

# 接着における品質作り込みの条件

(株)原賀接着技術コンサルタント 原賀康介

## 1. はじめに

「高品質な接着」には、「壊れない（信頼性に優れている）」ということと、「特性のばらつきが小さい」ということが必要である。ここでは、接着の特性として、強度について述べる。信頼性とばらつきの両者を満足する設計を行うためには、不良率、特性の分布形態、特性の下限値、破断強度ではない真の接着強度、劣化による特性の変化など多くのことを考えねばならない。さらに、劣化を低減したり、破壊に対する冗長性を向上させる設計も必要である。

以下に、このような品質作り込みの諸条件について述べる。また、高品質な接着継手を多大な評価試験なしで短期間に設計するための強度設計式も示した。

## 2. 高品質とは

図1に示すように、品質とは顧客の満足度であり、「不良率が低い（信頼性に優れる）」ことは当然だが、それだけでは高品質とは言えない。高品質であるためには、「ばらつきの小ささ」も併せ持っていることが必要である。

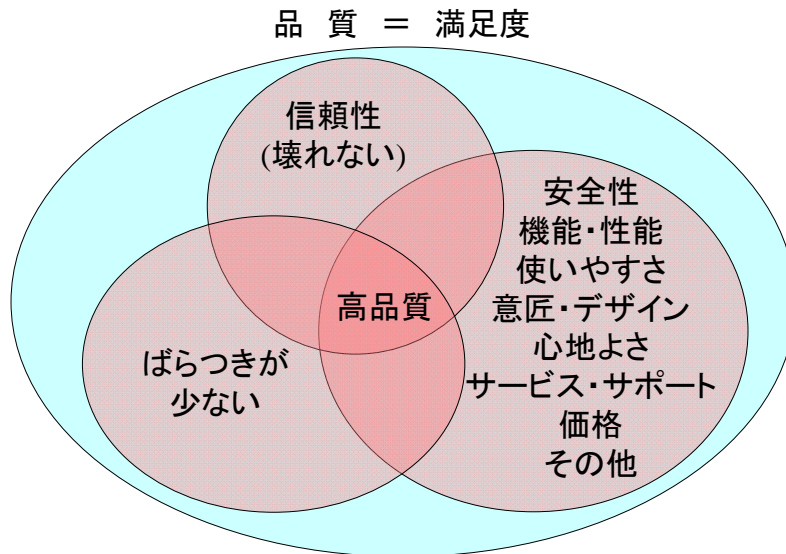


図1. 高品質の条件—壊れなくても「ばらつき」が大きければ「高品質」とは言えない—

## 3. 品質作り込みの条件

### 3.1 接着強度のばらつきと分布の形態

#### (1) 変動係数 $C_v$

接着特性（強度）のばらつきの大きさは、変動係数  $C_v$ （=標準偏差  $\sigma$ /平均値  $\mu$ ）で表す。図2は、サンプル数5個のデーターのばらつきの範囲と変動係数  $C_v$ の関係である。サンプル数が多くなるほど最低値は低くなり、1000万個測定すると下から3番目のデーターは破線のようにになる。高品質というためには、低強度品といえども平均値の50%は確保されていることが必要である。このためには、変動係数  $C_v$ は0.10以下が必要となる。

