

2・6 接着と他の接合との併用による異材接合部の特性

原賀 康介 高 隆夫 竹野 親二 松田 秀行
 (三菱電機(株)) (住友金属工業(株)) (スカイアルミニウム(株)) (横浜ゴム(株))
 上杉 康治 大迫 修二 大栗 靖弘
 (川崎製鉄(株)) (マツダ(株)) (サンスター技研(株))

Properties of Aluminum/Steel Joints by Various Joining Methods.

Kosuke Haraga Takao Taka Shinji Takeno
 (Mitsubishi Electric Corp.) (Sumitomo Metal Industries, Ltd.) (Sky Aluminium Co., Ltd.)
 Hideyuki Matsuda Yasuji Uesugi Shuji Osako Yasuhiro Okuri
 (Yokohama Rubber Co.) (Kawasaki Steel Corp.) (Mazda Motor Corp.) (Sunstar Eng. Inc.)

Key Words : Adhesive Material, Bonding, Welding, / Ribet, Mechanical-clinching, Weldbonding,

1. はじめに

自動車ボデーの軽量化にはアルミ合金板(以下アルミ)の採用が有力な手段であるが、その際、冷延鋼板(以下鋼板)とアルミとの異種材接合が大きな課題である。そこで、WG-2ではアルミ/鋼板の異種材接合について接着接合を中心に種々の検討を行っている。接着接合における重要な課題の一つに接着剤が硬化するまでの仮固定の方法がある。また、鋼板とアルミとの異種材接合には接着以外にも種々の方法があり、接着接合の特性を接着以外の方法と比較して位置付けを明確にすることも重要である。

そこで、小WG-Dでは、異種材接合法として、①接着、②リベット、③メカニカルクリンチング(TOX法)、④スポット溶接を比較し、接着接合の位置付けを明確にするとともに、接着接合の仮固定として②③④の方法を併用した場合の接合特性について検討した。

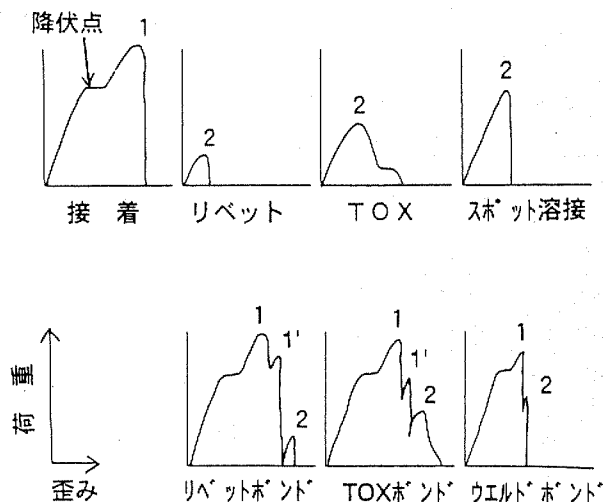


図1. 各種の引張りせん断試験体の荷重-歪み曲線

2. 供試材料及び実験方法

プログラムNo.2・2「異材接着試験体の作製方法と試験方法について」を参照。なお、接着とリベットの併用を以下リベットボンド、接着とメカニカルクリンチング(TOX法)の併用をTOXボンド、接着とスポット溶接の併用をウェルドボンドと呼ぶ。

3. 実験結果と考察

3.1. 初期引張りせん断強さ特性

(1) 荷重-歪み曲線: 図1に、4種類の単独接合(接着、リベット、TOX、スポット溶接)と3種類の併用接合(リベットボンド、TOXボンド、ウェルドボンド)の引張りせん断試験における荷重-歪み曲線を示した。図1及び引張りせん断試験時の観察より次のことがわかる。
 ①約6kN(150MPa)に降伏点が見られる。これは、アルミの降伏点である

表1. 初期引張りせん断強さ(単位:N、n=5)
 上段は平均値、下段()は最小値~最大値

接合法		No.1ヒ°-ク	No.1'ヒ°-ク	No.2ヒ°-ク
単 独 接 合	接 着	8 4 5 5 (8355~8561)	な し	-----
	リベット	-----	-----	8 3 6 (814~ 853)
	TOX	-----	-----	3 3 6 8 (3158~3550)
	スポット溶接	-----	-----	4 2 1 9 (3874~4570)
併 用 接 合	リベットボンド	8 2 3 2 (8100~8355)	7 0 6 5 (6973~7149)	7 8 8 (716~ 824)
	TOXボンド	7 7 7 7 (7512~7949)	5 9 5 5 (5825~6051)	3 6 0 3 (3540~3648)
	ウェルドボンド	6 6 1 2 (5776~7806)	不 明	(不明3ヶ~ 3991)

