

# H3ロケットの開発状況について

## 1. 開発状況

- **開発中のH3ロケット**について、2020年5月に実施した試験において、最大の開発項目である**LE-9エンジン**に**2つの課題が生じた**ため（下記2.）、同ロケット**試験機初号機打ち上げを2020年度から2021年度に延期していたところ**（2020年9月）。
- **2020年に把握した課題については概ね解決の見通しがたった**が、その後、ターボポンプにフラッタ\*等の振動に関する課題が確認されており、**今後実施する試験のデータを評価し、以降の開発計画を設定する必要がある。**
  - \*フラッタ…翼やタービンディスクと、そのまわりを流れる流体とが連成して生じる自励振動
- このため、**今年度に予定している試験機初号機打ち上げを見合わせ（1月21日にJAXAより公表）。**
- **新たな打ち上げ時期については、今後の開発の進捗を慎重に見極めたうえで、改めて設定。**

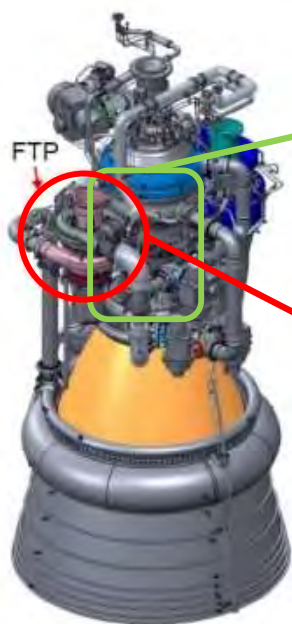
## 2. 不具合への対応状況

<不具合①：燃焼室内壁の開口> **【対応策を確立】**

- 状況：**冷却溝に至る開口を確認**
- 原因：試験データの評価とシミュレーション等により、**定常燃焼中に壁面に繰り返し高温の温度サイクルが負荷されることにより一定方向の塑性変形が累積し、最終的に開口に至ったと推定。**
- 対応策：  
壁面の変形が有意に進行しない**壁温の上限（約1100 K）以下で作動させる対応策を確立。**

<不具合②：FTPタービンの疲労> **【引き続き対応が必要】**

- 状況：**FTPの第2段動翼の一部に疲労破面を確認**
  - 原因：**翼振動計測試験を実施し、疲労が蓄積・進行した原因と推定される共振モードを特定。**
  - 対応策：
    - ・全翼の設計変更等により、**疲労破面の原因である共振を回避**
    - ・一方で、翼振動計測試験において、**第1段タービンディスク部のフラッタ等の振動に関する課題を確認したため（OTPにも同様に一部追加対策が必要）、複数の対応策を具体化中**
- 案1：タービンのディスク形状の見直しによる対応      案2：タービン羽根の設計変更を伴う対応



燃焼室内壁の開口の様子



第2段動翼



第1段ディスク

液体水素ターボポンプ断面図

**今後実施する試験のデータを評価し、以降の開発計画を設定。**



(参考資料)

H3ロケット試験機初号機の今年度打ち上げの  
見合わせ発表時(R4年1月21日)のJAXA資料

## H3ロケット第1段エンジン(LE-9)の 開発状況について

# LE-9エンジンの開発状況

- LE-9エンジンについては、認定燃焼試験【注1】にて、2つの事象（燃焼室内壁の開口および液体水素ターボポンプ（FTP）タービンの疲労）が発生した（2020年5月）。

【注1】 認定燃焼試験（QT）：実際の打上げに用いるエンジンと同等設計・プロセスで製造した試験用エンジンによる機能・性能の確認および寿命実証を目的とした燃焼試験

- これらの事象への対応を確実にを行うため、開発計画を見直した。これにより、試験機1号機（TF1）の打上げ時期は2021年度、TF2は2022年度となる見込みとした（2020年9月）。

