

講演内容の目次

1. 包装貨物振動試験

- ・ 蓄積疲労振動試験システムの紹介
- ・ 輸送環境計測データにおける低加速度データの取り扱い指針
- ・ 試験時間短縮が試験精度に及ぼす影響度の評価方法

2. 包装設計のための製品衝撃強さ試験

- ・ 破損部位別に損傷境界曲線を描く重要性
- ・ 台形波ではなく、正弦半波衝撃パルスを利用する利点
- ・ 簡易落下試験機による製品衝撃強さ評価方法

低加速度データの取扱い指針

指針 1：削除する基準

- ・ S-N曲線の疲労限度(下限値)以下を削除する。

机上の空論 (疲労限度、伝達率が特定できない。)

- ・ 蓄積疲労スペクトル(AFS)にて判断

全AFSに対する低加速度AFSの割合が小さければ削除可能。

指針 2：S-N曲線の加速係数m

- ・ 加速係数mが小さい 低加速度の影響が大きい。
大きい 影響が小さい。

指針 3：伝達率に注目

- ・ 試料によっては、低加速度と高加速度で共振点が異なる。

疲労試験 (S-N曲線) の説明

疲労試験

疲労試験とは、材料の疲労特性を見るための試験です。

材料は繰り返し応力を受けると、1回だけ応力を受けた場合よりも低い応力で破壊に至ります。疲労試験では、こうした疲労特性を見るために一定の応力振幅を与えて破壊に至るまでの繰り返し数を計測します。

計測値はS-N曲線と呼ばれる図にプロットされます。S-N曲線とは、横軸に繰り返し数N、縦軸に応力振幅Sをとって材料の疲労特性を表したものです。

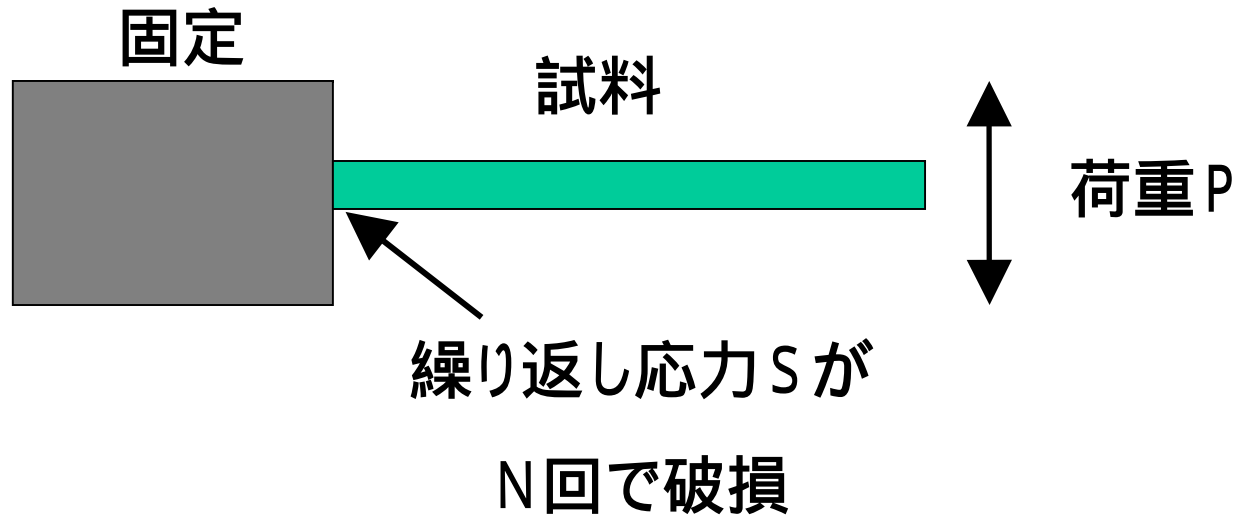
一般的に鋼の場合、繰り返し数が 10^7 で破壊しないものは、 10^7 以上繰り返しても破壊しません。このときの応力振幅の大きさを疲労強度(または疲労限度)といいます。

引用： 機械用語集 疲労試験

<http://www.mterm-pro.com/machine-yougo/material-another/hirou-test.html>

疲労試験とS-N曲線の説明

疲労試験の例



実験結果

| | | | | | | | |
|---|----|----|----|-----|------|--------|--------|
| S | 70 | 48 | 40 | 23 | 15 | 6.3 | 3.6 |
| N | 6 | 30 | 60 | 600 | 3000 | 10^4 | 10^5 |

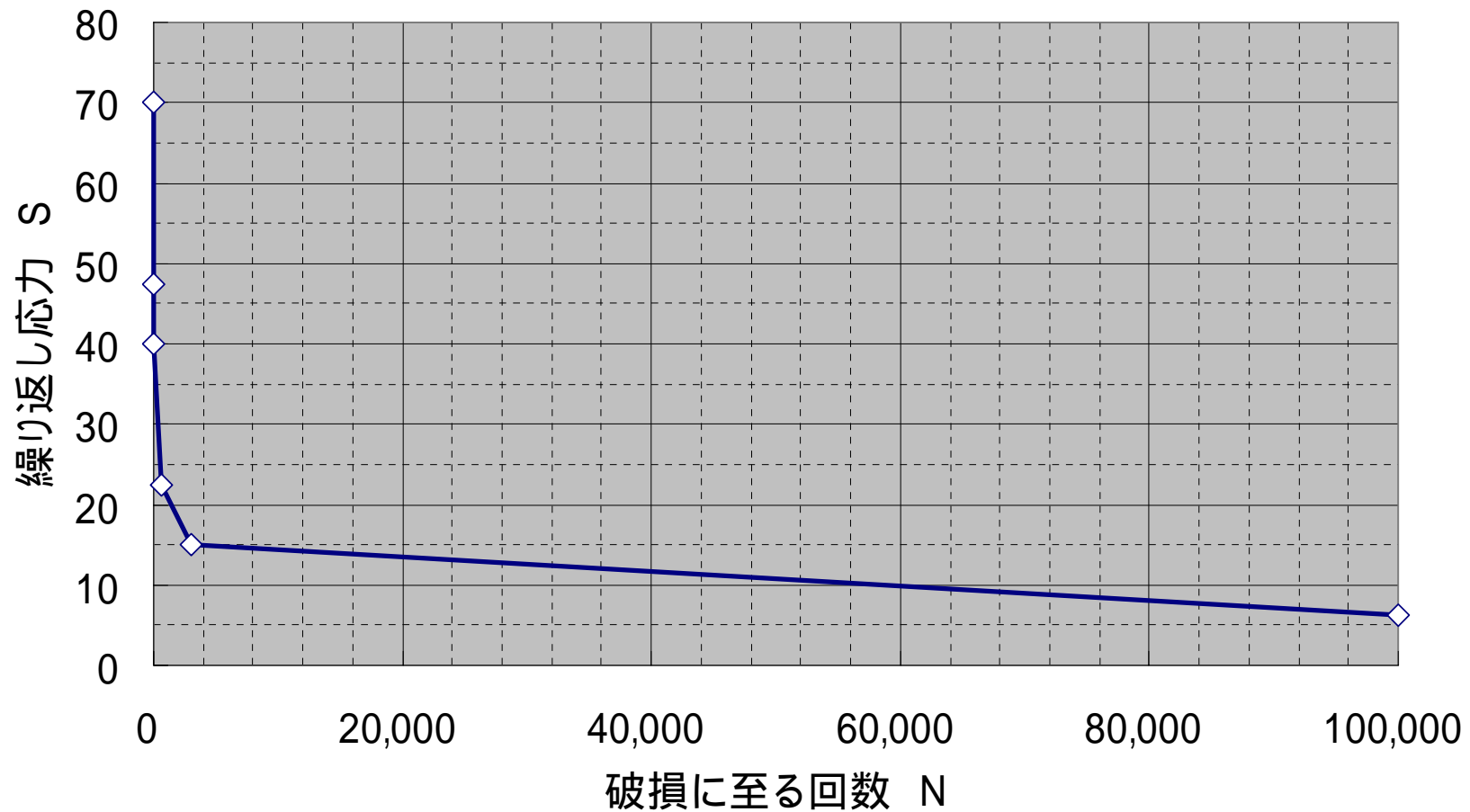
これは本当の実験結果ではありませんが、このような結果となる傾向が経験的にさまざまな材料で確認されております。

疲労試験とS-N曲線

実験結果

| | | | | | | | |
|---|----|----|----|-----|------|--------|--------|
| S | 70 | 48 | 40 | 23 | 15 | 6.3 | 3.6 |
| N | 6 | 30 | 60 | 600 | 3000 | 10^4 | 10^5 |

S-N曲線の模式図

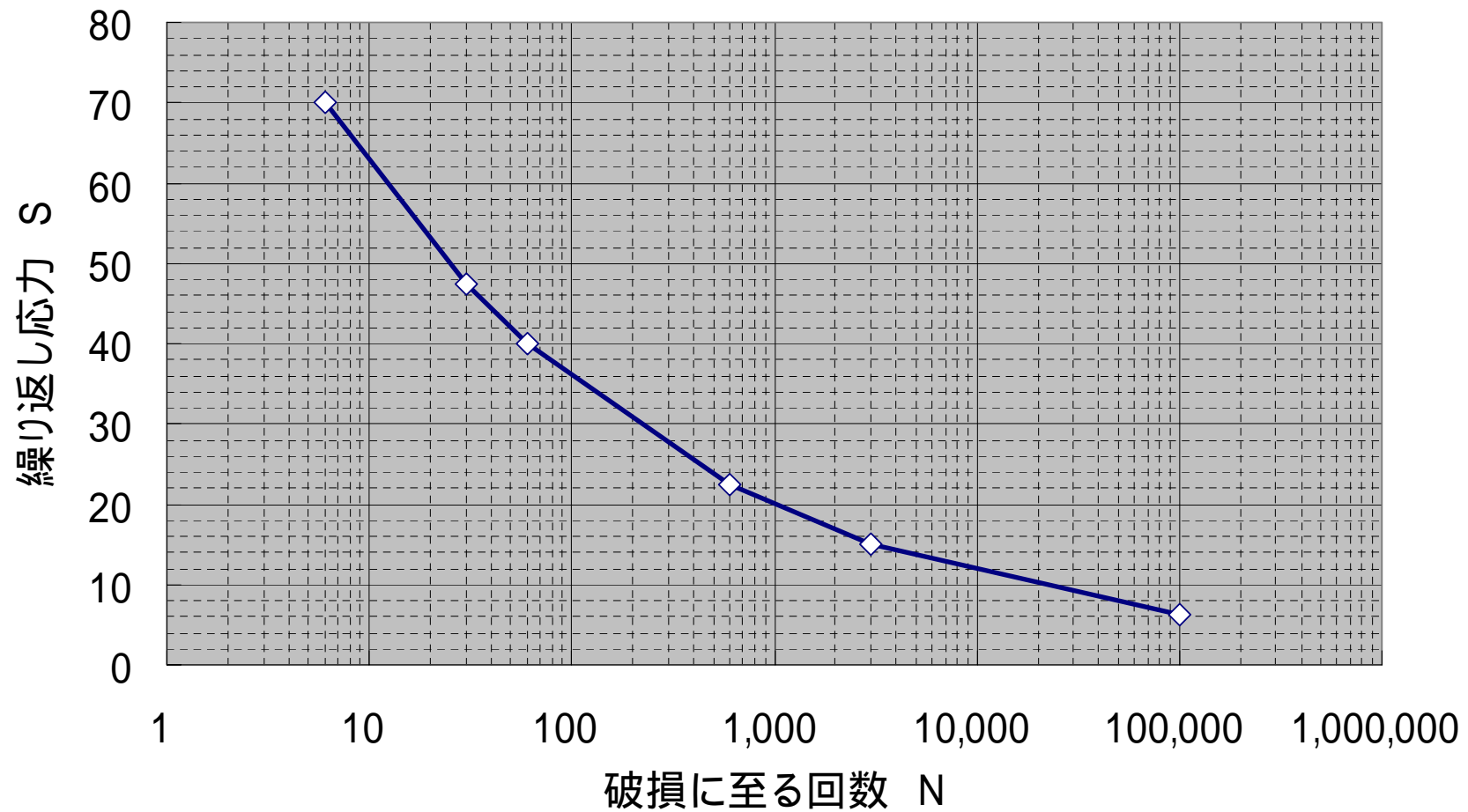


疲労試験とS-N曲線

実験結果

| | | | | | | | |
|---|----|----|----|-----|------|-----------------|-----------------|
| S | 70 | 48 | 40 | 23 | 15 | 6.3 | 3.6 |
| N | 6 | 30 | 60 | 600 | 3000 | 10 ⁴ | 10 ⁵ |