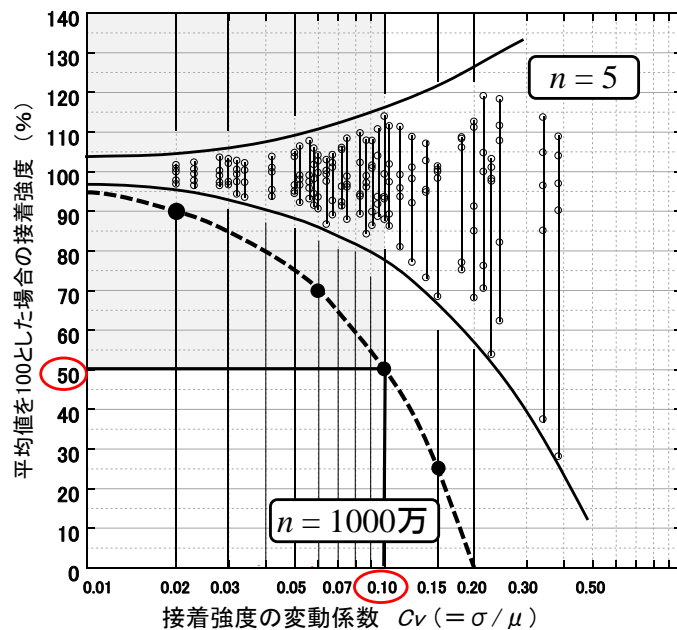


図2. 接着強度のばらつきと変動係数  $C_v$  の関係

## (2) 分布の形態

接着強度の分布の形態は破壊状態と大きく関係している。接着剤の内部で破壊する凝集破壊率が高い場合には正規分布となり、界面破壊率が高い場合には下に凸でブロードな分布となる。被着材料が破壊する場合には上に凸で頭打ちの分布となる。高品質接着の観点からは、凝集破壊率が40%以上有り、正規分布していることが必要である。

### 3.2 想定以上の不良を出さないための条件

#### (1) 不良の確率

図3に示すように、不良は、接着強度の分布と接着部に加わる力の分布が重なったところで生じる。接着部に加わる力の分布は分かっていないことも多いので、ここでは接着部に加わる最大の力  $P_{max}$  で考える。即ち、接着強度の分布の中で、 $P_{max}$  以下の強度のものが破壊すると考える。

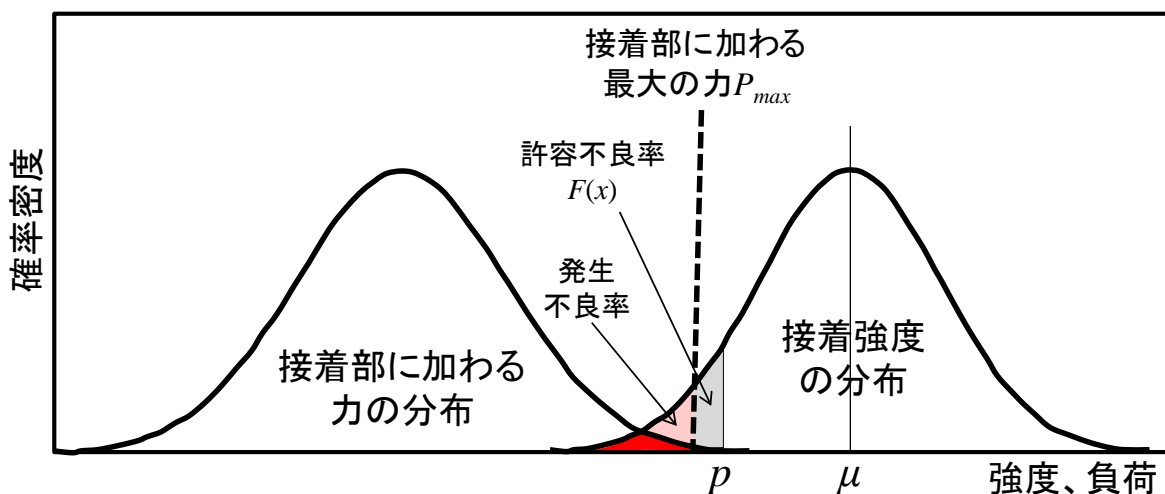


図3. ストレス・ストレングスモデルにおける接着部に加わる力と発生不良率、許容不良率  $F(x)$  の上限強度  $p$  の関係

## (2) 許容不良率 $F(x)$

製品の耐用年数までに発生する不良率の許容できる上限値を許容不良率  $F(x)$  と呼び、一般に設計段階で決められている。1/10 万～1/1000 万に設定される場合が多い。図 3 に示すように、許容不良率  $F(x)$  の上限強度を  $p$  とすると、許容不良率以上の不良を出さないためには、 $p \geq P_{max}$  が必要条件となる。

## (3) 高品質確保のために必要な変動係数 $Cv$ の大きさ

3.1 (1) で述べたように、多数個接着した場合、低強度品といえども平均値の 50% の強度を有していることは必要である。3.2 (2) と合せると、 $p \geq 0.5 \mu \geq P_{max}$  である事が必要となる。許容不良率  $F(x)$  が一定で平均値が変化しない場合は、許容不良率の上限強度  $p$  は分布がシャープになるほど（変動係数  $Cv$  が小さいほど）平均値  $\mu$  に近くなる。正規分布の累積密度関数から求めた許容不良率  $F(x)$ 、 $p/\mu$ 、 $Cv$  の関係を図 4 に示す。 $p/\mu$  を、以下、ばらつき係数  $d$  と示す。ばらつき係数  $d=0.50$  となる変動係数  $Cv$  を図 4 から求めると、許容不良率  $F(x)$  が 1/10 万、1/100 万、1/1000 万の場合は、それぞれ 0.12、0.11、0.10 となる。