- 以降、翼振動計測試験【注2】および技術データ取得試験（エンジン燃焼試験）等を段階的に実施しつつ、現象の究明と対応策の具体化を進めてきた。

【注2】 ターボポンプを実作動させ、動翼に発生する歪を直接計測する試験

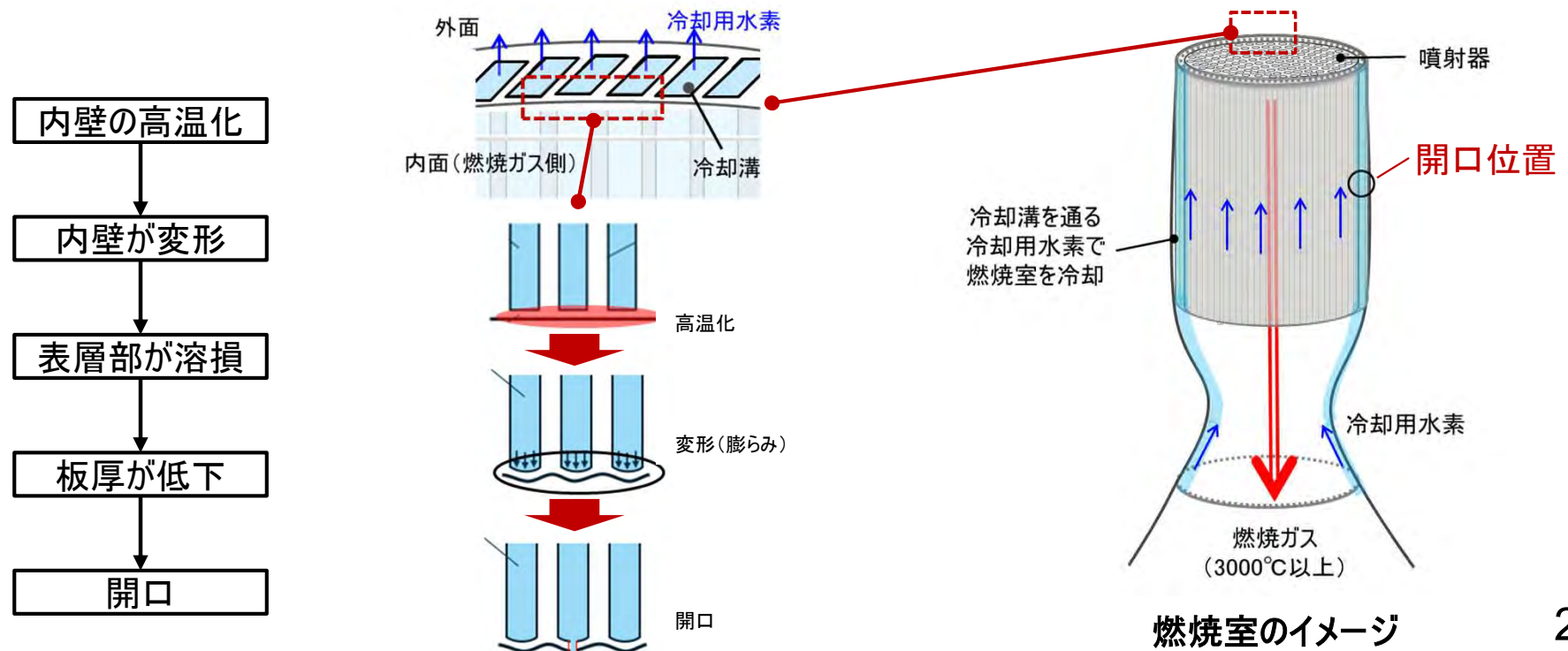
- 認定燃焼試験への移行には、対応策を反映したエンジン（ターボポンプ単体を含む）での試験検証を行うこととしている。現在、ターボポンプの設計確定に向け試験を進めているところ。

