ 計算値との乖離は最大でも1.5倍程度で比較的少なかった。
- ③ ただ、SUS304-WPBの温度200℃の γ 計算値はどの負荷応力の場合も絶対値が大きくなり、 γ 実測値との乖離も非常に大きくなった。
- ④ SP有無の影響：SP有の文献データが少なかったため、有無の影響について比較はできなかった。
- ⑤ γ 値構成式の適用性：Fig. 2-7及びFig. 2-8に示したように、コイルばね製造条件、締付試験(実使用環境)の諸情報が入手できれば γ 値構成式(1)により γ 値を計算して γ 値予測図が作成出来ることから、 γ 値構成式(1)の精度を、たとえば後述の試験WGの実測値や統計的計算手法の改善により高めることが出来れば、本委員会の目標とした「ばねメーカーが小型コイルばねを設計・製作する時に、“温間へたり量(γ 値)”をある程度予測できるような技術情報(解説)を作成する」に繋がる可能性があると考えられる。

3. 温間へたり試験結果 (試験WG)

本委員会へたり試験を行うにあたり、線種(鋼種)の選定や試験方法については、過去の文献やJSMAの標準をもとに、以下の通りで行うこととした。

3.1 供試ばね線

Table 3-1 に今回使用したばね線についてまとめた。線種は、よく用いられるSWP-A, SWOSC-Vと、より高温で用いられることの多いSUS304-WPBを選択し、線径は $\phi 1.0\text{mm}$ と $\phi 4.0\text{mm}$ の2種類を選択した。この線径については、本委員会に先立って行われた「圧縮コイルばねの疲労限度線図の改訂調査研究委員会」¹⁾で用いられたものと同様である。

なお、今回のばね線は日鉄住金SGワイヤー(株)、住友電工スチールワイヤー(株)、鈴木住電ステンレス(株)の3社に提供いただいた。

Table 3-2に各線種の化学成分と機械的特性をまとめた。いずれもJIS規格内に入っており問題ないことを確認できた。

Fig. 3-1にばね線の組織写真を、Fig. 3-2に硬さ測定結果を示した。

Table 3-1 Summaries about wire.

Grade	Diameter ϕ (mm)	Wire provided company
SWP-A	1.0	NIPPON STEEL & SUMIKIN SG WIRE CO., LTD.
	4.0	
SWOSC-V	1.0	Sumitomo (SEI) Steel Wire Corp.
	4.0	
SUS304-WPB	1.0	SUZUKI-SUMIDEN STAINLESS STEEL WIRE CO., LTD.
	4.0	

Table 3-2 Mechanical properties and chemical compositions of steel wires.

Grade	Diameter ϕ (mm)	Tensile strength (MPa)	Chemical compositions (mass%)							
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SWP-A $\phi 1.0$	0.995	2139	0.81	0.17	0.50	0.012	0.004	0.01	-	-
SWP-A $\phi 4.0$	3.986	1708	0.82	0.17	0.49	0.012	0.004	0.01	-	-
SWOSC-V $\phi 1.0$	0.991	2088	0.58	1.44	0.68	0.006	0.007	0.01	-	0.68
SWOSC-V $\phi 4.0$	3.983	1938	0.57	1.44	0.69	0.007	0.006	0.01	-	0.68
SUS304-WPB $\phi 1.0$	0.995	1549	0.070	0.41	1.26	0.032	0.004	-	8.48	18.08
SUS304-WPB $\phi 4.0$	3.999	1955	0.070	0.47	1.22	0.031	0.002	-	8.46	18.01

3.2 供試ばね

3.2.1 ばね諸元および製造条件

Table 3-3に試験に用いたばね諸元を示す。ショットピーニングの影響を確認するために、線径 $\phi 4.0\text{mm}$ のばねについては、ショットピーニングを施した。

Fig. 3-3にばねの製造工程を、Table 3-4, Table 3-5には低温焼なまし条件とショットピーニング条件を示す。ばねの製造については、線径 $\phi 1.0\text{mm}$ は日本発条(株)、線径 $\phi 4.0\text{mm}$ は(株)東郷製作所に協力いただき、ショットピーニング処理については、新東工業(株)に協力いただいた。

セッチング応力は、過去の試験条件を参考に、次の値で行った。この値は修正係数を考慮しない値である。

SWP-A, SWOSC-V : 1000MPa

SUS304-WPB : 850MPa

また、セッチングは3回行った。

Fig. 3-1 Optical microstructure of wire cross-sections.

Fig. 3-2 Hardness distributions of specimen wires.

