

社会資本メンテナンス講演会

2015年3月13日

橋を守るための大学の取り組み

法政大学・デザイン工学部
都市環境デザイン工学科

森 猛

道路橋メンテナンスへの取り組み

管理機関

国土交通省、都道府県、市町村
高速道路会社

実際の維持管理

民間企業

建設コンサルタント、橋梁製作会社
検査会社、……

管理機関からの委託

研究機関

国の研究機関、**大学**
高等専門学校、民間の研究機関

損傷の原因究明

検査方法、診断方法、補修方法の開発・検討

メンテナンスの実際

損傷が生じないような処置、損傷の検査、損傷の診断、
損傷の処置

橋梁の3大損傷

コンクリート構造のアルカリ骨材反応

コンクリート中のナトリウム・カリウムなどのアルカリ金属イオン(アルカリ性細孔溶液)が、骨材中の特定の鉱物(シリカ、カリウム、・・・)と反応。異常膨張を起こし、コンクリートにひび割れが発生。

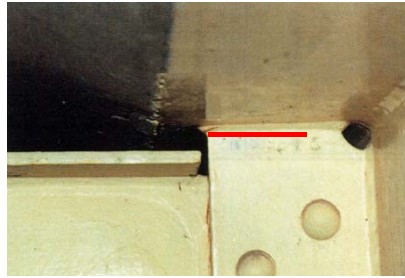
コンクリート構造の塩害

塩化物イオン(Cl-)がコンクリート製造時に混入あるいは、構造物の使用中に浸入し、蓄積された量がある限度以上になると、コンクリート中の鋼材の腐食が促進されて、鉄筋コンクリートが劣化・膨張し、ひび割れが発生。

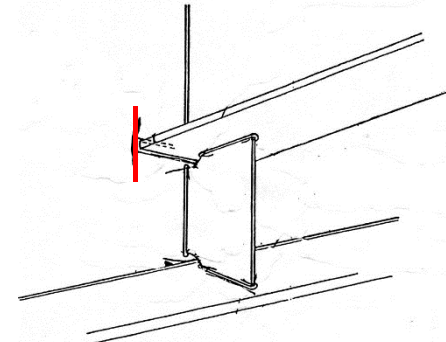
鋼構造の疲労

1回の作用では問題のない応力レベルであっても、それが繰り返し作用することにより、微少なき裂が発生して、進展することより破断に至る現象 **繰り返し荷重(応力):車両の走行**

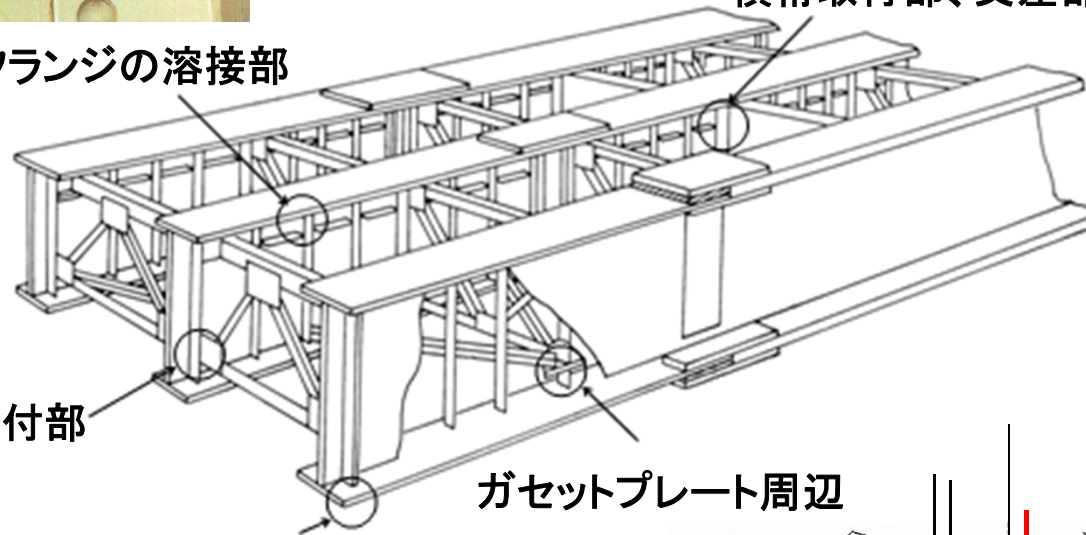
疲労損傷マップ(桁橋)



補剛材とフランジの溶接部

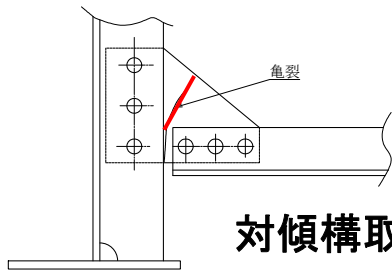


横桁取付部、交差部

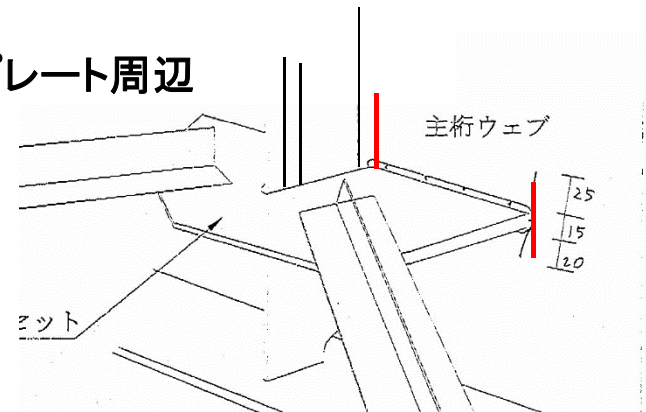
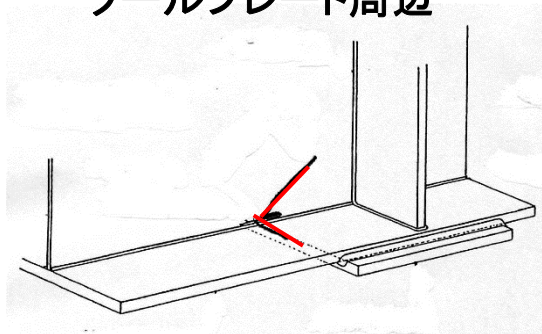


対傾構取付部

ガセットプレート周辺



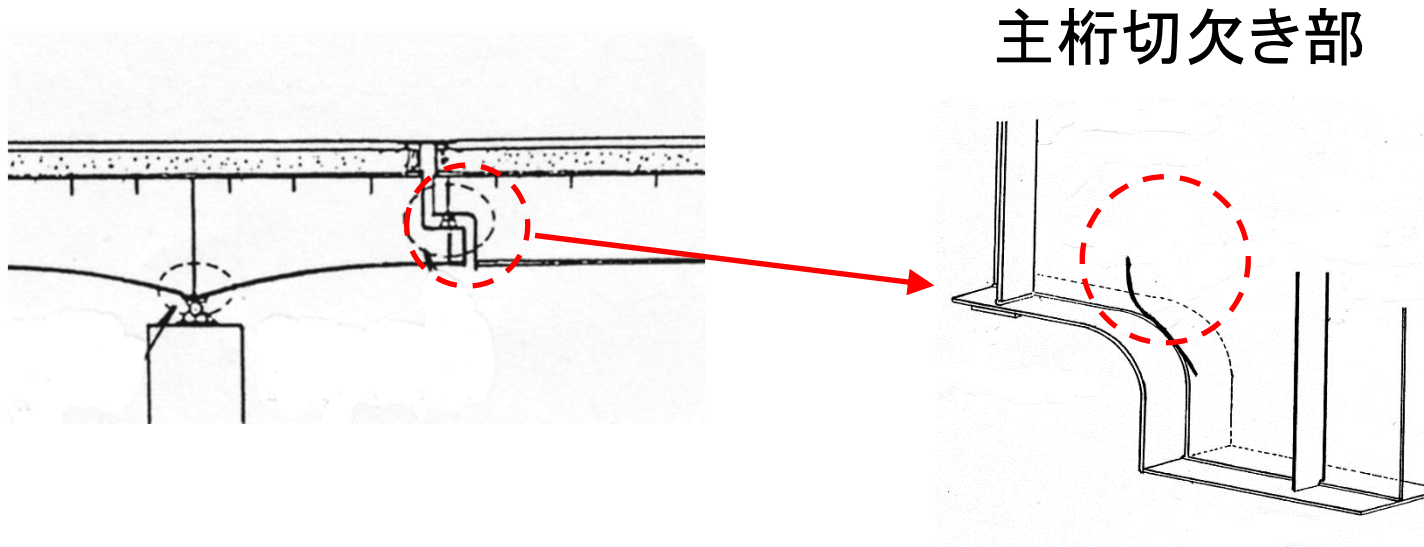
ソールプレート周辺



主桁ウェブ

ミット

疲労損傷マップ(桁橋)



疲労損傷事例の理解

多くの場合、疲労き裂発生原因は同じ

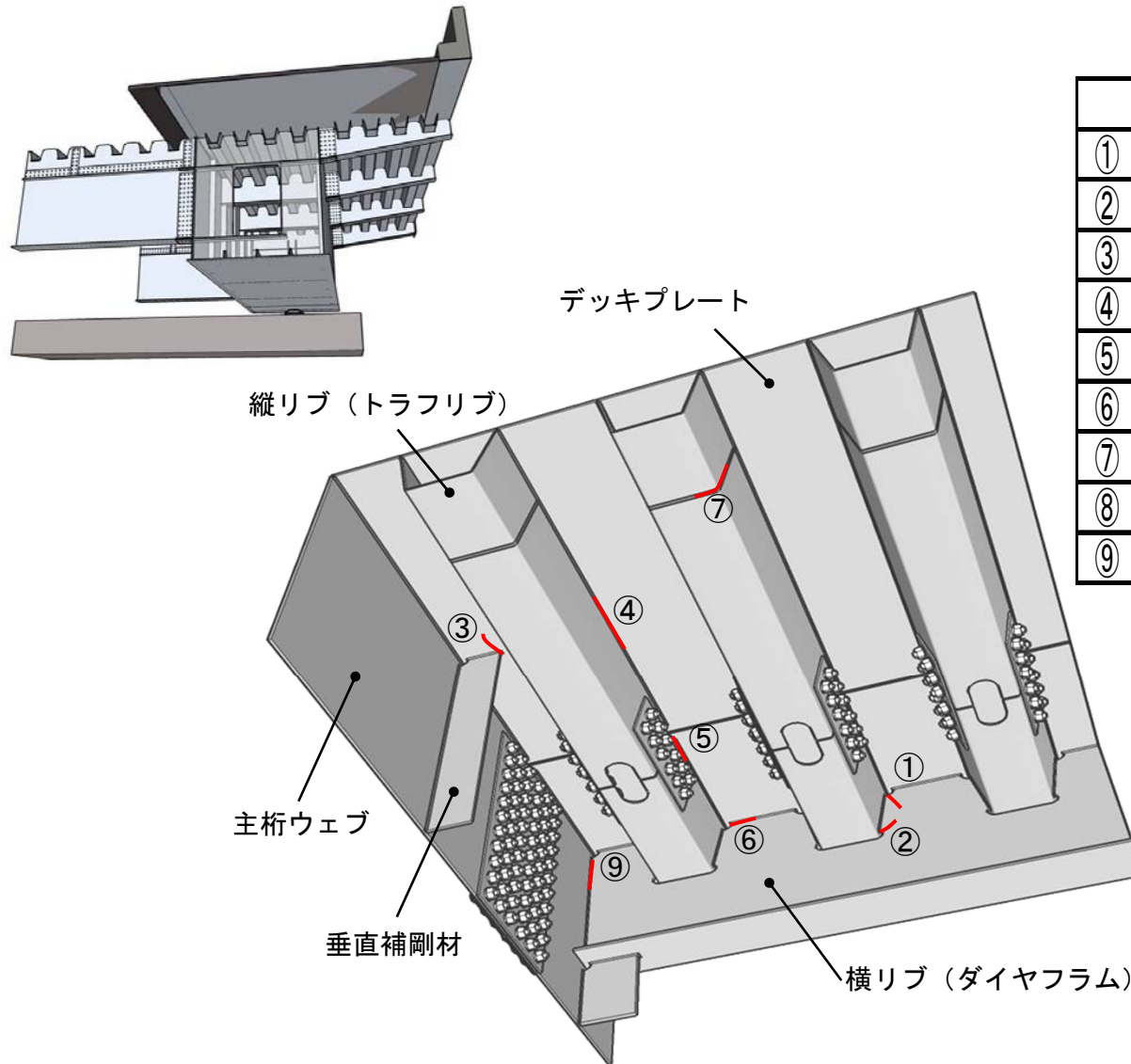
損傷の発生原因

応力範囲 > 疲労強度

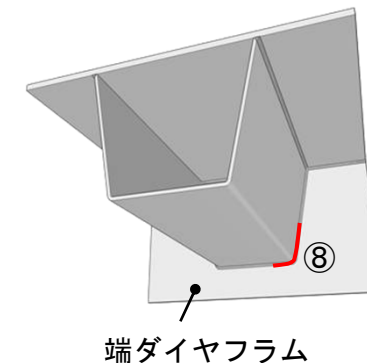
応力範囲が高い理由: 知らなかった、構造が不適切

疲労強度が低い理由: 溶接きず、……

疲労損傷マップ(閉断面リブ構造の鋼床版)

