懸架ばねの腐食耐久性評価法の研究*

懸架ばねの腐食調査委員会

Evaluation Method of Corrosion Fatigue Endurance Properties of Suspension Springs

Committee on Corrosion Fatigue Endurance
Properties of Suspension Springs

There were many evaluation methods of corrosion fatigue endurance properties of suspension springs, depending on spring manufacturers, as many factors affect the properties. Therefore, it has been desired to standardize the evaluation methods. This committee performed theoretical studies as well as experiments on corrosion fatigue. A new evaluation method is recommended on the basis of the experimental results that crack length evaluated from residual fatigue life is a good parameter to compare corrosion fatigue performances of suspension springs relatively.

Key words : Suspension spring, Corrosion fatigue endurance properties, Residual fatigue life, Evaluated crack length

1. ま え が き

近年、高速道路網の拡大、自動車技術の向上により自動車の高速走行が可能となった。トラックにおいては、年間走行距離の増加、用途拡大等のため、使用効率向上の要求がますます強まってきている。一方、環境衛生上の問題のため、冬期のタイヤチェーンの使用禁止による交通安全上の見地から、道路に塩をまく対策がとられてきた。そのため、懸架ばねに関しては塩害による耐久性の低下が重要視されている。

ばね技術研究会は、これら懸架ばねの諸問題を抽出すべく、平成2年に「懸架ばねの諸問題に対する調査研究委員会」を発足させた。2年間の調査研究の結果、懸架ばねの諸問題のなかでは腐食耐久性が重要な課題であり、試験方法についてもいくつかあるため、統一化すべきであるとの意見にまとめられた。そして、平成4年に「懸架ばねの腐食調査委員会」を発足させ、将来の統一化に向けて試験方法を提案することを目的に、懸架ばねの腐食耐久性の評価方法を検討することになった。

本報告は懸架ばねの腐食調査委員会の活動の成果内容をまとめたもので、その要点は以下のとおりである。

初めに、懸架ばねメーカーで行っている台上腐食耐久試験方法の現状を調査した。各社では、各々実車に近い腐食孔を生成させるという目的で腐食耐久試験を行っており、腐食条件等を規定する試験方案の統一化は難しいのではないかと結論に達した。

つぎに市場回収品の調査を行い、従来から行ってきた残存耐久試験が、それまでに生じたき裂長さと、負荷応力に

よって決定されることが認識された。そして、腐食環境下で生じたき裂長さの大小が、腐食耐久性の評価に利用できるのではないかと考えに至った。

そこで新たに、残存寿命から求められるき裂長さによる腐食耐久性評価の理論的考察を行い、これを裏づける台上腐食耐久試験を各社で実施した。その結果、残存耐久試験より求められるき裂長さの大小の比較によって、腐食耐久性の相対的評価のできることが立証されたので、台上腐食耐久試験法案の提案を行った。

本委員会の構成は次のとおりである。

委員長	三菱製鋼 (株)	千島和夫
副委員長	中央発條 (株)	加藤金治
〃	日本発条 (株)	小川 登
〃	三菱製鋼 (株)	栗原義昭
委 員	金属材料技術研究所	金澤健二
〃	(株) スミハツ	十林 崇
〃	中央発條 (株)	神谷修二
〃	日本発条 (株)	尾山二郎
〃	(株) 堀切バネ製作所	植田勇夫
〃	三菱製鋼 (株)	元村博春
事務局	(社) 日本ばね工業会	松田好央

2. 台上腐食耐久試験方法の現状の調査

2.1 ばね技術研究会の従来活動

ばね論文集における掲載論文等から活動状況を調査した。その結果を表1に示す。

1959年ばね論文集第6号の「ばねの疲労に関する共同研

究」では、直径8mmの丸棒に腐食液を滴下しながら回転曲げ疲労試験を行い、磨きばね鋼の腐食疲労と、腐食疲労に及ぼすショットピーニングの効果を耐久限度で比較している。

1975年ばね論文集第20号「重ね板ばねの疲れに関する共同研究」の中では、市場クレームを地域別に集計し、環境条件の影響を把握するための調査と、実車状態を再現した静的応力腐食試験や腐食後の疲労試験を行っている。また、

同論文集で中央発條（株）は、「ばね用平鋼の疲れに及ぼす腐食の影響について」として腐食後の疲労に限定して、塩水噴霧と屋外暴露による発錆状況の比較を行い、腐食孔の深さを観察し、これと寿命の関係を定量的に考察している。

1980年ばね論文集第25号で日本発条（株）は、「懸架ばねの腐食疲労に関する一考察」として、腐食→加振→放置というパターンの試験によって、実車走行における腐食疲労状況

表 1 ばね技術研究会の従来の活動

資 料	ベ ン チ	市 場	カーメーカ実車
ばねの疲労に関する共同研究 (1959 ばね論文集6号)	<ul style="list-style-type: none">腐食疲労に及ぼすショットピーニングの効果確認ショットピーニング有無の試験片による小野式回転曲げ疲労試験腐食無しと、種々の腐食液による腐食疲労腐食の程度によってピーニング効果に差が生じる	_____	_____
重ね板ばねの疲れに関する共同研究 (1975 ばね論文集20号)	<ul style="list-style-type: none">実車における腐食状況の再現目的静的応力腐食試験（試験片） 静応力+腐食液1回/1～3日塗布または浸漬×6カ月応力の差なしビット形状U字で実車と異なる粒界部に腐食孔発生腐食後の耐久→表面の粒界部を起点としてクラック進行寿命 0.1mmで1/2, 0.2mmで1/3, 0.05mm以下低下なし <p>→繰返し負荷が必要</p>	データ無し	折損品 ・腐食孔形状 (腐食孔+き裂) ・腐食はバット際に集中 ・無数のき裂発生 →粒界より発生
ばね用平鋼の疲れに及ぼす腐食の影響について (1975 ばね論文集20号)	<ul style="list-style-type: none">ばね用平鋼の塩水噴霧と屋外暴露の比較(1)腐食後の疲れは、腐食孔深さ値で比較すれば同等に取り扱える(2)疲れに対する腐食の影響は、<ul style="list-style-type: none">腐食孔深さが0.05mmを超えると寿命の低下が顕著になる腐食孔深さが0.3mmになるとショットピーニングの効果が完全に消滅した板ばねの破断条件を整理することによって 破断ばねの腐食孔深さの測定値 ↓ 腐食が原因かどうかの推定が可能	_____	_____
懸架ばねの腐食疲労に関する一考察 (1980 ばね論文集25号)	<ul style="list-style-type: none">実車耐久で塗装違いにより寿命比が一定になる現象を台上で再現するのが目的(SST 30分+2000回耐久+23h 大気放置)×2～3カ月実車と同様腐食孔発生、粒界腐食発生塗装違いの寿命比は実車と一致(1)腐食孔を再現させるには試験期間を長期化する。(2)粒界腐食は繰返し応力負荷しながら腐食させる。	_____	折損品 ・腐食孔形状 (腐食孔のみ) ・粒界腐食
懸架ばねの腐食疲労試験法に関する研究 (1984 ばね論文集29号)	<ul style="list-style-type: none">市場回収品の腐食深さ、形状を類似させる試験方法の確立 <div> <p>〔パターンⅠ〕</p></div> <div> <p>(市場の残存寿命との対応) 〔パターンⅡ〕</p></div> <p>Ⅰ 腐食孔発生U字形で市場と類似 粒界腐食は明確でない</p> <p>Ⅱ 疲労加振有無が最大腐食孔深さの成長に影響大 残存寿命は腐食孔深さの影響大</p> <ul style="list-style-type: none">考慮すべき項目①浸漬条件—空気供給、締付応力、浸漬回数、液温②加振条件—加振応力、加振回数、間隔③放置条件—締付応力、温度	<ul style="list-style-type: none">腐食孔形状U字がほとんど強度低下をもたらす線径、肉厚の減少はみられない3年経過後の腐食孔 コイル0.15mm 板ばね0.3mm粒界腐食は明確でない	_____

を台上で再現できることを確認した。しかし、試験期間が長くなるため、期間を短縮するという検討項目を残した。

1984年ばね論文集第29号では、共同研究「懸架ばねの腐食疲労試験法に関する研究」にて、自動車用懸架ばねの腐食耐久試験方法として、市場での腐食状況を台上で再現する最適な試験条件を見出すことを目的に、市場回収品の調査及び台上腐食耐久試験法の検討を行った。そして、自動車用懸架ばねの市場における腐食状況を定量的に明らかにすること、及び実車の市場における腐食状況がほぼ再現できる台上腐食耐久試験方法を開発することができた。

2.2 JASO 自動車部品腐食試験分科会の活動

分科会はカーメーカ、部品メーカ、材料メーカ、試験機メーカ、塗料（表面処理）メーカ、研究機関のメンバーで構成され、1987年～1990年の間、以下の活動を行った。

(1) 従来、主流として行われていた塩水噴霧試験による腐食の試験方法は、市場で発生する腐食との相関性が得ら

れないため、カーメーカ各社がそれぞれ独自の複合サイクル腐食試験を実施していた。そこで試験方法の統一化を目標に、市場再現性があり、促進性を有する規格を作成した。

(2) 沖縄での2年間にわたる屋外暴露で発生した腐食に対応し、その再現性と促進性の観点から試験方法を制定し、その試験に使用する複合サイクル試験装置（スガ試験機製）を定めた。制定された規格は「JASO M609-91 自動車用材料腐食試験方法」で、1サイクル8時間を塩水噴霧2時間（35℃、5%NaCl）、乾燥4時間（60℃、20～30%RH）、湿潤2時間（50℃、95%RH）とし、サイクル数は当事者間の協議で定めるというものである。

2.3 各社の台上腐食耐久試験方法の現状及び結果

板ばね及びコイルばねの各社における腐食耐久試験方法を表2、表3に、試験結果を表4に示す。各社の腐食耐久試験方法は次のとおりである。

(1) 板ばねの腐食耐久試験方法について

表2 ばねメーカー各社における懸架ばねの腐食耐久試験方法（板ばね）

メーカー	ばねの状態	試験内容
A	Ass'y・塗装有り	塩水噴霧下にて疲労試験 (5%NaCl, 30℃) (1G±0.2G, 0.4G, 0.6G; 0.1Hz)
B	↑	疲労試験 → 塩水浸漬[3h] → 大気放置[21h] × 5回 × 折損まで (10,000回) (5%NaCl, 50℃) (無負荷)
C	↑	試験方法① 疲労試験 → 塩水噴霧[48h] × 折損まで (5,000回) (5%NaCl, 35℃) 試験方法② 塩水浸漬[3h] → 大気放置[21h] × N回 → 疲労試験 (5%NaCl) (無負荷) (N=10～40) (折損まで) 試験方法③ 塩水噴霧[3h] → 大気放置[21h] × 40回 → 疲労試験 (5%NaCl, 35℃) (無負荷) (折損まで)
D	↑	塩水浸漬[0.5h] → 疲労試験 → 恒温槽放置[23h] × 折損まで (5%NaCl) (3,000回) (26℃, 湿度95%, 無負荷)

