

自動車のマルチマテリアル化に 対応する構造接着技術の課題

ー接着接合の信頼性、耐久性の作り込みの考え方ー

(株)原賀接着技術コンサルタント
http://haraga-secchaku.info/
原賀康介



1. 接着の採用目的とその事例
2. 日本の接着接合技術の世界的レベルと現状
3. 今後接着接合技術が期待される分野
4. 自動車のマルチマテリアル化における接着の課題



緒言

- ◆自動車の車体軽量化に向けて複合材料など材料の多様化が進みつつある。このような中で、異種材料の接合は重要な課題であり、その一つとして接着接合が注目されている。
- ◆接着剤による構造物の接合組立は、従来から航空・宇宙機器などに適用され多くの実績を有している。最近では、欧州をはじめ国内でも自動車の車体組立に適用が拡大しつつある。
- ◆しかし、量産車組立に、従来からの「構造接着」をそのまま適用することは困難であり、採用までには多くの検討課題がある。
- ◆今後、多様化する素材に対して構造接着接合を汎用的な接合手段としていくためには、部品材料と接着剤との相性、接着剤自体の物性、組立時の作業性、さらに、接着接合の信頼性設計や耐久性設計など多くの課題がある。
- ◆本講演では、上記のような課題への取り組み方について解説する。

本日の資料

- (I)  これから説明するPPTは配布されていません。本日の講演内容の「個別の技術」については、お手持ちの書籍に記載されています。講演の中で、関係するページを示します。「考え方」など本に書いてないことも話をします。
- (II)  本と首っ引きで話を聞くと、話の流れが掴めず、枝葉末節に捕られるので、できるだけ本の中身を見ないで、まずは話を聞いてください。本日のPPTのpdfは、弊社ホームページからのダウンロードを検討中です。(アップロード時は、ご聴講者には、パスワードをメールで連絡いたします)

1. 構造接着の採用目的とその事例

接着の採用目的

I P2-9

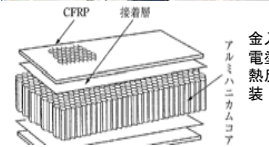
- (1) 高精度化
 - ←低温・低歪み接合
 - ←隙間充填性による部品精度の吸収
- (2) 軽量化
 - ←薄板の高強度接合(面接合による応力分散)
 - ←軽量素材の採用(異種材接合)
- (3) 工程合理化
 - ←溶接などの歪み除去作業の廃止(低歪み接合)
 - ←部品の加工精度の低減(隙間充填性の活用)
 - ←シール作業廃止(接合+シール)

高精度接着の事例 一大形宇宙電波望遠鏡の反射鏡一

野辺山宇宙電波観測所45mφミリ波電波望遠鏡
1981年完成



I P41-42
単体パネル



- 反射鏡の直径45m
- 反射鏡は600枚のパネルで構成(約2.5m×1.5m/枚、100mm厚)
- 宇宙のミリ波を観測
- 鏡面精度:全体0.1mm以下
- 単体パネル:0.05mm以下
- 春夏秋冬、昼夜の温度差(-30℃~+60℃)による変形不可
- そのため、線膨張係数0のCFRP/アルミニウムパネルで製作



2001年完成
水沢
小笠原
鹿兒島
石垣島

I P21-23 II P3-7

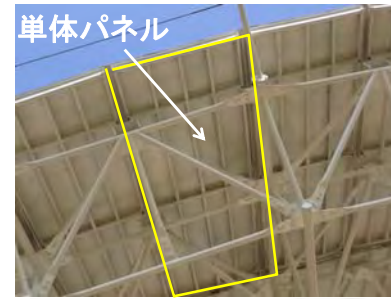
- 宇宙の立体地図作成用電波望遠鏡VERA(日本に4台)
- 反射鏡:直径20m、120枚のパネルで構成
- 分解能:月の上の1円玉が識別できる精度を有する
- 鏡面精度:全体0.25mm以下、単体パネル0.15mm以下
- 非塑性変形最大風速90m/sec(334km/hr)
- 単体パネルの構造:アルミ反射板の裏にアルミ製ストレッチ(補強材)が接着だけで固定。隙間充填による精度補償



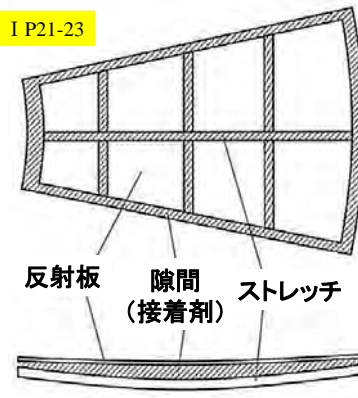
国際天文観測プロジェクト
ALMAサブミリ波電波望遠鏡
(チリ:標高5000mアタカマ高地)
(66台中12台が日本製造)
2013年本格運用開始

鏡面精度:φ12m 0.02mm以下
単体パネル:0.005mm以下

国際天文観測プロジェクトALMAの電波望遠鏡(国立天文台提供)



I P21-23

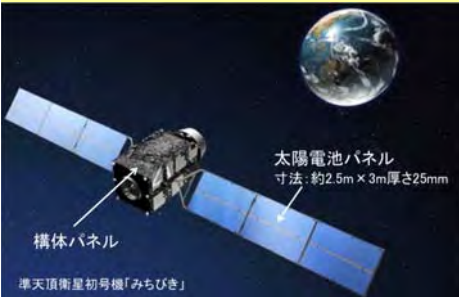


- ◆ストレッチは溶接で組むので精度が出ない
- 反射板とストレッチ間には**数mmの隙間**ができる

- ◆接着剤で隙間を埋めて接着する
- ◆接着剤:**二液室温硬化型アクリル系(SGA)**
- 硬化収縮応力発生→歪み発生
- 応力緩和で歪み除去 II P45-52

軽量化の事例

HSC 7/61



太陽電池パネル
寸法:約2.5m×3m厚さ25mm

構体パネル

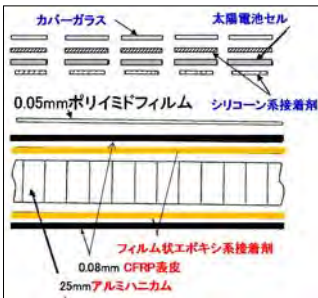
人工衛星の組立て(太陽電池パドル、構体、アンテナ)
CFRP/ハニカム/CFRPの接着サンドイッチパネル



I P32-33

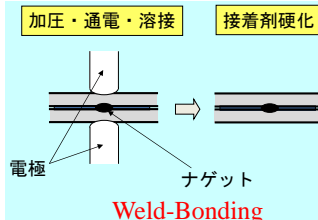


高速車輛向け車輛空調装置 主枠組立て
ステンレス薄板金部品の室温硬化(SGA)WB
接着+シール、耐疲労特性、高剛性、耐久性



I P43-46

- 要求条件:
- 耐ヒートサイクル性
-150℃~+200℃
 - 耐熱劣化性、低T_g
 - 耐放射線性
 - 低アウトガス(構体パネル)
 - 透明性(カバーガラス接着)



異種材接着の事例

HSC 8/61



国立天文台赤外線望遠鏡「すばる」(ハワイ島マウナケア山) **ガラス主鏡**:φ8.2m、厚さ20cm、重さ22.8トン、鏡面精度0.012μm 1999年1月ファーストライト

ガラス主鏡/インバー製固定点(3カ所)
ガラス主鏡/アクチュエータスリーブ(261箇所)



各種モーターの永久磁石/鋼製ローターコアのSPM
接着 高温強度、耐ヒートサイクル性、耐疲労性

I P46-50

2. 日本の構造接着技術の世界的レベルと現状

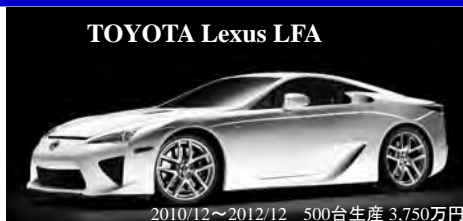
- (1)「構造接着技術」は欧米に比べて遅れている。
 その理由は、**接着技術を牽引する産業(航空機産業)がなかった。**
 ※一方、溶接は造船という牽引産業があったため世界の技術力
- (2)接着の技術開発にかかるリソース(人、金)が少ない
 →日本の**大学**には「**接着工学科**」はない
 →日本では接着接合の技術者が育っていない、稀少
- (3)**機器組立メーカー**でも接着の技術者は稀少
 設計者から接着で組み立てるという発想が出てこない
- (4)日本の**接着剤メーカーの規模**が小さい
 研究開発のリソースが少ない
 建築・土木分野が多く、構造体組立用接着剤のメーカーは少ない
- (5)接着剤メーカーが**接着適用技術(ソリューション)**を十分に持ってない
 欧米の接着剤メーカーは ニーズを創成しながら材料を開発する
- (6)接着適用の技術開発はユーザー主体で行われているが、適用までには**ユーザーでの膨大な検証試験**が必要

