SPECIAL REPORT
特別レポート

# 理想の設計がここにある 品質工学とCAEの最強タッグ

**市場に送り出す製品の性能や品質をすべて高レベルに保つのは難しい。
加工誤差や使用される条件などのばらつきの影響を受けるからだ。
品質工学は，このばらつきによる影響を受けにくい設計を低コストで実現する手法。
ばらつきを抑えるのではなく，ばらつきに強くすることで高性能を維持できる。
品質工学では様々な設計パラメータを広い範囲で比較する。
その過程では，CAEによる検討が大きな効果を発揮する。
品質工学とCAEを組み合わせることで，理想の設計が実現できる。**

世界最高の性能，世界初の機能を実現しても，それが限定された条件でしか実現できなければ製品としての魅力は半減する。また，どんなに安い製品でも買ってすぐに壊れてしまっては，顧客にとってはまさに「安物買いの銭失い」だ。

良い製品とは何か。機能・性能が優れている，価格が安いことは確かに顧客の購入理由として大きい。しかし，必要な機能・性能を安定して出せることも非常に重要である。ロバスト性を高めることは，適切な加工精度によるコストダウンやクレーム対策費の削減にもつながる。

ロバスト設計を実現する方法の一つが，品質工学。品質工学の適用によってどのような効果が得られるか。具体的な事例をベースに見てみる。

## 新ロータリーの性能実現を支えた

マツダが2003年春に発売した4ドアスポーツカー「RX-8」には，新開発のロータリーエンジン「RENESIS」が搭載されている。RENESISの最大の特徴は，排気ポートの位置を外周面（ペリフェラル）から側面（サイド）へ移したこと（**図1**）。これにより，吸排気タイミングのオーバーラップ（吸気ポートと排気ポートが同時に開通する瞬間）が無くなり高出力，低燃費を実現した[1]。

図1――「RX-8」に搭載されている新型ロータリーエンジン「RENESIS」。最大の特徴は，排気ポートの位置を外周面（ペリフェラル）から側面（サイド）へ移したことだ。これにより，吸排気タイミングのオーバーラップを無くすことが可能になったが，吸排気ポートの位置精度を高める必要があった。

ただし，実際にオーバーラップを無くすためには吸排気ポートに高い位置精度が求められる。吸排気ポートの位置は，オーバーラップが発生しないぎりぎりの位置に設計してあるためだ。

排気終了のタイミングを早める，または吸気開始のタイミングを遅らせる方向にポートの位置をずらせば位置精度の悪さによるオーバーラップの可能性は低くな

表――中子の位置精度に大きく影響する要因。これらを設計パラメータ（制御因子）として，中子の位置精度を高めるためにはどの要因をどうすればよいのかを品質工学で求めた。

| 設計パラメータ（制御因子） | | 水準 1 | 水準 2 | 水準 3 |
|---|---|---|---|---|
| 鋳型の熱影響 | A：鋳型のヤング率 | 小 | 大 | ― |
| | B：鋳型の熱膨張率 | 大 | 中 | 小 |
| 鋳型構造 | C：巾木の重心位置 | 内 | 中 | 外 |
| | D：巾木の体積 | 小 | 中 | 大 |
| | E：巾木のダボ長さ | 短 | 中 | 長 |
| 鋳型設計値 | F：サイドクリアランス設計値 | 大 | 中 | 小 |
| | G：高さクリアランス設計値 | 大 | 中 | 小 |
| 鋳込み方案 | H：中子セット方向 | 横 | 上 | 下 |

る。しかし，それは高出力・低燃費という開発目標と反するため採用できない。

エンジン性能を目標どおり実現するためには，吸排気タイミングにオーバーラップがなく，かつ，間隔もあかないよう，ポート位置を高精度に加工する必要があった。しかし，従来の工程能力では，オーバーラップが発生する不良品率が高くなってしまうと予想された。