↑印：「上に同じ」を表す。

表3 ばねメーカー各社における懸架ばねの腐食耐久試験方法（コイルばね）

メーカー	ばねの状態	試験内容
A	塗装無し	塩水噴霧[8h] → 大気放置[16h] × N ₁ , N ₂ , N ₃ 回 (5%NaCl, 30℃) (無負荷) (腐食孔深さ: 0.05, 0.10, 0.20mm目標) → 疲労試験 (リバウンド～フルバンプ; 3Hz)
B	塗装有り	疲労試験 → 塩水噴霧[3h] → 大気放置[21h] × 5回 × 折損まで (10,000回) (5%NaCl, 35℃) (無負荷)
	塗装無し (材料評価)	塩水噴霧[3h] → 大気放置[21h] × 20回 → 疲労試験 (5%NaCl, 35℃) (無負荷) (腐食孔深さ: 0.1～0.15mm)
E	塗装無し	疲労試験 → 塩水浸漬[5min] → 大気放置[23h] × 折損まで (3,000回) (5%NaCl) (無負荷)
D	↑	塩水噴霧[0.5h] → 疲労試験 → 恒温槽放置[23h] × 折損まで (5%NaCl, 35℃) (3,000回) (26℃, 湿度95%, 無負荷)

↑印：「上に同じ」を表す。

表 4 各社の台上腐食耐久試験方法の現状及びその結果

(1) 板ばね

ばね No.	ばね構成 幅×厚さ (mm)	下塗塗装	腐食方法	疲労試験条件* $\sigma_m \pm \sigma_a$ (kgf/mm ²)	折損データ			腐食状況	備考 ()内は試験日数
					折損回数	リ-7 No.	折損位置	硬さ (HV)	
A	D-1 90×11-3, 13-3, 16-3	ジソクリフ	塩水噴霧下にて疲労試験(0.1Hz)	10±0.6G	61,000	—	パッド際よりやや外側	—	U+V 0.1
	D-2 ↑	↑	↑	↑	121,000	—	↑	—	U+V 0.1
	D-3 50×6-2, 11-1	ブライマ	{10 ⁴ 回→(SST3h→大気放置21h)×5∞} ×折損まで	75.1±20(2t)	143,400	2	F 150	—	U 0.22
	D-4 ↑	↑	↑	↑	194,200	2	R 220	—	U 0.12
	D-5 ↑	↑	↑	26.1±26.1(3t)	295,000	3	F 100	—	U+き裂 0.05
	D-6 70×8-7	↑	↑	65±30	59,800	4	F 215	472	U 0.2
B	D-7 60×6-2, 5-1, 14-1	ジソクリフ	{10 ⁴ 回→(SST3h→大気放置21h)×5∞} ×折損まで	67.8±18	148,800	4	R 180	—	U 0.22
	D-8 ↑	↑	↑	↑	114,000	4	F 275	—	U 0.28
	D-9 60×7-2, 8-2	↑	(SST 3h+大気放置21h) × 10∞ → 疲労試験	53.8±44.7	44,000	3	F 130	—	U 0.1
	D-10 ↑	↑	↑	↑	67,000	3	F 140	—	U 0.12
	D-11 ↑	↑	↑	↑	54,000	3	F 220	—	U 0.12
	D-12 ↑	↑	↑	↑	57,000	3	F 240	—	U 0.12
	D-13 70×11-4, 18-2	ブライマ	(SST3h+大気放置21h) × 40∞ → 疲労試験	33±31	28,400	6	R 80	—	U 0.12
	D-14 70×19-2, 13-2, 12-1	ジソクリフ	{10 ⁴ 回→(塩水浸漬3h→大気放置21h)×14∞} → 疲労試験	47.3±35.9	66,000	3	R 160	—	U 0.08
	D-15 ↑	↑	{10 ⁴ 回→(塩水浸漬3h→大気放置21h)×31∞} → 疲労試験	↑	37,200	3	R 210	—	V+き裂 0.23
	D-16 90×15-2, 17-1	↑	{5,000回→SST48h} × 折損まで	—	50,000	3	F 340	505	U 0.08 (40~60日)
	D-17 90×16-1, 15-1	↑	↑	—	60,000	2	R 510	498	U 0.06 (40~60日)
	D-18 ↑	↑	↑	—	55,000	2	R 530	505	U+部V 0.11 (40~60日)
C	D-19 70×13.5-2	↑	(塩水浸漬0.5h→3,000回→大気放置21h) × 折損まで	—	72,000	2	F 410	490	U 0.03 (24日)
	D-20 ↑	↑	↑	—	88,500	2	F 410	493	U 0.05 (30日)
	D-21 ↑	↑	↑	—	97,700	2	R 410	490	U 0.04 (33日)
	D-22 80×14-2, 16-6	ブライマ	(塩水浸漬0.5h→2,000回→大気放置21h) × 折損まで	33.5±26.8(14t)	91,000	3	スリット際	—	— (45.5日)
	D-23 ↑	↑	↑	38.3±30.6(16t)	>96,000	—	—	—	— (48日)
	D-24 80×13-2, 16-4	ジソクリフ	↑	40.8±32.6(13t)	>91,000	—	—	—	— (45.5日)
	D-25 ↑	↑	↑	50.3±40.2(16t)	175,000	2	F 80	—	— (87.5日)
	D-26 60×7-1, 8-1, 12-2	ブライマ	↑	68.5±19.2(M)	48,600	2	F 370	—	V+き裂 0.09 (25日)
	D-27 ↑	ジソクリフ	↑	31.7±31.6(H)	69,400	2	F 375	—	U+き裂 0.07 (35日)
	D-28 60×6-4, 12-1	ブライマ	↑	62.9±20.8(M)	198,000	4	R 370	455	U+き裂 0.12 (99日)
	D-29 60×9-4, 8-1	↑	↑	45.4±42.8(H)	51,500	5	F 50	—	U 0.17 (26日)
	D-29 60×9-4, 8-1	↑	↑	40.2±32.2(8t)	51,500	5	F 50	—	U 0.17 (26日)

mm

↑印:「上に同じ」を表す。* 疲労試験条件 () t: リーフ板厚

(続く)

表 4 各社の台上腐食耐久試験方法の現状及びその結果

(1) 板ばね (続き)

ばね メ-カ	No.	ばね構成 幅×厚さ (mm)	下塗装	腐食方法	疲労試験条件* $\sigma_m \pm \sigma_a$ (kgf/mm ²)	折損データ			腐食状況 腐食孔 形状	備 ()内は試 験日数
						折損回数	リ-フ No.	折損位置	硬さ (HV)	
D	D-30	60×9-4, 8-1	↑	{塩水浸漬0.5h→ 3,000回→大気放置 21h} × 折損まで	45.3±35.1(9t)	46,000	5	F 50	—	—
	D-31	60×12-3	ジ'ソクリフ		41.2±31.7	133,800	3	R 60	—	—
	D-32	↑	↑		↑	131,650	3	F 63	—	—
	D-33	60×7-9	プライマ		44.6±32.6	48,500	5	R 310	—	—
	D-34	60×7-9	↑	{塩水浸漬0.5h→ 3,000回→大気放置 21h} × 折損まで	—	64,000	5	R 310	—	—
	D-35	60×13-3	ジ'ソクリフ		44.6±40.5	82,015	3	F 60	—	—
	D-36	↑	↑		↑	87,230	3	F 62	—	—
	D-37	50×6-1, 7-2	プライマ		57.2±28.3(6t)	72,000	3	R 52	450	U+き裂 (24日)
	D-38	↑	↑		66.7±33.0(7t)	87,000	3	R 57	472	U+き裂 (29日)
	D-39	60×6-3, 5-2	↑		47.5±27.2(5t)	140,400	1	F 70	472	U+き裂 (47日)
	D-40	↑	↑		57.0±32.6(6t)	235,000	5	R 45	440	V+き裂 (79日)
	D-41	80×13-1, 14-5	ジ'ソクリフ		47.7±38.2(13t)	256,700	5	F 195	—	—
	D-42	↑	↑		51.4±41.1(14t)	177,500	2	R 365	—	—
	D-43	90×11-3, 12-2, 16-1, 20-1	ジ'ソクリフ	{塩水浸漬0.5h→ 5,000回→大気放置 21h} × 折損まで	43.4±26.8(M)	60,000	4	R 111	440	U (12日)
	D-44	↑	↑		36.2±36.2(H)	44,000	5	F 185	440	U+き裂 (9日)
	D-45	70×9-6, 8-1	↑		40.2±32.2(9t)	93,100	3	R 354	480	U (19日)
	D-46	80×13-1, 14-4, 12-2	↑		54.4±43.9(14t)	54,600	3	R 180	472	U (11日)
	D-47	70×11-1(リ-フ)	塗装無し		65.0±40.0	72,000	—	センタ-	455	V+き裂 (15日)
	D-48	↑	↑		↑	81,000	—	センタ-	465	V+き裂 (17日)
	D-49	↑	↑		↑	177,000	—	センタ-	455	V+き裂 (36日)
	D-50	↑	↑		↑	276,000	—	センタ-	472	V+き裂 (92日)

↑印:「上に同じ」を表す。* 疲労試験条件 () t: リ-フ板厚 mm, M: メインリ-フ、H: ヘルパリ-フ (続く)

表 4 各社の台上腐食耐久試験方法の現状及びその結果 (続き)

(2) コイルばね

ばね メ-カ	No.	ばね線径 (mm)	塗装	腐食方法	疲労試験条件 $\sigma_m \pm \sigma_a$ (kgf/mm ²)	折損データ			腐食状況 腐食孔 形状	備 考
						折損回数	折損位置 オ-ブン側	硬さ (HV)		
D	DC1	11.9	無し	(3hSST+21h大気) ×10 [∞] 後→疲労試験	79.5±29	147,500	1・5/8 巻目下	479	U	0.06
	DC2	↑	↑		↑	197,200	3/4 巻目下	504	U	0.02
	DC3	↑	↑	(3hSST+21h大気) ×20 [∞] 後→疲労試験	↑	46,100	1・1/2 巻目下	524	U	0.06
	DC4	↑	↑		↑	33,100	1・3/4 巻目下	501	U	0.06
	DC5	↑	↑		↑	286,000	1・1/3 巻目下	501	—	処女材
	DC6	11.9	↑	(3hSST+21h大気) ×20 [∞] 後→疲労試験	64.1±36.6	197,000	5/8 巻目下	518	U	0.02
	DC7	↑	↑		↑	56,200	1・1/4 巻目下	518	U	0.10
	DC8	↑	↑		↑	55,100	1・1/4 巻目下	508	U	0.08
	DC9	↑	↑		↑	256,900	3/4 巻目下	504	—	処女材
	DC10	↑	↑		↑	374,700	3/4 巻目下	499	—	処女材

↑印:「上に同じ」を表す。

A 社では塩水噴霧下での疲労試験を実施している。この方法は、き裂の伝ば過程においても腐食の影響を与えることが可能である。また、ばねを一度試験機に取付けば、折損するまで連続して試験できるので、作業工数の削減を図ることができる。ただし、疲労試験機に塩水噴霧装置を直結させる必要があり、設備上の制約が大きい。

B 社では疲労試験と腐食試験の組合わせで実施している。腐食は塩水浸漬 3 時間後に大気放置 21 時間の 24 時間を 1 サイクルとし、5 サイクルごとに疲労試験を 10,000 回行い、折損まで繰り返す。設備は通常の疲労試験機と塩水槽があればよいが、1 日に 1 回、試験片を塩水槽から出し入れし、5 日ごとに疲労試験を実施する必要がある。