3. 今後接着接合技術が期待される分野

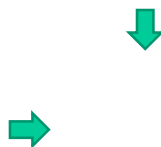
- 地球環境・資源保護 …… 軽量化、省エネルギー化(CO₂削減)
自動車(量産車)の車体軽量化 接着技術の牽引役になれるか
 鋼、アルミ、複合材料のマルチマテリアル化による異種材接合
- インフラ老朽化対策
 橋梁、高架道路、港湾施設などの補修工事(特に腐食部補修)
 使用しながらの工事
- 耐震補強
 既設ビル・建物、橋梁・道路などのインフラの補強
 使用しながらの工事
- 火気レス工法としての適用
 火気(溶接)が嫌われる場所での接合手段として適用
 化学プラントや工場、既設ビルでの補修、改造、新造
 造船における艀装工事、密閉空間での工事
- 部品加工時の仮固定用接着剤、リペアラブル接着剤
- 医療分野

4. 自動車のマルチマテリアル化における接着の課題

部品製造(CFRP)



↓
 接着・リベット併用接合



4.1 航空・宇宙機器や高級車の構造接着技術は量産車や一般機器の組立にも適用できるか？

- ◆航空・宇宙機器や高級車で使われている接着は、「**構造接着**」と呼ばれている技術。
- ◆**構造接着は、「性能優先」**で生産性やコストはさほど問われない。
- ◆**量産車組立における接着では、性能、生産性、コストが共に重要視される。**

◆接着される材料(例:CFRP)		
炭素繊維 マトリックス樹脂	【航空・宇宙】 長繊維、織物 熱硬化エポキシ	【量産車】 短繊維 熱可塑性樹脂(PP, PAなど)
◆接着剤		
形状 主成分 硬化方法 価格	【航空・宇宙】 フィルム状 エポキシ オートクレーブ 高価	【量産車】 液状 ウレタン、アクリル、エポキシ 短時間硬化 安価

- ◆「**構造接着**」をそのまま「**量産車組立**」に適用するのは困難。

4.2 対象素材とその到達点は？

- ◆鋼 普通鋼→一般構造用鋼→高張力鋼→超高張力鋼 → ？
鋼素材→めっき鋼板 (GI→GA→高耐食) → ？
- ◆アルミ
- ◆複合材料 繊維 : ガラス、アラミド(ケブラー)→炭素繊維(長繊維)
→炭素繊維(短繊維) → ？
マトリックス材 : エポキシ、ポリエステル(熱硬化樹脂)
→PP、PA(熱可塑性樹脂) → ？

素材の最終形はまだ見えない

- ◆素材の高強度化→薄肉軽量化→剛性低下→**高剛性構造が必要**
- ◆新素材→**加工法の検討が必要**
- ◆**接合**: 素材の組合せに適した方法の検討
- ◆**塗装**: 接合後塗装か、塗装後接合か

発散(進化)の段階を経て、強度・剛性・軽量化効果、素材の加工性、接合・組立性、トータルコストなどの点からいずれは収束に向かう

HSC13/61

4.3 マルチマテリアル化において接着接合に何を期待しているのか

- (1) 高強度接合(接着強度) 同種材料、異種材料
- (2) 薄肉化による点や線接合部の応力集中の回避
 - ①点や線接合+接着の併用使用
 - ②点や線接合から接着への代替→(1)
- (3) 剛性向上
面接合の活用
- (4) 振動防止
樹脂の粘弾性効果の活用
- (5) 超高張力鋼やめっき鋼板の溶接性低下対策
 - ①溶接+接着
 - ②接着への代替→(1)

現時点では、**何となく**低温耐衝撃性、高温接着強度、複合材料への接着性などが目標になっているようであるが、**期待する効果によって接着剤の作り込みの目標値は異なる**。上記の明確化が必要。

HSC14/61

4.4 接着接合を使いこなすためには、何を考えるべきか

- ◆**接着剤**は、構造体を形成する部材として材料設計されているか？
- ◆接着される**部品の表面**は、接着に適した状態になっているのか？
PP素材は基本的に接着できない←接着対象部材として不適
- ◆接着接合に適した**構造設計**はなされているか？
機械的特性、力学的耐久性、組立性 **現状や先行例に束縛されない**
- ◆**環境劣化を抑える設計**はなされているか？
環境耐久性は、素材と接着剤の組合せで決まるものではなく、要求条件に合わせて**作り込むもの**である
- ◆接着特性の**信頼性(ばらつき、再現性)**を考えた材料設計、構造設計はなされているか？
規格を厳しくして、検査を強化することは、不良率を増加させるだけ
平均値が高くてばらつきが大きければ適用できない

- 接着剤は、**バルク物性の作り込みが必要**
- 接着される部材は**接着性を考慮すべき**
- 接着剤の特性を最大限に活かす**構造設計が必要**
- 材料設計、構造設計では、常に**信頼性を考慮して行う事**

HSC15/61

4.5 接着における実施すべき課題

(1) 演者の基本的考え方

- ◆多種多様な被着材料に合わせて接着剤を開発、使用することは、**接着剤の多品種少量化**を招くこととなり、接着ユーザー、接着剤メーカー共に好ましくない。
 - ◆また、次々と開発される被着材料に対応した接着剤の開発は、**後追いの開発**となり**時間的にも不利**である。
 - ◆接着剤の欠点は、他の接合方法の併用でカバーする
- ↓
- ◆そこで、次を実施することが得策と考える。
 - ①**被着材料の表面**を接着性に優れた状態に**統一的に改質する方法**の開発
 - ②**接着剤**は、界面密着性に捕らわれず、**自動車用接合材**として必要な**バルク特性**を満足させる開発に注力する
 - ③接着と他の接合の併用接合(**複合接着接合法**)を活用する
 - ◆以下に、演者が考える個々の検討課題を説明する

HSC16/61

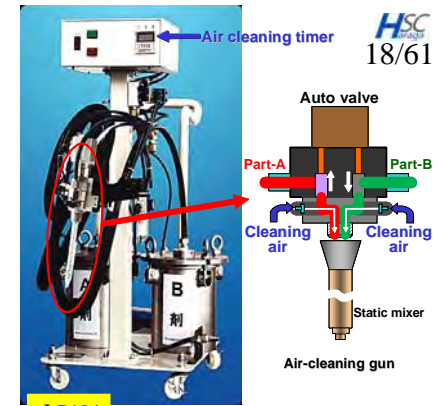
(2) 接着剤 ①二液室温硬化型接着剤の理解度向上

- ◆線膨張係数の異なる**異種材料接着**の点から、接着剤は、基本的に**室温硬化型**が主対象となる。(エポキシ、ウレタン、アクリル) II P244-246
- ◆しかし、二液室温硬化型接着剤は、なぜか毛嫌いされる事が多い。でも、**異種材接着では、避けては通れない。**
- ◆嫌われる理由
 - ・使い慣れない物への拒否反応
 - 煩雑さ：計量・混合、ミキサー内ゲル化防止、ミキサー洗浄
 - 可使時間の制限・温度の影響(特に夏期高温時)
 - 硬化時間の長さ・温度の影響(特に冬期低温時)
 - 油面接着性のなさ(エポキシ、ウレタン)
 - 日本の高湿度環境での発泡(ウレタン)
- ◆CFRTPなどの革新的新構造材料を検討している中で、**関連周辺技術も変革が伴うのは当然のこと。**従来技術に捕らわれていては先には進めない。**意識改革と室温硬化型接着剤への知識の深掘りが必要。**
- ◆車体組立では新材料である**二液室温硬化型アクリル系接着剤(SGA)**は、**ラジカル反応**により、付加反応にはない種々の特徴を有する。活用次第で大きな効果が期待できる。

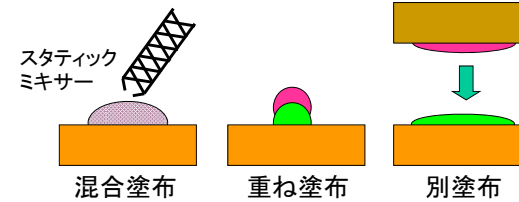
HSC17/61

【SGAの特徴】 I P12-14

- ◆**ラジカル連鎖反応(酸化還元反応)**により硬化する
 - ◇二液**非混合**(接触だけ)でも硬化
 - ◇**配合比**は目分量程度で十分
 - ◇硬化の立ち上がり**速度**が速い
- ◆**油面接着性に優れる** I P153
- ◆**凝集破壊性が高く、強度ばらつきが小さい**
- ◆せん断、はく離、衝撃の**強度バランスが良い**
- ◆**耐環境性に優れる**
- ◆**空気洗浄式塗布装置により一液ライクに使用可能(嫌気的性質の活用)**



