

鋼橋の疲労に対する耐久性向上と 合理的な維持管理技術

JSSC鋼橋の構造性能と耐久性研究委員会
疲労性能研究部会

疲労性能研究部会の活動

鋼橋の強靱化・長寿命化研究委員会 疲労強度研究部会(2015-2020) の成果

疲労強度向上WG (WG長:関西大学 石川敏之)

ピーニング処理後の溶接継手の疲労強度の規定化

維持管理WG (WG長:名古屋大学 判治剛)

疲労き裂検出の合理化(塗膜下・保護性錆び下のき裂)
き裂の当て板補強の合理的設計法

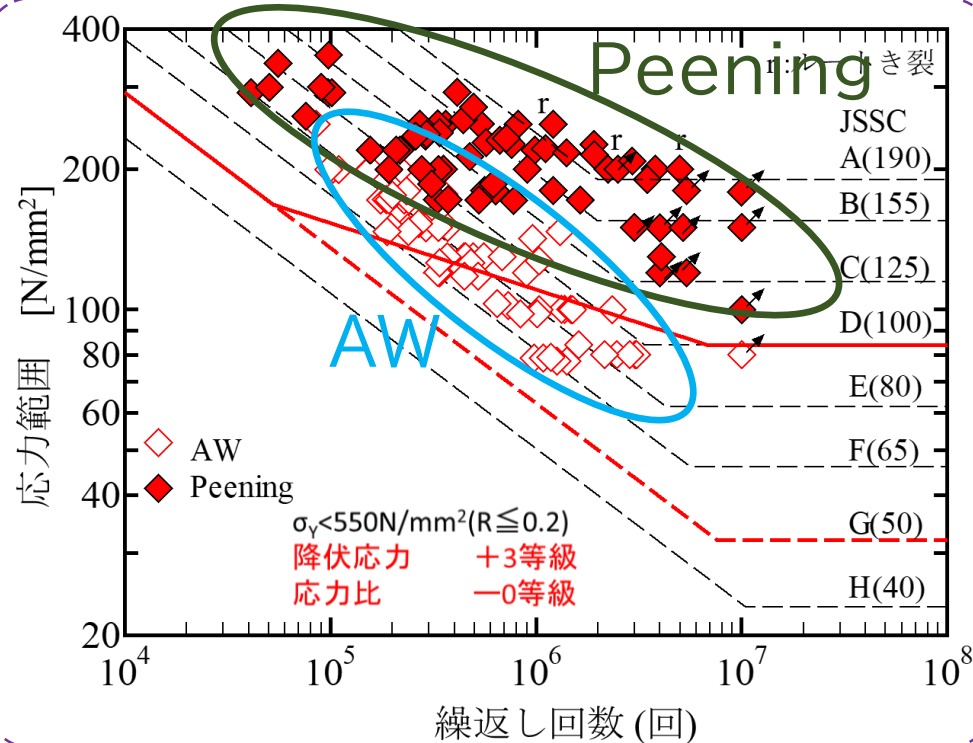
進展解析SWG (法政大学 内田大介を中心)

面外ガセット継手の板厚効果
局部応力を用いた疲労強度評価法

疲労強度向上WG（WG長：関西大学 石川敏之）

ピーニング処理後の溶接継手の疲労強度の規定化

鋼橋の強靱化・長寿命化研究委員会 疲労強度研究部会(2015-2020) の成果



既往のデータ収集
部会での疲労試験(R, σ_y , 予荷重)



UIT
(Ultrasonic Impact Peening)



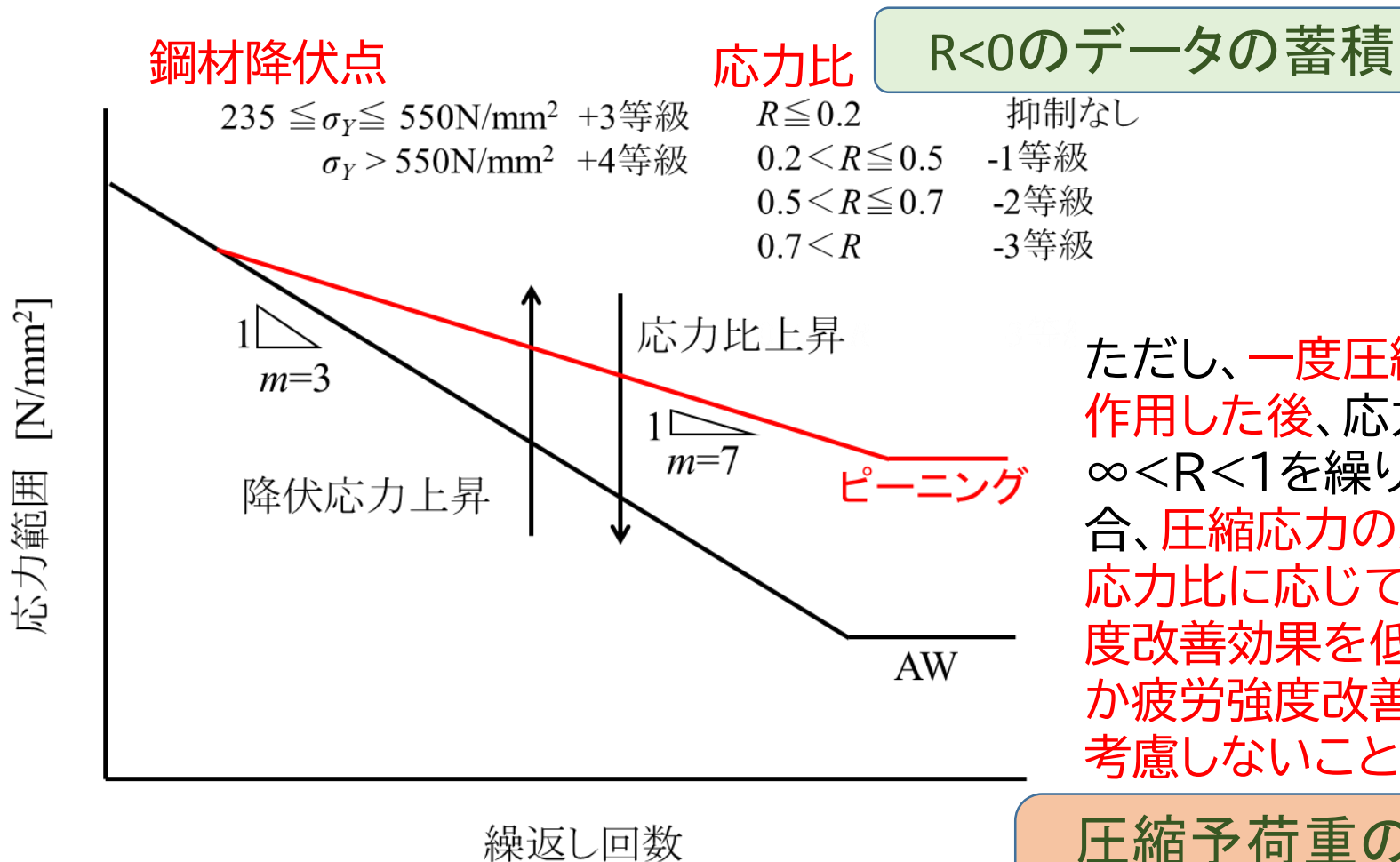
母材打撃HP
(母材打撃ハンマーピーニング)



PPP
(エア式ニードルピーニング)

他の継手形式・大型構造物への適用性

荷重非伝達十字継手・面外ガセット継手に対する ピーニング処理後の疲労強度等級の提案



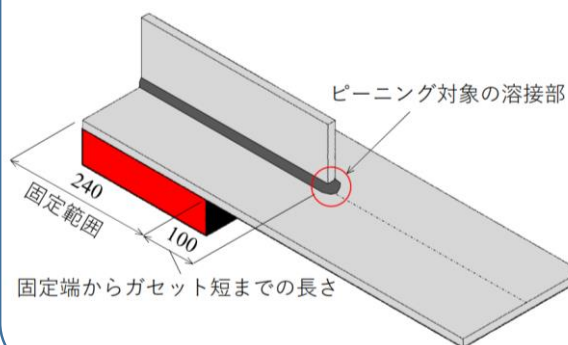
他のピーニング処理に対する適用性

圧縮予荷重の影響
について定量的評価

圧縮予荷重のピーニング処理効果に対する影響

2.1 ピーニング処理方法

ピーニング処理時の 固定条件を統一



UIT処理



母材打撃HP



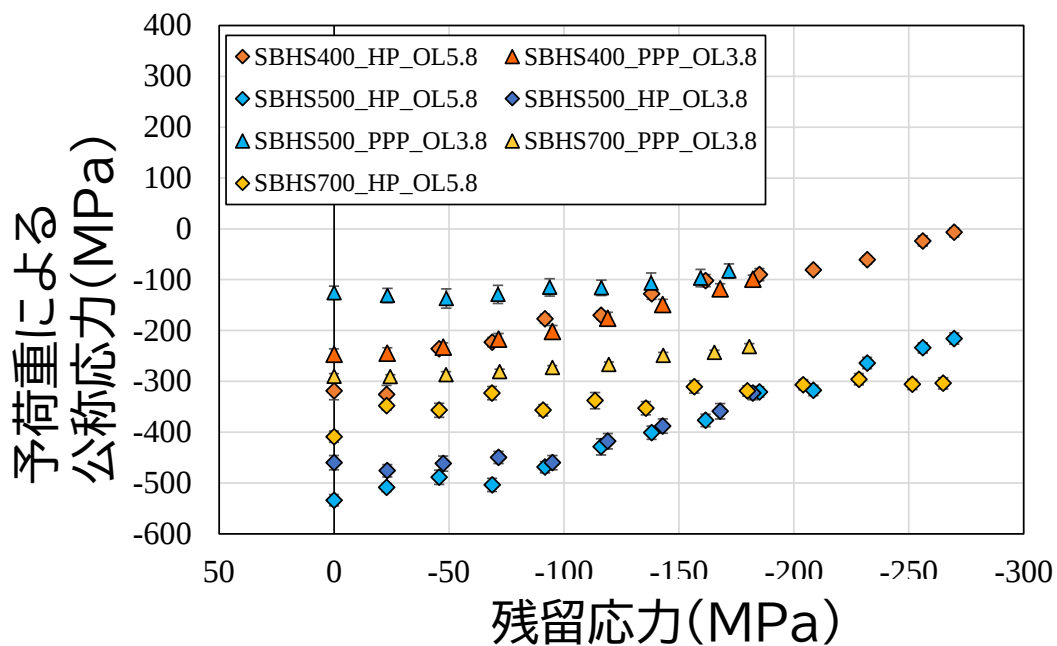
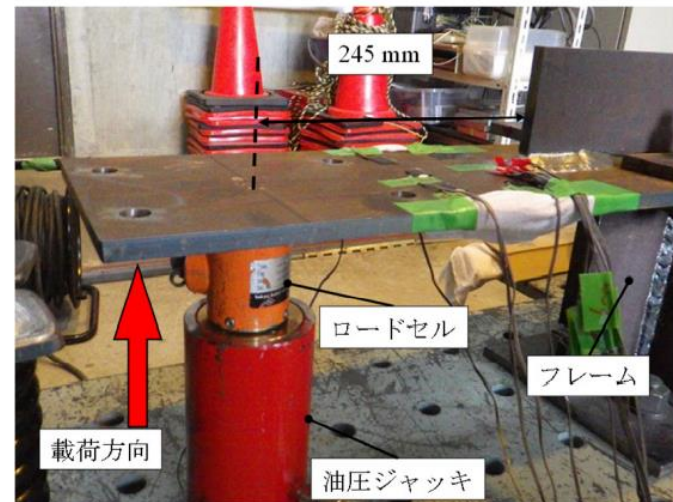
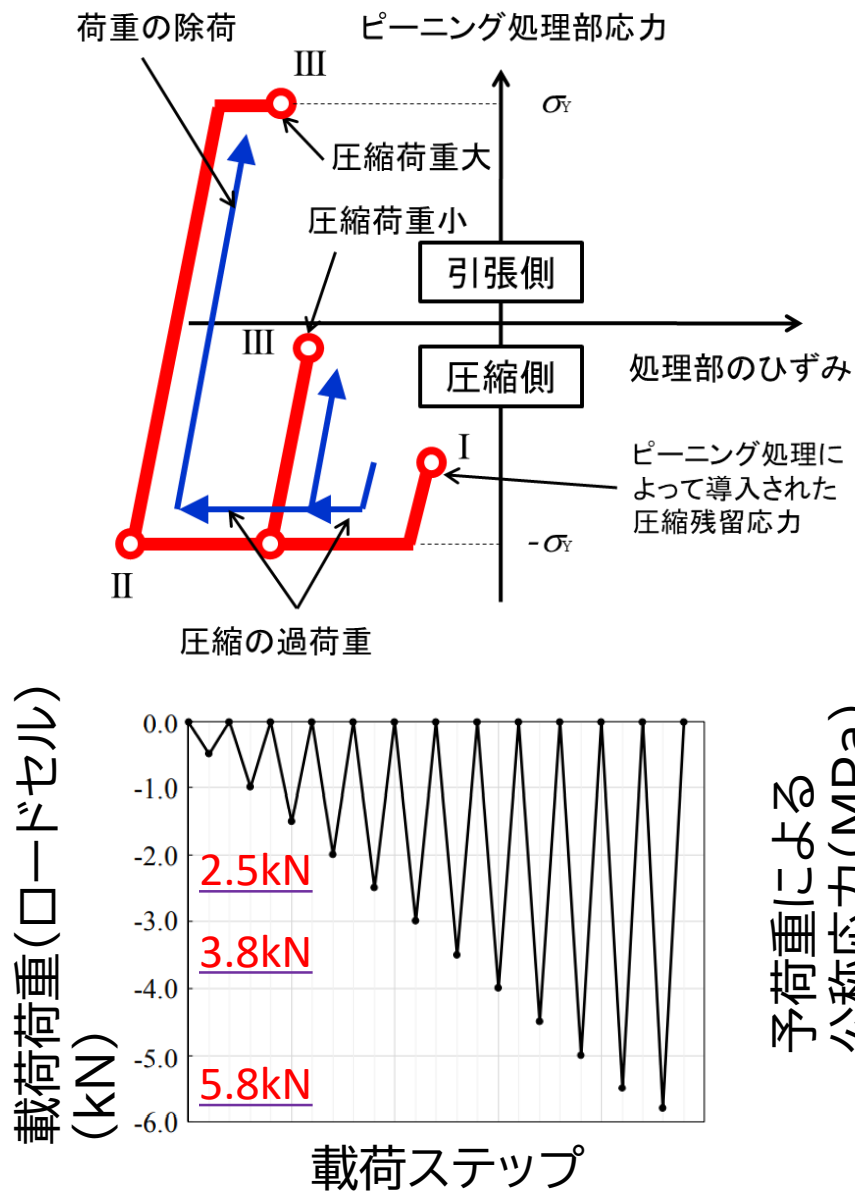
PPP処理