C 社は 3 種類の試験方法を採用している。試験方法①は B 社と同じく、疲労試験と腐食試験の組合わせである。疲労試験を 5,000 回と塩水噴霧 48 時間を 1 サイクルとして折損までこれを繰り返す。疲労試験機と塩水噴霧試験機が必要である。2 日に 1 回、試験片を塩水噴霧試験機より取出し、疲労試験を実施する。また、試験方法②③は腐食後の疲労試験である。②は塩水浸漬 3 時間、③は塩水噴霧 3 時間後にそれぞれ大気放置 21 時間の 24 時間を 1 サイクルとし、10～40 回繰り返す、その後疲労試験を行う。

D 社も疲労試験と腐食試験の組合わせである。塩水浸漬 0.5 時間後に疲労試験を 3,000 回行い、その後恒温槽内で一定温度・湿度にて 23 時間放置する。24 時間を 1 サイクルとして折損まで繰り返す。1 日 1 回、試験片の塩水槽、恒温槽からの出し入れと疲労試験が必要である。恒温槽放置のため、ばねの大きさと数量に制約を受ける。

(2) コイルばねの腐食耐久試験方法について

A 社は未塗装のばねに対して、腐食後に疲労試験を行っている。塩水噴霧 8 時間後に大気放置 16 時間の 24 時間を 1 サイクルとして、腐食孔深さが 0.05～0.20mm となることを目標とするサイクル数 $N_1 \sim N_2$ 回の後に疲労試験を行う。

B 社は塗装したばねに対して、板ばねと同様に疲労試験と腐食試験を組合わせて実施している。腐食は塩水噴霧 3 時間後に大気放置 21 時間の 24 時間を 1 サイクルとし、5 サイクルごとに疲労試験を 10,000 回行い、これを折損まで繰り返す。また、材料評価として、未塗装のばねに対して、A 社とほぼ同様の条件で腐食後に疲労試験を行っている。ただし、塩水噴霧 3 時間後に大気放置 21 時間を 1 サイクルとして、20 サイクルの後に疲労試験を行う。

E 社は未塗装のばねに対して、疲労試験と腐食試験を組合わせて実施している。疲労試験 3,000 回後に、塩水浸漬を 5 分間行い、その後 23 時間大気放置し、この 24 時間を 1 サイクルとして折損まで繰り返す。

D 社も未塗装のばねに対して、疲労試験と腐食試験の組合わせで実施している。塩水噴霧 0.5 時間後に疲労試験を 3,000 回行い、その後恒温槽内で一定温度・湿度にて 23 時間放置する。24 時間を 1 サイクルとして折損まで繰り返す。板ばねと同様に、恒温槽放置のため、ばねの大きさと数量に制約を受ける。

2.4 調査のまとめ

各社の試験方法は、ばね論文集で発表されている試験方法をベースに、それぞれ実車に近い腐食孔を生成させる目的で腐食耐久試験を行っている。腐食耐久試験の方法には、腐食試験と疲労試験の両方を実施する方法と、腐食孔の切欠きをつくって疲労試験をする方法があり、以下の 3 つに大別される。

- (1) 腐食後の疲労試験
- (2) 腐食+疲労のサイクル試験
- (3) 腐食下の連続疲労試験

試験期間は一部 10 日前後のものもあるが、大半は、30 日～60 日という期間を要している。しかも実車寿命と台上寿命の相関を求めようとしているが、なかなか良い方法はないようである。また、腐食無しの台上耐久との比較試験を行い、繰返し数比で評価しているメーカーもある。図 1 に示すように、腐食による損傷で繰返し数は 1/10～1/3 に低下する場合もある。

カーメーカは、ばねには塗装・材料・設計の総合的な評価を望んでおり、腐食耐久試験も塗装したばねで行っている。統一された試験方法としては「JASO M609-91 自動車用材料腐食試験方法」が制定されたが、カーメーカ各社が従来行っていた複合サイクル腐食試験との相関がとれないため、まだ普及していない。

3. 市場回収品、実車耐久回収品の調査

3.1 調査方法

1978 年から 1992 年にわたり、ばねメーカー各社が保有していた市場及び実車耐久試験回収品において、腐食が原因で折損した重ね板ばねのデータを対象に、ばね仕様、走行地域、走行距離、折損部位、腐食状況などを調査した。

3.2 調査結果

3.2.1 市場回収品の調査結果

調査結果を表 5 に示す。

(1) 調査品の車種、使用状況 調査品の車種は小型バン、トラックから中型バス、大型トラックと幅広く、走行

図 1 重ね板ばねの腐食状況と耐久性

表 5 市場回収重ね板ばねの調査結果一覧表

No.	ばね構成 幅×厚さ(mm)	下塗塗装	折損データ			腐食状況		使用状況	最大応力(kgf/mm ²) ()内常用時
			走行距離 (km)	リ-7 No. *	折損位置	硬さ (HV)	腐食孔形状		
S-1	60×7, 8-2, 7	プライマ	26,351	4	R 60	430	U	岐阜大滝村	86.1
S-2	↑	↑	↑	2, 3	R 85	410~405	↑	↑	↑
S-3	60×8, 9, 14-2	↑	15,839	2	F 85	464	U+き裂	-	81.5
S-4	60×11-2	ジツクリチ	20,000~ 37,051	1	F 47	435	V+き裂	ヨーロッパ	92.6
S-5	↑	↑	↑	↑	F 48	419	U	↑	↑
S-6	70×11-4, 18-2	プライマ	60,000	3	180	446	↑	生魚用海水槽積み車	73.6
S-7	↑	↑	30,000	3	170	453	↑	↑	↑
S-8	70×12, 13-2, 19-2	ジツクリチ	19,000	2	R 140	436	U+き裂	東京都清掃局	83.1
S-9	2枚	プライマ	52,687	2	R 50	434	U	青森	89.7
S-10	70×10-2, 11, 10, 18-2	↑	170,000	3	75	430	↑	-	75.7
S-11	↑	↑	↑	4	75	443	↑	-	68.8
S-12	70×11, 10	ジツクリチ	134,000	2	R 110	498	-	富山、中型バス	(54.0)
S-13	70×12-2	↑	96,000	2	R 120	454	-	秋田、中型バス	(56.2)
S-14	90×15-2, 17, 16, 15	↑	41,000	3	R 290	505	-	山口、大型ダンプ	(41.9)
S-15	80×21-3	↑	73,000	2	R 85	421	-	長野、中型バス	(62.4)
S-16	90×16-3, 14, 13, 14, 5-2, 11-2	↑	186,000	M4	F 92	454	-	大分、大型カーゴ	(60.3)
S-17	90×30, 25	↑	275,000	1	F 100	454	-	福岡、大型カーゴ	-
S-18	90×16-2, 18-5	↑	172,000	2	R 310	437	-	山口、大型カーゴ	(46.1)
S-19	90×14-8	↑	112,000	4	R 160	↑	-	秋田、大型カーゴ	-
S-20	↑	↑	↑	5	R 355	↑	-	↑	-
S-21	↑	↑	56,000	5	F 250	↑	-	山口、大型カーゴ	-
S-22	90×18-3, 20, 19-2, 18, 17	↑	88,000	3	F 190	454	-	秋田、大型ダンプ	(43.1)
S-23	80×12-2, 16-5	プライマ	283,065	5	R 150	440~472	き裂	福岡	(50以下)
S-24	100×13-5	↑	311,084	3	F 100	410~425	↑	-	-
S-25	80×13-2, 16-4	↑	64,858	2	F 76	455	U+V	阿賀野川流域	(60)
S-26	↑	↑	17,000	3, 4	R 170	425	き裂	-	↑
S-27	70×8-6, 18, 13	↑	19,323	3	R 160	434	U	-	90
S-28	100×11-2, 16-5	↑	156,745	6	F 150	↑	↑	九州臼杵	(70)
S-29	90×11-8, 16-3	↑	60,000	H3	R 190	491	↑	愛媛	(90)
S-30	↑	↑	340,000	6	F 300	440	↑	↑	↑
S-31	90×13-4, 14-4, 13-5	↑	206,000	4	F 130	508	↑	福岡	100
S-32	100×16-13	プライマ	6,000	6	F 140	440	↑	福岡	120
				2	F 470	440	-	福岡	(40)
				3	R 350	410	↑	↑	↑
				3	F 457	440	-	↑	↑
S-33	70×10-2, 9-1, 20-1	↑	19,000	2	R 240	425	U	福岡	90
S-34	80×6, 7-3	↑	53,000	2	F 135	472	↑	-	100
				3	↑	↑	↑	↑	↑

↑印:「上に同じ」を表す。

地域は国内の東北、北陸、北九州が大部分で、気象条件等の地域性が認められる。また一部ヨーロッパが含まれている。走行距離は0.6~34万kmであった。

(2) 腐食孔 図2に錆除去後の表面外観写真を示す。表面には多数の腐食孔が認められ、さらに腐食孔を起点とした疲労き裂がいくつか観察される。図3に折損部近傍の腐食孔の断面写真を示す。腐食孔の断面形状はU型、V型さらに腐食孔底を起点としたき裂の発生等、種々の形状が認められる。

図4に走行距離と腐食孔深さとの関係を示す。下塗り塗装にプライマとジンクリッチがある。ジンクリッチ塗装で、センチ穴より150mm未満の中心部折損品の腐食孔深さは、走行距離に関係なくほぼ0.15mmであるのに対して、有効部折損品の腐食孔深さは、10万km以上走行したもので急激に深くなっている。これは、有効部折損は飛び石、砂の噛みこみ等によりスポット的に塗膜が剥離し、腐食が内部に進み、応力も中央部に比べて比較的低いため、腐食孔がかなり深くなってから折損に至るためと考えられる。それに対し中央部折損は、フレッティング等により塗膜が面剥離し、腐食孔も全面に発生し、応力も高いため腐食孔深さが0.15mm程度になると折損に至ってしまうと考えられる。プライマ塗装品の腐食孔深さは、折損部位に関係なく、走行距離が長くなると深くなる傾向がみられる。

また図4に、ばね論文集第29号の「懸架ばねの腐食疲労試験法に関する共同研究」での調査結果(1979年~1980年回収品)をプロットしてある。国内走行品は今回調査のプライマ塗装品とほぼ同等の傾向である。一方、北米走行品は、10万km以下の走行では走行地域の腐食環境が厳しいため、今回の調査品に比べ腐食孔深さが深い。しかし10万km以上の走行品では逆に今回調査品の腐食孔深さの方が深い傾向がみられる。

3.2.2 実車耐久回収品の調査結果

調査結果を表6に示す。

(1) 調査品の車種、走行距離 調査品の車種はほとんどが小型バン、トラックであり、一部大型が含まれる。走

行距離は1万km前後が最も多く、20万kmのデータも一部みられる。

(2) 腐食孔 腐食孔深さは大半が0.15mm以下で、大半が0.1mm以上であった市場回収品の場合に比べ浅い。図5に折損部近傍の腐食孔の断面写真を示すが、腐食孔の断

(1) 腐食孔状況 (No. S-33) (100倍の写真に最小メモリ1mmのスケールを添えた写真)

(2) 腐食孔状況 (No. S-19)

(3) 腐食孔状況 (No. S-4)

