

“振動成分が重畳した疲労試験方法の開発および疲労強度影響評価の調査研究” 完了報告

大阪大学大学院工学研究科船舶海洋工学部門
ジャパン・マリンユナイテッド技術研究所

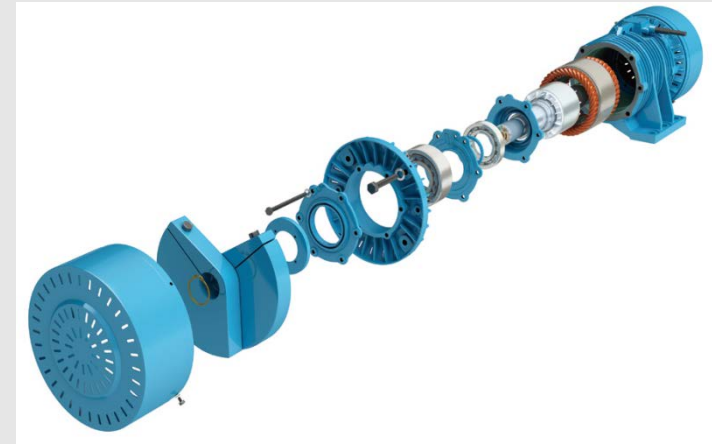
- コンテナ船の長大化. スプリングングやホイッピング等の高周波振動が疲労強度に及ぼす影響が問題化.
- 角(2012), 北村ら(2012)
 - 高周波重畳荷重下における母材中の疲労き裂進展挙動
 - 高周波成分により全荷重振幅が増大する効果のみ考慮すれば, 高周波重畳時のき裂伝播寿命を推定できる.
- Fricke and Paetzold (2012)
 - 高周波重畳荷重下の十字継手の疲労試験
 - 高周波成分による振幅増大を考慮した応力カウンティングを推奨
- 溶接継手の高周波重畳疲労試験データが不足
- 実構造を模擬した溶接継手試験体を使用して, 種々の条件下で多数の高周波重畳疲労試験を実施する必要がある.

- 油圧サーボ疲労試験機
 - 高額な初期費用・運転費用
 - 高周波重畳応力波形を再現する場合，運転費用と試験時間が許容限度を超えて大きくなる。
- 本研究の目的
 - 溶接継手の高周波重畳疲労試験に要する費用・時間を劇的に低減できる新しい疲労試験装置を開発する。
 - 振幅増大効果のみを評価するEnlargement応力カウント法を開発する
 - 定常的に高周波が重畳する場合に有効な疲労寿命評価手法を開発する
 - 間欠的に高周波が重畳する応力波形を負荷した疲労試験を実施し，定常重畳時に有効な寿命推定法の間欠的重畳波形に対する有効性を調べる。



回転偏心錘りを用いた疲労試験装置

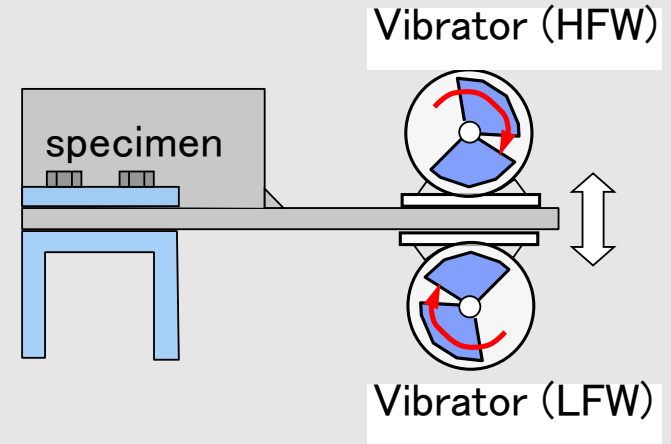
- Yamada (2006)
 - 回転偏心錘りを用いた市販起振機“ユーラス”を利用して簡易疲労試験装置を開発
- 板曲げ荷重型疲労試験装置
Plate Bending Vibration, PBV-type
 - t=12mmで開発
 - t=6~19mmでの実績あり
 - f>20Hzの高速負荷
 - 電気料金：油圧試験機の1/1000以下



	Conventional machine	Developed machine
Power source	Hydraulic pressure	Electric motor
Load application	Load, Displacement	Inertia force
Load frequency	about 2~3Hz	20 Hz
Electricity expense per specimen	65,000JPY (650USD)	60JPY (0.60USD)

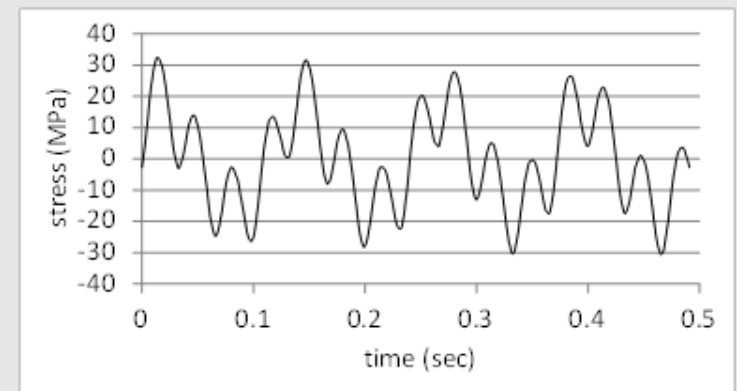
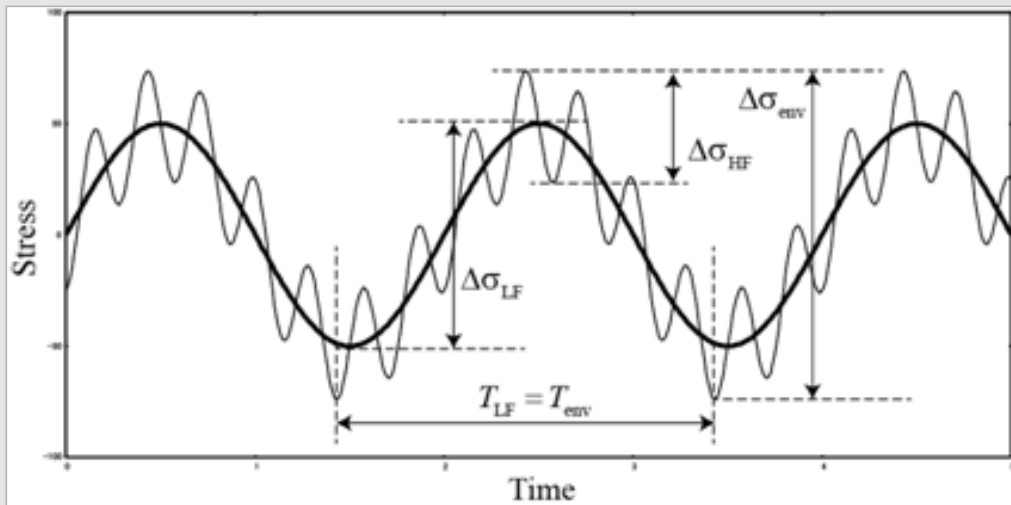
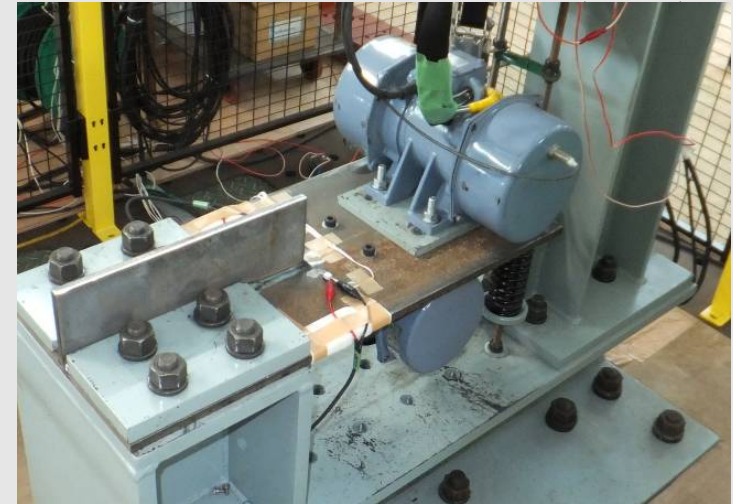
回転偏心錘りを用いた疲労試験装置

