

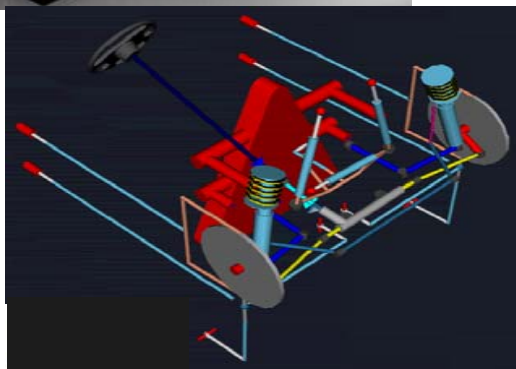
計算工学と実験工学の融合



“ものづくりのための計算工学” 研究会
発足記念シンポジウム

LMS Japan 浅野

アジェンダ



1

シミュレーション技術活用の目的

2

直面する課題

3

Noise & Vibration 分野での挑戦

4

ハイブリッドアプローチの適用例

5

まとめ

1. シミュレーション技術活用の目的

“ものづくりにおける実物評価 (Physical 評価) から
仮想評価 (Virtual 評価) への代替”

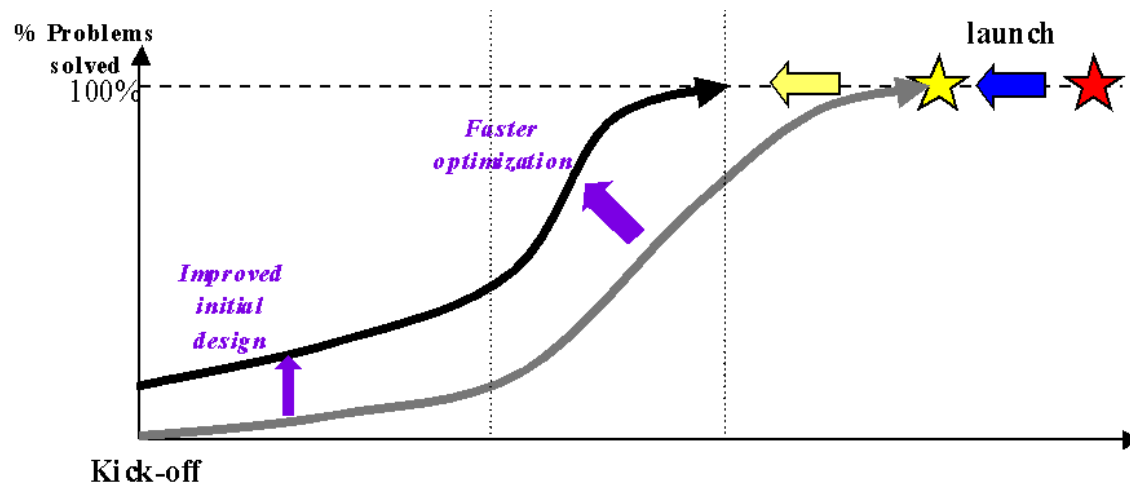
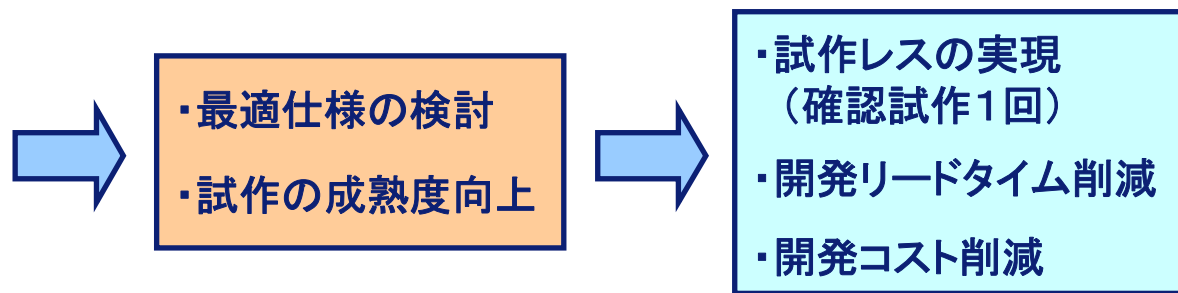
1. レギュレーション評価 (Official and Compulsory)

- ・物理的評価



2. 開発基準に対する評価 (Private and Arbitrary)

- ・物理的評価
- ・感能評価

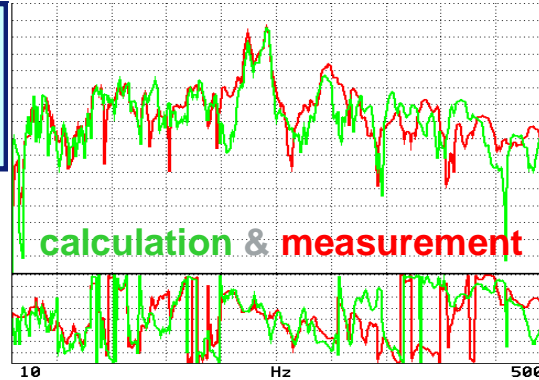


2. 直面する課題

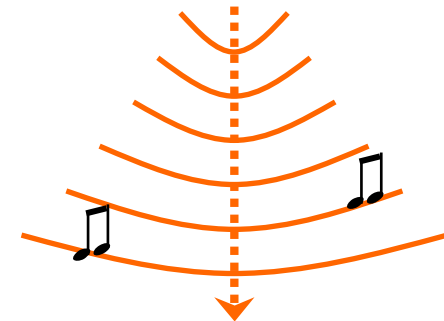
1. 実際現象からの乖離
(解析精度のレベル確保)



本セッションのテーマ



Source field



2. 適正評価基準の策定
(基準の妥当性、感能評価)



Acoustic field



3. 解析コストの増大
(人、リソース、メンテナンス、モデルの肥大化 etc.)