I P104 空気洗浄式塗布装置



油面接着品の凝集破壊状態

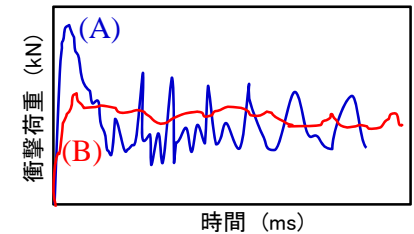
(2) 接着剤 ②要求特性

- (1) 作業性
 - ①取扱いの容易さ(作業環境: **温度・湿度への鈍感さ**)
 - ②塗布しやすくてたれない粘度
 - ③隙間充填性
 - ④塗布装置の簡便さ(繰返し吐出性、洗浄性)
 - ⑤**油面接着性**
 - ⑥**長可使時間と短時間硬化性**
 - ⑦**ウェルドボンディング適性**
- (2) 樹脂の特性
 - ①**低内部応力(高応力緩和性)**
 - ②**耐塗装性**
 - ③**絶縁性(電食防止)**
 - ④**シール性**
- (3) 接合特性
 - ①各種材料への接着性
 - ②**強靱性、耐衝撃性**
 - ③**高温強度**
 - ④振動吸収性
 - ⑤**信頼性**
 - ⑥**耐久性**
- (4) その他
 - ①保存安定性
 - ②法規制対応
 - ③硬化後の臭気
 - ④作業へのやさしさ
 - ⑤廃棄のし易さ

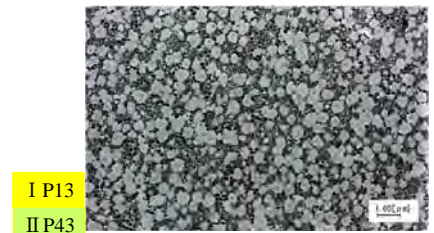
HSC19/61

(2) 接着剤 ③強靱性、耐衝撃性の確保

- ◆**耐衝撃性**
 - ・吸収エネルギー(面積)が大きいものが望ましい。
 - ・(A)のように衝撃初期の荷重値が高すぎてはならない。
 - ・(B)のように、適度な荷重を長時間にわたって受けるのが理想



- ◆**バルク特性の作り込み**
 - ◇**海/島構造**の導入による強靱化
 - ◇**破断伸び率**の向上
 - ◇**ゴム弾性(復元性)**付与
 - ◇**凝集破壊性**の向上(界面破壊不可)



二液アクリル系接着剤(SGA)における海/島構造の例(白い島がアクリル、黒い海がエラストマー)
(写真提供: 電気化学工業(株))

HSC20/61

(2) 接着剤 ④作業性の確保

◆長可使用時間短時間硬化性

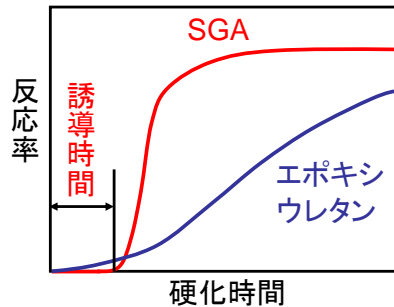
・接着作業に十分対応できる可使用時間の長さ、室温での短時間硬化性の両立が必要。

・可使用時間に対する固着時間の比

二液エポキシ、二液ウレタン(付加反応) : 12~16倍
SGA(ラジカル反応) : 3~4倍



・ラジカル連鎖反応の活用が効果的



HSC21/61

(3) 被着材料表面の統一的改質法の開発

◆多様な素材表面に共通の接着剤で対応できるように、素材表面の接着性を向上させる。

◆素材表面は、同じ部品でも個々に異なっている。

接着直前の処理は、接着の信頼性確保のために必須である。

◆素材の表面改質を検討する

I P153-160 II P66-72

- ◇機器による表面改質
 - プラズマ処理(大気圧、低圧)
 - 短波長紫外線処理
 - レーザー照射
 - 火炎処理 など

◇プライマー、コーティング剤

- ◇アンカー効果を持たせる表面の微細形状形成
 - 化成処理、レーザー処理
 - など

◆多様な部材表面に共通して適用できる処理法の開発が必要。

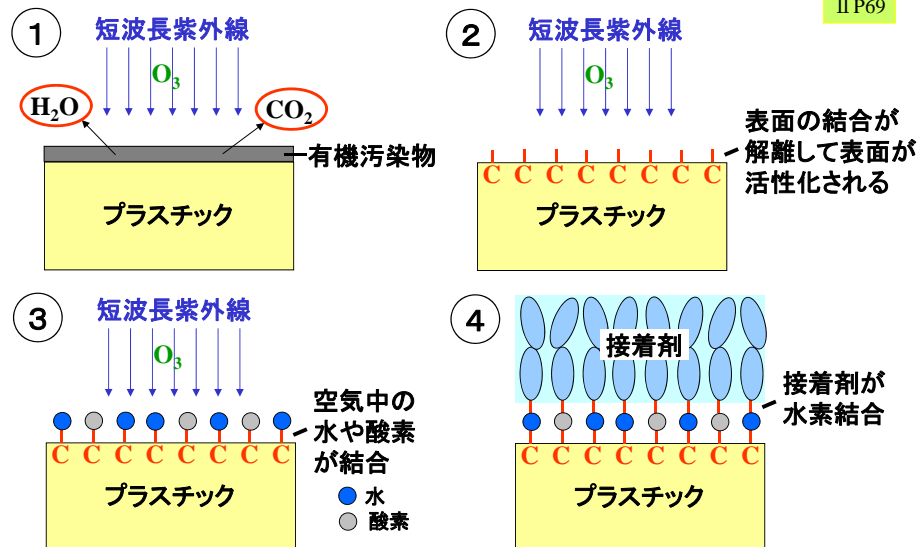
◆大面積、複雑形状の短時間処理ができる装置開発も必要

HSC22/61

短波長紫外線照射による表面改質メカニズム

I P157

II P69



★大気圧プラズマ処理などの他の改質方法でもメカニズムは類似

★金属やガラスなどでも効果が得られる。

HSC23/61

(4) 表層破壊の発生と回避

【表層破壊の発生】

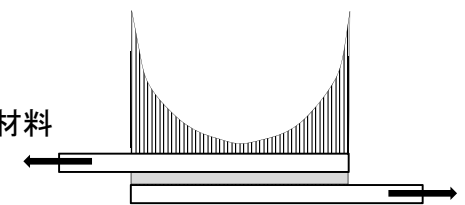
◆部材表面の接着性が向上すると、部材の表層が接着剤にもぎ取られる「表層破壊」が生じる。

◆接着部端部の応力集中が大きい場合には、母材強度よりかなり低い強度で表層破壊が生じる。

複合材料、めっき(特にGA)、塗膜、ガラスや焼結磁石などの脆性材料



表層破壊の例

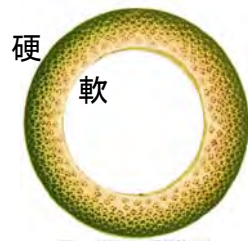


接着部端部でのせん断応力の集中

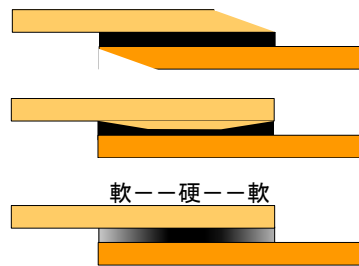
HSC24/61

【表層破壊の回避】

- ◆部材の表面を強化する
竹のような傾斜材料
クラッド、ラミネート
- ◆接着部端部の応力集中を減らす
 - ◇接着剤を柔らかくする
←高温強度は低下
 - ◇部材の接着端部の剛性を下げる
 - ◇接着端部の接着層を厚くする
 - ◇接着部の端部のみ接着剤を柔く
できれば理想的
接着剤への傾斜機能付与
アイデアは昔からある
簡易な方法での実現は困難？

