

特集：ロードスターRF

12

## MBDと品質工学の連携による設計諸元と工程の最適化

Proposal of Optimization for Design Parameter and Process Development  
with Coupling of MBD Approach and Quality-Engineering徳光 文広\*<sup>1</sup>

Fumihito Tokumitsu

## 要 約

市場の要求性能を満足する製品を迅速かつ安価に開発することが、企業として存続する必須課題となっている。しかし飛躍的に複雑さを増す傾向にある製品開発において更なる開発期間の短縮と品質の両立は困難を極める。この中において最悪と思われる限られた範囲の評価条件によって机上評価を行う従来手法によって得られた評価結果から導出された設計諸元及び管理ポイントや基準の選定では、さまざまな市場環境下での性能の安定性を保障し得るとは言い難い。しかし実機ができた段階から網羅的な実験を行うことは、期間的かつ費用的に現実性に乏しく、モデルを用いた机上評価に頼らざるを得ないのが実情となっている。

本稿では、机上評価を行う目的と対象を明らかとした上で、目的を達成し品質を安定させるために重要な設計諸元と方向性を抽出可能とするモデル要件を導出し活用することで、設計諸元の最適化に加えて生産工程の最適化を試みた結果を紹介する。

## Summary

Developing products satisfying market needs quicker and cheaper has become crucial for a company to survive. However, with product development becoming much more complex, it is extremely difficult to shorten the development period further while maintaining product quality. Under such circumstances, it is very hard to guarantee the stability of performance in various market conditions using design parameters, management variables and evaluation criteria extracted from a conventional method in which desk evaluation is conducted based only on limited evaluation criteria of assumed worst conditions. However, performing a comprehensive function test once a prototype becomes available is impractical in light of development lead time and cost, giving us no choice but to rely on theoretical evaluation.

In this paper, firstly, we clarified purpose and subject for theoretical evaluation, then, drew model conditions that enable the extraction of the design variables and directions which are important in serving the purpose and stabilizing the quality. Lastly, in addition to design parameter optimization, we also introduced trial results of production process optimization.

## 1. はじめに

企業は製品という価値を市場に提供し、お客様が要求する価値以上と判断された製品が選ばれ対価という形で帰ってきた利益を次世代製品の開発費用に充てる循環によって存立している。

お客様に選んでいただくためには、機能や品質は高くコストは低く抑えて相対的に価値を高める必要がある。この中で、開発費用や生産費用の多くを占める人件費を削減する手段として効率化が常に求められ、具体策として製品をユニットレベルに分割し、各ユニットを個別に生産可能とし、分割したユニットを流れ作業にて組み立

\*1 統合制御システム開発本部  
Integrated Control System Development Div.

てる生産スタイルが考案された。

更には、分割されたユニットは協力メーカーへ委託生産され会社レベルの分業体制へと拡大した。

この分業によって、生産効率は飛躍的に向上し、削減した生産コストは販売価格へ転化され、低価格化による競合力強化を果たした。しかし製品を分割する構造の多くは複雑となりやすく、分割されたユニットのバラツキの累積や組立再現性等により、完成した製品の機能が不安定となり市場での品質問題の要因となる弊害が発生し課題となっている。

本稿では、複数のシステムやユニットを物理量で連携したモデルを活用し、机上段階でシステムレベルから部品レベルまでを総合的に評価するModel Base Development (以下、MBD) と、機能に対する設計諸元の感度と安定性の関係を明らかにする品質工学を連携することに加え、生産工程も考慮することで、複雑な構造を持つ製品であっても、品質を高く生産コストを低く抑える試みを行った。

まず、モデル要件となる評価対象と評価方法に対する考え方について述べる。次に適用事例を示す。

## 2. 評価対象

一般的に、燃費はお客様が車両性能を評価する重要な指標として用いられているが、化石エネルギーや電気エネルギーから移動エネルギーへのエネルギー変換を行った結果であり品質特性である。しかし、標高や気温などによって燃費値が大きく変化するようでは安定した品質とは言えず、お客様の信頼が得られない。よって、エネルギー変換を機能と定義し、エネルギー変換の効率と安定性を評価対象とした。