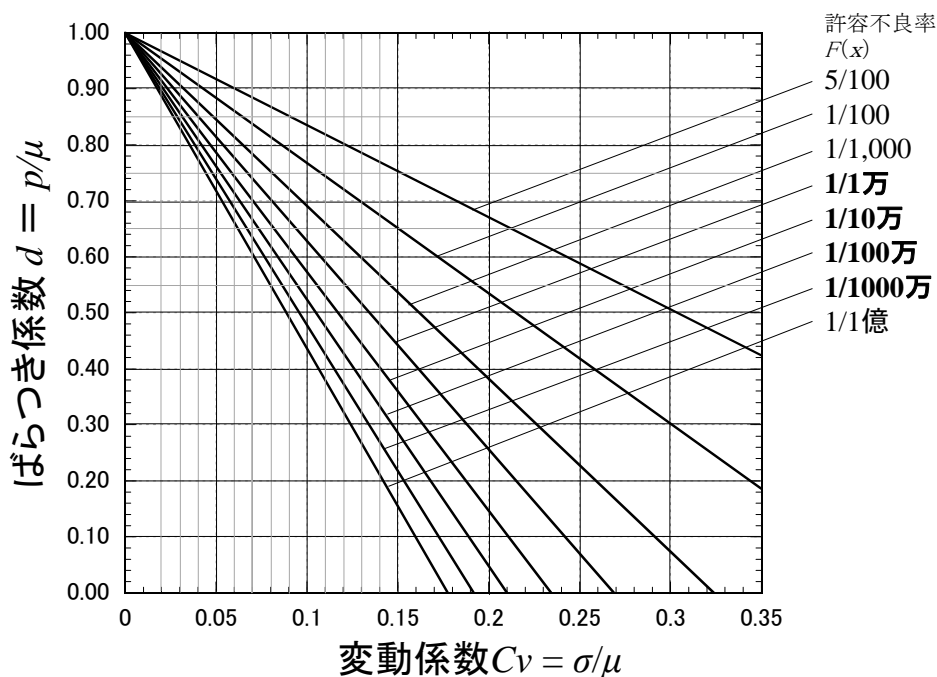


図 4. 許容不良率  $F(x)$  と変動係数  $Cv$ 、ばらつき係数  $d$  の関係

## (4) 許容不良率を表すもう一つの指数「信頼性指数 $R$ 」

許容不良率  $F(x)$  は 1/100 万のように、不良率そのものを表しているのが直感的にわかりやすいが、 $F(x)$ 、 $Cv$ 、 $d (=p/\mu)$  の関係を式化するのは容易ではない。そこで、工程能力指数  $Cp$  の考え方を流用して「信頼性指数  $R$ 」を(1)式のように定義する。

$$\text{信頼性指数 } R = (\mu - p) / 3\sigma \quad \dots (1)$$

$R=1.00, 1.33, 1.50, 1.67, 2.00$  の場合、 $\mu - p$  は、それぞれ  $3\sigma, 4\sigma, 4.5\sigma, 5\sigma, 6\sigma$  となる。

$$\sigma = Cv \times \mu \quad \text{なので、} R = (\mu - p) / 3\sigma = (1 - d) / 3Cv \quad \dots (2) \quad \text{となり、}$$

$$d = 1 - 3R \times Cv \quad \dots (3) \quad \text{となる。} R=1.00, 1.33, 1.50, 1.67, 2.00 \text{ の場合について}$$

図4に追記すると図5となる。信頼性指数  $R = 1.00, 1.33, 1.50, 1.67, 2.00$  を、それぞれ許容不良率  $F(x)$  で示すと、 $1.35/1000, 3.17/10万, 3.40/100万, 2.87/1000万, 1/10億$  となる。

