

# 振動成分が間欠的に重畳する波浪変動荷 重下の疲労強度評価法に関する調査研究

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻  
ジャパンマリンユナイテッド技術研究所

# 緒言

---

- ▶ 近年のコンテナ船の長大化, スプリングの高周波振動が疲労強度に及ぼす影響が問題化.
  - ▶ (大沢ら、2015)
    - ▶ 定常重畳時の角回し溶接継手の疲労寿命は定荷重振幅SN線図とレインフロー法で概ね推定可能.
    - ▶ 間欠重畳時は疲労寿命がレインフロー推定値から大幅に延伸する場合がある.
  - ▶ 溶接継ぎ手の高周波重畳疲労試験データが不足.
  - ▶ 既報の間欠重畳試験は, 重畳期間と非重畳期間の等価応力振幅が等しい場合のみ実施された. この条件は実働波形では成立しない.
  - ▶ 本研究では, 重畳・非重畳期間で等価応力振幅比を変化させた間欠重畳疲労試験を実施して, 間欠重畳の波形パターンと疲労寿命延伸率の関係を調べる.
-

# スプリング重畳疲労試験装置

- ▶ 回転偏心錘を電気モータで駆動する市販起振機を用いた、簡便な板曲げ振動疲労試験機 (PBV疲労試験機) を開発 (Yamada, 2006) .
- ▶ PBV試験機を改造
  - ・角回し溶接継手のスプリング重畳疲労試験を可能.
- ▶ スプリング振動
  - ・PBV試験装置の試験体に追加起振機を取付けて発生.
- ▶ 一次波と二次波 (スプリング荷重) の周波数は別個に制御.
- ▶ 荷重振幅は各起振機の錘の偏心度と起振機の取付け位置変更により調整.

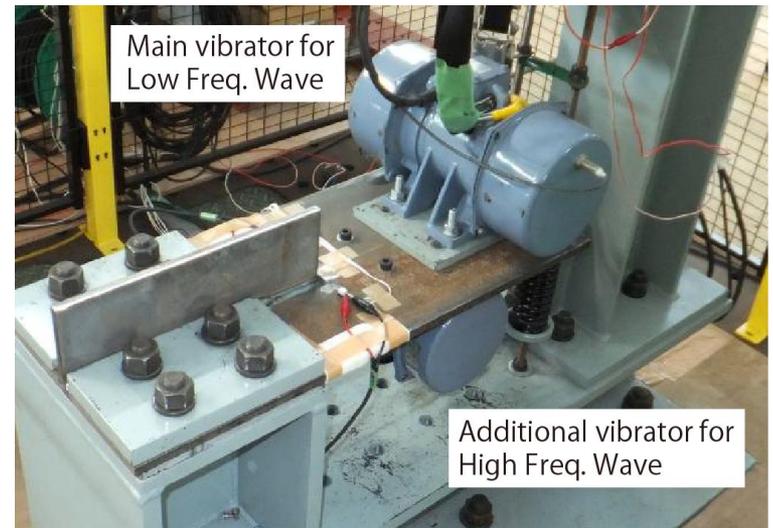


Figure: The PBV-type testing machine with additional vibrator used in springing superimposed loading tests.

# 疲労試験体

- ▶ 造船用鋼板AH32,  $t=12\text{mm}$
- ▶ 角回し継ぎ手
- ▶ 歪ゲージ
  - ▶ Ch1, Ch2 : 局所応力集中が影響
  - ▶ Ch3, Ch4 : 講習曲げ応力に換算
- ▶ 主板中央線付近の角回し溶接ビード止端でき裂発生.
- ▶ 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へ進入.
- ▶ Nb : き裂がビードから離れた時の一次波負荷回数、疲労寿命と定義.
- ▶ Ch1歪範囲が初期値から65%減少するまでの負荷回数をNbとして扱う.

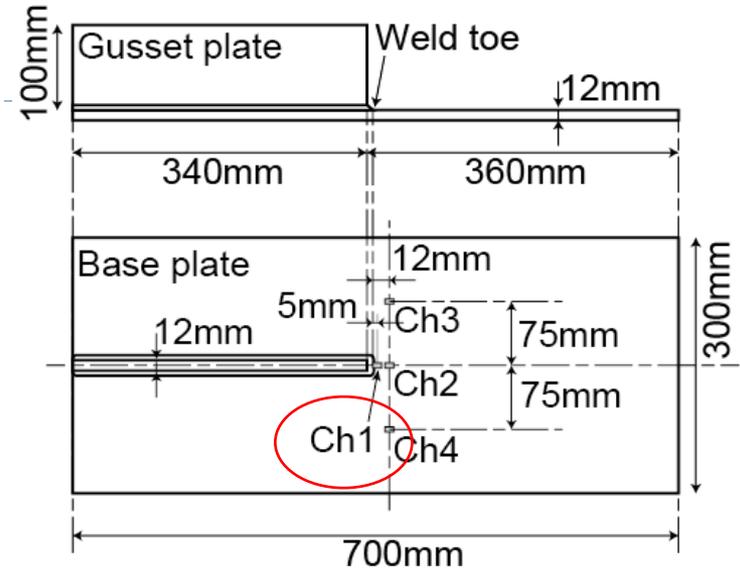


Figure: Out-of-plane gusset welded joint specimen (unit:mm)

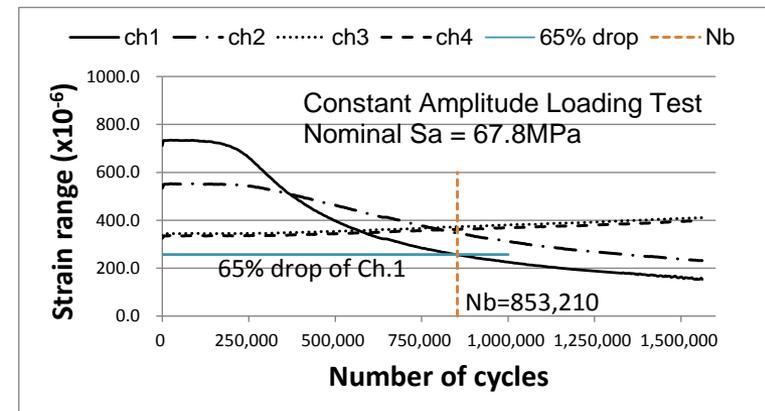


Figure: Changes in strain amplitudes during a constant amplitude fatigue test ( $\Delta\sigma=67.8\text{MPa}$ )

# 疲労試験体

## ▶ 供試材料 KA32

材質:AK32(NK船級材)		化学成分(%)													
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Nb	S.Al	Ti	Ceq3
		× 100			× 1000		× 100						× 1000		× 100
規格	Min.	-	-	70	-	-	-	-	-	-	-	-	15		-
	Max.	18	50	160	35	35	35	20	40	8	10	5	-	20	36
供試材		14	15	110	20	6	1	5	1	1	0	1	27	1	34