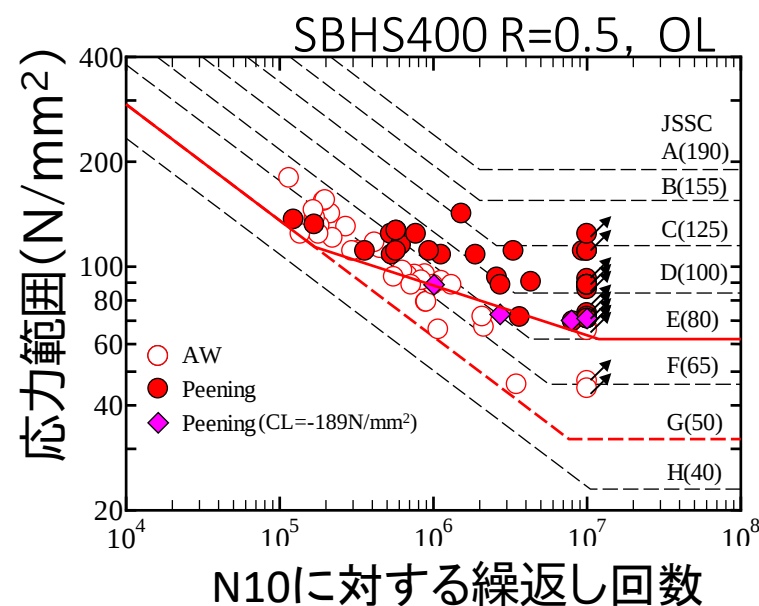
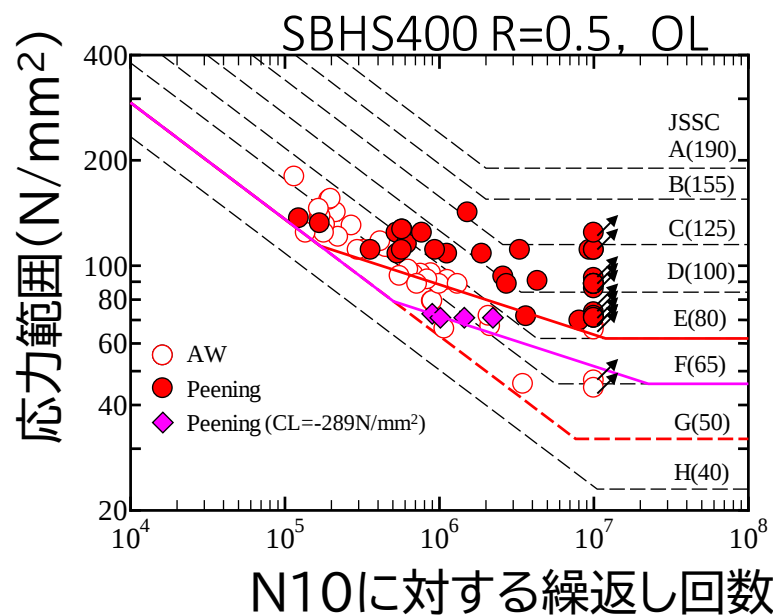
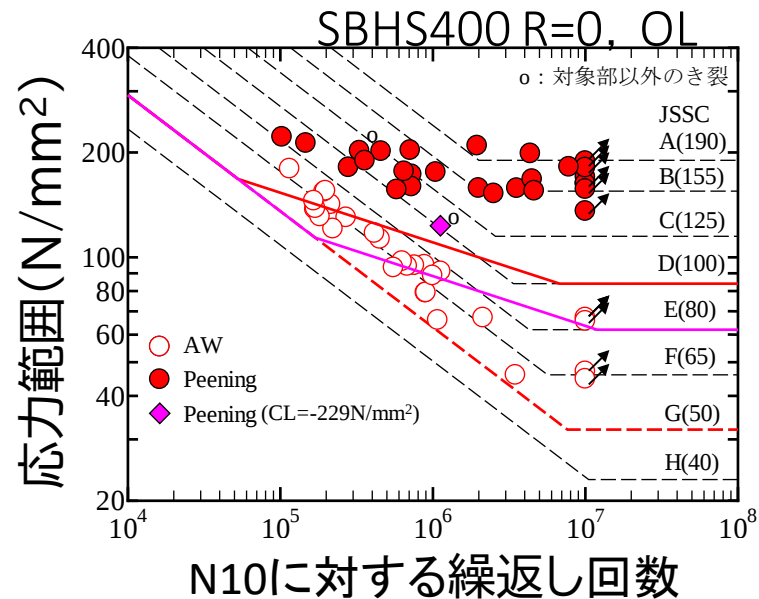
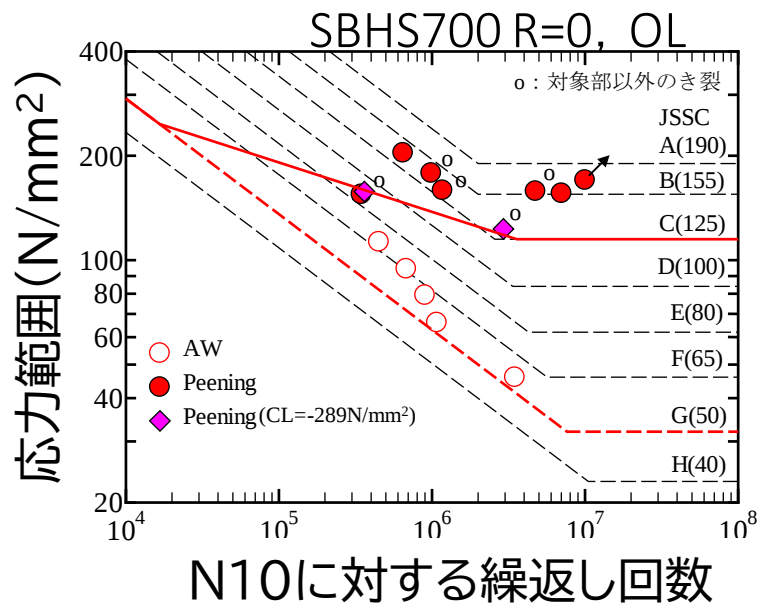
	SBHS400	SBHS500	SBHS700
UIT	10	10	10
母材打撃HP	10	10	10
PPP処理	10	10	10

計90体の疲労試験を実施

圧縮予荷重による残留応力の低下傾向



疲労試験結果と圧縮予荷重の影響



疲労試験結果と圧縮予荷重の影響

(a) $235 \leq \sigma_Y \leq 550 \text{N/mm}^2$

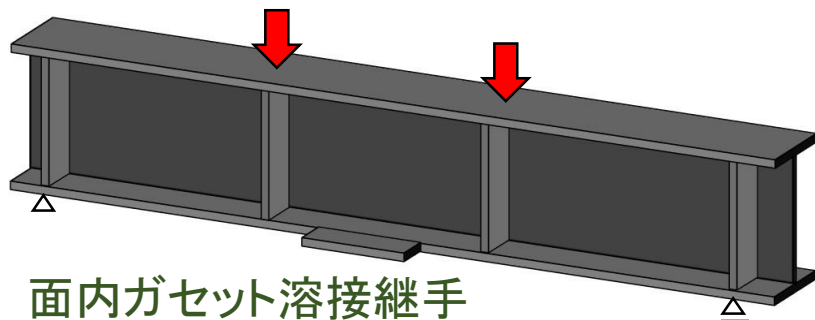
応力比	架設時に作用した圧縮応力 σ_{COL}	
	$\sigma_{\text{COL}} \geq -0.5\sigma_Y$	$-0.5\sigma_Y > \sigma_{\text{COL}} \geq -0.8\sigma_Y$
$R \leq 0.2$	+4等級	+3等級
$0.2 < R \leq 0.5$	+3等級	+2等級
$0.5 < R \leq 0.7$	+2等級	+1等級
$0.7 < R$	+1等級	改善効果なし

(b) $\sigma_Y > 550 \text{N/mm}^2$

応力比	架設時に作用した圧縮応力 σ_{COL}	
	$\sigma_{\text{COL}} \geq -0.5\sigma_Y$	$-0.5\sigma_Y > \sigma_{\text{COL}} \geq -0.8\sigma_Y$
$R \leq 0.2$	+3等級	+2等級
$0.2 < R \leq 0.5$	+2等級	+1等級
$0.5 < R \leq 0.7$	+1等級	改善効果なし
$0.7 < R$	改善効果なし	改善効果なし

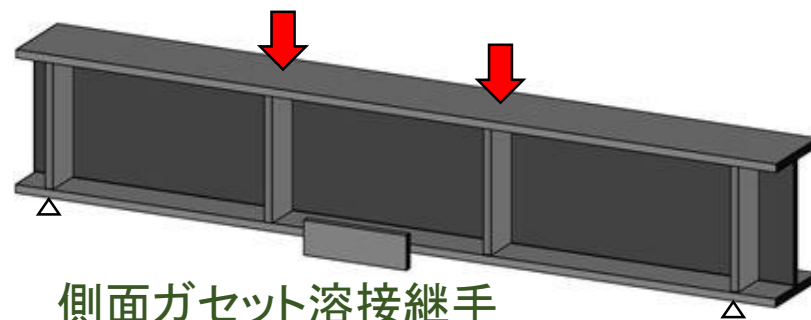
他の継手形式・大型構造物への適用性

疲労強度が低い溶接継手に対するピーニング処理後の 疲労強度の評価



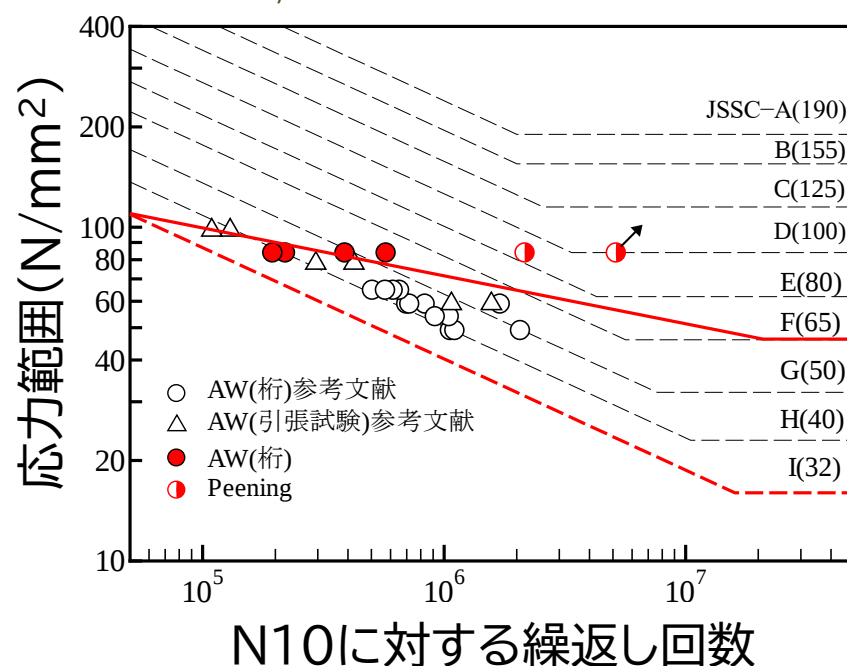
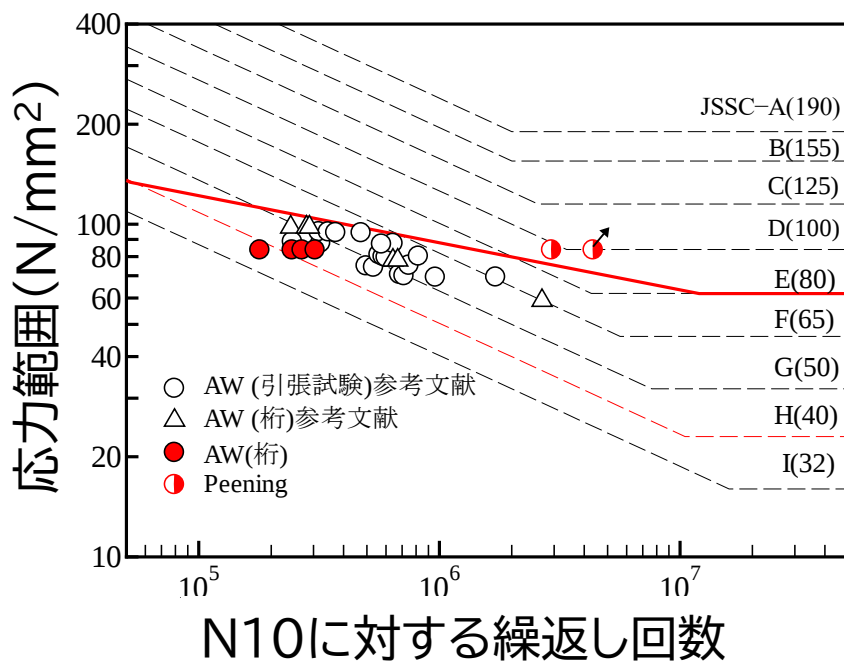
面内ガセット溶接継手