3. 解析精度向上へのチャレンジ:ハイブリッド (Noise & Vibration 分野におけるアプローチの1例)

(Source)

(Transfer)

(Response)

起振源

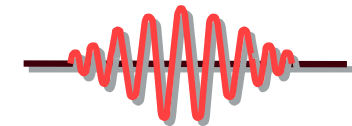
×

構造伝達系

$$\rightarrow P = \sum_i H_{pi} f_i$$

f_i

構造・音響伝達関数: H_{pi}



応答

Vibration
Hand, Body,
Noise
microphone
Ear



実験解析
アプローチ

LMS provides
Solution
&
Tools

理論解析
アプローチ

ハイブリッド
アプローチ

q_i

音源

×

音響伝播系

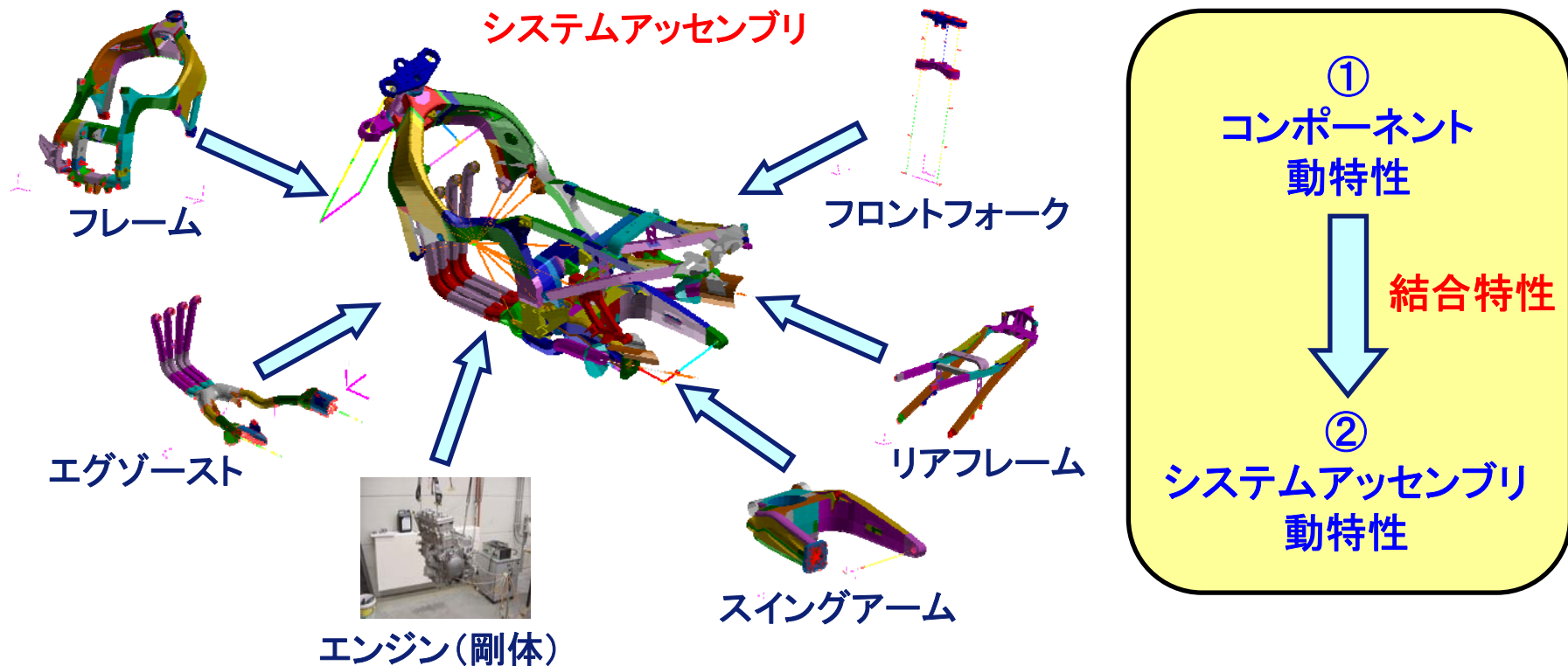
音響・音響伝達関数: H_{pi}

$$\rightarrow P = \sum_i H_{pi} q_i$$

4. ハイブリッド: Source と Transfer の線形・非線形性

線形性	小	大	/
非線形性	大	小	
アプローチ	(理論解析) MBS, MFBS Non-Linear FE Fluid Dynamics (実験解析) TPA, ASQ Load Identification	(理論解析) FEM, BEM (実験解析) EMA, ODS	Multi-Physics (Combined) Ex. Virtual.Lab & Test.Lsb

4. ハイブリッド: 伝達系 (Transfer) 同定の精度向上策 (コンポーネントからアッセンブリへ)