S-N曲線の模式図

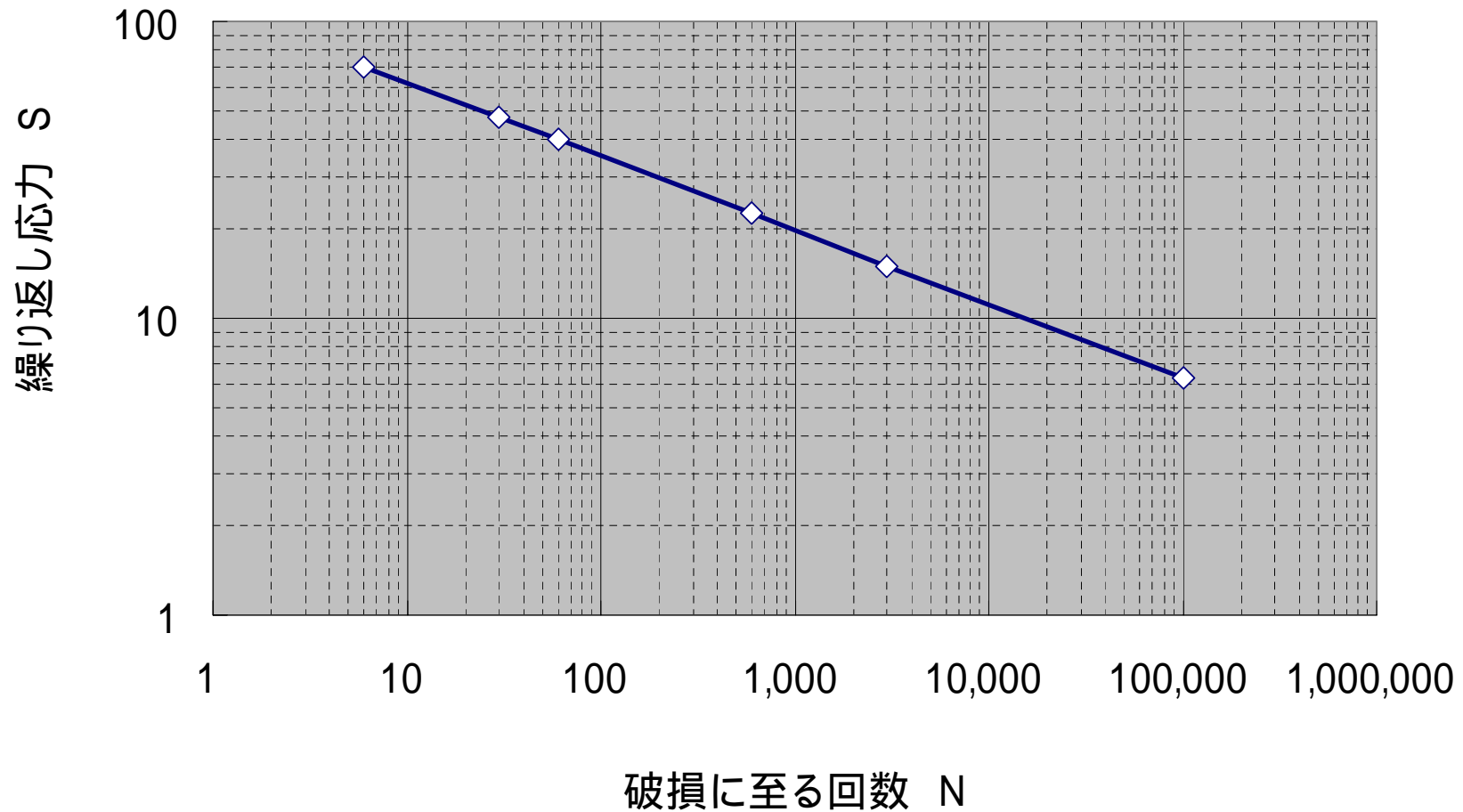


疲労試験とS-N曲線

実験結果

| | | | | | | | |
|---|----|----|----|-----|------|-----------------|-----------------|
| S | 70 | 48 | 40 | 23 | 15 | 6.3 | 3.6 |
| N | 6 | 30 | 60 | 600 | 3000 | 10 ⁴ | 10 ⁵ |

S-N曲線の模式図 (一般的な場合)

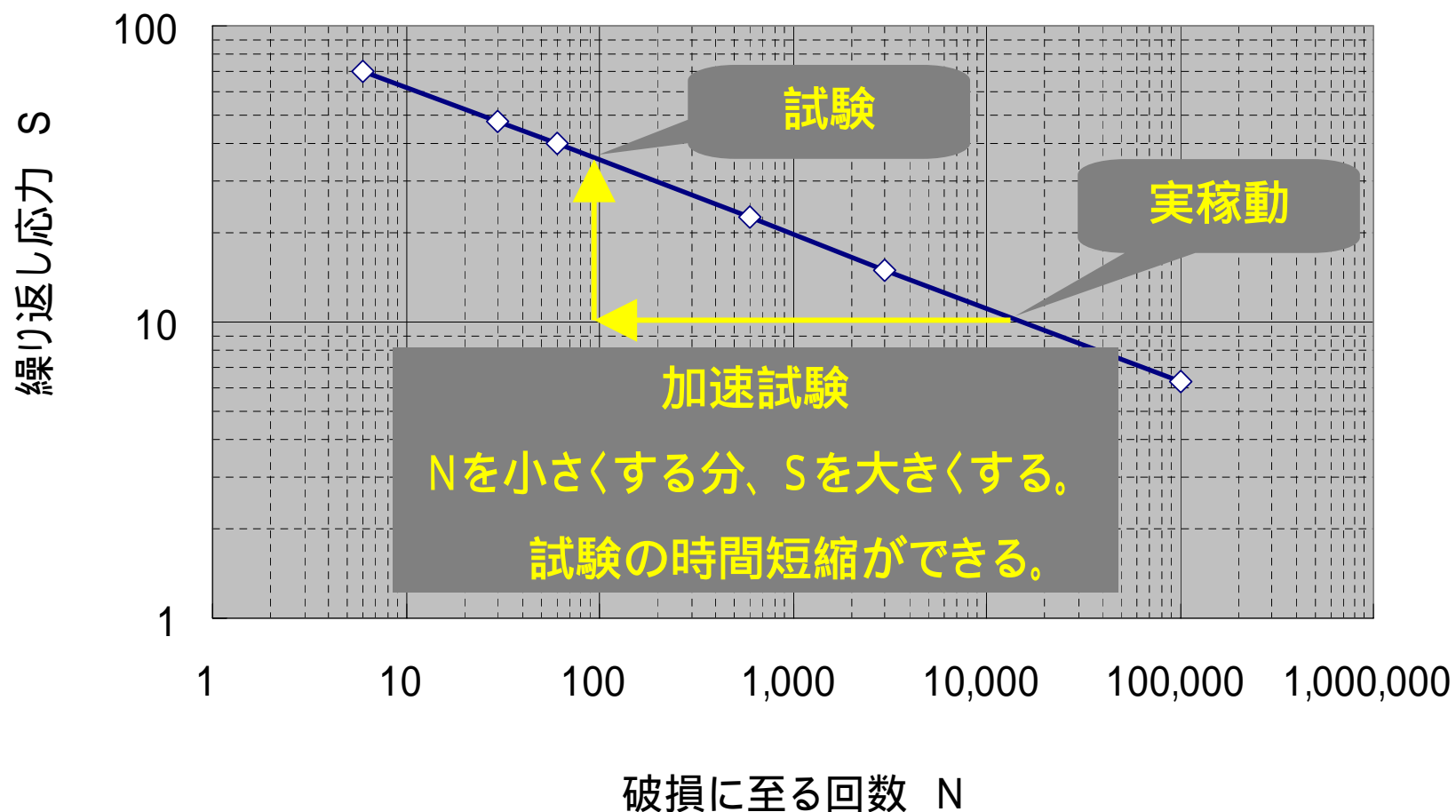


疲労試験とS-N曲線(加速試験)

実験結果

| | | | | | | | |
|---|----|----|----|-----|------|-----------------|-----------------|
| S | 70 | 48 | 40 | 23 | 15 | 6.3 | 3.6 |
| N | 6 | 30 | 60 | 600 | 3000 | 10 ⁴ | 10 ⁵ |

S-N曲線の模式図 (一般的な場合)