加えて、生産コストには歩留まりや累積バラツキを相殺する調整工数などが含まれるため、部品単品の加工基準を兼ねた部品単品同士の組み付け基準穴位置の加工バラツキを入力とし、他のユニットを組み付ける基準位置の累積バラツキを出力とする位置エネルギー変換の感度も評価対象とした。

更に、自重によるたわみ量やシール反力による変形量を相殺する見込み値も評価対象とした。

## 3. 評価方法

エネルギー変換の効率と安定性、及び位置エネルギー変換の感度を効率的に評価するため、机上で直交実験を行う。

まず、共通項となる制御因子を探し出し、加法性のある制御因子の組み合わせを明らかにする。これにより、エネルギー変換の効率と安定性を最大とする設計諸元も明らかとなり、設計のセンター値を決めるパラメータ設計も可能となる。

次に、許容加工誤差を拡大した水準にて直交実験を再度行う。これにより、位置エネルギー変換の感度が明らかとなり、感度が低い因子の許容誤差拡大検討や歩留まりと累積バラツキを相殺する調整工数の配分検討が可能となり、許容差設計も可能となる。

そして、モデルを弾性体とし剛体との相対比較を行う。机上での直交実験によって、位置エネルギー変換の感度が高い制御因子は分かっているので、自重やシール反力による変形量を相殺する見込み値つまり設計のセンター値のオフセット量を効率的に抽出可能となる。

## 4. 適用事例

### 4.1 Retractable Hard Topの概要

Retractable Hard Top (以下、RHT) は、バッテリーから供給された電気エネルギーをモーターの回転エネルギーに変換し、ギアを経由して多関節リンク機構 (以下、リンク) を駆動させることで、左右対称のリンクに締結されたルーフの開閉運動を行う構成となっている。

ルーフはフロントルーフやミドルルーフやバックウィンドウに分割され、分割部に中空形状のシール材を用いることで、雨水や外気温などが車室内へ侵入することを防いでいる (Fig. 1)。

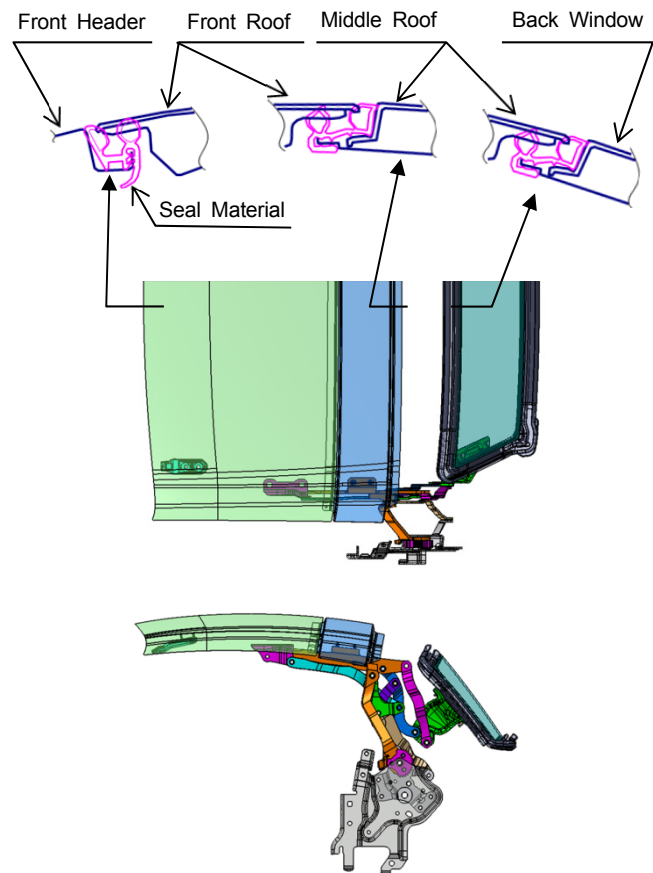


Fig. 1 RHT Configuration

RHTを構成する各ユニット (Fig. 2) は、二次サプライヤーによって生産され、一次サプライヤーによって組み立てを行いメーカーへ納品する生産スタイルとなっている。このユニットの中で、リンクはフロントルーフなど他のユニットを組み付ける土台でありながら、11個もの部品単品となるブラケットの端部に設定された組み付け基準をピポッドによって連結し、回転自由度を持たせることで、ルーフの開閉運動を可能とする複雑な構造となっている (Fig. 3)。