- 油圧試験機
 - 高周波成分を5Hz程度で負荷するのが限界
 - 多大な試験工数, 費用 (電気料金)
- PBV試験機
 - ユーラスと別機構により試験体に弾性振動を生じさせることができる.
 - 高周波数の起振機を追加
→スプリング重畳荷重
 - 間欠的に試験体を打撃
→ホイッピング重畳荷重
- 油圧試験機の1/10以下の試験時間,
1/1000以下の電気料金



スプリング重畳荷重試験装置

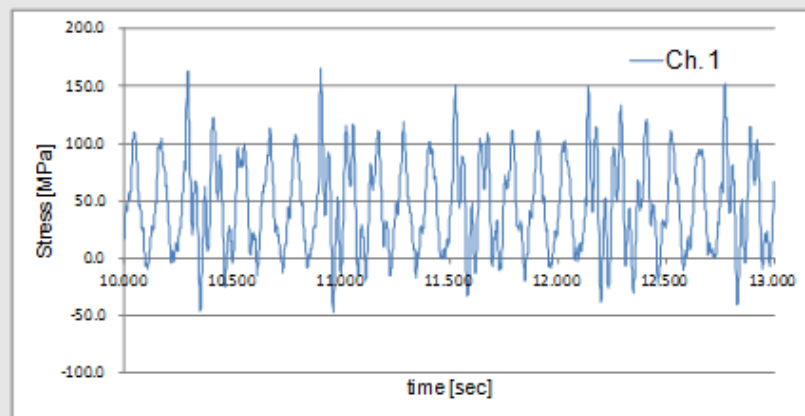
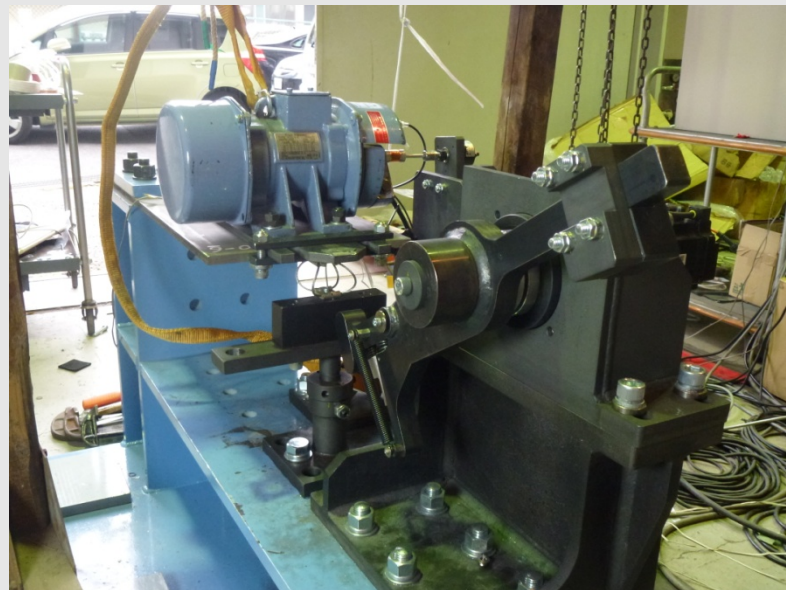
- PBV試験装置にHFW用追加起振機を搭載
- LFW周波数 ω_{LF} , HFW周波数 ω_{HF} は個別に制御



$$\omega_{HF}/\omega_{LF} = 3.78, \quad \Delta\sigma_{HF}/\Delta\sigma_{LF} = 0.74$$

ホイッピング重畳荷重試験装置

- Toyoda et al. (2012)
 - Whipping荷重の特徴
 - $\omega_{HF} \doteq 4\sim 5\omega_{LF}$
 - Whipping波形はLFW5波で減衰
- PBV試験体の自由端を回転ハンマでLFW5波に1回打撃
- 目標波形の継続発生に成功