ターボポンプ： タンクから燃焼室に推進剤を供給する回転機器（エンジンの一部）  
ポンプとタービンで構成される

共振： 物体が外部の振動と同期してさらに大きく振動する現象  
疲労： 繰り返しの力を受け、物体の強度が低下する現象

## ■ 燃焼室内壁の開口

- 状況: **冷却溝に至る開口**を確認(溝方向に最大幅0.5mm X 長さ10mm程度、計14か所)。
- 原因: 実体の詳細調査および解析等による原因究明を実施。  
燃焼室内壁を**高温作動条件**で試験した際、**燃焼室内壁**が設計値以上に**高温化**。  
高温化の要因は、「**定常時の局所的な熱の流入**」または「**起動・停止過渡時の一時的な冷却不足**」と推定。
- 対応策: **冷却の強化、起動・停止パターンの見直し**等により、燃焼室内壁温度を低減。エンジン燃焼試験により**技術データを追加取得し、対応策の効果を検証**予定。



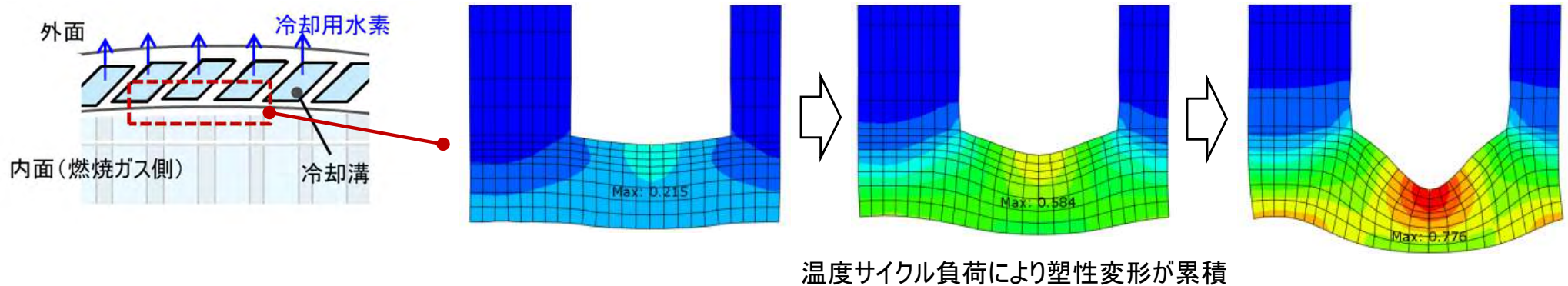
# 課題への対応状況（燃焼室内壁の開口）

## ■ 技術データ取得燃焼試験の状況

- 2020年11月より燃焼試験を実施し（計9回、1154秒）、様々な燃焼状態における**燃焼室内壁面直近の温度データ**を取得し、各試験後に**燃焼室内面の性状変化を観察**（認定燃焼試験での事象が**実際に発現**）。

## ■ 原因の絞り込み

- 試験データの評価とシミュレーション等により、「**定常燃焼中に壁面に繰り返し高温の温度サイクルが負荷されることにより一定方向の塑性変形が累積し、最終的に開口**」に至ったと推定。



## ■ 対応策

- 壁面の変形が有意に進行しない**壁温の上限（約1100K）以下で作動させる対応策を確立した**（試験機1号機で使用する機械加工噴射器は十分な余裕）。
- 試験機2号機以降で使用する**3D造型噴射器**については、**実証データを増すと同時に最終設計での機能・性能を検証するため、技術データ取得燃焼試験を追加実施する予定**。