図3 市場回収重ね板ばねの折損部近傍の腐食孔の断面写真

図2 錆除去後の表面外観写真

図4 走行距離と腐食孔深さとの関係

表 6 実車耐久回収重ね板ばねの調査結果一覧表

No.	ばね構成* 幅×厚さ(mm)	下塗塗装	折損データ		硬さ (HV)	腐食状況		使用状況 最大応力* (kgf/mm ²)
			走行距離 (km)	リ-7 No.*	折損位置	腐食孔形状	深さ (mm)	
J-1	70×8, 9-3, 6	プライマ	8,000	2	R 95	U(一部V+き裂)	0.09	—
J-2	↑	↑	9,000	2	R 73	↑	0.08	—
J-3	70×12-5, 7-2, 9-2, 10-4	↑	8,871	3	R 77	↑	0.06	—
J-4	↑	↑	6,628	3	R 117	U+き裂	0.04	—
J-5	60×6, 7, 6, 16	↑	16,286	2	F 70	U(一部V+き裂)	0.08	—
J-6	60×7-2, 13	↑	9,600	2	F 300	U	0.05	—
J-7	60×6, 5-2, 6, 13	↑	19,000	1	F 50	V+き裂	0.07	—
J-8	↑	↑	↑	4	F 190	↑	0.12	—
J-9	60×7-2, 8, 12	↑	5,000	3	R 100	U, V+き裂	0.05	—
J-10	↑	↑	↑	↑	R 85	U	0.07	—
J-11	60×7-5	↑	11,494	5	R 50	↑	0.07	—
J-12	↑	↑	19,185	3	F 290	U+き裂	0.03	—
J-13	60×7-2, 8, 12	ジツクリチ	5,000~ 6,000	3	R 110	U+き裂	0.15	—
J-14	70×10-4, 7-9	プライマ	16,900	3	R 135	U	0.07	—
J-15	60×7-2, 8, 12	ジツクリチ	12,960	3	R 100	V+き裂	0.03	—
J-16	↑	↑	15,000	3	F 100	U	0.03	—
J-17	60×8, 9, 11-2	プライマ	12,212	2	F 119	U(一部V+き裂)	0.09	—
J-18	60×8-2, 15-2	↑	14,000	2	F 240	U	0.08	—
J-19	60×10-2	ジツクリチ	14,800	2	F 40	↑	0.05	—
J-20	60×7-2, 8, 12	↑	3,000	3	F 80	V+き裂	0.03	—
J-21	60×7, 7, 8, 12	↑	3,000	3	F 75	V+き裂	0.03	—
J-22	60×7-3, 6, 11	↑	7,500	3	R 50	U, V+き裂	0.04	—
J-23	70×7-1, 8-5	プライマ	7,000	3	R 125	き裂	—	90
J-24	70×11-8, 10-7(H)	↑	3,500	4	↑	↑	—	↑
J-25	↑	↑	↑	H1	F 97	↑	—	↑
J-26	50×6, 7-3	ジツクリチ	14,454	H2	R 100	↑	—	↑
J-27	↑	↑	11,538	2	F 117	↑	—	↑
J-28	80×13-2, 15-4	↑	197,581	3	F 113	↑	—	↑
J-29	70×10, 11-4	プライマ	31,300	1~4 未折損	センタ穴 440~425	↑	—	↑
J-30	↑	↑	32,300	5	センタ穴 491	U	0.05	—
J-31	90×13-11	↑	197,581	4	R 150	U	0.08	110
J-32	70×11-8, 10-7	↑	61,200	7	F 95	V	0.20	↑
J-33	70×10-14	↑	56,500	10	R 180	U+V	0.21	90
J-34	↑	↑	↑	5	R 175	U+き裂	↑	↑
J-35	70×6, 7-2, 12-1	↑	17,154	5	F 177	U	0.1	—
J-36	↑	↑	12,285	5	F 157	U+き裂	0.17	100/120(H)
J-37	↑	↑	↑	(き裂)	↑	↑	↑	↑
J-38	↑	↑	↑	F 120	↑	↑	↑	↑
J-39	↑	↑	↑	F 110	↑	↑	↑	↑

↑印:「上に同じ」を表す。*ばね構成、リ-7No.、最大応力 H:ヘルパリーフ **J-28 残存寿命 245,000 回 (続く)

表 6 実車耐久回収重ね板ばねの調査結果一覧表 (続き)

No.	ばね構成 幅×厚さ(mm)	下塗塗装	折損データ			腐食状況		使用状況
			走行距離 (km)	リーフ No.*	折損位置	硬さ (HV)	腐食孔形状	
J-37	70×11-2,10-4,18	プライマ	62,900	6	R 105	425	V+き裂	最大応力* (kgf/mm ²) 90
J-38	70×7,8-5	↑	10,000	4	F 112	↑	U	↑
J-39	70×9-4	↑	6,272	3	F 90	472	き裂	—
J-40	↑	↑	3,900	4	F 48	↑	↑	—
J-41	↑	↑	4,857	4	↑	459	↑	—
J-42	↑	↑	4,513	3	F 87	434	↑	—
				4	F 45	↑	↑	—
J-43	60×7-2,6,13	↑	94541km	2	R 320	440	V	80/70(H)
J-44	60×6-3,5,13	↑	52,576	4	F 60	472	U	—
				3	FA* 112	—	↑	—
J-45	↑	↑	34,720	5	↑	—	↑	—
J-46	60×7-2,6,14	↑	9,770	3	↑	—	↑	—
J-47	↑	↑	5,655	H1	F 50	—	U、V+き裂	0.21, 0.28
J-48	60×7-2,13	↑	12,720	H1	F 55	—	↑	0.22, 0.26
J-49	60×7-3,6,12-2	↑	15,000	2	FA* 112	455	U	0.06
J-50	70×8-3,13	↑	10,181	未折損	—	↑	↑	0.05
J-51	↑	↑	10,612	3	F 165	472	↑	0.09
J-52	70×8,7-2,11	ジ'カリツチ/ プライマ	10,690	3	F 150	↑	↑	0.05
				1	F 45	440	V+き裂	0.04(0.12)
J-53	↑	↑	11,253	1	F 95	472	↑	0.03(0.13)
J-54	↑	↑	10,306	3	F 45	440	U+き裂	0.11
J-55	60×6-2,7,12-2	プライマ	29,425	H1	センタ穴	425	U	0.04
J-56	60×7,6,13	↑	6041km	未折損	—	440	↑	0.11
J-57	60×6-2,7,12-2	↑	15,000	H2	センタ穴	455	↑	0.07
J-58	60×7,6,13	↑	40,000	未折損	—	472/440	↑	0.04/0.05
J-59	↑	↑	13,077	H2	R 426	455	U	0.04
J-60	50×7-2,13	↑	25,500	1	F 434	472	U+き裂	0.02
J-61	↑	↑	25,000	2	F 45	↑	V	0.08
				↑	F 310	455	U、V	0.06
J-62	↑	↑	8,800	1	センタ穴	440	U	0.03
J-63	70×8-3,13	↑	11,498	3	F 147	472	(V)	0.14

↑印:「上に同じ」を表す。* リーフNo.、最大応力 H: ヘルパバリーフ

面形状は市場回収品と同様にU型腐食孔、V型腐食孔さらに腐食孔底を起点としたき裂の発生等種々の形状が認められる。実車耐久試験は加速試験のため、走行時の応力条件が厳しく、市場回収品に比べて腐食孔深さが浅いにもかかわらず、き裂の発生が多くみられる。図6に走行距離と腐食孔深さとの関係を示す。走行距離が1万km付近に集中しており、また実車耐久試験条件は個々に異なるため、明確な相関は認められない。

3.3 市場—実車耐久試験—台上耐久試験の比較

(1) 折損リーフ、折損部位 市場、実車耐久試験での

(1) 腐食孔状況 (No. J-38)

(2) 腐食孔状況 (No. J-47)

(3) 腐食孔状況 (No. J-52)

(4) 腐食孔状況 (No. J-54)

図5 実車耐久回収重ね板ばねの折損部近傍の腐食孔の断面写真
(100倍の写真に最小メモリ1mmのスケールを添えた写真)

折損リーフ No., 折損位置の頻度分布を図7, 図8に示す。折損リーフは市場、実車共にNo. 2, No. 3リーフが最も多く、両方で50%を占める。折損部位は、市場ではセンタ穴から50mm以上の部位で全般にわたって折損しているが、実車耐久試験ではセンタ穴から50~150mmのクランプ部近傍の折損が多い。これは、実車耐久試験では腐食の進行に対し、疲労の加速の方が大きいいため、発生応力の高いクランプ部近傍の折損が多いと考えられる。

(2) 腐食孔形状 各社から提出されたデータより、市場での腐食孔の深さと幅の関係をプロットすると、図9の

図6 実車耐久走行距離と腐食孔深さとの関係

図7 折損リーフ No. の頻度分布

図8 折損部位 (センタ穴からの距離mm) の頻度分布

ようになり、比率はほぼ0.5である。この結果は、ばね論文集第29号で述べられている¹⁾ 腐食孔の幅と深さの関係と一致している。

一部のデータより、市場、実車耐久、台上耐久の損傷負荷形態とU型腐食孔、V型腐食孔、き裂の有無などの腐食孔形状の関係として、

(a) 市場未折損品の腐食孔形状はU型になっている。

(b) 市場折損品、台上耐久（腐食+耐久のサイクル試験）折損品ではV型またはV型腐食孔からのき裂発生が多く見られる。

(c) 市場で発生したき裂は閉口しているが、台上耐久では開口している。

等の特徴が見受けられた。しかし、各社から提出された腐食孔形状データを確認した結果からは一概にはいえないようである。すなわち、市場、実車耐久試験、台上耐久試験ともに腐食孔形状としては、比率は異なるものの、U型、V型および腐食孔+き裂がみられる。

したがって、腐食孔形状のU型、V型、腐食孔+き裂は腐食疲労過程のある時点の様相を見たものであり、それは腐食速度とき裂の伝ば速度の絡みにより時々刻々変化し、一義的に決まるものではないと考えられる。すなわち、き裂伝ば速度が腐食速度より小さければ図3(1)のように腐食孔のみが成長し、腐食孔が限界寸法を超えてき裂が発生しても、腐食の進行とき裂伝ば速度の絡みにより図3(2)のようにき裂のみが成長したり、図3(3)のようにき裂部が腐食されたりすると考えられる。

(3) 実車耐久試験、台上耐久試験後の残存寿命の比較

ばね論文集で発表されている台上腐食耐久試験法^{1), 2)} は、市場回収品の腐食孔深さ、形状を類似させることを目的としていたが、腐食孔の発生、成長過程は腐食速度とき裂伝ば速度の絡みにより非常に複雑であり、それを台上で加速再現させることは難しいと考えられる。

図10は、コイルばねの実車耐久後の残存寿命と台上腐食耐久後の残存寿命を比較したものである。実車塩害耐久

の残存寿命が2~3万回であるのに対し、台上腐食耐久20サイクルでの寿命は4~5万回である。ここで、台上耐久で30サイクル程度に腐食サイクルを増やし、残存寿命が2~3万回になれば、実車塩害耐久と同等の損傷状態になっているのではないかと考えられる。すなわち、市場あるいは実車耐久回収品の残存寿命と、台上にて腐食耐久試験を実施し、途中で打切った後、回収品と同一応力条件にて大気中で求めた残存寿命とが同寿命であれば、台上の損傷状態が市場あるいは実車耐久と同等であると判断できるものと考えられる。なおここで、残存寿命から評価できる損傷状態とは、残存耐久試験を開始する時点ですでに形成されているき裂の長さを意味している。