ばらつき係数  $d \geq 0.50$  となる変動係数  $Cv$  は、(2)式から、 $Cv \leq (1-d)/3R \dots (4)$  なので、信頼性指数  $R = 1.33, 1.50, 1.67$  の場合は、それぞれ  $\leq 0.13, \leq 0.11, \leq 0.10$  が必要となる。さらに高品質が求められ、 $d \geq 0.70$  を要求される場合は、それぞれ  $Cv \leq 0.08, \leq 0.07, \leq 0.06$  が必要となる。

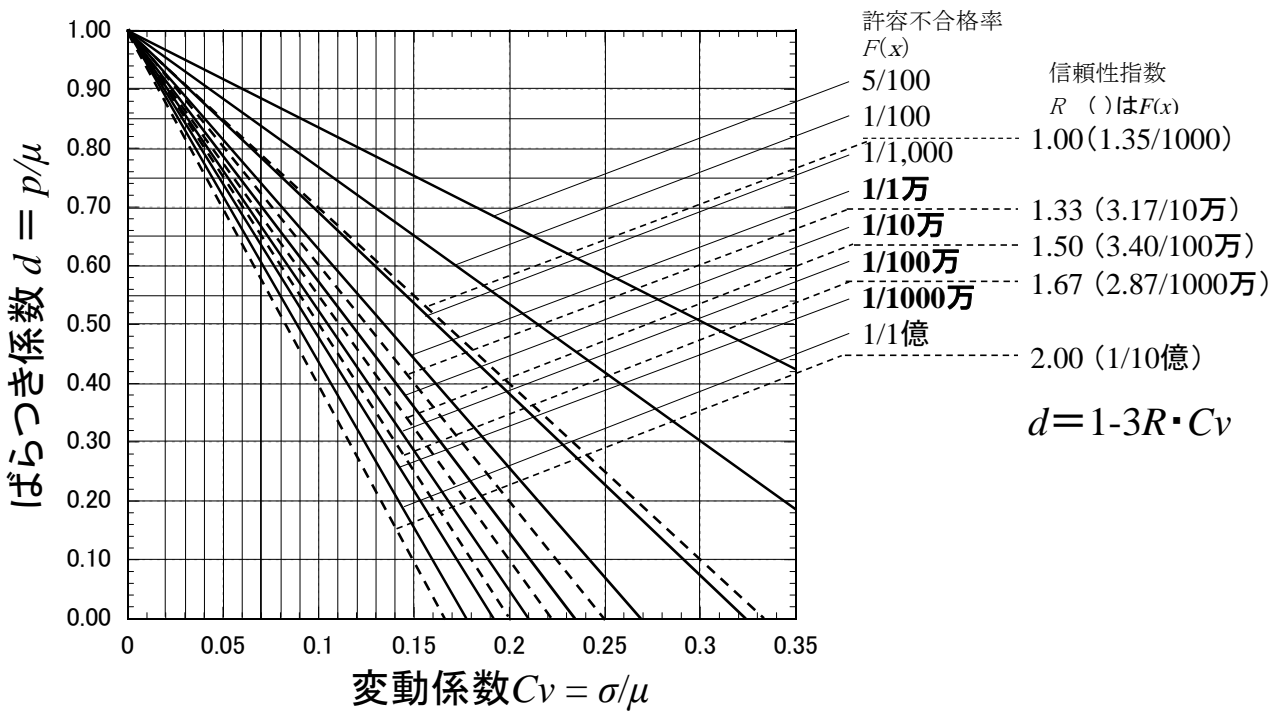


図5. 変動係数  $Cv$  と許容不良率  $F(x)$ 、信頼性指数  $R$ 、ばらつき係数  $d$  の関係

### 3.3 内部破壊強度を考える

接着強度は破壊試験により測定されており、破断強度があたかも真の接着強度であるかのように扱われている。しかし、破断強度は便宜上のもので、強度設計に使える強度値ではない。図6に示すように、破断以前の低荷重域で繰返し内部破壊が発生しており、損傷の蓄積により破断に至る。

