

一般財団法人 日本海事協会  
共同研究 成果報告書

**ClassNK**  
R&D PROJECT

# 大型クランク軸の実動応力と曲げ-ねじり 疲労強度予測に関する研究開発

一般財団法人日本海事協会  
(株) 神戸製鋼所  
川崎重工業 (株)  
ダイハツディーゼル (株)  
新潟原動機 (株)

日立造船 (株)  
三井造船 (株)  
三菱重工船用機械エンジン (株)  
ヤンマー (株)  
国立大学法人広島大学

2016.08.31



- 1. 事業計画**
- 2. MBS検討結果**
- 3. 疲労強度に与える介在物の影響把握**
- 4. 多軸疲労強度の評価**
- 5. 実体疲労試験における介在物の影響**
- 6. 実動応力疲労試験および評価**
- 7. IACSルール化への提案**
- 8. 事業成果まとめ**



# 1. 事業計画

## 2. MBS検討結果

## 3. 疲労強度に与える介在物の影響把握

## 4. 多軸疲労強度の評価

## 5. 実体疲労試験における介在物の影響

## 6. 実動応力疲労試験および評価

## 7. IACSルール化への提案

## 8. 事業成果まとめ

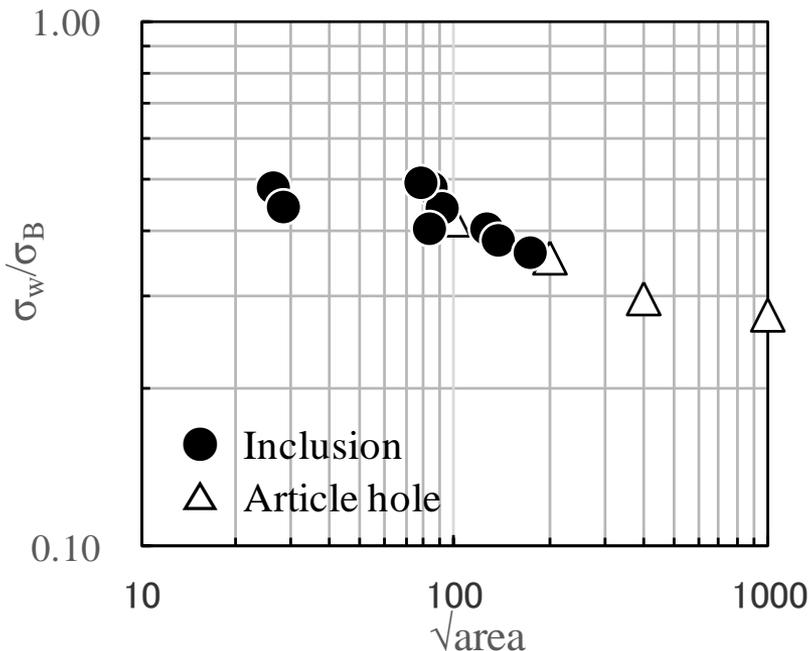


## ➤ 現状のIACS UR M53

クランク軸材料の設計疲労強度は引張強度によって決まる  
⇒ 材料の清浄度・介在物サイズの影響が考慮されていない

$$\sigma_{Dw} = K \cdot (0.42\sigma_B + 39.3) \cdot \left( 0.264 + 1.073D^{-0.2} + \frac{785 - \sigma_B}{4900} + \frac{196}{\sigma_B} \sqrt{\frac{1}{R_H}} \right)$$

設計疲労強度    Kファクタ    引張強度    軸径    フィレット径



村上の式

$$\sigma_w = \frac{1.43(\text{HV} + 120)}{(\sqrt{\text{area}})^{1/6}}$$

疲労強度    ビッカース硬さ    介在物の投影面積

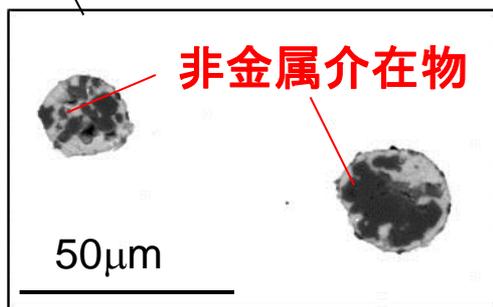
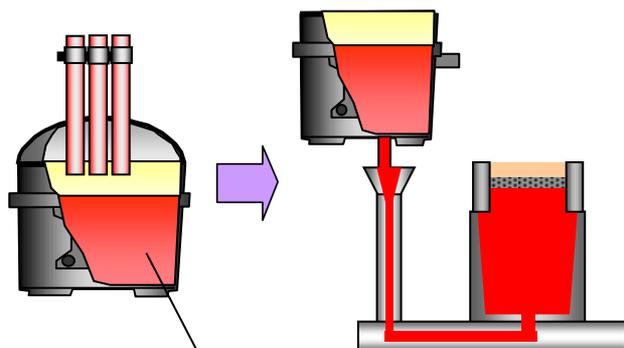
村上らにより、介在物の投影面積 ( $\sqrt{\text{area}}$ ) が鋼の疲労強度に大きく影響を与えることが報告されている



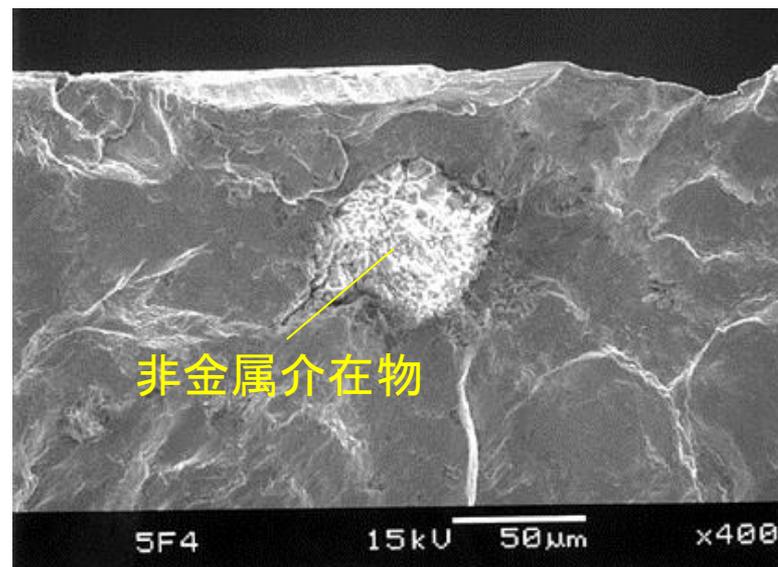
## 大型鍛造部品の場合、非金属介在物の出現は避けることが難しい

Steel making

Ingot casting



Example of an inclusion in fatigue fracture surface



近年、製鋼プロセスの高度化により、高潔浄な材料が製造可能となったため、同一引張強度の材料でも、鋼の潔浄度により疲労強度が異なる事例がある。

船級ルール of 設計疲労強度に介在物サイズの影響を反映すべき

クランク軸の疲労強度評価精度に大きく影響を与える  
以下の2点に取り組む

- MBSを適用したクランク軸の高精度な実動応力予測技術を確立する
- 内部介在物の影響を考慮した曲げ-ねじり多軸疲労強度評価技術を確立する

上記事業成果を基に、  
IACSルール変更案をCIMAC WG4に提案する。

## **CIMAC WG4:**

クランク軸の設計規則 (**IACS UR M53**) の変更を提案する

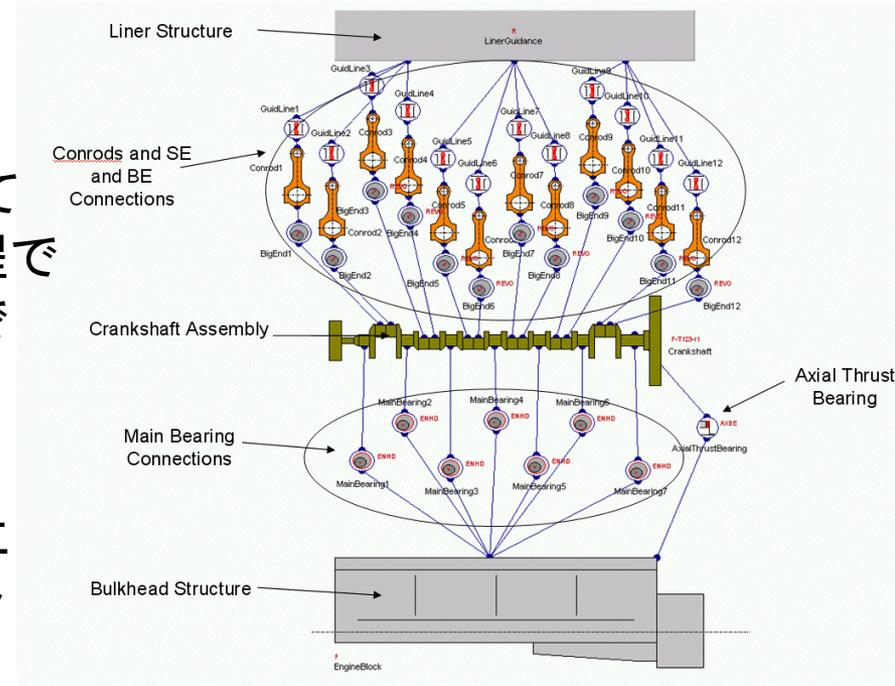
**CIMAC** (国際内燃機関会議) 内のワーキンググループ

## MBS: Multibody (dynamics) simulationの略

一般的には、  
「多体動力学」「機構解析」とも呼ばれる

○互いに作用し合う複数の部品が全体としてどのような運動をするのか、その運動の過程でどのような力が発生するのかを、数値計算で求める手法である。

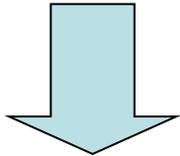
○エンジン全体の厳密なモデリングを可能にし、そのモデルを用いた動的シミュレーション(時刻歴応答解析)を行うことができる。