## 中子の位置精度を高める

そこで，吸排気ポートの位置精度を向上するにはどうすれば良いかを，品質工学によって検討した[*1]。目標は現在の工程能力から位置精度を2倍に高めることだ。

吸排気ポートがあるサイドハウジングは鋳造品。吸排気ポートの位置精度を決めるのは，主型に対する中子の位置精度となる。

検討ではまず，位置精度が重要となる13カ所（中子上に9点，主型上に4点）のポイントを選び，これらを相互に結んだ78寸法を評価する値とした。位置精度とは，穴の寸法や位置がどれだけばらつくかということ。この78寸法のばらつきを見ることで，吸排気ポートの位置のばらつきも評価できる。

次に，中子の位置精度に大きく影響し，かつ，設計者がコントロールできる要因として八つの設計パラメータ（品質工学で利用する制御因子）を選択（表）。位置精度を高める，つまり前述の78寸法のばらつきを小さくするためには，どの設計パラメータをどうすればよいのかを求めるわけだ。

八つの設計パラメータには，鋳型のヤング率，巾木[*2]の重心位置，クリアランスの設計値といった数値で表せるものだけでなく，中子のセット方向のような選択肢的なものもある。各設計パラメータは，位置精度への影響の違いがはっきりと現れるように大きく異なる数段階で検討する（これを水準と呼ぶ）。そして，これらの設計パラメータすべてがばらつく可能性があるため，すべてを誤差因子としても扱うことにした。

品質工学を適用した結果，中子の位置精度を向上するには巾木の体積を大きくすることが最も重要だと判明。これは，経験的にも妥当性がある答えだった。

巾木の体積を約1.5倍にするという改良を中子に加えた結果（図2），吸排気ポートの位置精度を2.5倍に向上させられることを実験によっても確認できた。

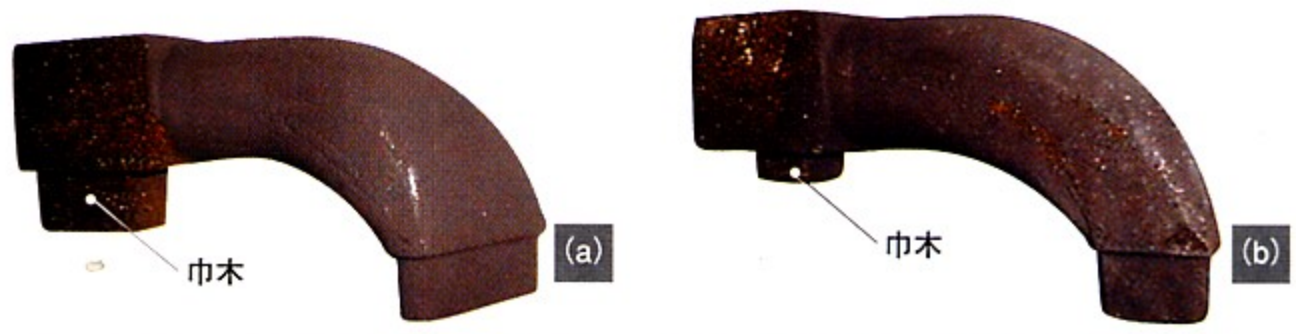


図2――改良後（a）と改良前（b）の中子の形状。それぞれ，右下部分の断面がポート形状となる。品質工学を適用し，巾木の体積を大きくすることでポートの位置精度を2.5倍に向上できた。