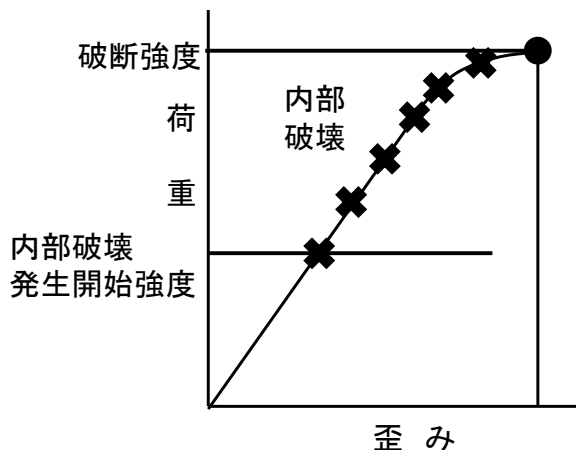


図6. 接着継手の荷重-歪み線図における

表1. AEによる内部破壊の評価結果

破壊状態	試料番号	AE発生開始荷重比
凝集破壊	1	51 %
	2	76 %
	3	100 %
	平均	76 %
界面破壊	1	7 %
	2	8 %
	3	31 %
	平均	15 %

AE発生開始荷重比 = AE発生開始荷重 / 破断荷重

### 内部破壊の発生の模式図

まず、静的強度として、破断以前の低荷重で最初に生じる内部破壊強度を接着強度と考えることとする。表1は、AE (Acoustic Emission) によって引張りせん断接着試験片 (ステンレス鋼板同士/接着剤: SGA) の内部破壊を測定した結果である。表面処理により凝集破壊と界面破壊を作り分けている。この結果から、界面破壊の場合は、破断荷重の10%以下の負荷で内部破壊が生じており、信頼性が非常に悪いことが分かる。凝集破壊の場合は、破断荷重の50%以上の負荷で内部破壊が始まっている。破断荷重に対するAE発生開始荷重の比を内部破壊係数 $h$ と表すと、凝集破壊の場合は0.5となる。以後、静的荷重負荷の場合の内部破壊係数を $h_1$ と示し、 $h_1=0.5$ とする。

疲労破壊は内部破壊の蓄積によるものと考え、繰返し疲労などの高サイクル疲労が加わる場合は、静的破断強度に対する疲労試験の $10^7$ 回での強度の比を内部破壊係数 $h_2$ とし、 $h_2=0.25$ とする。冷熱サイクルなどの低サイクルの熱応力の繰返しの場合は、静的破断強度に対する疲労試験の $10^4$ 回での強度の比を内部破壊係数 $h_3$ とし、 $h_3=0.45$ とする。

### 3.4 劣化による強度低下とばらつきの増大

劣化により、接着強度は低下する。図7に示すように、初期の平均強度 $\mu_0$ に対する劣化後の平均強度 $\mu_y$ の比を劣化後の接着強度の保持率 $\eta_y$ と表す。高品質の接着であるためには、耐用年数経過後の保持率は、悪くても0.5以上、望ましくは0.7以上を保っていることが必要と考える。

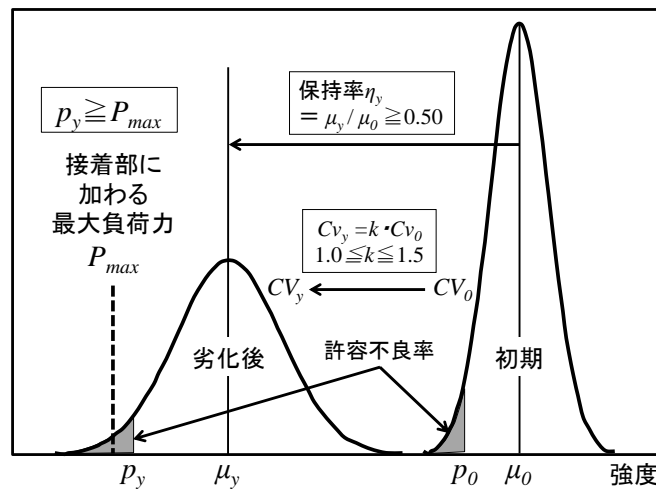


図7. 劣化による接着強度の低下とばらつきの増大および許容不良率における上限強度 $p$ と接着部に加わる最大負荷力 $P_{max}$ の関係

図7に示すように、劣化により接着強度のばらつきは増加する。劣化によるばらつきの増加は、初期の接着強度の変動係数 $CV_0$ が $k$ 倍に増大して $CV_y$ になるとして扱う。 $k$ は、筆者の多くの試験データと製品の実績から、屋外で30年間使用されるような場合でも最大で1.5と考えられ、より耐用年数が短い場合や使用環境が緩い場合は、1.2や1.4で良いと考えられる。