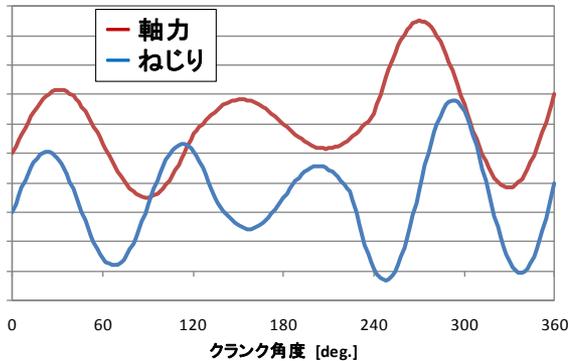
クランク軸の実動応力の把握に有効な技術として  
近年、エンジンメーカーを中心に普及している

## MBS精度向上検討

低速: 2ストロークエンジン  
中速: 4ストロークエンジン  
MBSの解析条件適正化  
精度確認に取り組む



## MBS結果

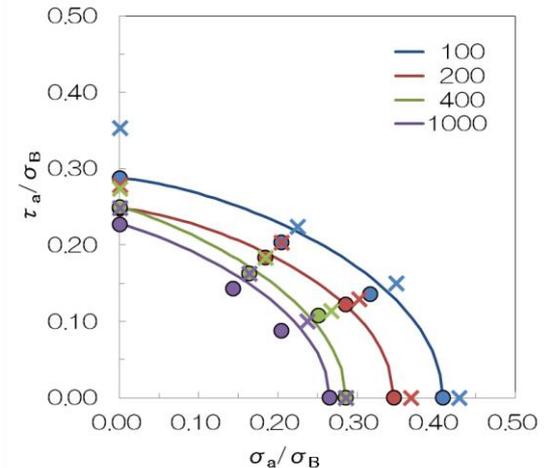
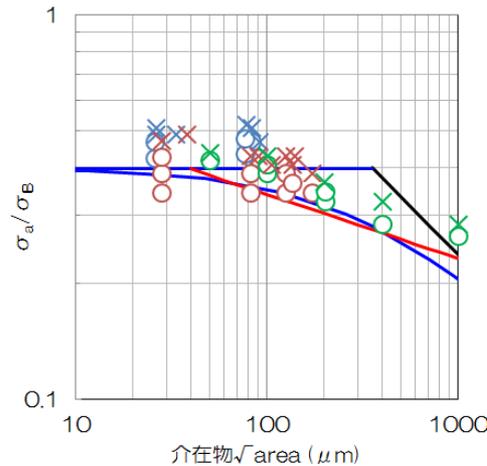


クランクフィレット部に生じる  
多軸応力条件を把握

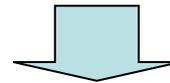
## 疲労試験項目：

- 軸力疲労試験
- ねじり疲労試験
- 軸力-ねじり疲労試験

各疲労試験におけ  
る介在物サイズの  
影響把握



適切な多軸疲労評価手法・材料データの把握



介在物サイズの影響を考慮した  
クランク軸の多軸疲労評価技術の確立



# 1. 事業計画

## 2. MBS検討結果

### 3. 疲労強度に与える介在物の影響把握

### 4. 多軸疲労強度の評価

### 5. 実体疲労試験における介在物の影響

### 6. 実動応力疲労試験および評価

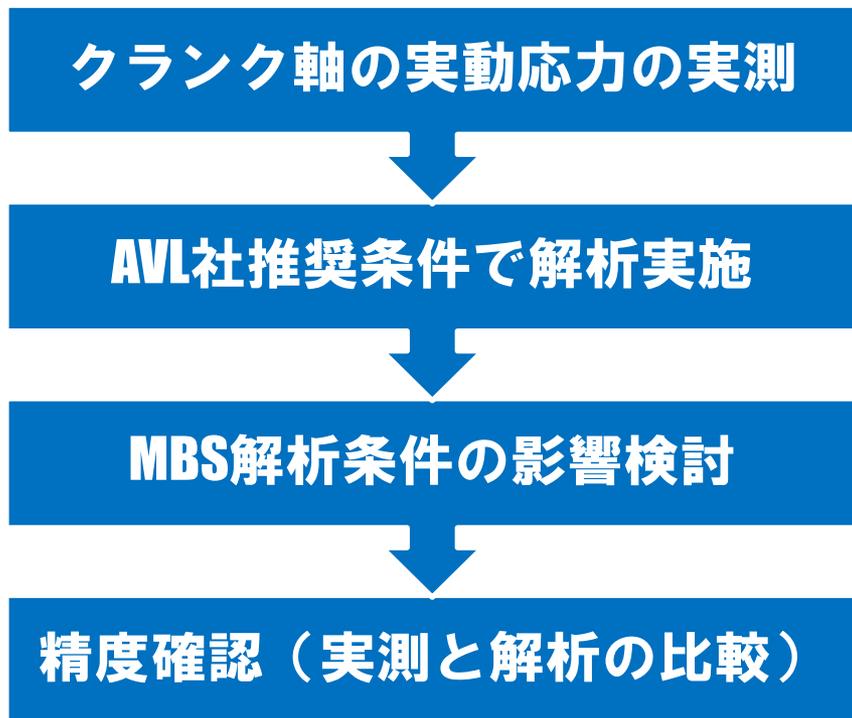
### 7. IACSルール化への提案

### 8. 事業成果まとめ



目的: **MBS (Multibody Simulation)**を適用したクランク軸の実動応力予測技術の確立  
⇒ **AVL**社の**"Excite Power Unit"**を使用