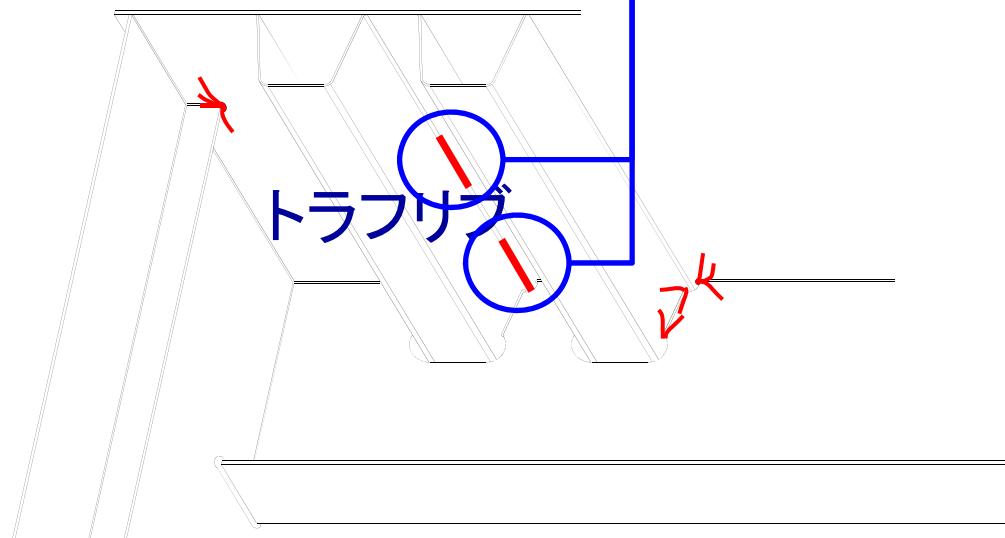


き裂発生部位	
①	縦リブと横リブ(ダイヤフラム)の溶接部(上側スカラップ部)
②	縦リブと横リブ(ダイヤフラム)の溶接部(下側スリット部)
③	デッキプレートと垂直補剛材の溶接部
④	デッキプレートと縦リブの溶接部
⑤	デッキプレートと縦リブスカラップの溶接部(現場継手部)
⑥	デッキプレートと横リブ(ダイヤフラム)の溶接部
⑦	縦リブと縦リブの突合せ溶接部
⑧	縦リブと端ダイヤフラムの溶接部
⑨	横リブ(ダイヤフラム)と主桁ウェブの溶接部



デッキプレート・トラフリブ溶接部のき裂

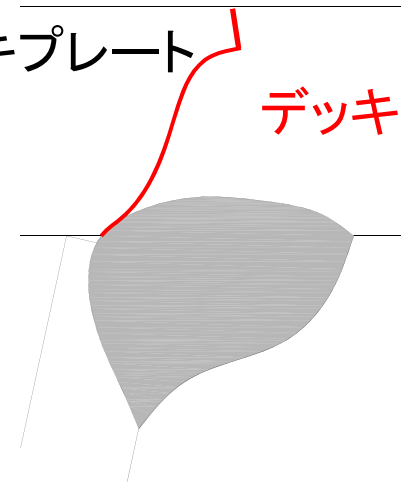
デッキプレート



デッキプレート・トラフリブ溶接部

デッキプレート

デッキき裂



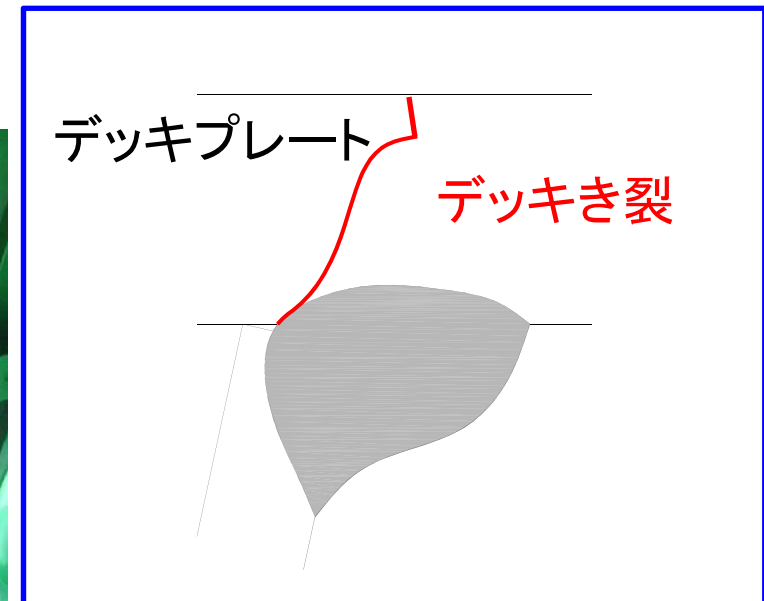
- ・デッキプレートとトラフリブの変形が複雑
- ・デッキプレートとトラフリブの接合
→片面すみ肉溶接

ルート部に高い応力集中が生じる

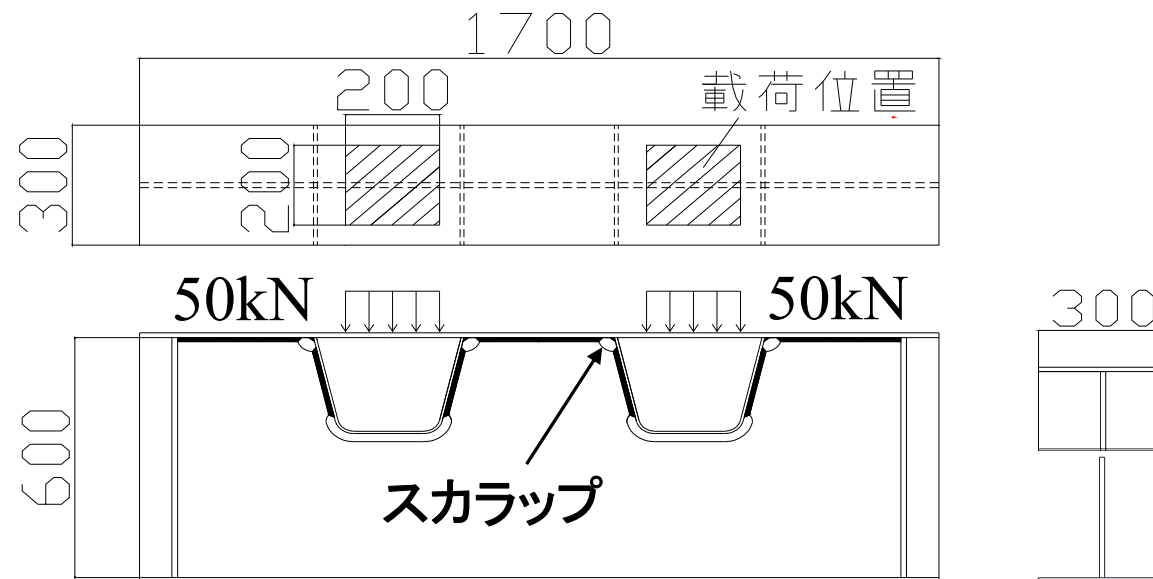
＜実橋での損傷事例＞



デッキプレート進展き裂の発生・進展性状と 疲労耐久性向上の試み



<試験体の形状・寸法>



試験体	デッキプレート厚 (mm)	スカラップ
N12	12	なし
S12	12	あり
N16	16	なし
S16	16	あり

デッキプレート厚

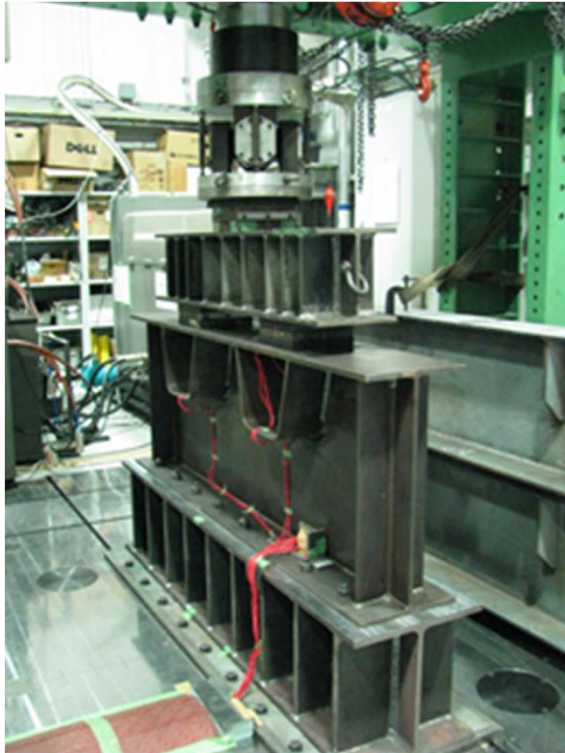
12mm、16mm

トラフリブ寸法

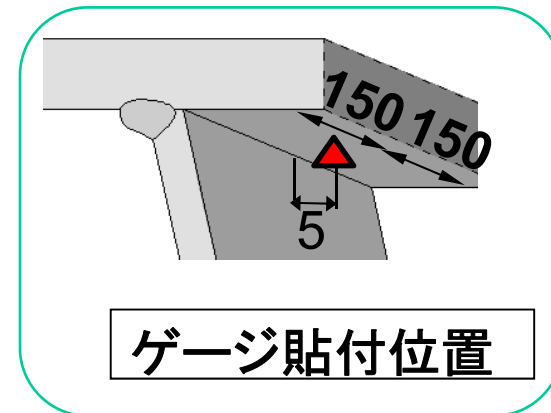
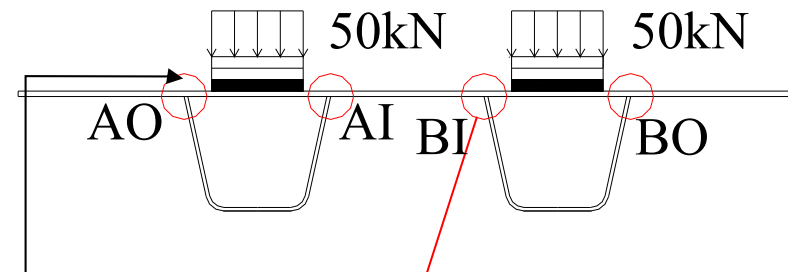
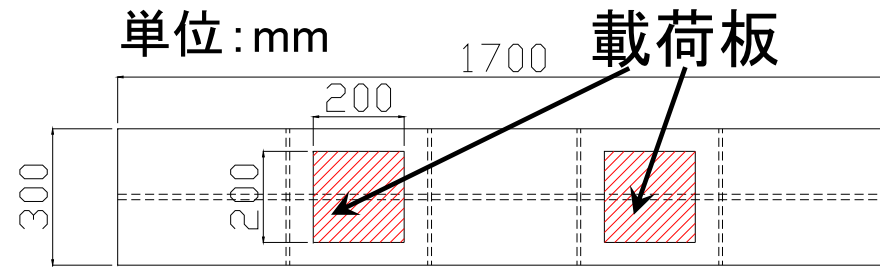
320mm × 240mm × 6mm