### 4. 最大負荷力に対して初期の平均破断強度は何倍必要かを求める設計式

劣化後においても想定以上の不良を発生させないためには、劣化後において、 $p_y \geq P_{max}$ であることが必要である。また、3.3で述べたように、設計に用いることができる強度を内部破壊

強度で考えると、**図7**の初期強度 $\mu_0$ は、内部破壊発生開始強度と考えるべきである。さらに、実際に設計に用いる設計許容強度としては、安全率 $S$ を考慮する必要がある。すでに、ばらつき、内部破壊、劣化を考慮しているので、安全率 $S$ は1.5~2.0倍で良いと考えられる。

以上を全て考慮して、接着部に加わる最大負荷力 $P_{max}$ に対して初期の平均破断強度 $\mu_{ohS}$ が何倍必要かを求める設計式を求めると、**(5)式**が得られる。

$$\mu_{ohS} / P_{max} \geq S / [h\{1-k(1-d_0)\} \eta_y] \dots (5)$$

ここで、 $\mu_{ohS}$ : 許容不良率、ばらつき、内部破壊、劣化、安全率を考慮した初期の必要平均破断強度、 $P_{max}$ : 接着部に加わる最大負荷力、 $S$ : 安全率で1.5~2.0程度、 $h$ : 内部破壊係数で、静的負荷力だけが加わる場合は $h_1=0.50$ 、高サイクル疲労が加わる場合は $h_2=0.25$ 、冷熱サイクルなどの低サイクル疲労が加わる場合は $h_3=0.45$ 程度、 $k$ : 劣化による初期の変動係数 $C_{V_0}$ の増大率で1.2~1.5程度、 $d_0$ : 初期のばらつき係数で0.5以上、望ましくは0.7程度、 $\eta_y$ : 劣化後の強度保持率で、0.50以上、望ましくは0.7程度である。なお、初期の必要な変動係数 $C_{V_0}$ は、信頼性指数 $R$ と初期のばらつき係数 $d_0$ から**(4)式**で得られる値にまで作り込みを行う必要がある。

安全率 $S$ を1.5、内部破壊係数 $h$ は、 $h_1=0.50$ 、 $h_2=0.25$ 、 $h_3=0.45$ 、劣化による初期の変動係数 $C_{V_0}$ の増大率 $k$ を1.5、初期のばらつき係数 $d_0$ を0.7、劣化後の強度保持率 $\eta_y$ を0.50とした場合、**(5)式**で求めた必要倍率は、静的強度のみが加わる場合には10.9倍以上、高サイクル疲労が加わる場合は21.8倍以上、冷熱サイクルなどの低サイクル疲労が加わる場合は12.1倍以上となる。

## 5. 耐久性の作り込みのための耐久性設計

### 5.1 耐水性の向上

接着部の耐久性は、接着剤、被着材料、表面状態、加わる力や環境によって決まると思われていることが多く、接着剤の選定や表面処理の検討に多大な労力が費やされていることが多い。しかし、接着の劣化に大きな影響を及ぼす水分劣化やクリープ劣化は接着部や部品の設計によって、任意の劣化率に制御することが可能である。

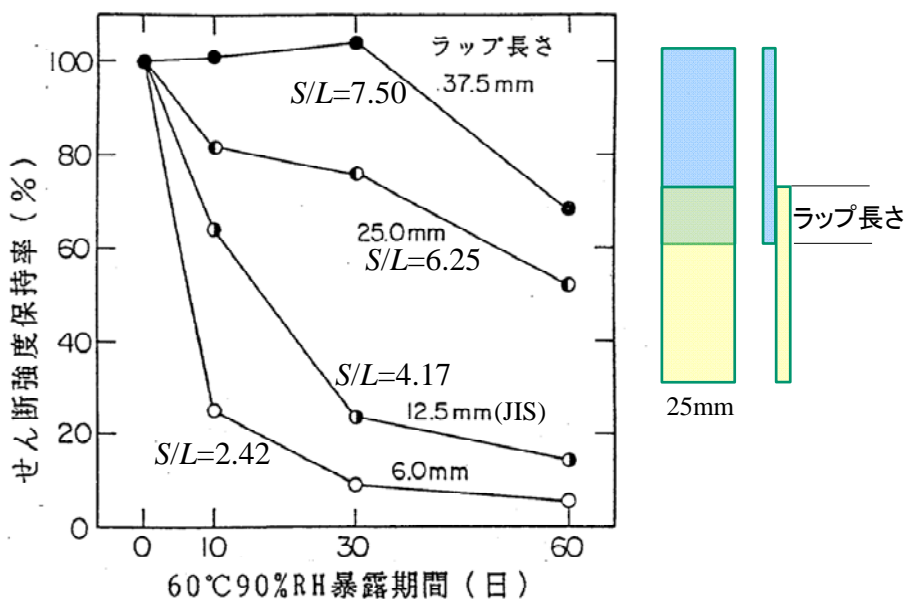


図8. 引張りせん断試験片のラップ長を変化させた場合の耐湿性の違いの例

(ステンレス鋼板同士、接着剤：SGA)