Table 3-3 Dimensions of designed specimen springs.

Materials	SWP-A, SWOSC-V		SUS304-WPB	
Wire diameter (mm)	$\phi 1.0$	$\phi 4.0$	$\phi 1.0$	$\phi 4.0$
Average of diameter (mm)	6.0	24.0	6.0	24.0
Number of total coils	9.5	6.0	10.5	7.0
Number of active coils	7.5	4.0	8.5	5.0
Free height (mm)	25.0	52.0	25.0	60.0
End shape	Closed end and Grinding			
Shot peening	Non	Treated	Non	Treated

Fig. 3-3 Manufacturing Process of coil springs.**Table 3-4** Conditions of annealing.

Specimen		$\phi 1.0\text{mm}$	$\phi 4.0\text{mm}$	
		Annealing conditions after coiling.	Annealing conditions after coiling.	Annealing conditions after SP
SWP-A	non. SP	350°C-10min.	350°C-20min.	
SWOSC-V		420°C-10min.	420°C-20min.	
SUS304-WPB		400°C-30min.	400°C-30min.	
SWP-A	SP		350°C-20min.	230°C-15min.
SWOSC-V			420°C-20min.	230°C-15min.
SUS304-WPB			400°C-30min.	230°C-15min.

Table 3-5 Conditions of Shot peening (SP).

Peening media	0.6mm CCW
Shot velocity	78 m/s
Projectile amount rate	130 kg/min.
Coverage	200%
Arc-height	0.350 mmA

3.2.2 ばね特性

Fig. 3-4 (a)～(f)に供試ばねの線間すきま線図を示す。巻き形状に異常は見られない。

Fig. 3-5 (a)～(f)に荷重-たわみ線図を示す。いずれのばねも線形特性が得られており、試験をする上で問題ないことを確認した。また、ショットピーニングを施しても、ばね特性に変化がないことも確認した。

(a) SWP-A $\phi 1.0\text{mm}$ (b) SWOSC-V $\phi 1.0\text{mm}$ (c) SUS304-WPB $\phi 1.0\text{mm}$ (d) SWP-A $\phi 4.0\text{mm}$ (e) SWOSC-V $\phi 4.0\text{mm}$ (f) SUS304-WPB $\phi 4.0\text{mm}$ **Fig. 3-4** Space between coils-diagrams of specimens.

(a) SWP-AP-A ϕ 1.0mm. (b) SWOSC-V ϕ 1.0mm. (c) SUS304-WPB ϕ 1.0mm. (d) SWP-A ϕ 4.0mm. (e) SWOSC-V ϕ 4.0mm. (f) SUS304-WPB ϕ 4.0mm.

Fig. 3-5 Load-Deflection diagrams of specimens.

Fig. 3-6にショットピーニングを施したばねのX線法を用いた残留応力測定結果を示す。測定はばねの内径側を主応力方向で行い、SWP-A及びSWOSC-Vのばねは並傾法により、SUS304-WPBのばねはX線2D法により行った。その結果、ばね表層に圧縮残留応力が付与されていることを確認できた。

([SP] Shot peened, [non SP] not Shot peened)

(a) SWP-A ϕ 4.0mm. (b) SWOSC-V ϕ 4.0mm. (c) SUS304-WPB ϕ 4.0mm.

Fig. 3-6 Residual stress distributions of specimen springs.

3.3 温間へたり試験方法

3.3.1 試験条件

Table 3-6 に試験条件を示す。締付応力、試験温度、締付時間は、従来、実施されてきた試験条件を参考に決定した。

Table 3-6 Conditions of spring set test.

Materials	Wire diameter (mm)	Shot peening	Clamping stress (MPa)	Test temperature (°C)	Clamping time (hour)	
SWP-A SWOSC-V	φ1.0 φ4.0	Non	600	100 150 200	24 48 96 312	
			700			
			800			
			900			
	φ4.0	Treated	600	100 200		
			900			
	SUS304 -WPB	φ1.0 φ4.0	Non	500		200 300 400
				600		
700						
800						
φ4.0		Treated	500	200 400		
			800			

3.3.2 試験手順

本委員会が実施した温間へたり試験手順を示す。

[手順1] ばねの寸法測定 (Fig. 3-7)

- ・外径測定は、ノギスを用いて2方向を測定(90°)し、その平均値を採用する。
- ・自由長は、荷重0.3Nを付加時の高さを測定し採用する。
- ・線径はミルシートのトップ/エンドの平均値を採用する。

Fig.3-7 Measuring outer diameters of specimen spring.