$C_{eq3}(\text{炭素等量}) = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5$

材質:AK32(NK船級材)		引張試験(圧延垂直方向) 標点間長さ=200mm			衝撃試験(圧延方向),10.0mmサイズ 2mm Vノッチ	
		降伏点/耐力	引張強さ	伸び	試験温度	平均吸収エネルギー
		N/mm <sup>2</sup>			%	°C
規格	Min.	315	440	17	0	31
	Max.	-	590	-		-
供試材		344	489	23	0	230

# 定荷重振幅疲労試験<sup>(1)</sup>

- ▶ PBV試験装置を使用して定荷重振幅疲労試験を実施.
  - ▶  $N_b$ に関するSN線図
  - ▶ SN線図におけるBasquinの式, 比例係数・べき乗指数
- $C=3.443 \times 10^3 \text{ MPa}$ ,  $m= -0.293$

$$\Delta\sigma = C N_b^m$$

- ▶ 今回製作した試験体は、スプリング連続重畳でも既存データと同等の寿命であり、試験体間で有意差がないことが確認された

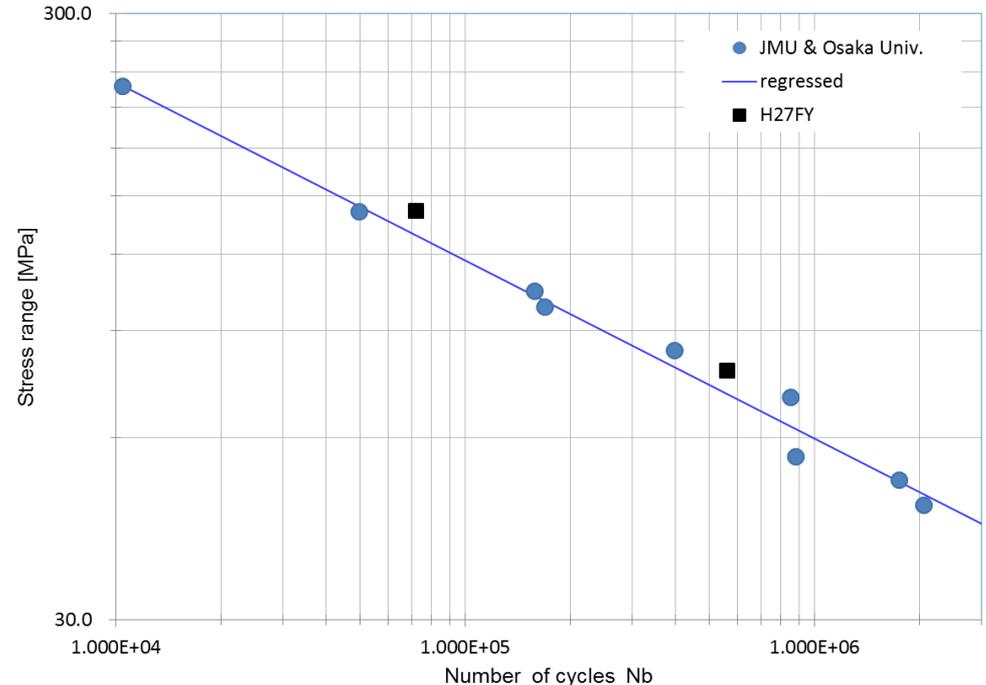


Figure: Fatigue strength of out-of-plane gusset welded joints under constant amplitude loading tests (the relationship between nominal stress range and  $N_b$ )

# 定常スプリングング重畳疲労試験

## ▶ 試験条件

- ▶  $\omega_{HF}$ ,  $\omega_{LF}$ : 1次波・2次波角振動数
- ▶  $\Delta\sigma_{HF}$ ,  $\Delta\sigma_{LF}$ : 1次波・2次波応力範囲

Series	T.P. No.	$\frac{\omega_{HF}}{\omega_{LF}}$	$\Delta\sigma_{LF}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{HF}$ (MPa)	$\frac{\Delta\sigma_{LH}}{\Delta\sigma_{LF}}$	$\Delta\sigma_{eq.rf.}$ (MPa)	Nb (Cycles)
S1	S1-C-1*	3.8	<b>36.7</b>	<b>27.0</b>	0.74	<b>59.5</b>	1,882,314
	S1-C-2*	3.8	35.6	33.6	0.94	65.0	716,663
	S1-C-3*	3.8	35.6	44.7	1.25	81.4	221,986
	S1-C-4	3.8	34.6	24.7	0.71	56.0	1,450,388
	S1-C-5	3.8	34.9	23.7	0.68	55.7	1,007,997
S2	S2-C-1*	3.8	47.6	28.0	0.59	73.3	494,034
	S2-C-2*	3.8	48.0	36.5	0.76	82.4	424,371
	S2-C-3*	3.8	47.8	55.2	1.16	105.6	152,189
	S2-C-4	3.8	46.5	36.5	0.78	77.0	610,213
	S2-C-5	3.8	47.1	35.7	0.76	79.0	398,268
S3	S3-C-1*	3.8	60.1	21.4	0.36	78.3	480,000
	S3-C-2*	3.8	62.8	12.2	0.19	68.9	646,208
	S3-C-3*	3.8	62.0	32.3	0.52	86.3	274,446

# 定常スプリングング重畳疲労試験

## ▶ 疲労試験結果

- ▶ 縦軸：  
Rainflow等価  
応力範囲
- ▶ 横軸：1次波回数
- ▶ 実線：  
定荷重振幅SN線図
- ▶ 定常重畳時の疲労  
寿命はRainflowカウ  
ントで評価できる。