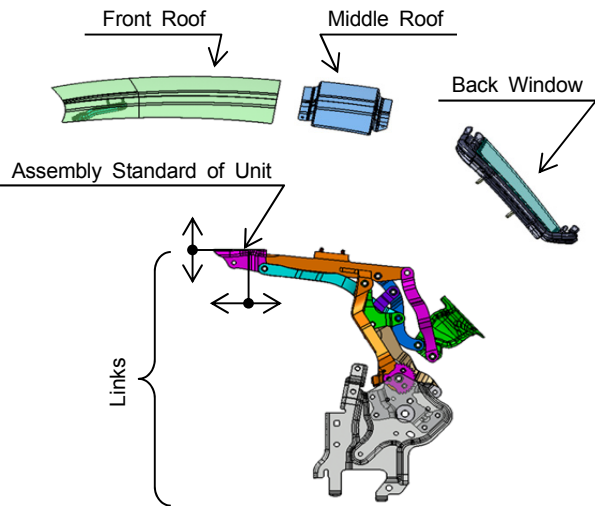


Fig. 2 Divided Units

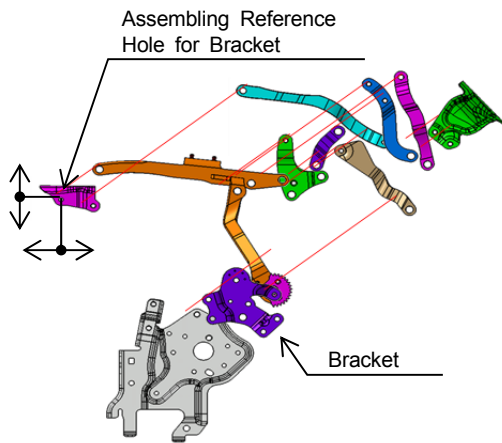


Fig. 3 Links Configuration

4.2 市場での使われ方

RHTに対するお客様のご要望つまり市場での使われ方は、解放感を得るためにルーフを適な車室内環境を得るためにルーフを開めることである。

4.3 評価対象①

ルーフの開閉は、投入した電気エネルギーによって得られるため、電気エネルギーからルーフの位置エネルギー

への変換効率と安定性を評価対象とした (Fig. 4)。

変換効率を高めると不要になった発電エネルギーを目的地までの移動エネルギーに充てられる。安定性を高めるとルーフ先端の上下振動や作動音の変化量が最小となり不快な印象も与えない。

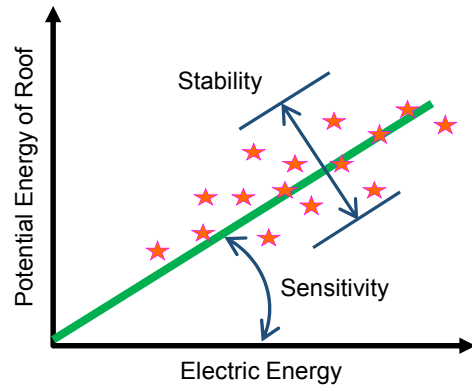


Fig. 4 Energy Conversion

4.4 評価対象②

車室内外の遮断は、分割されたルーフの相対位置により決まるシール隙によって得られるため、リンクを構成するブラケットの組み付け基準穴位置から分割されたルーフを組み付けるリンク側の組み付け基準位置への位置エネルギー変換への感度を評価対象とした (Fig. 5)。

感度の低い因子の許容加工公差を緩和すると生産コストを改善できる。感度の高い因子は重点管理特性となり歩留まりと累積バラツキを相殺する調整工数の定量的な配分検討が可能となる。

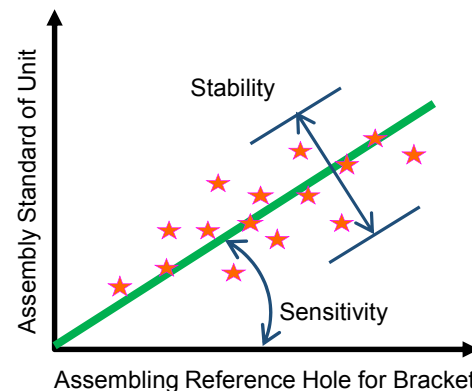


Fig. 5 Position Energy Conversion

4.5 評価対象③

シール隙は自重によるたわみ量やシール反力による変形量によって変化するため、自重やシール反力の有無によるブラケット端部の締結穴位置からシール面への位置エネルギー変換の感度の変化量も評価対象とした (Fig. 6)。