②単独接合ではピークは1ヶしか見られないが、併用接合の場合は2～3ヶのピークが見られる。図1中に「1」と記したピーク（以下No.1ピークと呼ぶ）はアルミ側のラップ端での接着部の破壊によるピーク、「1'」と記したピーク（以下No.1'ピークと呼ぶ）は鋼板側のラップ端での接着部の破壊によるピーク、「2」と記したピーク（以下No.2ピークと呼ぶ）はリベット、TOX、スポット溶接部の破壊によるピークである。

(2) 引張りせん断強さと破壊形態： 図1の各破断ピークにおける引張りせん断強さを表1に示した。また、接着単独及び併用接合の破壊形態を図2に示した。これらの結果より次のことがわかる。

①単独接合の引張りせん断強さは、

「接着>スポット溶接>TOX>リベット」

の順で、接着が最も高い強さを示す。破壊形態は、接着単独ではアルミ側での薄層凝集破壊(T.F.) (約85%)と完全凝集破壊(C.F.)であり欠陥部は見られない。リベット、スポット溶接はシアー破壊で、スポット溶接ではアルミのチリが非常に多く発生している。TOXは、鋼板に穴があくプラグ破壊である。

②併用接合における接着ラップ端での破壊強さ (No.1ピーク強さ) を接着単独と比較すると、

「接着>リベット>TOX>ウェルド」

の順で、いずれの併用接合も接着単独にくらべて強さが低下している。破壊形態を見ると、図2に示すように、ウェルドボンドでは非常に多くの欠陥部が見られ、TOXボンドでも欠陥が見られる。リベットボンドでは欠陥はほとんど見られない。ウェルドボンドにおける欠陥は、アルミのチリによる接着剤の飛散や焦げによるものと、シートセパレーションによる接着剤のひけによるものと考えられる。TOXボンドにおける欠陥は、接合過程で一旦生じるシートセパレーションによる接着剤のひけによるものと考えられる。併用接合におけるNo.1ピーク強さの順位は、単独

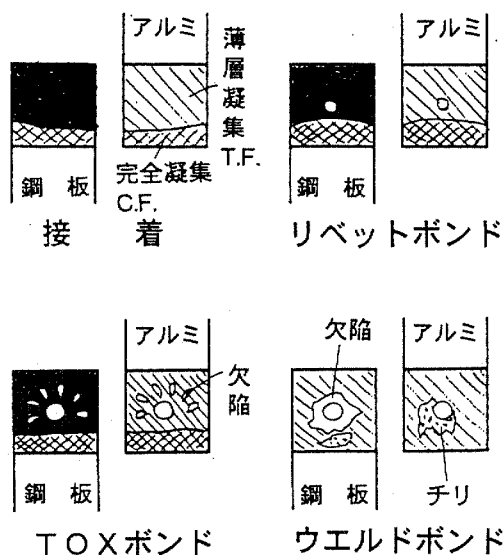


図2. 接着単独及び併用接合の破壊形態

接合における強さの順位「スポット溶接>TOX>リベット」とは逆であり、欠陥部の大きさの順位と同じになっていることから、併用接合におけるNo.1ピーク強さの低下は、欠陥の発生による接着面積の減少によるものと考えられる。

③アルミ/鋼板のスポット溶接及びウェルドボンドにおいては、ナゲットが生成しかつチリの発生が少ない電流範囲が非常に狭いため、それぞれに適切な電流値で試験体の作製を行ったが、ウェルドボンドにおいては接着剤のないスポット溶接単独の場合に比べて生成するナゲットが小さくなっている。また、表1に示すように、No.2ピークが不明である試験体が5個中3個あることから、ウェルドボンドにおけるスポット溶接部の強さは、スポット溶接単独の場合より低く、ばらつきが大きいものと考えられる。

表2. 複合サイクル試験における引張りせん断強さ (N) の経時変化

() 内は保持率 (%)