[手順2] セッチング高さ算出及びセッチング実施

- ・各線種ごとに荷重-たわみ線図を作成する (n=2)。
- ・荷重-たわみ線図からセッチング応力での高さを読み取り、2本の平均値をセッチング高さとする。
- ・セッチングは2秒間保持して3回実施する。

[手順3] 締付高さの算出

- ・セッチングしたばねを用いて、荷重-たわみ線図を作成する。(n=2)
 - ・各締付応力時の2本のばね高さの平均値で算出する。
 - ・この時の高さを、同じ条件の試験に適用する。
- 以上の手順で使用する予測計算式は、次の通りである。

$$\tau = \frac{8 \cdot P \cdot D}{\pi \cdot d^3} \quad (2)$$

τ : 締付応力 [MPa]

P : 荷重 [N]

D : コイル平均径 [mm]

d : 線径 [mm]

[手順4] へたり測定試験結果の算出

- ・荷重損失 ΔP を求め、残留せん断ひずみ γ を算出し、この値をへたりの指標とする。算出式は次の通り。

$$\gamma = \frac{8 \cdot \Delta P \cdot D}{\pi \cdot d^3 \cdot G} \quad (3)$$

γ : 残留せん断ひずみ [%]

ΔP : 荷重損失 [N]

D : コイル平均径 [mm]

d : 線径 [mm]

G : 横弾性係数 [N/mm²]

3.3.3 締付試験方法、及び温間加熱・冷却方法

Fig.3-8に線径φ1.0及び4.0mmのばねの締付方法をそれぞれ示した。いずれも高さを一定に保持して締付試験を行えるようにしている。φ1.0mmのばねでは指定高さのブロックを4箇所配置し、φ4.0mmのばねでは指定長さのパイプを使用して締付試験を行った。加熱試験には恒温槽を用いた。ばねが互いに重ならないように間隔をあけて配置し、冷却は炉から取り出した後、空冷して行い、サンプルが常温になるまで放置して固定治具からばねを取り外した。

(a) Wire diameter φ1.0mm

(b) Wire diameter φ4.0mm

Fig. 3-8 Retaining method of specimen springs.

3.3.4 長時間側の試験方法

試験は一つのばねを使用して時間経過ごとにへたり量を測定して、再度、締付試験を継続する「間欠法」を採用した。温間へたり量が間欠法と連続法とで差がないことは過去の文献¹⁶⁾により明確にされている。

3.4 温間へたり試験結果及び考察

3.4.1 各線種（鋼種）の試験結果

Fig. 3-9((a)～(f))にSWP-AのSP無しのばねの試験結果を、Fig. 3-10((a)～(f))にSWOSC-VのSP無しのばねの試験結果を、Fig. 3-11((a)～(f))にSUS304-WPBのSP無しのばねの温間へたり試験結果を示す。すべての結果において、締付温度が高いほど、締付応力が高いほど残留せん断ひずみ γ は大きくなることを確認した。

Fig. 3-9(a) SWP-A ϕ 1.0mm springs. (100°C) Fig. 3-9(e) SWP-A ϕ 4.0mm springs. (150°C) Fig. 3-9(b) SWP-A ϕ 1.0mm springs. (150°C) Fig. 3-9(f) SWP-A ϕ 4.0mm springs. (200°C) Fig. 3-9(c) SWP-A ϕ 1.0mm springs. (200°C) Fig. 3-10(a) SWOSC-V ϕ 1.0mm springs. (100°C) Fig. 3-9(d) SWP-A ϕ 4.0mm springs. (100°C) Fig. 3-10(b) SWOSC-V ϕ 1.0mm springs. (150°C)

Fig. 3-10 (c) SWOSC-V ϕ 1.0mm springs. (200°C) Fig. 3-11 (a) SUS304-WPB ϕ 1.0mm springs. (100°C) Fig. 3-10 (d) SWOSC-V ϕ 4.0mm springs. (100°C) Fig. 3-11 (b) SUS304-WPB ϕ 1.0mm springs. (150°C) Fig. 3-10 (e) SWOSC-V ϕ 4.0mm springs. (150°C) Fig. 3-11 (c) SUS304-WPB ϕ 1.0mm springs. (200°C) Fig. 3-10 (f) SWOSC-V ϕ 4.0mm springs. (200°C) Fig. 3-11 (d) SUS304-WPB ϕ 4.0mm springs. (100°C)

Fig. 3-11 (e) SUS304-WPB ϕ 4.0mm springs. (150°C) Fig. 3-11 (f) SUS304-WPB ϕ 4.0mm springs. (200°C)