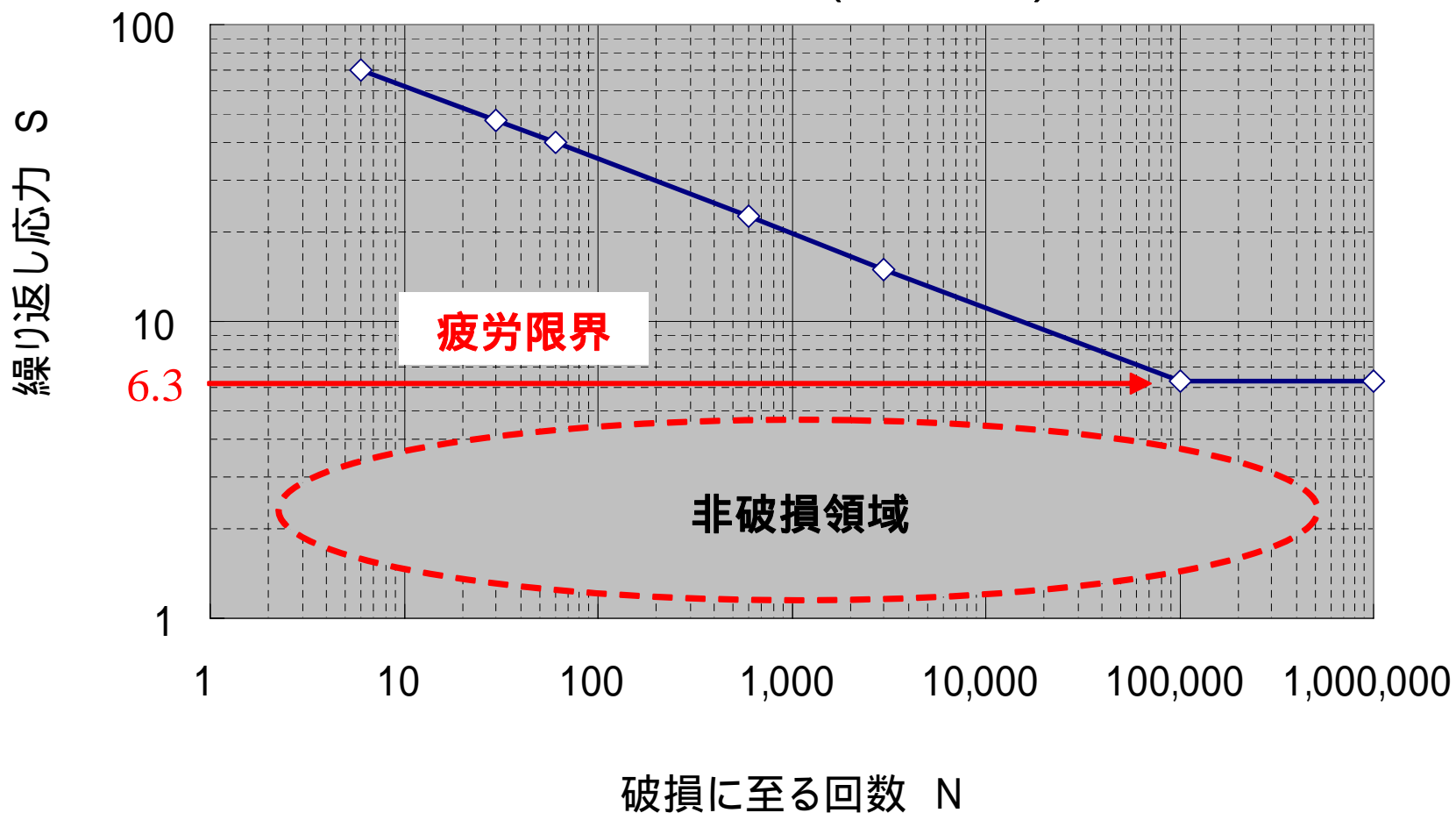


疲労試験とS-N曲線、疲労限度

実験結果

| | | | | | | | |
|---|----|----|----|-----|------|-----------------|-----------------|
| S | 70 | 48 | 40 | 23 | 15 | 6.3 | |
| N | 6 | 30 | 60 | 600 | 3000 | 10 ⁴ | 10 ⁵ |

S-N曲線の模式図 - 鋼(S45Cなど)の場合 -



低加速度データの取扱い指針

指針 1 : 削除する基準

- ・ S-N曲線の疲労限度(下限値)以下を削除する。

机上の空論 (疲労限度、伝達率が特定できない。)

- ・ 蓄積疲労スペクトル(AFS)にて判断

全AFSに対する低加速度AFSの割合が小さければ削除可能。

指針 2 : S-N曲線の加速係数m

- ・ 加速係数mが小さい 低加速度の影響が大きい。
大きい 影響が小さい。

指針 3 : 伝達率に注目

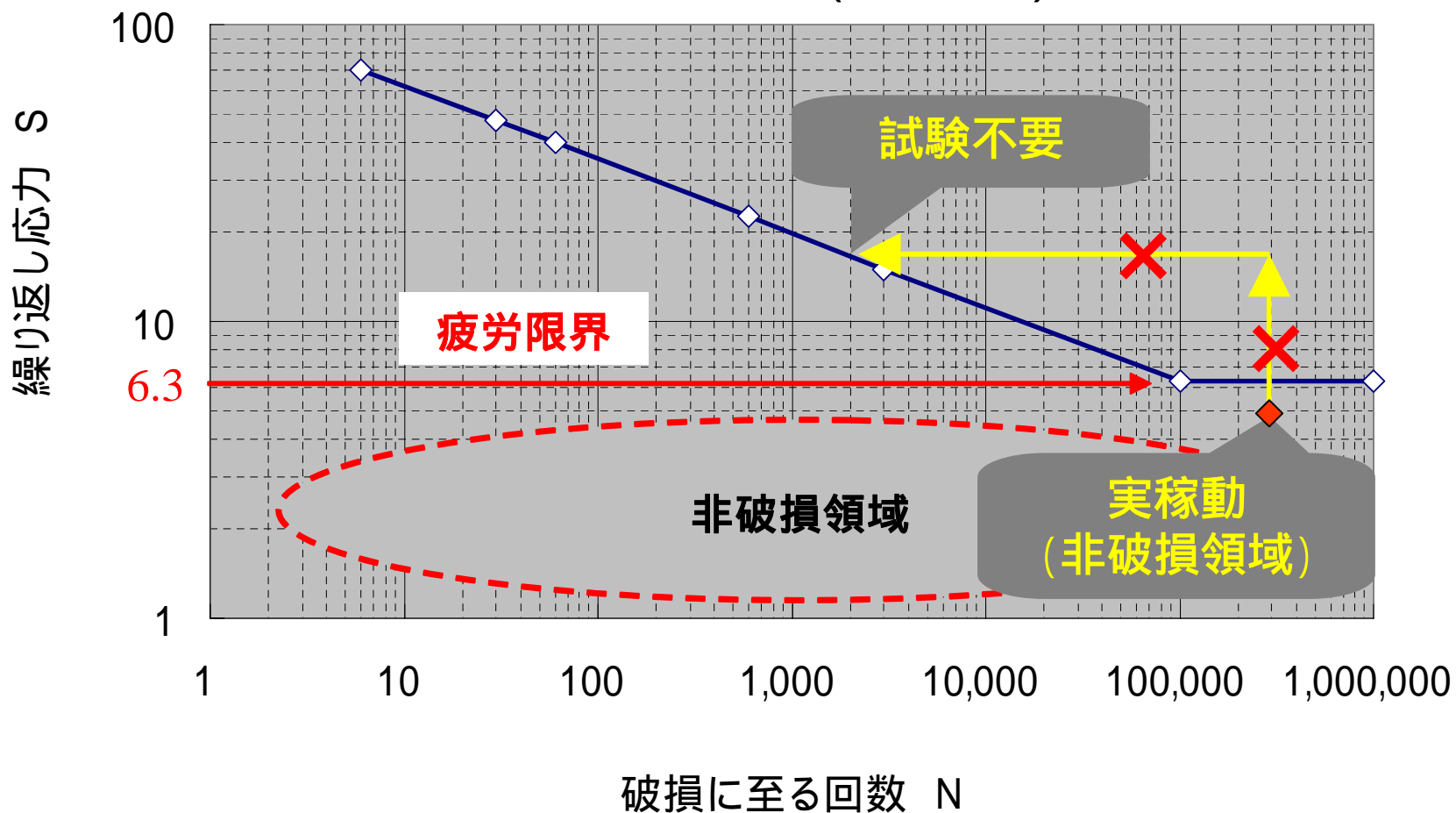
- ・ 試料によっては、低加速度と高加速度で共振点が異なる。

疲労試験とS-N曲線、疲労限度

実験結果

| | | | | | | | |
|---|----|----|----|-----|------|-----------------|-----------------|
| S | 70 | 48 | 40 | 23 | 15 | 6.3 | |
| N | 6 | 30 | 60 | 600 | 3000 | 10 ⁴ | 10 ⁵ |

S-N曲線の模式図 - 鋼(S45Cなど)の場合 -



要注意:

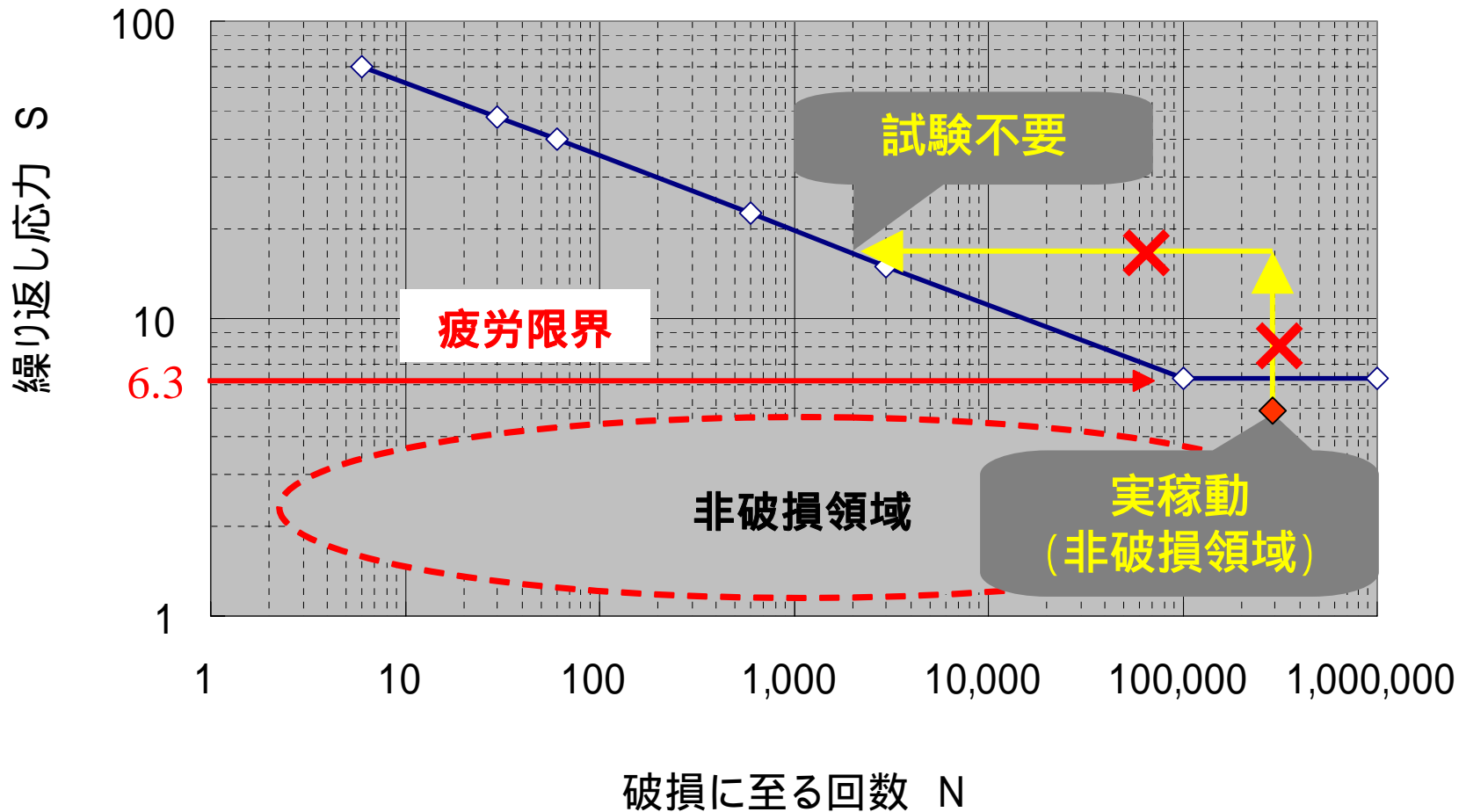
発生応力 < 疲労限度 (応力下限値)

試験不要 (データ削除)

発生回数 > 疲労限度 (回数: 10^5 or 10^6)

関係なし (試験必要)

S-N曲線の模式図 - 鋼 (S45Cなど) の場合 -



疲労試験とS-N曲線

S-N曲線の紹介 (1)