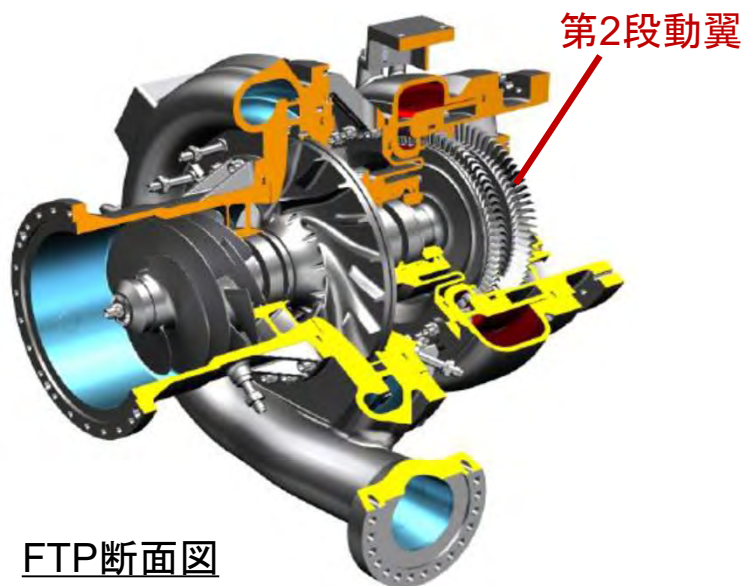
## ■ FTPタービンの疲労

- 状況: FTPの第2段動翼(タービンの一部)76枚中2枚に疲労破面を確認。
- 原因: 実体の詳細調査、解析、翼振動計測試験<sup>【注1】</sup>等による原因究明を実施。当初有意な影響があると評価したモード以外の共振により、疲労が蓄積・進行したためと推定。

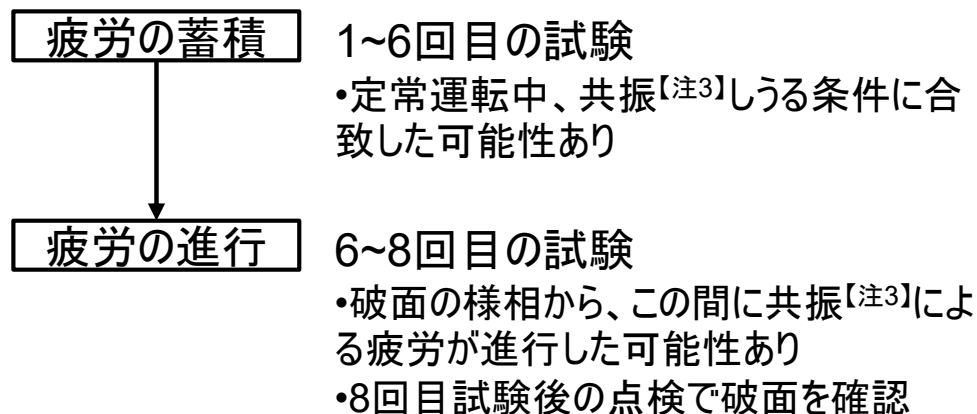
【注1】ターボポンプを実作動させ、動翼に発生する歪を直接計測する試験

- 対応策: 全ての構造固有値<sup>【注2】</sup>を運転領域から除外したタービンに設計変更(念のため、OTPについても極力同様の方針とし設計変更)。翼振動試験を実施し、対応策の効果を検証予定。

【注2】構造体がつ固有の共振周波数。形状、材質などで決まる。



FTP断面図



【注3】翼振動計測試験(2020年8月に実施)により確認された、当初有意な影響があると評価したモード以外の共振

# 課題への対応状況(FTPタービンの疲労)

## ■ 翼振動計測試験の状況

- ターボポンプの翼振動計測手法を新たに導入の上試験を実施し、**翼の振動応答レベルを直接計測**(単体試験に加えエンジン燃焼状態でも計測)
- 原因となった**共振モードの特定**および**対応策を検証**

## ■ 対応策の検証状況

### ● 液体水素ターボポンプ(FTP)

- 全翼の設計変更等により**翼列由来の共振**<sup>【注1】</sup>を回避し、翼振動計測試験にて**改善効果を確認**
  - » 翼振動計測試験において、**第1段タービンディスク部にフラッタ**<sup>【注2】</sup>の発生を認めたため、**複数の対応策を具体化中**