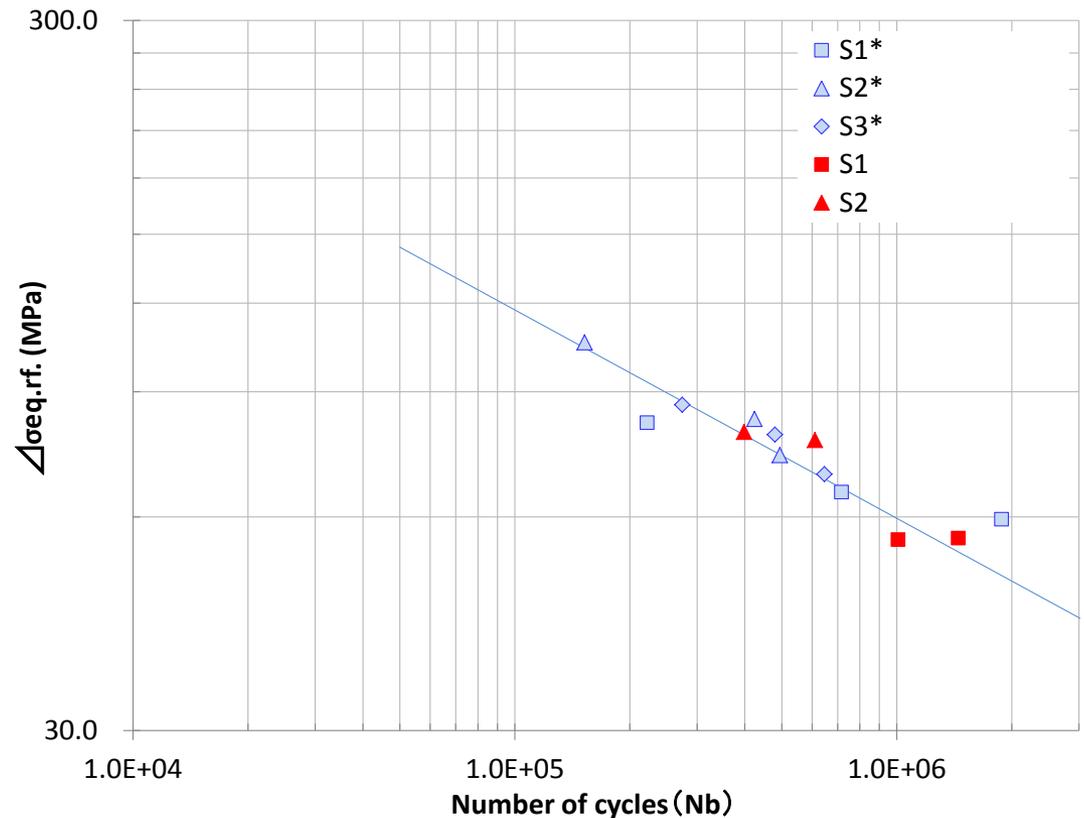
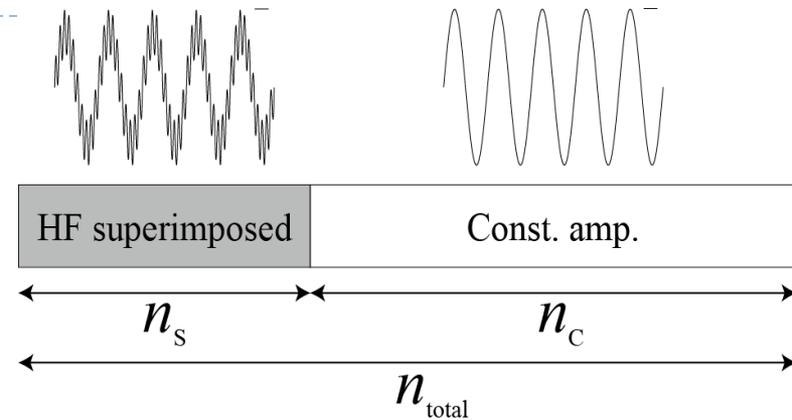


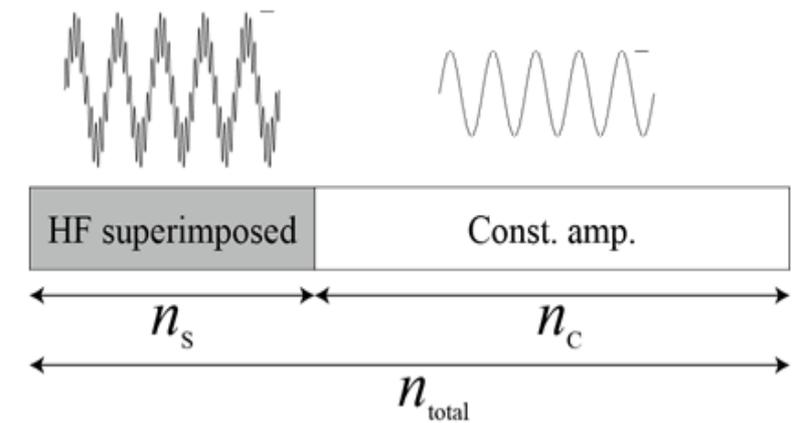
Figure: The relationship between equivalent stress ranges determined by rainflow stress counting methods and Nb in constantly springing superimposed tests.

# 間欠スプリングング重畳疲労試験

- ▶ Nconst: 定常重畳時のNb
- ▶ 間欠重畳試験
  - ▶ 荷重セット: 重畳 $n_s$ 回, 非重畳 $n_c$ 回
- ▶  $n_{total} = n_s + n_c$
- ▶  $n_s/n_{total}$ : 1/4, 1/2
- ▶ 等価応力範囲
  - ▶ 重畳 $\Delta\sigma_{eq,s}$ , 非重畳 $\Delta\sigma_{eq,c}$
  - ▶ 全期間平均 $\Delta\sigma_{eq,W}$
- ▶ IFシリーズ:  $\Delta\sigma_{eq,s} = \Delta\sigma_{eq,c} = \Delta\sigma_{eq,W}$
- ▶ LFシリーズ:  $\Delta\sigma_{eq,s} > \Delta\sigma_{eq,c} = \Delta\sigma_{LFW}$



IF series

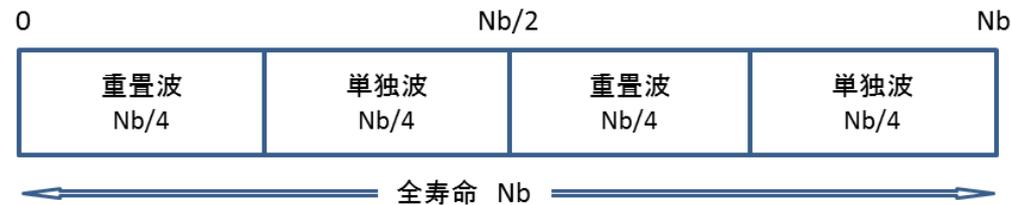


LF series

# 間欠スプリングング重畳疲労試験

- ▶ 重畳波形: 定常重畳波形と同じ
  - ▶ S1, S2, S3 ( $\Delta\sigma_{LFW}=36,48,60\text{MPa}$ )
- ▶ ntotal: 全寿命の1/2に設定