## ○検討フロー



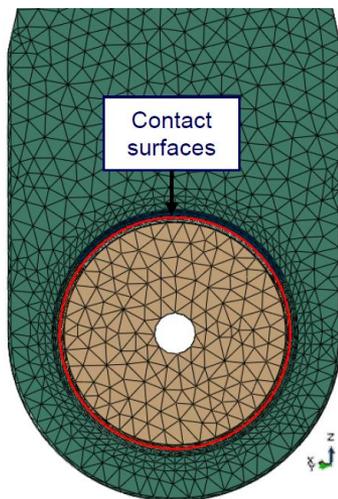
## ○対象エンジン

- ①低速2ストロークエンジン  
シリンダ数: 7気筒  
測定ケース: 100%, 75%Load
  
- ②中速4ストロークエンジン  
シリンダ数: 6気筒  
測定ケース: 100%, 75%Load

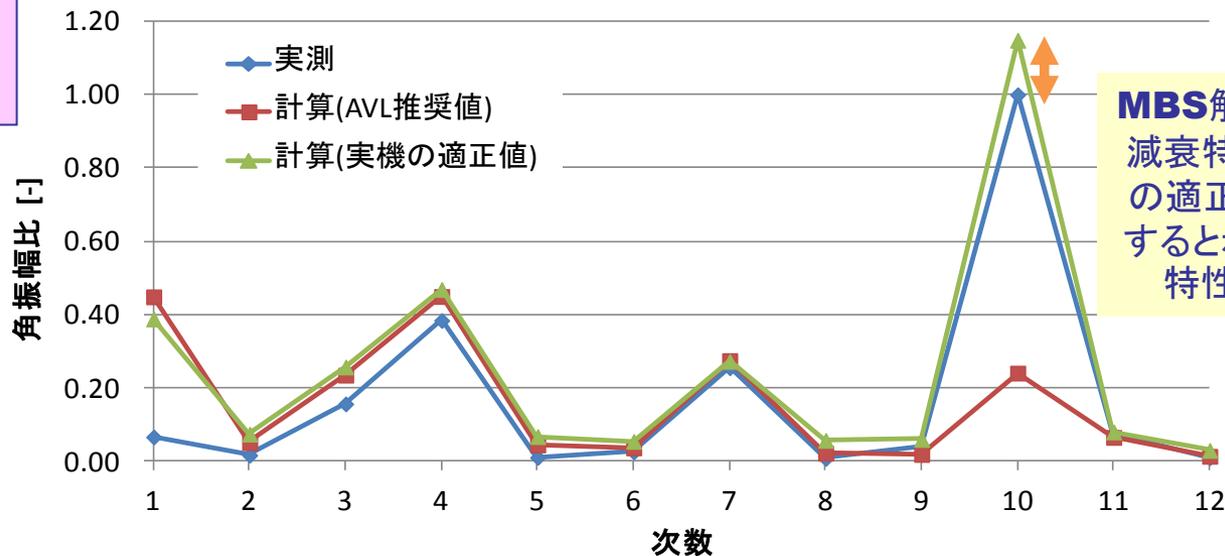
実測と解析が一致するように  
解析条件を適正化

# 実測とMBSの結果比較(低速エンジン)

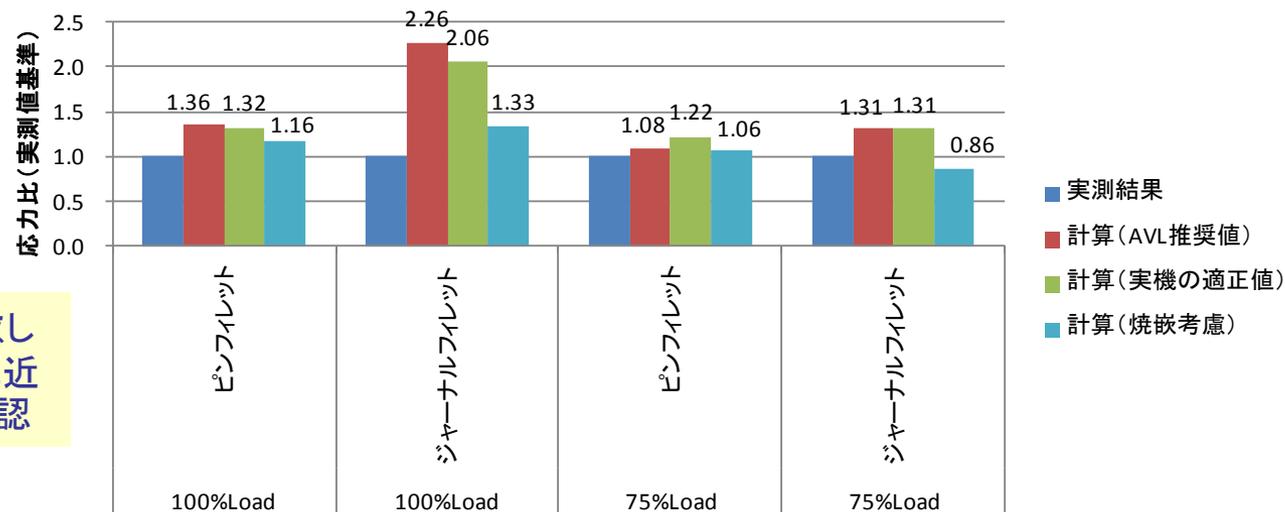
スローとジャーナル軸の焼嵌めをモデル化



焼嵌めを考慮した方が実測に近づく傾向を確認



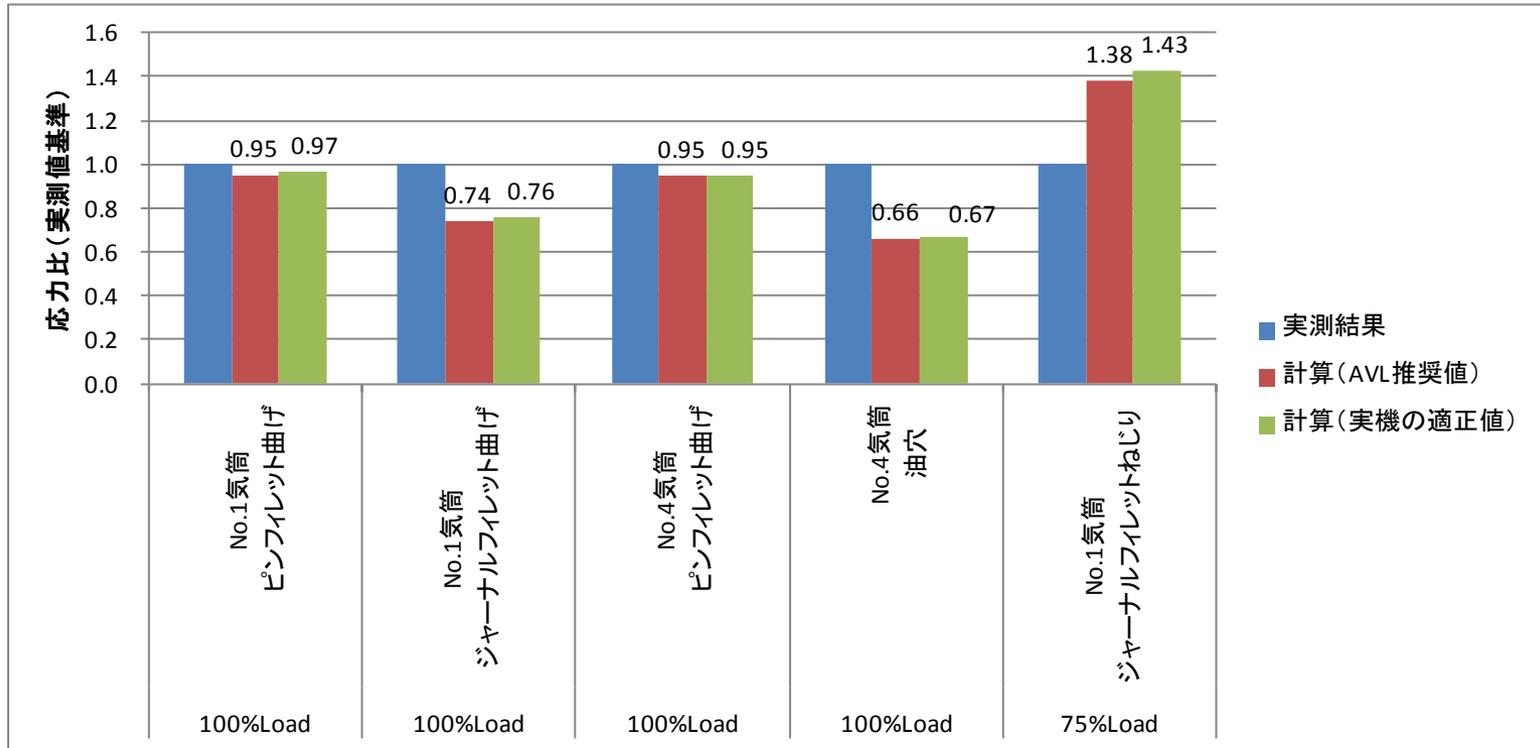
MBS解析条件の減衰特性に実機の適正值を適用するとねじり振動特性が改善



解析条件を適正化すると実測とMBSの結果がおおむね一致することを確認した

# 実測とMBSの結果比較(中速エンジン)

AVLの推奨値で解析しても概ね実測と一致  
実機の適正值に変更しても大きく変化せず



ピンフレット部の応力は実測とMBSの結果がおおむね一致することを確認した  
ジャーナルフレットおよび油穴周りの応力の場合は更なる検討が必要である



低速および中速ディーゼルエンジンを対象に、クランク軸の実動応力測定結果と**MBS**解析結果を比較し、**MBS**解析条件の適正化と解析精度の検証を行った。

低速および中速ディーゼルエンジン共に、実測と解析が一致することを確認した**MBS**の境界条件においては、**MBS**は実動応力の予測に有効なツールであることがわかった。



1. 事業計画
2. MBS検討結果
3. 疲労強度に与える介在物の影響把握
4. 多軸疲労強度の評価
5. 実体疲労試験における介在物の影響
6. 実動応力疲労試験および評価
7. IACSルール化への提案
8. 事業成果まとめ



## ➤ 目的

軸力、ねじり、軸力-ねじり混合の疲労強度に及ぼす介在物の影響を定量的に把握するための基礎データを取得することを目的に、クランク軸から試験片を複数切り出して疲労試験を行い、それぞれの荷重条件における介在物寸法と疲労強度の関係を調査した。

## ➤ 供試材

種類	ボア径 (mm)	NK材料 記号	試験体 No.	不純物濃度(ppm)		引張強度 (MPa)
				S	O	
組立型	700	KSF65	65-A	18	12	698
			65-A	50	11	724
			65-A	110	10	668
一体型	320mm	KSFA90	A90-A	5	8	941
			A90-B	97	17	980