図8は、幅25mmの単純重ね合せ引張りせん断試験片において、ラップ長さのみを変化させた場合の耐湿性試験結果の比較である。ラップ長さを長くすることで、劣化が大きく低下していることが分かる。これは、接着面積 $S$ /接着部外周の長さ $L$ が大きいかほど耐水性に優れているためである。幅が $W$ で細長い接着部の場合、幅 $W$ を2倍、3倍、4倍と大きくすると、劣化速度は $1/4$ 、 $1/9$ 、 $1/16$ と遅くなっていく。任意の劣化率になるように $S/L$ や $W$ を決めることで水分劣化を制御することができる。

## 5.2 耐クリープ性の向上

接着部にクリープ力が加わっている状態で水分が浸入すると、クリープ劣化が加速される。6で述べる複合接着接合法を採用することによって、クリープ劣化を低減することができる。

## 6. 接着の欠点を補い信頼性を向上させる複合接着接合法

複合接着接合法は、接着剤と点溶接やリベット、ボルト、かしめなどの機械的締結を併用した接合法である。図9に、代表的な複合接着接合法の例を示した。(A)は、接着剤とスポット溶接の複合でウェルドボンディングと呼ばれている方法、(B)は、接着剤とブラインドリベットの複合でリベットボンディングと呼ばれている方法、(C)は、接着剤とメカニカルクリンチングの複合、(D)は、接着剤とセルフピアスリベットの複合である。このような複合接着接合法により、接着剤の問題点である作業性や強度特性、信頼性を大きく改善することができる。強度・信頼性の点では、破断に対する冗長性の拡大、高温における接着強度の低下の防止、はく離開始点の補強、クリープ劣化の低減、疲労特性の向上などの効果が得られる。

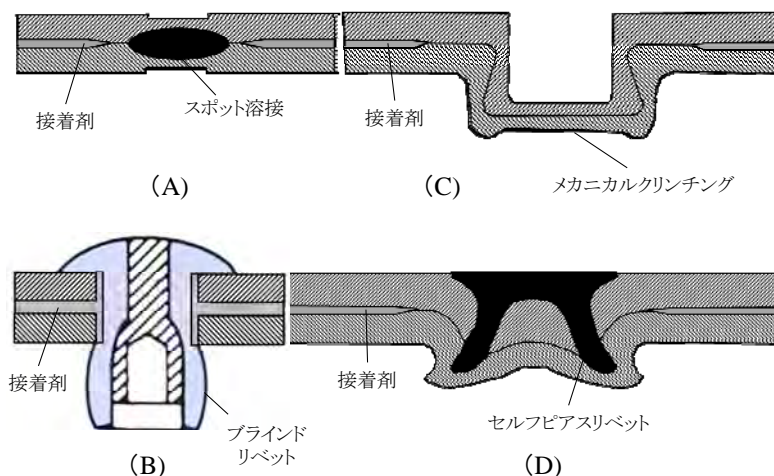


図9. 複合接着接合法の例

図10は、接着、スポット溶接、接着とスポット溶接の併用（ウェルドボンディング）の引張り剪断試験における伸びと荷重の関係である。スポット溶接や接着だけの場合は、一度破壊すると破断してしまうが、ウェルドボンディングでは、最初にラップ端部の接着部が破壊してもすぐには破断せず、スポット溶接とその周辺の接着剤でもう一度荷重に耐えている。破壊までに要したエネルギーは、併用接合では、単独接合の約3倍に向上している。一度の破壊で破断に至ることは危険で避けなければならないが、併用接合では破断に対する「冗長