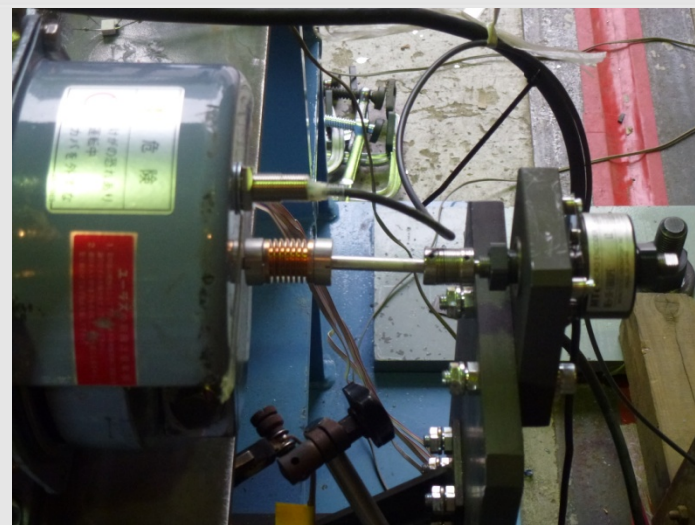
ホイッピング重畳荷重試験装置

- ハンマの二度撃ちを防止するメカニズム
- 打撃で生じた振動が阻害されない

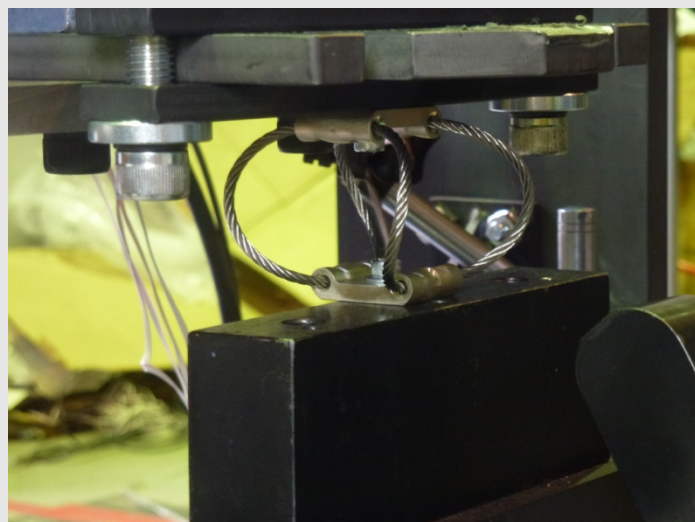
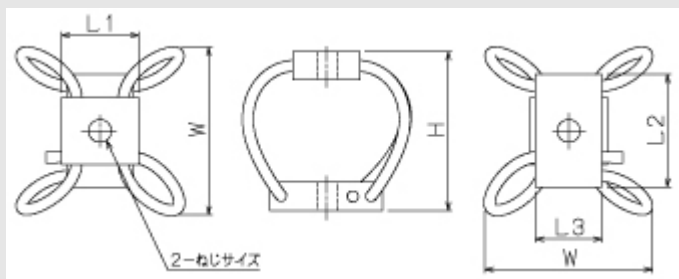


ホイッピング重畳荷重試験装置

- 起振機回転軸のエンコーダ
 - 回転錘とハンマの位置関係を制御
 - 高精度な位相制御を実現

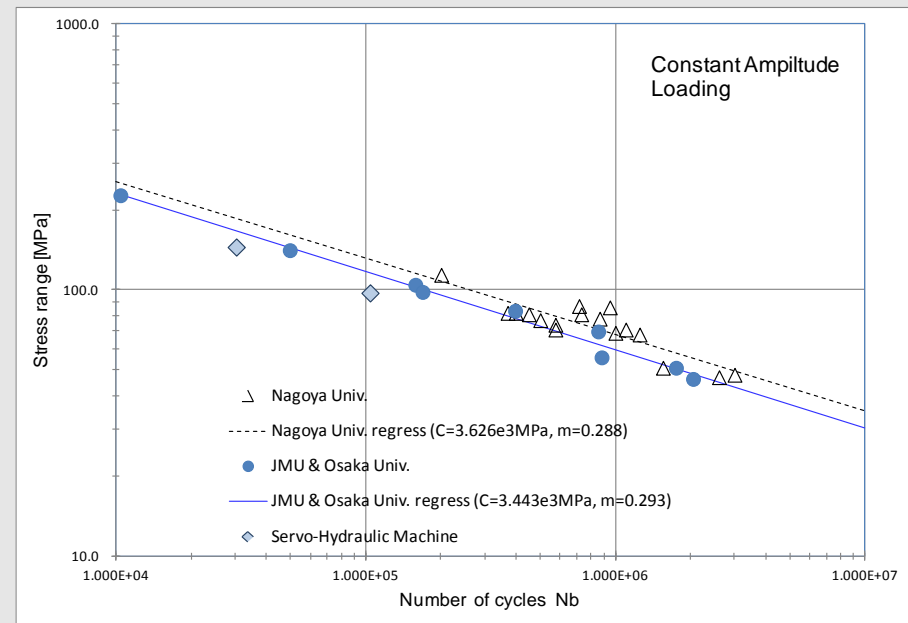
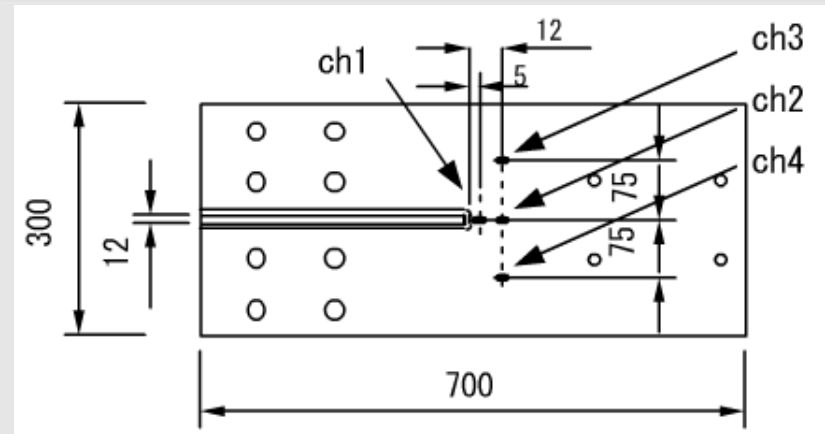


- エニダイン・コンパクトロープ防振器
 - 3次元変形，大減衰能，高耐久性
 - 防振ゴムを併用して減衰能を調整



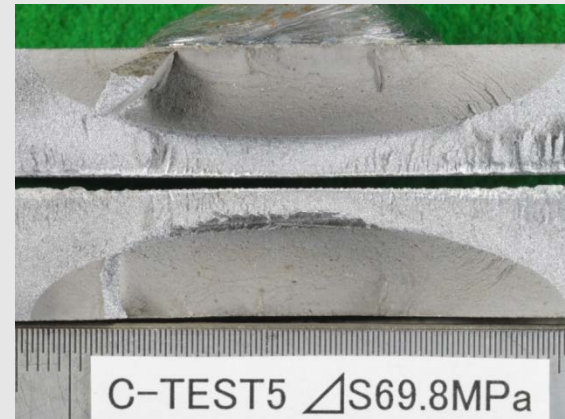
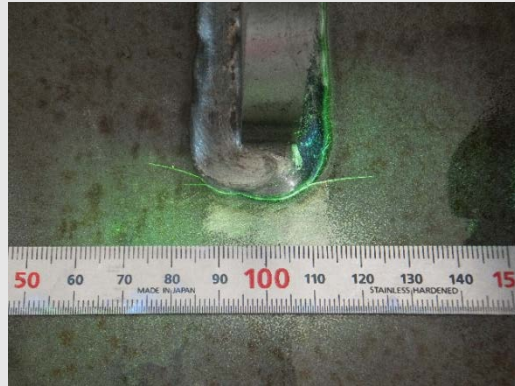
定荷重振幅疲労試験

- 造船鋼AH32, $t=12\text{mm}$
- 角回し継手
- 主板中央線付近の角回し溶接ビード止端でき裂が発生
- ビード止端に沿って進展した後、ビードから離れて主板内に進展
- Nb: き裂がビードから離れた時のLFW荷回数

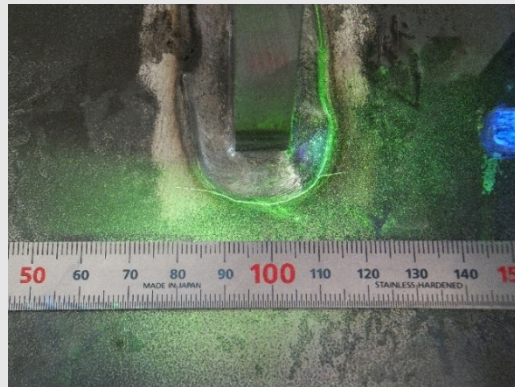


疲労破面

- Ch1 65% drop = き裂がビードから主板に進入した時期
- 定荷重疲労試験



- Whipping試験(W-100)