## ➤ 疲労試験条件

- ① 軸力疲労試験
- ② ねじり疲労試験
- ③ 軸力-ねじり疲労試験

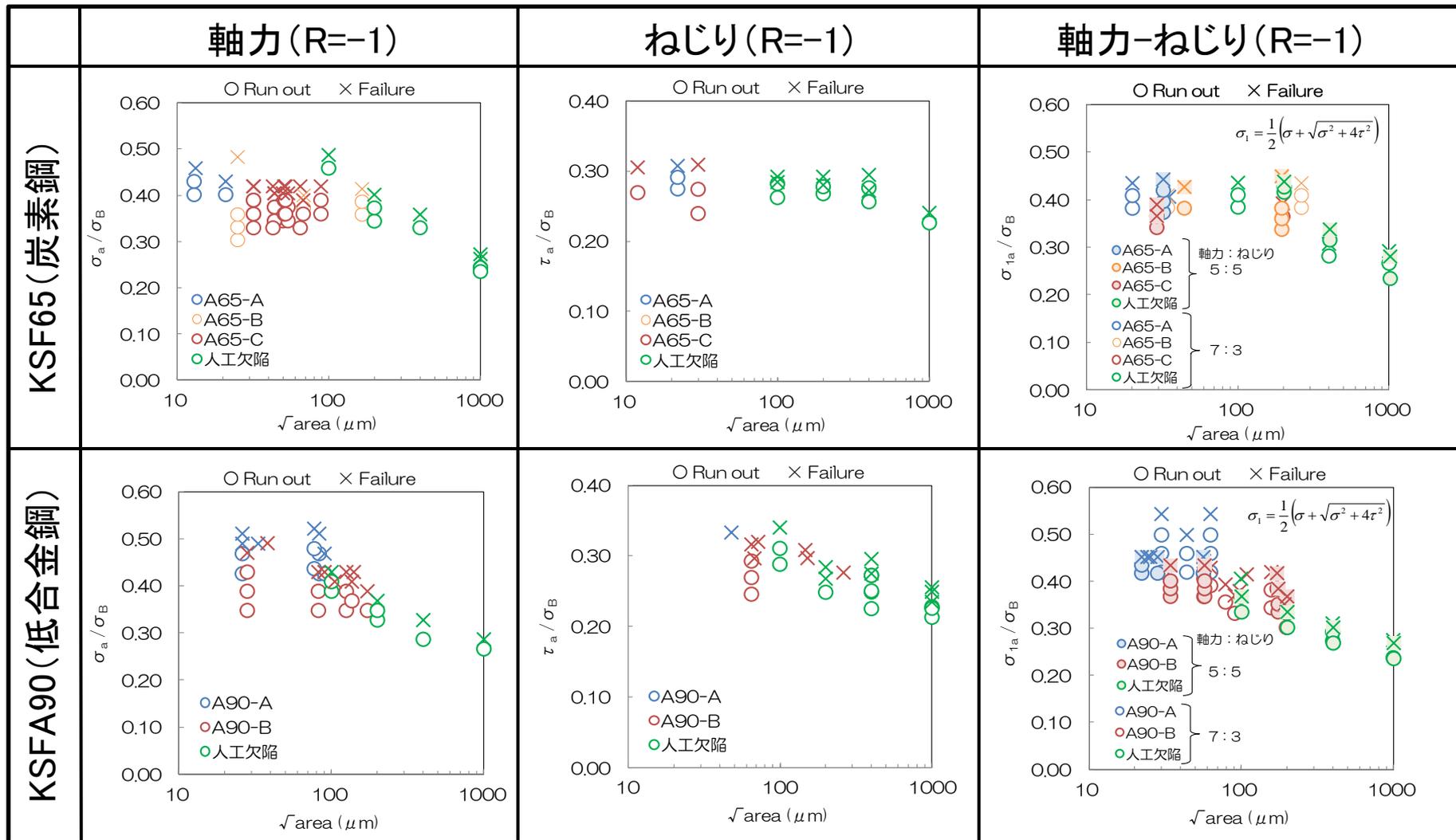
軸力:ねじり=5:5および7:3(位相差無)



# 疲労強度と介在物寸法の関係

## ▶ 疲労試験結果

※縦軸は軸力, ねじり, 最大主応力の応力振幅を引張強度で基準化した値を示す。



多軸疲労強度と介在物(微小欠陥)寸法( $\sqrt{area}$ )の関係を定量的に把握した



## ➤ 平均応力の影響

プロット： 実験結果

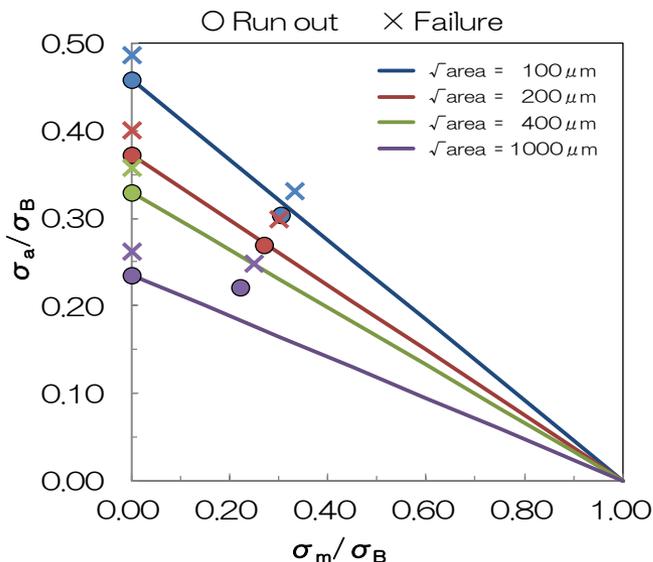
実線： 修正**Goodman**線図

$$\sigma_a = \sigma_w \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)$$

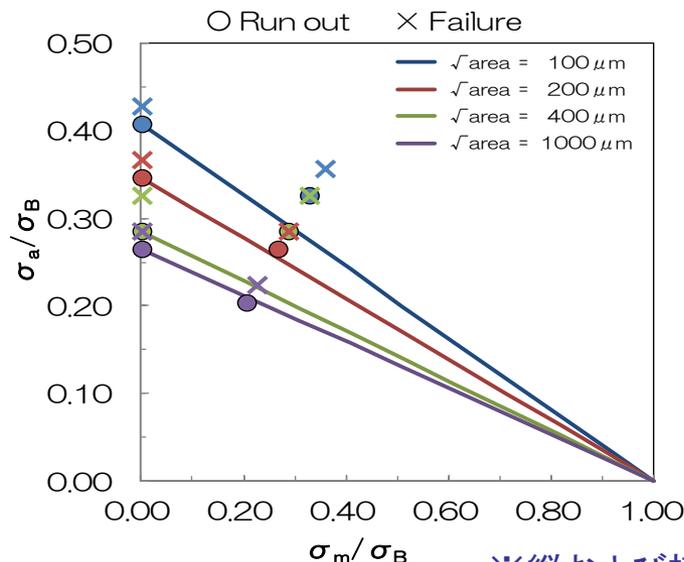
平均応力有の疲労強度      平均応力無の疲労強度      引張強度

平均応力

### KSF65(炭素鋼)



### KSFA90(低合金鋼)



修正 Goodman 線で安全側の予測が可能ながわかった

※縦および横軸は応力振幅および平均応力を引張強度で基準化した値を示す。



## ➤ 疲労強度予測式の検討

疲労強度

材料定数

応力比

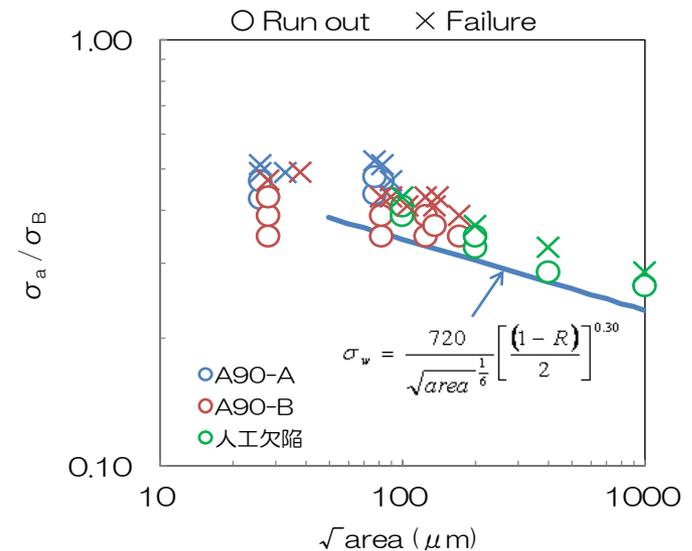
材料定数

$$\sigma_w (\text{または } \tau_w) = \frac{A}{\sqrt{\text{area}}^{\frac{1}{6}}} \left[ \frac{(1-R)}{2} \right]^B$$

介在物の投影面積

(例) KSFA90 軸力疲労

		応力比	A	B	適用範囲
炭素鋼	軸力	-1	550	0.32	$\sqrt{\text{area}} > 100 \mu\text{m}$
	ねじり	-1			$\sqrt{\text{area}} > 400 \mu\text{m}$
	軸力-ねじり	-1			$\sqrt{\text{area}} > 100 \mu\text{m}$
	軸力	0	500	0.32	$\sqrt{\text{area}} > 100 \mu\text{m}$
低合金鋼	軸力	-1	720	0.30	$\sqrt{\text{area}} > 50 \mu\text{m}$
	ねじり	-1			$\sqrt{\text{area}} > 400 \mu\text{m}$
	軸力-ねじり	-1			$\sqrt{\text{area}} > 50 \mu\text{m}$
	軸力	0	680	0.30	$\sqrt{\text{area}} > 50 \mu\text{m}$



村上らの $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルを参考に、今回確認した鋼種、荷重条件に対して疲労強度予測式を構築した。



クランク軸に用いられる代表的な材料**KSF65**と**KSFA90**の軸力、ねじり、混合荷重下における疲労強度と介在物(微小欠陥)寸法の関係を定量的に把握した。

その結果と $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルを参考に、疲労強度予測式を構築した。また、平均応力の影響を鉄鋼材料で一般的に用いられる修正**Goodman**線で安全側の予測が可能であることを確認した。これにより、平均応力の影響も含め、介在物(微小欠陥)が存在する場合のクランク軸の疲労強度を概ね推定することが可能となった。



1. 事業計画
2. MBS検討結果
3. 疲労強度に与える介在物の影響把握
4. 多軸疲労強度の評価
5. 実体疲労試験における介在物の影響
6. 実動応力疲労試験および評価
7. IACSルール化への提案
8. 事業成果まとめ



## ➤ 目的

クランク軸の疲労強度評価に有効な方法を見極めることを目的に、既存の多軸評価手法と疲労試験結果を比較し、既存の手法の有効性と精度確認を行った。

## ➤ 多軸疲労評価式

- (1) H.J.Gough : Proc. Inst. Mech. Eng., 160(1949) 417.
- (2) W.N. Findley : Trans. ASME, 79 (1957) 1337.
- (3) 西原利夫, 河本 実 : 日本機械学会論文集, 7(1941) 1-85.