性」が大きく改善され、定期検査によるクラック発見での補修も可能となる。

図 11 は、60°C90%RH 雰囲気中でのクリープ破断特性の比較である。リベットやスポット溶接を併用することによって、接着のクリープ破断特性が大きく改善されることが分かる。ウェルドボンディングではクリープ破断は見られなくなっている。

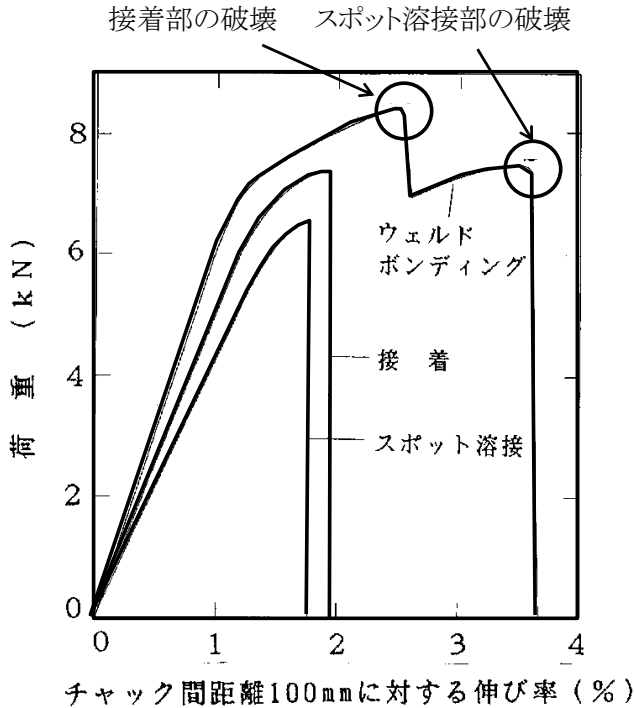


図 10. 接着、スポット溶接、ウェルドボンディングの伸びと荷重の関係

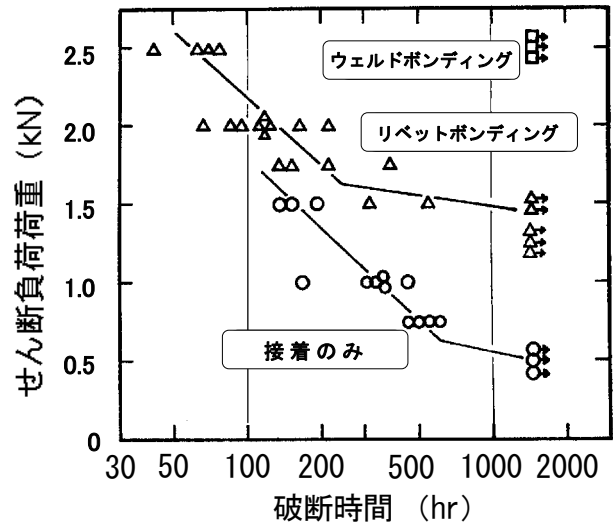


図 11. ウェルドボンディング、リベットボンディングによるクリープ特性の改善例 (60°C90%RH 雰囲気中)

## 7. おわりに

接着剤による接合は、分子間力による界面を有する結合であるため、ねじ・ボルト・ナット、リベット、溶接やろう付けなどに比べて接合強度のばらつきが大きいという大きな課題を有している。さらに、接着強度を非破壊で測定する方法は現時点で存在しないため、検査によって低強度品を排除することは不可能である。抜取りで破壊検査を行ったとしても、低強度品を見つけ出すことはできない。このため、不良につながる低強度品もフィールドに流出することとなる。フィールドで多量の不良を生じさせないためには、出荷段階で想定以上の不良が出ない品質が確保されていることを確認することが重要となる。

ここでは、信頼性とばらつきの両者を満足する「高品質な接着設計」を行うために考慮すべき諸条件について述べ、高品質な接着継手を多大な評価試験なしで短期間に設計するための強度設計式も示した。

高品質接着の基本は、界面破壊を低減して凝集破壊率を向上させ、接着強度の変動係数を小さくすることに尽きる。初期状態において、凝集破壊率が 40%以上、接着強度の変動係数が 0.10 以下まで作り込まれていれば、最低限の高品質接着ができていると考えられるので、まずはここを第一段階の作り込みの目標としていただきたい。さらに、ばらつきの要因解析や表面処理、表面改質などにより作り込みを深めていただきたい。

本講演が高品質接着作り込みの一助となれば幸いである。