3.4.2 線種（鋼種）差の比較と考察

これらの結果をもとに、以下で比較検討を行う。

Fig. 3-12((a) ~ (f)) に線径 ϕ 1.0mm 及び ϕ 4.0mm の線種での比較結果を示す。比較をするにあたり、3線種が同じ条件になる条件として、締付温度200°C、締付応力600MPaから800MPaを採用した。

Fig. 3-12 (a) Comparison results of three types materials of residual share strain. (ϕ 1.0mm springs, non SP, 200°C, 600MPa) Fig. 3-12 (b) Comparison results of three types materials of residual share strain. (ϕ 1.0mm Springs, non SP, 200°C, 700MPa) Fig. 3-12 (c) Comparison results of three types materials of residual share strain. (ϕ 1.0mm springs, non SP, 200°C, 800MPa) Fig. 3-12 (d) Comparison results of three types materials of residual share strain. (ϕ 4.0mm springs, non SP, 200°C, 600MPa) Fig. 3-12 (e) Comparison results of three types materials of residual share strain. (ϕ 4.0mm springs, non SP, 200°C, 700MPa)

Fig. 3-12(f) Comparison results of three types materials of residual share strain. (ϕ 4.0mm springs, non SP, 200°C, 800MPa)

線径 ϕ 1.0mm では残留せん断ひずみ γ の大きさが、SWP-A > SWOSC-V > SUS304-WPB の順であったが、線径 ϕ 4.0mm では SWP-A > SUS304-WPB > SWOSC-V の順となって傾向が異なり、SWOSC-V と SUS304-WPB が逆転する事象についてばねの硬さに着目して検討した。

Fig. 3-13 に線径 ϕ 1.0mm 及び Fig. 3-14 に ϕ 4.0mm のばねの硬さ測定結果を示す。この結果から、線径 ϕ 1.0mm のばねの硬さが ϕ 4.0mm のばねよりも硬くなっていることを確認できた。また、SWOSC-V と SUS304-WPB の線径での硬さの差に着目してみると、線径 ϕ 1.0mm に比べて ϕ 4.0mm の方が硬さの差は大きい。このように硬さが残留せん断ひずみ γ に影響することを実データでも確認できた。

Fig. 3-13 Vickers Hardness of ϕ 1.0mm springs non SP.

Fig. 3-14 Vickers Hardness of ϕ 4.0mm springs non SP.

3.4.3 線径による比較

各線種の線径 ϕ 1.0mm と ϕ 4.0mm のばねについて、加熱温度 100, 150, 200°C、締付時間 24, 48, 96, 312h で温間へたり試験を行い、残留せん断ひずみ γ に及ぼす負荷応力の影響を比較した。Fig. 3-15 (a) ~ (d) に SWP-A の試験結果を、Fig. 3-16 (a) ~ (d) に SWOSC-V の試験結果を、Fig. 3-17 (a) ~ (d) に SUS304-WPB の試験結果をまとめて示す。

これらの試験結果で、SWP-A 及び SWOSC-V では、残留せん断ひずみ γ が ϕ 1.0mm > ϕ 4.0mm という関係を示した。一方、SUS304-WPB では、締付温度によって結果が異なり、締付温度 200°C 及び 300°C では ϕ 1.0mm < ϕ 4.0mm となり、締付温度 400°C では ϕ 1.0mm > ϕ 4.0mm という結果となった。

先の検証ではばねの硬さ測定を行い、その結果を Fig. 3-13 及び Fig. 3-14 に示したが、その時の硬さデータは ϕ 1.0mm > ϕ 4.0mm であった。すなわち、硬さが高い方が残留せん断ひずみ γ が小さくなるとの考えもあるが、今回は反対の結果が得られ、硬さだけでは説明がつかないことがわかった。

そこで、線径によって残留せん断ひずみ γ に違いが表れる要因として、セッチングの効果に差が生じていると考えた。今回のセッチング条件は過去の試験条件を採用し、SWP-A 及び SWOSC-V については 1000MPa、SUS304-WPB については 850MPa で行った。セッチングの効果については残留応力の影響と考えられており、またセッチングにより諸特性が変化することも知られている²²⁾。今回の活動では材料の比較検証ができていないため、今後、S-S 曲線の作成を含めて試験検証を追加する予定である。

Fig. 3-15(a) SWP-A[24h].

Fig. 3-15(b) SWP-A[48h].

Fig. 3-15(c) SWP-A[96h].