接合方法	ピークの種類	経時日数						
		初期	20日 (60サイクル)	40日 (120サイクル)	60日 (180サイクル)	80日 (240サイクル)	100日 (300サイクル)	
単独接合	接着	No. 1	8455	8169 (97)	7770 (92)	7603 (90)	7505 (89)	7270 (86)
	リベット	No. 2	836	873 (104)	896 (107)	961 (115)	866 (104)	848 (101)
	TOX	No. 2	3368	4250 (126)	4243 (126)	4142 (123)	4112 (122)	3972 (118)
	スポット溶接	No. 2	4219	3034 (72)	2061 (49)	1924 (46)	0 (0)	224 (5)
併用接合	リベットボンド	No. 1	8232	7734 (94)	7613 (92)	7456 (91)	6146 (75)	6463 (79)
		No. 2	788	不明	不明	不明	不明	不明
	TOXボンド	No. 1	7777	7208 (93)	6508 (84)	5789 (74)	不明	不明
		No. 2	3603	3560 (99)	3632 (101)	3704 (103)	3655 (101)	3540 (98)
ウェルドボンド	(注1)	6612	5595 (85)	2375 (36)	239 (4)	0 (0)	0 (0)	

(注1) ウェルドボンドはNo.1ピークとNo.2ピークの区分が困難なため最大ピークで一括表示した

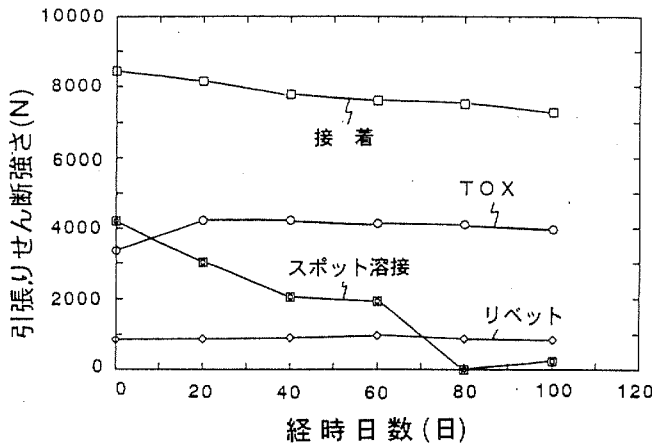


図3. 複合サイクル試験における単独接合試験体の引張りせん断強さの経時変化

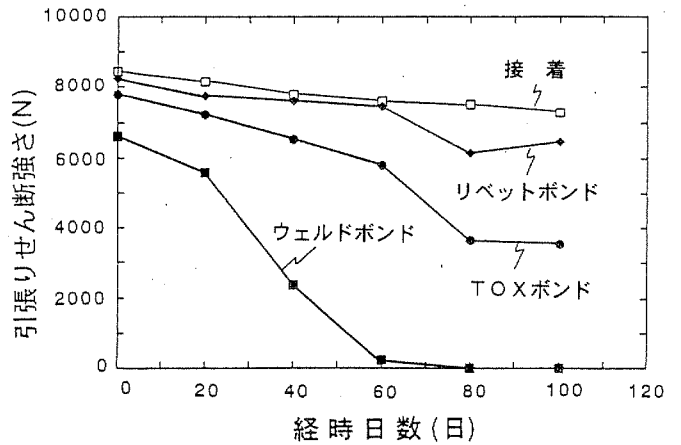


図4. 複合サイクル試験における併用接合試験体の引張りせん断強さの経時変化

3. 2. 複合サイクル試験

表2に、複合サイクル試験における、各接合のNo.1ピーク及びNo.2ピークの引張りせん断強さと保持率を示した。なお、ウェルドボンドについてはNo.1ピークとNo.2ピークの区分が困難なため最大ピーク強さで一括表示した。また、図3には各単独接合試験体の、図4には各併用接合試験体の引張りせん断強さの経時変化を示した。図4の引張りせん断強さはNo.1ピークとNo.2ピークのいずれか高い方の強さで示している。これら結果と破壊面の観察より次のことがわかる。

(1) リベット、TOX、スポット溶接の場合：

- ①リベット、TOXでは100日(300サイクル)後もせん断強さの低下は見られないが、スポット溶接の場合は急激にせん断強さが低下し、80日(240サイクル)後には腐食破断により強さが0となっている。
- ②リベット、TOX及びスポット溶接の場合は、60日(180サイクル)までのアルミ面には激しい腐食(白錆発生)