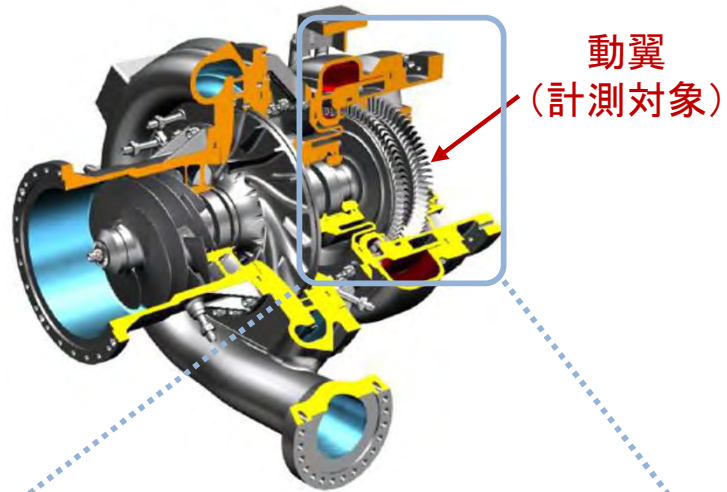
【注1】 2020年5月のFTPタービン疲労破面の主原因である、翼列の後流分布が励振源の共振

【注2】 構造物(ここでは翼やタービンディスク)とそのまわりを流れる流体とが連成して生じる自励振動

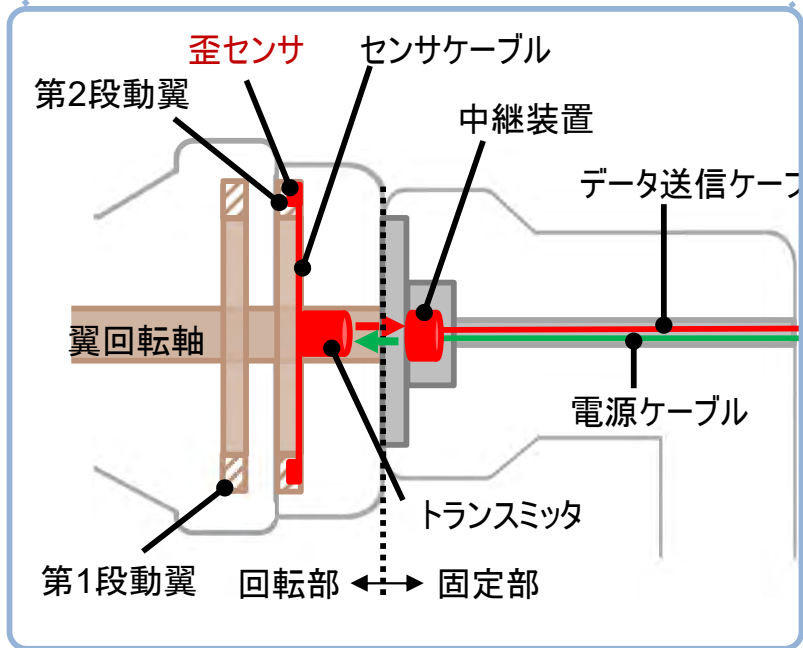
### ● 液体酸素ターボポンプ(OTP)

- FTPからの水平展開として、全翼の設計変更等により**翼列由来の共振**を極力回避し、翼振動計測試験にて**改善効果を確認**
  - » 翼振動計測試験により、対応すべき**振動応答**(課題として顕在化していない、タービン入口部の流れの不均一性等に起因すると推定)を新たに把握し、**複数の対応策を具体化中**