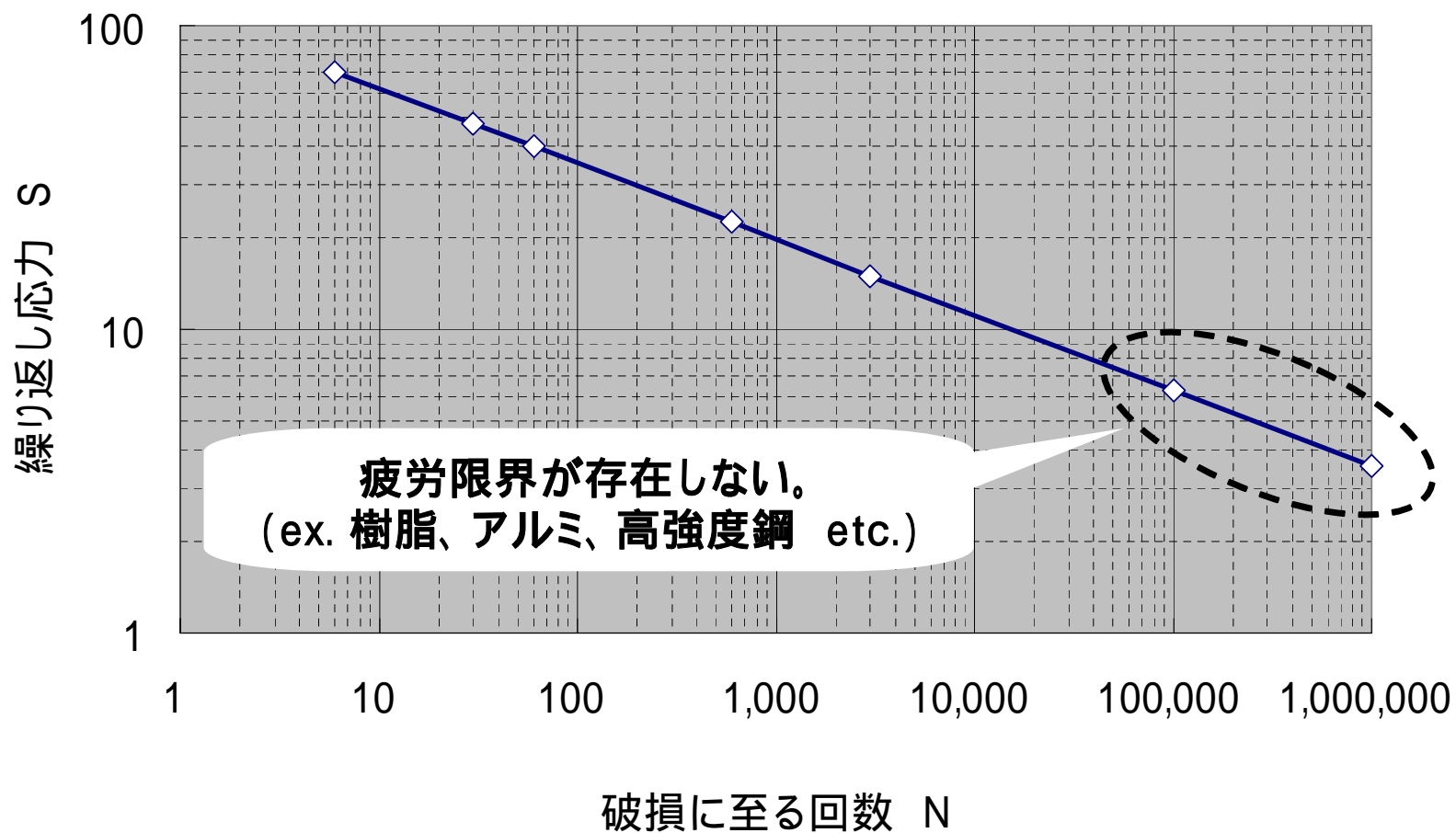
鉄鋼 (S45C) の疲労限度

疲労試験と S-N 曲線、疲労限度

実験結果

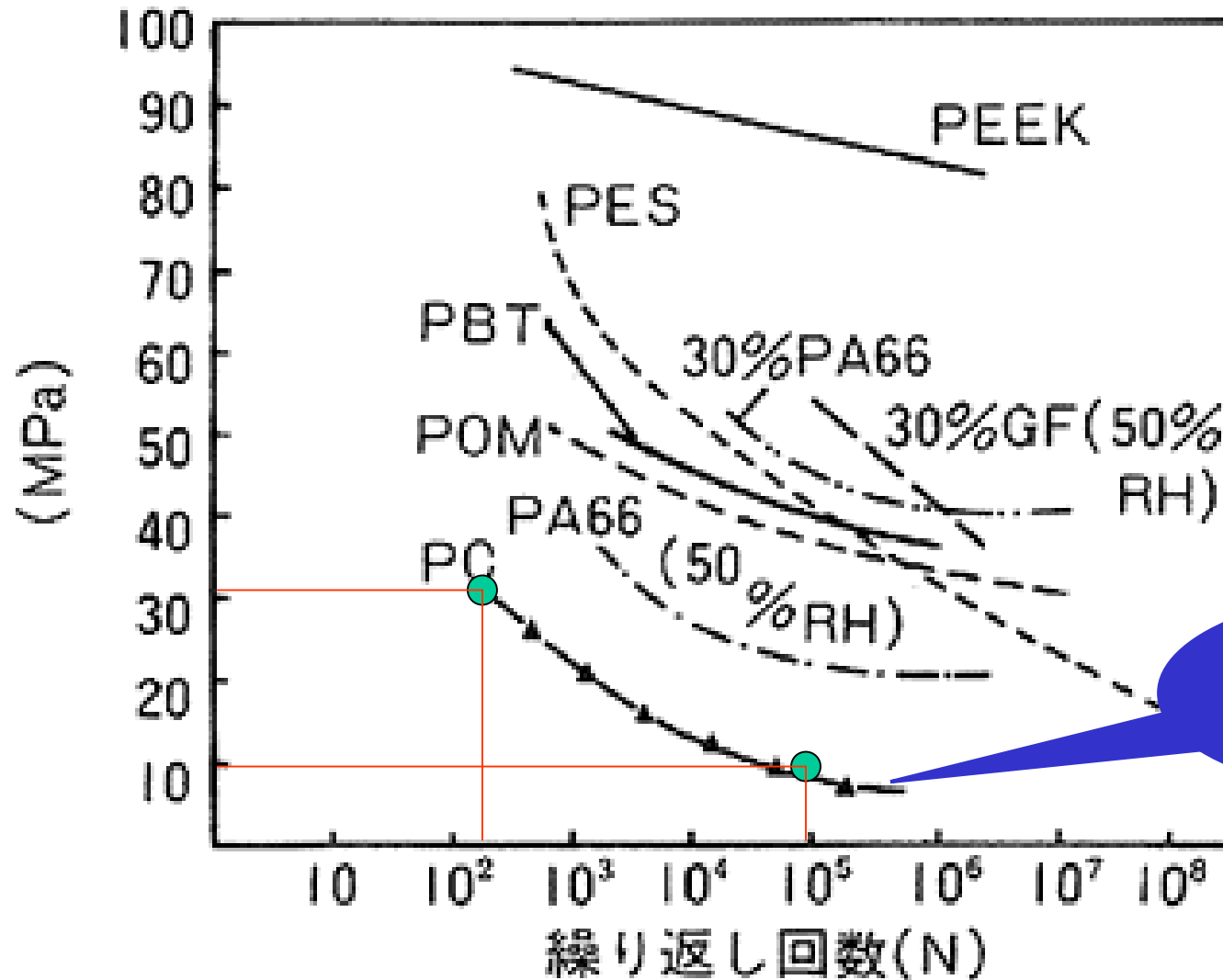
| | | | | | | | |
|---|----|----|----|-----|------|--------|--------|
| S | 70 | 48 | 40 | 23 | 15 | 6.3 | 3.6 |
| N | 6 | 30 | 60 | 600 | 3000 | 10^4 | 10^5 |

S-N 曲線の模式図



疲労試験とS-N曲線

S-N曲線の紹介 (1)



エンジニアリング
プラスチックの
S-N曲線

加速係数 m
5.7

疲労試験

振動試験

疲労試験により、

損傷が現れる限界の

S: Stress(応力) と N: Number(回数) の関係
を表した曲線(S-N曲線)が得られます。



一般的に、S G、N T に置換されます。

もっと、丁寧に論理を進めてみましょう！

振動試験では、

損傷が現れる振動条件

G: 振動加速度 と T: 加振時間 の関係
が必要です。 (試験時間短縮に利用)

疲労試験

振動試験

フィールド振動

貨物の底面
(トラックの荷台)

G_{F1} が N_{F1} 回 発生

G_{F2} が N_{F2} 回 発生

伝達率 

内部製品の部位A
の振動

G_{F1} 、 G_{F2} 、...



応力

$F1$ 、 $F2$ 、...

疲労試験

振動試験

フィールド振動

振動試験

貨物の底面
(トラックの荷台)

G_{F1} が N_{F1} 回 発生

G_{T1} を N_{T1} 回 加振

G_{F2} が N_{F2} 回 発生

G_{T2} を N_{T2} 回 加振

伝達率

内部製品の部位A
の振動

G_{F1} 、 G_{F2} 、...

G_{T1} 、 G_{T2} 、...

応力

$F1$ 、 $F2$ 、...

$T1$ 、 $T2$ 、...

S - N 曲線を活用

疲労試験

振動試験

フィールド振動

振動試験

貨物の底面 **0.1g** G_{F1} が N_{F1} 回 発生
(トラックの荷台) **0.3g** G_{F2} が N_{F2} 回 発生
10万回
3万回

0.2g G_{T1} を N_{T1} 回 加振
6250回
0.6g G_{T2} を N_{T2} 回 加振
1875回

伝達率



1.5倍



1.5倍

内部製品の部位A
の振動

0.15g **0.45g**
 G_{F1} 、 G_{F2} 、...

0.3g **0.9g**
 G_{T1} 、 G_{T2} 、...

$F=ma$ 、 $F=A$



応力

$F1$ 、 $F2$ 、...
1.5MPa **4.5MPa**

$T1$ 、 $T2$ 、...
3MPa **9MPa**

S - N 曲線を活用

加速係数 $m=4$ とすると、「応力を2倍 回数は1/16」が成立！

疲労試験

振動試験

フィールド振動

振動試験

貨物の底面 (トラックの荷台) **0.1g** G_{F1} が N_{F1} 回発生
10万回
0.3g G_{F2} が N_{F2} 回発生
3万回

~~0.2g~~ G_{T1} を N_{T1} 回加振
~~6750回~~
~~0.6g~~ G_{T2} を N_{T2} 回加振
1875回

伝達率



1.5倍



1.5倍

内部製品の部位A
の振動 **0.15g** G_{F1} 、**0.45g** G_{F2} 、...

~~0.3g~~ G_{T1} 、**0.9g** G_{T2} 、...

$F=ma$ 、 $F=A$



応力

~~1.5MPa~~ F_{F1} 、**4.5MPa** F_{F2} 、...



~~3MPa~~ F_{T1} 、**9MPa** F_{T2} 、...

例えば、

F_{F1} が疲労限度以下なら...?

S - N 曲線を活用

加速係数 $m=4$ とすると、「応力を2倍 回数は1/16」が成立!