Fig. 3-16(c) SWOSC-V[96h].

Fig. 3-15(d) (d)SWP-A[312h].

Fig. 3-16(d) SWOSC-V[312h].

Fig. 3-15 Comparison of residual shear strain between ϕ 1.0mm and ϕ 4.0mm springs. (SWP-A [24, 48, 96, 312h])

Fig. 3-16 Comparison of residual shear strain between ϕ 1.0mm and ϕ 4.0mm springs. (SWOSC-V [24, 48, 96, 312h])

Fig. 3-16(a) SWOSC-V[24h].

Fig. 3-17(a) SUS304-WPB[24h].

Fig. 3-16(b) SWOSC-V[48h].

Fig. 3-17(b) SUS304-WPB[48h].

Fig. 3-17(c) SUS304-WPB[96h].

Fig. 3-17(d) SUS304-WPB[312h].

Fig. 3-17((a)~(d)) Comparison of residual shear strain between $\phi 1.0\text{mm}$ and $\phi 4.0\text{mm}$ springs. (SUS304-WPB[24, 48, 96, 312h])

3.4.4 ショットピーニング有無の比較

各線種のばねについてショットピーニング処理有り・無しの場合の残留せん断ひずみ γ を測定して、残留せん断ひずみ γ に及ぼすショットピーニングの影響を検証した。

Fig. 3-18((a) (b))にSWP-Aでの測定結果を示す。締付温度 100°C では差はないが、 200°C では残留せん断ひずみ γ が増加した。これは、ショットピーニングにより付与された残留応力が、温間へたり試験中に、コイルリング後の低温焼なまし処理温度に近い条件で長時間保持されたことから減少してねじり降伏点が低下したためと考えられる^{22,23)}。

Fig. 3-19((a) (b))にSWOSC-Vでの測定結果を示す。SWP-Aの結果と同様の傾向が見られたが、ショットピーニングを施したばねの締付温度 200°C での残留せん断ひずみ γ の増加量が大きくなった。これは、ショットピーニングに付与された残留応力がSWOSC-Vのほうが大きいことから可動転位量が多くなったためと考えられる。

Fig. 3-20((a) (b))にSUS304-WPBでの測定結果を示す。締付温度 200°C と 400°C では、ショットピーニングによる差は現れなかった。これは締付温度が 400°C と高いため、ショットピーニングにより付与した残留応力が消失して処理無しばねと同様の結果となったと考えられる。

これらの結果から、ショットピーニングを施したばねは、使用環境の温度を考慮したうえで使用しなければならないことを改めて確認することができた。

Fig. 3-18(a) SWP-A[100°C]. Fig. 3-18(b) SWP-A[200°C].Fig. 3-18((a)~(b)) Comparison of residual shear strain between non SP and SP springs. (SWP-A[$100, 200^\circ\text{C}$]) Fig. 3-19(a) SWOSC-V[100°C]. Fig. 3-19(b) SWOSC-V[200°C].Fig. 3-19((a)~(b)) Comparison of residual shear strain between non SP and SP springs. (SWOSC-V[$100, 200^\circ\text{C}$])

Fig. 3-20(a) SUS304-WPB[200℃].

Fig. 3-20(b) SUS304-WPB[400℃].

Fig. 3-20((a)~(b)) Comparison of residual shear strain between non SP and SP springs. (SUS304-WPB[200,400℃])

3.4.5 へたり量の予測計算式の検証

SWOSC-V及びSUS304-WPBについて、過去の研究委員会¹⁶⁾にて提案された残留せん断ひずみ γ の予測計算式を用いた計算値と今回の実測値との整合性を検証した。その結果、Fig. 3-21(a), (b)にSWOSC-Vでの検証データを、Fig. 3-22(a), (b)にSUS304-WPBでの検証データを示すように、低応力側では比較的良く一致したものの、今回新たに設定した高応力側での締付条件ではあまり一致しなかった。

なお、今回の試験データを使用したへたり量の予測計算式の検証、及び必要な見直しについては、現在まで十分には行っていないため、SWP-Aについての予測式の検証と併せて、さらに検討が必要で、今後の課題としたい。

3.5 試験WGのまとめ

- ①各線種(鋼種)の影響：締付温度が高く、締付応力が高いほど残留せん断ひずみ γ は大きくなり、残留せん断ひずみ γ は線径 $\phi 1.0\text{mm}$ ではSWP-A>SWOSC-V>SUS304-WPBであったが、線径 $\phi 4.0\text{mm}$ ではSWP-A>SUS304-WPB>SWOSC-Vと逆転した。
- これはSWOSC-VとSUS304-WPBの硬さの差が、線径 $\phi 1.0\text{mm}$ に比べて $\phi 4.0\text{mm}$ の方が大きいため、硬さが残留せん断ひずみ γ に影響することを実データでも確認できた。