疲労試験

動的能力300kN
電気油圧サーボ式材料試験機

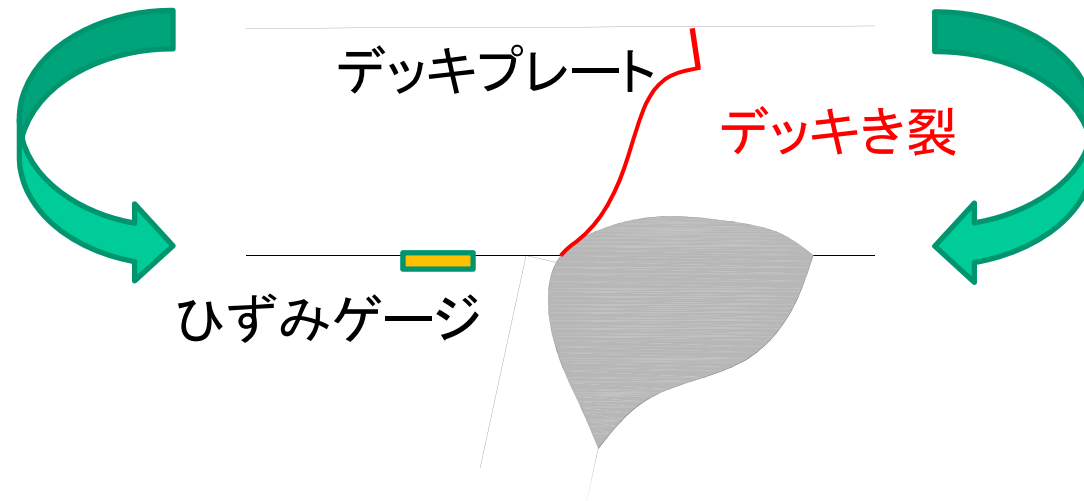


下限荷重: 10kN
上限荷重: 110kN
(片側トラブリブの荷重範囲50kN)
繰返し速度: 5Hz



ひずみの変化→亀裂深さ

なぜひずみを計ることによってき裂の進展がわかるのか

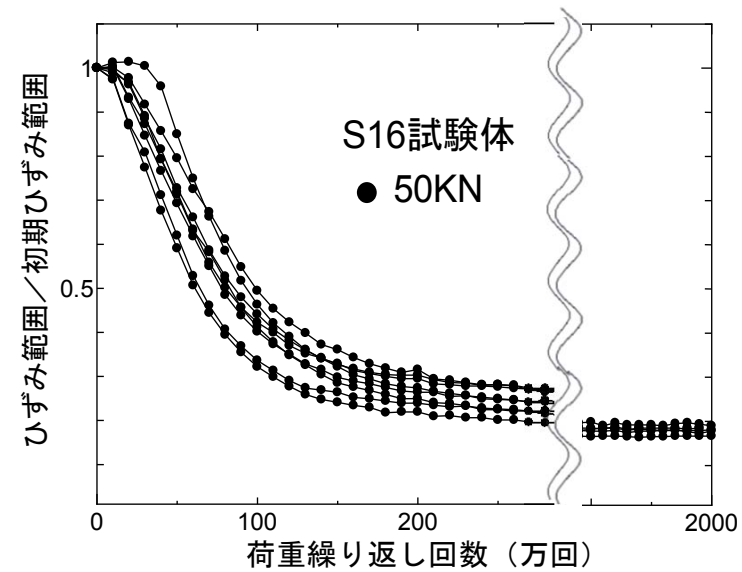
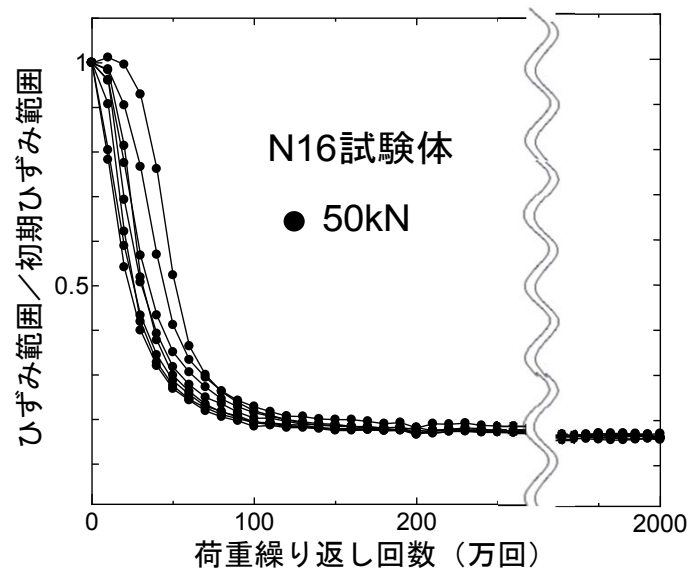
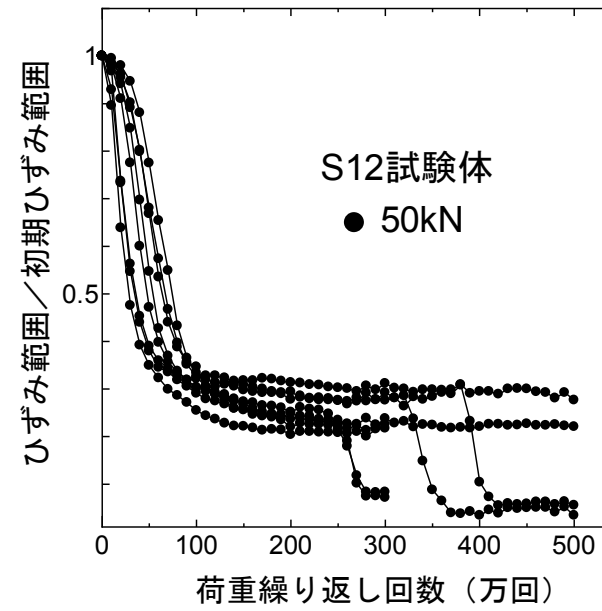
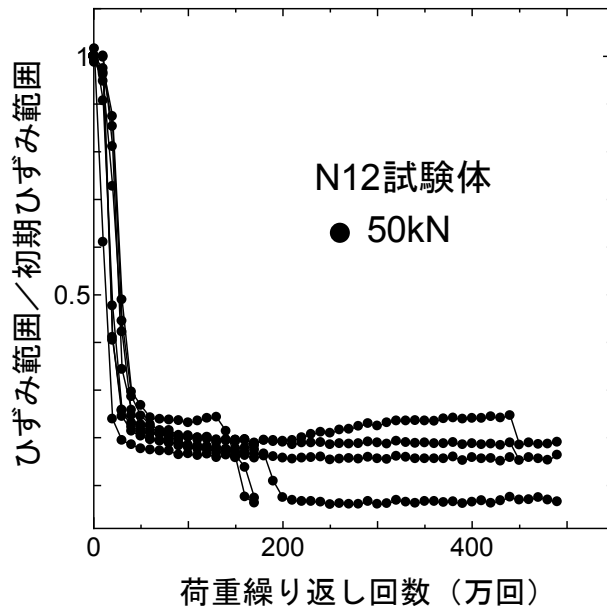