低加速度データの取扱い指針

指針 1 : 削除する基準

- ・ S-N曲線の疲労限度 (下限値) 以下を削除する。

~~机上の空論 (疲労限度、伝達率が特定できない。)~~

- ・ 蓄積疲労スペクトル (AFS) にて判断

全AFSに対する低加速度AFSの割合が小さければ削除可能。

指針 2 : S-N曲線の加速係数 m

- ・ 加速係数 m が小さい 低加速度の影響が大きい。

大きい 影響が小さい。

指針 3 : 伝達率に注目

- ・ 試料によっては、低加速度と高加速度で共振点が異なる。

疲労試験

振動試験

フィールド振動

振動試験

貨物の底面
(トラックの荷台)

$G_F(f)$ が $N_F(f)$ 回 発生

$G_T(f)$ を $N_T(f)$ 回 加振

伝達率

$\downarrow Tr_{FA}(f), Tr_{FB}(f) \dots \downarrow Tr_{TA}(f), Tr_{TB}(f) \dots$

内部製品の各部位 A, B, ...
の振動

$G_{FA}(f), G_{FB}(f) \dots$

$G_{TA}(f), G_{TB}(f) \dots$

応力

$F_A(f), F_B(f) \dots$

$T_A(f), T_B(f) \dots$

伝達率は、
振動数、部位によって
大きく異なる。

S - N 曲線を活用

蓄積疲労スペクトルを用いることにより、問題解消！

蓄積疲労の定義 (新システム)

マイナー則

破損の発生条件は $\sum_{i=1,2,\dots} \frac{n_i}{N_i} = 1$

S - N 曲線

$$N_i \times S_i = c \quad (= \text{一定}) \quad \text{for } i=1,2,\dots$$

i と S_i を次式とすると、 $n_i \times S_i^\alpha = \beta$ となり、破損条件は $\sum_{i=1,2,\dots} \frac{n_i}{N_i} = \frac{\beta}{\beta_c}$ となる。

このを
“蓄積疲労”と
呼ぶ

S_i : 負荷 n_i : 負荷の回数 N_i : 破損に至る「負荷の回数」
蓄積疲労 c : 許容蓄積疲労

蓄積疲労スペクトルの定義

狭帯域ランダム振動ピーク値の確率密度関数

$$f_{\text{Rayleigh}}(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$

負荷回数 N に相当

狭帯域ランダム振動の蓄積疲労

S に相当

$$\beta = (f_0 \cdot T) \times \left\{ \int_0^{\infty} x^\alpha \cdot f_{\text{Rayleigh}}(x) dx \right\} = f_0 T (\sqrt{2}\sigma)^\alpha \times \Gamma\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)$$

狭帯域から広帯域へ拡張

蓄積疲労スペクトル

$$\beta(f) = f \cdot T \left\{ 2 \times \text{PSD}(f) \right\}^{\frac{\alpha}{2}} \times \Gamma\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)$$

x : 加速度 (応答値)

σ : x の標準偏差

f_0 : 周波数

T : 加振時間

β : 蓄積疲労

$\text{PSD}(f)$: パワースペクトル密度

振動試験の問題点

4. 疲労試験と振動試験の相違点

材料単体

構造体(周波数特性がある)



(解決方法) 蓄積疲労システムでは・・・

「蓄積疲労スペクトル」
を考案！



周波数ごとの蓄積疲労
が評価可能になる。

蓄積疲労振動による試験条件の導出 (供試品)



実際のDVDプレーヤー



供試品として用いた
DVDプレーヤー入り段ボール貨物

蓄積疲労振動による試験条件の導出 (Phase 1)

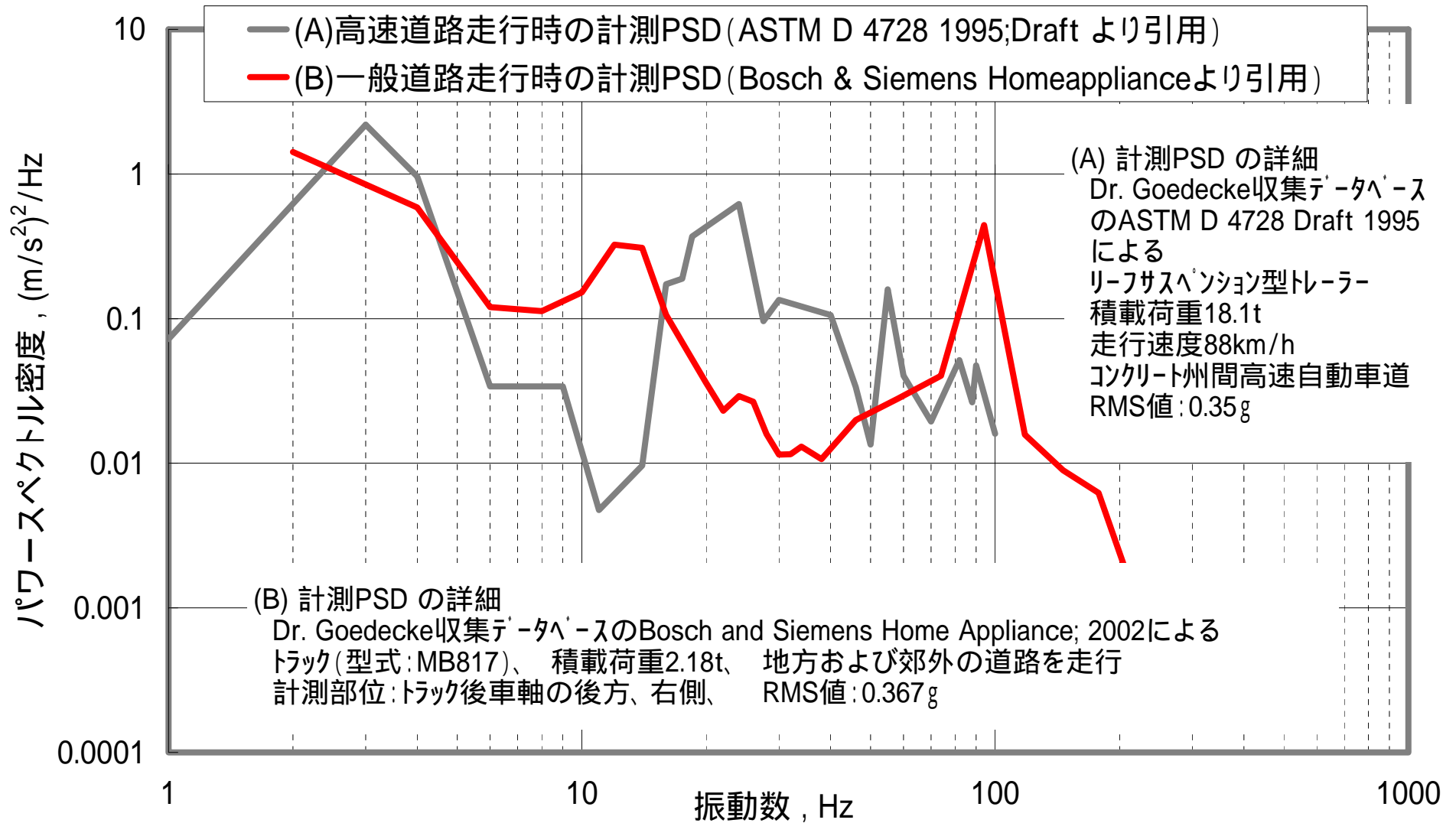


図2 輸送シナリオ作成に用いたフィールド振動データ ((A)高速道路、(B)一般道路)

蓄積疲労振動による試験条件の導出 (Phase 1)

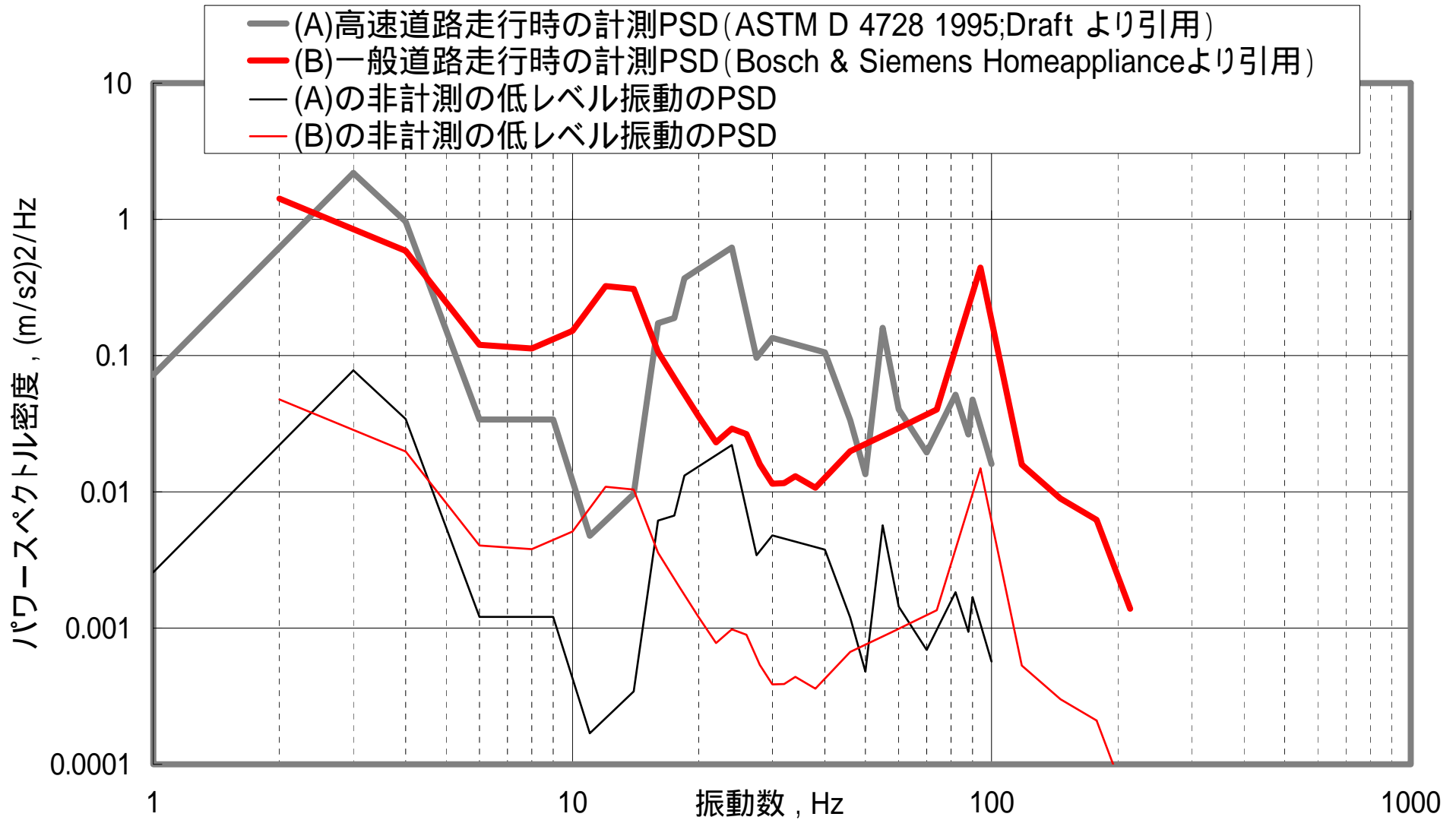


図2 輸送シナリオ作成に用いたフィールド振動データ ((A)高速道路、(B)一般道路)