# 【参考】翼振動計測の概要

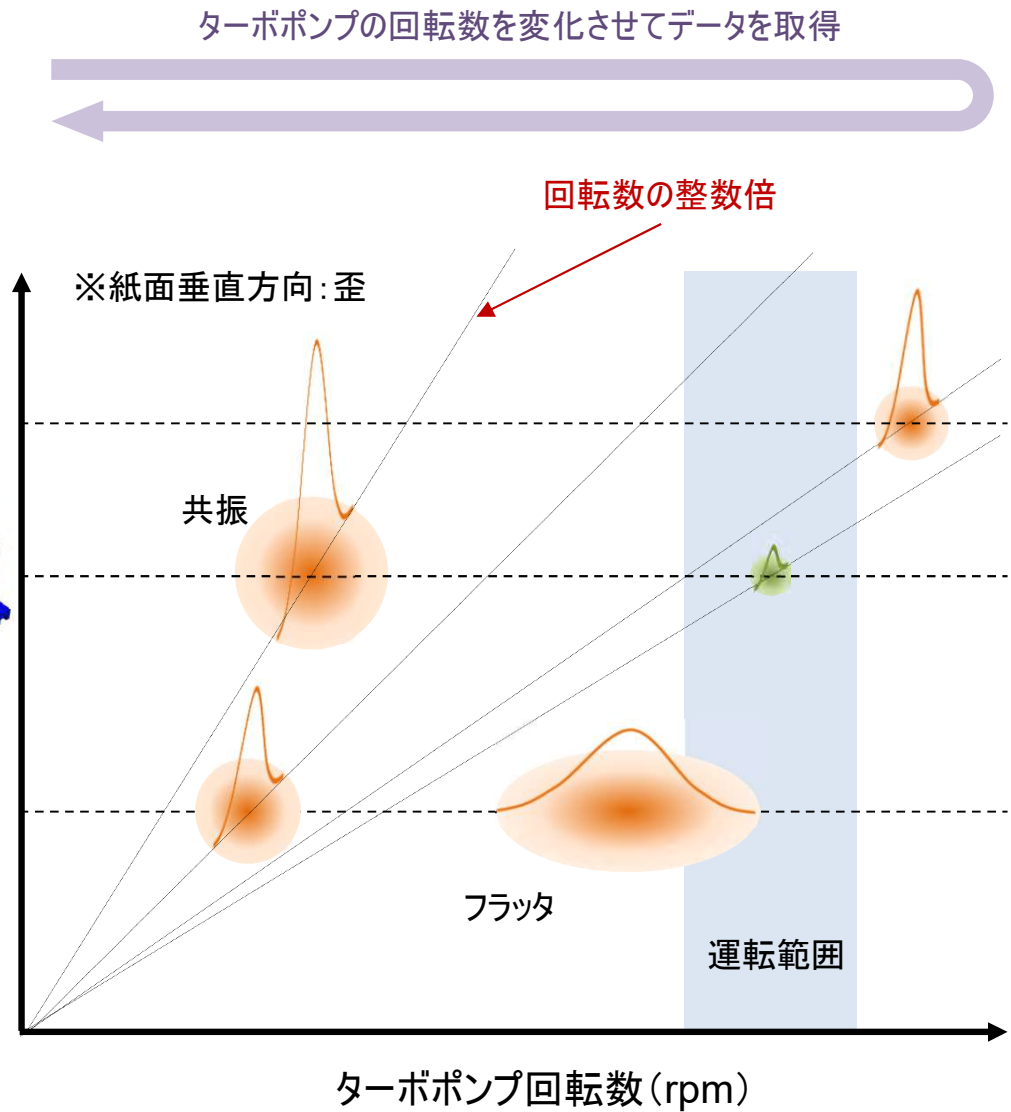
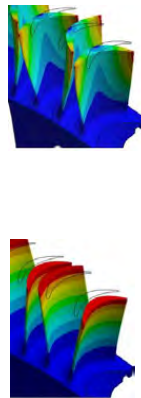


動翼  
(計測対象)



歪センサ  
センサケーブル  
中継装置  
データ送信ケーブル  
電源ケーブル  
受信機  
電源  
第2段動翼  
第1段動翼  
翼回転軸  
回転部  
固定部  
トランスミッタ