き裂が生じる、また進展することによって
力(応力)が伝わりにくなる



ひずみが小さくなる

ひずみ範囲と荷重繰返し数の関係



き裂深さとひずみの変化

き裂深さ

N12試験体 25万回時



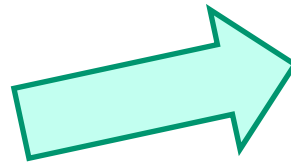
S12試験体 25万回時



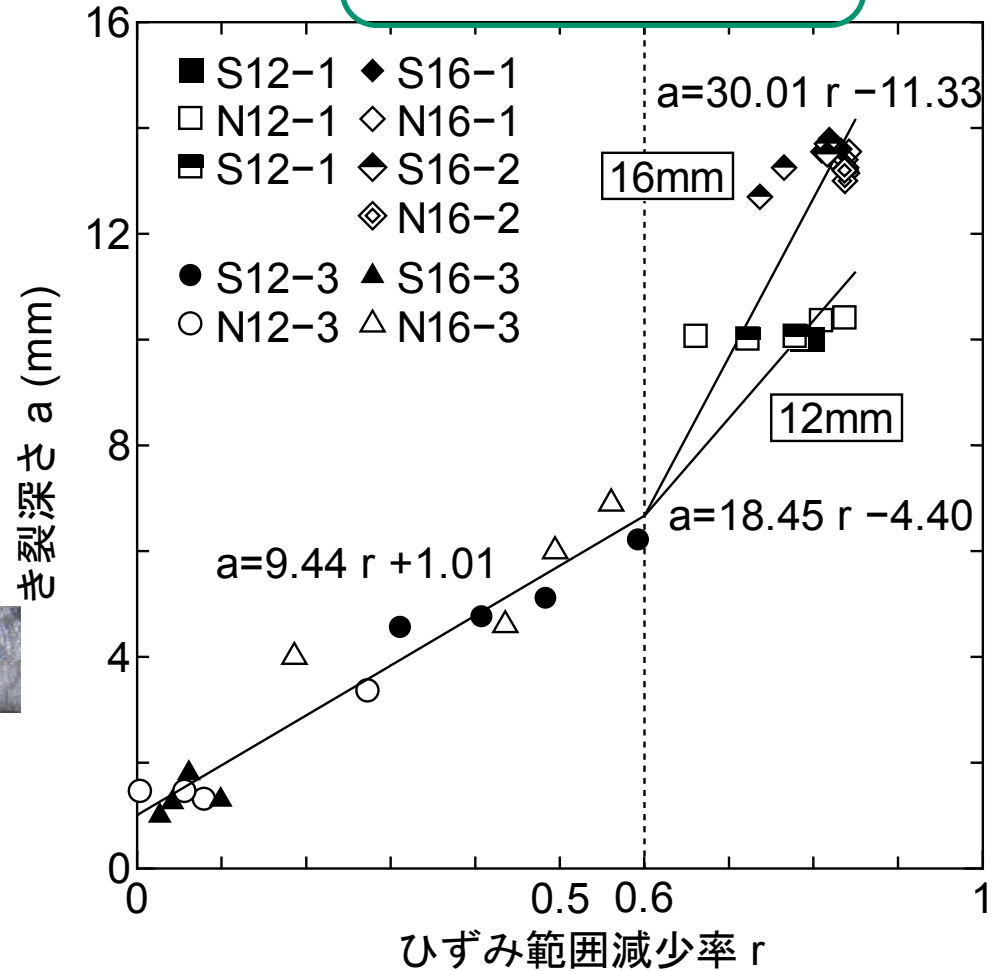
N16試験体 50万回時



S16試験体 50万回時



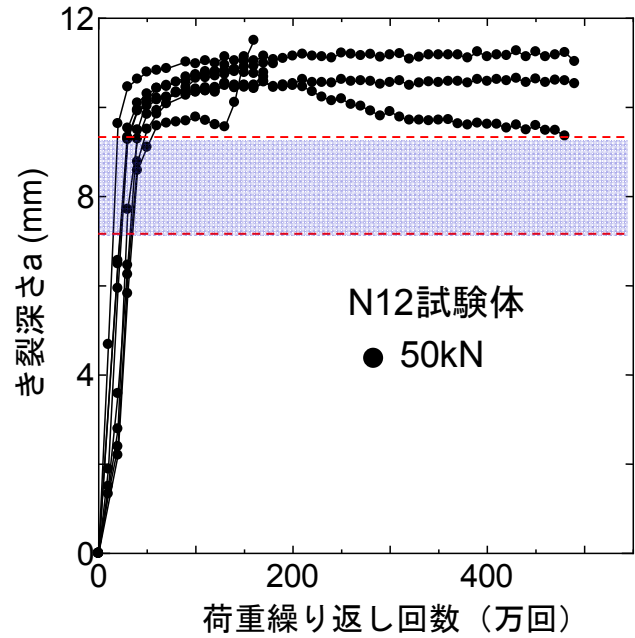
ひずみ減少率と き裂深さの関係式



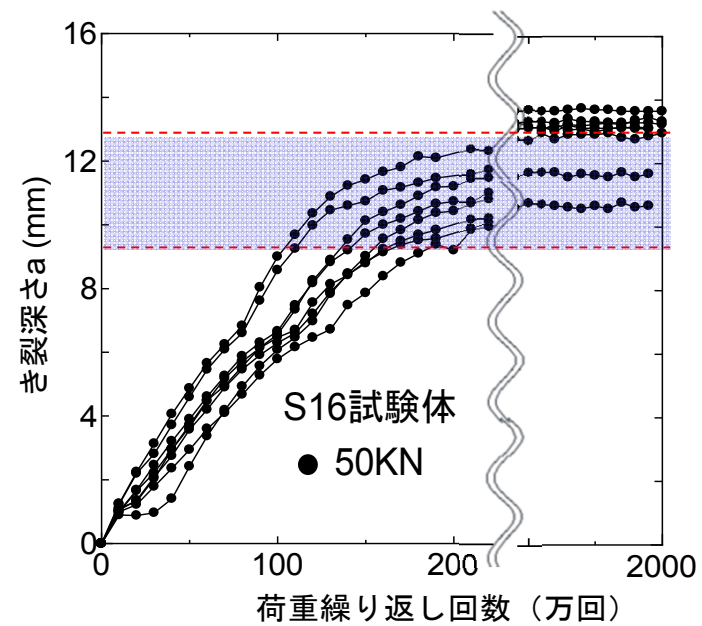
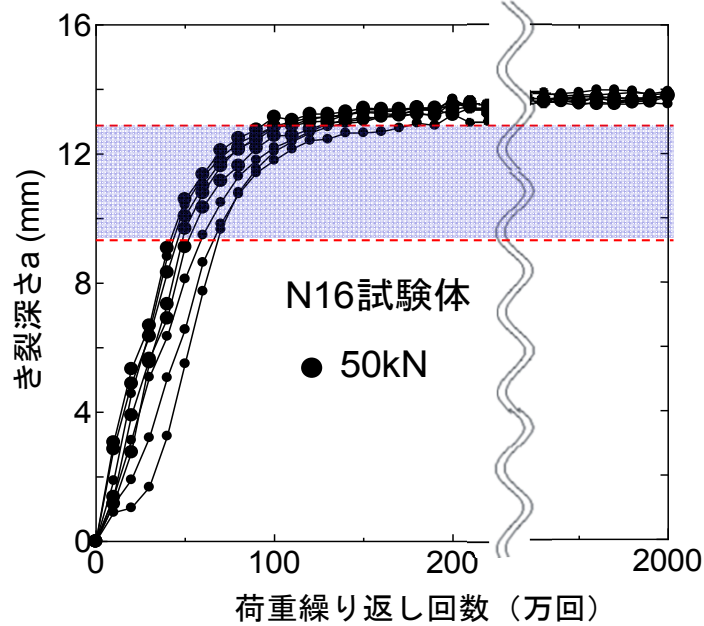
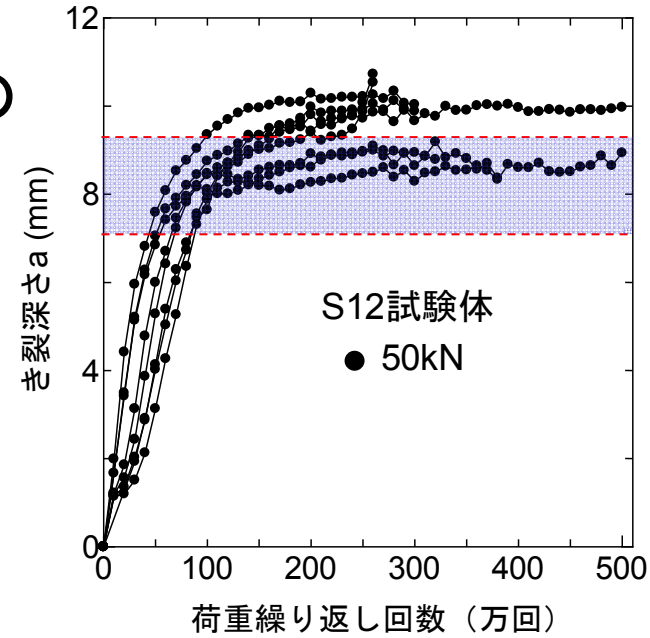
$$\text{ひずみ範囲減少率} = (\Delta\varepsilon_0 - \Delta\varepsilon) / \Delta\varepsilon_0$$

$\Delta\varepsilon_0$: 初期ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$: ひずみ範囲

き裂進展曲線

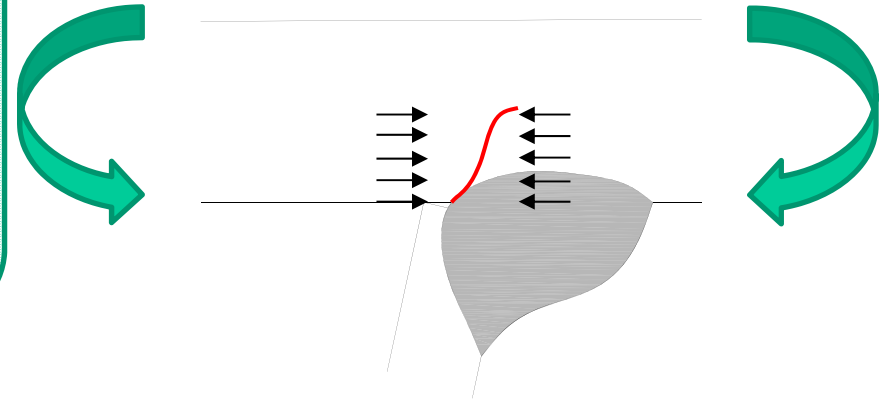


板厚の
80%
60%

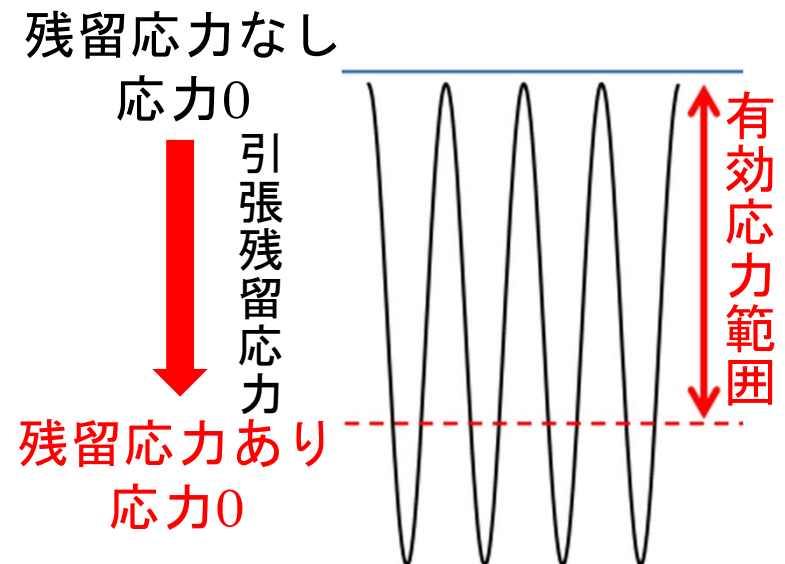


デッキき裂の進展性状

溶接ルート部には圧縮応力が作用するにも関わらず、き裂は**荷重**
重載荷直後に発生し荷重繰り返し回数に比例して進展する



ルート部先端に**引張残留応力**が存在するとすれば
→特異な進展性状が説明可能



疲労耐久性向上法のアイデア

デッキ進展き裂の原因と考えられる溶接ルート部の引張残留応力低減による疲労耐久性向上

検討の方法

①荷重範囲の影響

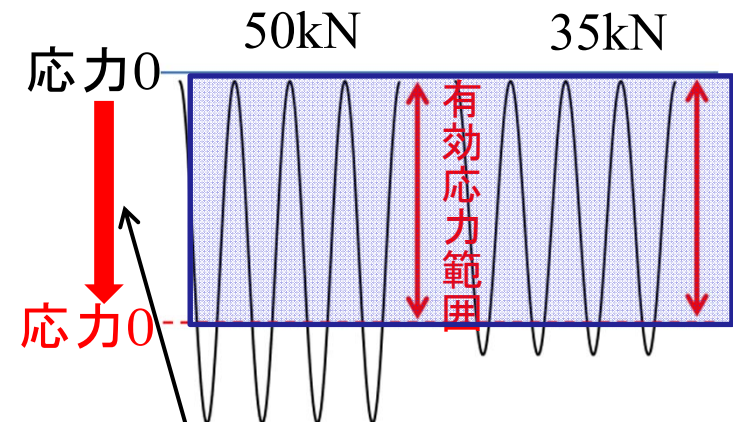
荷重範囲35kNと荷重範囲50kNの
疲労試験結果を比較

↓

き裂の進展性状、進展速度が
荷重範囲によらず同じ

↓

ルート部先端近傍に引張残留応力が存在する

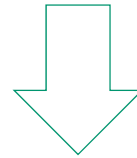


応力0点が移動する

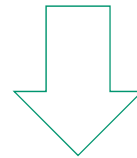
検討の方法

② 残留応力除去焼鈍を施した試験体の疲労試験

焼鈍を施した試験体と溶接のままの試験体の疲労試験結果を比較



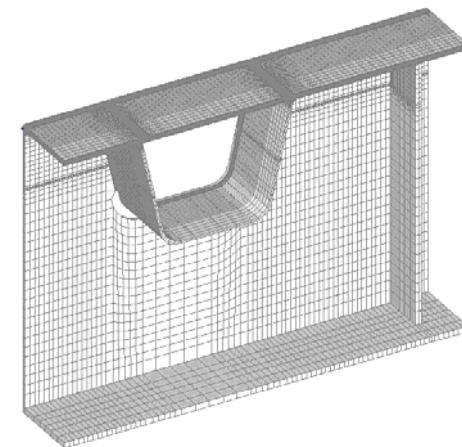
焼鈍を行なった場合、疲労耐久性が向上？



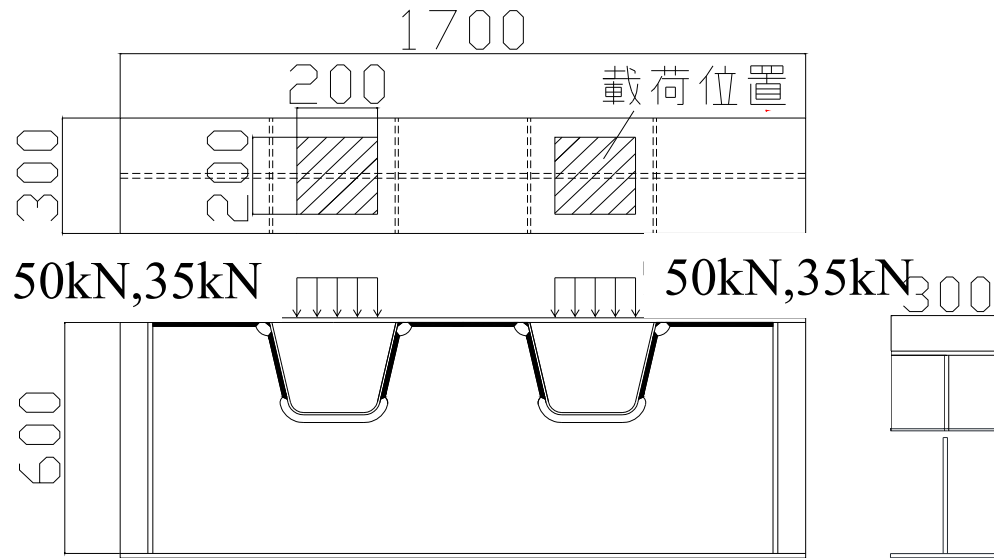
残留応力焼鈍の効果を明らかにする

③ 3次元熱弾塑性解析

- ・溶接ルート部近傍の残留応力を明らかにする
- ・残留応力を低減する方法を示す



< 試験体形状・寸法 >



デッキプレート厚
12mm 16mm
トラフリブ寸法
320mm × 240mm × 6mm

試験体	荷重範囲	スカラップ
N12	50kN	なし
S12		あり
N16		なし
S16		あり
N12	35kN	なし
S12		あり
N16		なし
S16		あり