が認められるが鋼板面には赤錆の発生は見られない。これは、鋼板とアルミの接触により、アルミがアノード、鋼板がカソードとなって、鋼板面は電気(ガルバニック)防食されているためと考えられる。80日(240サイクル)以後の腐食破断した後のスポット溶接試験体では、錆により絶縁状態となるため鋼板の腐食(赤錆発生)が見られる。

③スポット溶接におけるせん断強さの低下の原因は、現時点では不明であるが、アルミ・鉄合金層の腐食促進によることも考えられる。

(2) 接着の場合：

- ①接着強さは経時的に徐々に低下し、100日(300サイクル)後で約14%の低下を示している。
- ②破壊形態は、暴露前には凝集破壊であるが、劣化の進行とともに接着部の周辺から鋼板面での界面破壊に変化し、経時的に拡大している。また、鋼板の界面破壊部には赤錆の発生はほとんど見られず、接着部の近傍にアルミの白錆の発生が認められ、この点から異種金属接触腐食状態下に

表3. ヒートサイクル試験における引張りせん断強さ(N)の経時変化

()内は保持率(%)

接合方法	ピークの種類	経時日数					
		初期	20日 (10サイクル)	40日 (20サイクル)	60日 (30サイクル)	80日 (40サイクル)	100日 (50サイクル)
単独接合	接 着 No.1	8455	7799 (92)	7397 (87)	7828 (93)	6357 (75)	4140 (49)
	リベット No.2	836	804 (96)	814 (97)	844 (101)	844 (101)	834 (100)
	TOX No.2	3368	3924 (117)	3649 (108)	4552 (135)	4228 (126)	4218 (125)
	スポット溶接 No.2	4219	3806 (90)	3649 (86)	4218 (100)	4081 (97)	3914 (93)
併用接合	リベットボンド No.1	8232	7485 (91)	7308 (89)	7564 (92)	5837 (71)	不明
	リベットボンド No.2	788	不明	不明	不明	不明	853 (108)
	TOXボンド No.1	7777	7034 (90)	6445 (83)	6759 (87)	不明	不明
	TOXボンド No.2	3603	3738 (104)	3620 (100)	3679 (102)	3581 (99)	3640 (101)
ウェルドボンド	(注2)	6612	4787 (72)	4052 (61)	3394 (51)	1079 (16)	1079 (16)

(注2) ウェルドボンドはNo.1ピークとNo.2ピークの区分が困難なため最大ピークで一括表示した

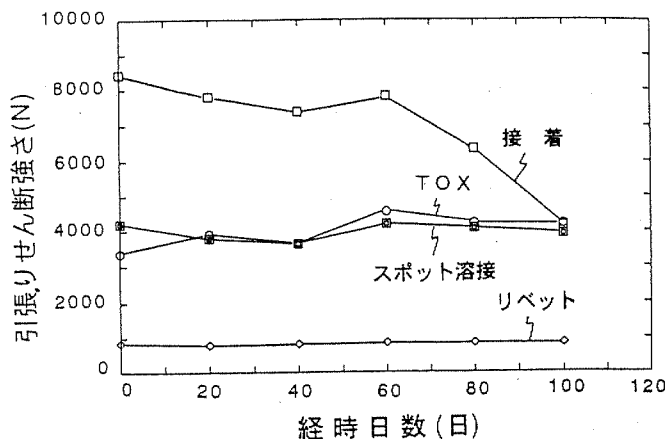


図5. ヒートサイクル試験における単独接合試験体の引張りせん断強さの経時変化

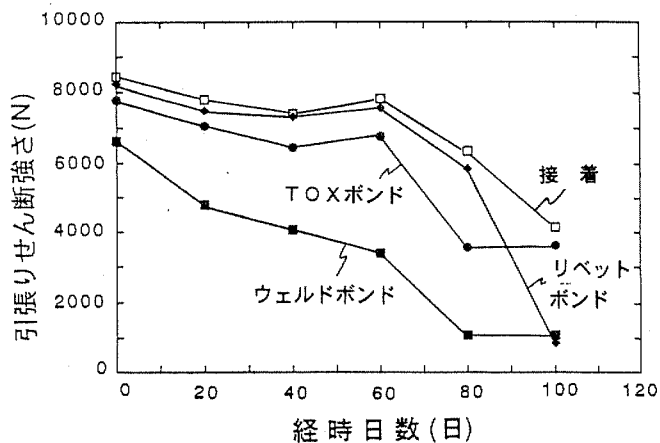


図6. ヒートサイクル試験における併用接合試験体の引張りせん断強さの経時変化

あるものと考えられる。なお、本実験の接着試験体では接着剤厚さのコントロールのためのガラスペースは添加していないため、薄い接着剤を通しての通電や局部的金属接触の可能性があるものと思われる。