蓄積疲労振動による試験条件の導出 (Phase 2)

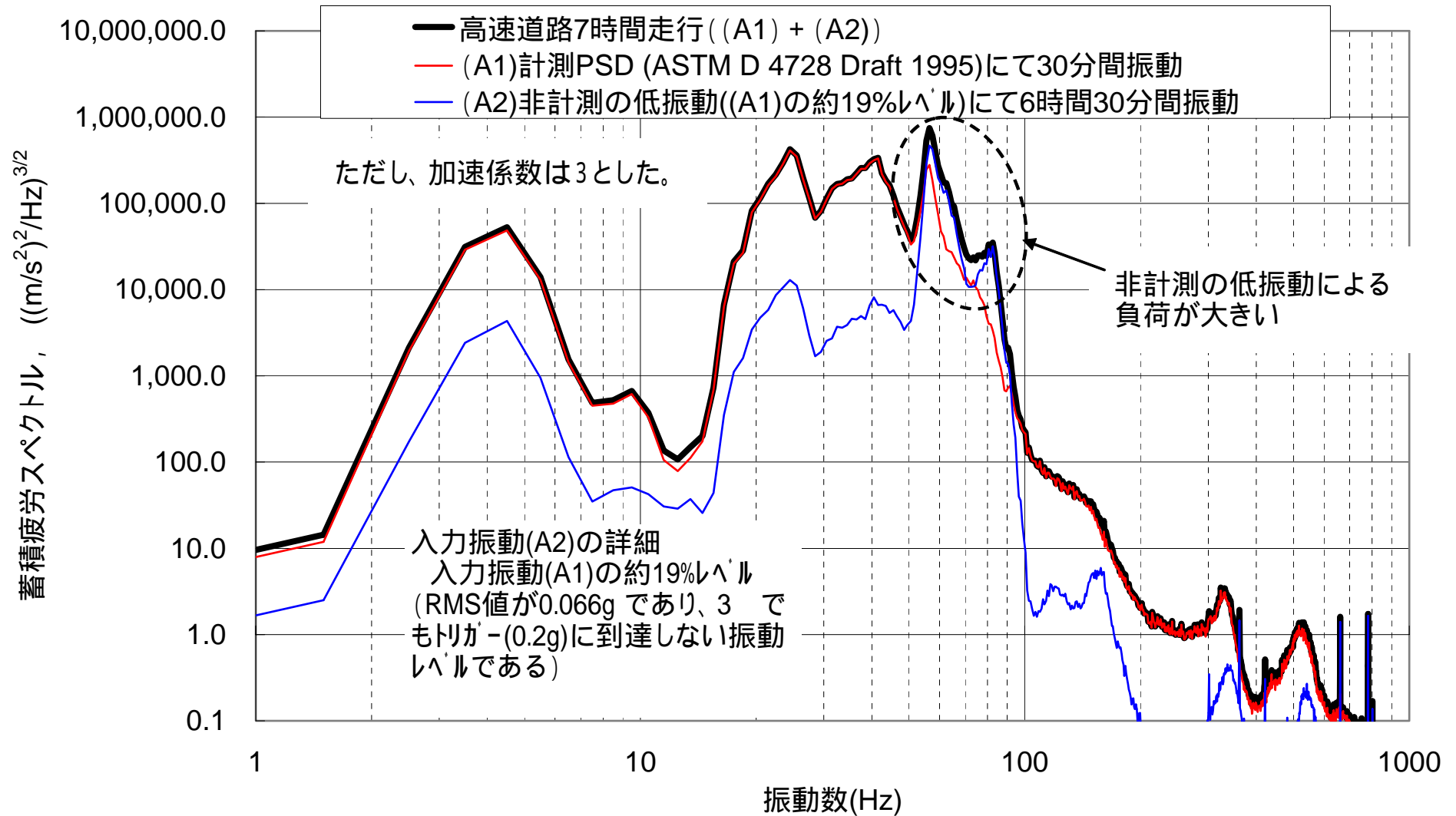


図3(a) 高速道路7時間走行によるDVDプレーヤーの蓄積疲労スペクトル

蓄積疲労振動による試験条件の導出 (Phase 2)

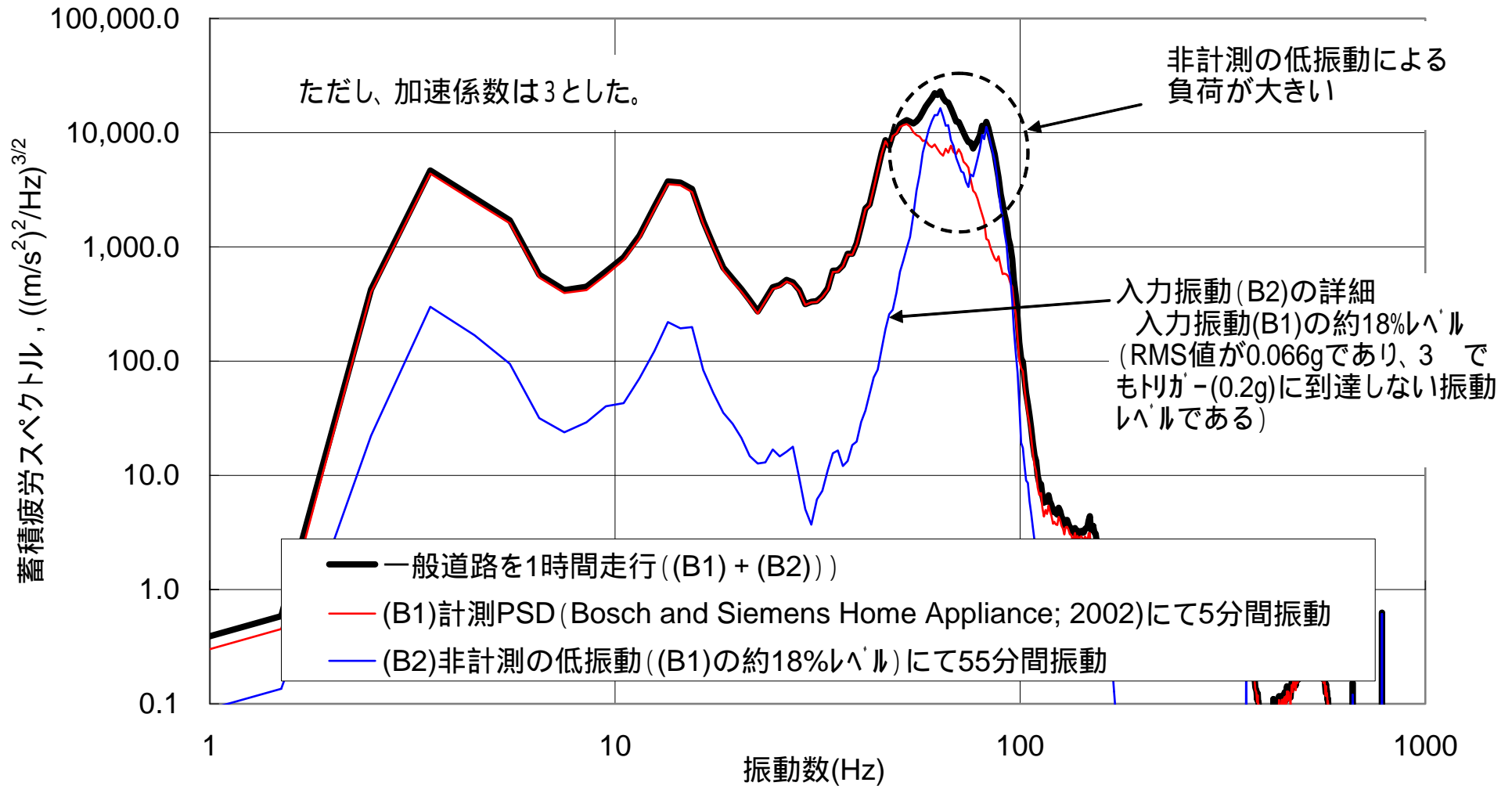


図3(b) 一般道路1時間走行によるDVDプレーヤーの蓄積疲労スペクトル

低加速度データの取扱い指針

指針 1 : 削除する基準

- ・ S-N曲線の疲労限度(下限値)以下を削除する。
机上の空論 (疲労限度、伝達率が特定できない。)
- ・ 蓄積疲労スペクトル(AFS)にて判断
全AFSに対する低加速度AFSの割合が小さければ削除可能。

指針 2 : S-N曲線の加速係数 m

- ・ 加速係数 m が小さい 低加速度の影響が大きい。
大きい 影響が小さい。

指針 3 : 伝達率に注目

- ・ 試料によっては、低加速度と高加速度で共振点が異なる。

蓄積疲労振動による試験条件の導出(分析・解析)

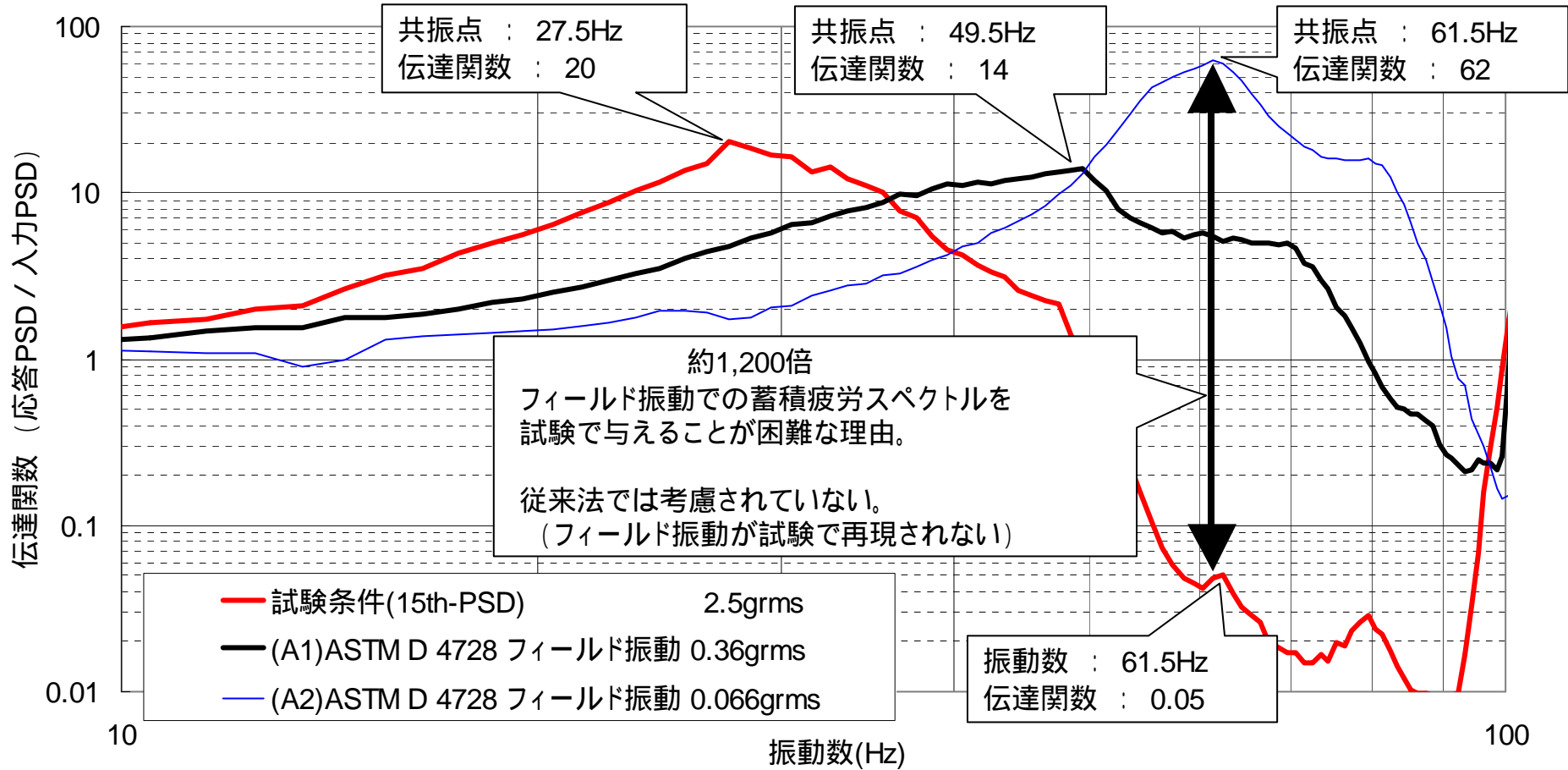


図6 次世代振動試験条件の高周波(60~90Hz)が強い理由についての検討
入力振動(振動台PSD)に対する応答振動(DVDプレーヤー左奥下部PSD)の伝達関数

低加速度データの取扱い指針

指針 1 : 削除する基準

- ・ S-N曲線の疲労限度(下限値)以下を削除する。
机上の空論 (疲労限度、伝達率が特定できない。)
- ・ 蓄積疲労スペクトル(AFS)にて判断
全AFSに対する低加速度AFSの割合が小さければ削除可能。