SM490Y, R=0.05



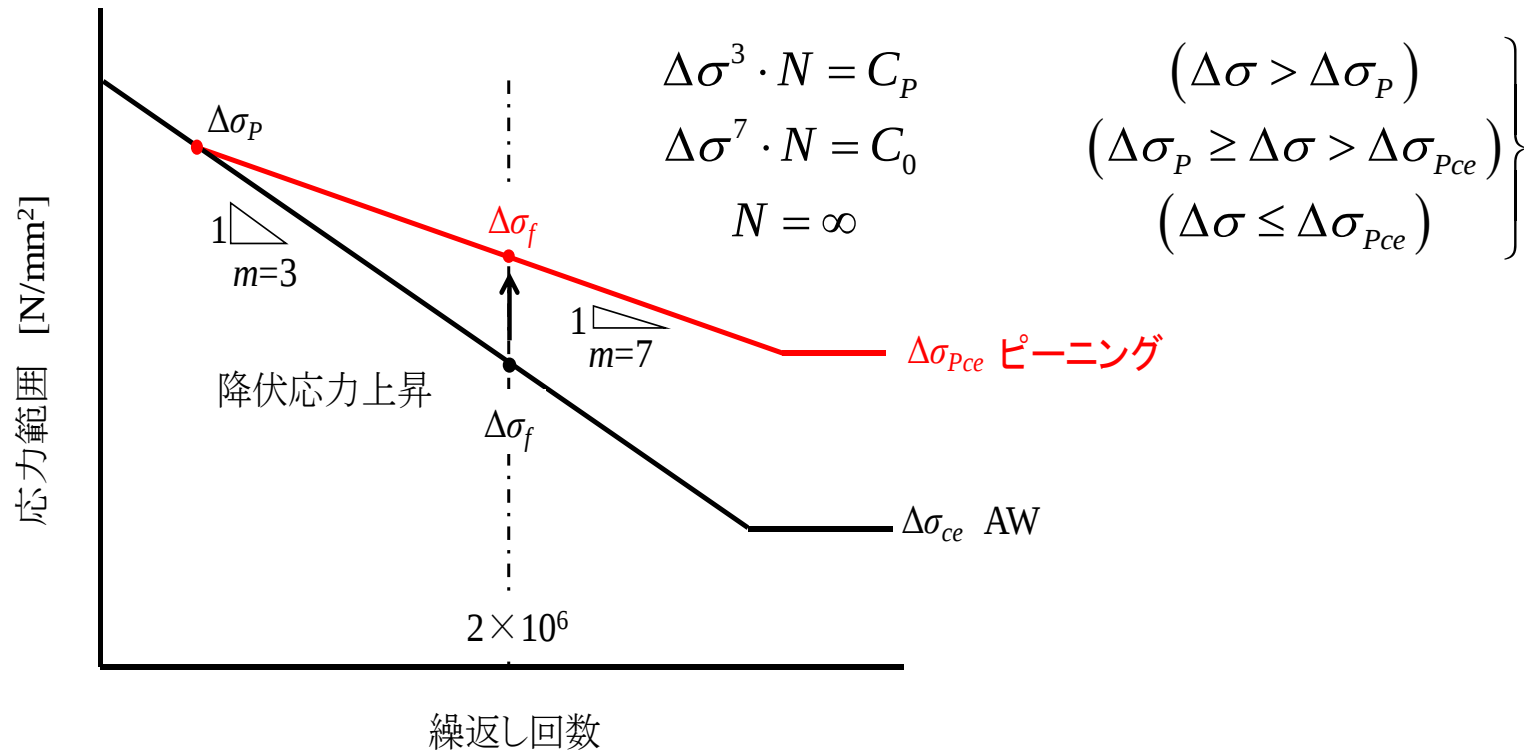
側面ガセット溶接継手

SM490Y, R=0.05



他の継手形式・大型構造物への適用性

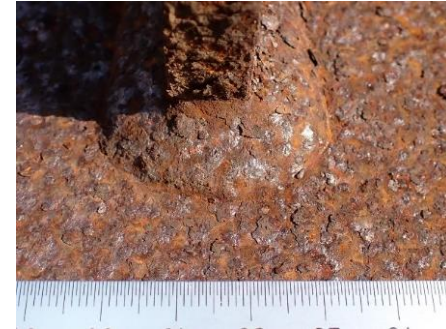
E～I等級の溶接継手に対するピーニング処理後の疲労強度等級の提案



応力比	鋼材の降伏応力の特性値	
	$235\text{N/mm}^2 \leq \sigma_y \leq 550\text{N/mm}^2$	$\sigma_y > 550\text{N/mm}^2$
$R \leq 0.2$	+3等級	+4等級
$0.2 < R \leq 0.5$	+2等級	+3等級
$0.5 < R \leq 0.7$	+1等級	+2等級
$0.7 < R$	改善効果なし	+1等級

WG2 維持管理WG (WG長:名古屋大学 判治剛)

疲労き裂検出の合理化(塗膜下・保護性錆び下のき裂)



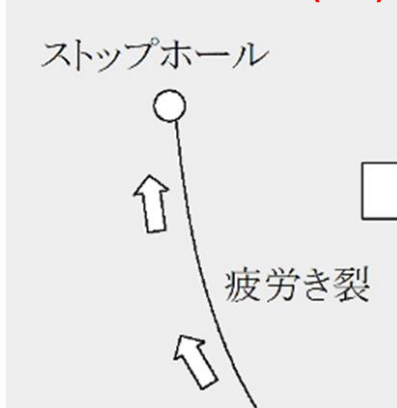
塗膜割れ発見 ➡ 塗膜剥離 ➡ 非破壊

剥離せずき裂有無のスクリーニング

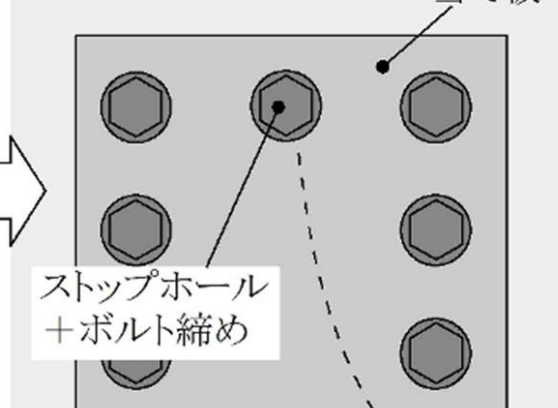
耐候性鋼・保護性錆び下のき裂
はどのように検知できる？

き裂の当て板補強の合理的設計法

ストップホール(SH)

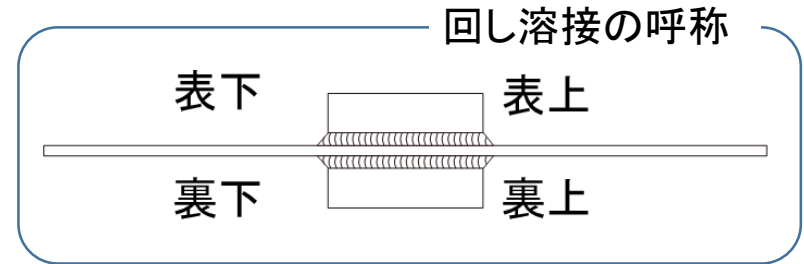
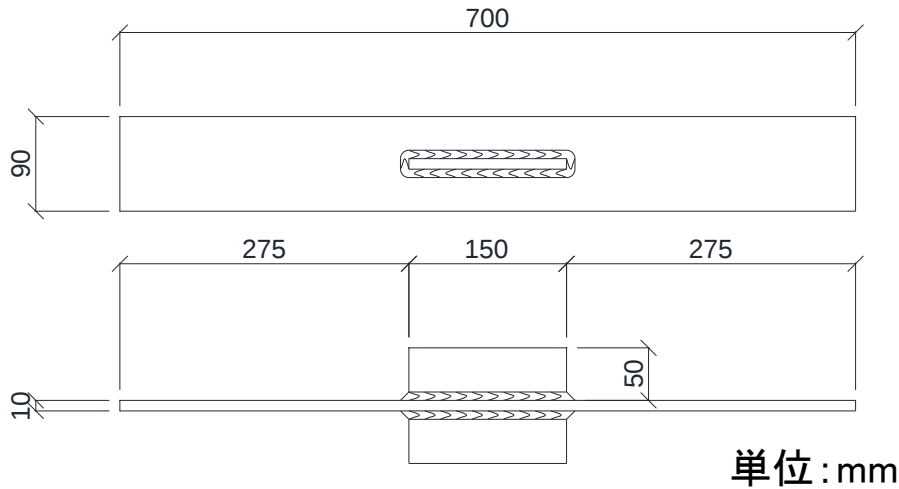


当て板工法



補強後の疲労耐久性を
考慮した当て板補強設計

塗膜下のき裂検知



塗装試験体(重防食塗装): 6体
 膜厚計測 : 317 μ (3体の平均)

対象とする非破壊検査手法

超音波探傷



- ・斜角探触子(入射角45度)
- ・クレーピング波

渦電流探傷



- ・PECT II (相互誘導形)
- ・NORTEC (相互誘導形)

維持管理WG 塗膜下き裂検知

これまでの成果

試験体		塗膜割れ	ECT	UT	エコー (dB)	UTによる推定寸法 (長さmm×深さmm)	破壊試験による寸法 (長さmm×深さmm)	備考
塗装1	表下	無	P, N	SV, CR	53.1	—	き裂無	裏下からのエコー
	裏下	有	P, N	SV, CR	50.9	—	24.6×6.8	
塗装2	裏下	無	P, N	SV	59.9	—	4.4×1.6	
塗装3	表上	無	—	—	—	—	1.4×0.5	見逃し
	表下	無	N?	SV	56	3.0×4.0	1.1×0.5	
塗装4	裏上	有	—	—	—	—	き裂無	
	裏下	有	—	—	—	—	き裂無	
塗装5	表下	有	N?	SV, CR	51.1	14×2.7	15.1×3.7	
塗装6	表上	有	—	—	—	—	1.4×0.5	見逃し
	表下	有	N	SV, CR	56.4	7×4.2	5.7×2.0	

N: NORTECで検出、P: PECTで検出

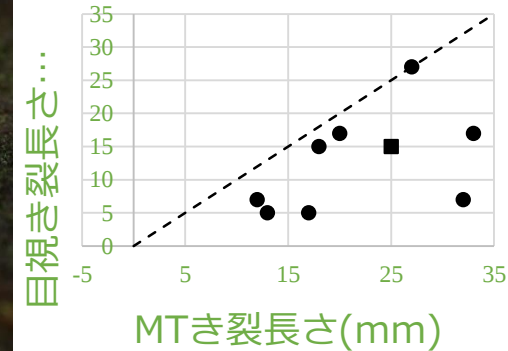
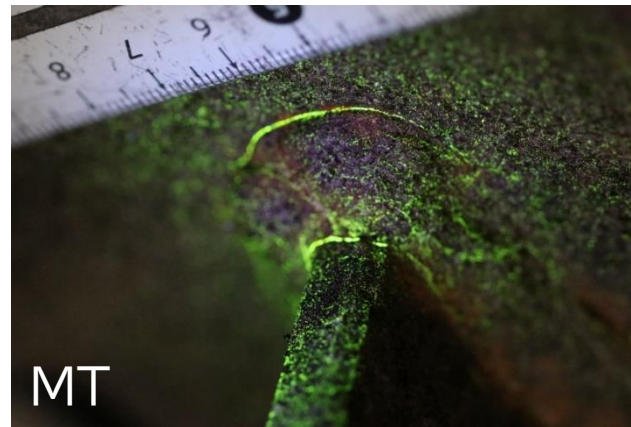
SV: 斜角探傷法、CR: クリーピング波

- ✓ 超音波探傷では、斜角法では深さ1.6mmのき裂、クリーピング波法であれば2mmのき裂を検出していることから、超音波探傷法では塗膜の上から2mm以上のき裂を検出できる。
- ✓ 渦電流探傷法では、深さ1.6mm以上のき裂であれば検出できる。

塗膜のあることによる各探傷法の感度低下について検討

耐候性鋼のき裂検知

実際の耐候性鋼溶接継手に生じた疲労き裂発生状況調査



40年曝露試験体

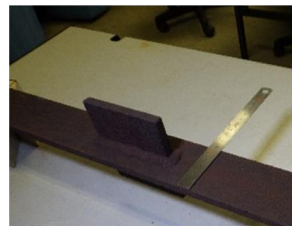
疲労試験
き裂検知法
疲労強度評価

曝露継続

リブ十字すみ肉溶接



面外ガセット



き裂導入後の再曝露およびき裂検知

新たな試験体の製作

疲労き裂導入

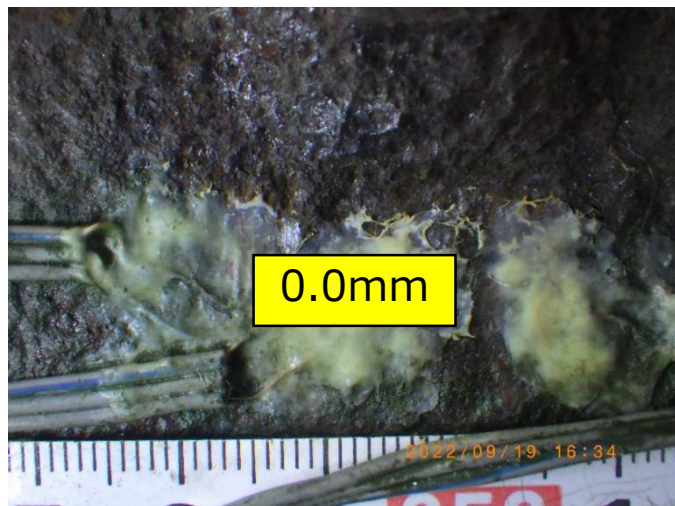
促進環境での曝露

検知法の検討

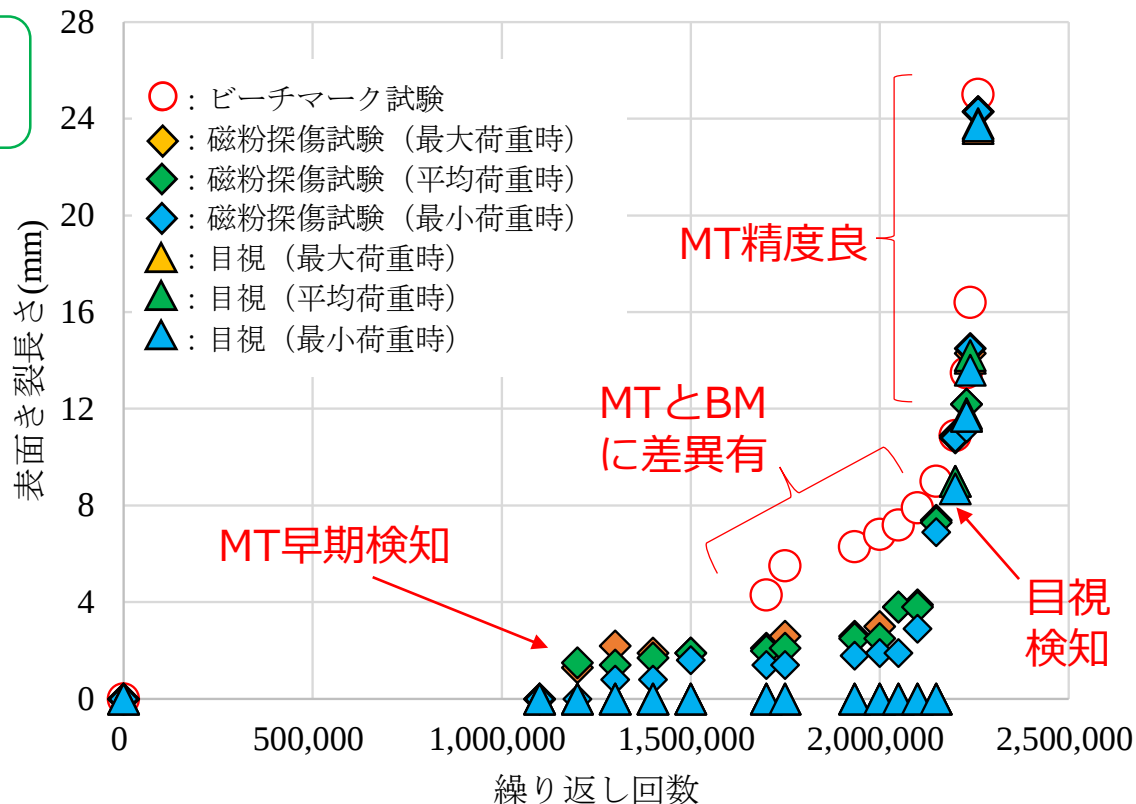
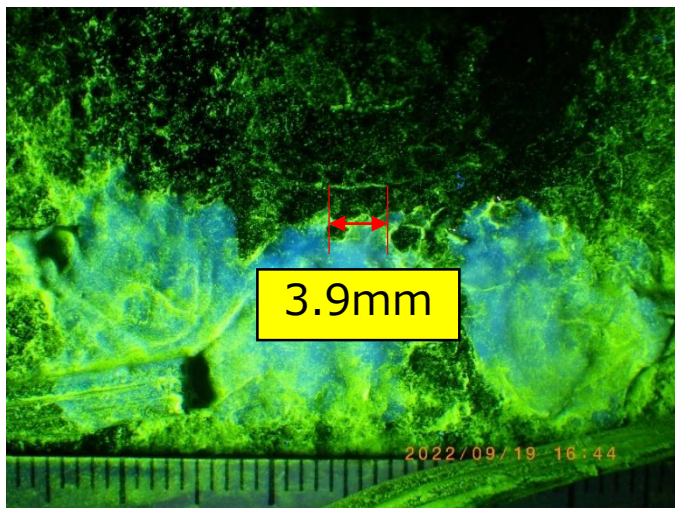
保護性錆び上からのMT