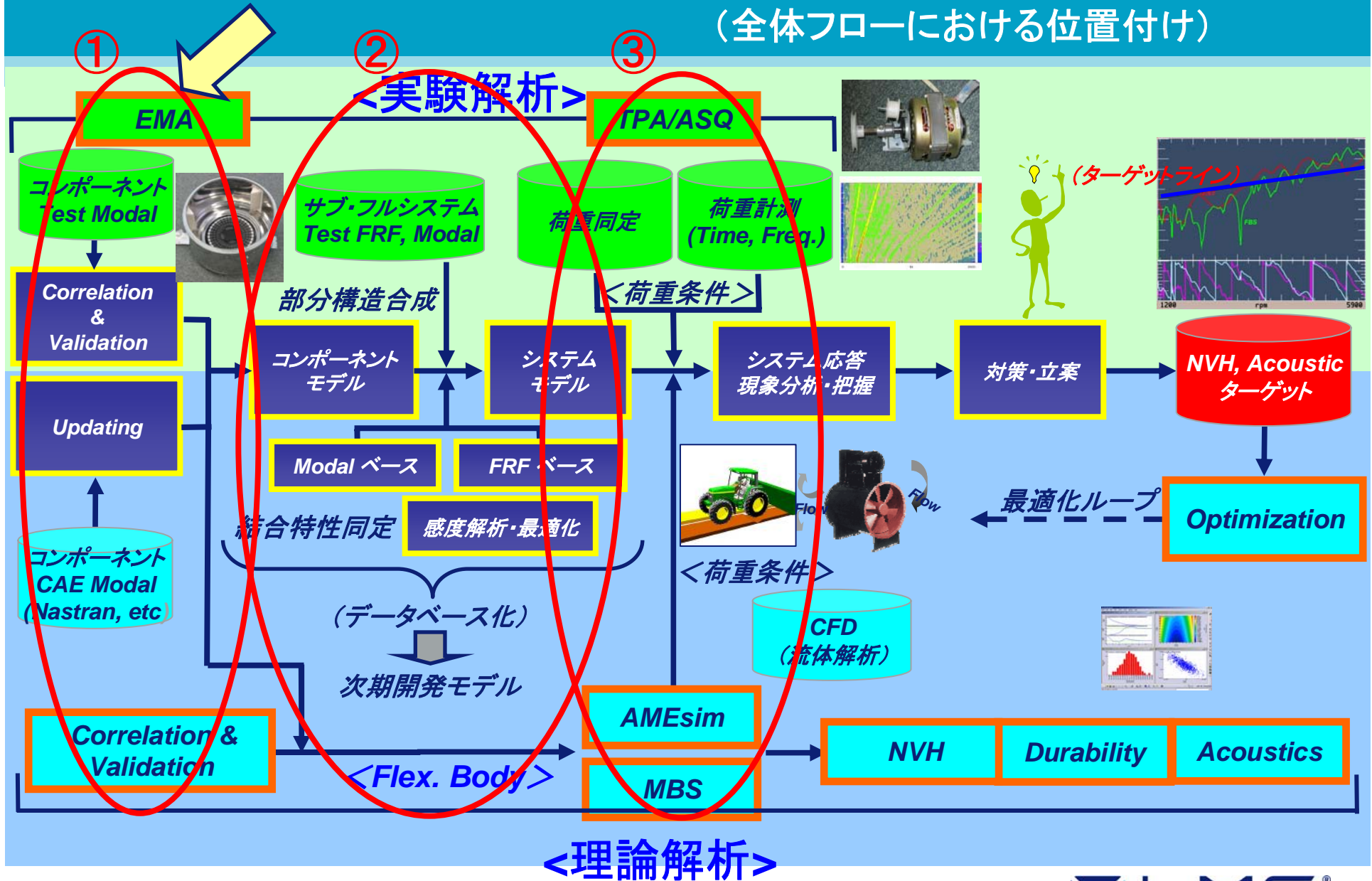


動特性(構造伝達系): 1. 固有値(モーダルパラメータ) 2. 固有モード

結合特性: 1. バネ 2. ダンピング(粘性・ヒステリシス)

4. ハイブリッド:ソリューションプロセス

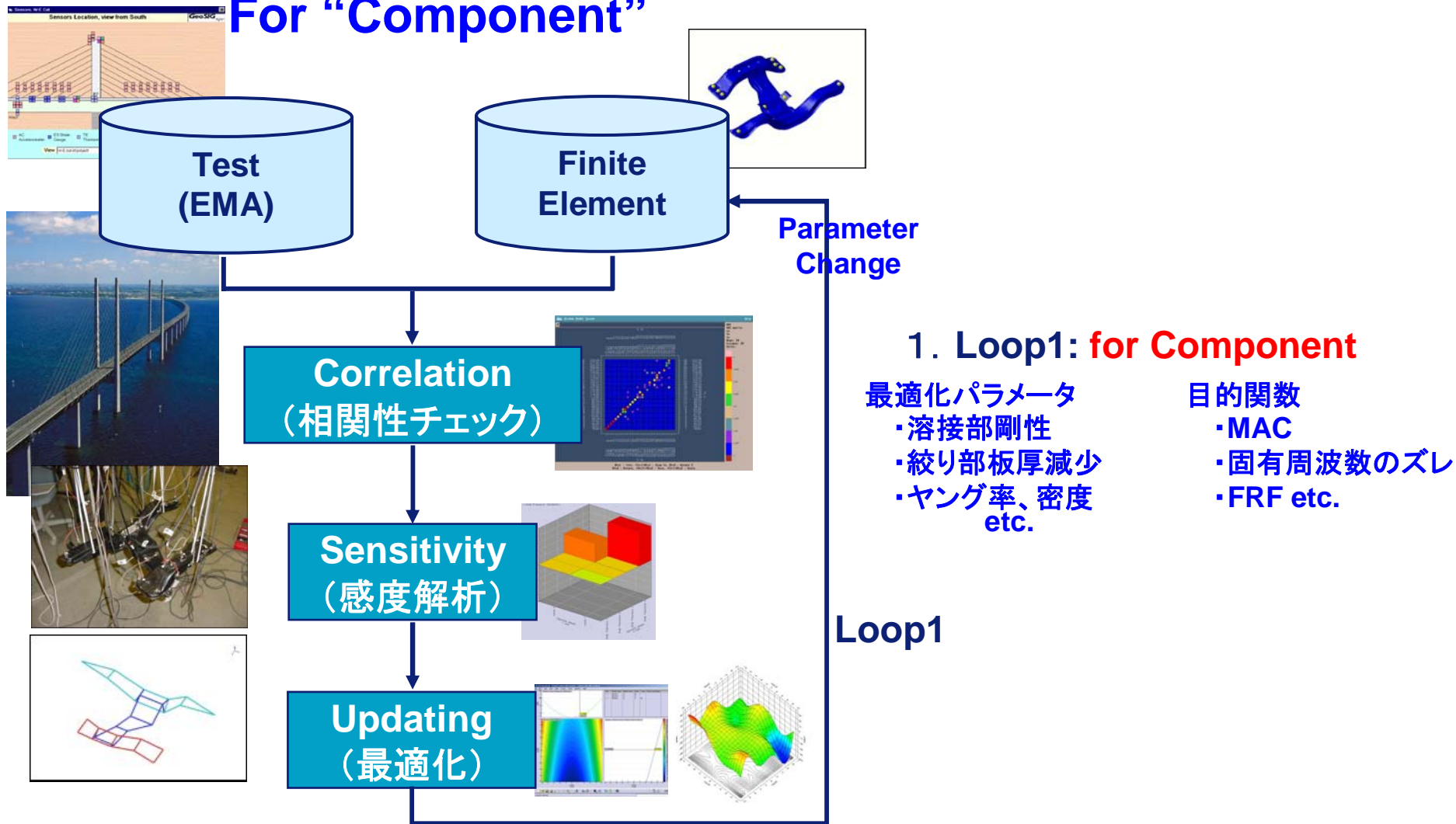
(全体フローにおける位置付け)