4.6 評価対象①の評価方法と評価結果

電気エネルギーからルーフの位置エネルギーへのエネルギー変換を決定する因子と、ブラケットの組み付け基準穴位置から分割されたルーフを組み付けるリンク側の組み付け基準位置への位置エネルギー変換を決定する因子の共通項となるブラケットの加工基準穴位置から組み付け基準穴位置までの距離を制御因子として設定した (Fig. 7)。

この中で、ブラケットを生産する二次サプライヤーが実測し管理可能な制御因子の中から交互作用のない組み合わせを探し出し、26因子3水準となる直交表L54に割当て、机上で直交実験を実施した (Fig. 8)。結果、電気エネルギーからルーフの位置エネルギーへのエネルギー変換は、効率を高めると安定性が損なわれることが分かった。安定性を優先したいとの設計意図があるため、要因効果図 (Fig. 8) を参考に効率の悪化率を最小限とし安定性を最大限改善できそうな組み合わせを抽出し、確認実験を行った (Fig. 9)。結果、ブラケットの加工基準穴位置から組み付け基準穴位置までの距離によって効率と安定性を配分可能であることが分かり、設計意図に準じた設計のセンター値が決定可能となった。

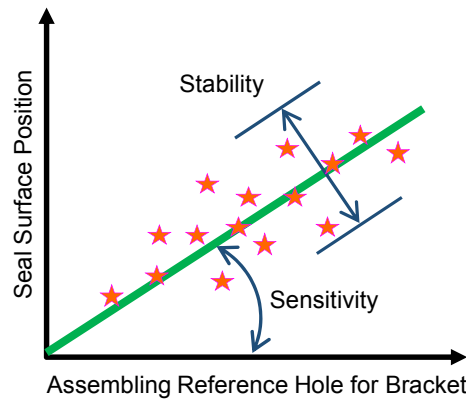