4 5 年暴露試験体 3 体目

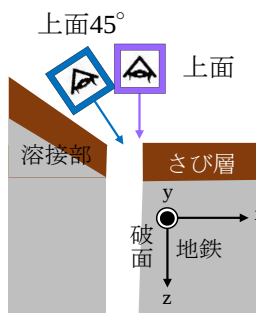
2,100,000回目視（最大荷重時）



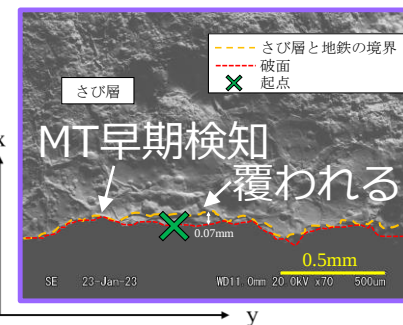
2,100,000回MT（最大荷重時）



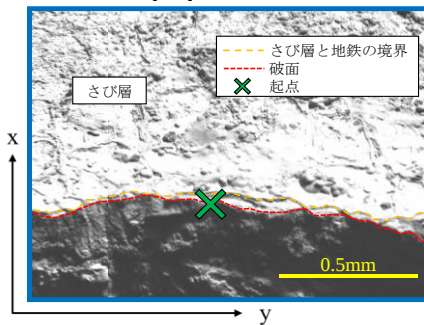
SEM観察



上面から撮影



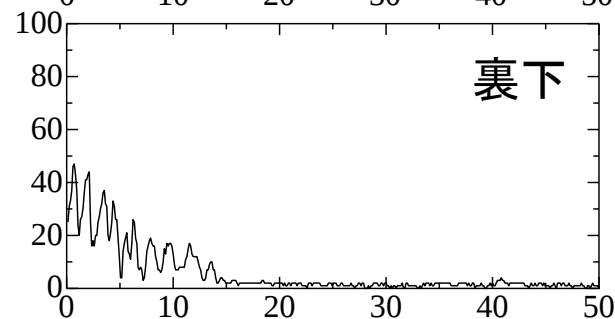
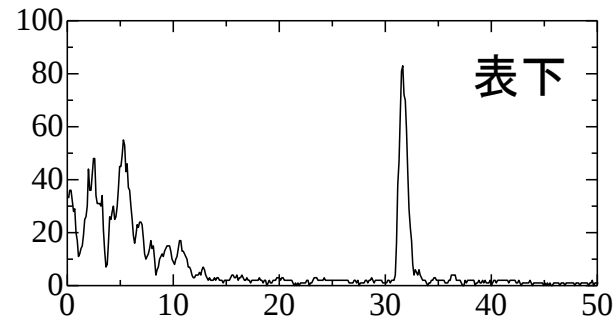
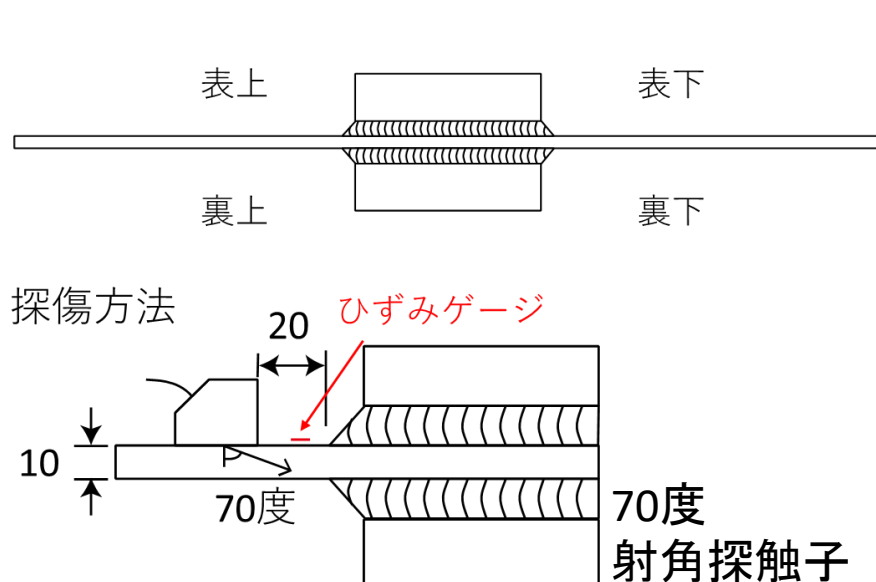
上面45°から



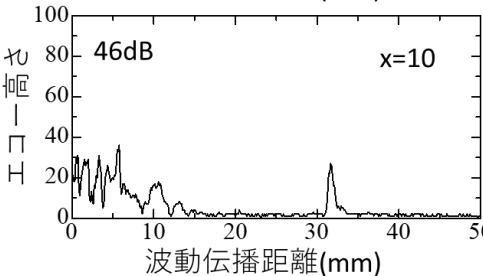
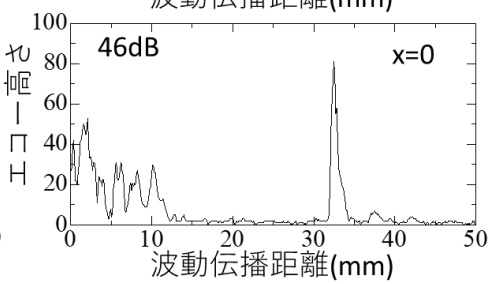
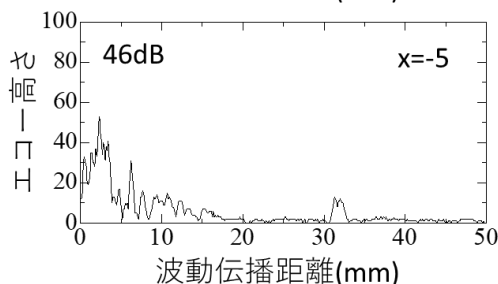
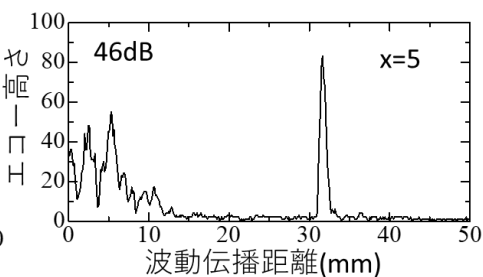
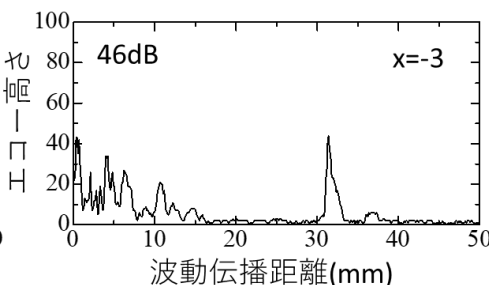
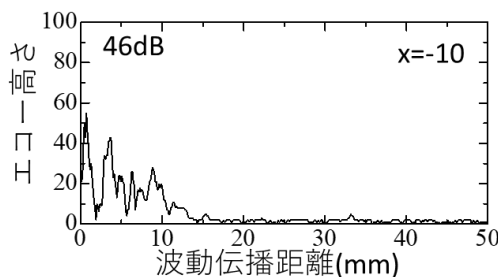
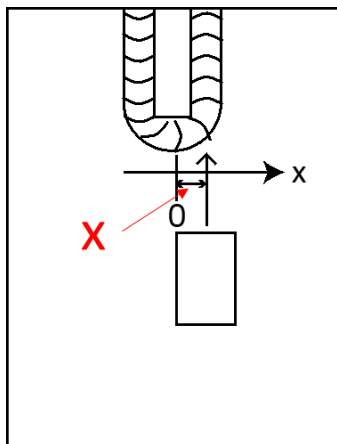
✓ MTによる検出が遅れない場合でも、き裂が大きくなるまでの間、さびの割れ方によりき裂長さの検出精度が悪くなる場合有。

保護性錆び上からの超音波探傷

超音波探傷検査の適用性の検討(45年暴露面外ガセット継手試験体)

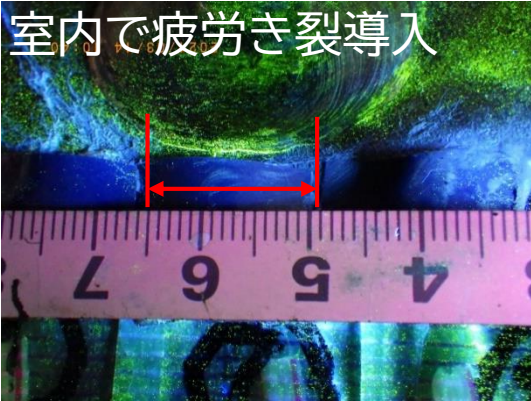


長さ測定(表下) (コーナーエコー)



耐候性鋼のき裂検知（明るい錆び再現）

室内で疲労き裂導入



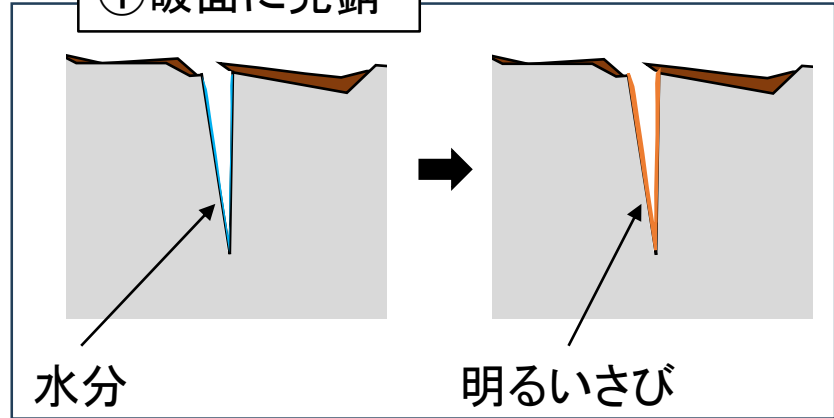
沖縄で大気暴露
2年10か月



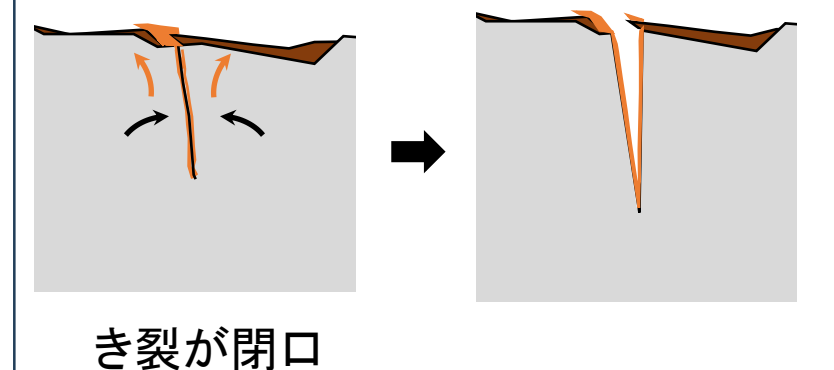
オレンジ色の錆びが
見られない



①破面に発錆

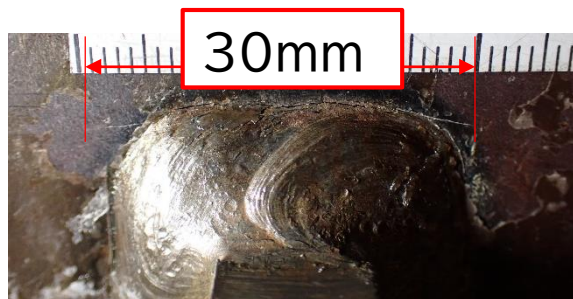


②き裂の閉口によりさびが押し出る

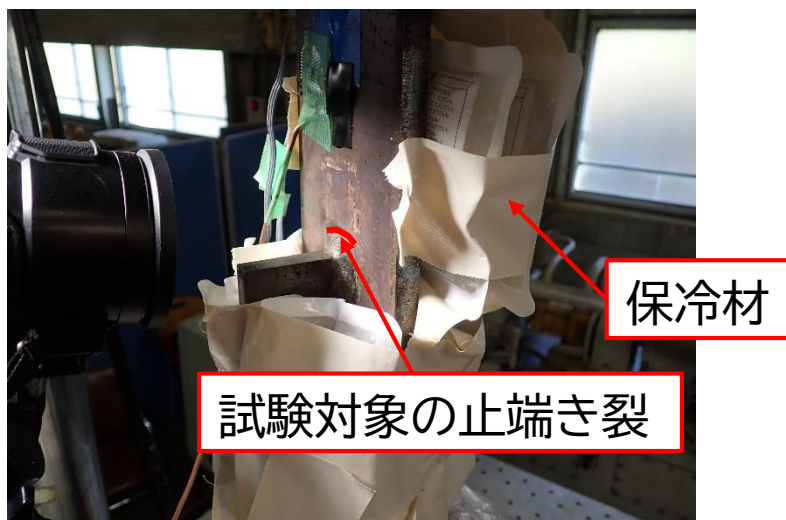


使用した試験体

止端き裂を導入した面外ガセット
溶接継手



冷却条件



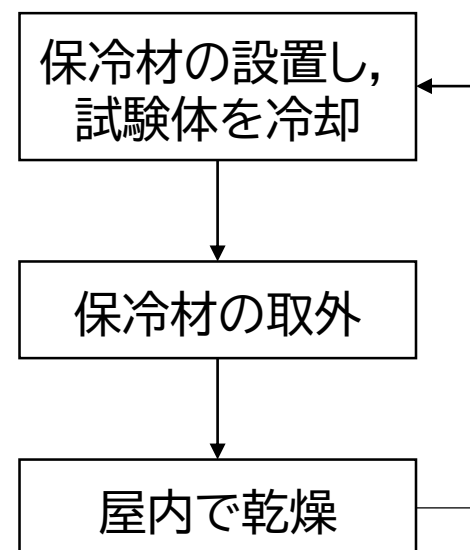
- ・冷却方法: 保冷材の設置
- ・冷却範囲: ガセット周りおよび試験対象の溶接部

載荷条件

- ・常時0.1Hzで加振(冷却時に加振)
- ・引張5～125kN(1～7日目)
※き裂導入時と同じ荷重
引張5～65kN(8日目～)