荷重範囲の影響—疲労破面—

荷重範囲50kN

N12



S12



N16



S16



荷重範囲35kN

N12



S12



N16

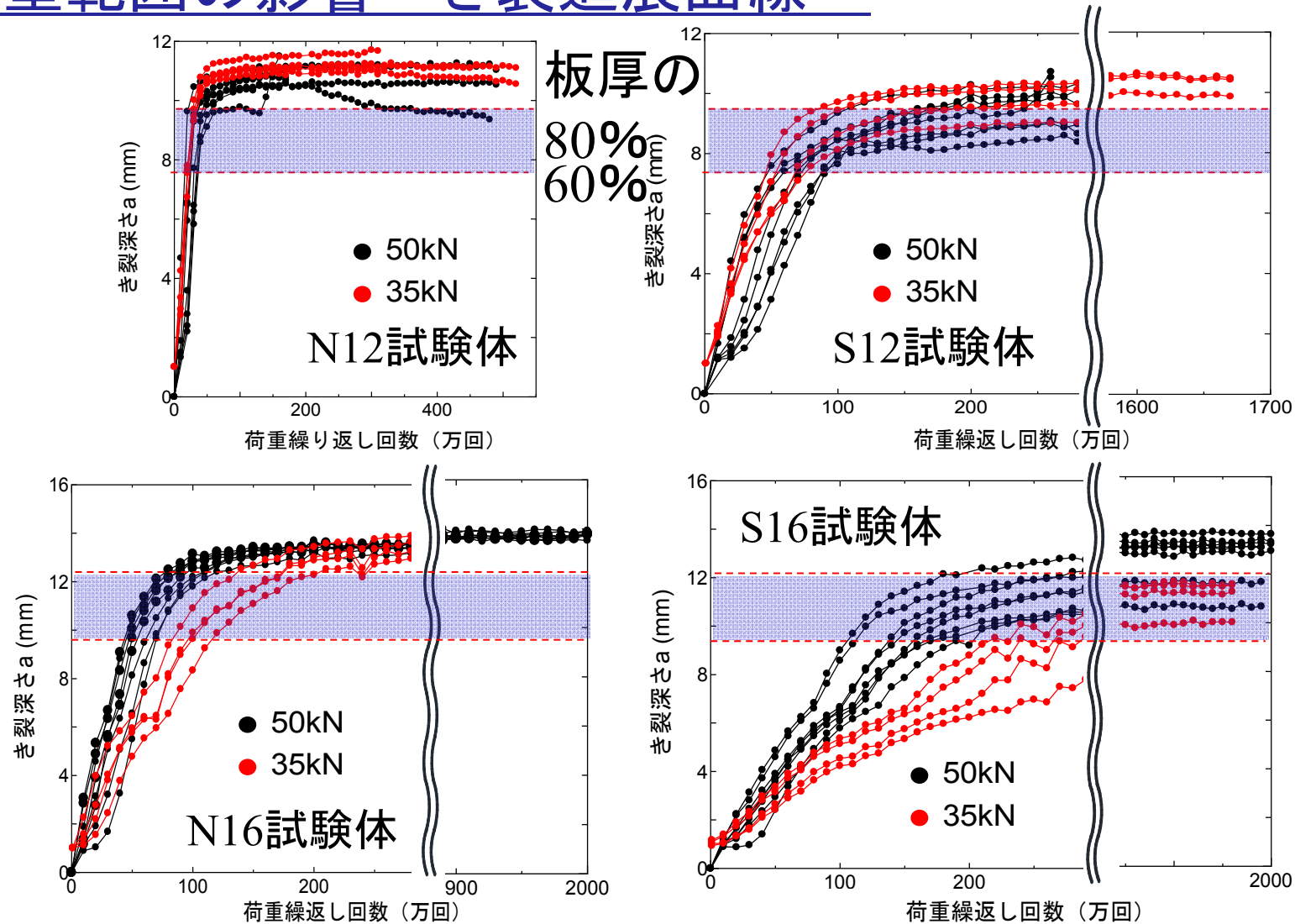


S16



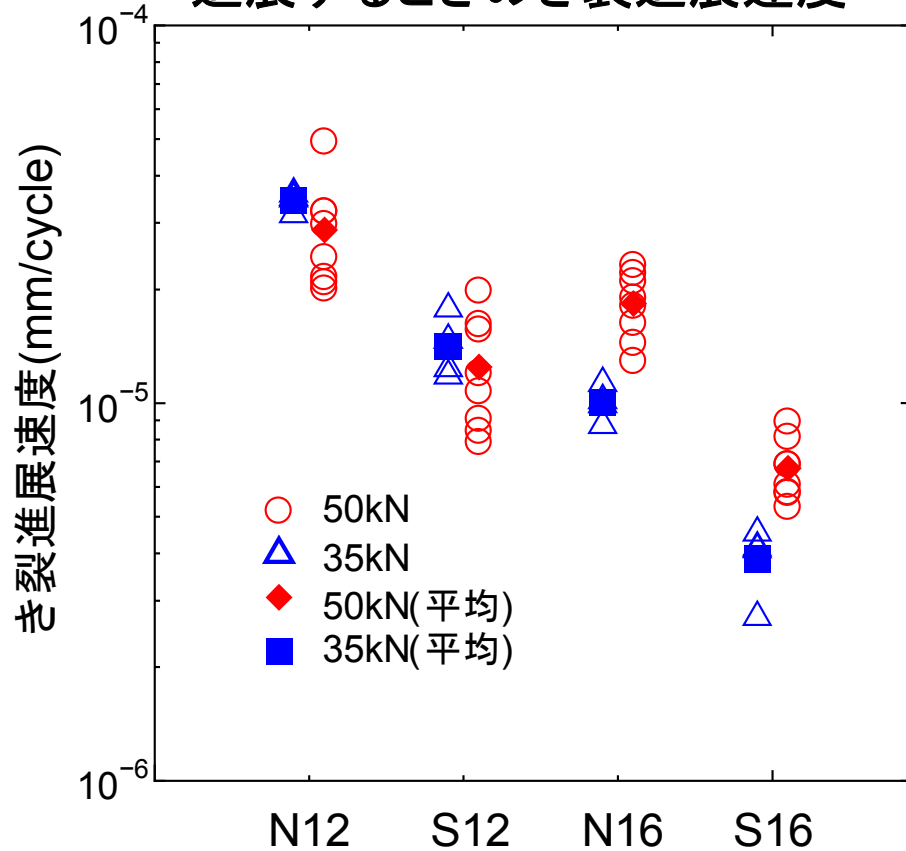
- ・荷重範囲50kN、35kNのいずれも、主たる疲労き裂は下から生じる
- ・その後、上から生じたき裂と合体する

荷重範囲の影響—き裂進展曲線—



き裂の発生・進展性状に対する荷重範囲の顕著な影響はない

き裂が板厚の1/2まで
進展するときのき裂進展速度



＜進展速度の平均値＞
(荷重範囲50kNを基準とする)

試験体	50kN	35kN
N12	2.87×10^{-5} mm/cycle (1.00)	3.43×10^{-5} mm/cycle (1.12)
S12	1.25×10^{-5} mm/cycle (1.00)	1.42×10^{-5} mm/cycle (1.13)
N16	1.84×10^{-5} mm/cycle (1.00)	1.00×10^{-5} mm/cycle (0.54)
S16	6.72×10^{-6} mm/cycle (1.00)	3.87×10^{-6} mm/cycle (0.58)

き裂進展速度表示式

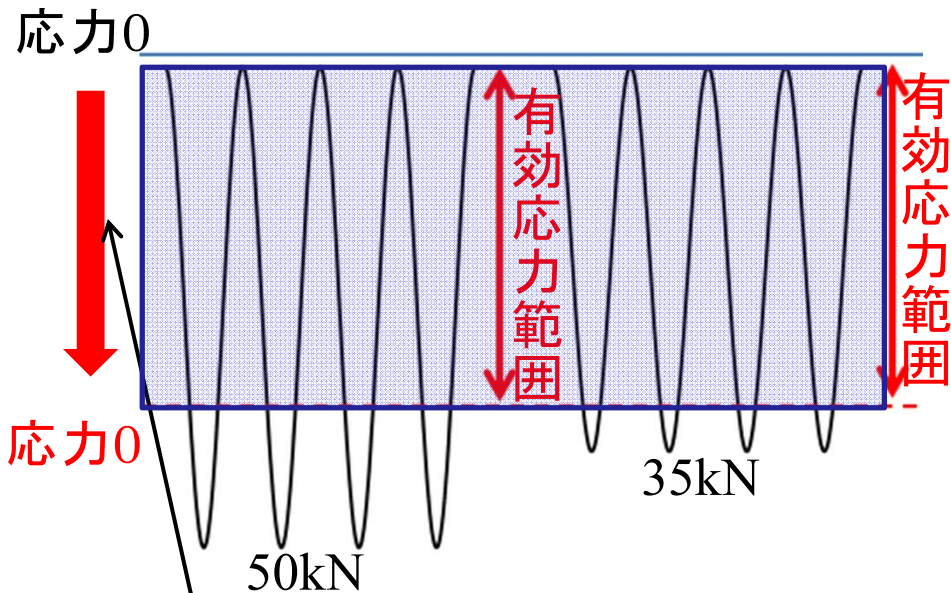
$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^3$$