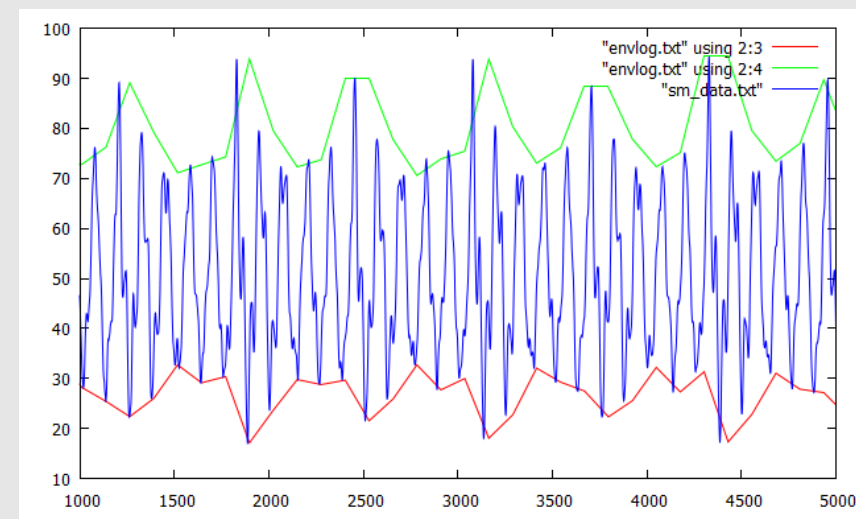
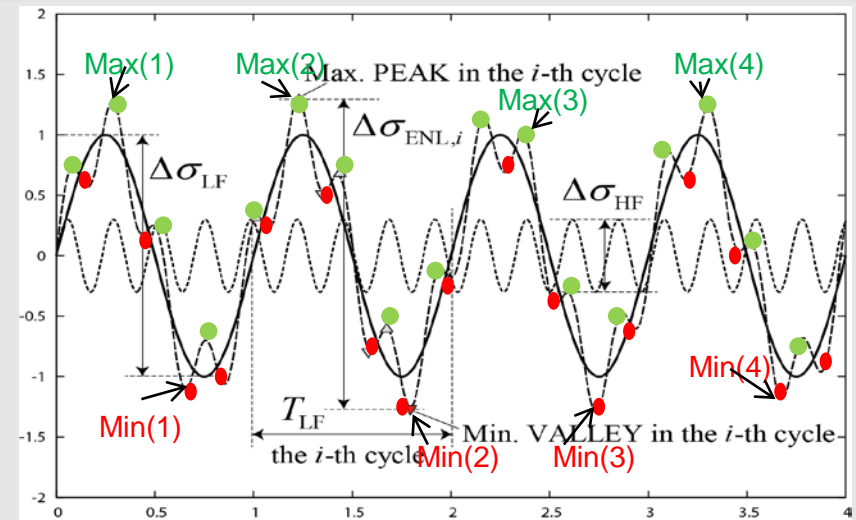


■ サイクルカウント

- Rainflow 法 ASTM E 1049-85 (2005)
- Enlargement カウント法: 高周波成分による振幅増大を考慮してカウント
- LFW counting: HFW を無視してカウント

■ Enlargement カウント法

- LFWサイクル中の極大値の中の最大値 $\text{Max}(i)$ と極小値の中の最小値 $\text{Min}(i)$ を記録.
- LFWサイクルのpeak-to-peak振幅を $\text{Max}(i) - \text{Min}(i)$ で評価
- 包絡線によるカウントに相当



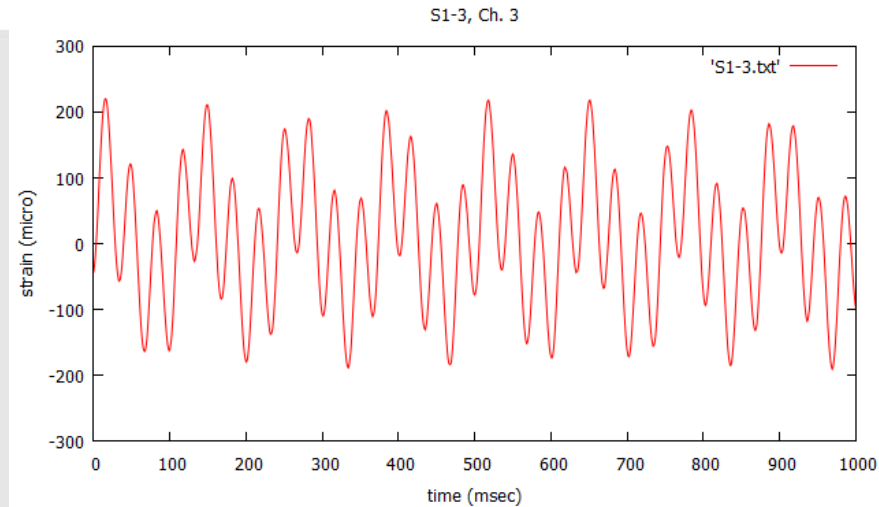
スプリング重畳疲労試験

- $f_{LF} \cong 12\text{Hz}$, $\omega_{HF}/\omega_{LF} \cong 3.78$
- S1 : $\Delta\sigma_{LF} \cong 36\text{MPa}$, $\Delta\sigma_{HF}/\Delta\sigma_{LF} \cong 0.7 \sim 1.3$
- S2 : $\Delta\sigma_{LF} \cong 48\text{MPa}$, $\Delta\sigma_{HF}/\Delta\sigma_{LF} \cong 0.7 \sim 1.2$
- S3 : $\Delta\sigma_{LF} \cong 60\text{MPa}$, $\Delta\sigma_{HF}/\Delta\sigma_{LF} \cong 0.4$
- Nb : Ch1歪振幅が初期値から65%減少するまでの負荷回数