結露サイクル

- ・保冷材による試験体の冷却で1日1度結露を発生をさせる



着目点



<5~125kN試験時:1~7日目

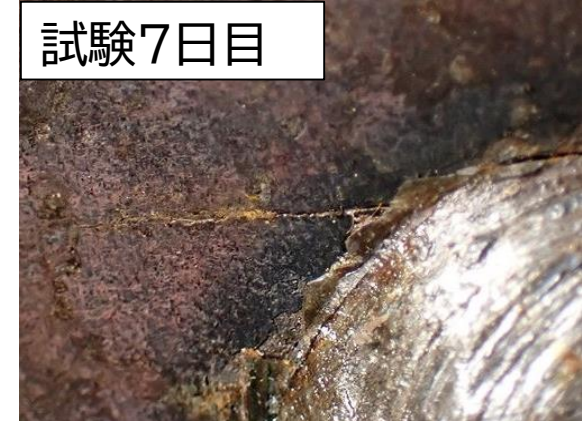
試験4日目



試験5日目



試験7日目



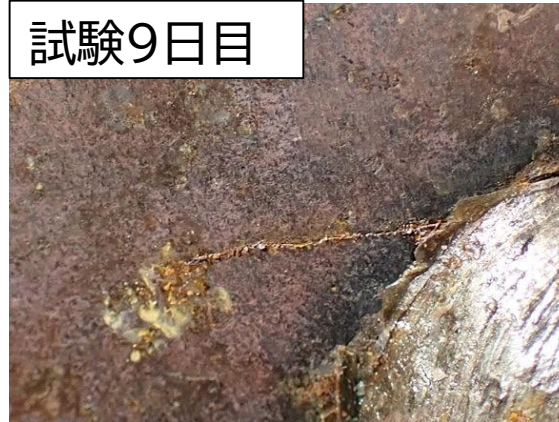
き裂の進展に伴い、き裂周りにさびがみられるようになる

<5~65kN試験時:8~14日目>

試験8日目



試験9日目



試験14日目



き裂進展が早いため、荷重範囲を小さくして試験を実施。**着実にさびの色の変化がみられる**→以上より、結露も一つの要因の可能性が考えられる。現在引張荷重下での検討のため、圧縮荷重下での実験も検討予定。

き裂の当て板補強の合理的設計法

鋼橋の強靱化・長寿命化研究委員会 疲労強度研究部会(2015-2020) の成果

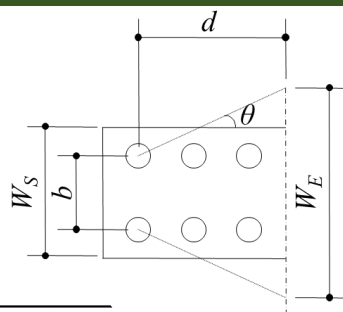
当て板の形状の影響を受けるSH縁の応力推定法

$$\alpha_{SH,s} = \beta \cdot \alpha_{SH,n}$$

$$\beta = f \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_n}$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_n} = \frac{W_E t_M}{2W_S t_S + (W_E - l_C) t_M}$$

$$f = 0.776 \left(\frac{l_C}{P} \right)^{-0.597}$$



断面増効果

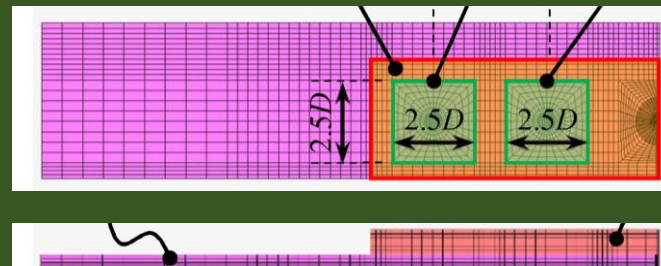
架橋効果



当て板上の参照応力からのSH縁応力推定法

SH縁応力の簡易解析手法の検討

2.5D範囲を節点共有



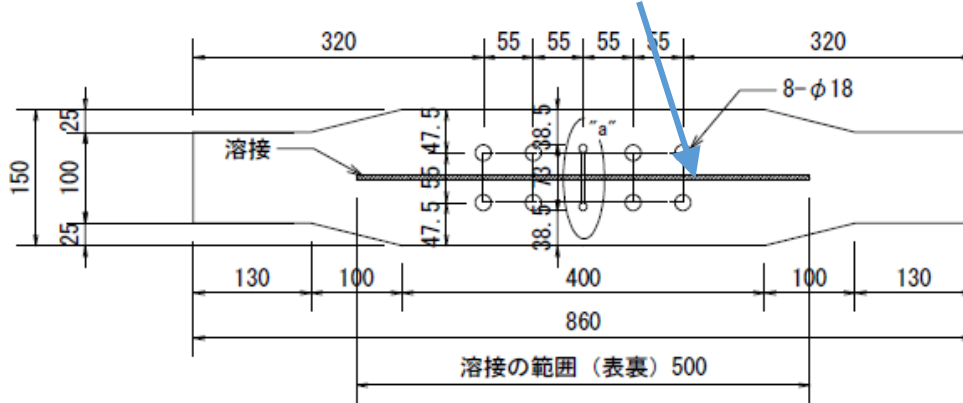
SH縁の応力範囲を用いた
当て板後の疲労強度評価法
の検討

軸引張だけでなく種々の
応力場への適用拡大

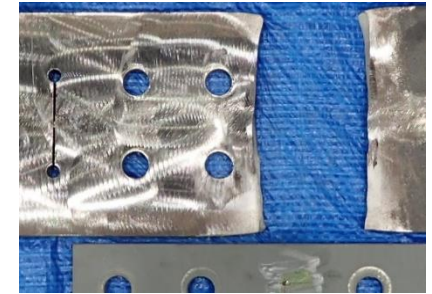
当て板下SHの疲労強度

溶接後にスリット・SH加工

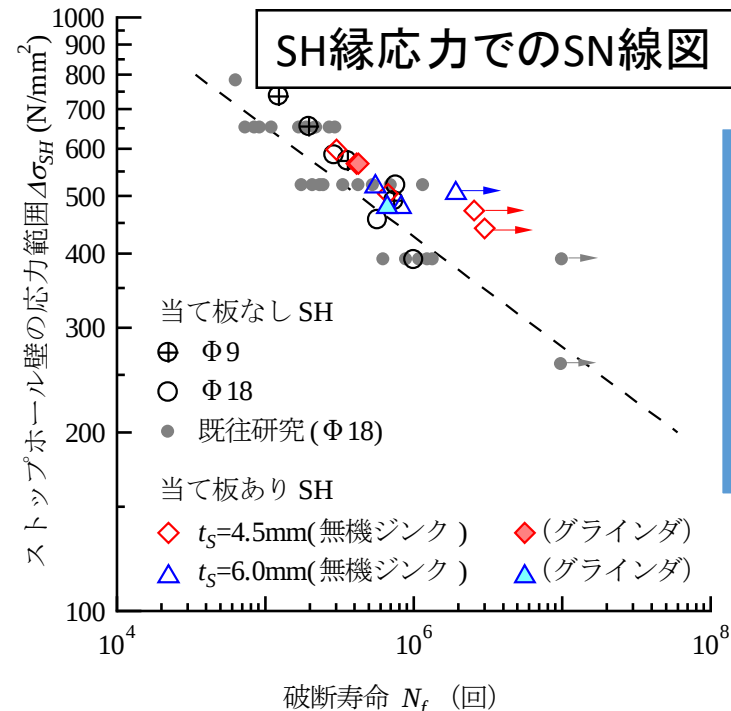
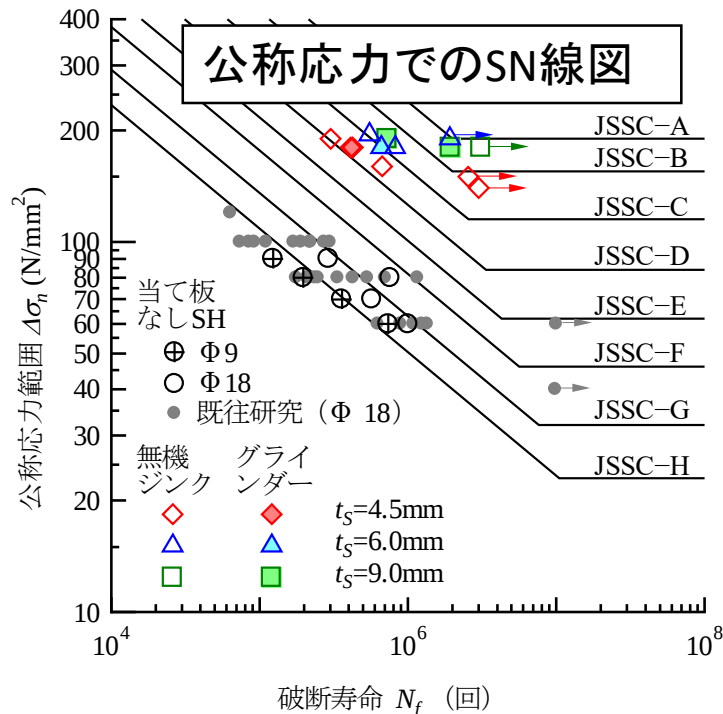
主板厚9, 当て板厚4.5, 6, 9mm



SHからのき裂



フレットングき裂

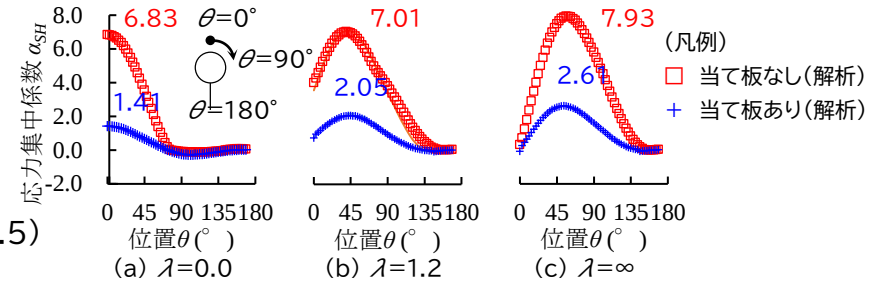
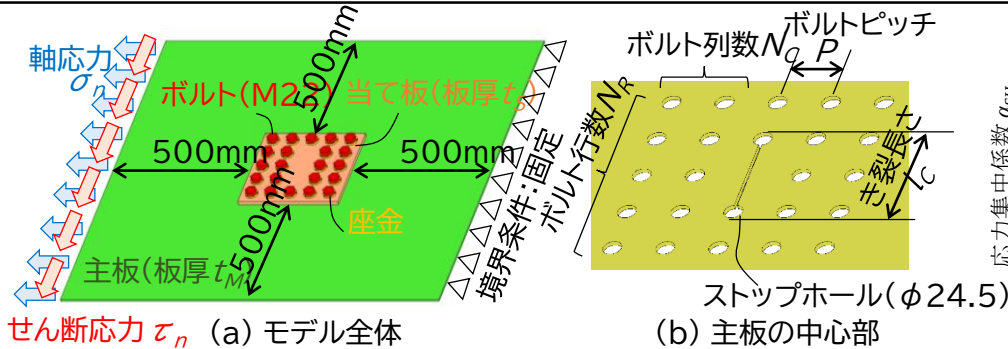


当て板ありSH
の疲労強度は
当て板なしSH
と同程度(素地
調整の影響も
なし)

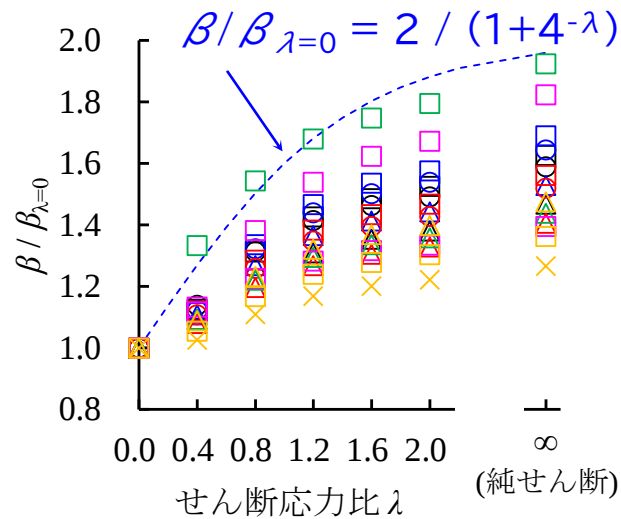
組み合わせ応力場での当て板+SHの応力低減効果

せん断応力比 $\lambda = \tau_n / \sigma_n$ に着目したパラメータ解析

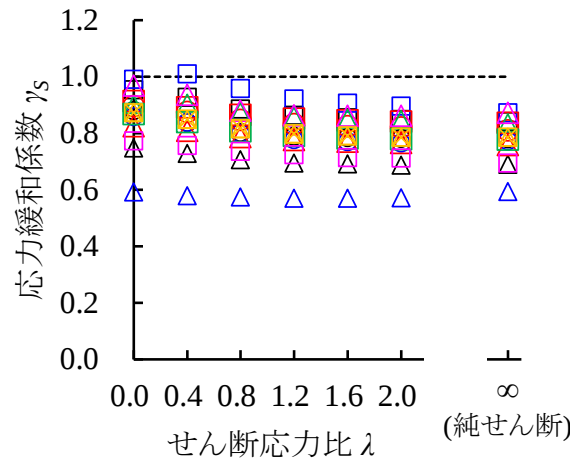
せん断応力比により応力集中の位置と大きさが変化



当て板の応力低減効果



当て板+ボルト締めめの応力緩和係数

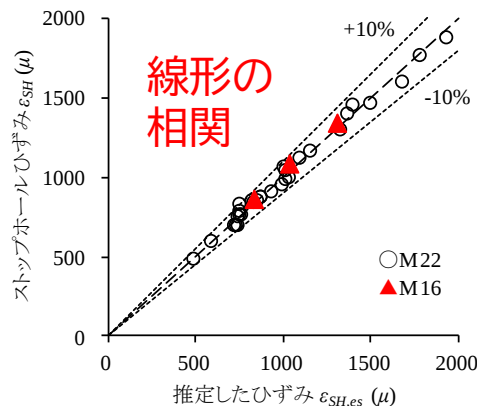
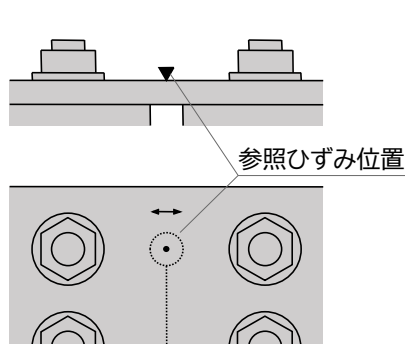