このように、大気中での残存耐久試験による残存寿命は、それまでに受けた力学条件、腐食条件によって生じたき裂を意味する損傷状態を反映したものであるということとは、逆に残存寿命はばねの腐食耐久性を評価する手がかりとなることを示唆している。

3.4 まとめ

市場及び実車耐久試験回収品で、腐食が原因で折損した重ね板ばねの腐食状況は、U型、V型および腐食孔+き裂の形態に分類された。これらは腐食疲労過程のある時点の様相を見たものであり、それは腐食速度とき裂の伝ば速度の絡みにより時々刻々変化し、一義的に決まるものではないと考えられた。

大気中での残存耐久試験による残存寿命は、それまでに受けた力学条件、腐食条件によって生じたき裂を意味する損傷状態を反映しており、残存寿命はばねの腐食耐久性を評価する手がかりとなることが示唆された。

4. 腐食耐久性の評価法の検討

4.1 腐食耐久性評価の新しい考え方

これまで、損傷状態として市場、実車に近い腐食孔を生成させる目的で腐食耐久試験が行われてきたが、市場における腐食条件や力学条件はさまざまであり、それらの状況

図9 市場での腐食孔の幅と深さとの関係

図10 コイルばねの実車耐久後の残存寿命と台上腐食後の残存寿命の比較

を台上で加速再現させることは非常に難しい。これは図11に示すように、ばねの腐食耐久特性を左右する要因が多岐にわたるためである。

したがって、腐食条件、力学条件を特定し、ばねの耐久性を比較しても、個々に現実に問題となる腐食条件、力学条件下でのばねの耐久性の評価にはならない可能性が大きい。むしろ、腐食条件、力学条件の設定は個々の問題に委ねるべき性格のものであるといえる。しかし、そのような中であっても、耐久性の評価に関する何らかの共通の認識が必要となる。

そこで、ばねの腐食耐久性を調べる方法として、図12に示すように、ある程度の腐食条件・力学条件のもとでの試験を実施した後、大気中で破壊までの残存耐久試験を行い、その結果である残存寿命より、既に存在していたき裂の長さを評価し、そのき裂長さの大小により腐食耐久性を評価する方法を検討した。

鉄鋼材料の疲労破壊過程は一般に図13にも見られるように、(a) き裂の発生過程、(b) 発生したき裂が後述するパリス則にしたがって安定して伝ばする過程、(c) ある時点から急激に成長して最終破断に至る過程、に大別される。各過程の疲労寿命に占める割合は、(c) の過程はほぼ無視できるが、(a) と (b) の過程のいずれが支配的かは、対象物の形状や、対象物のおかれる環境によって異なる。なお、このような疲労過程のうち、(b) のき裂伝ば過程の占める寿命は、(b) の過程開始時点のき裂長さ a_0 と終了時点のき裂長さ a_f 、及び応力拡大係数-き裂伝ば速度のき裂伝ば特性の関係式から評価することができる。

腐食環境下の疲労寿命となると、腐食孔の形成によってき裂の発生過程が促進されるか否か、あるいはき裂面における腐食生成物によってき裂の伝ば過程が抑制されるか否かなどに大きく依存する。しかし、伝ば過程の寿命を決める伝ば速度は、平均応力が高く、き裂先端が十分に開口した状態では、環境や材料自身の強度などの条件に対して、鈍感な性質を示すことが知られている³⁾。

腐食耐久寿命は、腐食孔形成を含むき裂の発生寿命及びき裂の伝ば寿命の合計である。腐食孔を含むき裂発生過程への影響因子は複雑であるとともに、その過程の損傷状態を定量的に捉えることは困難である。しかし、伝ば過程にあるき裂が存在する状態は、大気中での残存耐久試験により、き裂の長さとして損傷状態を捉えることができる。残存寿命で評価したき裂長さが相対的に小さければ、それまでに受けた腐食条件、力学条件に対して耐久性が優れていると判断することができる。

4.2 残存寿命によるき裂長さの評価

4.2.1 き裂伝ば速度とき裂伝ば寿命

図12 腐食耐久性評価の考え方

図13 腐食疲労損傷過程

図11 ばねの腐食耐久性を左右する要因

安定して伝ばする疲労き裂の1サイクル当りの伝ば速度 da/dn は、き裂先端の応力拡大係数範囲 ΔK に支配され、両者の関係はパリス則とよばれる式 (1) で表される。

$$da/dn = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

ここで、 ΔK は応力範囲 $\Delta\sigma$ 、き裂長さ a 、及びき裂形状に支配される係数 F に依存し

$$\Delta K = F\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

で表される。なお、式 (1) の成り立つ ΔK には範囲があり、ある値以下の ΔK ではき裂は伝ばしない。このような ΔK の値をき裂伝ばの下限界値 ΔK_{th} と呼んでいる。き裂伝ば特性の模式図を図 14 に示す。

いま図 13 において、残存耐久試験の繰返し数 n_o から n_f の間 ΔN ($n_f - n_o$) に、き裂は a_o から a_f の長さに成長したとすると、両者の関係は

$$\begin{aligned} \Delta N &= \int_{n_o}^{n_f} dn \\ &= \int_{a_o}^{a_f} \frac{1}{C\pi^{m/2}F^m} (\Delta\sigma)^{-m} a^{-m/2} da \\ &= \frac{2}{C\pi^{m/2}F^m(m-2)(\Delta\sigma)^m} \times \left(\frac{1}{a_o^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_f^{(m-2)/2}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

で表される。ここで、 F はき裂長さ a_o から a_f の間でき裂長さに依存しないと仮定している。 ΔN を残存寿命とし、最終段階のき裂長さ a_f を仮定することができるならば、残存耐久試験開始時のき裂長さ a_o は

$$a_o = \left\{ \frac{C\pi^{m/2}F^m(m-2)(\Delta\sigma)^m}{2} \Delta N + \frac{1}{a_f^{(m-2)/2}} \right\}^{2/(2-m)} \quad (4)$$

として、推定することができる。なお、仮定する a_f の値が多少異なっても評価される a_o への影響は小さいことがわかっている。

図 14 き裂伝ば特性の模式図

式 (1) における指数、係数の値は、応力比 0 の条件下でばね鋼について調べた小山ら⁴⁾の結果によると、平均的には、 ΔK の単位を $\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$ 、き裂伝ば速度 da/dn の単位を mm/cycle として、

$$m=3, C=10^{-10}$$

となっている。また、 ΔK_{th} の値は応力比などに依存するが、鋼種などによってはあまり変化しないといわれており、小山ら⁴⁾のまとめによると、応力比が 0 の場合、 $10\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$ の値が示されている。

4.2.2 き裂長さの評価

(1) 板ばねの場合 板ばねの場合を想定すると、曲げによる残存耐久試験により得られる残存寿命から、残存耐久試験開始時に存在していたき裂の深さ方向の長さを評価することができる。以下にその方法を示す。

(a) 仮定 板ばねを想定し、リーフにおけるき裂の状態を図 15 に示す。

応力形式とき裂形態：リーフの軸に直角な半楕円表面き裂に、片振り曲げ応力が作用

伝ば速度式： $da/dn = C(\Delta K)^m$

$$m=3, C=10^{-10}$$

き裂伝ば下限界値： $\Delta K_{th} = 10\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$

アスペクト比： $\mu = 0.5$ (a/b)

ポアソン比： $\nu = 0.3$

破断：き裂先端が板厚の 1/2 になったとき

応力拡大係数： $\Delta K = F\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$ ここで F は、有限板における半楕円表面き裂の曲げによる応力拡大係数の形状係数で、次式に示すように、アスペクト比及び板厚 t に対するき裂深さの比 $\lambda = a/t$ に依存する⁵⁾。

図 15 曲げを受けるリーフの表面き裂

$$F = 1.1359 - 0.3929\mu - 0.3440\mu^2 + 0.2613\mu^3 \\ + \lambda(-1.5184 + 0.4178\mu + 0.7846\mu^2 - 0.6329\mu^3) \\ + \lambda^2(4.3721 - 13.9152\mu + 16.2550\mu^2 - 6.4894\mu^3) \\ + \lambda^3(-3.9502 + 12.5334\mu - 14.6137\mu^2 + 5.8110\mu^3) \\ (\nu = 0.3, 0.125 \leq \mu \leq 1.0, \lambda \leq 0.6)$$

(b) 計算 計算の流れを図16に示す。

応力範囲 $\Delta\sigma$ (kgf/mm²), 板厚 t (mm), 残存寿命 ΔN を入力。

き裂長さ a_0 を仮定: 例えば $a_0 = 0.01$ mm

$$a_i = a_{i-1} + 0.01$$

$\lambda = (a_i + a_{i-1})/2t$ として F を計算。

き裂長さが a_{i-1} から a_i になるまでに要する繰返し数 N_i を式 (3) により計算。

a_i が $t/2$ になる前に $\Sigma N_i > \Delta N$ になったら, 仮定したき裂長さが小さすぎたことを意味するので, 計算を打ち切る。

き裂長さ a_0 を仮定し直す: 例えば $a_0 = 0.02$ mm (a_0 の仮定の工夫により結果を速く出すことができる。)

計算を繰り返す。

図16 評価き裂長さの計算の流れ

最初に $a_i > t/2$ となったときに, $\Sigma N_i > \Delta N$ になる場合の a_0 をき裂長さとする。

なお, き裂長さ a_0 に対する応力拡大係数 $\Delta K_{a0} = F\Delta\sigma\sqrt{\pi a_0}$ を計算し, $\Delta K_{a0} < \Delta K_{th}$ となるならば, この場合は図14の点線の領域すなわち ΔK_{th} 以下でも伝ばするとして a_0 を計算したことになる。この場合, 設定応力のもとでの ΔK_{th} に対応するき裂長さを a_p とすると, a_p 以降パリス則による伝ば寿命 N_p を求めることができる。 $\Delta N - N_p$ は a_p になるまでの過程の寿命 N_i となる。ただし, a_p は試験応力に依存した値になる。

(c) 解析例 表4に示す残存耐久試験の結果のうち, 破断位置の応力範囲がわかっている一部のデータに上記の手法を適用し, き裂長さを推定した。図17に腐食孔深さと評価き裂長さとの関係を示す。腐食孔深さは, 破断部近傍で観察された腐食孔の最大の深さを表す。残存耐久試験の破壊の起点となったき裂の長さは, その近傍で観察される腐食孔の最大深さと必ずしも一致するものではないが, 近い値にあるものと予想される。両者は良い対応関係にあり, き裂長さの推定方法が妥当なものであることを示している。

(2) コイルばねの場合 コイルばねの場合はかなり大胆な仮定のもとではあるが, コイルばねの残存耐久試験により得られる残存寿命から, 残存耐久試験開始時に存在していたき裂の深さ方向の長さを評価することができる。以下にその方法を示す。

(a) 仮定 応力形式とき裂形態: 丸棒の軸に直角な半楕円表面き裂に, セン断応力と同じ大きさの片振り曲げ応力が作用

伝ば速度式, き裂伝ば下限値, アスペクト比, ポアソン比: 板ばねの場合と同じ

破断: き裂先端が線径の1/5になったとき

応力拡大係数: $\Delta K = F\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$ ここで F は, 丸棒における半楕円表面き裂の曲げによる応力拡大係数の形状係数で,