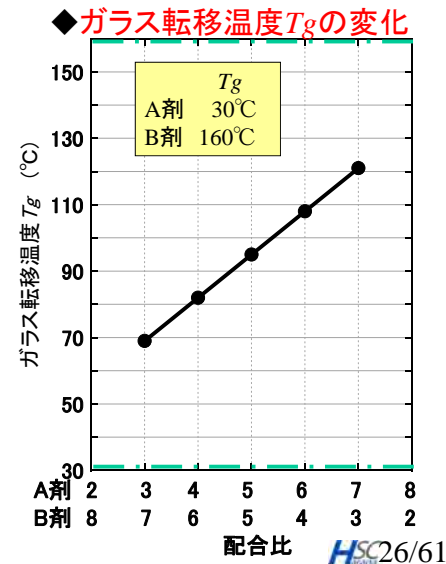
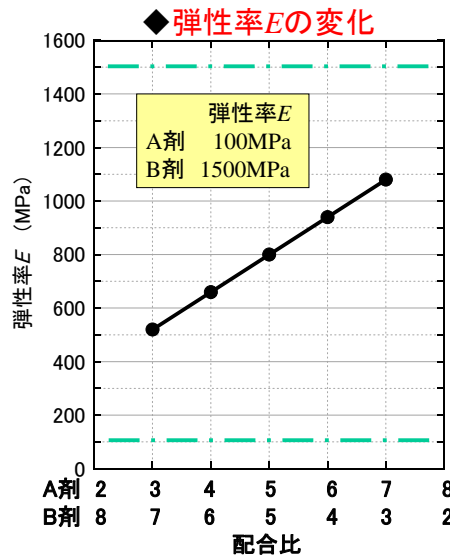


竹の断面構造



軟—硬—軟

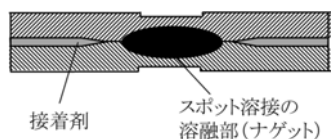
SGA(二液異組成室温硬化型アクリル系接着剤)を用いれば
物性傾斜は容易に実現できる
— 配合比変化による弾性率、 T_g の変化 —



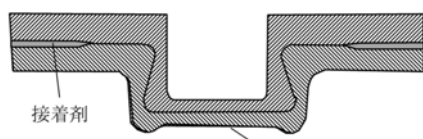
(5) 複合接着接合法の活用

II P37-39

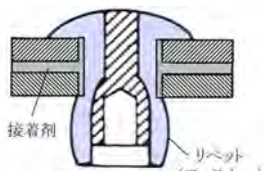
【複合接着接合法の例】



(A)ウェルドボンディング



(C)TOXボンディング
メカニカルクレンジング (TOXかしめ)



(B)リベットボンディング



(D)HENROBボンディング
打ち込みリベット (HENROBリベット)

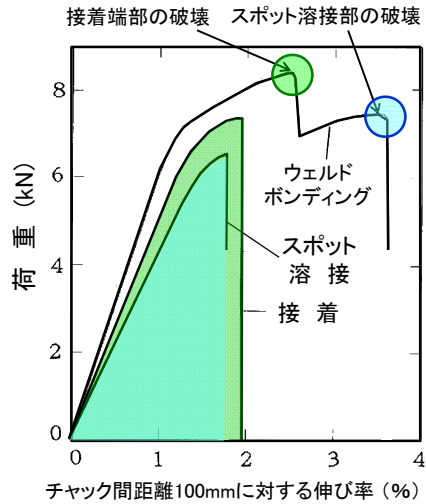
【併用接合法の効果】 II P81-86

- ◆接着信頼性の向上
 - ・破壊の冗長性の拡大 ←相乗効果
 - ・火災時の形状保持 ←接着の課題解決
- ◆接合特性の向上
 - ・クリープの防止 ←接着の課題解決
 - ・高温での接着強度の向上 ←接着の課題解決
 - ・疲労特性の向上 ←点接合の課題解決
 - ・耐衝撃性の向上
 - ・はく離開始点の保護
- ◆接着作業性の改善
 - ・固定治具不要
 - ・硬化待ち時間不要(長可使時間接着剤の使用可)
 - ・導電性の確保(電着塗装、アース)

単独接合の欠点は他の方法で補う

【複合接着接合法による接合信頼性の向上】

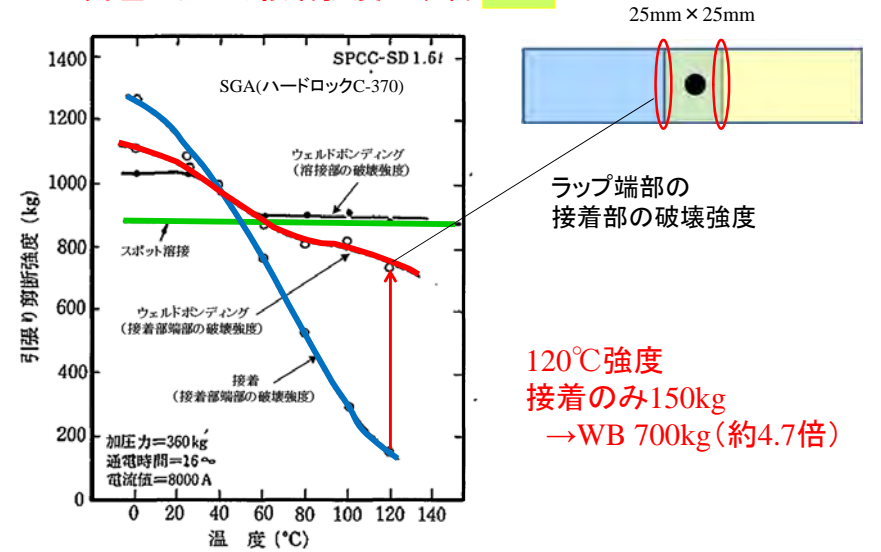
◆破壊に対する冗長性の拡大 II P82



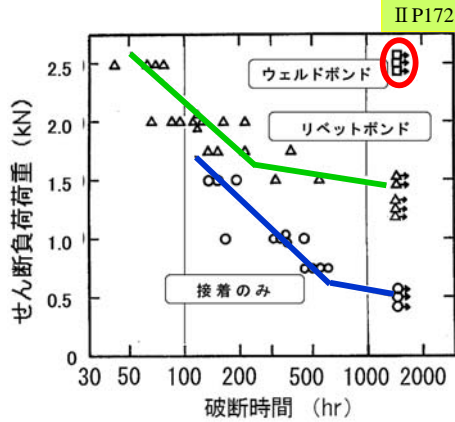
一方が破壊しても破断せず、
他方の接合で持ちこたえる

破壊エネルギー約3倍

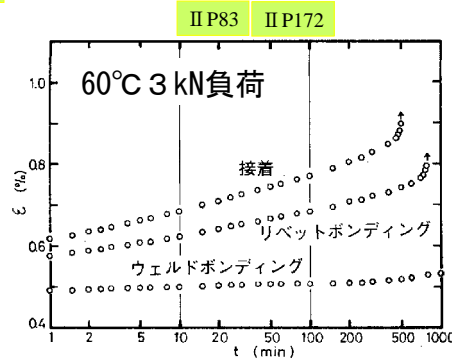
◆高温における接着強度の改善 II P84



◆クリープ特性の改善



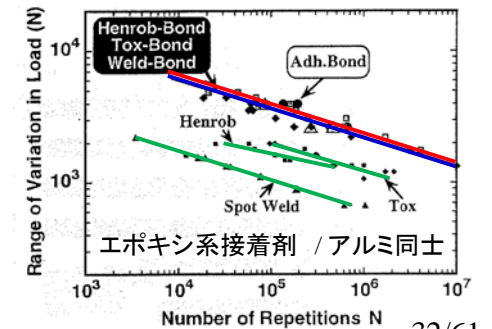
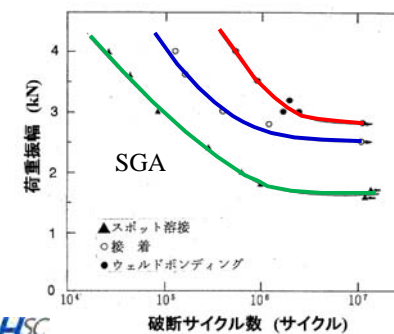
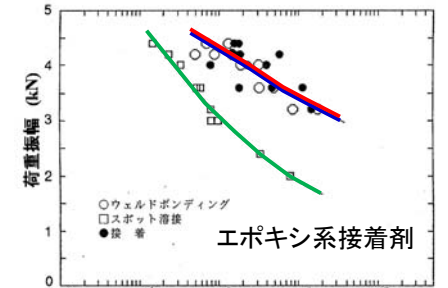
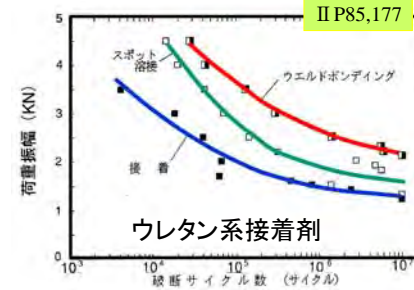
60°Cにおけるクリープ
破断試験