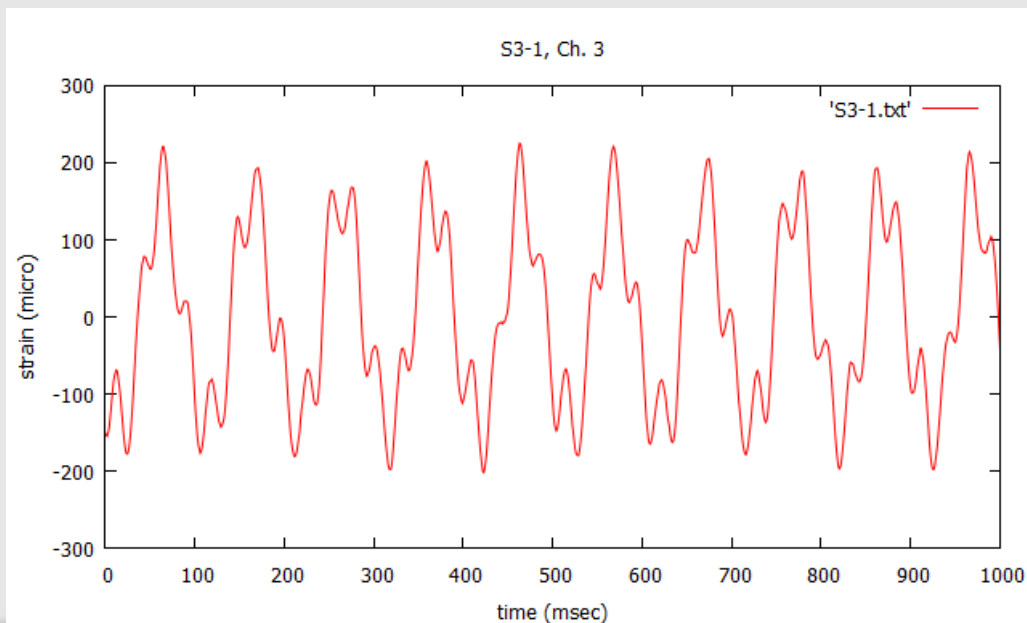
No.	$\Delta\sigma_{LF}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{HF}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{HF}$ / $\Delta\sigma_{LF}$	Nb	D_{LF}	D_{ENL}	D_{rf}	$\Delta\sigma_{eq,ENL}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{eq,rf}$ (MPa)
S1-1	36.7	27.0	0.74	1.882E+06	0.349	1.560	1.658	54.1	55.0
S1-2	35.6	33.6	0.94	7.210E+05	0.121	0.859	0.957	60.4	61.6
S1-3	35.6	44.7	1.26	2.239E+05	0.037	0.507	0.627	73.8	78.1
S2-1	47.6	28.0	0.59	4.910E+05	0.221	0.881	0.936	68.9	69.8
S2-2	48.0	36.5	0.76	4.247E+05	0.197	1.091	1.168	76.7	78.4
S2-3	47.8	55.2	1.15	1.518E+05	0.069	0.837	1.014	96.6	101.9
S3-1	60.1	21.4	0.36	4.855E+05	0.485	1.131	1.186	74.5	75.3
S3-2	62.8	12.2	0.19	6.515E+05	0.756	0.984	1.009	65.4	65.8
S3-3	62.0	32.3	0.52	2.802E+05	0.311	0.881	0.913	81.6	82.4

スプリングング重畳疲労試験

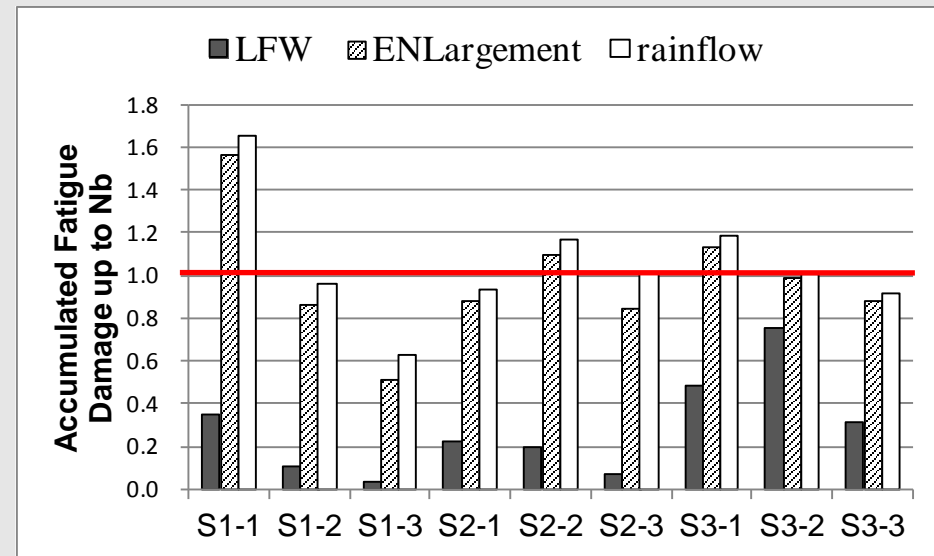
- 重畳波形の例
- Case S1-3:
 - $Ds_{LF}=35.6\text{MPa}$
 - $Ds_{HF}/Ds_{LF}=1.26$



- Case S3-1:
 - $Ds_{LF}=60.1\text{MPa}$
 - $Ds_{HF}/Ds_{LF}=0.36$



- 特殊な条件を除くと D_{ENL} , D_{rf} : 0.8~1.7
- $D_{ENL} < D_{rf}$ だが差は僅少
- Rainflow法 or Enlargementカウントにより疲労寿命を推定可能
- 本研究のスプリングング重畳試験条件では、全応力範囲の拡大効果が支配的な影響力を有することがわかった



ホイッピング重畳疲労試験

- WL : light weight , WH : heavy weight

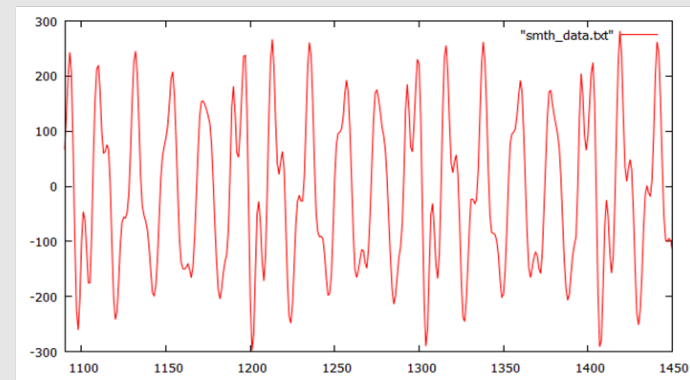
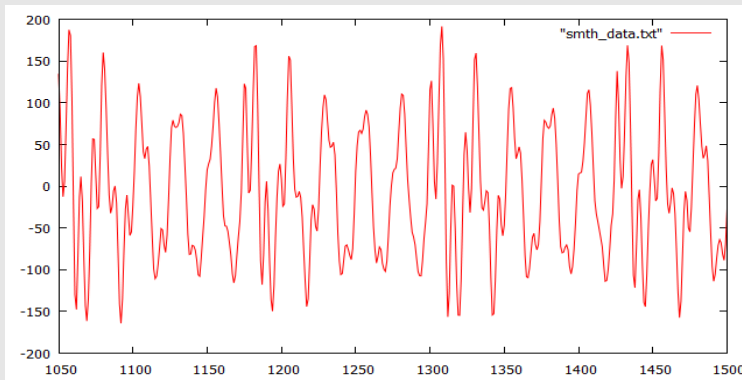
- Two digits show 10 times f_{LFW}
(e.g., “_79HZ” means $f_{LFW} = 7.9\text{Hz}$)

No.	$\Delta\sigma_{LF}$ (MPa)	Nb	D_{LF}	D_{ENL}	D_{rf}	$\Delta\sigma_{eq,ENL}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{eq,rf}$ (MPa)
WL_79HZ	37.0	1.075E+06	0.205	1.270	1.372	61.5	62.9
WH_79HZ	37.0	5.525E+05	0.105	0.539	0.605	57.3	59.2
WH_88HZ	53.9	2.703E+05	0.186	0.661	0.706	75.7	77.1
WH_97HZ	65.2	2.088E+05	0.275	1.036	1.055	93.7	94.2