固有モード



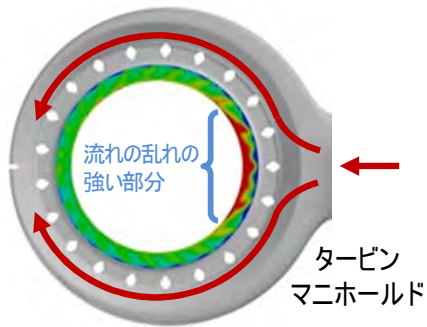
試験データの分析例: キャンベル線図のイメージ



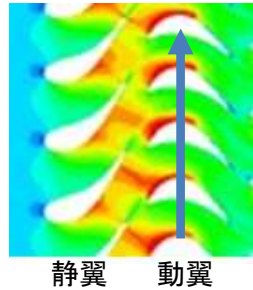
# 【参考】タービンの振動現象

## 加振源の例

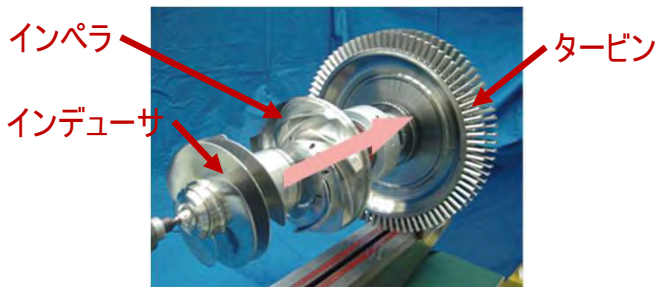
不均一な流れ



翼列の後流分布



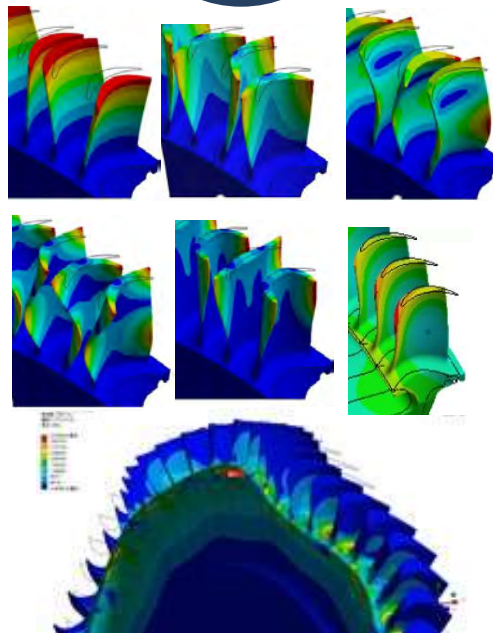
ポンプ部からの振動伝達



## タービンの振動現象

共振

物体が外部の振動と同期してさらに大きく振動する現象



フラッタ

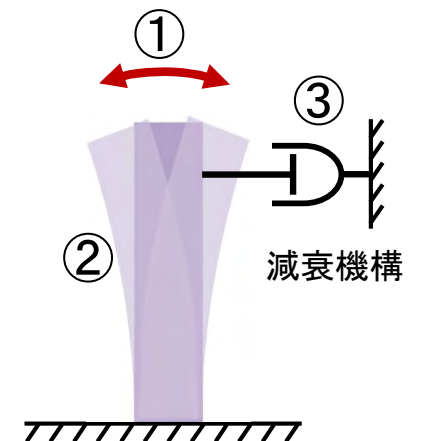
構造物とそのまわりを流れる流体とが連成して生じる自励振動

## 対応策

①加振源の調整

②固有値の調整

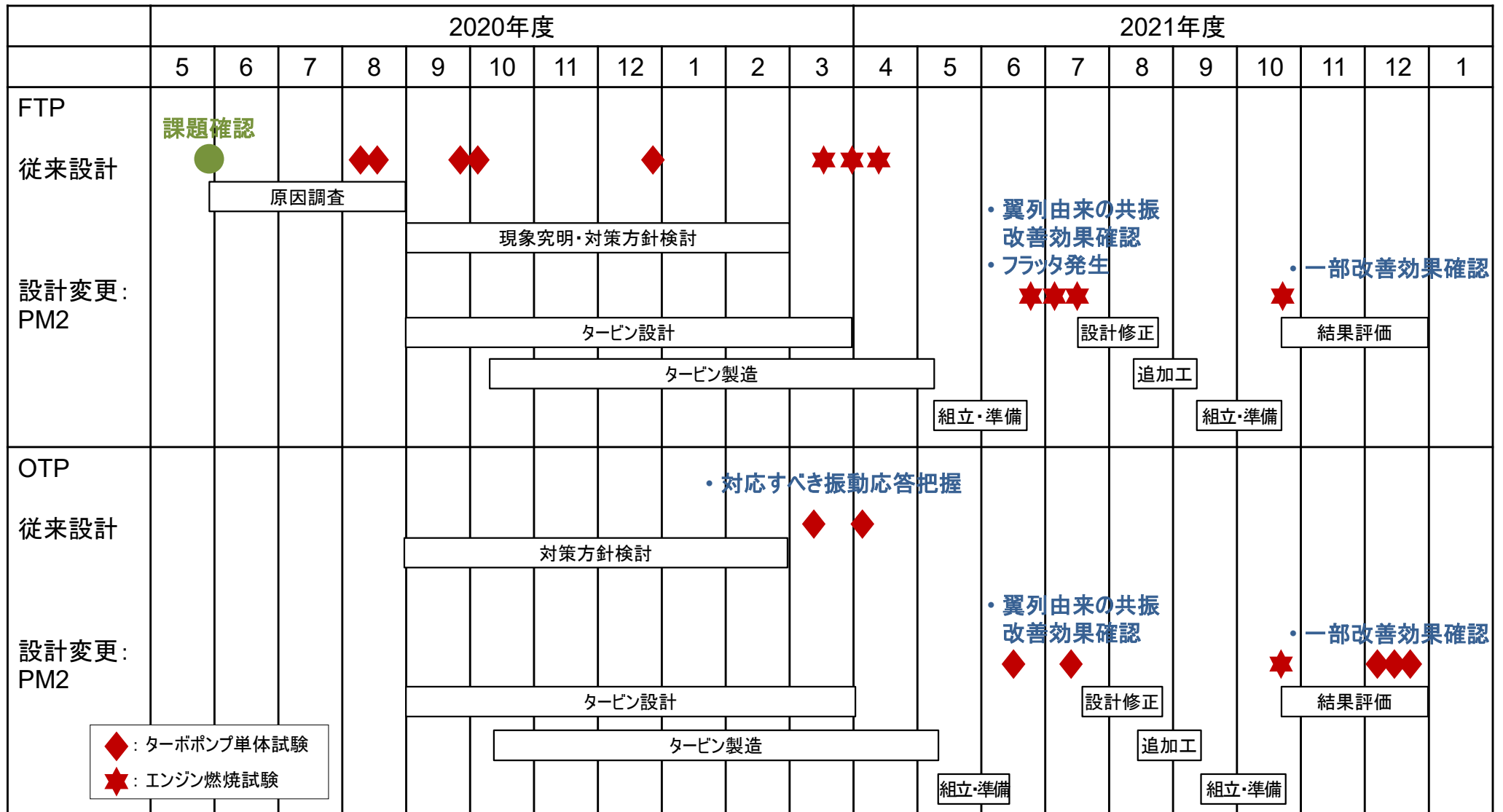
③減衰力の強化



# 【参考】これまでの取り組み

## ■ これまでの取り組み

- 翼振動計測試験で得られたデータを随時評価の上設計に反映し、段階的に検証。



# 開発計画の見直し

- 2020年5月のLE-9エンジン認定燃焼試験にて認められた2つの事象のうち、**燃焼室内壁の開口**については**対応策を確立**した。一方、FTPタービンの疲労を受けた**ターボポンプ**については、**一定の目途を得たものの確実な打上げを行うための対応が必要な状況**。
- 対応を具体化次第、これまでの方針(以下に示す)どおり試験機1号機の打上げに臨む。
  - **翼振動試験**および**技術データ取得試験**等により**段階的かつ着実にリスク低減**を実施。
  - そのうえで**認定試験**により開発仕様を実証し、**TF1を打上げる計画**。
- このため、**試験機1号機の2021年度の打上げを見合わせる**こととしたい。
- なお、これまで総合システム試験などを極力前倒し(P8~9)、全体のリスクを低減しつつ開発が進捗しており、当面LE-9エンジンの開発に集中する。