軸応力状態の
値を用いて、組
合せ応力場で
の応力低減効
果を評価可能

純せん断状態 ($\lambda = \infty$) の値に収束する傾向 $\Rightarrow$ 推定法の提案

ボルト締めめの応力緩和係数への影響は小さい

当て板上の参照ひずみによるストップホール縁ひずみの推定



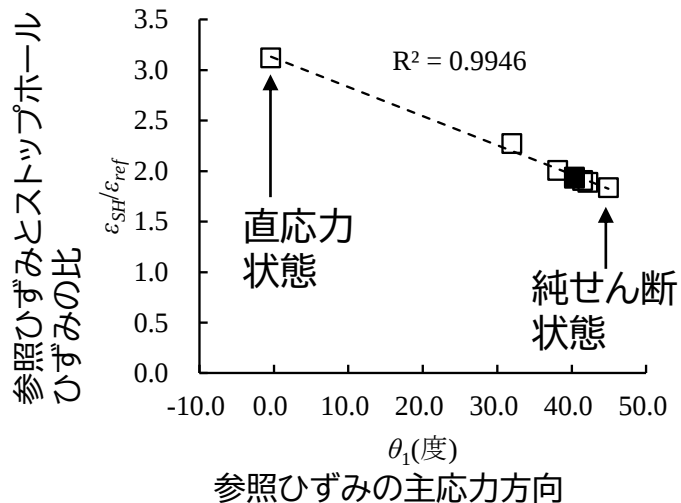
$$\varepsilon_{SH} = \left\{ 0.487 \left(\frac{P}{D} \right) + 1.63 \right\} \varepsilon_{ref}$$

直応力状態の場合, 上式でストップホールひずみを推定可能

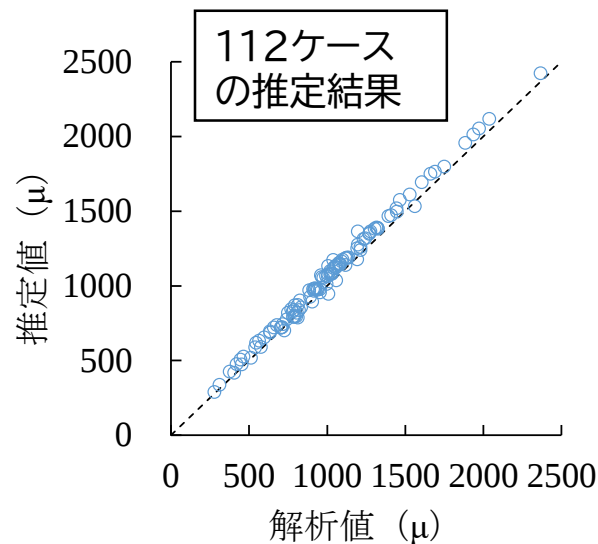
当て板補修の効果を簡易に評価できる
(補修効果確認, モニタリング)

曲げ・せん断比(組合せ応力場)の影響

参照ひずみの主応力方向により,
両ひずみの関係は線形的に変化



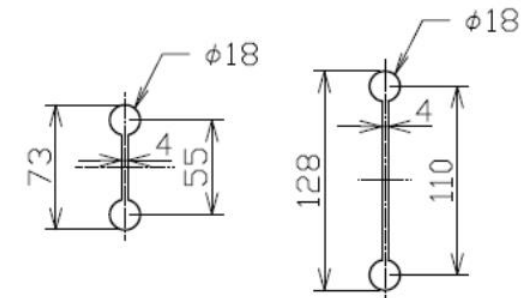
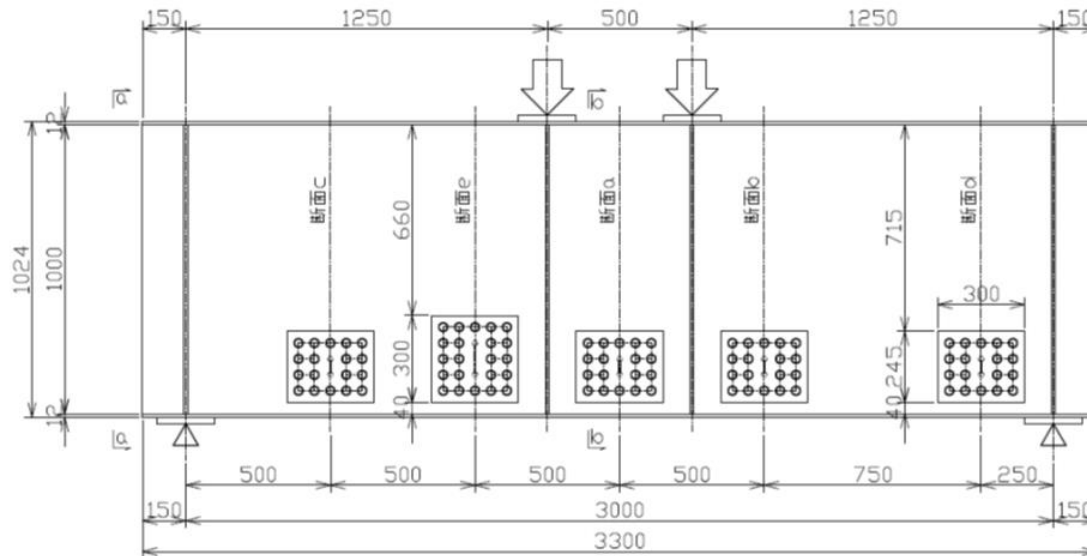
$$\varepsilon_{SH} = \left\{ 0.487 \left(\frac{P}{D} \right) + 1.63 \right\} \varepsilon_{ref} \times (1 - 0.55 \sin \theta_1)$$



参照ひずみの主
応力方向で補正

組合せ応力場
でも参照ひず
みを用いた評
価が可能

今までの検討結果の実構造(鋼桁)への拡張

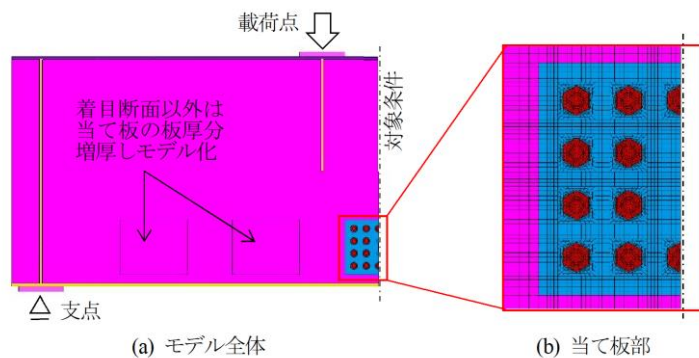


ストップホール詳細

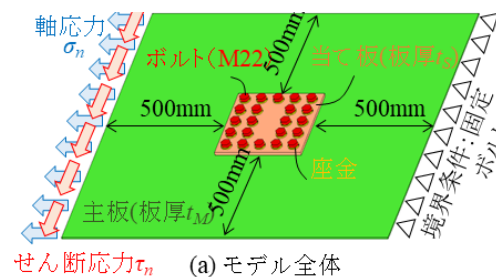


- 桁高1,000mm、支間3,000mm
- ウェブ厚9mm (SM490Y)
- 断面位置を変えて着目部(当て板)の曲げせん断比を変える(5断面)

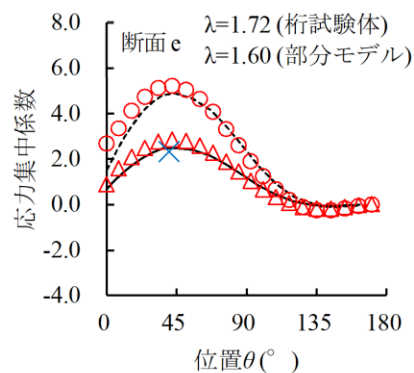
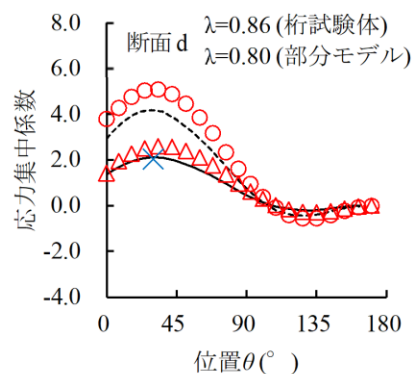
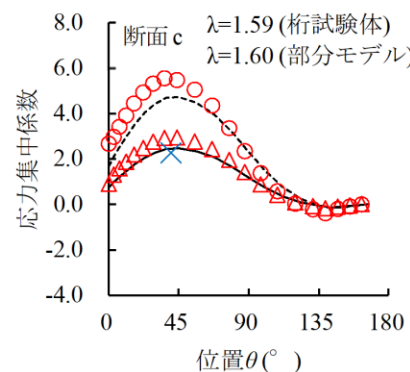
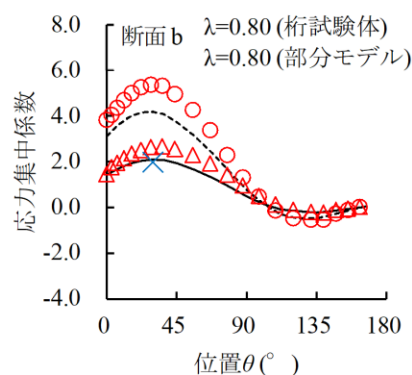
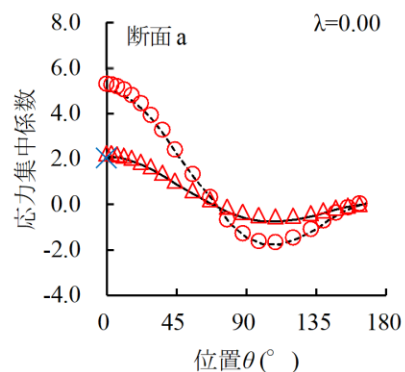
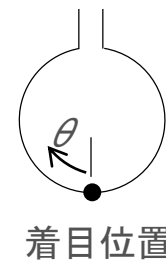
	当て板厚	ストップホールのボルト締め
CASE1	4.5 mm	なし
CASE2	4.5 mm	あり
CASE3	9 mm	なし



桁試験モデル



部分モデル



桁試験体

----- 当て板なし
 ——— 当て板あり

部分モデル

○ 当て板なし
 △ 当て板あり

実験結果

× 当て板あり

- FE解析(桁試験体と部分モデル)、実験結果の整合を確認

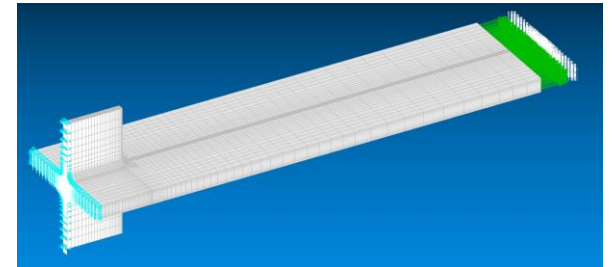
SH+当て板補強設計の手引き化

進展解析SWG（法政大学 内田大介を中心）

面外ガセット継手の板厚効果

面外ガセット溶接継手の板厚効果

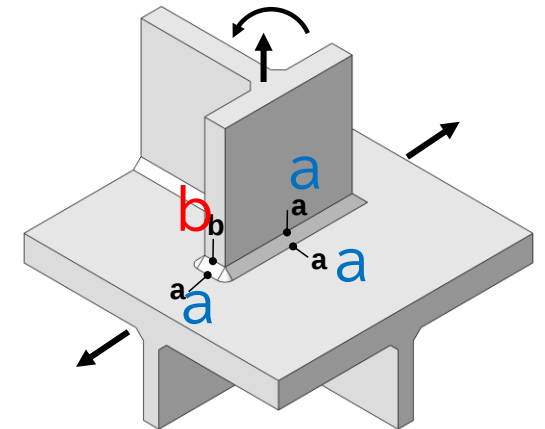
JSSC疲労設計指針	道路橋示方書
考慮しない	1/4乗則



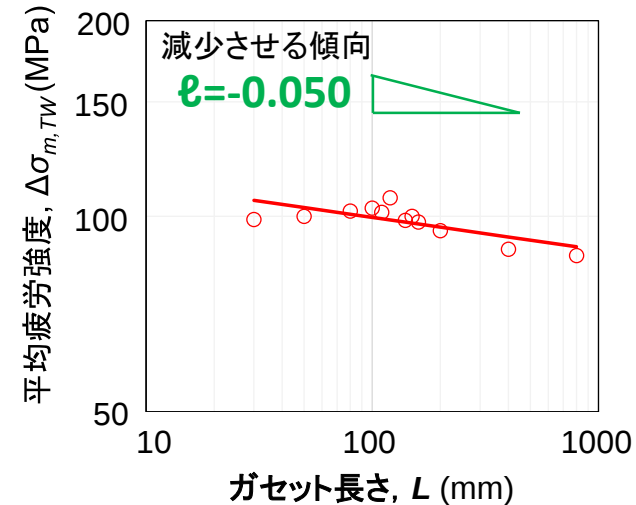
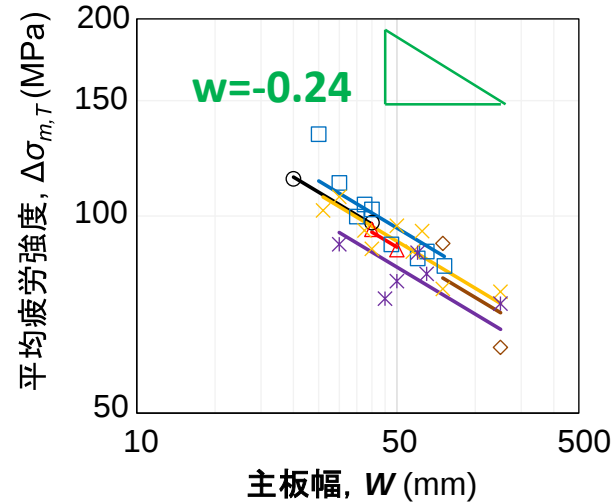
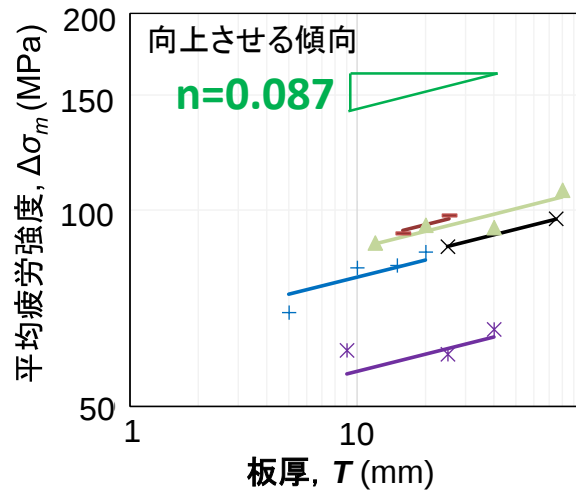
局部応力を用いた疲労強度評価法

ホットスポット応力評価に関して
現在、Type-aに関する規定(0.4T-1.0Tから外挿)