Fig. 3-21(a) Relationship between predicted value and measured value of residual shearing strain. (SWOSC-V $\phi 1.0\text{mm}$)

Fig. 3-21(b) Relationship between predicted value and measured value of residual shearing strain. (SWOSC-V $\phi 4.0\text{mm}$)

- ②線径による比較：SWP-A及びSWOSC-Vでは、残留せん断ひずみ γ が $\phi 1.0\text{mm} > \phi 4.0\text{mm}$ という関係を示したが、SUS304-WPBでは、締付温度によって結果が異なり、①項では、残留せん断ひずみ γ が硬さに比例して変化することを示したが、ここでは反対の結果が得られ、硬さだけでは説明がつかないことがわかった。
- そこで、すでに報告されているセッティング効果を検証す

Fig. 3-22(a) Relationship between predicted value and measured value of residual shearing strain. (SUS304-WPB $\phi 1.0\text{mm}$)

Fig. 3-22(b) Relationship between predicted value and measured value of residual shearing strain. (SUS304-WPB $\phi 4.0\text{mm}$)

る予定であったが、今回の活動では比較検証が十分に行えなかったため、今後、S-S曲線の作成を含め試験検証を追加する予定である。

- ③ショットピーニング有無の比較：各線種のばねについて残留せん断ひずみ γ に及ぼすショットピーニングの影響を検証した結果、SWP-Aでは、締付温度100°Cでは差はないが、200°Cでは残留せん断ひずみ γ が増加したが、これはショットピーニングにより付与された残留応力が、温間へたり試験中に、コイルリング後の低温焼なまし処理

温度に近い条件で長時間保持されたことから減少してねじり降伏点が低下したためと考えられる。

- SWOSC-Vでは、ショットピーニングを施したばねの締付温度200°Cでの残留せん断ひずみ γ の増加量が大きく、これは付与された残留応力がSWOSC-Vのほうが大きいことから可動転位量が多くなったためと考えられる。

- SUS304-WPBでは、締付温度200°Cと400°Cでは、ショットピーニングによる差は現れなかったが、これは締付温度が400°Cと高く、ショットピーニングにより付与した残留応力が消失したため、処理無しばねと同様の結果となったと考えられる。

- 以上より、ショットピーニングを施したばねには、使用環境の温度の考慮が必要なることを再認識した。

- ④へたり量 γ の構成式(予測計算式)の検証：SWOSC-V及びSUS304-WPBについて、過去の委員会にて提案された残留せん断ひずみ γ の構成式を用いた計算値と今回の実測値との整合性を検証した結果、低応力側では比較的良く一致したものの、今回新たに設定した高応力側での締付条件ではあまり一致しなかった。

- 今回の試験データを使用したへたり量の構成式の検証及び必要な見直しは行えなかったため、SWP-Aの予測式の検証と併せて、さらに検討が必要で、今後の課題としたい。

4. 結 言

今回の活動の結果、委員・関係者のご尽力により、「ばねメーカーが小型コイルばねを設計・製作する時に、“温間へたり量(γ 値)”をある程度予測できるようなデータベースを作成すること」はできたと考える。

すなわち、得られた温間へたりに関する諸データは、ばらつきが少なく、締付試験での負荷応力、温度、時間の影響についても妥当な傾向が得られ、過去の論文、研究委員会報告内容での傾向と一部の鋼種、温度域を除いて概ね一致することも確認できた。

ただ、今回の活動の中では、S-S曲線を元にした温間へたり量の検討・考察は行えず、また得られたデータを元にした予測計算式の高精度化にも至れなかったことをお詫びしたい。

今後も必要と機会があれば、温間へたりに関するばね学会研究委員会活動を継続いただき、温度域によって異なると推察される温間へたりのメカニズム検証と実用性の高い γ 値予測計算式化を検討いただき、より有用な温間へたりに関する技術指針を提供いただけることを期待したい。

なお、今回の委員構成は主に中堅若手主体となり、各位が文献収集と分類整理、温間へたり試験実施とデータ整理を積極的に実施し、2017年6月14日の中間報告会でも発表を担当するなど熱心に活動下さったこと、及び岡本副委員長、荻原副委員長が各WG活動を積極的に進めて下さり、特に岡本副委員長は力不足の委員長・川喜を引張って中間報告会、ばね論文集への投稿を主管下さったことを付記して感謝の意を表したい。