- 試験体の固有振動数NBF = 28.5Hz

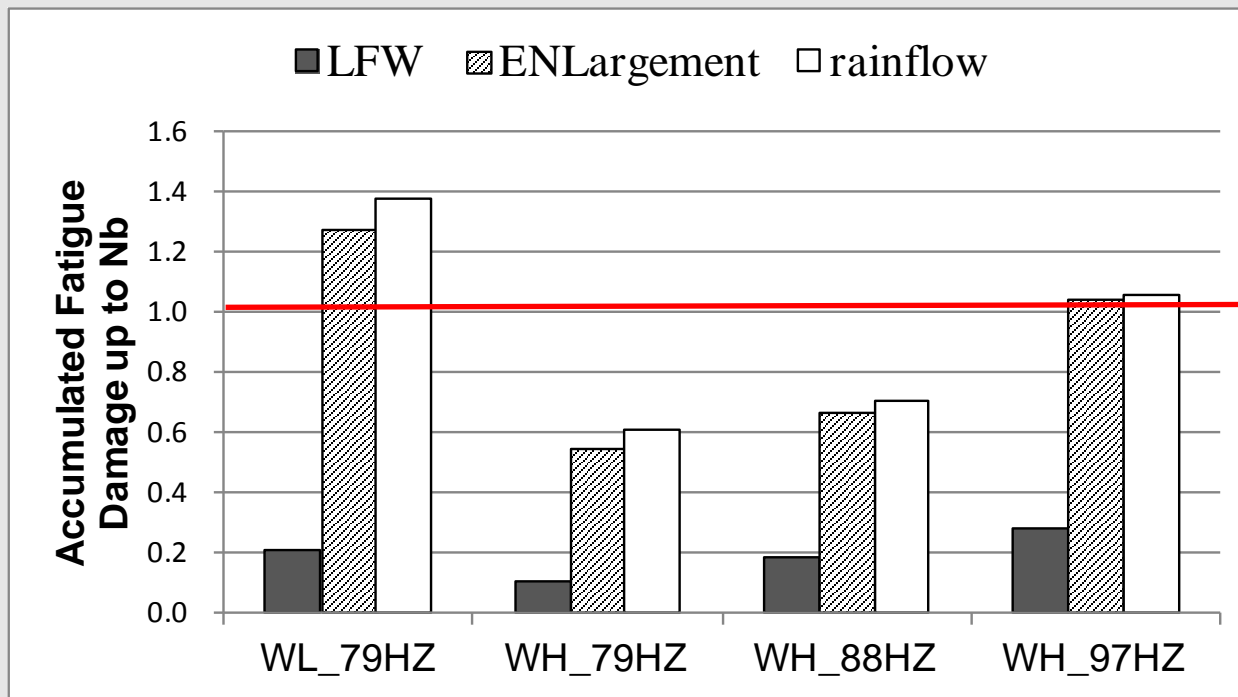
- NBF/ f_{LFW} ranges from 2.94 (9.7Hz) to 3.61 (7.9Hz)

- WH_79HZ: Max. $\sigma_{pp} \cong 1.8 \Delta\sigma_{LF}$ WH_97HZ: Max. $\sigma_{pp} \cong 2.1 \Delta\sigma_{LF}$



ホイッピング重畳疲労試験

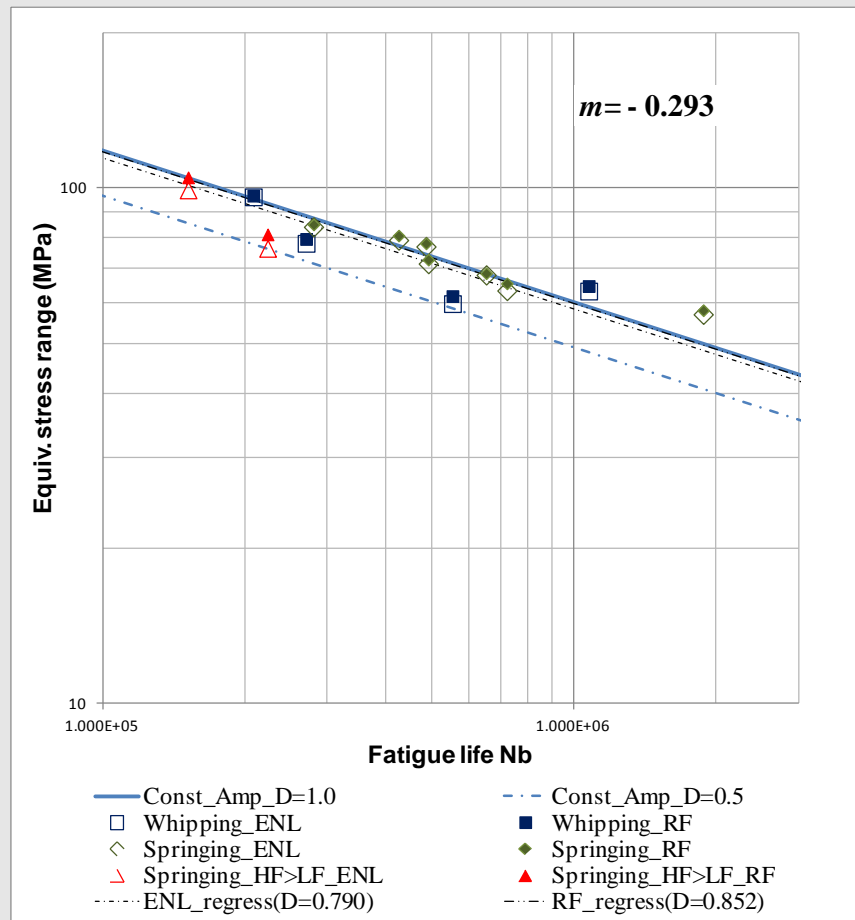
- D_{ENL} , D_{rf} : 0.6~1.4
- $D_{ENL} < D_{rf}$ だが差は僅少
- Rainflow法 or Enlargementカウントにより疲労寿命を推定可能
- 本研究のホイッピング重畳試験条件では、全応力範囲の拡大効果が支配的な影響力を有することがわかった



高周波重畳荷重を受ける溶接継手の疲労強度評価法

- Rainflow法, ENL法での等価応力範囲
 $\Delta\sigma_{eq,rf}$, $\Delta\sigma_{eq,ENL}$
- $\Delta\sigma_{eq,rf}$ と $\Delta\sigma_{eq,ENL}$ の差は小さい
- 試験結果の大部分がD=1.0 とD=0.5の間に分布
- スプリング重畳
 - 定荷重振幅試験と同等または長寿命側
- ホイッピング重畳
 - 定荷重振幅試験と同等または短寿命側
 - ばらつきが大きい
- 線形累積被害則+Rainflow or ENLカウントで寿命が推定できる

$$\Delta\sigma_{eq,rf} = C \left(\frac{N_b}{D_{rf}} \right)^m, \quad \Delta\sigma_{eq,ENL} = C \left(\frac{N_b}{D_{ENL}} \right)^m \quad (1)$$