4. ハイブリッド:

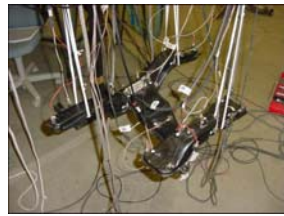
①:コンポーネントのコリレーション&アップデーティング

For “Component”



4. ハイブリッド：系の伝達特性同定手法 (実験・理論解析)

<実験モーダル解析：EMA>

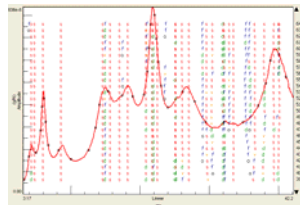


実機対象モデル



伝達関数の計測

$$U = \sum_i H_{fi} F_i$$



カーブフィット



モーダルパラメータ・モードシェープの抽出

計測ポイント数に対応
した抽出自由度数



物理自由度の算出

<シミュレーションモーダル解析>

CADモデル



有限要素法による
係数マトリクス
の同定
支配方程式の構築

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = 0$$



固有値解析の実行



モーダルパラメータ・モードシェープの抽出

指定周波数に対応
した抽出自由度数

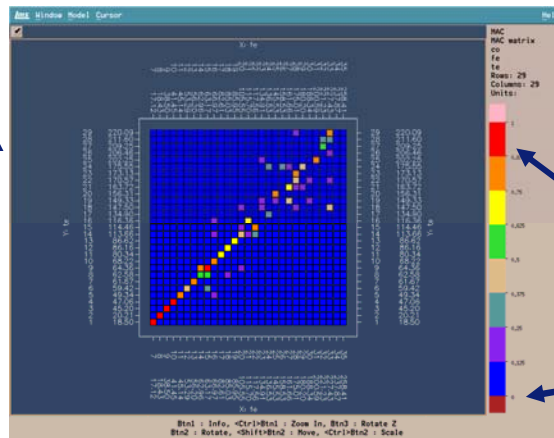
4. ハイブリッド： 実験モデルとシミュレーションのコリレーション

1. MAC (Mode Assurance Criterion)

固有モードの相関性チェック
(実験モデルと計算モデル)

<MAC Matrix>

↑
実験から得られたモード



→
計算から得られたモード

実験から得られた固有モードと計算から得られた固有モードの相関性を表す指標

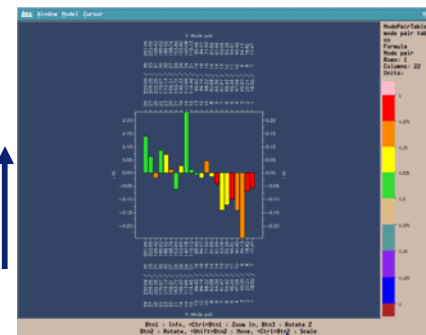
MAC = 1 : 完全一致(相関性100%)

MAC = 0 : 無相関、一次独立(相関性0%)

2. MPT (Mode Pair Table)

対応する固有モードの周波数チェック
(実験モデルと計算モデル)