C: 材料定数 ΔK : 応力拡大係数

0.34

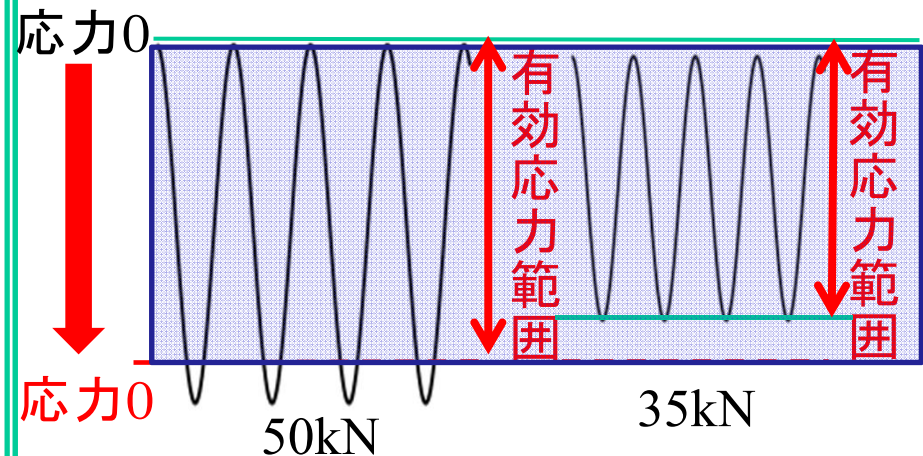
原因は... 溶接ルート部に生じる **引張残留応力**

N12, S12



応力0点が移動する

N16, S16

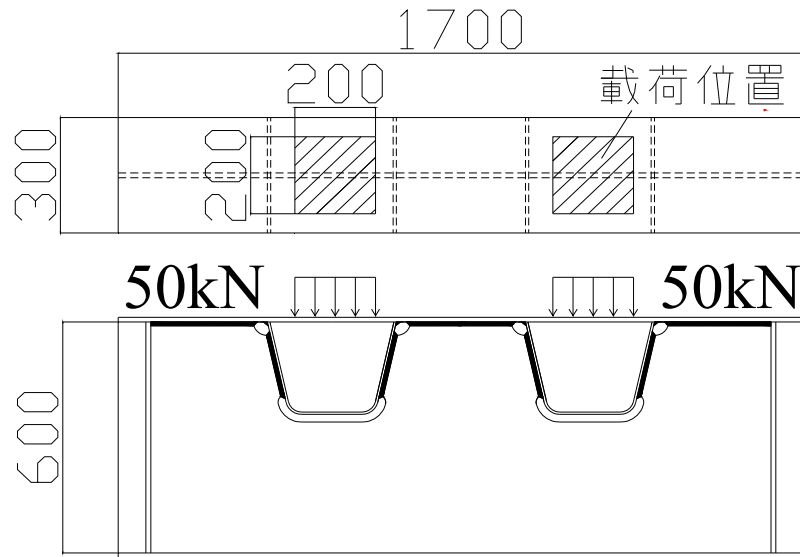


荷重の大きさが変わっても進展速度が
変わらなかった原因

→ **引張残留応力**

残留応力除去焼鈍の効果ー試験体ー

＜試験体形状・寸法＞



デッキプレート厚

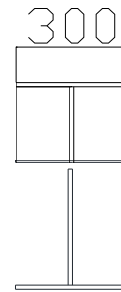
12mm 16mm

トラフリブ寸法

320mm × 240mm × 6mm

＜焼鈍条件＞

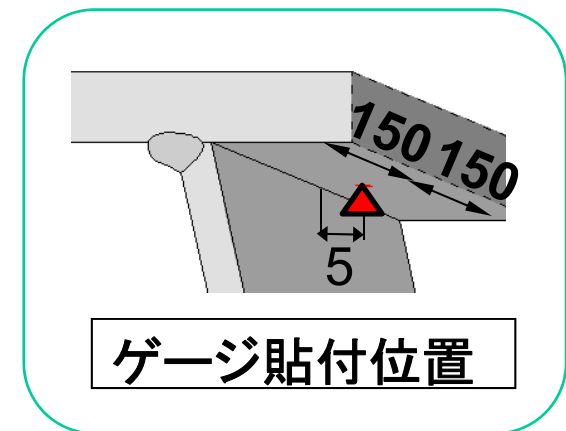
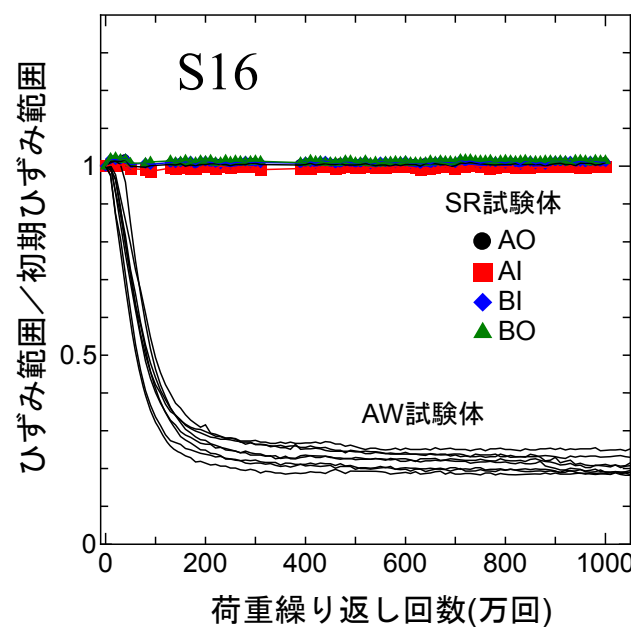
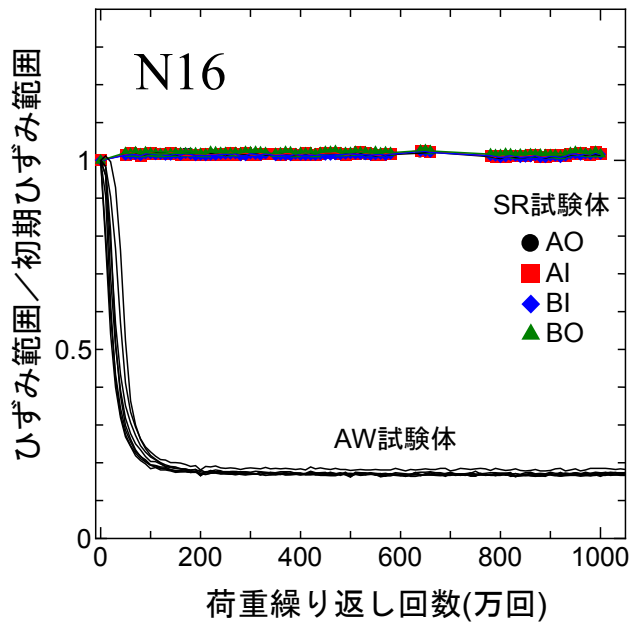
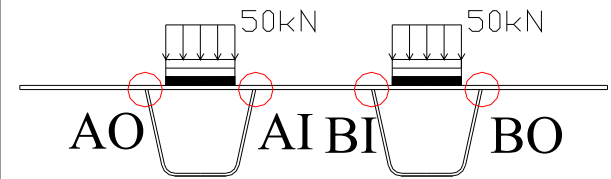
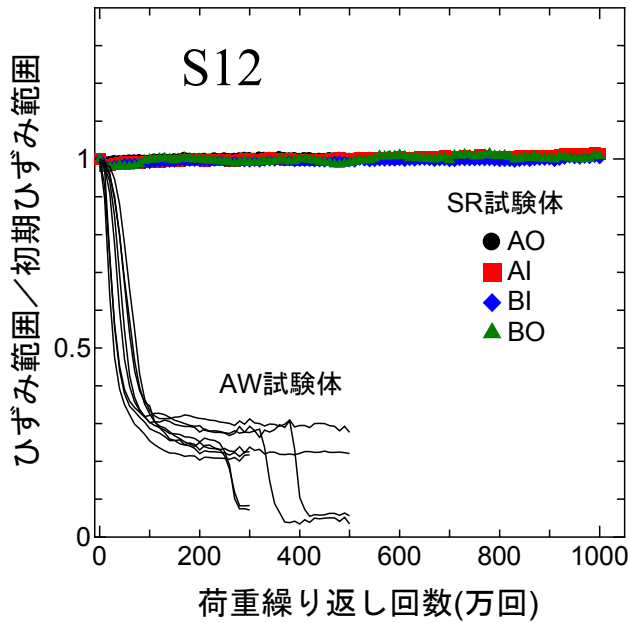
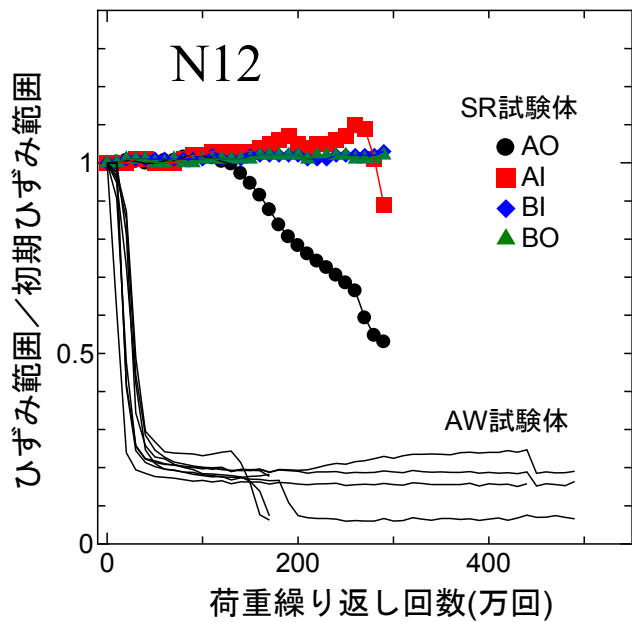
昇温速度40°C/hr, 625°C3時間保持
降温速度50°C/hr



試験体	荷重範囲	残留応力 除去焼鈍	スカラップ
N12AW	50kN	なし	なし
S12AW			あり
N16AW			なし
S16AW			あり
N12SR	50kN	あり	なし
S12SR			あり
N16SR			なし
S16SR			あり

AW: 溶接のままの試験体
SR: 焼鈍を施した試験体

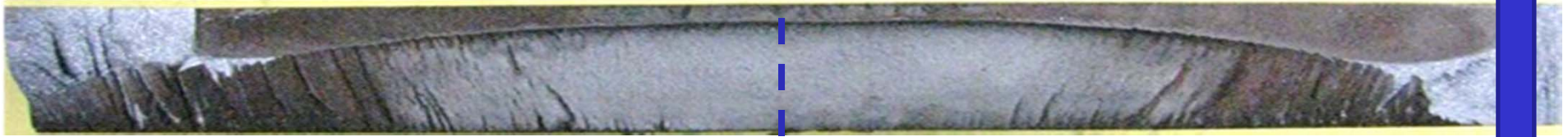
残留応力除去焼鈍の効果—ひずみ範囲の変化—



残留応力除去焼鈍の効果—疲労破面—

先にき裂が生じる方向

N12AW (溶接のまま)



横リブ板厚中心

N12SR (残留応力除去焼鈍)