Type-B(板こば)のホットスポット応力評価について
検討

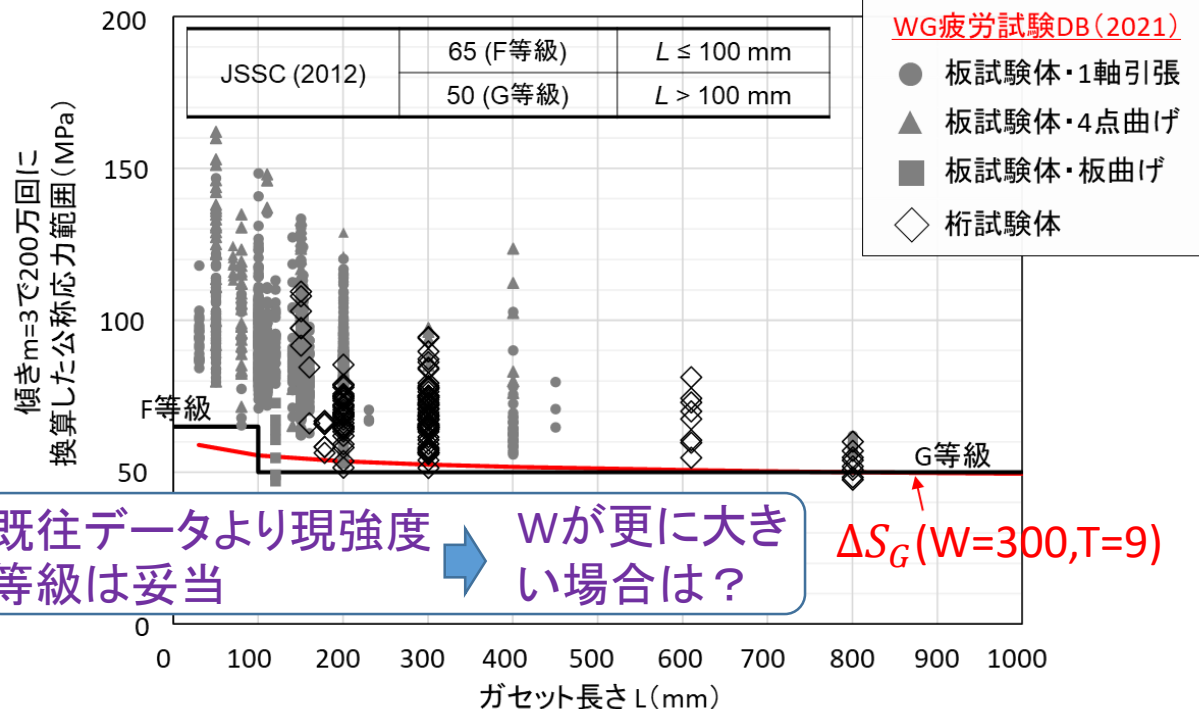


進展解析SWG 寸法効果① これまでの成果(データベース分析)



分析結果から得られた
200万回疲労強度推定式

$$\Delta S_G = 73.7 \times \left(\frac{L}{110}\right)^{-0.050} \times \left(\frac{W}{100}\right)^{-0.24} \times \left(\frac{T}{12}\right)^{0.087}$$



進展解析SWG 寸法効果② これまでの成果(き裂進展解析)

疲労試験結果(疲労強度・ビーチマーク)と併せて解析精度の検証と解析条件の設定



特に板厚に注目してその影響を検討

引張の場合(XFEM)

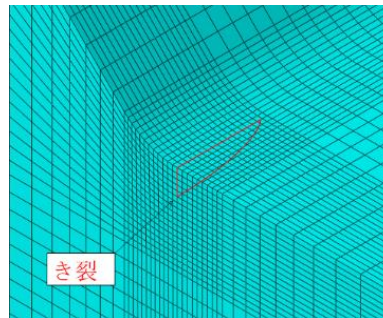
板厚が増加すると

疲労強度が増大

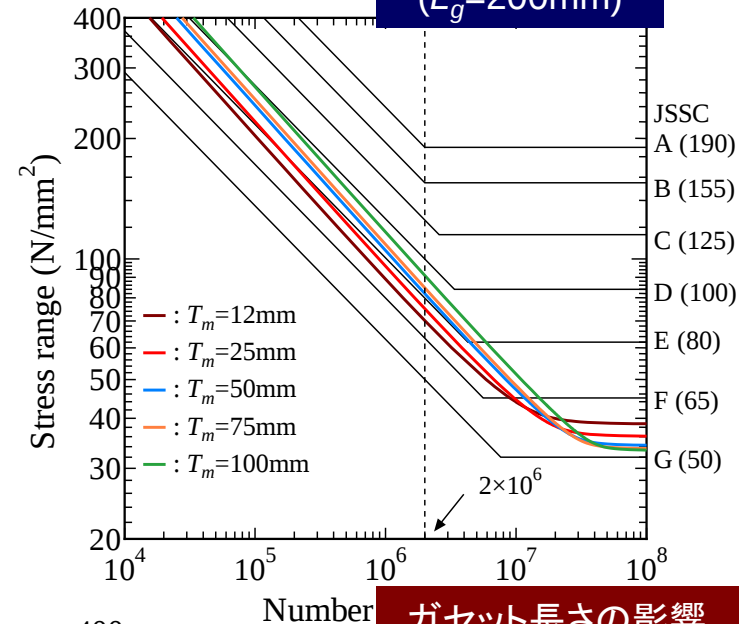
疲労限が低下

の傾向がみられる

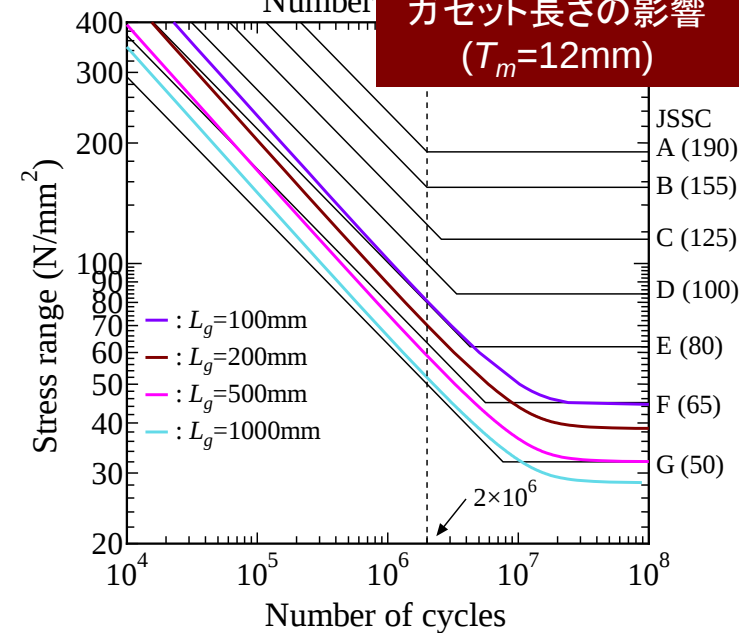
(主板幅 $W=1000\text{mm}$ の
ケース)



主板厚の影響
($L_g=200\text{mm}$)



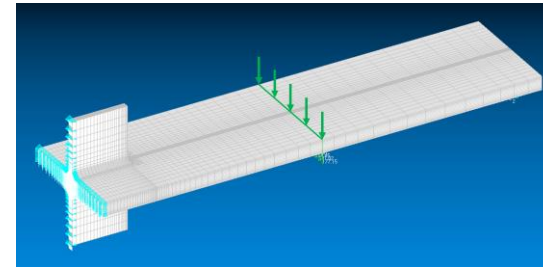
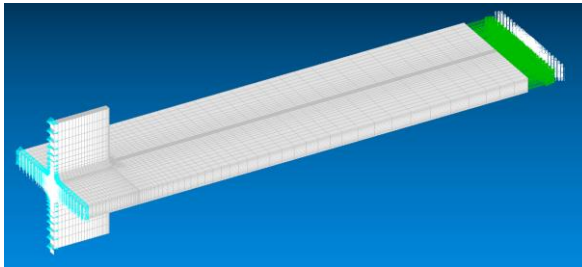
ガセット長さの影響
($T_m=12\text{mm}$)



進展解析SWG 寸法効果② パラメトリックなき裂進展解析

パラメータ解析を踏まえた寸法効果の提案

- 軸力が作用する場合と面外曲げ(4点曲げ)が作用する場合を対象

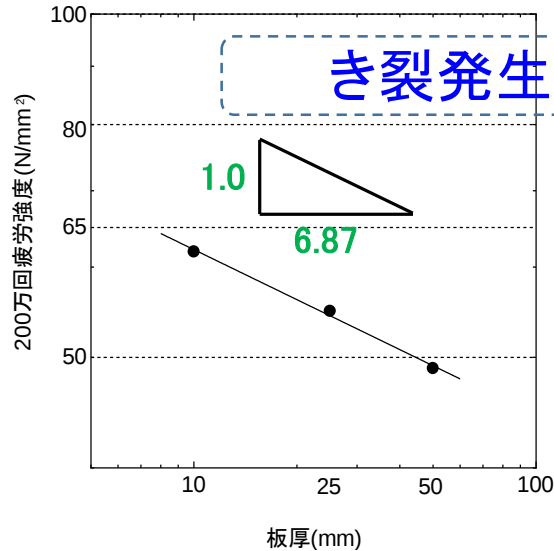


主板			ガセット			溶接部	合計	
長さ	板幅	板厚	高さ	長さ	厚さ	脚長	解析数	
1000	120 500 750 1000	(12)	100	100	12	$\sqrt{2}t$ (主板or ガセット厚の 大きい方のt)	64 (128)	
		25		200				
3000		50		500				
		75		1000				

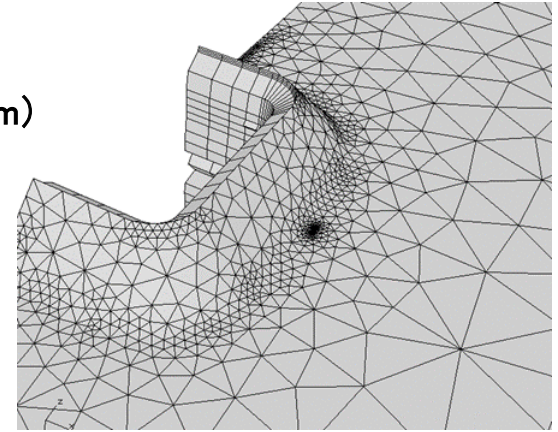
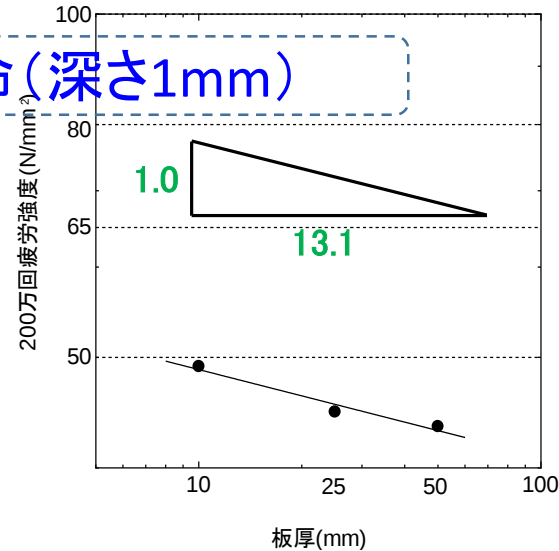
進展解析SWG 寸法効果② これまでの成果(き裂進展解析)

曲げの場合 (FRANC3D)

LN (ガセット長200mm, 母板幅120mm)



LW (ガセット長200mm, 母板幅200mm)



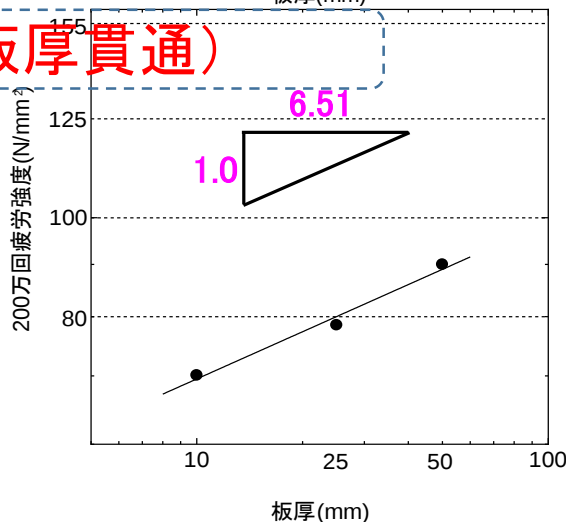
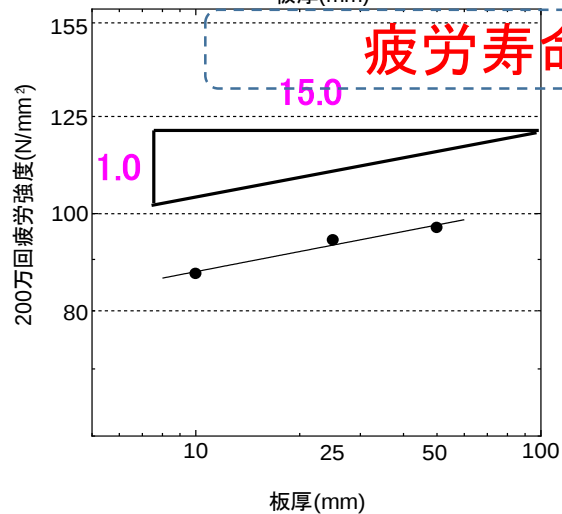
板厚が増加すると
疲労強度が増大

き裂発生寿命が低下

の傾向がみられる



その程度 (板厚補正指数)
は継手寸法で異なる

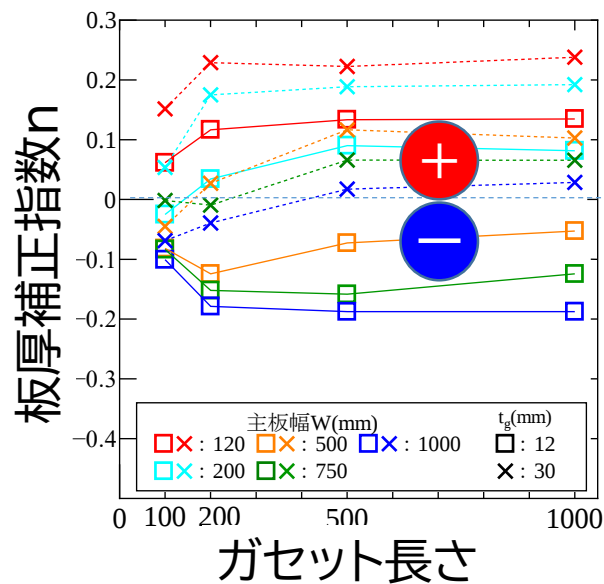
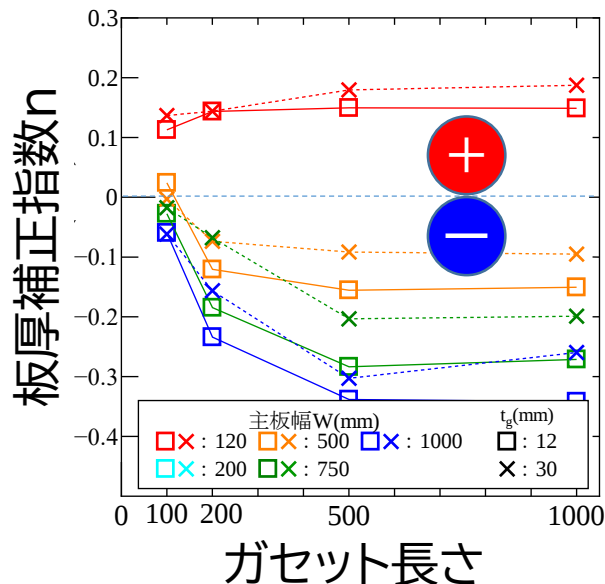