高周波重畳荷重を受ける溶接継手の疲労強度評価法

- Fricke and Paetzold (2013)
 - 十字溶接継手のスプリング・ホイッピング重畳試験（油圧試験装置）
 - 定荷重試験結果の平均SN線図($m=-3$)を使用
 - 破断時被害度 : $D=0.5\sim 1.0$
- 本研究の結果より短寿命側の結果
 - 本研究の平均線はほぼ $D=1.0$
- 結果の差異の原因調査が必要
 - SN線図の傾き
 - 継手形式
 - 負荷形態
 - 歪速度

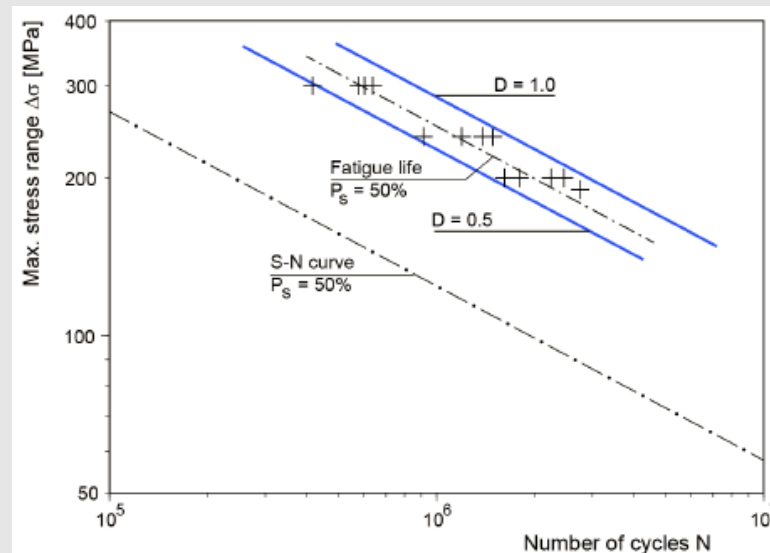
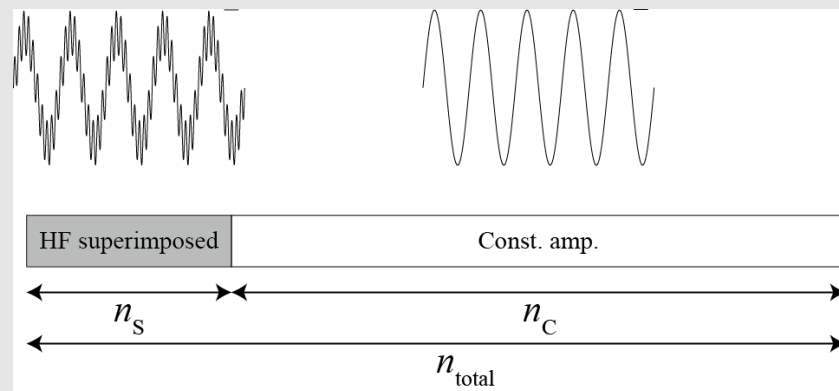


Fig. 11: Fatigue lives from variable amplitude tests with measured stress history and life prediction based on mean S-N curve

高周波重畳荷重を受ける溶接継手の疲労強度評価法

- 定常的に高周波が重畳する場合の疲労寿命推定
 - 定荷重疲労試験、スプリング試験、ホイッピング疲労試験を行う
 - 定荷重疲労試験からS-N線図を決定
 - Rainflow法またはENL法を用いて 重畳波形の等価応力を決定し、 $P_s=50\%$ 線図を決定
 - $P_s=50\%$ 線図に相当する（定荷重SN線図で評価した）疲労被害度 $D_{P_s=50\%}$ を計算する
 - 荷重試験のSN線図を用いて被害度を計算し、高周波重畳期間は被害度を $1/D_{P_s=50\%}$ 倍して加算する。
- 重畳あり・重畳なしの区間を別個に扱ってよいかは不明
- スプリング・ホイッピング間欠試験を実施して確認する必要がある



スプリング間欠試験

■ 試験条件

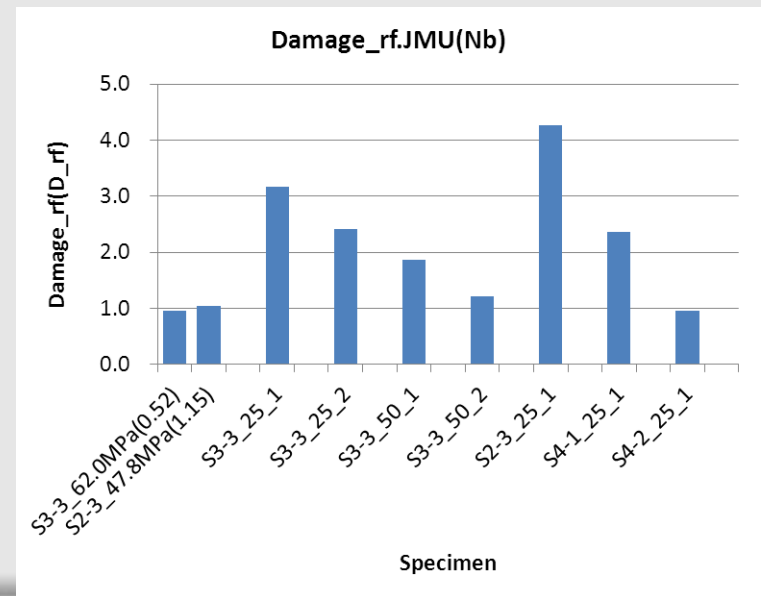
荷重条件	重畳波割合 (%)	荷重パターン (ブロック数)	試験体名	波形	TLF / THF	$\Delta\sigma_{LF}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{HF}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{HF} / \Delta\sigma_{LF}$	$\Delta\sigma_{env}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{eq,rf}$ (MPa)	Weld toe life_Nb (Cycles)	Damage_rf (D_rf)
連続重畳 (S3-3) へース $\Delta\sigma_{eq,rf}=82.4\text{MPa}$ Nb=2.802E+05	25	2	S3-3_25_1	重畳	3.8	62.2	31.5	0.51	91.7	86.0	9.311E+05	3.16
				単独		84.1			84.1			
	50		S3-3_50_1	重畳	3.8	61.1	32.7	0.54	90.2	84.1	7.635E+05	2.41
				単独		82.2			82.2			
連続重畳 (S2-3) へース $\Delta\sigma_{eq,rf}=101.9\text{MPa}$ Nb=1.518E+05	25	2	S3-3_50_2	重畳	3.8	61.8	31.7	0.51	91.1	87.6	5.163E+05	1.87
				単独		84.4			84.4			
	S2-3_25_1		重畳	3.8	61.4	31.7	0.52	89.5	85.8	3.596E+05	1.21	
			単独		83.3			83.3				
連続重畳 (S2-3) へース $\Delta\sigma_{eq,rf}=101.9\text{MPa}$ Nb=1.518E+05	25	2	S4-1_25_1	重畳	3.7	48.3	52.9	1.09	103.0	102.9	6.798E+05	4.26
				単独		101.9			101.9			
	S4-2_25_1		重畳	3.9	101.1	16.9	0.17	101.4	97.3	4.573E+05	2.37	
			単独		97.3			97.3				
S4-2_25_1	重畳	3.9	73.7	16.3	0.22	87.8	84.9	2.930E+05	0.95			
	単独		83.6			83.6						