↑
周波数の乖離

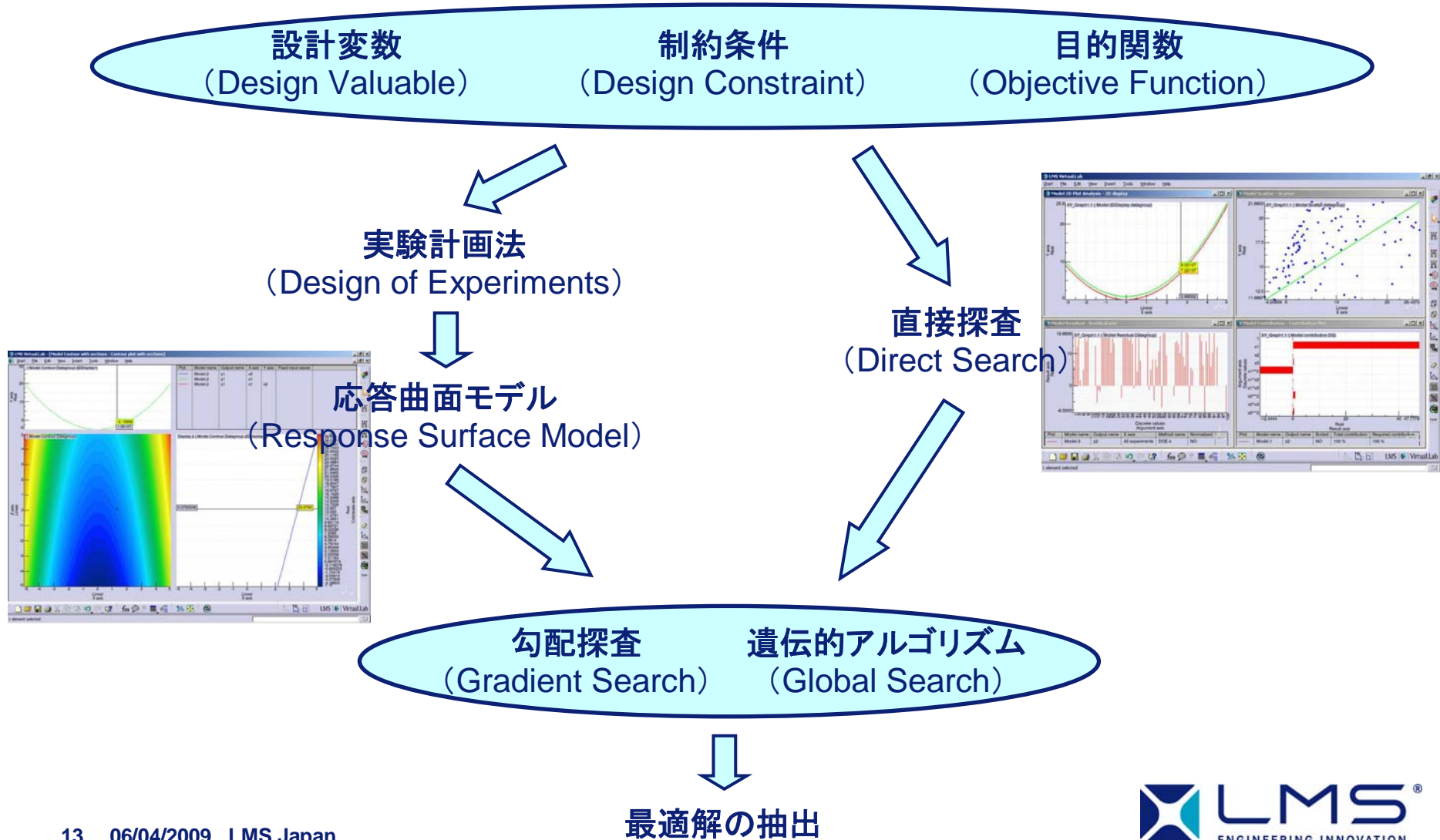


比較するモードペア



4. ハイブリッド: シミュレーションモデルのアップデートング

<最適化:アップデートングフロー>



4. ハイブリッド：ソリューションプロセス

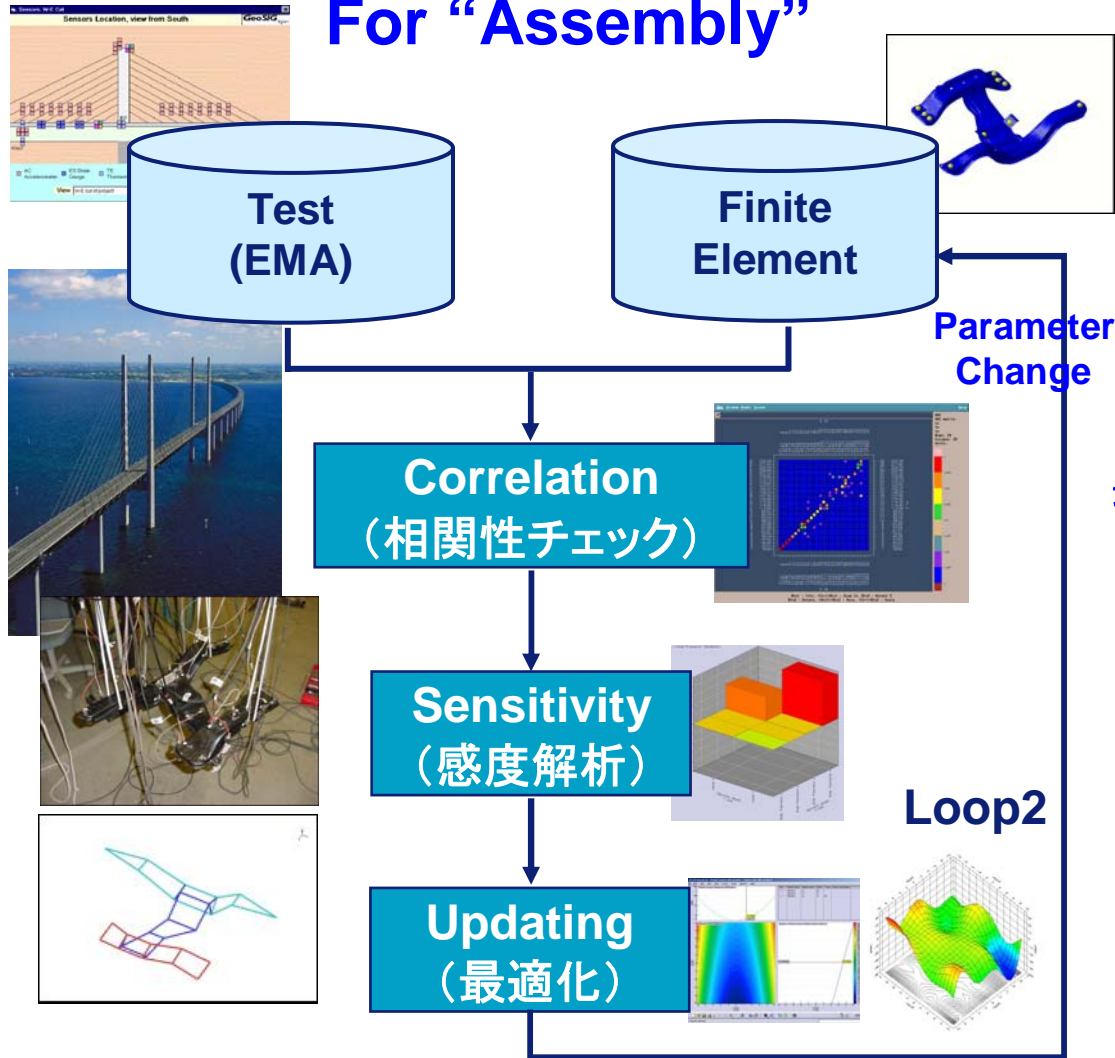
(全体フローにおける位置付け)