Fig. 6 Position Energy and Force Balancing

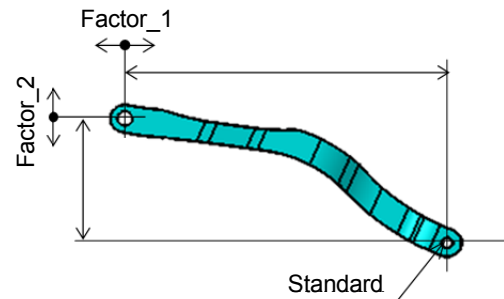


Fig. 7 Control Factor

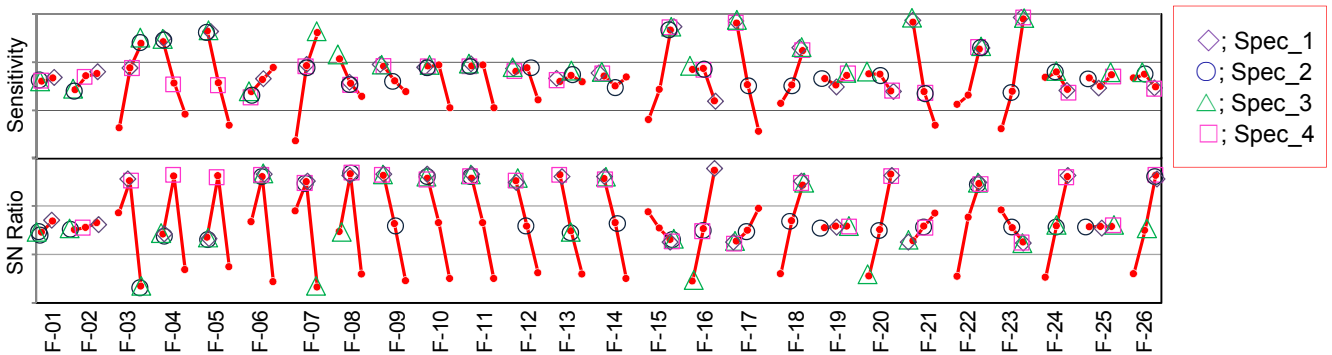


Fig. 8 Factor Effect Diagram

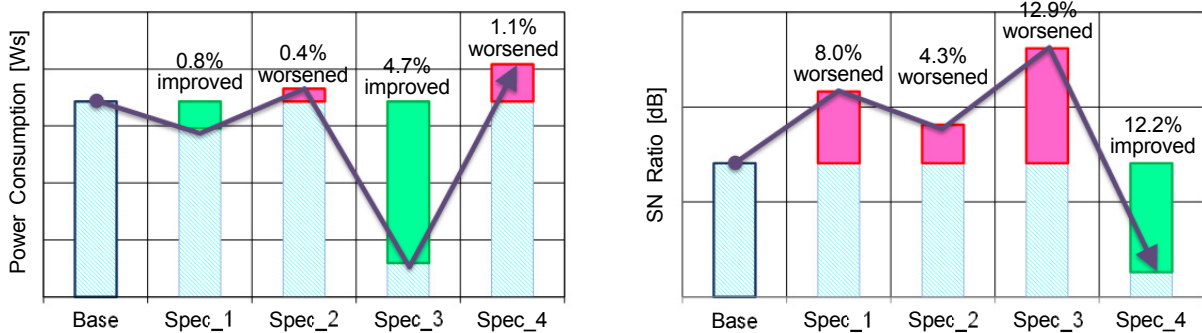


Fig. 9 Confirmation Experiment Result

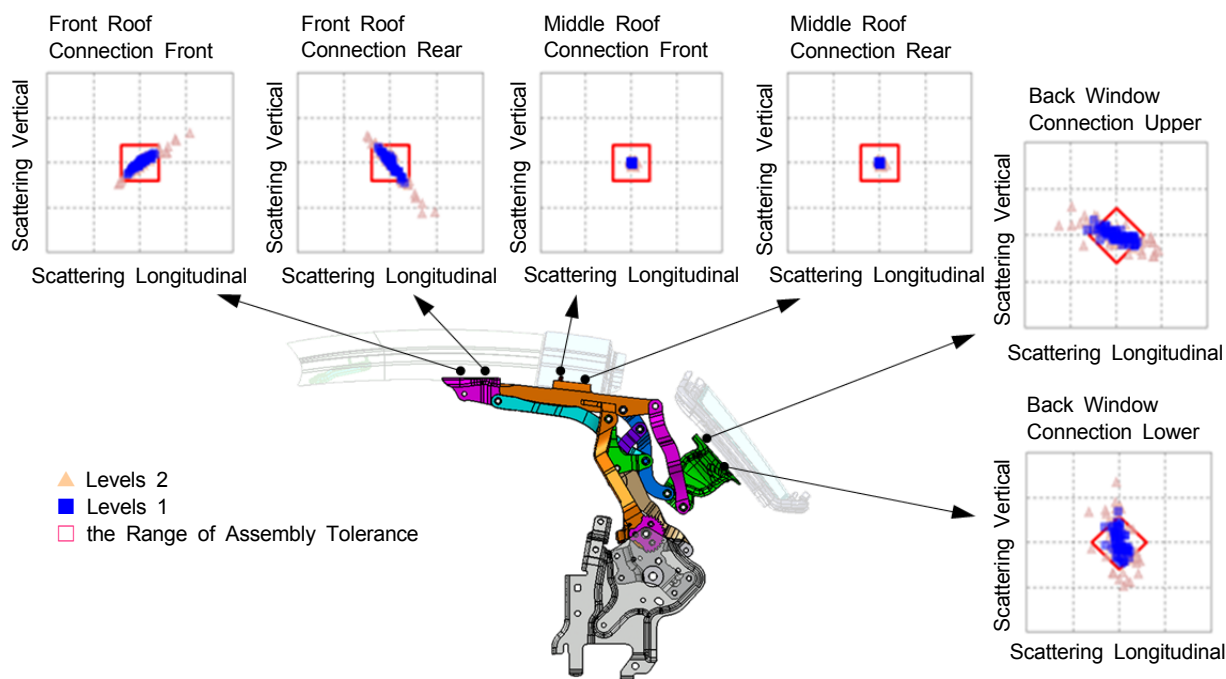


Fig. 10 Scattering at Connection Parts Like Front-Roof

4.7 評価対象②の評価方法と評価結果

許容加工公差を2倍にした水準にて直交実験を再度実施した。初回と再度実施した直交実験の結果の中から分割されたルーフを組み付けるリンク側の組み付け基準位置をグラフにプロットすることで、ブラケットの組み付け基準穴位置のバラツキに対する分割されたルーフを組み付けるリンク側の組み付け基準位置のバラツキの規模と方向性つまり感度を可視化定量化した (Fig. 10)。