重畳割合 50% × 2ブロック



重畳割合 25% × 2ブロック



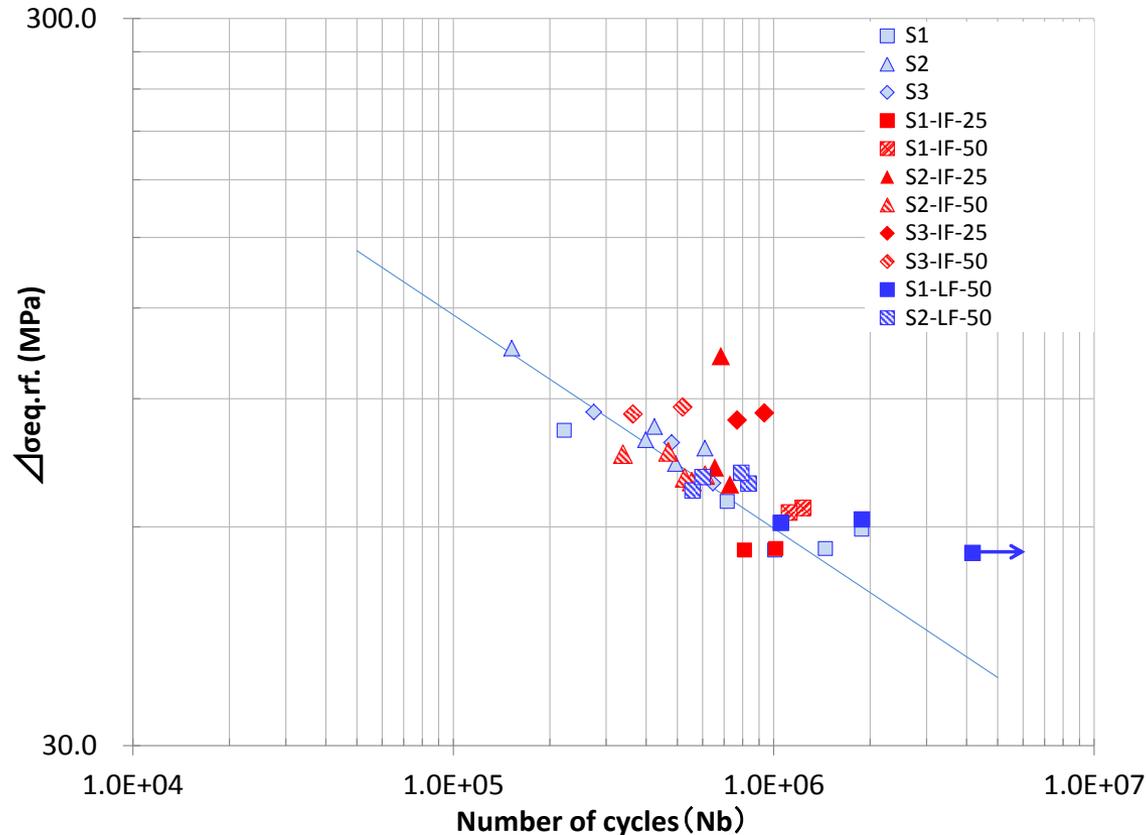
# 間欠スプリング重畳疲労試験

- ▶ Nc(ChI 5% drop life), Nb(ChI 65% drop life)
- ▶ Nbまでのranflow被害度Drf

Series	T.P. No.	$\frac{\omega_{HF}}{\omega_{LF}}$	$\Delta\sigma_{LF}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{HF}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{LH}$ $\Delta\sigma_{LF}$	$\Delta\sigma_{eq.rf.}$ (MPa)	$\frac{ns}{ntotal}$	Nb (Cycles)	Nc (Cycles)	Np (Nb-Nc)	Dw
S1-IF-25	S1-IF-25-1	3.8	37.9	27.8	0.73	62.9	0.25	1,016,059	236,628	779,431	1.19
	S1-IF-25-2	3.8	36.5	29.7	0.81	63.6	0.25	811,522	121,766	689,756	0.98
S1-IF-50	S1-IF-50-1	3.8	37.1	29.2	0.79	63.7	0.50	1,234,330	596,360	637,970	1.50
	S1-IF-50-2	3.8	37.3	28.2	0.76	62.7	0.50	1,117,460			1.29
S2-IF-25	S2-IF-25-1*	3.8	48.4	52.5	1.09	103.0	0.25	684,058	428,266	255,792	4.30
	S2-IF-25-2	3.8	41.0	30.3	0.74	68.6	0.25	730,533	219,612	510,921	1.14
	S2-IF-25-3	3.8	41.4	32.5	0.79	72.4	0.25	655,183	440,953	214,230	1.24
S2-IF-50	S2-IF-50-1	3.8	49.6	35.6	0.72	75.5	0.50	338,504	53,274	285,230	0.74
	S2-IF-50-2	3.8	46.1	34.8	0.75	76.0	0.50	468,811	150,307	318,504	1.05
	S2-IF-50-3	3.8	41.6	30.5	0.73	69.2	0.50	555,333	99,712	455,621	0.90
	S2-IF-50-4	3.8	41.2	34.4	0.84	70.6	0.50	611,041	171,726	439,315	1.06
	S2-IF-50-5	3.8	41.2	32.3	0.79	70.0	0.50	527,572	218,507	309,065	0.89
S3-IF-25	S3-IF-25-1*	3.8	62.2	31.5	0.51	86.0	0.25	935,231	530,000	405,231	3.18
	S3-IF-25-2*	3.8	61.1	32.7	0.54	84.1	0.25	768,873	556,000	212,873	2.41
S3-IF-50	S3-IF-50-1*	3.8	61.8	31.7	0.51	87.6	0.50	519,719	102,000	417,719	1.88
	S3-IF-50-2*	3.8	61.4	31.7	0.52	85.7	0.50	363,487	90,000	273,487	1.22
S1-LF-50	S1-LF-50-1	3.8	38.7	29.0	0.75	55.2	0.50	4,175,000			3.13
	S1-LF-50-2	3.8	43.0	33.4	0.78	60.7	0.50	1,053,567	99,326	954,241	1.11
	S1-LF-50-3	3.8	42.8	33.4	0.78	61.4	0.50	1,886,312	1,119,088	767,224	2.03
S2-LF-50	S2-LF-50-1	3.8	46.7	35.6	0.76	68.8	0.50	834,824	364,527	470,297	1.32
	S2-LF-50-2	3.8	46.5	35.6	0.77	67.3	0.50	559,267	40,045	519,222	0.82
	S2-LF-50-3	3.8	49.8	37.5	0.75	71.1	0.50	792,344	320,003	472,341	1.41
	S2-LF-50-4	3.8	48.6	36.5	0.75	70.2	0.50	600,373	163,793	436,580	1.02

# 間欠スプリングング重畳疲労試験

## ▶ Rainflow等価応力～Nb線図



The relationship between equivalent stress ranges determined by rainflow stress counting methods and Nb in intermittently springing superimposed tests.