4. ハイブリッド:

②: アセンブリのコリレーション&アップデートング

For "Assembly"



Component-1, Component-2

モーダルベース
サブストラクチャリング

2. Loop2: for Assembly Model

- | | |
|--------------------|-----------|
| 最適化パラメータ | 目的関数 |
| ・ボルト締結ばね定数 | ・MAC |
| ・ゴムブッシュばね定数 | ・固有周波数のズレ |
| ・圧入締結ばね定数 | ・FRF etc. |
| ・カシメ締結ばね定数
etc. | |

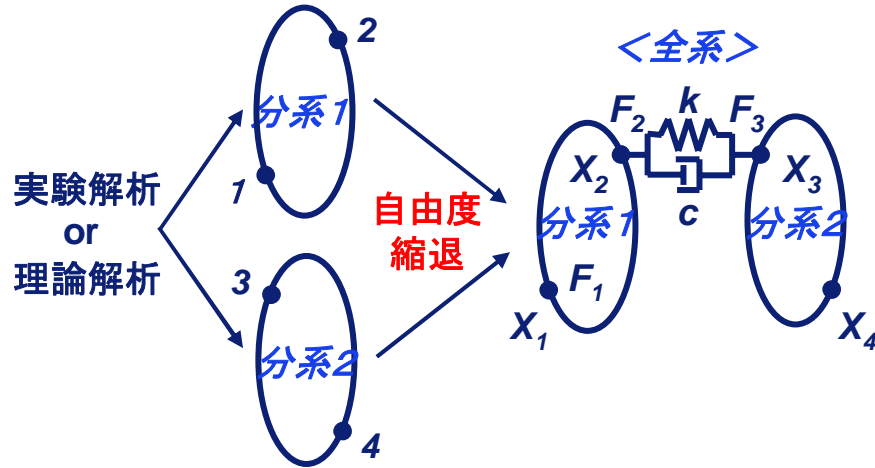
結合部特性の同定

データベース化

次期開発モデルへの適用

4. ハイブリッド: コンポーネントを縮退・結合してアセンブリへ

<部分構造合成法: Sub-Structuring>

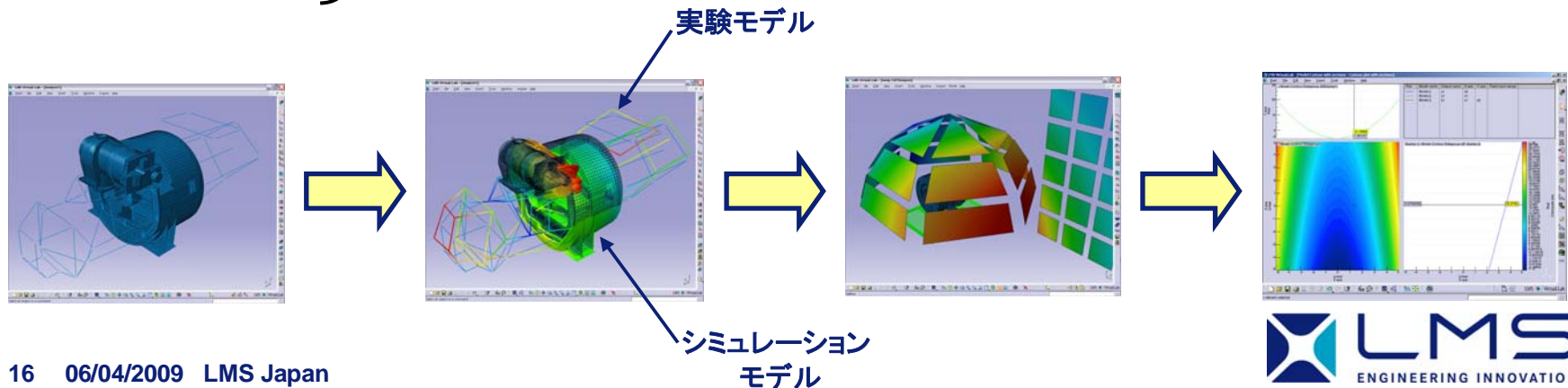


1. **理論解析**でコンポーネント間の結合特性を同定する目的で最適化計算を用いる場合
(非常に多くの固有値計算の繰り返しが必要)
2. **実験解析**と**理論解析**から得られるコンポーネントを併用してシステムモデルを構築する場合
(ハイブリッドアプローチ)