これにより、感度が低い因子は許容公差を緩和して生産コストを適正化する検討が可能となり、感度が高い因子はブラケットを生産する二次サプライヤーの重点管理特性となり、リンクにフロントルーフなどのユニットを組み付ける一次サプライヤーが行う累積バラツキを相殺する調整工数や調整シム枚数など、一次サプライヤーと二次サプライヤーの生産コストのトレードオフ検討が可能となった。

4.8 評価対象③の評価方法と評価結果

自重とシール反力による変形量を評価するため、Craig-Bampton法を用いて剛体モデルを弾性体とした。自重やシール反力では降伏点を超えないことが分かって

いるブラケットなどの金属材は線形特性を用いた。圧縮率も高い中空形状のシール材は非線形特性を用いた。この弾性体モデルを用いてブラケットの組み付け基準穴位置からシール面への位置エネルギー変換を評価した。シール反力と強度剛性のつり合いの結果シール面のバラツキ幅は縮小されるため、感度の高い因子に注力することで、効率的に弾性体モデルのシール面の位置を設計のセンター値に復帰できるブラケットの組み付け基準穴位置のオフセット量を明らかとし、見込み量として設定した (Fig. 11)。

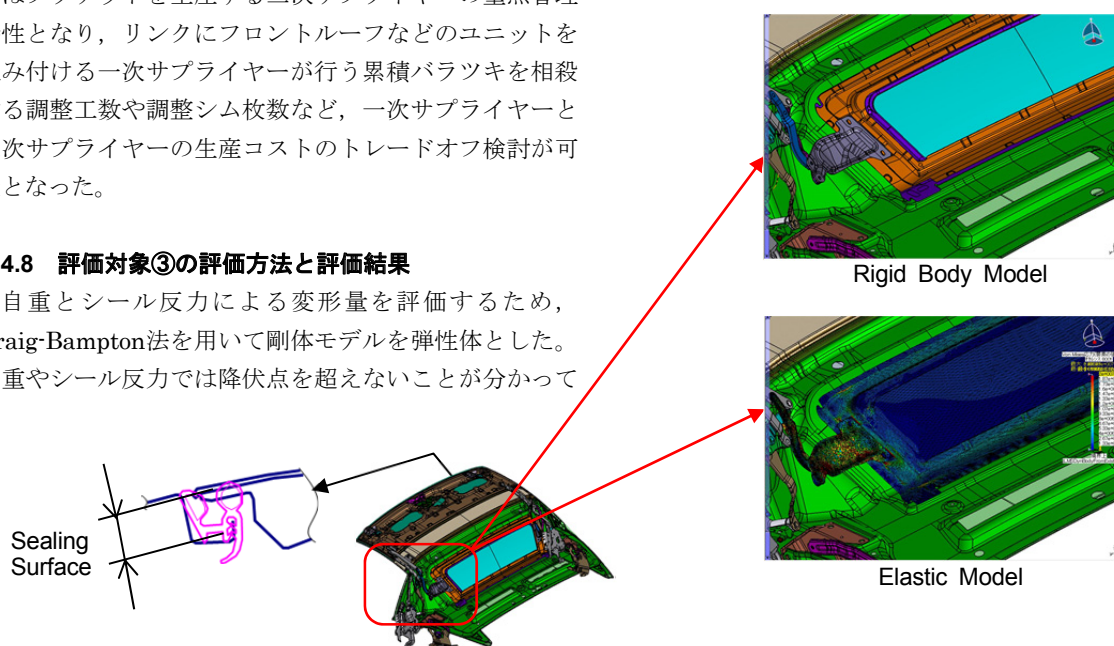


Fig. 11 Rigid Body to Elastic Body

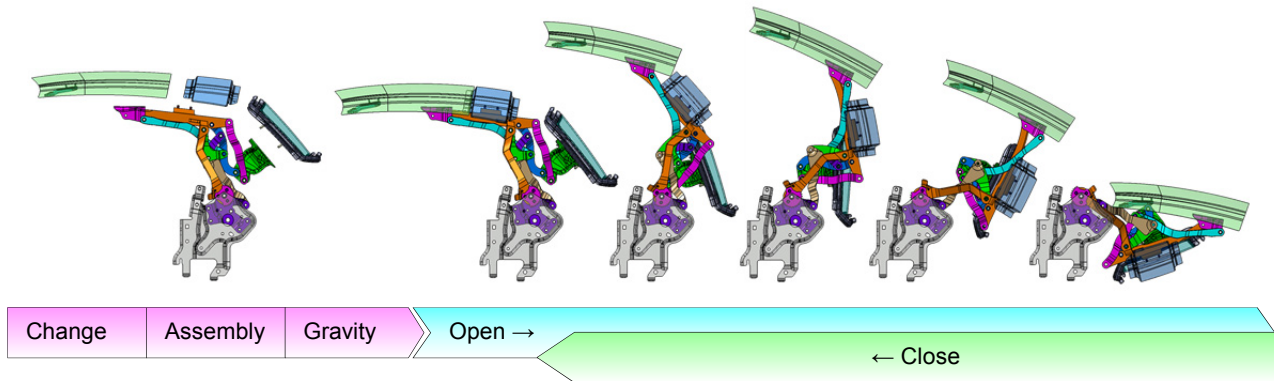


Fig. 12 Evaluation Modes

#### 4.9 モデルの構成

これらの評価を机上で行うにあたり、3D形状に依存した領域はVirtual.Labを用いてプラントモデルを開発した。プラントモデルに力を加えた結果となる応答速度によって次のモーター軸出力トルクなどが変化するパワーフローは制御を含めてMATLAB/Simulinkにてコントロールモデルを開発した。このプラントモデルとコントロールモデルを連成させることで、ループを開閉させるモーターの負荷に応じて電圧や電流やループの開閉速度などが過渡的に変化する機構を再現した。