③鋼板界面での離れの原因としては、異種金属接触腐食(電食)により鋼板は弱い陰極防食下にあるため、発生した OH^- が鋼板/接着剤界面にアタックし結合を破壊するいわゆる陰極はく離機構¹²⁾によることが考えられる。

(3) 併用接合の場合：

①No.1ピーク強さ(接着部の強さ)の劣化の程度は、

「ウェルドボンド」>「TOXボンド」>「リベットボンド」≧「接着」

の順で、ウェルドボンドが最も劣化が大きく、リベットボンドは接着単独よりわずかに劣化が大きい程度である。ウェルドボンドの場合は80日(240サイクル)後には全数腐食破断しせん断強さが0となっている。

②No.2ピーク強さ(リベット、TOX、スポット溶接部の強さ)は、TOXボンドの場合は100日(300サイクル)後でも強さの低下は見られないが、ウェルドボンドの場合は80日(240サイクル)後には全数腐食破断し強さが0となっている。

③いずれの併用接合の場合も、接着部の破壊形態の変化は基本的には接着単独の場合と同様で、鋼板面での界面破壊への移行である。ただし、ここでも鋼板に赤錆の発生は見られないことから、異種金属接触腐食状態下での陰極はく離による劣化が考えられる。

④ウェルドボンド、TOXボンド、リベットボンドにおける劣化の程度の違いは、初期状態での接着部の欠陥の発生量と対応しているものと考えられ、欠陥部が多いほど接着部に塩水が侵入しやすいため劣化しやすいと考えられる。

3.3. ヒートサイクル試験

表3に、ヒートサイクル試験における、各接合のNo.1ピーク及びNo.2ピークのせん断強さと保持率を示した。

なお、ウェルドボンドについてはNo.1ピークとNo.2ピークの区分が困難なため最大ピーク値で一括表示した。また、図5には各単独接合試験体の、図6には各併用接合試験体のせん断強さの経時変化を示した。図6のせん断強さはNo.1ピークとNo.2ピークのいずれか高い方の強さで示している。これら結果と破壊面の観察より次のことがわかる

(1) リベット、TOX、スポット溶接の場合：

①リベット、TOXでは、複合サイクル試験と同様に、100日(50サイクル)後でも強さの低下は見られない。スポット溶接においては、複合サイクル試験で見られた急激な強さの低下は見られず、100日(50サイクル)後でも強さの低下はほとんど見られない。

②いずれも、複合サイクル試験の場合と同様に、アルミ面には腐食(白錆発生)が認められるが鋼板面には赤錆の発生は見られない。これは、鋼板とアルミの接触により、アルミがアノード、鋼板がカソードとなって、鋼板面は電気(ガルバニック)防食されているためと考えられる。

(2) 接着の場合：

①接着強さの低下は複合サイクル試験の場合より大きく、60日(30サイクル)以後に急激に低下し、100日(50サイクル)後にはせん断強さが約1/2に低下している。

②破壊形態の変化は、複合サイクル試験の場合と同様で、劣化の進行とともに接着部の周辺から鋼板面での界面破壊に変化し、経時的に拡大している。また、鋼板の界面破壊部には赤錆の発生はほとんど見られず、接着部の近傍に白錆の発生が認められる。

③鋼板界面での離れの原因としては、複合サイクル試験の場合と同様に、陰極はく離機構によることが考えられる。

(3) 併用接合の場合：

①No.1ピーク強さ(接着部の強さ)の劣化の程度は、複合サイクル試験の場合と同様に、

「ウェルドボンド」>「TOXボンド」>「リベットボンド」≧「接着」

の順で、ウェルドボンドが最も劣化が大きい。複合サイクル試験と比べると、ウェルドボンドの場合は劣化が少なく、TOXボンドの場合はほぼ同等で、リベットボンドの場合は80日(40サイクル)までは同等であるが、100日(50サイクル)後ではヒートサイクル試験ではピークが不明となり、高く見積もっても保持率10%以下に低下しており、複合サイクル試験より強さの低下が非常に大きい。