横リブ板厚中心

- ・AW試験体は下から、SR試験体は上から疲労き裂が生じている。
- ・その後、反対側から生じたき裂と合体する。

残留応力除去焼鈍の効果ー断面マクロー

N12SR試験体



S12SR試験体



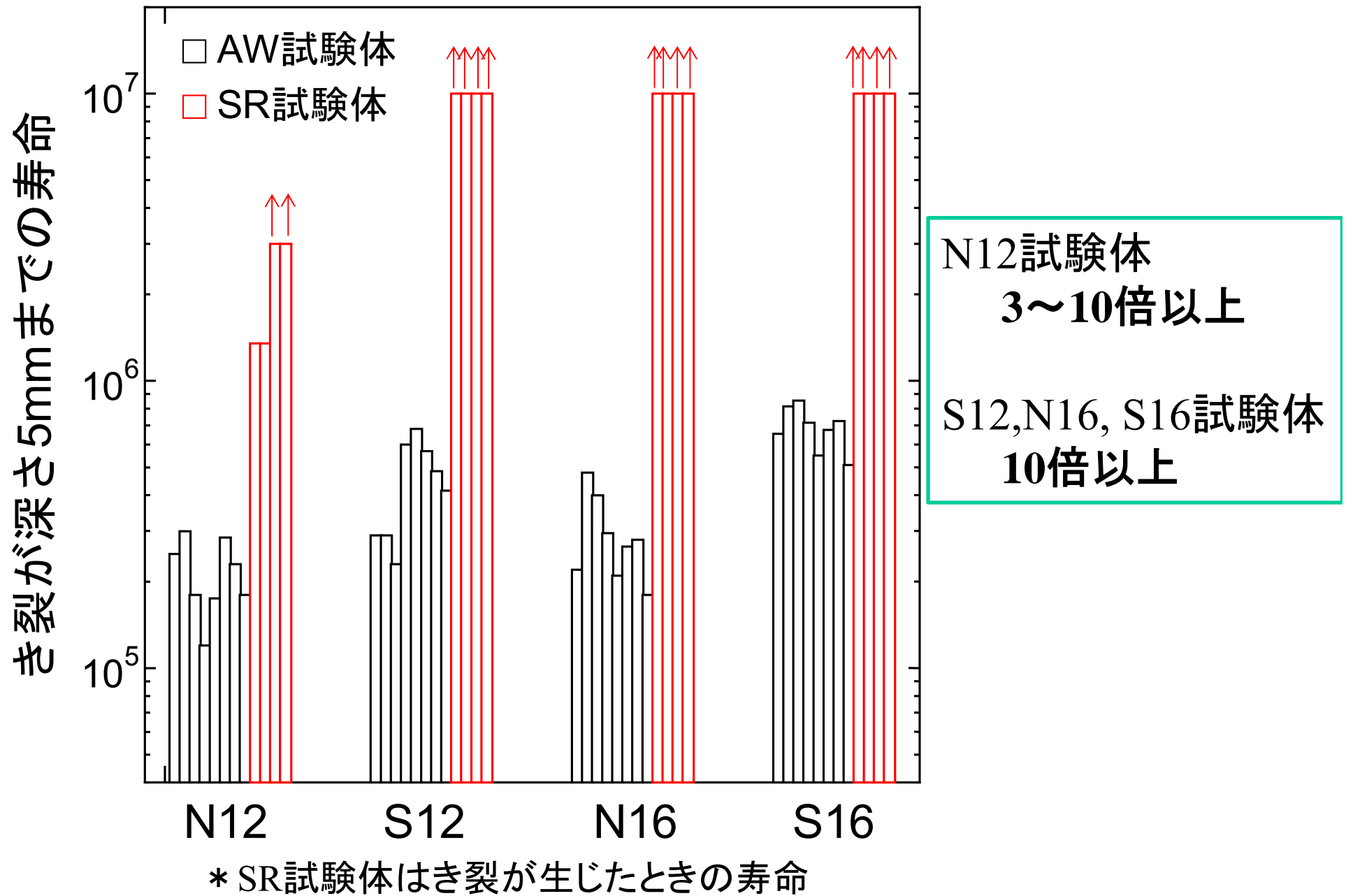
N16SR試験体

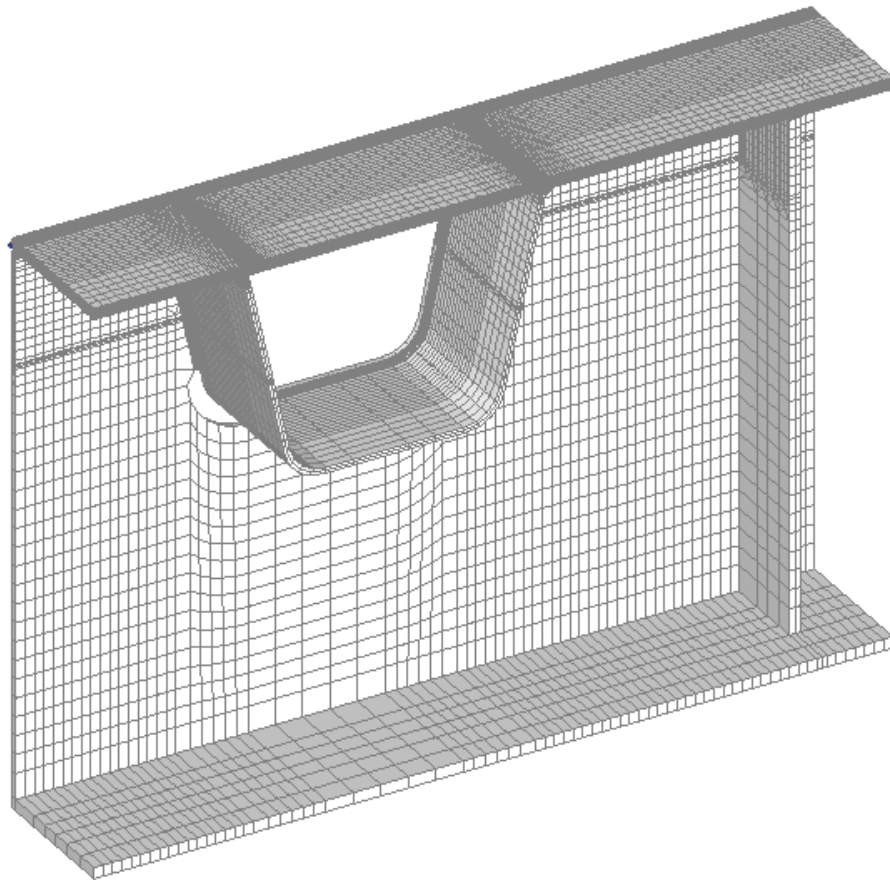


S16SR試験体



残留応力除去焼鈍(SR)の効果—疲労耐久性向上—





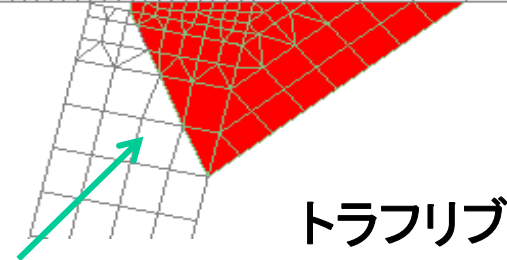
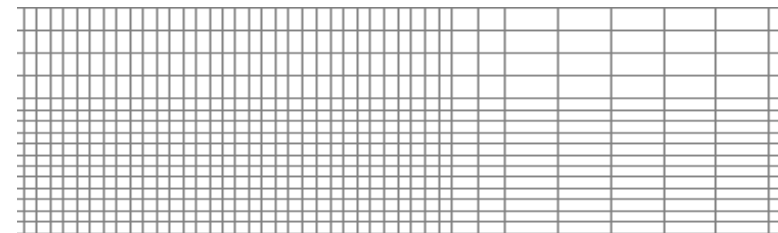
溶接：脚長8mm
溶接溶込み深さ：トラフリブ厚の75%