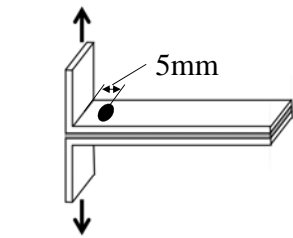
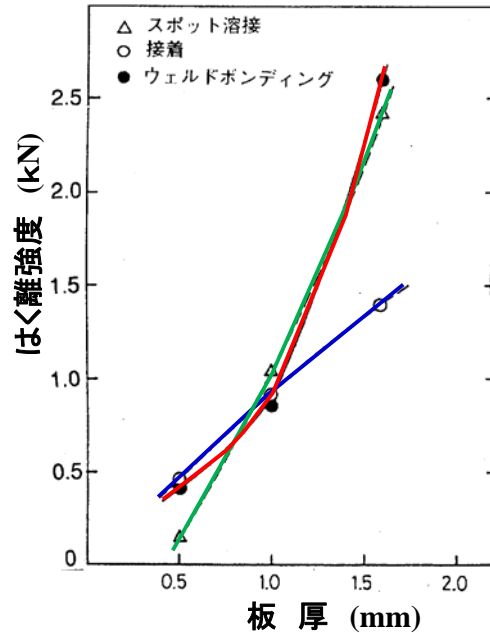
60°Cにおけるクリープ
変形量の経時変化

◆疲労特性の改善

硬い接着剤では併用効果は得られない



◆はく離開始点の保護 II P115



板厚1.0mm以下
スポット<接着、WB

板厚1.0mm以上
接着<スポット溶接、WB

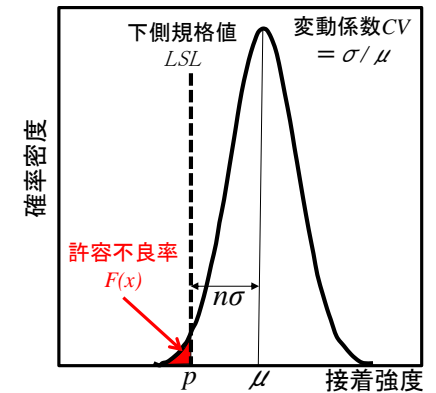
(6)信頼性(ばらつき、再現性)の確保 ①目標値

- ◆許容不良率 : 1/10万~1/100万~1/1000万
- ◆工程能力指数 1.33(4σ管理)~1.50(4.5σ管理)~1.67(5σ管理)

◆これらの要求をクリアできるかどうかは、許容不良率における上限強度 p や下側規格値 LSL と接着強度のばらつき σ の大きさによる

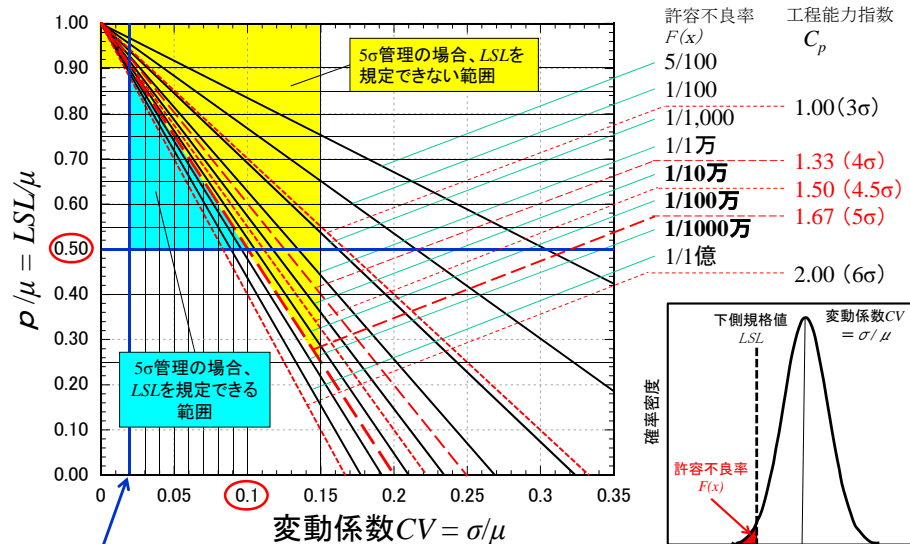
- ・ばらつき σ が大きくても p や LSL が低ければクリアできる
- ・ばらつき σ が小さくても p や LSL が高ければクリアできない

- ◆ μ 、 σ 、 p 、 LSL が実数では扱いにくいので、**平均値 μ で割って無次元化した $\sigma/\mu=CV$ 、 p/μ 、 LSL/μ で考える。**
- ◆接着強度の分布は**正規分布**になる



- ◆接着強度の変動係数 CV はどのくらいにすべきか

接着強度の変動係数 CV と、許容不良率 $F(x)$ 、工程能力指数 C_p と、 p 、 LSL の関係 I P136 II P136,215



接着強度の変動係数 CV を0.02以下にすることは至難

前図からわかること

- ◆工程能力指数 $C_p=1.33$ は、許容不良率1/1万~1/10万に相当する。
- ◆工程能力指数 $C_p=1.50$ は、許容不良率1/10万~1/100万に相当する。
- ◆工程能力指数 $C_p=1.67$ は、許容不良率1/100万~1/1000万に相当する

- ◆工程能力指数 $C_p=1.67$ が要求される場合、下側規格値 LSL と必要な変動係数 CV は、次のようになる。

下側規格値 LSL/μ 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90
 必要な変動係数 $CV \leq 0.10 \leq 0.08 \leq 0.06 \leq 0.04 \leq 0.02$

- ◆接着強度の変動係数 CV はどのくらいまで小さくできるか?

- $CV=0.100$ 最低限確保すべき品質作り込みの最低必要条件(十分可能)
 - $CV=0.070$ 劣化後も $CV=0.100$ を確保するための品質作り込みの目標値(可能)
 - $CV=0.050$ 品質作り込みで達成可能
 - $CV=0.020$ 相当な品質作り込みが必要だが達成可能
- 講師のチャンピオンデータでは、
- $CV=0.007$ (軟鋼板2.3mm同士、せん断、一液エポキシ)
 - $CV=0.005$ (アルミ3.0mm同士、せん断、一液エポキシ)
 - $CV=0.003$ (合金化亜鉛めっき鋼板、はく離、SGA:C355)

- ◆要求する工程能力指数 C_p が同じでも、下側規格値 LSL を高く設定しすぎると、不合格が増加する。

劣化によるばらつきの増加 II P133,214

◆劣化により、平均強度の低下とばらつきの増加が起こる

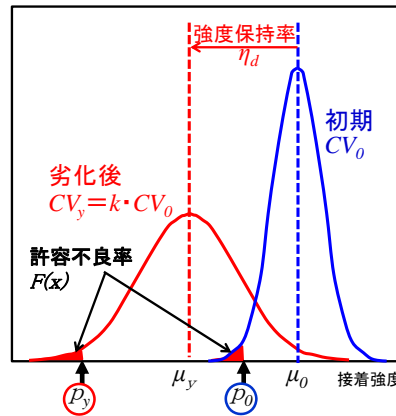
◆ばらつきの増加は、変動係数CVが初期のk倍に増加するとして扱う

◆凝集破壊の場合、屋外で30年間使用するような場合でも、経験的にkはmax1.5までと考えて良い。(通常1.3~1.4が良い)

◆k=1.4とすると、

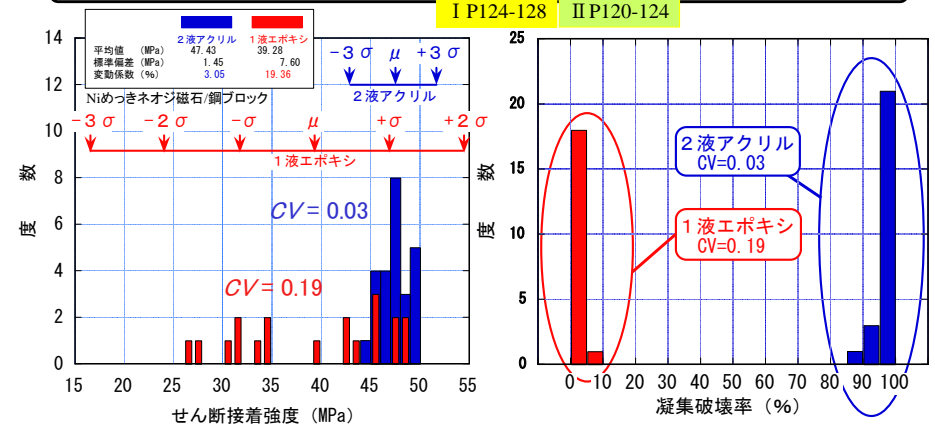
初期の変動係数 CV_y	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04
劣化後の変動係数 CV_0	0.14	0.11	0.10	0.08	0.07	0.06

上記より、劣化後でも変動係数0.10を確保するためには、初期の変動係数は0.07~0.08を達成する必要がある。



(6)信頼性の確保 ②変動係数を小さくするには

接着強度と凝集破壊率の度数分布と変動係数CVの比較例



- ◆一般に、凝集破壊率が高くなれば、変動係数CVは小さくなる。
- ◆初期の凝集破壊率は、再現性を持って面積の40%以上が確保されていれば基本的な信頼性は確保できていると考えられる。