②No.2ピーク強さは、TOXボンド、リベットボンドでは100日(50サイクル)後でも低下は見られない。ウェルドボンドの場合は、複合サイクル試験で見られた腐食破断は全く見られない。

③いずれの併用接合の場合も、接着部の破壊形態の変化は基本的には接着単独の場合と同様で、鋼板面での界面破壊への移行である。ただしここでも鋼板に赤錆の発生は見られないことから、異種金属接触腐食状態下での陰極はく離による劣化が考えられる。

3.4. 疲れ試験

図7に荷重範囲 ΔL と破断繰返し数の関係を示した。この結果より、疲れ強さは

「接着 \geq リベット $>$ TOXボンド $>$ ウェルドボンド $>$ TOX $>$ リベット」

の順となっていることがわかる。この順位は、静的引張りせん断試験の強さの順位と同様で、併用接合はそれぞれの単独接合と接着の中間の疲れ強さを示している。

4. まとめ

(1) 初期状態における各接合方法の最大ピークの引張りせん断強さは、「接着 $>$ リベットボンド $>$ TOXボンド $>$

ウェルドボンド $>$ スポット溶接 $>$ TOX $>$ リベット」の順で、併用接合におけるせん断強さは接着単独より低下している。これは、接着部に生じた欠陥のため接着面積が減少したことによるものと考えられる。欠陥の量は「ウェルドボンド $>$ TOXボンド $>$ リベットボンド」でウェルドボンドが最も多い。

(2) 腐食環境下での引張りせん断強さの劣化の程度は、「ウェルドボンド $>$ TOXボンド $>$ リベットボンド \geq 接着 $>$ リベット、TOX」の順に大きく、併用接合の耐環境性は接着単独より劣っている。併用接合における劣化の程度の違いは、接着部の欠陥の量と対応しているものと考えられ、欠陥部が多いほど接着部に塩水や水分が侵入しやすいため劣化しやすいと考えられる。

(3) いずれの接合方法においても、劣化時には破壊形態に変化が観察され、凝集破壊から鋼板面での界面破壊へと移る。その界面には異種金属接触腐食が観察された。鋼板に赤錆の発生は見られず、異種金属接触腐食状態下での陰極はく離による劣化が考えられる。

(4) 疲れ強さは、「接着 $>$ リベットボンド $>$ TOXボンド $>$ ウェルドボンド $>$ TOX $>$ リベット」の順に優れており、併用接合の疲れ強さは、それぞれの単独接合と接着の中間の強さを示し、静的引張りせん断強さの順位と一致している。

(5) 複合サイクル試験において、スポット溶接部自体の劣化が見られたが、原因は現時点でははっきりしない。今後の検討が必要である。

本研究のTOX及びTOXボンドの試験体の作製についてご協力をいただいた(株)エナミ精機の仲 克氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 水流 徹、浅利満頼、春山志郎；金属表面技術、**39**(1)2(1988)。
- 2) 佐藤忠明；塗料の研究、(117)51(1989)。

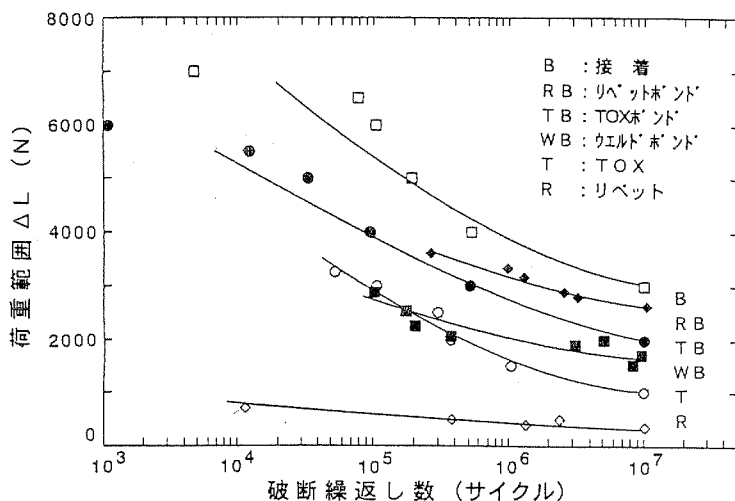


図7. 疲れ試験における荷重範囲 ΔL と破断繰返し数の関係