プリポスト：Femap
ソルバ：Abaqus Ver.6.11-3

入熱条件

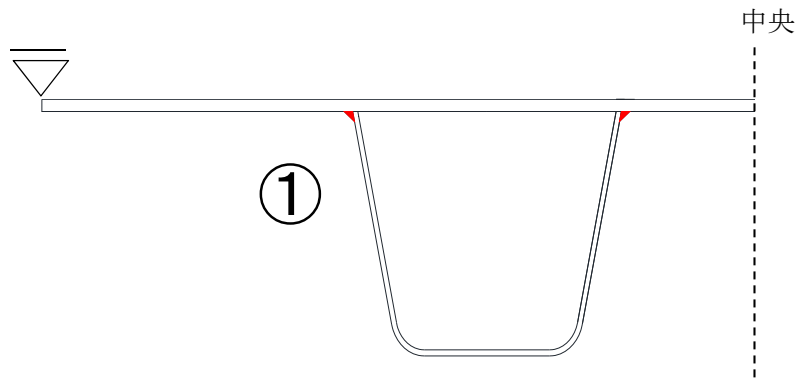
電流	360 A
電圧	39 V
入熱量	14040 J
熱効率	0.75

デッキプレート

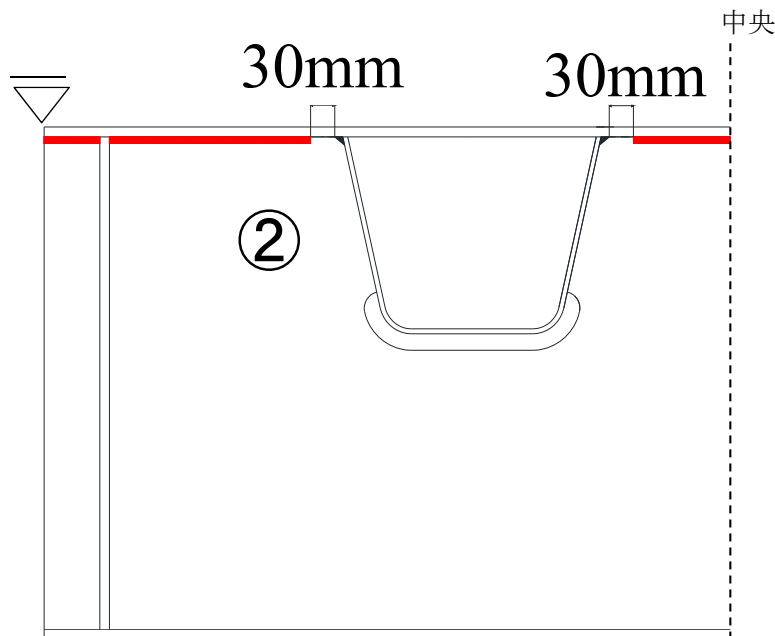


溶接加熱時対象部

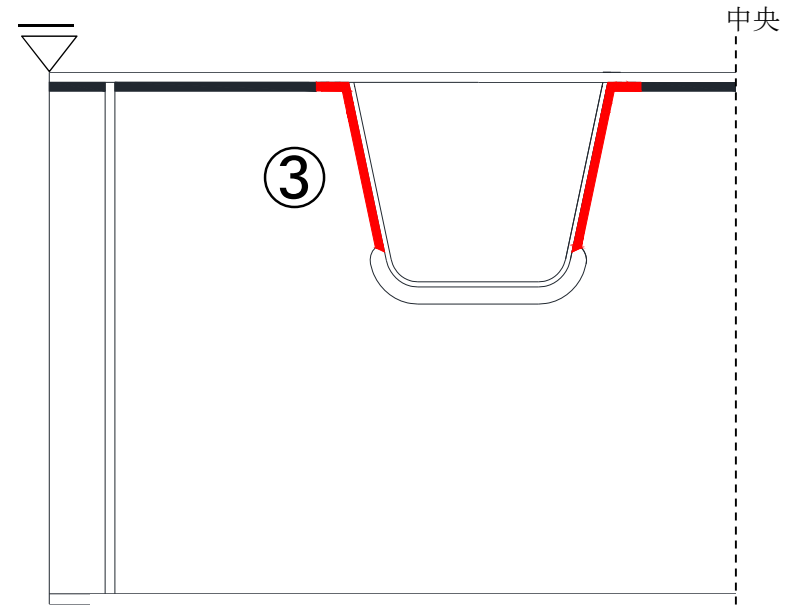
溶接ルート部の残留応力解析—解析手順—



デッキプレート・トラフリブ溶接



横リブ・デッキプレート溶接



トラフリブ・横リブ溶接

解析手順

①デッキプレート・トラフリブ溶接



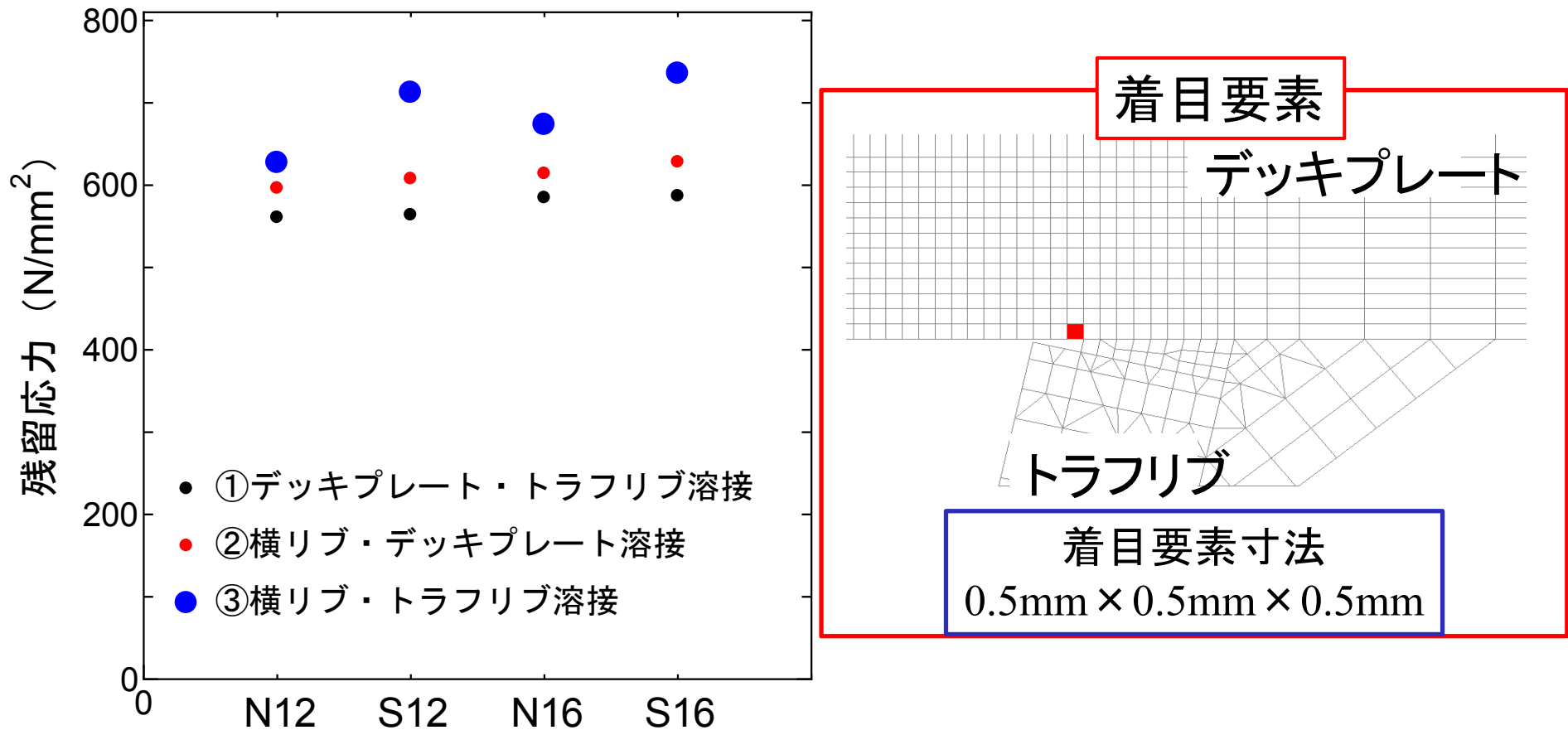
②横リブ・デッキプレート溶接

※N12, N16は, デッキプレート・トラフリブ溶接部から30mm離れた位置までを溶接



③トラフリブ・横リブ溶接

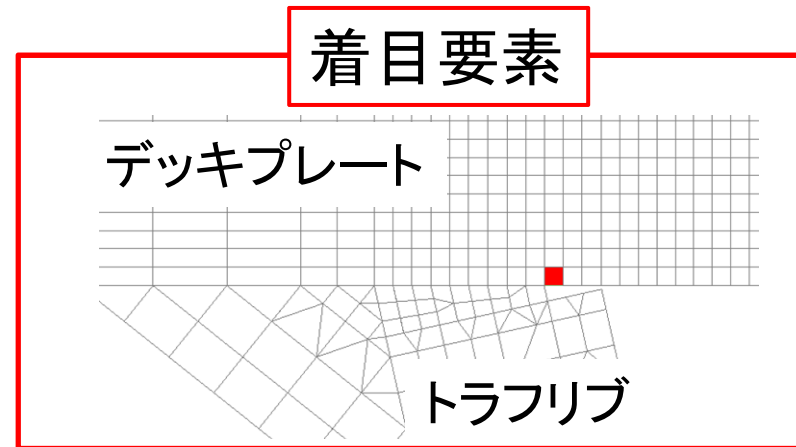
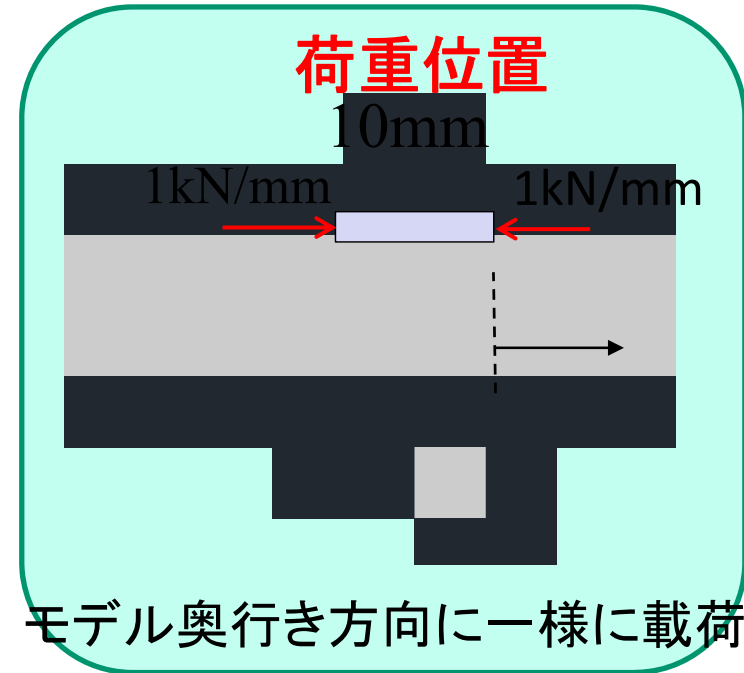
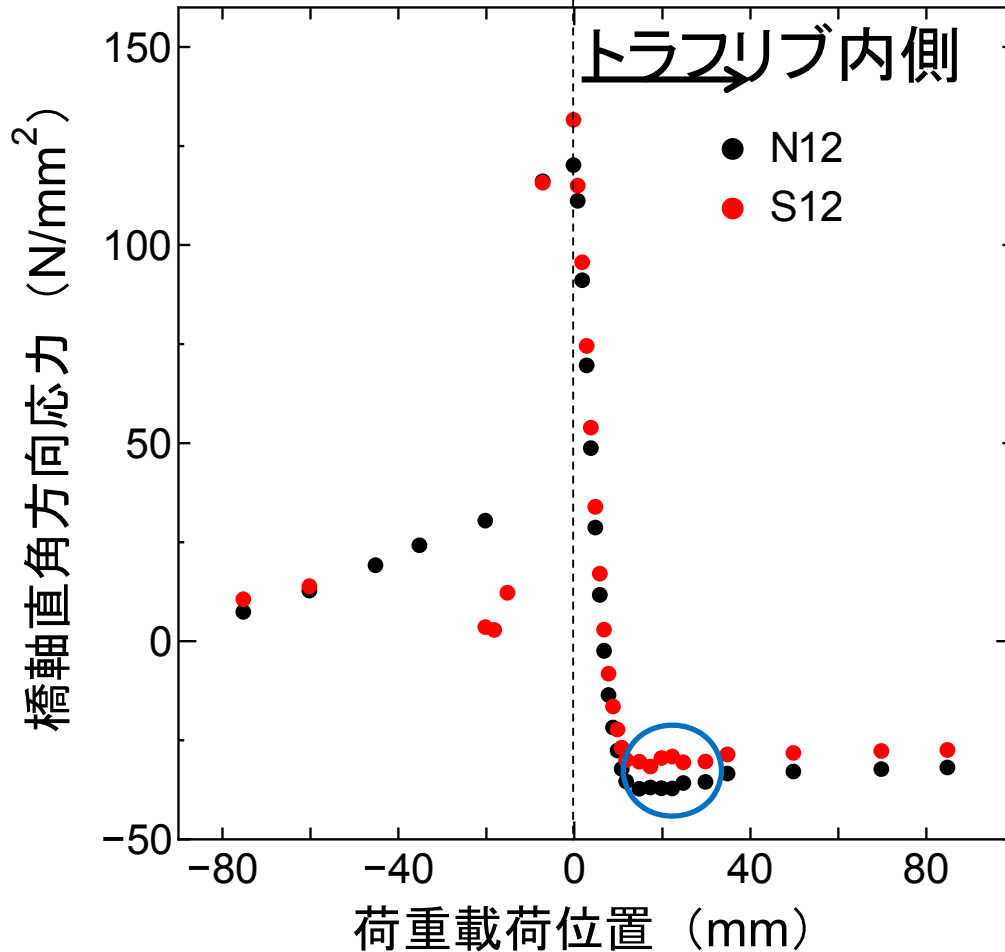
溶接ルート部の残留応力解析－残留応力(最大主応力)－



デッキプレート厚を厚くする, スカラップを設けることで残留応力は大きくなる

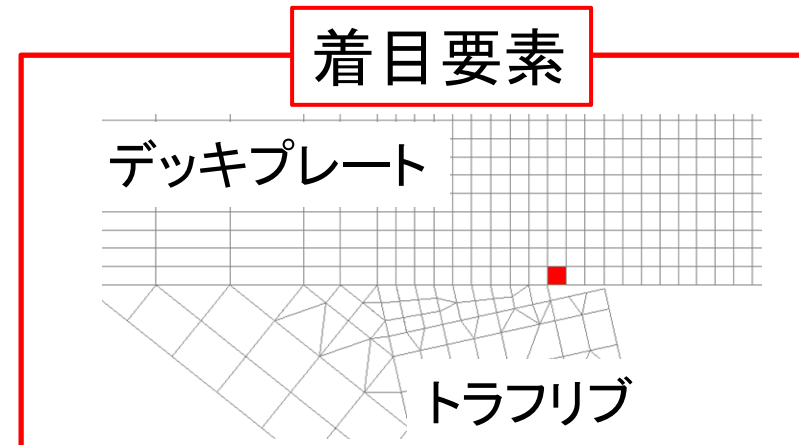
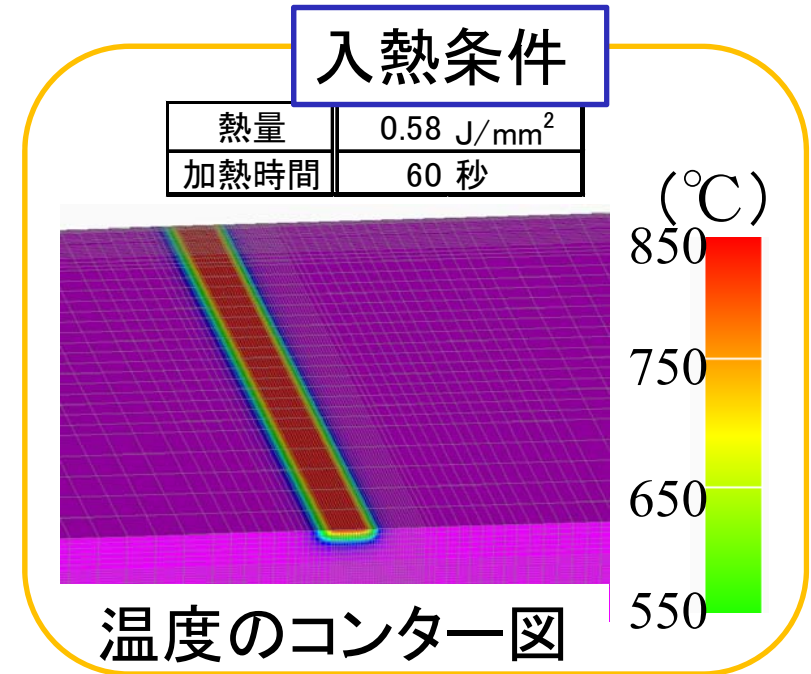
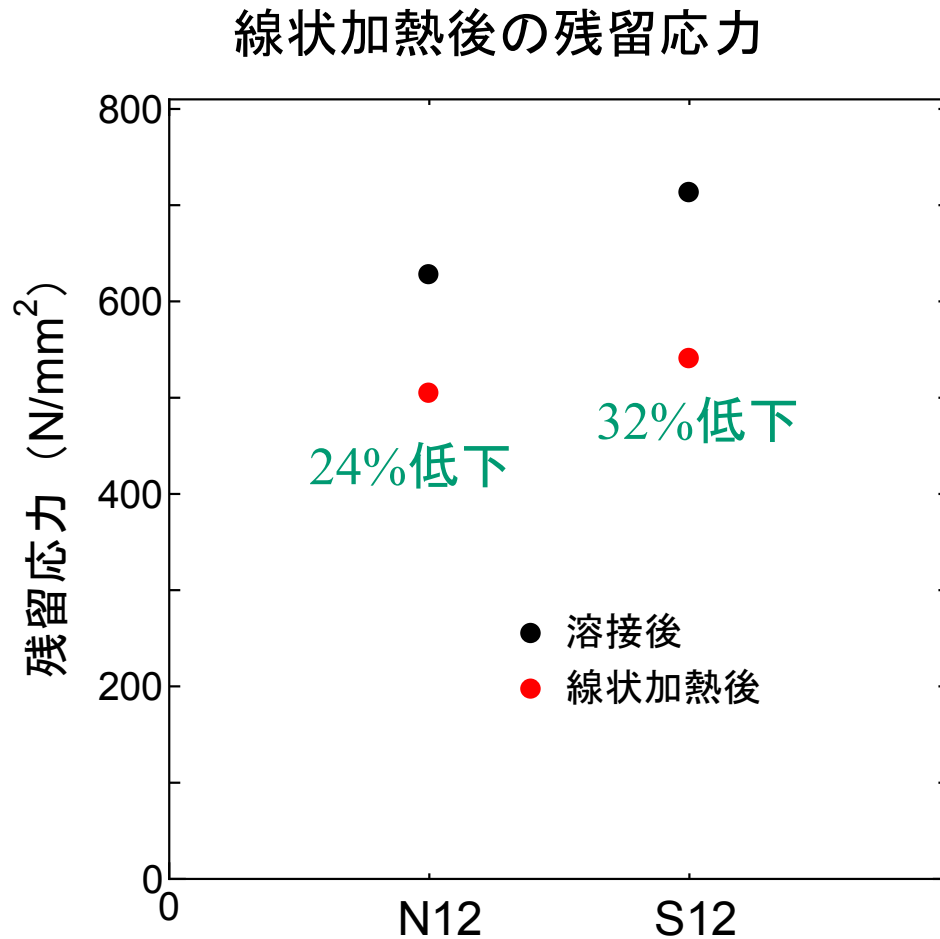
溶接ルート部の残留応力解析—加熱位置の検討—

加熱方法: アセチレンガスバーナー



最大圧縮応力が生じた位置は、トラフリブ内面から内側に20mm程度

線状加熱による残留応力低減



残留応力は線状加熱によって
N12で24%, S12で32%低減

残留応力の低減法

- * 残留応力除去焼鈍は、非現実的
- * 線状加熱が現実的
- * 最適な位置、時間、方法
解析的検討、実験による検討

今後の課題

- * 一般の方のメンテナンスへの理解
自動車の車検、エレベータの点検
- * メンテナンス事業
人材の確保と育成(資格制度)