進展解析SWG 寸法効果② ガセット長さで整理した板厚補正係数

疲労寿命

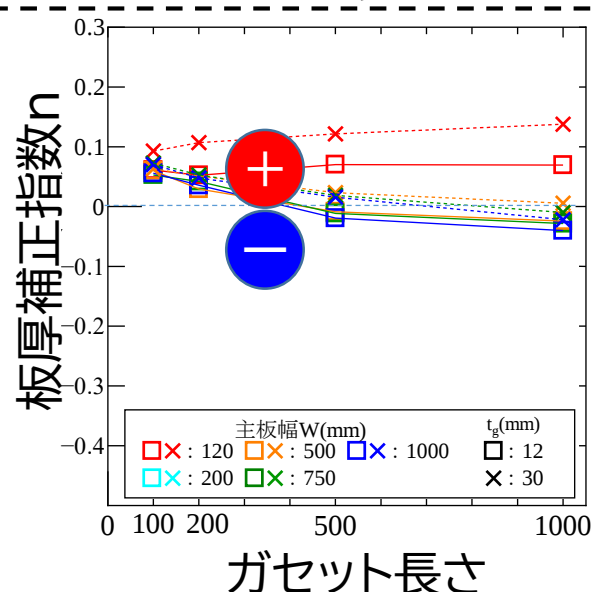
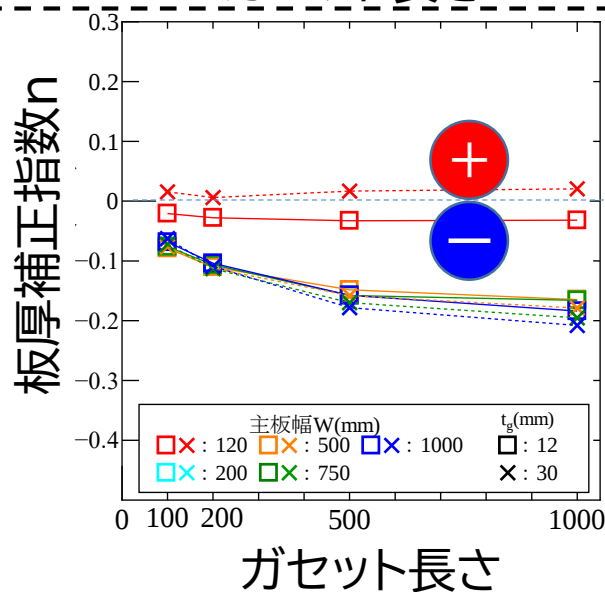
打ち切り限界

曲げ



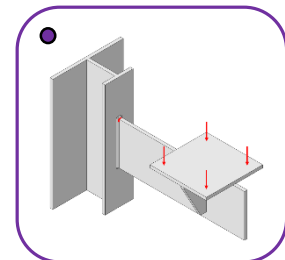
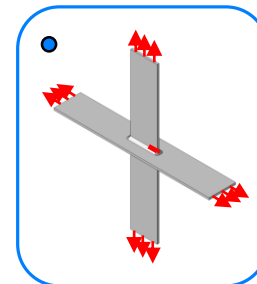
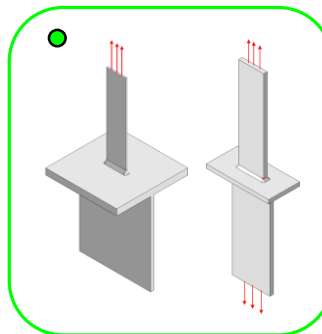
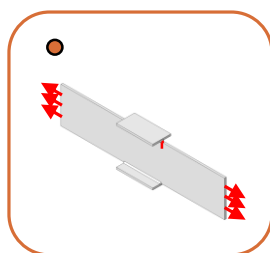
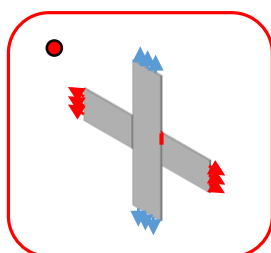
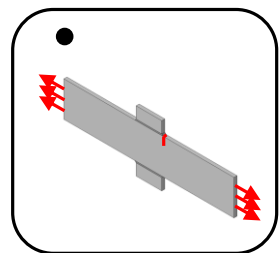
主基板幅	
120	□×
200	□×
500	□×
750	□×
1000	□×
ガセット厚	
□	12mm
×	30mm

軸引張



進展解析SWG Type Bホットスポットに関する検討

Type Bからの疲労き裂が生じた文献の収集



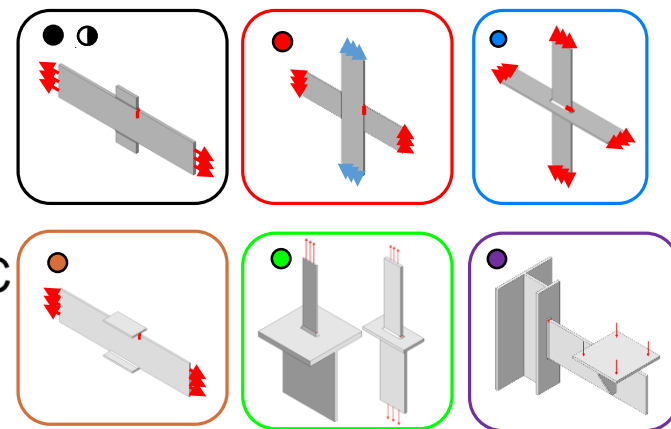
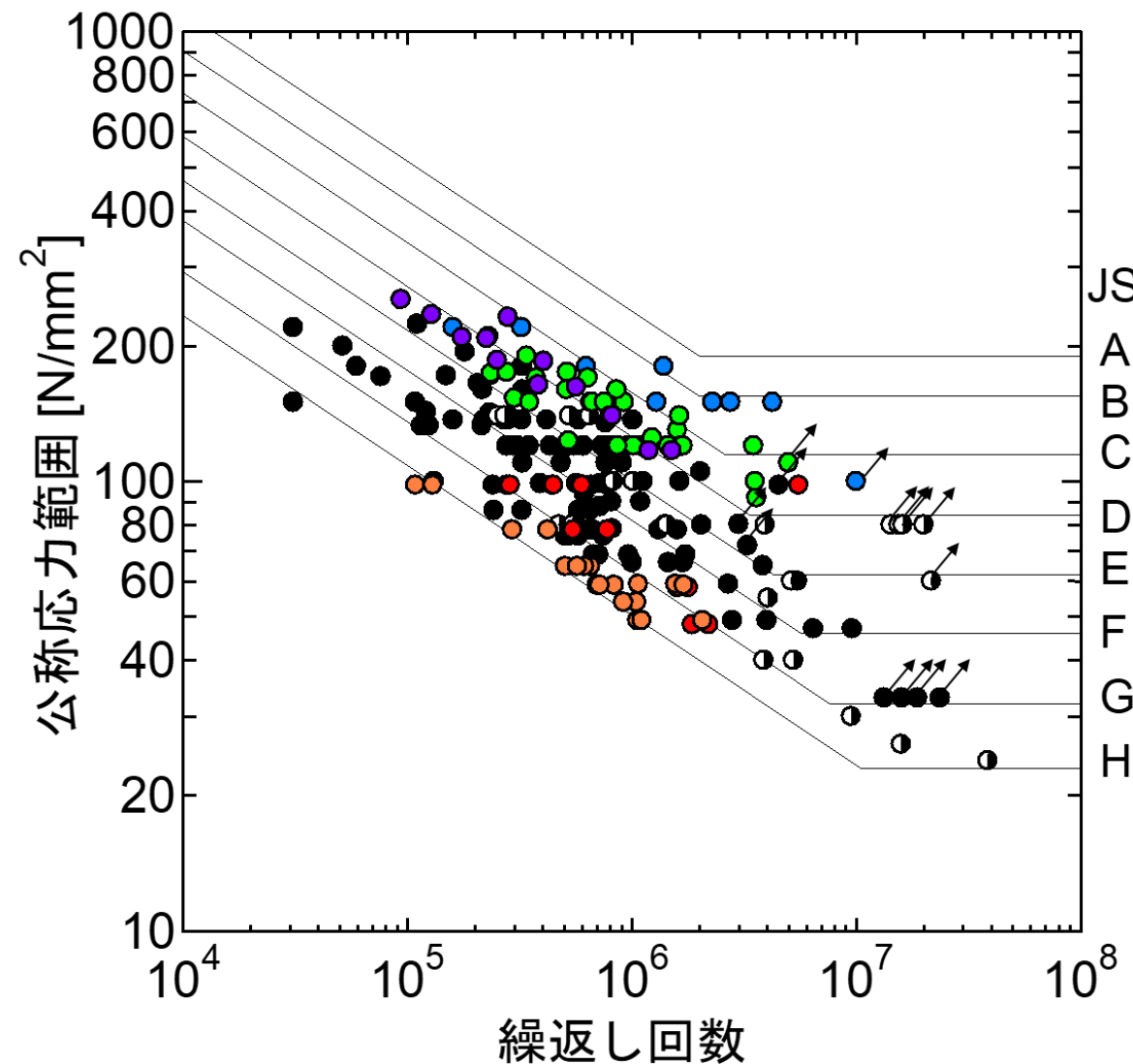
● 変動振幅荷重

	●	●	●	●	●	●
板厚 [mm]	6 ~ 13	9	10	6 ~ 20	9	10
データ数 (うちrun-out)	130 (13)	10 (0)	19 (0)	28 (1)	22 (3)	12(0)
文献数	14	2	2	4	3	1

⇒全ての実験をFEモデル化（ソリッド要素）し、板こば面における
ホットスポット応力を算出（4, 8, 12 mm法，板厚中心位置）

進展解析SWG Type Bホットスポットに関する検討

公称応力範囲で整理



全データの標準偏差:

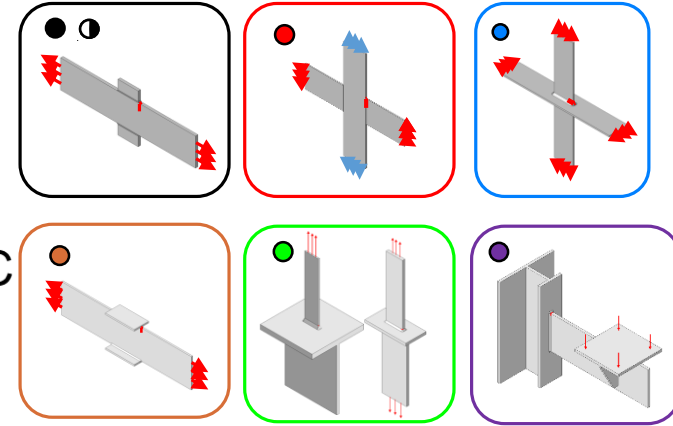
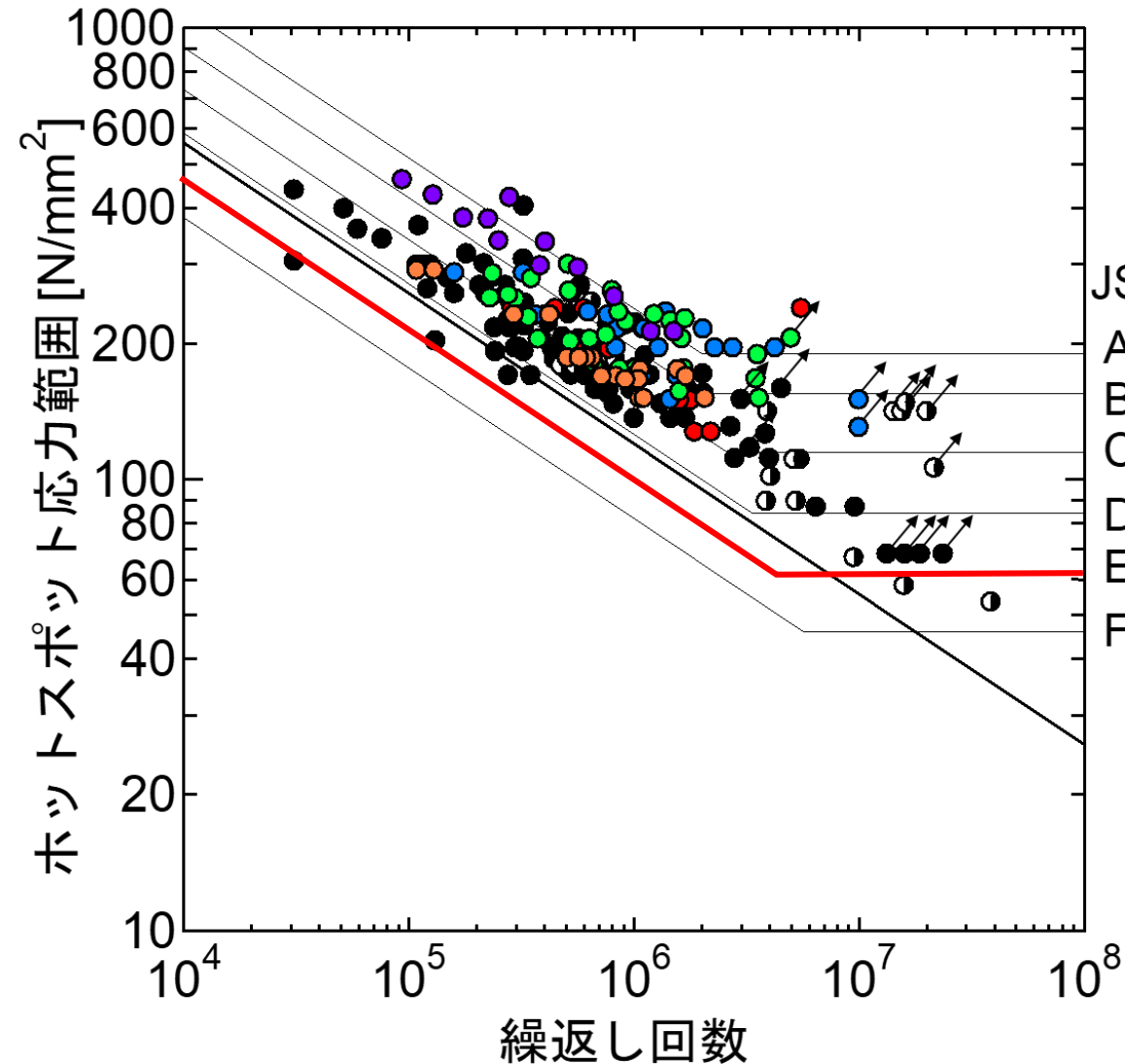
0.4509

平均-2σの200万回疲労強度:

37.14N/mm²

進展解析SWG Type Bホットスポットに関する検討

ホットスポット応力範囲で整理



全データの標準偏差:
0.2740

平均-2σの200万回疲労強度:
95.19N/mm²

**JSSC-E等級で安全側の
疲労照査が可能**