# 間欠スプリング重畳疲労試験

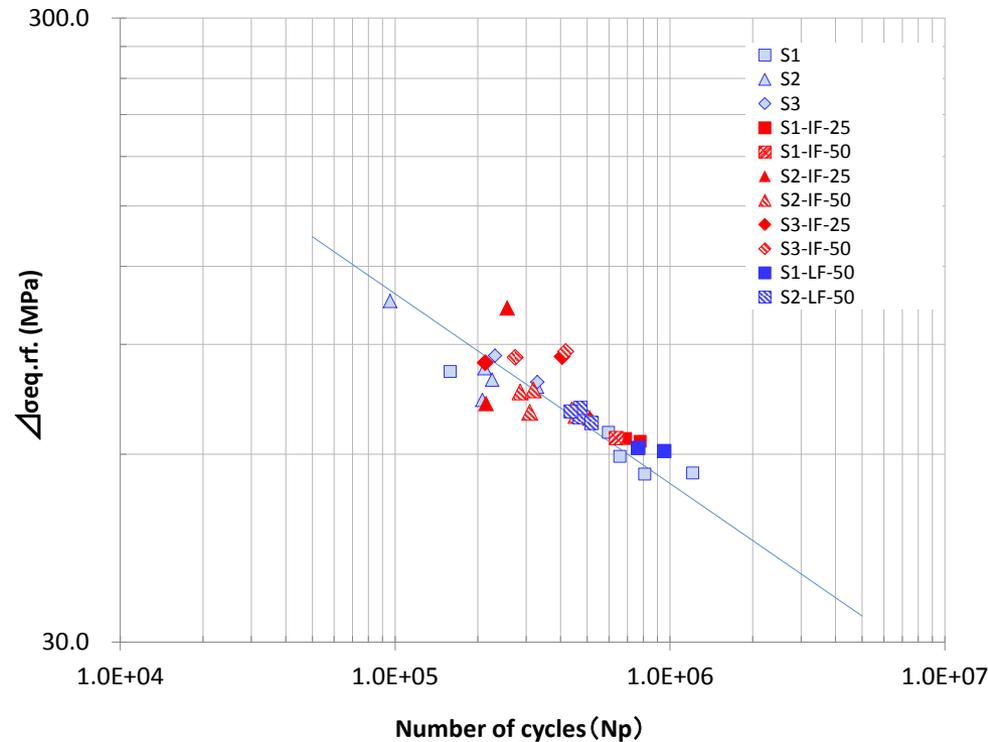
## Rainflow疲労被害度(平均値)の比較

試験種類	Dw
連続重畳	1.09
間欠重畳(等価応力)	1.56
間欠重畳(1次波)	1.28

- ▶ 連続重畳(C)では、Dwの平均値がほぼ1.0でありばらつきも小さい。すなわち、定荷重振幅SN線図とrainflow法により、近似的に疲労寿命を推定し得る。
- ▶ 等価応力範囲を一定に保持した間欠重畳(IF)ではDwが0.74~4.30の範囲に分布し、平均値が1.56となった。既報<sup>17)</sup>時点での平均値2.60と比較して寿命の延伸度合いは低下したものの、連続と湯上との比較では、寿命が延伸する傾向にある。
- ▶ 非重畳時に一次波成分のみとする間欠重畳(LF)ではDwが0.82~2.03の範囲に分布し、平均値は1.28となった。連続重畳よりは疲労寿命が延伸する傾向は見られるものの、等価応力範囲を一定の保持した場合に比較し、その延伸度合いは低い。

# 間欠スプリングング重畳疲労試験

- ▶ き裂発生寿命  $N_c$  (ChI 5% drop life)
- ▶ き裂伝播寿命  $N_p = N_b - N_c$



The relationship between equivalent stress ranges determined by rainflow stress counting methods and  $N_p$  in intermittently springing superimposed tests.

# 間欠スプリングング重畳疲労試験

---

- ▶ 破断寿命 $N_b$ との比較では、き裂伝播寿命 $N_p$ の方がまとまりがよく、ばらつきが少ない結果となっている。
- ▶ 既報では、間欠重畳(IF)の $N_p$ は長寿命側に分布していたが、 $N$ 数を増やした結果、長寿命側/短寿命側に平均的にばらつく結果となった。



# PBVホイッピング重畳疲労試験装置

---

## ▶ PBVホイッピング重畳疲労試験装置

- ▶ ワイヤ式ダンパを取付けた片持ち梁試験体の自由端を回転ハンマで打撃

## ▶ 問題点( $f_{HF}$ :2次波周波数, $f_{LF}$ :2次波周波数)

- ▶  $f_{HF}$ が試験体の固有振動数(3章の試験体で約28Hz)に固定される.
- ▶  $f_{HF}=28\text{Hz}$ のとき $f_{LF}=28\text{Hz}\div 5=5.6\text{Hz}$ になる. ユーラスでは安定して8Hz以下の運転ができないので $f_{LF}$ を9Hz以上とした. 既報<sup>17)</sup>で負荷した荷重は実働荷重の波形の特徴を忠実に再現していない.
- ▶ 振動する試験体を打撃するため, 打撃の瞬間のハンマ・試験体の位置関係が厳密には異なり, 衝撃力の大きさが打撃ごとにばらつく.
- ▶ ユーラスの不均衡力の調整範囲が狭く, ハンマ打撃力も連続的に制御できないので, 相似な荷重時刻歴による系統的疲労試験が実施できない.



# 動電型高周波重畳疲労試験装置 振動発生機

---

## ▶ 加振システム

- ▶ 加振力3920N の動電型振動発生機(旭製作所R-3030)
  - ▶ 電力増幅器(旭製作所APD-5000)
  - ▶ DC~5,000Hz で加振可能である.
  - ▶ 制御システム(旭製作所製K2-Sprint)は, 入力2ch, 任意波形に対応.
  - ▶ 出力(駆動力)が入力電流に比例し精密な制御が可能
  - ▶ 非接触で駆動するので波形歪みが小さい
  - ▶ 定期的な保守が不要
  - ▶ 油圧装置に比較して大出力・大振幅(1000mm など)の起振が難しい
- 



# 動電型高周波重畳疲労試験装置 振動発生機

## ▶ R-3030 exciter

加振力	3920 N (正弦波入力時)
最大加速度	784 m/s <sup>2</sup> (無負荷時)
最大変位	30 mm p-p
最大搭載重量	60 kg (手動調整)
振動数範囲	1~3,000 Hz (制御などセンサーに依存する事がある)
可動部重量	5 Kg
振動台寸法	φ170 mm
本体重量	約 170 Kg (単体モデル)
環境条件	温度 0~40° , 湿度 0~85% (結露無きこと)