指針 2 : S-N曲線の加速係数 m

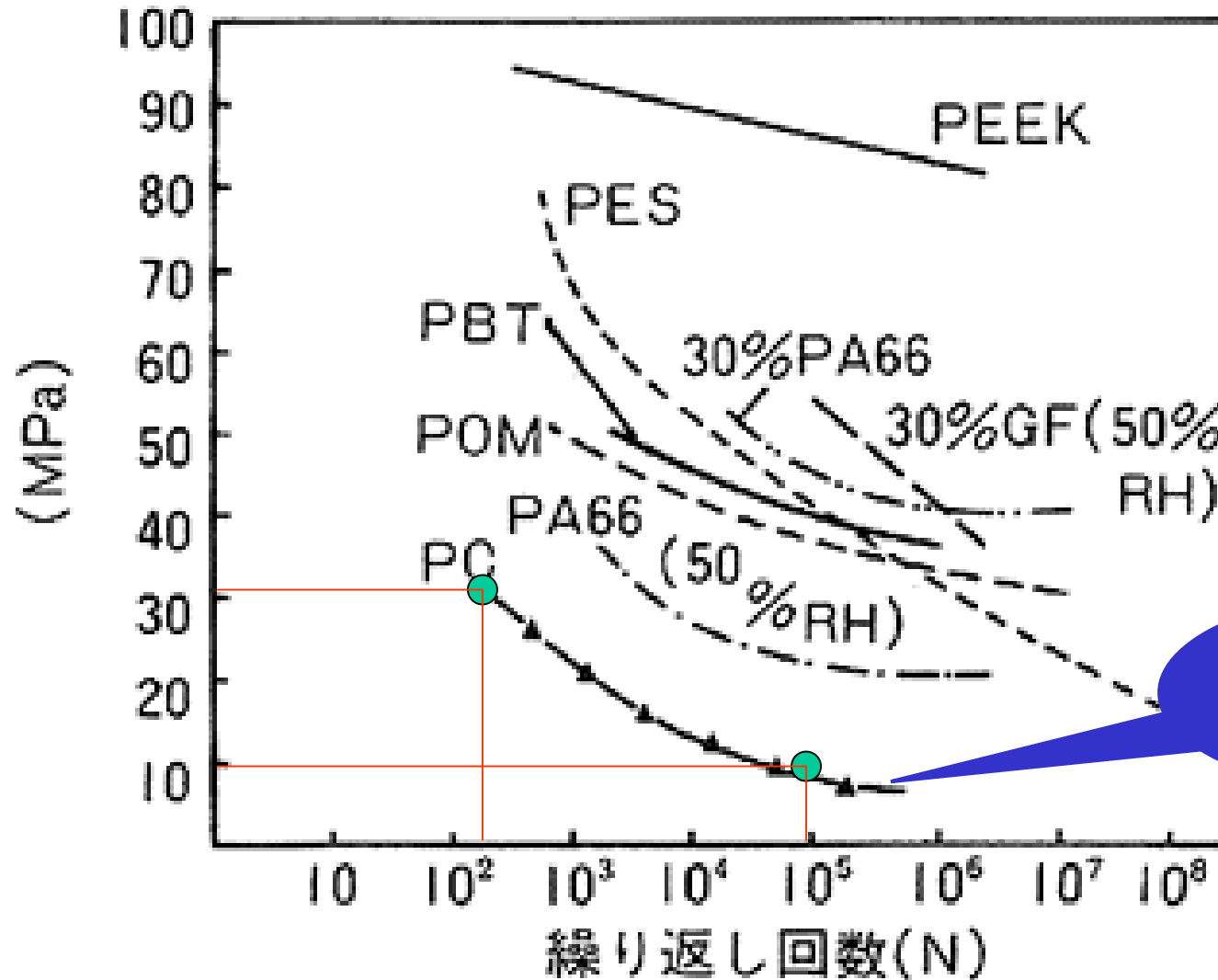
- ・ 加速係数 m が小さい 低加速度の影響が大きい。
大きい 影響が小さい。

指針 3 : 伝達率に注目

- ・ 試料によっては、低加速度と高加速度で共振点が異なる。

2. 蓄積疲労の指標化

S - N 曲線の紹介 (1)



エンジニアリング
プラスチックの
S - N 曲線

加速係数 m
5.7

2. 蓄積疲労の指標化

S - N 曲線の紹介 (1)

PC

(エンジニアリングプラスチック)

加速係数 $m = 5.7$

(30MPa, 2×10^2 回)、(10MPa, 10^5 回)

2. 蓄積疲労の指標化

S - N 曲線の紹介 (2)

S 4 5 C

(機械構造用炭素鋼)

初期損傷なし: $m=7.6$

(350MPa, 2×10^5 回)、(520MPa, 10^4 回)

初期損傷あり: $m=4.6$

(120MPa, 2×10^6 回)、(500MPa, 3×10^3 回)

2. 蓄積疲労の指標化

S - N 曲線の紹介 (3)

軽水炉環境中の 炭素鋼のS-N曲線

大気中: $m=7.6$

(0.73%, 2×10^3 回)、(0.3%, 1.4×10^4 回)

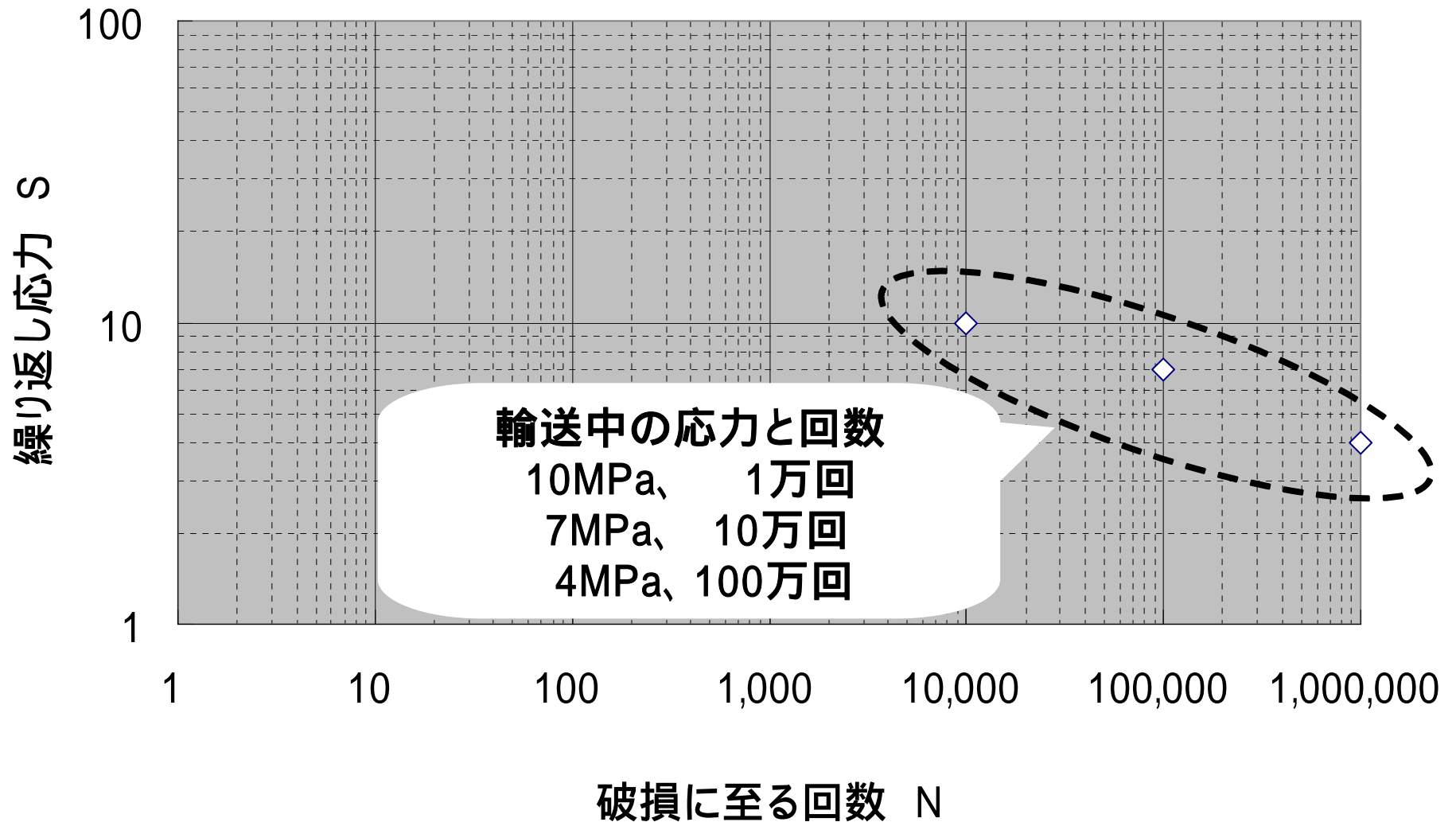
軽水炉環境中: $m=3.8$

(0.3%, 700回)、(0.5%, 100回)