界面破壊が良くない理由

I P124-128 II P121

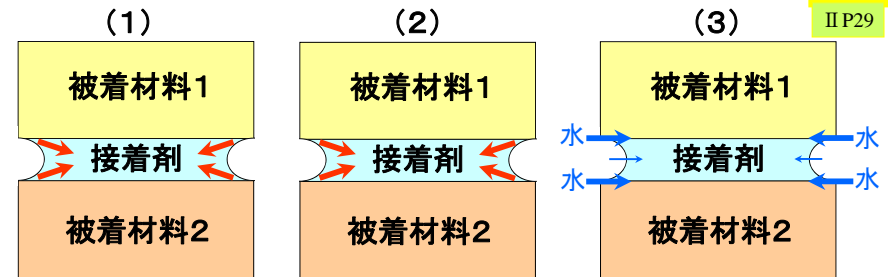
◆接着接合は、「界面」を有する接合で、界面は、「ばらつきの要因」が非常に多く、常に同じ状態にコントロールすることは非常に困難なため、界面破壊をすると接着強度のばらつきが大きくなる。



◆接着剤の内部で破壊する「凝集破壊」の場合は、接着剤の物性だけで強度が決まるので、接着強度のばらつきが小さい。

界面接着性向上の必要性—接着部の脆弱箇所—

I P179 II P29



- ・硬化収縮応力
- ・加熱硬化冷却時の熱応力
- ・冷熱サイクルにおける熱応力
- ・繰り返し応力

接着端部の界面に
応力が集中する

接着部への水分の
浸入による劣化
水分により界面の
結合が切れる

水分は接着端部の界面
から浸入しやすい

接着端部の界面が最もやられやすい。界面破壊は禁物

(7) 接着強度の実力値(設計基準強度) II P208-219

◆通常用いられている破断強度や平均値、初期の室温状態での強度は、真の接着強度とは言えない。

◆接着強度を低下させる各種因子を考慮して、接着部が健全な状態で耐える上限の強度を「接着の実力強度」と考える。その強度を「設計基準強度」とする。

◇接着強度の実力値に影響する因子

- (1) 接着強度の温度依存性
- (2) 接着強度のばらつき ←説明済
- (3) 内部破壊の発生
- (4) 劣化による強度低下とばらつきの増大 ←説明済

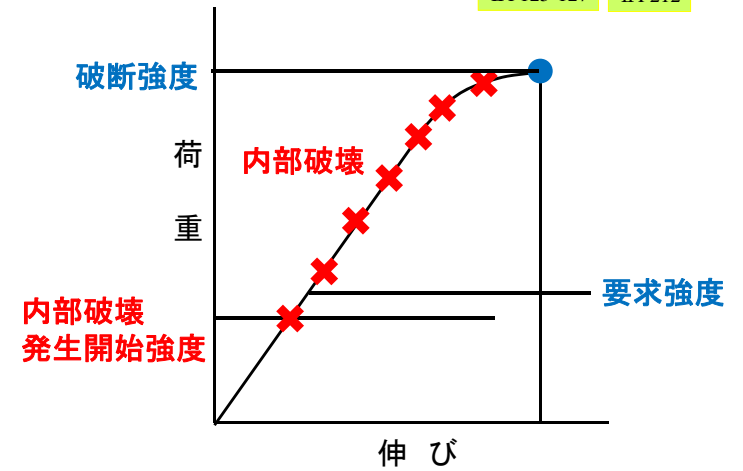
◆実際の設計においては、設計基準強度で設計してはならず、安全率を見込んだ強度を用いる。これが、「設計許容強度」である。

設計許容強度 = 設計基準強度 / 安全率

◆接着部に加わる力の大きさ ≤ 設計許容強度 となるように設計すること。

内部破壊の発生—接着部の破断以前に生じる破壊—

II P125-127 II P212



- ◆接着部の破壊は、低い荷重が加わった段階で始まっている
- ◆要求強度以下で内部破壊が生じることも多い。

内部破壊はどのくらいの荷重負荷で生じるか I P128 II P126,212

界面破壊と凝集破壊での引張りせん断試験中に発生するAEの発生開始荷重比と、発生開始時点から破断に至るまでに発生した大きな音の発生回数の測定例

破壊状態	サンプル	AE発生開始荷重比	破断までのAE発生回数
界面破壊	1	7 %	25 回
	2	8 %	17 回
	3	31 %	117 回
	平均	15 %	53 回
凝集破壊	1	51 %	19 回
	2	76 %	11 回
	3	100 %	1 回
	平均	76 %	10 回

AE:Acoustic Emission

SUS/SUS 柔軟二液アクリル系接着剤

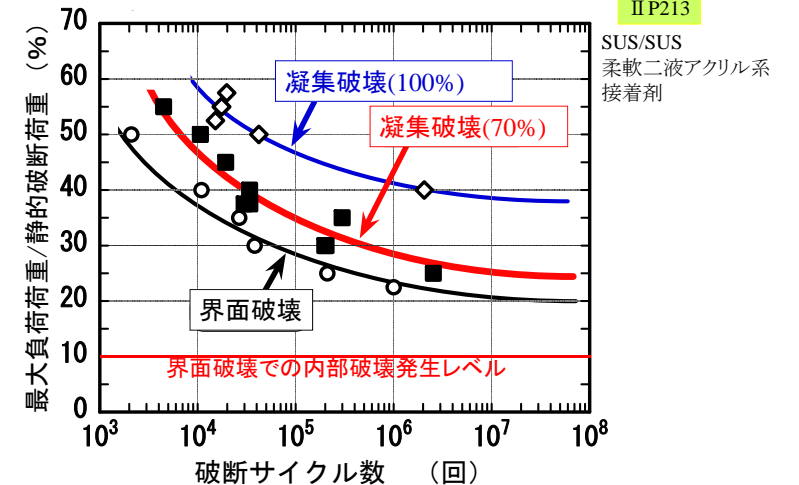
AE発生開始荷重比 = AE発生開始荷重 / 破断荷重

- ◆界面破壊の場合は、破断荷重の10%以下の荷重でも内部破壊が生じている。接着剤と被着材の界面での破壊(クラック状:脆性破壊的)
- ◆凝集破壊の場合は、破断荷重の50%以上の荷重が加わると内部破壊が生じている。接着剤の内部での破壊(接着剤の塑性破壊:延性破壊的)

➡ 信頼性 : 凝集破壊 >> 界面破壊

凝集破壊率と疲労特性の比較例 (ステンレス鋼板、アクリル系接着剤)