図17 板ばねにおける残存耐久試験より求められる評価き裂長さと腐食孔深さとの関係

次式に示すように、アスペクト比 μ 、直径 d に対するき裂深さの比 $\lambda = a/d$ に依存する⁵⁾。

$$F = (1.122 - 0.230\mu - 0.901\mu^2 + 0.949\mu^3 - 0.280\mu^4) \\ \times (1.0 + 0.157 \times 2\lambda - 0.634 \times 4\lambda^2 + 4.590 \times 8\lambda^3 - 6.628 \times 16\lambda^4) \\ \times (1.121 - 1.199\lambda + 4.775\lambda^2 - 1.628\lambda^3 - 7.035\lambda^4 + 13.27\lambda^5) \\ / (1.12 - 0.231\lambda + 10.55\lambda^2 - 21.72\lambda^3 + 30.39\lambda^4)$$

(b) 計算 計算の流れは 図 16 に示す板ばねの場合と同じである。

応力範囲: $\Delta\sigma$ (kgf/mm²), 線径: d (mm), 残存寿命: ΔN を入力。

以下 F の計算, 破断条件以外は板ばねの場合と同じ。

(c) 解析例

「懸架ばねの腐食疲労試験法に関する研究」¹⁾ に記載のデータに適用した結果を 図 18 に示す。腐食孔深さと評価き裂長さの関係は良い対応関係にあり、き裂長さの推定方法が妥当なものであることを示している。

4.2.3 残存寿命と評価き裂長さとの関係

ここで、リーフ板厚あるいはコイル線径と応力範囲が決まると、残存寿命と評価き裂長さとは 1 対 1 に対応するので、予め両者の関係を求めておくことと便利である。図 19 に残存寿命と評価き裂長さの関係の 2, 3 の例を、リーフ板厚、線径、応力範囲をパラメータとして示す。

リーフ板厚を 8 mm とし、応力範囲を 5 水準に変えた結果を実線で示す。残存寿命が小さい領域で評価き裂長さが 4 mm に漸近する傾向にあるのは、破断条件を板厚の 1/2 としたためである。同じ評価き裂長さに対する残存寿命は、応力範囲が低い条件ほど長くなる。また、パリズ則にのっとり伝ばを開始する限界のき裂長さ a_p は、応力範囲が低いほど大きな値になる。したがって、残存耐久試験の応力条件の設定に際して、損傷がわずかで短いき裂しか存在しないと予想される場合は、試験時間の短縮を図るためと、存在するき裂を伝ば過程のき裂として評価するために、高応

図 18 コイルばねにおける残存耐久試験より求められる評価き裂長さと腐食孔深さとの関係

力の条件を選択することが必要である。

点線で示すリーフ板厚 12mm の結果との比較においては、き裂長さの長い領域では破断の設定条件を反映して両者異なるが、1 mm 以下のき裂に対しては両者は近い結果を与えている。

一点鎖線で示す線径 12mm のコイルばねの結果を板ばねの結果と直接比較することはできないが、評価き裂長さが短い領域では、リーフ板厚 12mm の結果に近くなる。

4.3 評価き裂長さの大小による腐食耐久性の評価

以上のように、残存耐久試験を行うまでに受けた損傷状態を、き裂長さという値で残存寿命より評価することができた。そこで図 12 にも見られるように、同じ腐食条件、力学条件のもとでの試験を実施した状態での評価き裂の大小を比較することによって、腐食耐久性の相対的な評価が可能と考えられる。

なお、同一の腐食・力学条件下で損傷を受けたばねの腐食耐久性を比較するとき、残存寿命の大小で比較することもできる。すなわち、残存寿命の長いばねの方が損傷を受けにくかったと判断することになる。しかし、破壊の位置が異なるような場合は、破壊の起点部に作用する実応力は異なるので、単に寿命の大小で損傷状態の比較できるのか疑問が残る。また、そこでの損傷の実体が何であるかは不明のままである。しかし、残存寿命から破壊のもととなったき裂長さを評価し、その評価き裂長さの大小を比較すれば、同一の腐食・力学環境下で受けた損傷を、き裂という損傷の実体で比較することができることになる。すなわち、比較する複数のばねにおいて、評価き裂長さが相対的に小さければ、そのばねは所定の腐食・疲労環境下で損傷を受

図 19 評価き裂長さと残存寿命との関係

け難かったということで、他のばねより腐食耐久性が優れていると判断することができる。

また、ここではき裂長さを推定するとき、き裂伝ば特性を仮定した。材質を変えてばねの腐食耐久性の改善を図ろう、あるいは、ショットピーニングなどの表面処理の条件を変えてばねの腐食耐久性の改善を図ろうとした場合などは、伝ば特性自身変わったり、残留応力の相違などにより、仮定したき裂伝ば特性を用いたのでは真のき裂が推定できないのではないかと懸念が残る。それは事実である。しかし、仮定したき裂伝ば特性を一つの「物差し」として用いるのであれば、そこで得られた評価き裂長さは、真のき裂の長さでなくても、その大小による相対的な比較は可能である。

例えば、き裂伝ば速度が遅くなる新しい材料をばねに適用し、従来のばねと比較する場合、当然新しいばねは伝ば過程に時間を要するため、残存寿命は長くなる。そこに、仮定した伝ば特性の「物差し」を用いて評価き裂長さを求めるとそれは短くなり、優れたばねと評価される。むしろ、「物差し」となるき裂伝ば特性を仮定して評価き裂の長さを求めることによって、その大小でばねの腐食耐久性の相対的な比較が可能となる。なお、ここで仮定したき裂伝ば特性は架空の特性ではなく、ばね鋼のデータを基礎にしたものであり⁴⁾、ばねの耐久性を評価する際の「物差し」としては妥当なものと考えられる。

そのほかにも、評価き裂長の大小による腐食耐久性を評価する方法にはいくつかの利点がある。例えば試験工数の削減や試験時間の短縮である。図20に試験形式として、腐食耐久試験後の大気中における残存耐久試験の種々の組合せを示す。なおこの図では、破断位置での応力範囲は同一である場合を想定している。例えば、腐食耐久試験を破断まで行わずに中断し、その後は大気中で連続して行える残存耐久試験より求められる評価き裂長さ a_0 で耐久性を評価することにする。応力範囲の条件が同じであると、既に述べたようにパリス則にのっとり伝ばを開始するき裂長さ a_0

になった後のき裂伝ば過程の寿命 N_p は腐食環境でも大気中でも大差ない。したがって、腐食環境下での試験はき裂が長くなるまで行う必要はないので、中断以降破断までに要していた腐食耐久試験の腐食関連の工数、試験時間の削減が図れる。なお、大気中での残存耐久試験の応力条件は腐食耐久試験の応力条件にそろえる必要はなく、大きくすることもできるので、この意味からも試験時間の短縮を図ることができる。しかし、評価き裂長さが、設定応力のもとでの ΔK_{th} に対応するき裂長さ a_p より小さい場合には、架空のき裂長さを求めたことになるので、その値を比較しても意味の無いこともあり、その場合は腐食耐久試験の条件をより厳しくするなどの配慮が必要である。

また別の観点からの利点としては、市場回収品などについて、残存耐久試験から評価き裂長さを求めることにより、市場での使用環境状況などの推定、検討が可能となることが挙げられる。

5. 台上腐食耐久試験

5.1 はじめに

残存耐久試験の残存寿命より求める評価き裂長の大小により、腐食耐久性の評価が可能かどうかを検証するため、表7に示す4件の事例について本評価法の適用を試みた。最初の3件はすでに結果が明白なもので、期待される評価結果が得られるかどうかを調べるものである。最後の1件は必ずしも結果は明白ではなく、本評価法を適用した場合にどのような評価結果になるかのケーススタディである。なお、以下の試験における試験片には、塗装処理はしていない。

5.2 試験内容と結果

5.2.1 事例1 (人工欠陥の大きさの相違)

(1) 目的 大きさの異なる人工欠陥を付けた試験片に対して大気中で寿命試験を行った場合、評価き裂長の大小が、欠陥の深さの大小と対応するかを確認する。

(2) 試験条件 供試材は硬さレベルをHV490としたSUP9鋼で、試験片の寸法は $60b \times 8t \times 220L$ である。試験片にはショットピーニング処理は施していない。

人工欠陥は、目標の深さを0.4mmと1mmにした2種類を用意した。浅い欠陥は、調質後、人工欠陥を付ける箇所をグラインダで研磨し、研磨面を薄く樹脂で被覆し、ビッカース硬さ計で圧痕を付けて小さな穴を明け、その穴を電解研磨で深くして作った。深い欠陥は、調質前に $\phi 1.1$

図20 腐食耐久試験後の残存耐久試験により求められる評価き裂長さ

表7 検証試験の主旨

事例	評価対象項目
1	人工欠陥の大きさの相違
2	腐食・力学条件の相違
3	ショットピーニングの有無の相違
4	硬さレベルの相違

mm のドリルで穴を明け、調質後さらに $\phi 3$ mm のドリルで角を落として作った。人工欠陥は 4 点曲げ内スパンの荷重点直下の板幅の中央に付けた。

疲労試験は図 21 に示すように、4 点曲げ試験で、大気中において繰返し速度 6.5 Hz のもとで行った。なお、内スパン長さ A を 50mm、外スパン長さ B を 170mm とした。試験片中央部に貼付したひずみゲージによって応力を測定し、所定の応力に対応するストロークを決めて、ストローク制御で試験した。応力条件は $65 \pm 30 \text{ kgf/mm}^2$ と $65 \pm 40 \text{ kgf/mm}^2$ とした。

(3) 結果 同じ深さの欠陥材では応力条件が厳しくなると、また同じ応力条件のもとでは人工欠陥の深さが深くなると疲労寿命は低下した。破面写真を図 22 に示す。目標とした人工欠陥からき裂は発生・伝ばし破断に至っていた。人工欠陥の深さと寿命から求められる評価き裂長さとの関係を図 23 に示す。プロットは必ずしも 45° の線上にはないが、欠陥の深い試料の方が評価き裂の長さは大きくなっている。したがって、評価き裂長さの大小が、欠陥の深さの大小と対応することが確認された。なお、図 23 には結果を応力条件別に記号を変えてプロットしているが、評価き裂長さの大小には試験応力条件の相違の影響は出ていない。

5.2.2 事例 2 (腐食・力学条件の相違)

(1) 目的 同一条件の試験片に対して異なる条件の腐食耐久試験を行った場合、評価き裂長さの大小が、異なる腐食条件、力学条件による損傷状態の相違と対応するかを確認する。

(2) 試験条件 供試材は硬さレベルを HV500 とした SUP6 鋼で、試験片の寸法は $70\text{b} \times 8\text{t} \times 550\text{L}$ である。試験片にはショットピーニング処理は施していない。

腐食耐久試験は、塩水浸漬 0.5 時間 (5% NaCl)、疲労試験 ($65 \pm 30 \text{ kgf/mm}^2$, 2.6 Hz, 3,000 回)、恒温槽放置 23 時間 (26°C, 湿度 95%, 無負荷) の 24 時間を 1 サイクルとし、10, 15, 20 サイクルの 3 条件を設定した。残存耐久試験は大気中で、応力条件 $65 \pm 30 \text{ kgf/mm}^2$ のもとで行った。腐食耐久試験中の疲労試験及び腐食耐久試験後の残存耐久試験は 4 点曲げ試験で、図 21 に示す内スパン A を 150mm、外スパン B を 500mm とした。試験の制御は事例 1 の場合と同じで、試験片中央部の応力が所定の応力になるストロー