更に、操作ミス防止と評価効率を高めるため、直交表に準じて自動でブラケットの組み付け基準穴位置を変化させてはブラケット同士を組み付けリンクとし、リンクに分割されたループを組み付けて自重を加えた後に開閉運動を行う一連の生産工程を自動で行うモデルとした (Fig. 12)。

### 5. おわりに

MBDは机上段階で品質工学の目的を達成させる具体的な技術手段であり、MBDと品質工学の親和性は極めて高いといえる。本稿で紹介した適用事例では、ブラケットに設定された加工基準穴位置から組み付け基準穴位置までの距離を共通の制御因子として、設計のセンター値を決定可能とし、適正な生産コストで目標品質を達成可能とし、自重やシール反力をキャンセルする見込み値を決定可能とした。

これは設計諸元の最適化と生産工程の最適化であり、製品をユニットレベルに分割した構造として個別に生産し、流れ作業の中で分割したユニットを組み立てる生産スタイルの弊害とされる責任の所在と限界の不透明さの排除であり、市場に安定した品質の製品を提供するために必要なシナリオの具体化でもある。安定した品質は、顧客満足度にも貢献し愛着となり荒廃も減少する。つまり、限られた資源の最大有効活用であり豊かな社会の実現にもつながる。

その一方で、評価対象となる機能の本質を見極めるこ

とができれば、モデルが再現すべき機能も最小限となり簡易的なモデルで必要十分となる。今回、適用事例として選定したRHTは複雑な構造となっているため、まず詳細なモデルを用いてMBDと品質工学を連携させて機能の評価を試みた。結果として多くの知見を得ることができたが、詳細なモデルは扱う情報量も多く収集し精査する工数なども多くなり、モデルの開発効率は高いと言いがたい。

今回の試みにて得られた多くの知見を用いて機能の本質を見極め、次回は簡易的なモデルでも同等の結果が得られるようにモデル要件を整備し開発の効率を高め、より高く安定した品質を低い生産コストで市場に提供し、豊かな社会造りに貢献していきたい。

### 参考文献

- (1) 田口玄一：田口玄一論説集<第三巻>，日本規格協会，pp.413-438 (2012)
- (2) 長松昌男ほか：製品開発のための新しいモデル化手法 (機能モデルの基本概念)，日本機械学会論文集C編，64巻，622号，pp.131-138 (1998)

■ 著 者 ■



徳光 文広