I P130 II P72,127,177 II P213



SUS/SUS 柔軟二液アクリル系接着剤

凝集破壊率が高いほど疲労特性は向上する。冷熱繰返しでも同様。

高温での平均破断強度に対する設計許容強度比 P_s^* の計算結果

内部破壊係数 h	劣化後		設計基準強度比 P^* (安全率 $S=1.0$)			設計許容強度比 $P_s^*=P^*/S$		
	保持率 η_y	ばらつき係数 D_y	$P^*=h \cdot D_y \cdot \eta_y$			安全率 $S=1.5$	安全率 $S=2.0$	
						$P^*/1.5$	$P^*/2.0$	
静荷重負荷 $h_1=0.50$	0.75	0.7	0.2625 (1/4)	0.1750 (1/6)	0.1313 (1/8)			
		0.6	0.2250 (1/4)	0.1500 (1/7)	0.1125 (1/9)			
		0.5	0.1875 (1/5)	0.1250 (1/8)	0.0938 (1/11)			
		0.4	0.1500 (1/7)	0.1000 (1/10)	0.0750 (1/13)			
		(0.3)	0.1125 (1/9)	0.0750 (1/13)	0.0563 (1/18)			
		0.7	0.1750 (1/6)	0.1167 (1/9)	0.0875 (1/11)			
	0.50	0.6	0.1500 (1/7)	0.1000 (1/10)	0.0750 (1/13)			
		0.5	0.1250 (1/8)	0.0833 (1/12)	0.0625 (1/16)			
		0.4	0.1000 (1/10)	0.0667 (1/15)	0.0500 (1/20)			
		(0.3)	0.0750 (1/13)	0.0500 (1/20)	0.0375 (1/27)			
		0.7	0.2363 (1/4)	0.1575 (1/6)	0.1182 (1/8)			
		0.6	0.2025 (1/5)	0.1350 (1/7)	0.1013 (1/10)			
低サイクル疲労 $h_2=0.45$	0.75	0.5	0.1688 (1/6)	0.1125 (1/9)	0.0844 (1/12)			
		0.4	0.1350 (1/7)	0.0900 (1/11)	0.0675 (1/15)			
		(0.3)	0.1013 (1/10)	0.0675 (1/15)	0.0507 (1/20)			
		0.7	0.1575 (1/6)	0.1050 (1/10)	0.0788 (1/13)			
		0.6	0.1350 (1/7)	0.0900 (1/11)	0.0675 (1/15)			
		0.5	0.1125 (1/9)	0.0750 (1/13)	0.0563 (1/18)			
	0.50	0.4	0.0900 (1/11)	0.0600 (1/17)	0.0450 (1/22)			
		(0.3)	0.0675 (1/15)	0.0450 (1/22)	0.0338 (1/30)			
		0.7	0.2363 (1/4)	0.1575 (1/6)	0.1182 (1/8)			
		0.6	0.2025 (1/5)	0.1350 (1/7)	0.1013 (1/10)			
		0.5	0.1688 (1/6)	0.1125 (1/9)	0.0844 (1/12)			
		0.4	0.1350 (1/7)	0.0900 (1/11)	0.0675 (1/15)			
高サイクル疲労 $h_2=0.25$	0.75	(0.3)	0.0563 (1/18)	0.0375 (1/27)	0.0282 (1/35)			
		0.7	0.0875 (1/11)	0.0583 (1/17)	0.0438 (1/23)			
		0.6	0.0750 (1/13)	0.0500 (1/20)	0.0375 (1/27)			
		0.5	0.0625 (1/16)	0.0417 (1/24)	0.0312 (1/32)			
		0.4	0.0500 (1/20)	0.0333 (1/30)	0.0250 (1/40)			
		(0.3)	0.0375 (1/27)	0.0250 (1/40)	0.0188 (1/53)			
	0.50	0.7	0.1313 (1/8)	0.0875 (1/11)	0.0657 (1/15)			
		0.6	0.1125 (1/9)	0.0750 (1/13)	0.0563 (1/18)			
		0.5	0.0938 (1/11)	0.0625 (1/16)	0.0469 (1/21)			
		0.4	0.0750 (1/13)	0.0500 (1/20)	0.0375 (1/27)			
		(0.3)	0.0563 (1/18)	0.0375 (1/27)	0.0282 (1/35)			
		0.7	0.0875 (1/11)	0.0583 (1/17)	0.0438 (1/23)			

II P218

$$D_y = \rho_y / \mu_y$$

(8) 耐久性は設計マター—耐水性の作り込み—

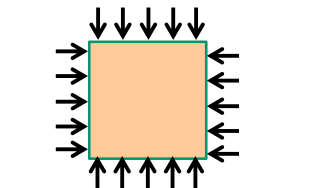
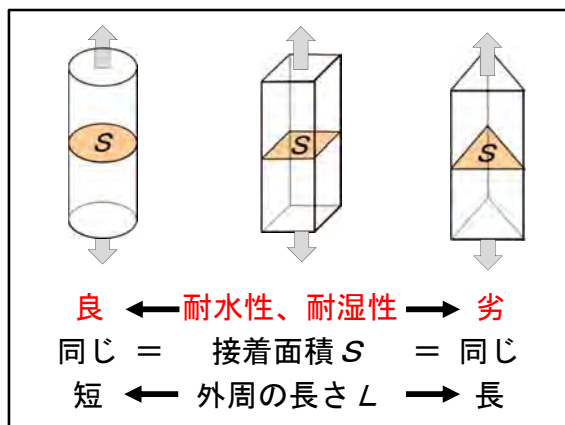
- ◆環境劣化を抑える設計はなされているか？
環境耐久性は、素材と接着剤の組合せで決まるものではなく、要求条件に合わせて作り込むものである
- ◆耐水・耐湿劣化は、接着部の形状・寸法によって、任意に変化させることができる。

水分劣化における接着部の形状・寸法の影響

II P94-95

接着部の面積が同じで形状が異なる場合

II P152-157

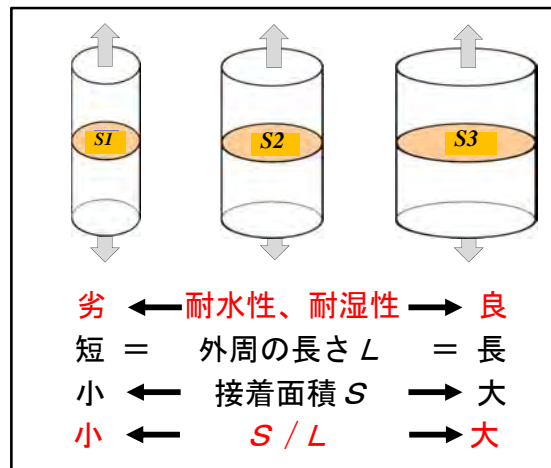


◆被着材が水分を通さない場合は、水分は接着部の外周部のみから浸入する

◆面積が同じでも、形状によって、外周の長さは異なる

◆外周(水の入り口)の長さが長いほど吸水量が増加するため、劣化が早い

接着部の形状が同じで面積が異なる場合



◆面積 S が増えると外周長さ L は増加するので、浸入する水分量は増加する。

◆面積は外周比の二乗で増加するため、単位接着剤量に対する吸水量は下がる。

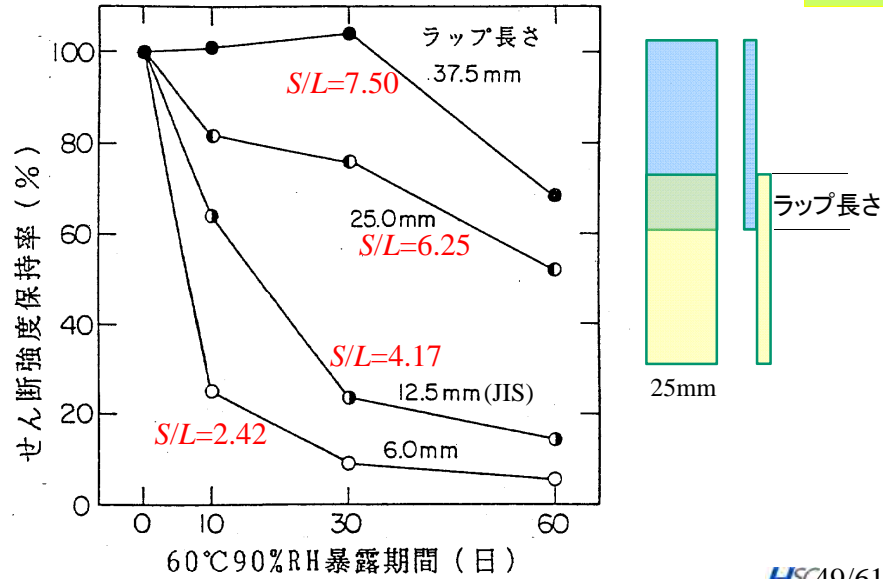
◆外周から中心までの距離も長くなるため、中心部まで浸入する時間は長くなる。



◆同一形状の場合、面積 S が大きくなるほど耐水性は良くなる。

引張りせん断試験片(幅25mm)のラップ長を変化させた場合の耐湿性の違いの例(60°C90%RH、ステンレス、アクリル系接着剤)

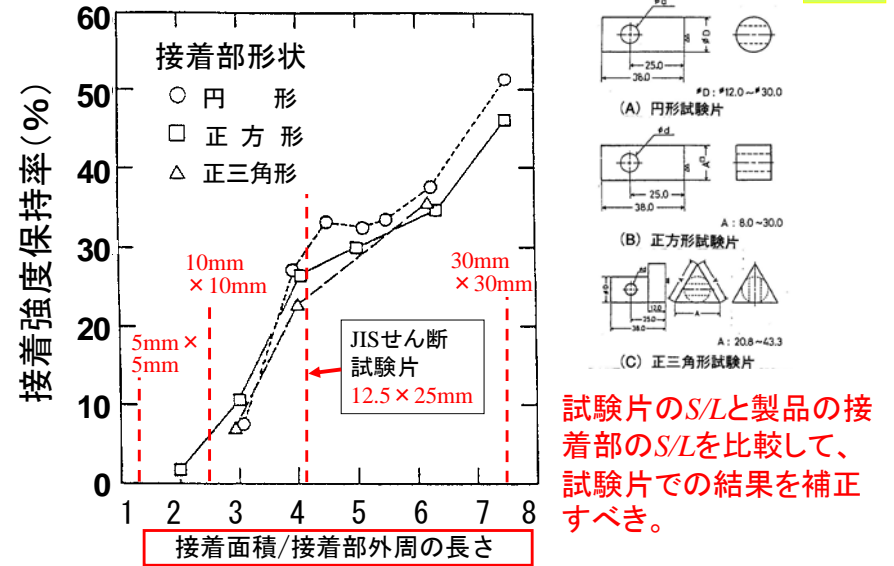
II P154



HSC49/61

S/Lと耐湿性の関係 (ステンレス、アクリル系接着剤、80°C90%RH5日間暴露後)