図 21 4 点曲げ疲労試験方法

(1) $\sigma = 65 \pm 40 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f = 33, 170$

(2) $\sigma = 65 \pm 35 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f = 49, 880$

図 22 人工欠陥材の破面写真

図 23 人工欠陥深さ (測定値) と評価き裂長さとの関係

クを決めて、ストローク制御で試験した。

(3) 結果 破面のマクロ写真を図24の示す。腐食耐久試験により形成されたき裂は着色され、残存耐久試験で伝ばした領域と明瞭に区別できる。腐食耐久試験のサイクル数が増すと損傷が進み、き裂が長くなっている。このような損傷状態の相違が、残存寿命から求められる評価き裂長さと対応するのか調べてみる。図25に腐食サイクル数と評価き裂長さとの関係を示す。10, 15, 20サイクルと腐食条件、力学条件が厳しくなるにしたがい、評価き裂長さは長くなる。したがって、評価き裂長さの大小が、損傷状態の相違と対応することが確認された。なお図25には、破面上で観察された腐食耐久試験により形成されたき裂長さが合わせて示されているが、評価き裂長さとは必ずしも一致はしていない。

5.2.3 事例3 (ショットピーニングの有無の相違)

(1) 目的 ばね条件としてショットピーニング処理有り無しの試験片に対して、同一条件の腐食耐久試験を行っ

(1) 10サイクル、残存寿命=34,000

(2) 15サイクル、残存寿命=10,500

(3) 20サイクル、残存寿命=1,100

図24 ショットピーニング処理を施さない材料の腐食耐久試験後の残存耐久試験による破面の巨視的様相 (実物に最小メモリ0.5mmのスケールを添えた写真)

た場合、評価き裂長さの大小が、ショットピーニングの有無による損傷状態の相違と対応するかを確認する。

(2) 試験条件 供試材は硬さレベルをHB444としたSUP9鋼で、試験片寸法は70b×8t×550Lである。ショットピーニングによる表面圧縮残留応力は64.1kgf/mm²となった。

比較するショットピーニングを施していない試験片の結果としては、硬さレベルがほぼ同じである事例2の結果を流用することにする。したがって、ショットピーニング材の腐食耐久試験の条件及び試験方法は事例2の場合と同じとした。なお一部、腐食耐久試験を加えない疲労試験と、破断までの腐食耐久試験を行った。

また、腐食耐久試験の応力条件が65±30kgf/mm²ではなく、65±40kgf/mm²とした試験も行い、事例2の場合と同様、評価き裂長さの大小が、異なる腐食条件、力学条件による損傷状態の相違と対応するかを確認した。なお、この試験の試料寸法は70b×8t×220Lで、曲げ試験の内スパンを50mm、外スパンを170mmとした。

(3) 結果 破面のマクロ写真を図26の示す。図24に示すショットピーニングを施していない試験片の結果に比べ、同じサイクルの腐食耐久試験で受ける損傷すなわち形成されたき裂の長さは小さくなっている。

図27にショットピーニング処理の有無と評価き裂長さとの関係を示す。10, 15, 20サイクルの各環境・力学条件において、ショットピーニングを施した試験片の評価き裂長さは短くなる。したがって、評価き裂長さの大小が損傷状態の相違と対応することが確認された。この結果により、実施したショットピーニング処理により、当該腐食耐久環境下での腐食耐久性は向上したと判断することができる。

図28の横軸は残存耐久試験の残存寿命及び腐食耐久試験における疲労条件の繰返し数を含めた全寿命を表し、縦軸は残存寿命から求められる評価き裂長さ及び腐食耐久試験で形成されたき裂長さの実測値を表している。ここで、

図25 ショットピーニング処理を施さない材料の腐食耐久試験サイクル数と評価き裂長さとの関係

(1) 10サイクル、残存寿命=373,200

(2) 15サイクル、残存寿命=69,000

(3) 20サイクル、残存寿命=29,000

図26 ショットピーニング処理を施した材料の腐食耐久試験後の残存耐久試験による破面の巨視的様相（実物に最小メモリ0.5mmのスケールを添えた写真）

図27 ショットピーニング処理の有無と評価き裂長さとの関係

評価き裂長さは実線で、残存寿命は黒印、全寿命は白印で示してある。事例2ですでに述べたショットピーニング処理を施さない場合と同様、処理材でも腐食耐久試験のサイクル数が増え、腐食条件、力学条件が厳しくなるにしたがい、評価き裂長さは長くなり、評価き裂長さの大小が、損傷状態の相違と対応していることがわかる。

同図において、サイクル数が24、27とあるのは、破断まで腐食耐久試験を行った結果で、それぞれ25、28サイクル目の疲労条件下での寿命を残存寿命としてプロットしたものである。これらの結果を含め、全寿命についてみると、ショットピーニング処理材、未処理材ともある程度以上の大きさのき裂が形成されると、腐食耐久試験のサイクル数の大小に係わらず全寿命はほぼ一定になることがわかる。これは、図20においても述べたように、同じ応力条件のもとでは、パリス則に則り伝ばを開始するき裂長さ a_0 になった後のき裂伝ば過程の寿命 N_p は、腐食環境下でも大気中でも大差ないということを実験的に示したことになる。

また、ショットピーニング材で腐食耐久試験の応力条件を $65 \pm 30 \text{ kgf/mm}^2$ とした結果と、 $65 \pm 40 \text{ kgf/mm}^2$ のとした結果を比較すると、図29に示すように、10、15、20サイクルの各腐食耐久試験とも、力学条件が厳しくなると、評価き裂長さは長くなった。したがって、評価き裂長さの大小が、事例2の場合と同様、異なる力学条件による損傷状態の相違と対応することが確認された。

5.2.4 事例4（硬さレベルの相違）

(1) 目的 ばね条件として、熱処理により硬さレベルを変え、ショットピーニング処理を施した試験片に対して、同一条件の腐食耐久試験を行い、評価き裂長さの大小で、硬さレベルの高低による腐食耐久性の優劣が評価できるか検討する。

(2) 試験条件 供試材は事例3の場合と同じSUP9鋼で、硬さレベルをHB401と低くした。ショットピーニングによる表面圧縮残留応力は 52.0 kgf/mm^2 となった。したがって硬さレベルをHB444とした事例3の結果と比較するときは、単に硬さだけでなく、残留応力が変化していることや、以下に述べる試験片寸法が異なることにも留意しな

図28 残存寿命、全寿命と評価き裂長さ、実測き裂長さとの関係

ればならない。

腐食耐久試験の条件は事例3の場合と同様、事例2の条件と同じとした。腐食耐久試験の応力条件が $65 \pm 30 \text{ kgf/mm}^2$ の場合の試料寸法は $70 \text{ b} \times 8 \text{ t} \times 1200 \text{ L}$ で、曲げ試験の内スパンを 80 mm 、外スパンを 900 mm とした。また、応力条件 $65 \pm 40 \text{ kgf/mm}^2$ の試験の試料寸法は $70 \text{ b} \times 8 \text{ t} \times 600 \text{ L}$ で、曲げ試験の内スパンを 100 mm 、外スパンを 500 mm とした。

(3) 結果 硬さレベルの異なる材料に対する、各腐食耐久試験条件下の評価き裂長さの結果を図30に示す。 $\sigma = 65 \pm 40 \text{ kgf/mm}^2$ の場合、各腐食耐久試験のサイクルごとに比較すると、硬さの高い方が評価き裂長さは小さくなる。一方、 $\sigma = 65 \pm 30 \text{ kgf/mm}^2$ の場合は、逆に、硬さの低い方が評価き裂長さは小さい。したがってこの結果からは、熱処理により硬さレベルを変えると、 $\sigma = 65 \pm 40 \text{ kgf/mm}^2$ の場合は硬さの高い材料の方が、 $\sigma = 65 \pm 30 \text{ kgf/mm}^2$ の場合は硬さの低い材料の方が、当該腐食耐久環境下での腐食耐久性は優れていると判断される。

このように同じ材料に対しても、腐食耐久試験の応力条件などによって腐食耐久性の評価結果が異なる場合もある。このような結果をもたらす原因としては、先に述べたように、硬さレベルを変えたことに伴うショットピーニング処理による残留応力の相違や、試験片形状の相違などが考えられるが、その詳細な検討は本報告の範囲ではない。硬さレベルの影響など、個々の要因について厳密に明らかにするには、詳細な実験計画のもとでの試験が必要となるが、評価き裂の大小による腐食耐久性の評価は、関連した要因の影響を含めた、現実には即した総合的な判断を行う手がかりを与えるものとなる。

5.3 結果の総括

残存耐久試験の残存寿命より求められる評価き裂長さの大小により腐食耐久性の評価が可能かどうかを検証するた

め、表7に示す事例について試験、検討を行い以下の結果を得た。

(1) 寿命より求められる評価き裂長さの大小と人工欠陥深さの深い、浅いとは対応し、残存寿命から、残存耐久試験開始時に存在するき裂長さの大小を評価できることが確認された。

(2) 10, 15, 20 サイクルと腐食条件、力学条件が厳しくなるにしたがい、残存寿命より求められる評価き裂長さは長くなる。したがって、評価き裂長さにより、腐食・力学条件が変わることによる損傷状態の相違が評価できることが確認された。

(3) ショットピーニング有無の供試材において、ショットピーニング有りの方が残存寿命より求められる評価き裂長さは短くなる。したがって、評価き裂長さにより、ばね条件が変わることによる損傷状態の相違が評価できることが確認された。

(4) 硬さレベルの異なる材料の供試材に対しては、腐食耐久試験の応力条件によって、評価き裂長さの大小による腐食耐久性の優劣の判定結果が逆転することがあった。

以上の結果により、残存耐久試験により求められる評価き裂の大小の比較により、腐食耐久性の相対的な評価が可能ことが確認された。今後はさまざまなばね条件、腐食条件及び力学条件に適用を試みるとともに、相対的な評価だけでなく、寿命で何%の向上が図れたのか、強度で何%上昇が見込まれるのか、などの定量的評価法についても検討する必要がある。

なお、各事例の結果において、残存耐久試験から求められる評価き裂長さと、腐食耐久試験で形成されたき裂長さの実測、あるいは欠陥深さの関係を図31に示す。評価き

図29 腐食耐久試験における応力条件と評価き裂長さとの関係

図30 供試材の硬さレベルと評価き裂長さとの関係

裂長さとき裂長さの実測値はほぼ45°の傾きの線に乗っており、「物差し」として用いたき裂伝ば特性の表示式により評価したき裂長さは、ある程度実際のき裂長さを表現していることがわかる。しかし、ショットピーニング処理材の結果が、評価き裂長さが小さいときに45°の線に対して下側にきたり、人工欠陥試験片の結果が、45°の線に対して下側にくるのは、真のき裂長さを求めるときには考慮すべき要因のあることを示している。すなわち、前者の場合は、ショットピーニングによる圧縮残留応力により伝ば速度が遅くなり、残存耐久試験の残存寿命が長くなることを、また後者の場合は疲労寿命に人工欠陥からのき裂の発生過程が含まれことを、考慮しなければならない。