分系1: 数十万自由度
+
分系2: 数十万自由度

全系: **高々** 数十~数百自由度

1. 伝達関数ベース
2. モーダルベース



4. ハイブリッド: コンポーネントを縮退・結合してアッセンブリへ

ハイブリッド伝達関数合成法 (FRF Based Sub-Structuring)の一例



+



+



理論解析モデル

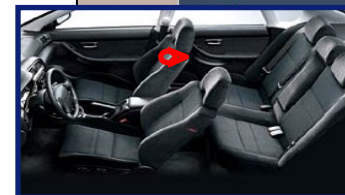
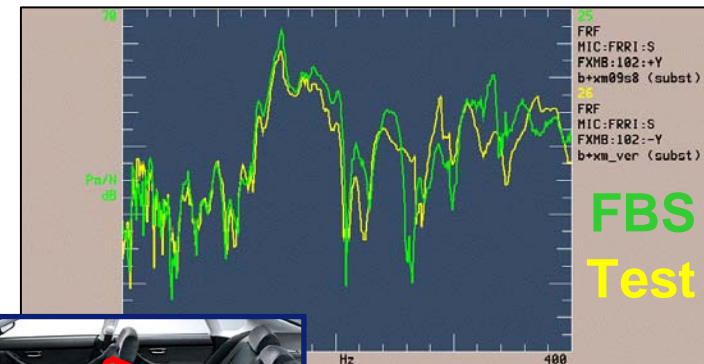
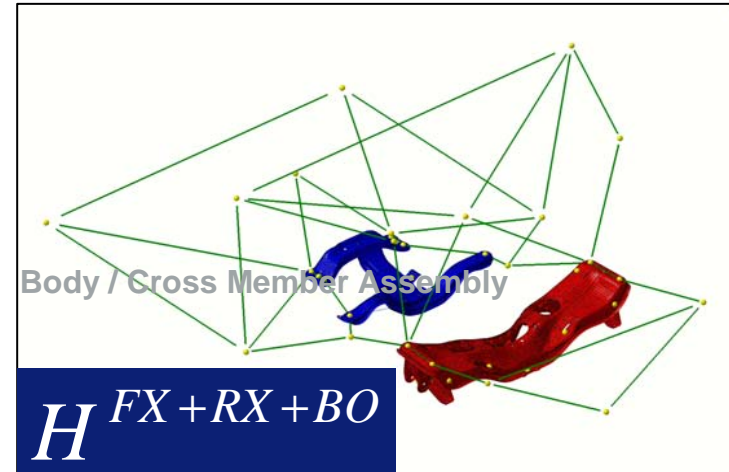
$$H^{RX} = \begin{bmatrix} H_{cc}^{RX} & H_{ci}^{RX} \\ H_{oc}^{RX} & H_{oi}^{RX} \end{bmatrix}$$

実験解析モデル

$$H^{BO} = \begin{bmatrix} H_{cc}^{BO} & H_{ci}^{BO} \\ H_{oc}^{BO} & H_{oi}^{BO} \end{bmatrix}$$

理論解析モデル

$$H^{FX} = \begin{bmatrix} H_{cc}^{FX} & H_{ci}^{FX} \\ H_{oc}^{FX} & H_{oi}^{FX} \end{bmatrix}$$



4. ハイブリッド：ソリューションプロセス

(全体フローにおける位置付け)




4. ハイブリッド:

③: 加振力 (Source) の同定: 実験解析によるアプローチ

< 荷重同定 >

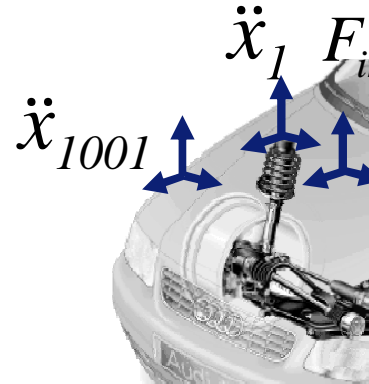
<Dynamic Stiffness>



$$F(\omega) = K(\omega)[X_s(\omega) - X_t(\omega)]$$

実験室計測 実機運転計測

<Matrix Inversion>

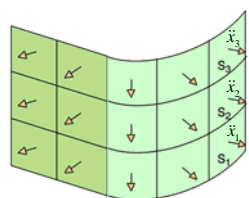


$$F_1^{oper} = \begin{bmatrix} \frac{\ddot{x}_1}{F_1} \\ \frac{\ddot{x}_{1001}}{F_1} \\ \frac{\ddot{x}_{1002}}{F_1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1^{oper} \\ \ddot{x}_{1001}^{oper} \\ \ddot{x}_{1002}^{oper} \end{bmatrix}$$

実験室計測 実機運転計測

< 音源同定 >

<Panel Vibration>



$$\dot{Q} = \int_S \ddot{x}_n ds$$

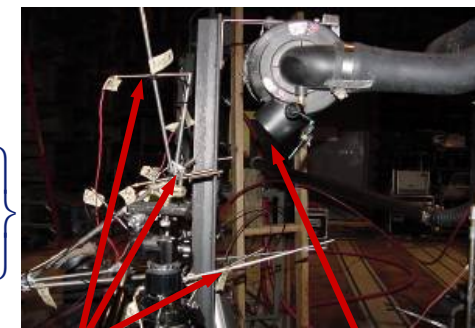
discretisation

$$\dot{Q}_i = A_i \ddot{x}_{ni}$$

Surface area Normal acceleration

<Nozzles>

$$Q_{exhaust}^{oper} = \begin{bmatrix} P_{1001} \\ Q_{exhaust} \\ P_{1002} \\ Q_{exhaust} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} P_{1001}^{oper} \\ P_{1002}^{oper} \end{Bmatrix}$$