II P157

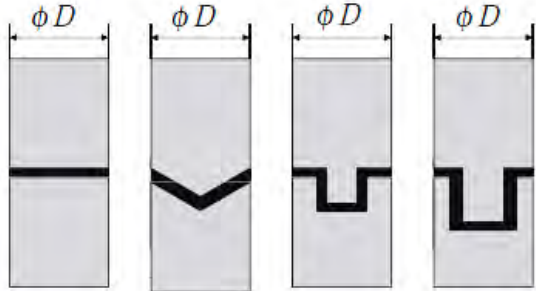


試験片のS/Lと製品の接着部のS/Lを比較して、試験片での結果を補正すべき。

HSC50/61

S/Lを大きくする継手設計の一例

II P95
II P157



外周の長さ	$L1 = L2 = L3 = L4$
接着面積	$S1 < S2 < S3 < S4$
$\epsilon = S/L$	$\epsilon1 < \epsilon2 < \epsilon2 < \epsilon4$

劣 ← 耐湿性、耐水性 → 優

接着部の設計を行う時には、少しでもS/Lが大きくなるように設計すること

HSC
51/61

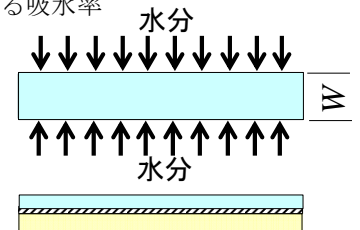
細長い接着部の水分劣化に及ぼす幅Wの影響

接着部の幅がWの細長い接着部への水分の拡散量は、Fickの拡散の法則に従っている。(凝集破壊の場合)

幅Wの端からの距離xにおけるt時間暴露後の吸水率の分布を求める計算式(Fickの拡散式)

$$\frac{M_x}{M_m} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)} \cdot \sin \frac{(2j+1)\pi x}{W} \cdot \exp \frac{-(2j+1)^2 \pi^2 D t}{W^2} \quad (1)$$

- M_x : 時間 t、端部からの距離 x における吸水率
- M_m : 飽和吸水率
- W : 接着部の幅
- D : 拡散係数
- M : 時間 t における吸水率
- b : 試料長さ



$$D = \frac{\Delta M^2 \pi}{16 M_m^2 \Delta t} \cdot \frac{1}{(1/W + 1/b)^2} \quad (2)$$

HSC52/61

細長い接着部における接着部の幅と水分劣化の加速倍率

接着部の幅 W と、平均吸水率が同一になる時間 t の関係
(Fickの拡散の式での計算結果)

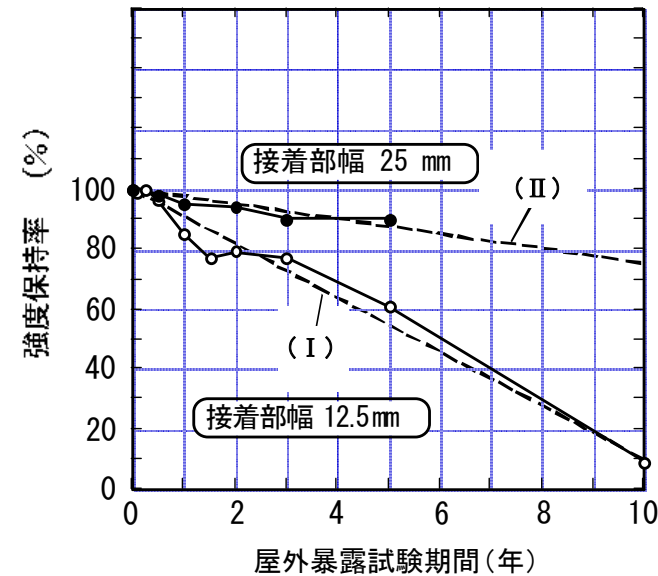
接着部の幅 W (mm)	到達時間 t (hr)
25 (1)	360 (1)
50 (2)	1440 (4)
75 (3)	3240 (9)
100 (4)	5760 (16)
125 (5)	9000 (25)

$$t = (W/W_0)^2$$

- ◆同一保持率まで低下する時間は、接着部の幅 W の比の2乗で長くなる
- ◆例えば、幅 W が2倍になれば劣化時間は4倍かかり、 W が3倍になると9倍の時間がかかる。
- ◆逆に、幅 W が1/2倍になれば1/4の時間で劣化を起こす。 W が1/3倍になると1/9の時間で劣化を起こす。
- ◆試験片の幅と、製品の接着部の幅の比を確認することはきわめて重要。

細長い接着部における接着部の幅と屋外暴露耐久性の例

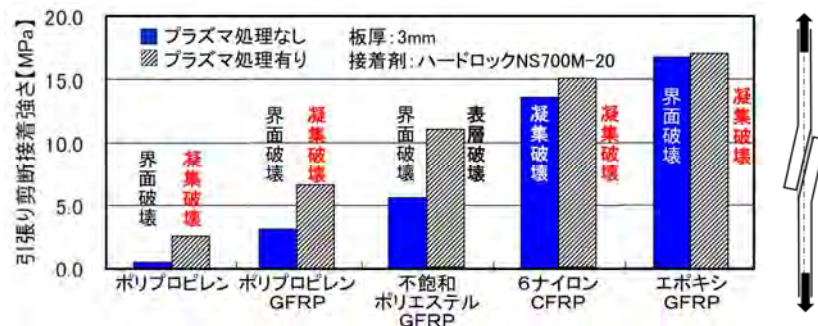
II P165



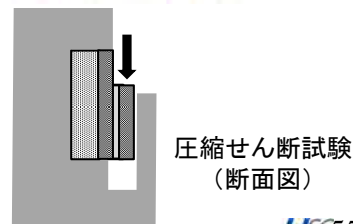
- ◆破線(II)の傾きは、破線(I)の傾きを1/4にしたものである。
- ◆実験結果でも、幅25mmでは幅12.5mmの1/4の速度で劣化している。

(9) 接着評価法の最適化 ①せん断強度試験

- ◆板/板の引張りせん断試験では樹脂材料接着の適切な強度評価は困難なため、**圧縮せん断試験への移行が望ましい。**



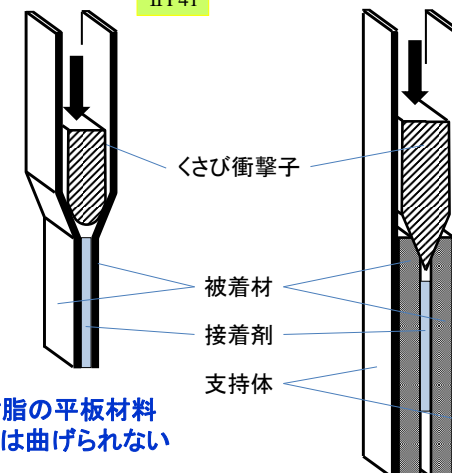
引張りせん断強度は被着材自体の強度に支配される



(9) 接着評価法の最適化 ②くさび衝撃強度

多種の被着材料に対応できる試験片形状の検討が必要。

(A) 現行の試験方法 II P41



(9)接着評価法の確立 ③信頼性評価法

- ・破断の前に生じる**内部破壊の評価**が重要(AEなど)
- ・平均値ではなくばらつきを考慮した**統計的扱い**
- ・その他、**経年劣化の定量的評価** II P220-235
- ・**非破壊検査法の開発**
組立工程での短時間での検査方法、判定基準
整備工場での評価の方法、判定基準

(10)その他の検討課題

- ◆接着部の補修方法
- ◆接着部の解体方法
- ◆短繊維CFRPの環境・生体への影響調査
 - ・廃却時燃焼→導電性の短繊維CFが空気中に飛散
→電波障害、短絡による機器損傷、人体への吸引
 - ・地球環境保護のためのCO2削減を目的とした車体軽量化が
新たな環境問題の種とならないよう、十分な事前調査が必要
 - ・企業及び技術者の第一の社会的責任

さいごに

- ◆革新的開発における独自性・独創性の発揮
 - ・**先行事例**に引きずられると画期的な技術は生まれない。
 - ・未経験の技術の「**食わず嫌い**」は開発を阻害する。
 - ・材料の良い面、悪い面を知り尽くす。
正しい知識の習得と知識の深掘りをする
とことん自分で触ってみる
不明点はまずやってみる。その上で理論的に正しいか考える。
材料に過大な期待をしない
材料の欠点をカバーする「**使いこなし**」の**技術開発**が必要
- ・日本が強い技術(例:鋼板、溶接)をとことん使いこなす。
従来からの金属材料による軽量化技術の開発にも重きをおいて、**最低限の樹脂化と金属材料との最適なハイブリッド構造の開発**にもより注力すべきではないだろうか。