### (1) H.J. Goughの式

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_w}\right)^2 + \left(\frac{\tau_a}{\tau_w}\right)^2 = 1$$

### (2) W.N. Findleyの式

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_w}\right)^\phi + \left(\frac{\tau_a}{\tau_w}\right)^2 = 1$$

$$\phi = \tau_w / \sigma_w$$

### (3) 西原・河本の式

$\phi = \tau_w / \sigma_w \leq 1/\sqrt{3}$ のとき

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_w}\right)^2 + \left(\frac{\tau_a}{\tau_w}\right)^2 = 1$$

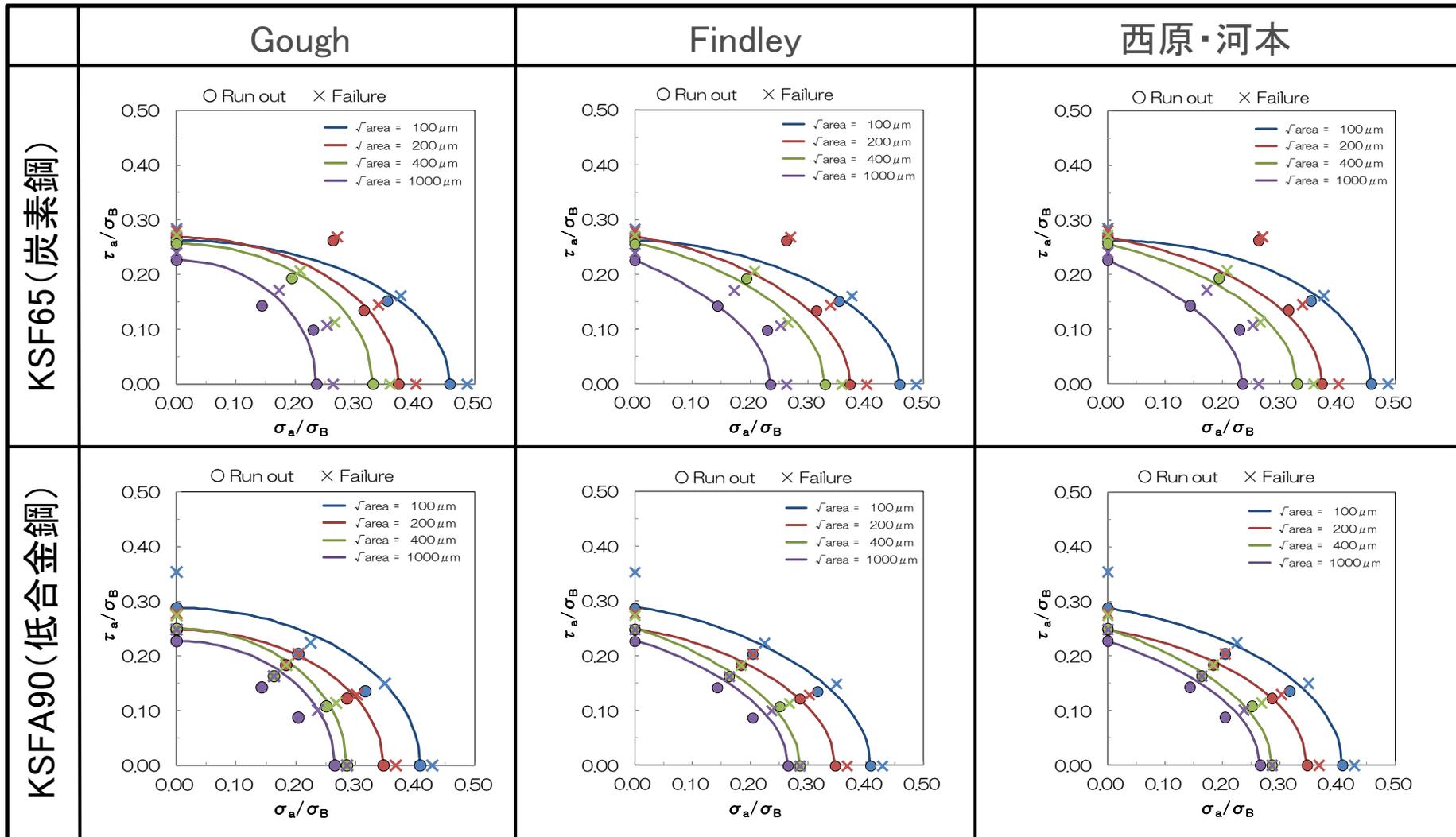
$\phi > 1/\sqrt{3}$ のとき

$$\frac{1}{2} \left( \frac{1}{\phi^2} - 1 \right) \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_w} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( 3 - \frac{1}{\phi^2} \right) \frac{\sigma_a}{\sigma_w} + \left( \frac{\tau_a}{\tau_w} \right)^2 = 1$$

$\sigma_w$ : 軸力疲労強度  
 $\sigma_a$ : 軸力応力振幅  
 $\tau_w$ : ねじり疲労強度  
 $\tau_a$ : ねじり応力振幅

# 多軸疲労評価式との比較

プロット： 実験結果  
実線： 予測



実験結果は**Findley**および西原・河本の式と良く一致することを確認した。  
 → 単軸の疲労強度 ( $\sigma_w$  および  $\tau_w$ ) における介在物寸法の影響を確認すれば、  
 多軸疲労試験を行わなくても介在物寸法を考慮した多軸疲労評価が可能である。

介在物(微小欠陥)が存在する場合の多軸疲労強度は、それぞれの介在物サイズに応じた軸力疲労強度 $\sigma_w$ とねじり疲労強度 $\tau_w$ を用いると、**Findley**および西原・河本の多軸疲労評価式と良く一致することを確認した。特に**Findley**の式は複雑な計算を必要とせず評価が可能である。

以上のことから単軸の疲労強度( $\sigma_w$ および $\tau_w$ )における介在物寸法の影響を調べれば、多軸疲労試験を行わなくても介在物寸法を考慮した多軸疲労強度の推定が可能となった。



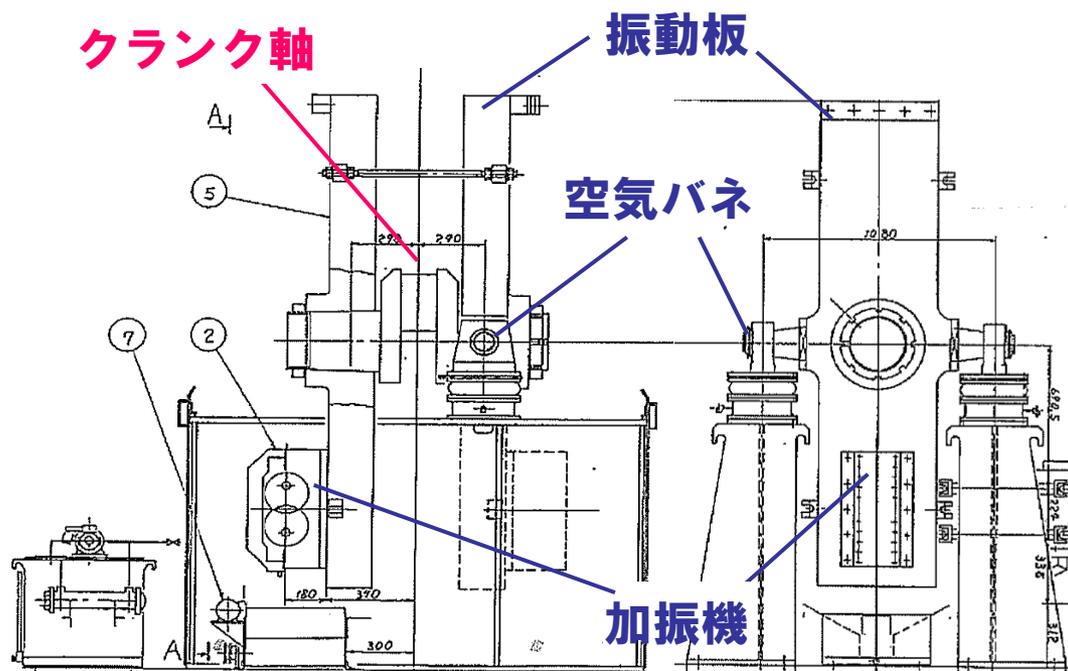
1. 事業計画
2. MBS検討結果
3. 疲労強度に与える介在物の影響把握
4. 多軸疲労強度の評価
5. 実体疲労試験における介在物の影響
6. 実動応力疲労試験および評価
7. IACSルール化への提案
8. 事業成果まとめ



## ➤ 目的

実クランク軸における疲労強度(以下実体疲労強度)と介在物寸法の関係を確認することを目的に、一体型クランク軸を対象に曲げ荷重下の実体疲労試験を行い、実体疲労試験における介在物の影響評価を行った。