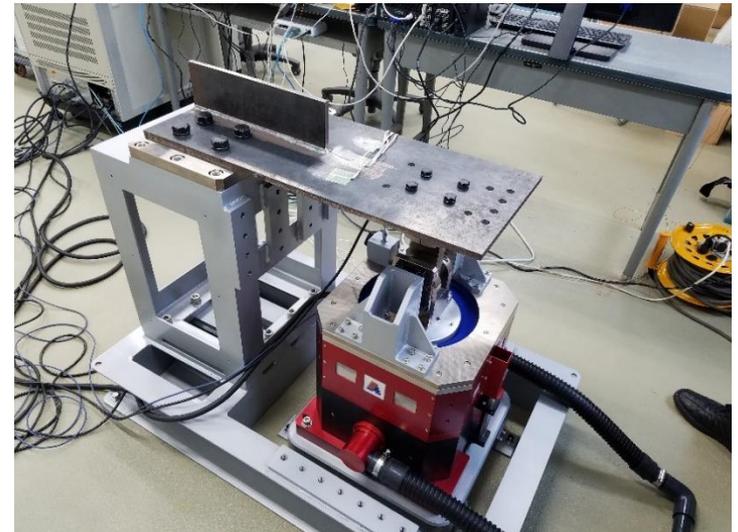
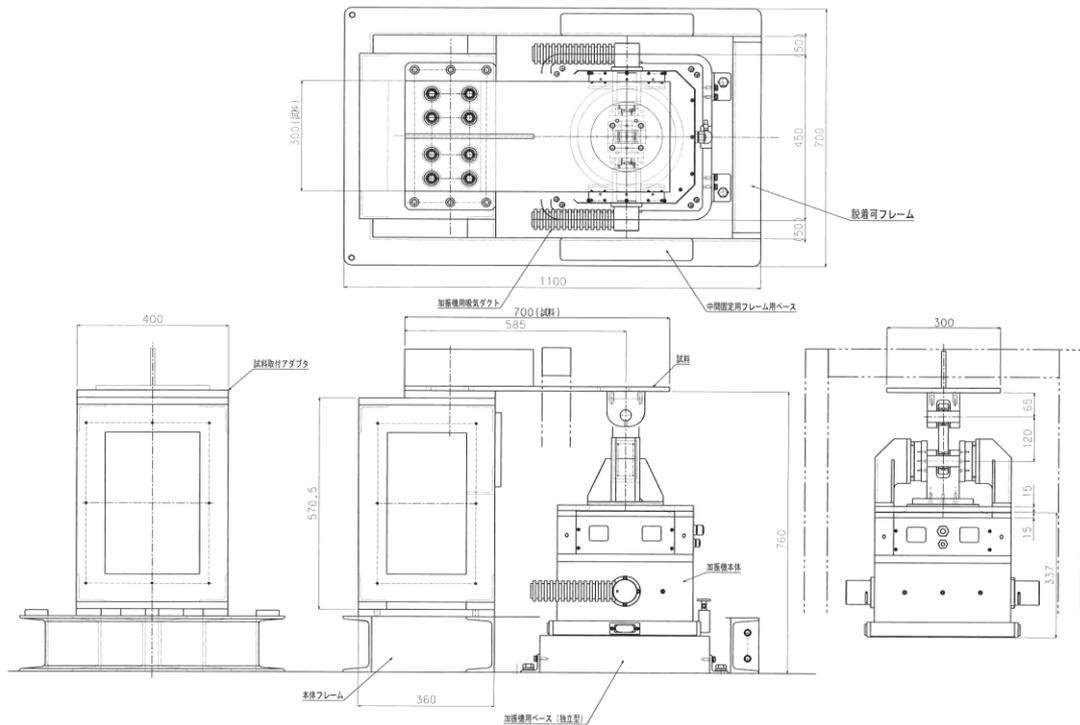


## ▶ APD-500 power amplifier

定格出力	3000 V A
周波数特性	1~5,000 Hz
S N比	50 d B 以上 (20V出力時において)
入力電圧	1 V r m s
入力インピーダンス	10 k Ω
出力インピーダンス	2 Ω
消費電力	4. 5 K V A
本体重量	約 30 K g
一次側電源仕様	三相 200V-20A-以上

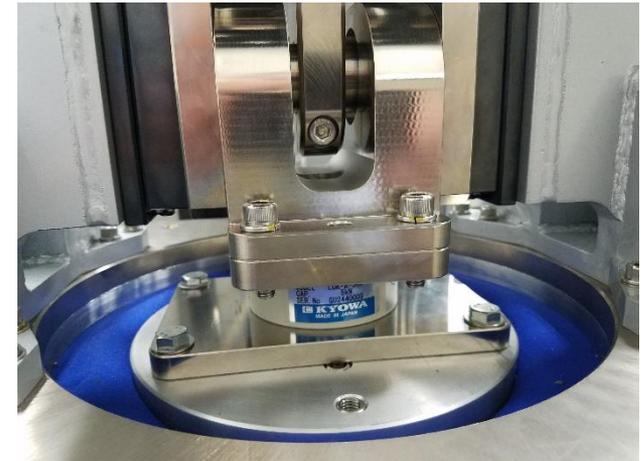
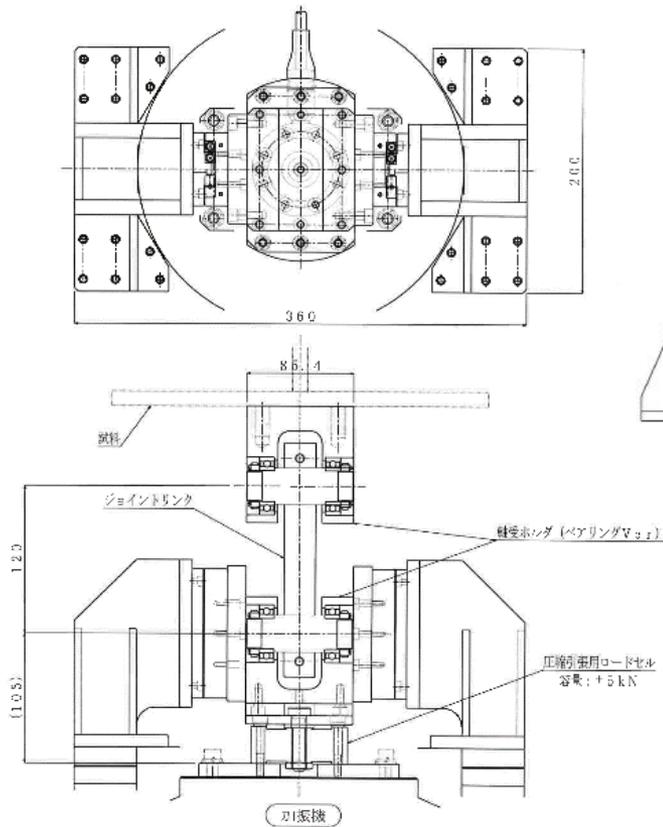
# 動電型高周波重畳疲労試験装置 駆動装置

- ▶ 振動発生機と片持ち梁溶接試験体を動力伝達機構で連結



The electric PVB fatigue testing apparatus

# 動電型高周波重畳疲労試験装置 荷重伝達機構



Load cell inserted between the drive train and the exciter

The drive train of electric PVB fatigue testing apparatus

# 動電型高周波重畳疲労試験装置

## 荷重制御疲労試験

- ▶ 試験体固有振動数 $f_{NF}=28\text{Hz}$
- ▶  $f>20\text{Hz}$ 以上にすると, 歪波形にうなりが生じ $\Delta\varepsilon$ が $f$ につれて増大
- ▶ ロードセル出力を制御信号とし,  $f>20\text{Hz}$ である周波成分が含まない波形により荷重制御試験を実施
- ▶ 定荷重振幅試験
  - ▶  $\Delta P=4\text{kN}$  ( $\Delta\sigma_n=137.5\text{MPa}$ ), 周波数 $f=15\text{Hz}$
- ▶ 高周波重畳試験: 荷重波形