Indicator Microphones Intake Nozzle

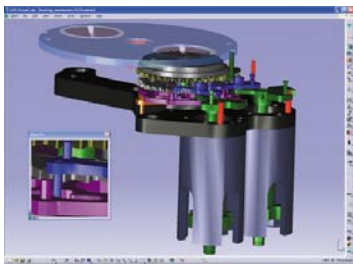
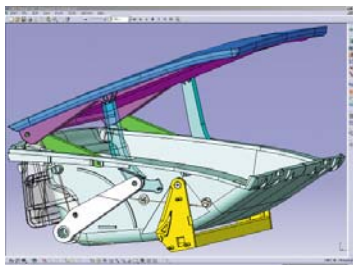
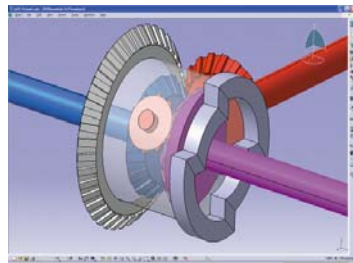
4. ハイブリッド:

③: 加振力の同定: 理論解析によるアプローチ

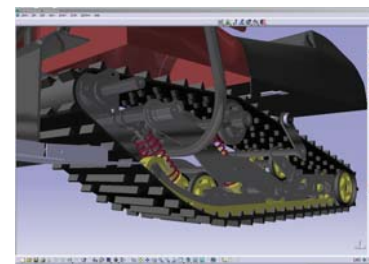
<Multi-Flexible-Body Simulation>

複数のボディー(剛体、弾性体)より構成されるメカニカルシステムの
任意の拘束条件(結合、接触、衝突、駆動、加振、制御 etc.)下における
実際の稼動状態(ダイナミクス:機構・運動・挙動・振動 etc.)をシミュレートするツール

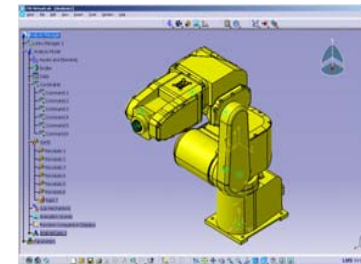
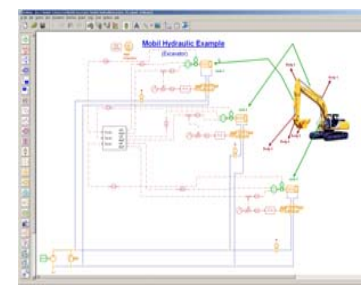
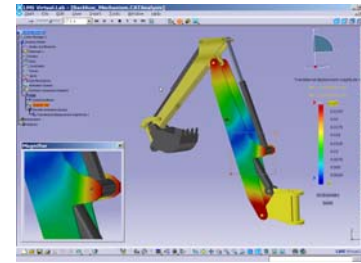
Mechanical Dynamics



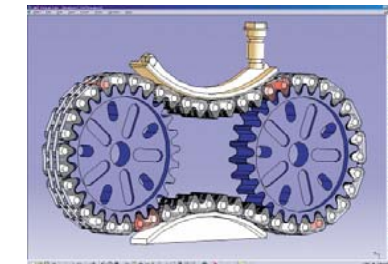
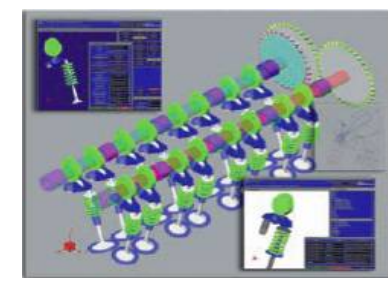
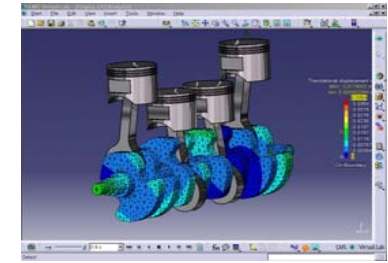
Vehicle Dynamics



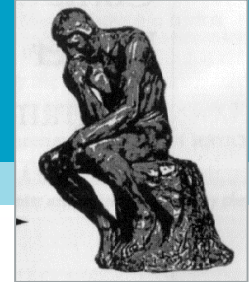
Control Dynamics



Engine Dynamics



5. まとめ



1. ものづくりにおいて“実験解析”は必須で、回数は削減できても無くする努力は幻想である。
2. 現象把握の基本は“実験解析”であり、“理論解析”は現象の分析とその対策に用いるべきである。
3. 理論解析の精度を向上させるには、如何に多くの実験データベースと実験的知見を持つかに懸っている。
4. 理論解析では、出来るだけ少ない自由度で対象とする現象が再現できるモデル構築を目指す。そのためには、モデル化前の十分な熟慮と考察が必須である。不必要な自由度の増大は“百害あって一利無し”。
5. 理論解析の精度目標は7～8割を目指し、完璧を追求しない。一定以上の精度確保には加速度的な解析コストの上昇を招く場合が多い。



理論解析者への教訓:

実験結果は実験者意外だれもが信じるが、解析結果は解析者意外だれも信じない



Thank you