## ➤ 実体疲労試験装置の概略



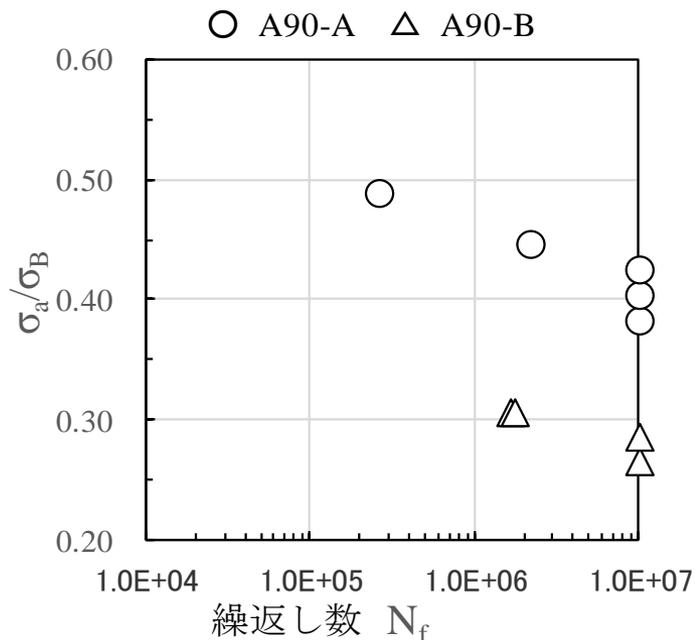
## ➤ 供試材

ピン径310mmの実クランク軸  
材質:KSFA90(低合金鋼)





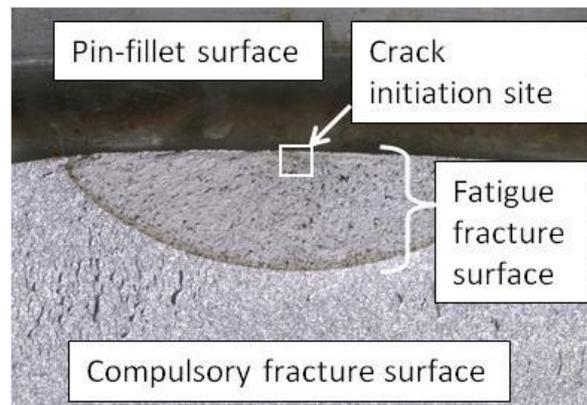
## ➤ S-N曲線



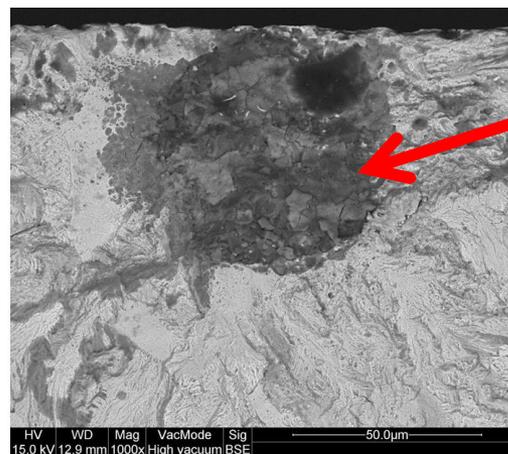
※縦軸は実体疲労の応力振幅 $\sigma_a$ を引張強度 $\sigma_B$ で基準化した値を示す。

清浄度の低い材料(A90-B)の方が疲労強度は低い結果となった。

## ➤ き裂起点部の観察

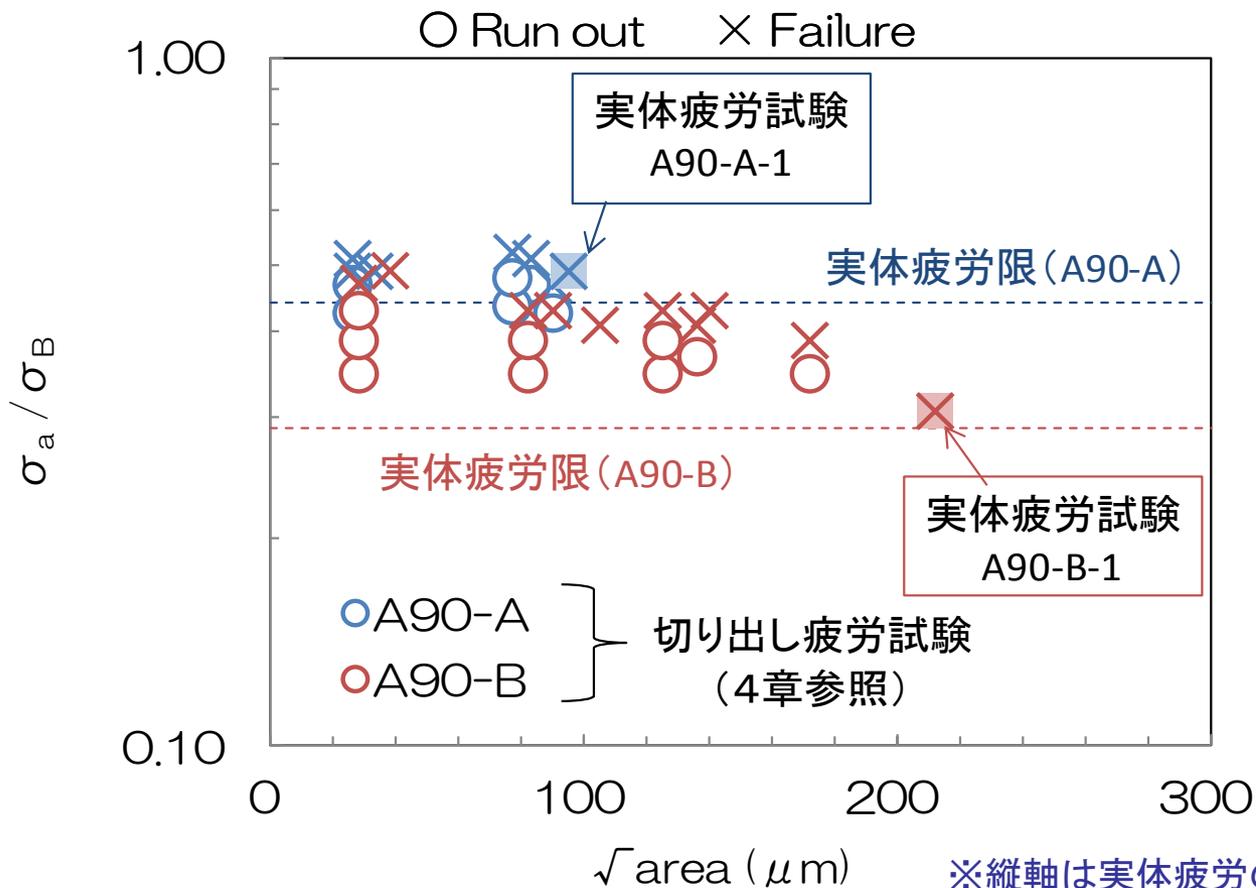


(例) A90-B材の破面観察





# 疲労強度と介在物寸法の関係



・介在物寸法 ( $\sqrt{\text{area}}$ ) と疲労強度の関係は切り出し疲労試験と同様であった。

・実体疲労試験体のき裂起点部に観察された介在物寸法は、切り出し試験片で観測される最大の介在物寸法よりも若干大きいことがわかった。



実体疲労試験においても介在物サイズが疲労強度に大きく影響し、介在物サイズと疲労強度の関係は切出し疲労試験と同様であることがわかった。

また、実体疲労試験は切出し試験と比較して試験応力が作用する体積が大きいため、より大きい介在物が試験応力の作用領域に存在する可能性があることを確認した。



1. 事業計画
2. MBS検討結果
3. 疲労強度に与える介在物の影響把握
4. 多軸疲労強度の評価
5. 実体疲労試験における介在物の影響
6. 実動応力疲労試験および評価
7. IACSルール化への提案
8. 事業成果まとめ