$\Delta\sigma_{env}$: 試験開始時の安定領域での応力の包絡線範囲の実測

$\Delta\sigma_{eq,rf}$: レインフローカウントでの等価応力範囲

■ 試験結果

- 重畳の有無によらず定荷重疲労試験SN線図を使用
- スプリング間欠試験の疲労寿命は大部分で定常重畳時の疲労寿命より延伸した
- 寿命は最大で4.26倍に延伸

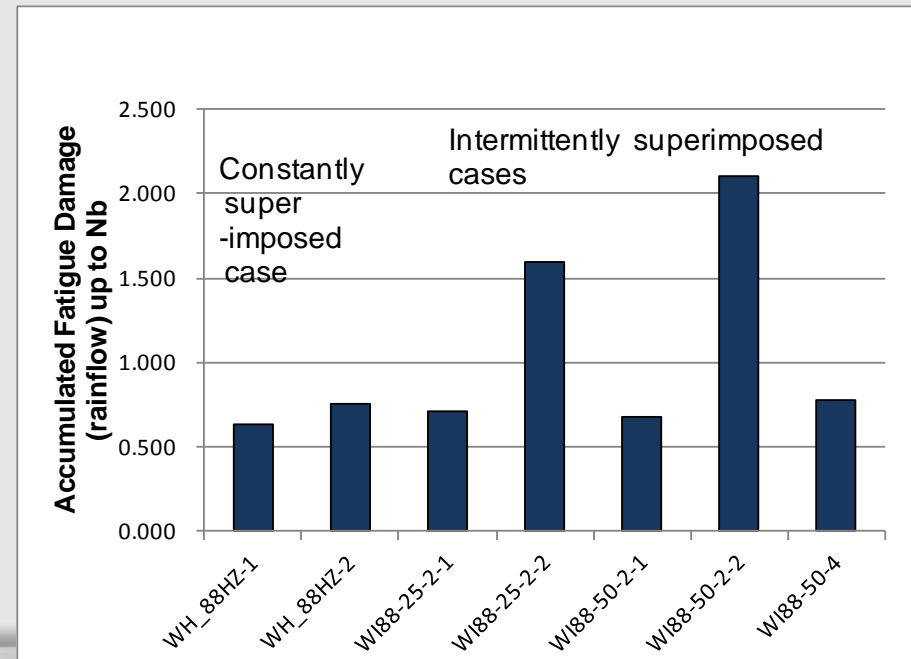



■ 試験条件

No.	ns	nc	ns/ntotal	Nb	D_{rf}	$\Delta\sigma_{eq,rf}$ (MPa)
WH_88HZ-1	-	-	-	2.703E+05	0.633	77.1
WH_88HZ-2	-	-	-	2.228E+05	0.750	85.8
WI88-25-2-1	40,000	120,000	25%	2.667E+05	0.707	80.0
WI88-25-2-2	40,000	120,000	25%	7.115E+05	1.597	76.2
WI88-50-2-1	80,000	80,000	50%	2.867E+05	0.683	77.5
WI88-50-2-2	80,000	80,000	50%	7.210E+05	2.098	82.2
WI88-50-4	40,000	40,000	50%	3.077E+05	0.777	78.8

■ 試験結果

- 重畳の有無によらず定荷重疲労試験SN線図を使用
- ホイッピング間欠試験の疲労寿命は約半数で定常重畳時の疲労寿命より延伸した
- 寿命は最大で2.1倍に延伸



- 本研究でFrickeらの実験結果より長寿命の結果が得られた原因の調査
 - 実応力履歴における高周波重畳の発現頻度，持続時間等の特徴を再現できる応力波形を用いた多数の疲労試験による実験知見の蓄積
 - ホイッピング減衰完了から次回衝撃までの間隔
 - 重畳の発現頻度，持続時間，重畳期間と非重畳期間の割合・間隔
 - 重畳が間欠的に生じる場合の寿命延伸と波形の特徴（重畳の持続時間，発現間隔）の関係の解明
- 
- 実際に船舶が遭遇する，間欠的に高周波成分が重畳する荷重履歴に対する疲労寿命推定法の開発

- 不平衡回転モータを用いた板曲げ振動疲労試験機に追加回転モータまたは回転ハンマを装着して角回し溶接継手のスプリング・ホイッピング重畳疲労試験を実施した
- Rainflow法と最大振幅増大効果のみ考慮するEnlargementカウント法で計算した疲労被害度の差は小さい
- スプリング重畳では定荷重振幅試験と同等または長寿命側の、ホイッピング重畳では定荷重と同等または短寿命側の結果が得られた
- 定常的に高周波重畳荷重を受ける溶接継手の簡易疲労強度評価法を提案した
- 高周波重畳波形と非重畳波形が交互に作用する場合の疲労試験を実施し、重畳波が間欠的に重畳する場合は定常的に重畳する場合より疲労寿命が大幅に延伸する場合があることを示した
- 実際に船舶が遭遇する応力履歴に対して合理的に疲労寿命を推定するためには、本研究に引続いて、実応力履歴の高周波重畳の発現頻度、持続時間等の特徴を再現できる応力波形を用いた多数の疲労試験を実施して実験知見を蓄積する必要がある。

- Osawa, N.; Nakamura, T.; Yamamoto, N. and Sawamura, J. "Development of a new fatigue testing machine for high frequency fatigue damage assessment", Proc. OMAE2013, Paper No.11582., 2013.
- 大沢直樹, 中村哲也, 山本規雄, 澤村淳司, "疲労強度への高周波影響を評価するための疲労試験装置の開発", 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 16, 515-518, 2013.
- Osawa, N.; Nakamura, T.; Yamamoto, N. and Sawamura, J., "Experimental Study on High Frequency Effect on Fatigue by Using the New High Speed Fatigue Testing Machine", Proc. PRADS2013, pp. 550-556, 2013.
- 大沢直樹, 中村哲也, 山本規雄, 澤村淳司, "振動曲げ疲労試験装置による溶接継手の高周波疲労試験方法に関する研究", 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 17, 37-40, 2013.
- 大沢直樹, 中村哲也, 山本規雄, 澤村淳司, "高周波重畳荷重を受ける溶接継手の疲労強度評価法に関する研究", 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 18, 485-488, 2014.
- Osawa, N.; Nakamura, T.; Yamamoto, N. and Sawamura, J. "Experimental Study on High Frequency Effect on Fatigue Strength of Welded Joints by Using Plate-Bending-Vibration Type Fatigue Testing Machines", Proc. OMAE2014, Paper No. 23856., 2014. (OMAE2014 Best Paper Award Structures, Safety and Reliability Symposium受賞)
- Osawa, N.; Nakamura, T.; Yamamoto, N. and Sawamura, J. "Experimental study on simplified assessment method for high frequency effect on fatigue strength of ship's welded joints", IIW Doc. XIII-2552-14.