6. 台上腐食耐久試験方案の提案

以上の検討を踏まえ、以下にばねの台上腐食耐久性の評価方法として「ばねの腐食耐久性能の相対的評価方法」を提案する。

ばねの腐食耐久性能の相対的評価方法

1. 適用範囲

この方案は複数の種類の板ばねあるいはコイルばねについて、特定の腐食環境下での腐食耐久性能の相対的優劣を、残存寿命より求める評価き裂長さの大小によって評価する方法について規定する。

2. 評価手順

2.1 評価対象試料

腐食耐久性能向上のため、材質、熱処理、表面処理、形状、アッセンブルなどの条件をパラメータとして変えた板ばねあるいはコイルばねを対象とする。

図 31 評価き裂長さと実測欠陥長さ、実測き裂長さとの関係

2.2 腐食環境、疲労環境の設定と腐食耐久中断試験の実施

腐食環境、疲労環境の条件設定及び腐食耐久試験条件、試験中断条件については、当事者間の協議により決める。

評価対象試料について、それぞれ同一条件の腐食耐久中断試験を実施する。

同一ばねに対する繰返し数は3以上とし、具体的な数は当事者間の協議により決める。

2.3 残存耐久試験の条件設定と実施

腐食耐久試験後、大気中で連続して破断までの疲労試験を実施する。応力条件については当事者間の協議により決める。

2.4 腐食耐久中断試験により形成されるき裂長さの推定

残存耐久試験における破壊起点部に作用する応力範囲、残存寿命及び、板ばねリーフ板厚あるいはコイルばね線径を用い、腐食耐久中断試験により形成されたき裂長さを評価き裂長さとして計算により求める。

2.5 腐食耐久性能の相対的優劣の判定

評価対象試料の範囲において、腐食耐久中断試験後の残存寿命より求められる評価き裂長さの短いばねほど、腐食耐久性能が優れていると判定する。

3. 評価結果の報告

評価結果の報告には、次の事項について詳細な記録を付記することが望ましい。

- (1) ばねの諸元
- (2) 腐食環境条件
- (3) 疲労環境条件
- (4) 腐食耐久試験条件
- (5) 残存耐久試験条件
- (6) 残存耐久試験結果及び評価き裂長さの一覧表
- (7) 判定結果

4. 参 考

評価き裂長さ計算プログラムを参考として付表に示す。

7. あとがき

2年半にわたる委員会活動の成果として、腐食耐久性の評価の標準的な方案を提案することができた。今後はさまざまなばね条件、腐食条件及び力学条件に適用を試み、不備な点の改良を図るとともに、データを蓄積し、データベースを構築していくことが、耐久性、信頼性のより優れたばねの開発、高い安全性のもとでのばねの使用のために、肝要と思われる。

参 考 文 献

- 1) 菅野公一郎, ばね論文集, No. 25, (1980), 39.
- 2) 懸架ばね腐食疲労試験委員会, ばね論文集, No. 29, (1984), 115.
- 3) 西島 敏ほか, 金属材料技術研究所 研究報告集, No. 6, (1987), 197.
- 4) 小山 博ほか, ばね論文集, No. 29, (1984), 30.
- 5) Y. Murakami et. al.: Stress Intensity Handbook, Vol. 2, (1987) Pergamon Press.

付表 評価き裂長さの計算プログラム

```

1000  ' ***** 評価き裂長さの計算プログラム *****
1010  ' *      懸架ばねの腐食調査委員会      *
1020  ' *      1994/11/17  VER.1      *
1030  ' *****
1040  CLS
1050  LOCATE 10,2:PRINT "***** 評価き裂長さの計算 *****"
1060  LOCATE 10,3:PRINT "試験番号      : "
1070  LOCATE 10,4:PRINT "ばねの種類      :      (1:板ばね , 2:コイルばね)"
1080  LOCATE 10,5:PRINT "応力範囲      :      (kgf/mm2)"
1090  LOCATE 10,6:PRINT "残存寿命      :      (cycles)"
1100  LOCATE 10,7:PRINT "板厚 (mm)      : "
1110  LOCATE 10,8:PRINT "線径 (mm)      : "
1120  LOCATE 22,3 :INPUT TPNOS$
1130  LOCATE 22,4 :INPUT TYPE : "TYPE 板ばね :1, コイルばね :2"
1140  LOCATE 22,5 :INPUT S: "応力範囲 (kgf/mm2)"
1150  LOCATE 22,6 :INPUT N: "残存寿命 (cycles)"
1160  IF TYPE = 2 THEN LOCATE 22,8 :INPUT T : "線径 (mm)"
1170  IF TYPE <> 2 THEN LOCATE 22,7 :INPUT T : "板厚 (mm)"
1180  LOCATE 10,10 :INPUT "フリッターへ出力しますか(Y/N)":OUT1$
1190  OUT2=0
1200  IF OUT1$="Y" OR OUT1$="y" THEN OUT2=1
1210  ' 入力条件の表示
1220  STR1$="板ばね":IF TYPE =2 THEN STR1$="コイルばね"
1230  STR2$="板厚":IF TYPE =2 THEN STR2$="線径"
1240  GOSUB *PRN1
1250  IF OUT2=1 THEN GOSUB *LPRN1
1260  ' 主要な変数の初期設定
1270  LIMIT =.5 : IF TYPE =2 THEN LIMIT =.2
1280  U=.5
1290  M=3
1300  C=1E-10
1310  DKTH=10
1320  A0=0
1330  PICH=6.25
1340  ' F, NI, NT の計算
1350  FOR I=1 TO 5
1360  PICH=.2*PICH
1370  ' 繰返し計算 -1
1380  A0=A0+PICH
1390  A1=A0-.01
1400  NT=0
1410  ' 繰返し計算 -2
1420  A1=A1+.01
1430  A2=A1+.01
1440  R0=A1/T
1450  ' き裂進展長さと破壊仮定条件の比較
1460  IF R0 > LIMIT THEN GOTO 1570
1470  '
1480  R=(A1+A2)/(2*T)
1490  IF TYPE=2 THEN GOSUB *KEISUU2 ELSE GOSUB *KEISUU1
1500  N1=2*(A1^(1-(M/2))-A2^(1-(M/2)))/(C*(M-2)*((1.77*F*S)^M))
1510  NT=NT+N1
1520  IF NT<N GOTO 1420
1530  PRINT "      I=";I;"      A0=";A0;"      AF=";A1;"      NT=";NT
1540  IF OUT2=1 THEN LPRINT "      I=";I;"      A0=";A0;"      AF=";A1;"      NT=";NT
1550  GOTO 1380
1560  '
1570  PRINT "      I=";I;"      A0=";A0;"      AF=";A1;"      NT=";NT
1580  IF OUT2=1 THEN LPRINT "      I=";I;"      A0=";A0;"      AF=";A1;"      NT=";NT
1590  A0=A0-PICH
1600  NEXT I
1610  A0=A0+PICH
1620  R=A0/T
1630  IF TYPE=2 THEN GOSUB *KEISUU2 ELSE GOSUB *KEISUU1
1640  DK0=F*S*(3.14*A0)^.5
1650  IF DK0>DKTH THEN GOSUB *SUCES1 : END

```

```

1660 ' 伝ば開始までの寿命の計算
1670 PRINT "      評価き裂長さ(A0) = ";A0;" (mm)"
1680 IF OUT2=1 THEN LPRINT "      評価き裂長さ(A0) = ";A0;" (mm)"
1690 FOR J=1 TO 10000
1700 A0=A0+.001
1710 R=A0/T
1720 IF TYPE=2 THEN GOSUB *KEISUU2 ELSE GOSUB *KEISUU1
1730 DK1=F*S*(3.14*A0)^.5
1740 IF DK1>DKTH GOTO 1760
1750 NEXT J
1760 PRINT "      伝ば開始き裂長さ(AP) = ";A0;" (mm)"
1770 IF OUT2=1 THEN LPRINT "      伝ば開始き裂長さ(AP) = ";A0;" (mm)"
1780 A1=A0-.01
1790 NP=0
1800 A1=A1+.01
1810 A2=A1+.01
1820 RO=A1/T
1830 IF RO> LIMIT THEN GOSUB *SUCES2 : END
1840 R=(A1+A2)/(2*T)
1850 IF TYPE=2 THEN GOSUB *KEISUU2 ELSE GOSUB *KEISUU1
1860 N1=2*(A1^(1-(M/2))-A2^(1-(M/2)))/(C*(M-2)*((1.77*F*S)^M))
1870 NP=NP+N1
1880 GOTO 1800
1890 END
1900 ' サブルーチン
1910 *KEISUU1
1920 F=1.135-.3929*U-.344*U^2+.2613*U^3+R*(-1.5184+.4178*U+.7846*U^2-.6329*U^3)+
R*R*(4.3721-13.9152*U+16.255*U^2-6.4894*U^3)+R*R*R*(-3.9502+12.5334*U-14.6137*U^
2+5.811*U^3)
1930 RETURN
1940 *KEISUU2
1950 F=(1.122-.23*U-.901*U^2+.949*U^3-.28*U^4)*(1+.157*2*R-.634*4*R^2+4.59*8*R^
3-6.628*16*R^4)*(1.121-1.199*R+4.775*R^2-1.628*R^3-7.035*R^4+13.27*R^5)/(1.12-.2
31*R+10.55*R^2-21.72*R^3+30.39*R^4)
1960 RETURN
1970 *PRN1
1980 PRINT " "
1990 PRINT "**** 評価き裂長さの計算 ****"
2000 PRINT "      試験番号 = ";TPNOS
2010 PRINT "      ばね種類 = ";STR1$
2020 PRINT "      ";STR2$;" = ";T;" (mm)"
2030 PRINT "      応力範囲 = ";S;" (kgf/mm^2)"
2040 PRINT "      残存寿命 = ";N;" (cycles)"
2050 RETURN
2060 *SUCES1
2070 PRINT "      評価き裂長さ(A0) = ";A0;" (mm)"
2080 PRINT "      残存寿命(N) = ";N;"      伝ば過程の寿命(NP) = ";N
2090 IF OUT2=1 THEN LPRINT "      評価き裂長さ(A0) = ";A0;" (mm)"
2100 IF OUT2=1 THEN LPRINT "      残存寿命(N) = ";N;"      伝ば過程の寿命(NP) =
";N
2110 RETURN
2120 *SUCES2
2130 N1 = N - NP
2140 PRINT "      残存寿命(N) = ";N
2150 PRINT "      伝ば開始までの寿命(NI) = ";N1;"      伝ば過程の寿命(NP) = ";NP
2160 IF OUT2=1 THEN LPRINT "      残存寿命(N) = ";N
2170 IF OUT2=1 THEN LPRINT "      伝ば開始までの寿命(NI) = ";N1;"      伝ば過程の
寿命(NP) = ";NP
2180 RETURN
2190 *LPRN1
2200 LPRINT " "
2210 LPRINT "**** 評価き裂長さの計算 ****"
2220 LPRINT "      試験番号 = ";TPNOS
2230 LPRINT "      ばね種類 = ";STR1$
2240 LPRINT "      ";STR2$;" = ";T;" (mm)"
2250 LPRINT "      応力範囲 = ";S;" (kgf/mm^2)"
2260 LPRINT "      残存寿命 = ";N;" (cycles)"
2270 RETURN

```