ディーゼル機関のクランク軸の安全性→疲労強度評価が重要



実際のクランク軸に負荷される実動応力条件を模擬した疲労試験を実施  
以下の3条件で疲労強度評価を実施

- ① Findleyの評価
- ② 最大主応力の評価
- ③ 疲労評価ソフトの評価

## ○実動応力条件の決定

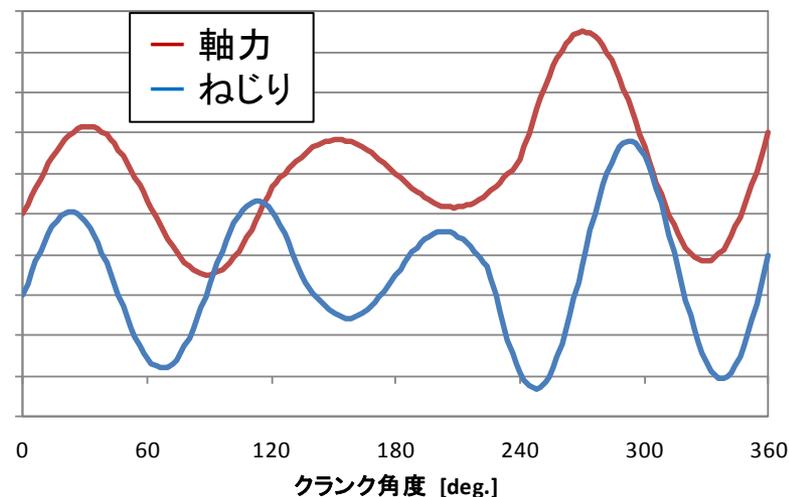
- ・低速ディーゼルエンジン
- ・中速ディーゼルエンジン

実測と**MBS**解析を実施



ピンフィレット部の実測位置の  
実動応力波形を試験条件に採用

イメージ図



全波形を $5 \times 10^6$ 回繰返して疲労試験実施



# ① Findleyの評価

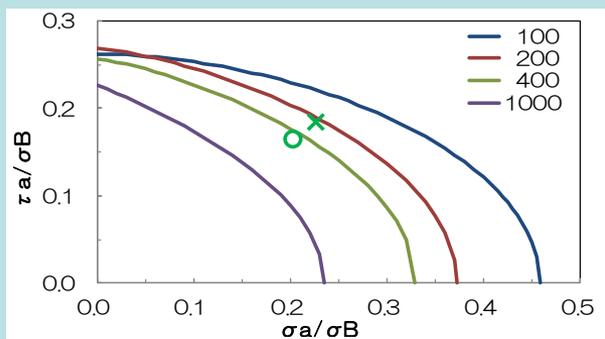
## ○Findleyの式

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_w}\right)^{\frac{1}{\phi}} + \left(\frac{\tau_a}{\tau_w}\right)^2 = 1$$

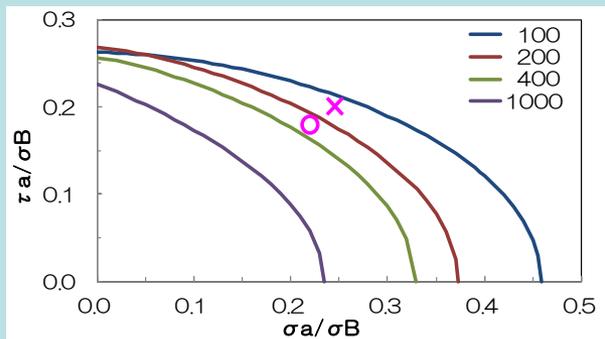
$$\phi = \tau_w / \sigma_w$$

※ $\sigma_w$ および $\tau_w$ は軸力およびねじりの疲労強度を現し、単軸疲労試験の実測値を用いた

### 低速エンジン

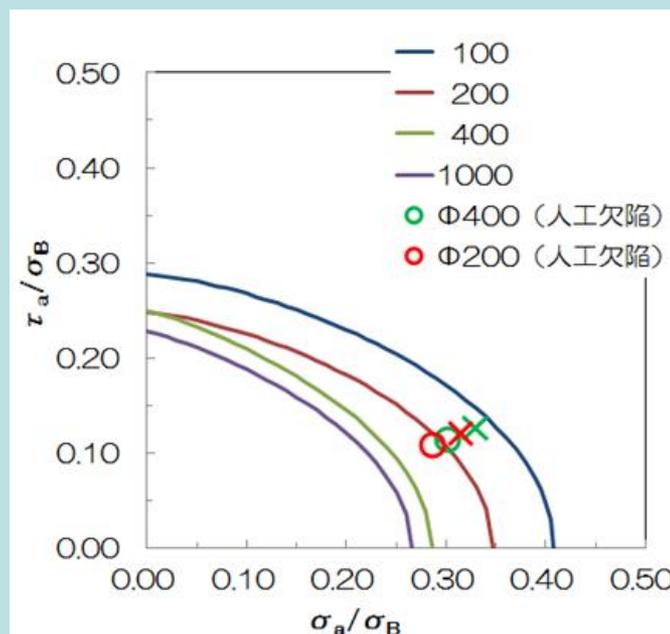


Φ 400 μm人工欠陥



実欠陥 $\sqrt{\text{area}}=183 \mu\text{m}$

### 中速エンジン



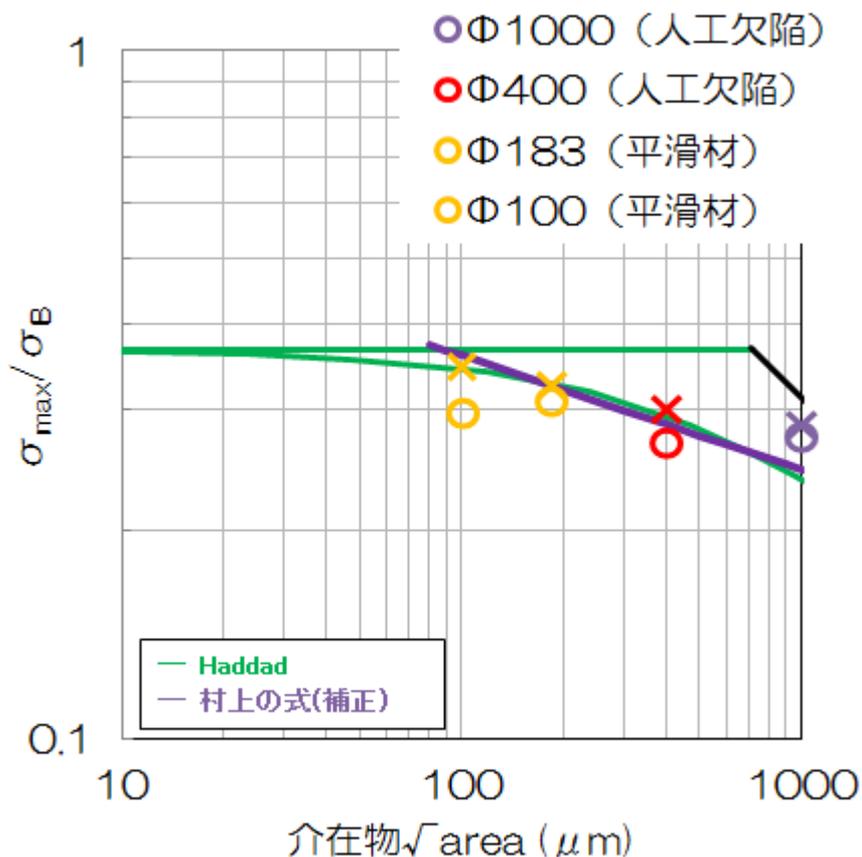
※縦および横軸はねじりおよび軸力の応力振幅 ( $\tau_a$ および $\sigma_a$ )を引張強度 $\sigma_B$ で基準化した値を示す。