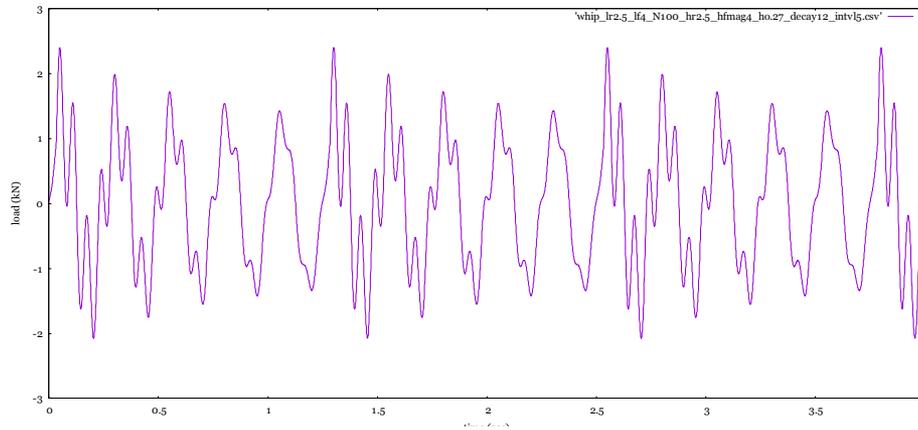
Waveform parameters of the whipping superimposed waveform

	Primary wave		Secondary wave			Slaming intvl. (cycl.)	Damping time (cycl.)	$\Delta\sigma_{r,eq}$ (Mpa)
	Range (kN)	Freq. (Hz)	Range (kN)	Freq. (Hz)	Phase diff. (x $\pi$ rad.)			
Whipping	2.5	4.0	2.5	16	0.27	5	12	116.8
Springing	2.5	4.0	1.5	16	0	—	—	121.8

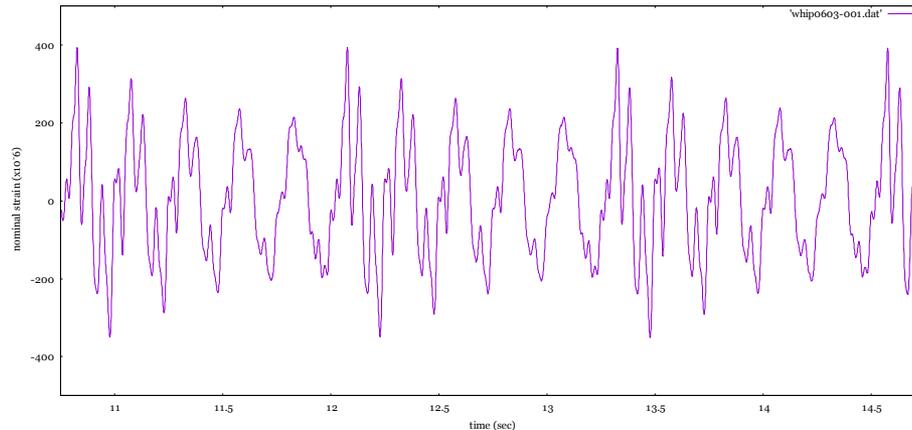
# 動電型高周波重畳疲労試験装置

## 荷重制御疲労試験

### ▶ ホイッピング重畳: 目標波形



### ▶ ChI歪波形

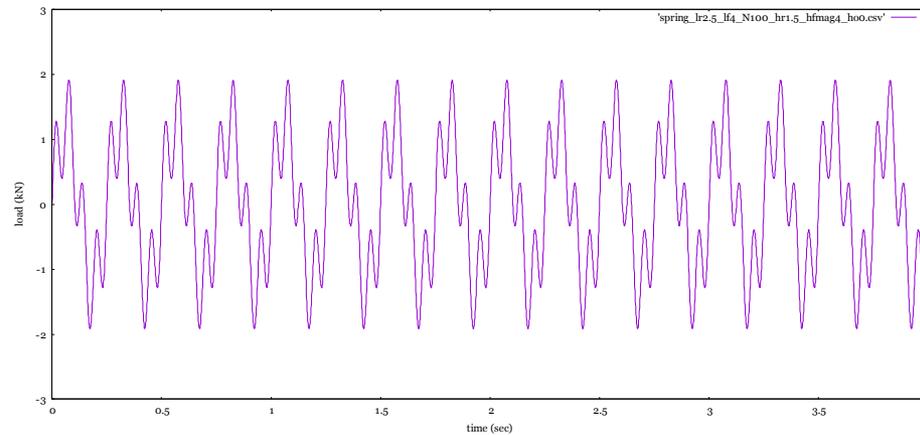


Waveforms of applied load and nominal strain response measured in the whipping superimposed loading test