参考文献 (内容明示のため「文献題目」も記載)

(○内数字は、Table 2-2 ~ 2-4掲載の文献番号)

- 1) 研究委員会報告 (山田凱朗委員長): ばね論文集「圧縮コイルばねの疲労限度線図に関する共同研究」, 60, (2015), 53.
- 2) ①長安 剛: ばね論文集「冷間成形コイルばねの高温締付試験 (報告1)」, No.9, (1963), 78.
- 3) ②岩田 齊, 荒川大次郎, 里見祥明: ばね論文集「耐熱ばね鋼についてSi-Cr鋼の熱間及び疲労特性」, No.10, (1964), 12.
- 4) ③中川 昭, 井上和政, 鈴木昭弘: ばね論文集「クロム・シリコン鋼オイルテンパー線の性能について」, No.10, (1964), 16.
- 5) ④分科会報告 (富田勝信委員長): ばね論文集「ばね用ステンレス鋼線共同実験報告」, No.11, (1966), 91.
- 6) ⑤中川 昭, 井上和政, 小泉義明, 菅野憲興: ばね論文集「Si-Cr鋼, Cr-V鋼オイルテンパー線によるコイルばねの高温ヘタリについて」, No.12, (1967), 45.
- 7) ⑥吉川文岳, 出口 武: ばね論文集「Si-Cr鋼オイルテンパー線ばねの低温浸炭窒化による性能向上」, No.12, (1967), 36.
- 8) ⑦研究委員会報告 (大野 明委員長): ばね論文集「自動車用弁ばねの耐久性能に関する研究」, No.13, (1967), 1.
- 9) ⑧研究報告 (大野 明委員長): ばね論文集「ばね用ステンレス鋼線共同研究」, No.14, (1969), 75.
- 10) ⑨研究報告 (大野 明委員長): ばね論文集「ばね用ステンレス鋼線共同研究報告 (その2)」, No.17, (1972), 33.
- 11) ⑩荒川次郎, 上林三郎, 西田 彰, 藤田照夫, 佐藤和良: ばね論文集「ばね用耐孔食ステンレス鋼線について (第1報)」, No.20, (1975), 6.
- 12) ⑪共同研究報告 (渡辺信一委員長): ばね論文集「高強度鋼線の疲れ強さに関する研究」, No.25, (1980), 53.
- 13) ⑫小泉義明, 林 博昭, 下田秀明: ばね論文集「各種高強度ばね用ステンレス鋼線の比較試験」, No.28, (1983), 23.
- 14) ⑬谷本好則: ばね論文集「高強度細径ばね用ステンレス鋼線」, No.29, (1984), 48.
- 15) ⑭斎藤純幸, 芦野正美, 高橋健治: ばね論文集「コイルばねの高温ヘタりに及ぼすばね指数の影響」, No.32, (1987), 24.
- 16) ⑮共同研究報告 (田中千秋委員長): ばね論文集「SWOSC-V及びSUS304-WPB耐熱ばねの長時間ヘタリ特性」, No.34, (1989), 59.
- 17) ⑯研究委員会報告 (金尾正雄委員長): ばね論文集「弁ばね用高強度Si-Cr鋼オイルテンパー線の研究」, No.40, (1995), 57.
- 18) ⑰研究委員会報告 (木村雄二委員長): ばね論文集「ステンレス鋼線の耐久性に関する研究」, No.46, (2001), 41.
- 19) ⑱研究委員会報告 (本間 達委員長): ばね論文集

「コイルばねの形状と特性に及ぼす焼鈍条件」, No.58, (2013), 49.

- 20) 共同研究報告 (神原広司委員長): ばね論文集「熱間成形コイルばねのヘタリ試験法に関する研究」, No.30, (1985), 150.
- 21) 研究委員会報告 (新谷紀雄委員長): ばね論文集「圧縮コイルばねのヘタリに関する研究」, No.59, (2014), 47.
- 22) ばね技術研究会編, 「ばね (第3版)」, (1982), 439, 丸善.
- 23) 日本ばね工業会, 「ばねハンドブック」, (2005), 145, 日本ばね工業会.