安全側で評価できることが確認された

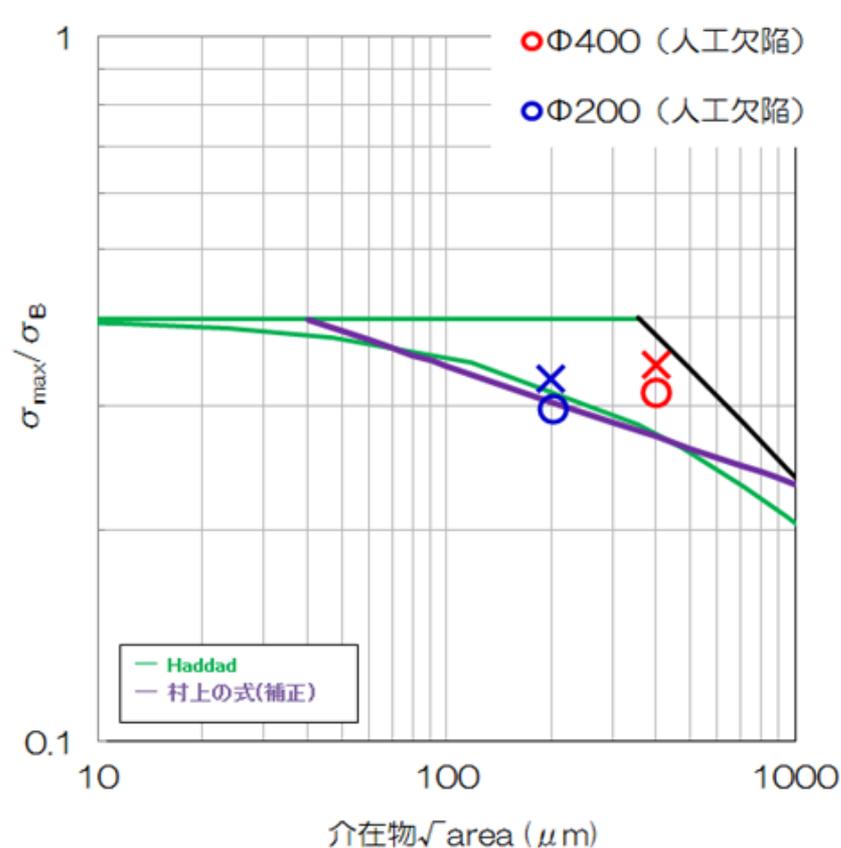


# ②最大主応力の評価

○KSF65



○KSFA90



※縦軸は最大主応力の応力振幅 $\sigma_{max}$ を引張強度 $\sigma_B$ で基準化した値を示す。

安全側で評価できることが確認された



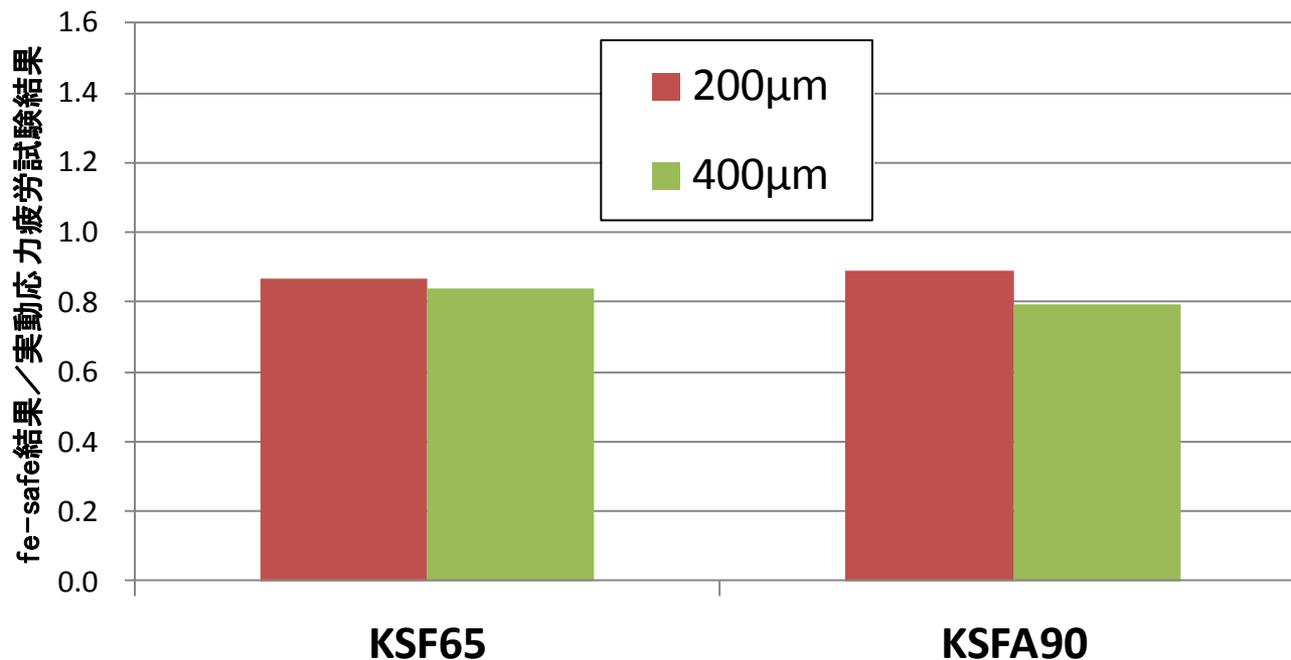
# ③疲労評価ソフトの評価

## ○Brown Millerの式

材料定数は軸力疲労試験の  
**S-N**線図から算出

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{(\sigma'_f - \sigma_m)}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c$$

ひずみ範囲  $\Delta\varepsilon$   
 材料定数  $\sigma'_f$   
 平均応力  $\sigma_m$   
 ヤング率  $E$   
 繰返し数  $2N_f$   
 材料定数  $b$   
 材料定数  $\varepsilon'_f$   
 材料定数  $c$



安全側で評価できることが確認された



○実動応力下の疲労強度も一定振幅下の疲労強度と同様に、Findleyの式および最大主応力の評価が可能であることを確認した。

○疲労評価ソフトにおけるBrown Millerの評価は、安全側の評価となることを確認した。

○介在物寸法の影響を材料定数に考慮することで、実動応力下の疲労強度を一般的な多軸応力評価手法にて安全側に評価可能であることがわかった。



1. 事業計画
2. MBS検討結果
3. 疲労強度に与える介在物の影響把握
4. 多軸疲労強度の評価
5. 実体疲労試験における介在物の影響
6. 実動応力疲労試験および評価
7. IACSルール化への提案
8. 事業成果まとめ

## ➤ 目的

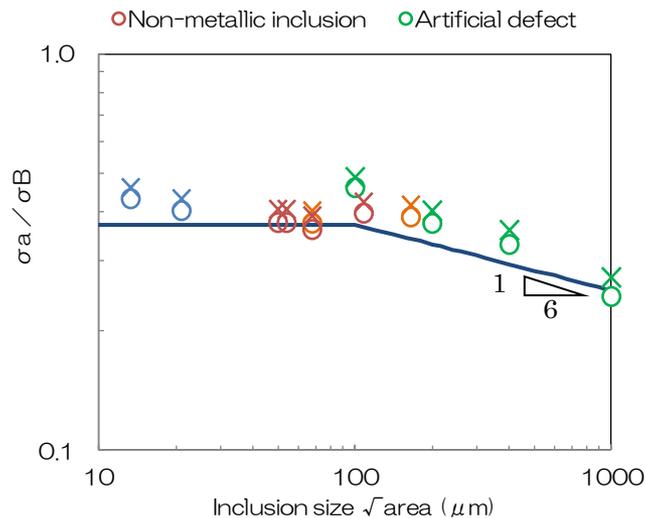
現状のクランク軸の設計規則(**IACS UR M53**)の設計疲労強度に考慮されていない介在物寸法の影響をルールに反映させるために、**CIMAC WG4**へ提案を行う。

### **CIMAC WG4:**

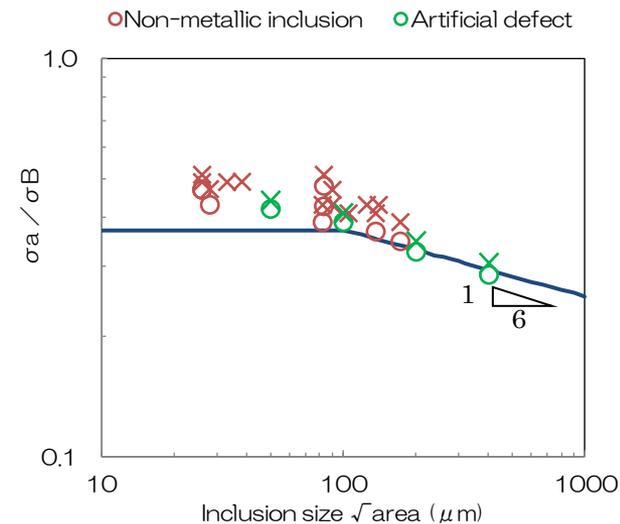
クランク軸の設計規則の更新を提案する**CIMAC**内のワーキンググループ

⇒本事業成果に基づき「非金属介在物寸法を考慮した高い疲労強度の活用に関するガイダンス」を提案した。これを受けて、エンジンメーカ、クランク軸サプライヤ、船級のメンバーからなる検討サブグループで、この議論が開始された。

## KSF65 (炭素鋼)

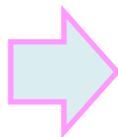


## KSFA90 (低合金鋼)



$$\sigma_w = \frac{A}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}}$$

疲労強度は  
 $\sqrt{area}$ の(-1/6)  
に比例



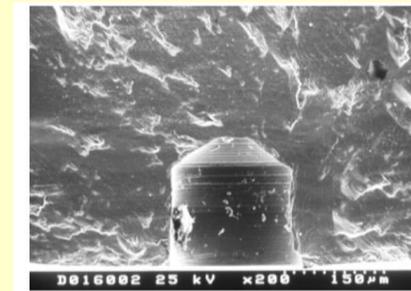
$$\sqrt{area}=500\mu\text{m},$$

$$K=1.05$$

$$(K - factor) = \frac{2.96}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}}$$

Kファクタも $\sqrt{area}$ の  
(-1/6)に比例  
ただし、上限を有する

疲労試験による評価  
(人工欠陥)





## ▶ 想定されるWGでの議論のポイント

- ・提案通りにK-factorを定めるか、根本的に強度式を見直すのか。
- ・K-factorを定めるならば、最大介在物寸法で定めるか、清浄度か。
- ・最大介在物寸法ならば、現行強度式で想定されている寸法はどの程度か。
- ・最大介在物寸法の評価方法。

## ▶ ルール化への流れ

CIMAC WG4で  
更新案を議論



IACS MP\*で  
提案内容を議論



IACS ルール  
に反映



各船級ルール  
に反映



修正提案

\* IACS Machinery Panel (機関部会)



本事業の成果を元に、「非金属介在物寸法を考慮した高い疲労強度の活用に関するガイダンス」として**CIMAC WG4**へ提案し、ルール化に向けた議論を開始した。

**IACS UR M53.6**の疲労強度式における**K-factor**の設定方法や疲労試験方法に関しての提案を行った。



- 1. 事業計画**
- 2. MBS検討結果**
- 3. 疲労強度に与える介在物の影響把握**
- 4. 多軸疲労強度の評価**
- 5. 実体疲労試験における介在物の影響**
- 6. 実動応力疲労試験および評価**
- 7. IACSルール化への提案**
- 8. 事業成果まとめ**



○実測と解析が一致することを確認したMBSの境界条件においては、MBSは実動応力の予測に有効なツールであることがわかった。

○実動応力下における介在物寸法を考慮した多軸疲労強度評価手法を提案し、安全側の評価となることを確認した。

○上記成果を元に、介在物寸法と疲労強度の関係に関するIACSルール化に向けた提案を行った。

本事業計画時の目標はすべて達成された