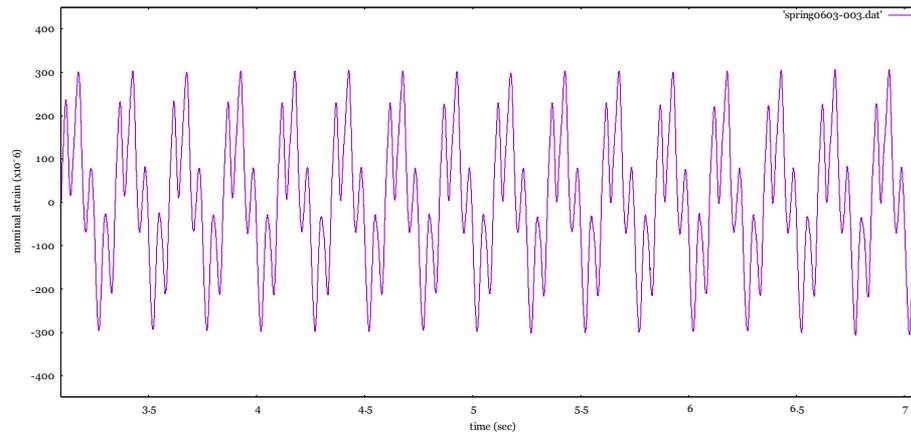
# 動電型高周波重畳疲労試験装置

## 荷重制御疲労試験

### ▶ スプリングング重畳: 目標波形



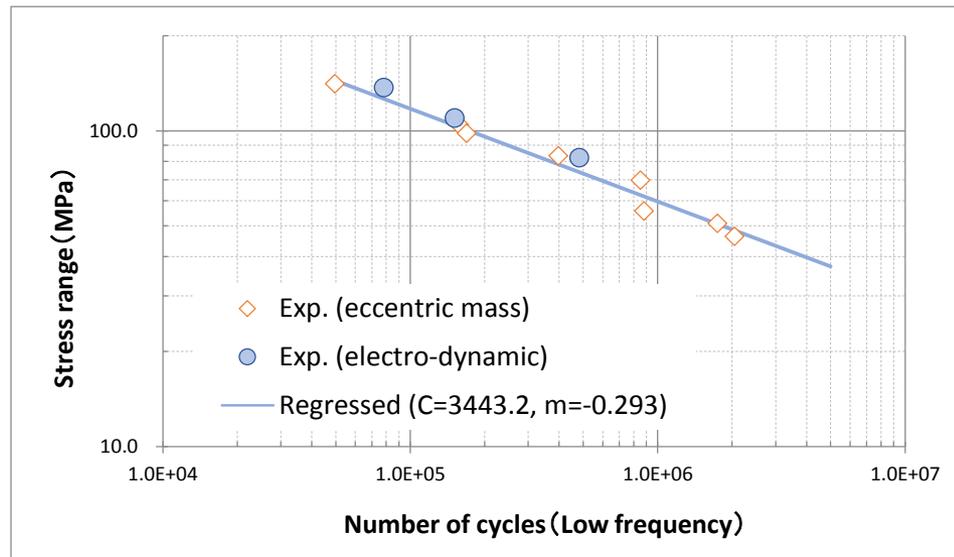
### ▶ ChI歪波形



Waveforms of applied load and nominal strain response measured in the springing superimposed loading test.

# 定荷重疲労試験

- ▶  $\Delta P=4\text{kN}$  ( $\Delta\sigma_n=137.5\text{MPa}$ ), 周波数  $f=15\text{Hz}$
- ▶ 荷重倍率 100%, 80%, 60% ( $\Delta\sigma_n=137.5\text{MPa}$ , 109.8MPa, 82.4MPa)
- ▶ 動電型試験結果は, 偏心錘試験結果のばらつき範囲内にある



Comparison of constant amplitude fatigue test results loaded by the motor with eccentric-mass apparatus and the electro-dynamic actuator.

# 定常ホイッピング重畳疲労試験

Constantly whipping superimposed fatigue test results of welded joints tested by the electric PVB fatigue testing apparatus with various load magnification factors.

	Primary wave		Secondary wave			Slaming intvl. (cycl.)	Damping time (cycl.)	$\Delta\sigma_{rf,eq}$ (Mpa)	Nb (cycl.)	$D_{rf}$
	$\Delta\sigma_{LF}$ (MPa)	Freq. (Hz)	$\Delta\sigma_{HF}$ (MPa)	Freq. (Hz)	Phase diff. (x $\pi$ rad.)					
WHIP100-1	85.9	4.0	85.9	16	0.27	5	12	116.8	79,300	0.766
WHIP100-2									91,200	0.881
WHIP060-1	51.6		51.6					70.1	498,200	0.842

- ▶ 疲労寿命Nbにおける疲労被害度: 0.766~0.842
- ▶ 定荷重振幅試験SN線図とレインフロー法で推定した疲労寿命結果は、実験結果より僅かに危険側の推定.
- ▶ 何れのデータも定荷重振幅試験のばらつきの範囲内にある.
- ▶ 一般性のある結論を得るには追加試験が必要.

# 間欠ホイッピング重畳疲労試験

- ▶ IFシリーズ:  $\Delta\sigma_{eq,s} = \Delta\sigma_{eq,c} = \Delta\sigma_{eq,W}$
- ▶ ILシリーズ:  $\Delta\sigma_{eq,s} > \Delta\sigma_{eq,c} = \Delta\sigma_{LFW}$

Intermittently whipping superimposed fatigue test results of welded joints tested by the electric PVB fatigue testing apparatus.

	Primary wave		Secondary wave			Slaming intvl. (cycl.)	Damping time (cycl.)	$\Delta\sigma_{WHIP,eq}$ (Mpa)	$\Delta\sigma_{sol,eq}$ (Mpa)	Nb (cycl.)	$D_{rf}$
	$\Delta\sigma_{LF}$ (MPa)	Freq. (Hz)	$\Delta\sigma_{HF}$ (MPa)	Freq. (Hz)	Phase diff. (x $\pi$ rad.)						
WHIP100-IF-1	85.9	4.0	85.9	16	0.27	5	12	116.8	116.5	148,700	1.441
WHIP100-IF-2										94,300	0.914
WHIP100-IL-1									86.3	131,400	0.901
WHIP100-IL-2										163,400	1.127

- ▶ Nbまでの疲労被害度: 0.901 ~ 1.441
- ▶ 定荷重振幅試験SN線図とレインフロー法で推定した結果が実験結果に概ね一致していたこと。
- ▶ 定常重畳と間欠重畳を比較すると、間欠重畳の方が長寿命側の疲労寿命を示した例が多かった
- ▶ 一般性のある結論を得るには追加試験が必要

# 結言

---

- ▶ 偏心回転錘りPBV試験機を使用したスプリング重畳試験条件では、ケースIL, ケースIFの双方で、多くの試験結果は定荷重振幅SN線図に概ね対応していた。
  - ▶ 偏心回転錘りPBV試験機を使用したスプリング重畳試験条件では、ケースILの寿命の伸びはケースIHの伸びより小さい傾向がみられた。ケースIHには特に疲労寿命が長い荷重波形が複数含まれていた。
  - ▶ 偏心回転錘りPBV試験機を使用したスプリング重畳試験条件では、応力波形の違いによる疲労寿命の差は主としてき裂発生寿命の違いで生じていた。ケースIHで特に疲労寿命が長いケースでは、き裂発生寿命が顕著に伸びていた。
  - ▶ 動電型起振機を使用したPBV試験機を用いれば、任意の波形、振幅のホイッピング重畳波形による定常・間欠重畳疲労試験を実施できる。
- 



# 結言

---

- ▶ 溶接継手試験体に動電型起振機によりホイッピング重畳応力波形を負荷する際の起振周波数等の制約条件が明らかになった。
  - ▶ 動電型PBV試験機で実施した定荷重振幅疲労試験結果は、偏心回転錘りPBV試験機で作成した定荷重振幅SN線図と概ね一致していた。
  - ▶ 動電型PBV試験機で実施した定常ホイッピング重畳疲労試験では偏心回転錘りPBV試験機で作成した定荷重振幅SN線図よりやや短寿命側の結果が得られたが、試験点数が少ないため一般的結論は導けなかった。
  - ▶ 動電型PBV試験機で実施した間欠ホイッピング重畳疲労試験では偏心回転錘りPBV試験機で作成した定荷重振幅SN線図に概ね一致する結果が得られた。試験点数が少ないため、ケースIFとケースILの寿命の比較に関する一般的結論は導けなかった。
- 