Table 補足-1 温間ヘタリに関する18文献 (1/3)

No	論文	タイトル	対象鋼種	結言 (抜粋)
①	No.9 (1963)	冷間成形コイルばねの高温締付試験 (報告1)	SWP-A SWOC-V SWOC-VV	対象鋼種においては、SWOC-VVが最も優れた鋼種の一つである。
②	No.10 (1964)	耐熱ばね鋼についてSi-Cr鋼の熱間及び疲労特性	SWOSC-V SWOCV-V	SWOSC-Vは、耐熱ばねとして、引張、ヘタリ、疲労特性がSWOCV-Vより優れている。
③	No.10 (1964)	クロム・シリコン鋼オイルテンパー線の性能について	SWOSC-V SWOCV-V	SWOSC-VはSWOCV-Vより耐熱性に優れ、耐ヘタリ性も優秀である。
④	No.11 (1966)	ばね用ステンレス鋼線共同実験報告	SUS27他	締付試験において、応力、時間よりも温度の影響が大きく作用する。
⑤	No.12 (1967)	Si-Cr鋼, Cr-V鋼オイルテンパー線によるコイルばねの高温ヘタリについて	SWOSC-V SWOCV-V	ヘタリは比較的初期段階で現れ、鋼種、ばねの処理によってヘタリ量は変化する。
⑥	No.12 (1967)	Si-Cr鋼オイルテンパー線ばねの低温浸炭窒化による性能向上	SWOSC-V	静的、動的、耐熱試験ともに、低温浸炭窒化したものは、ヘタリが非常に小さい。

Table 補足-2 温間ヘタリに関する18文献 (2/3)

No	論文	タイトル	対象鋼種	結言 (抜粋)
⑦	No.13 (1967)	自動車用弁ばねの耐久性能に関する共同研究特集	SWP-V SWO-V SWOSC-V	変形限度は高温弾性限と一定関係はなく、鋼種による影響が大きい。
⑧	No.14 (1969)	ばね用ステンレス鋼線共同研究	SUS27WH-C	静的、動的耐熱特性は、SWO-SCにくらべ同等ないし若干優れている。
⑨	No.17 (1972)	ばね用ステンレス鋼線共同研究報告 (その2)	SUS27WH-B SUS27WH-C	残留せん断ひずみは、伸線過程の相異により影響を受ける。横弾性係数は締付試験後、若干大きくなる。
⑩	No.20 (1975)	ばね用耐孔食ステンレス鋼線について (第1報)	SUS316 SUS304 SUS304+Mo	SUS304にMoを添加すると、耐ヘタリ性能は向上する。
⑪	No.25 (1980)	高強度鋼線の疲れ強さに関する研究	SWC SWP-A SWO-V,他	炭素鋼系の高強度鋼線の耐ヘタリ性は、高強度にしても効果は期待できない。
⑫	No.28 (1983)	各種高強度ばね用ステンレス鋼線の比較試験	SUS304-WPB SUS631-WPC	ヘタリ性: オーステナイト系>サブゼロ加工系>析出硬化系

Table 補足-3 温間ヘタリに関する18文献 (3/3)

No	論文	タイトル	対象鋼種	結言 (抜粋)
⑬	No.29 (1984)	高強度細径ばね用ステンレス鋼線	SUS304-WPB SWP-B	供試材の高温におけるばねの残留せん断ひずみは鋼種間の差が著しい。
⑭	No.32 (1987)	コイルばねの高温ヘタりに及ぼすばね指数の影響	SWP-A SWOSC-V SUS304-WPB	高温ヘタりに及ぼす、ばね指数及びピッチ角 (8.5° ~ 12° 内) の影響は少ない。
⑮	No.34 (1989)	SWOSC-V及びSUS304-WPB耐熱ばねの長時間ヘタリ特性	SWOSC-V SUS304-WPB	解析時、係数の温度依存性がある温度を境にして異なっていた。今後の検討課題。
⑯	No.40 (1995)	弁ばね用高強度Si-Cr鋼オイルテンパー線の研究	SWOSC-V 高強度 SWOSC-V	材料を高強度化すると、耐ヘタリ性は低下した。(一部条件を除く)
⑰	No.46 (2001)	ステンレス鋼線の耐久性に関する研究委員会報告	SUS302 SUS304	300, 400℃の高温ヘタリ性は高引張強さほどヘタリやすい。(但し、理由は不明)
⑱	No.58 (2013)	コイルばねの形状と特性に及ぼす焼鈍条件	SWP-B SWOSC-V SUS304-WPB	SWOSC-V: 360 ~ 420℃ SUS304-WPB: 350 ~ 450℃ の低温焼鈍により、ヘタリ少となる。

※活動当初に文献WGが調査対象とした728文献のリストは、ばね学会HPに掲載予定である。