2. 蓄積疲労の指標化

加速係数 m の設定基準は・・・？

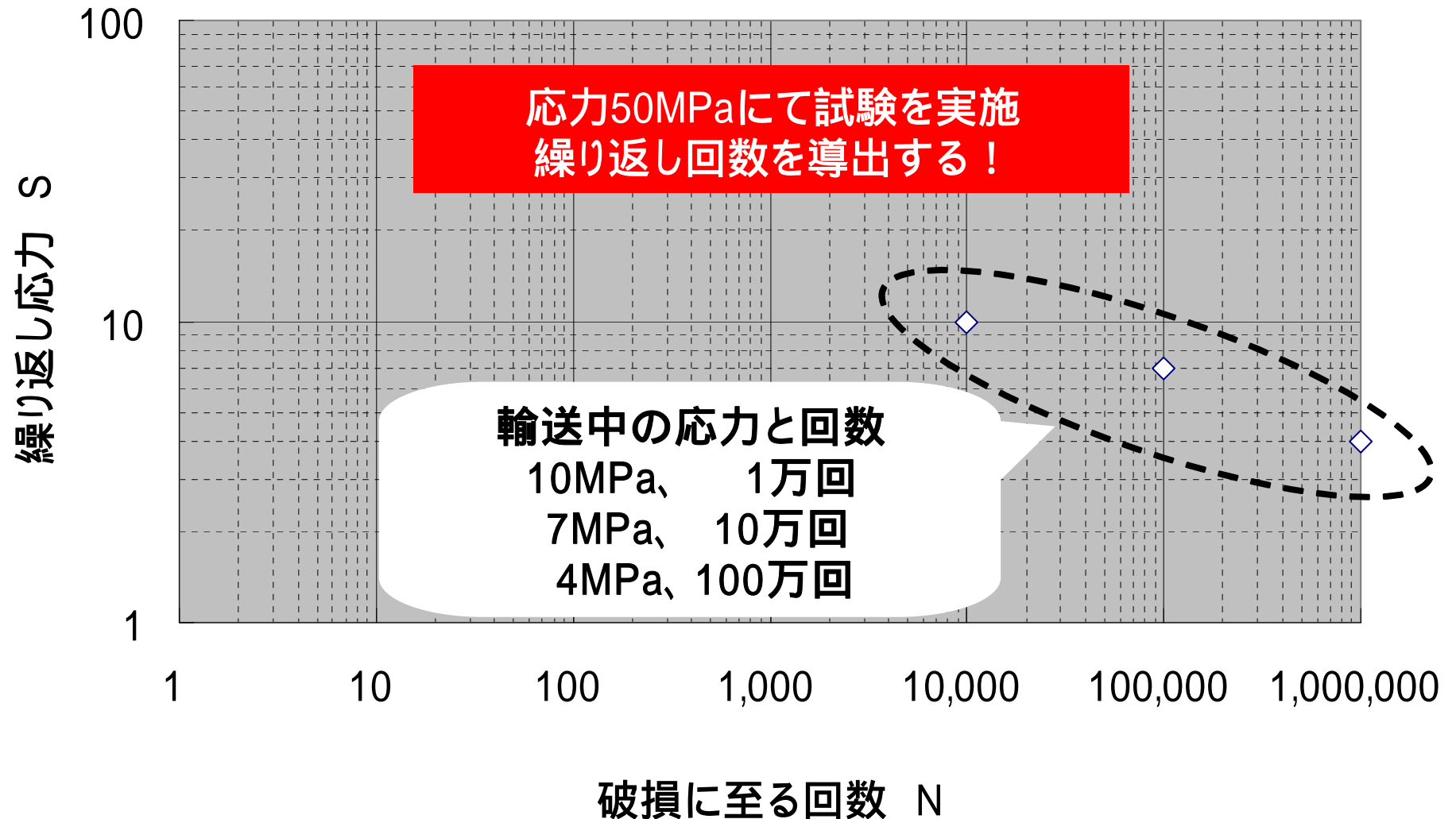
S-N曲線による試験条件の導出(模式図)



2. 蓄積疲労の指標化

加速係数 m の設定基準は・・・？

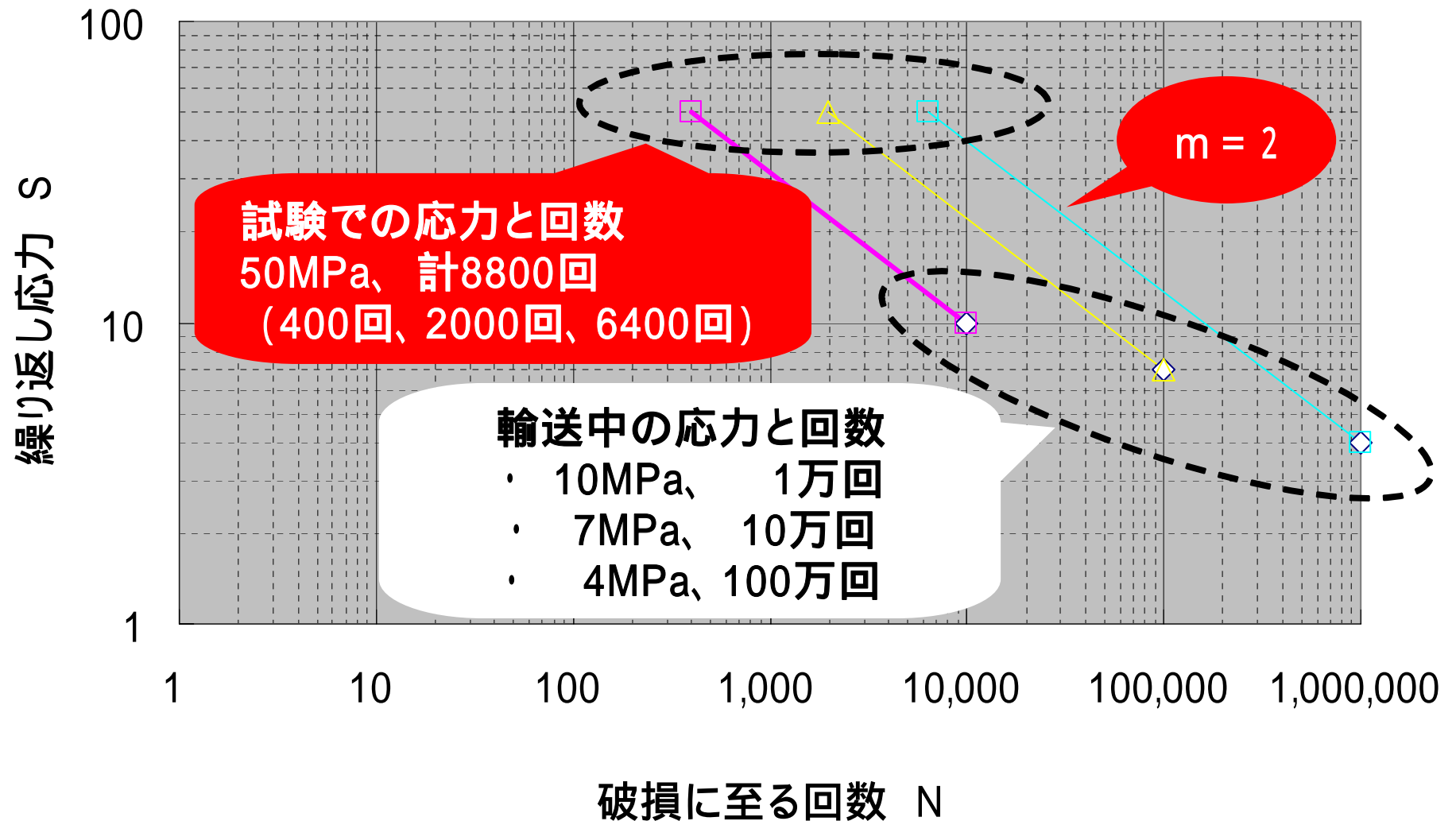
S-N曲線による試験条件の導出(模式図)



2. 蓄積疲労の指標化

加速係数 m の設定基準は・・・？

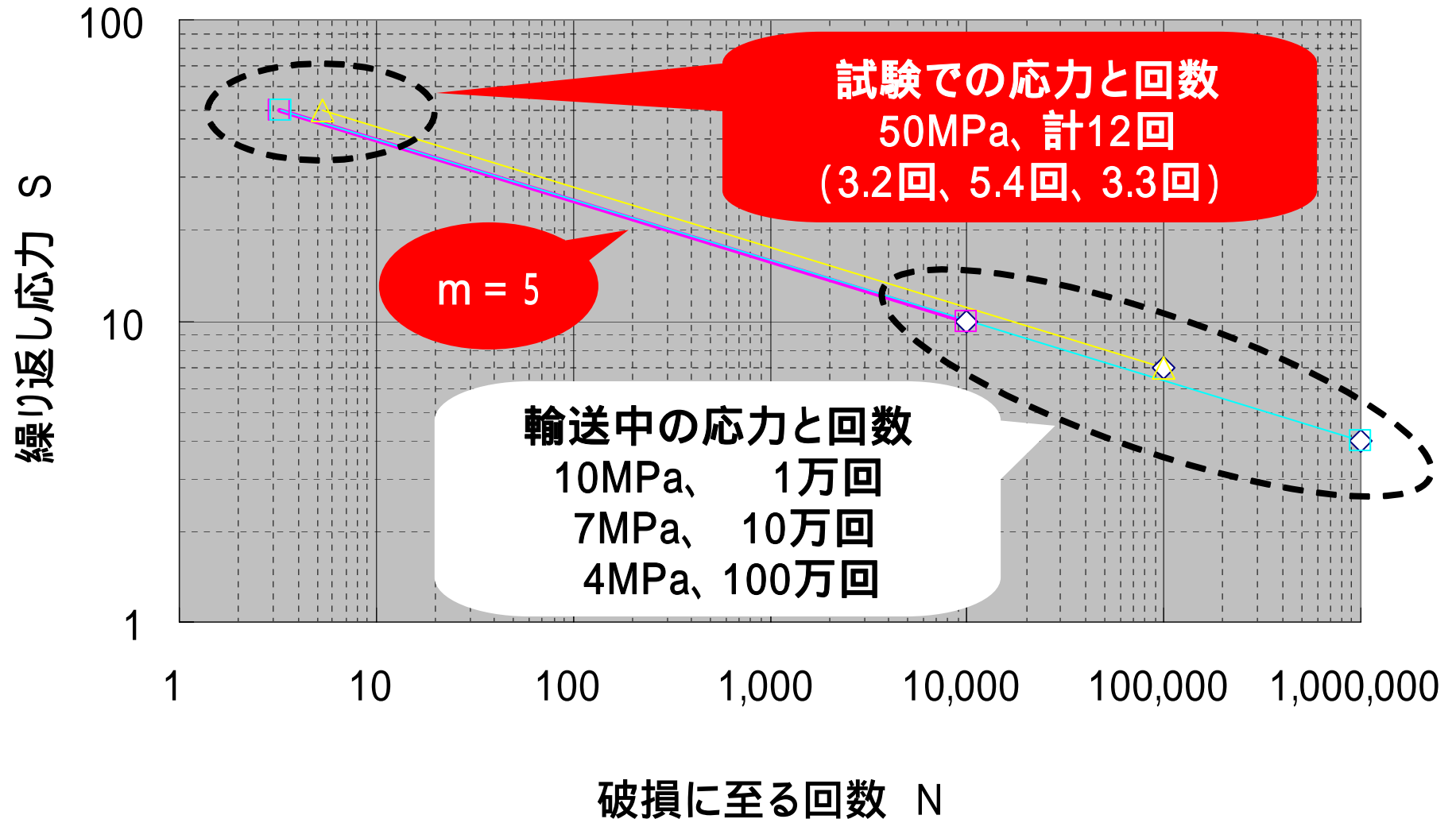
S-N曲線による試験条件の導出(模式図)



2. 蓄積疲労の指標化

加速係数 m の設定基準は・・・？

S-N曲線による試験条件の導出(模式図)



2. 蓄積疲労の指標化

加速係数 m の設定基準は... ?

S-N曲線による試験条件の導出 (模式図)