＊1　この適用事例は「CAEを用いた鋳造用鋳型設計条件の最適化」として第10回品質工学研究発表大会で銀賞を受賞している。

＊2　巾木とは中子の一部の名称で，主型に差し込んで中子を支える役割を持つ。

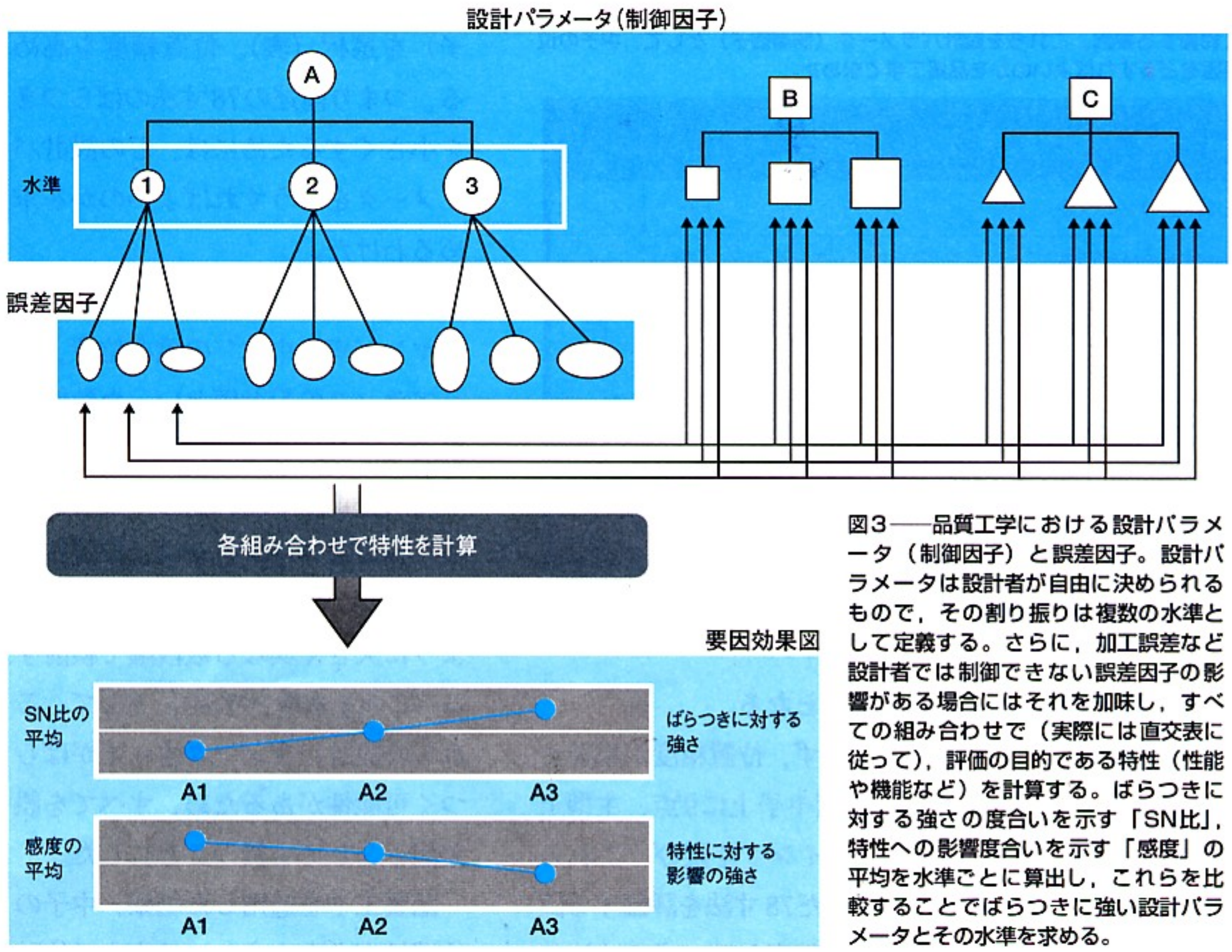


図3——品質工学における設計パラメータ（制御因子）と誤差因子。設計パラメータは設計者が自由に決められるもので，その割り振りは複数の水準として定義する。さらに，加工誤差など設計者では制御できない誤差因子の影響がある場合にはそれを加味し，すべての組み合わせで（実際には直交表に従って），評価の目的である特性（性能や機能など）を計算する。ばらつきに対する強さの度合いを示す「SN比」，特性への影響度合いを示す「感度」の平均を水準ごとに算出し，これらを比較することでばらつきに強い設計パラメータとその水準を求める。

マツダが品質工学に取り組みを開始したのは1993年。テーマを決めた検討会などの活動を続けながら様々な車種に適用し，中でもアテンザでは大々的に品質工学を適用した。RX-8ではさらに適用領域を広げて展開。このサイドハウジングの鋳型設計への適用もその一つだ。

## まずは，ばらつきを抑える

以上の事例のように，ばらつきによって製品の性能や品質を低下させないようにする手法の一つとして品質工学が注目されている。加工誤差や，市場での利用環境のばらつきによって性能や品質は影響を受ける。理想的な状態で目標値を満たしても，それが製品として最適とは限らない。様々な設計パラメータはばらつくものであるということを念頭において，そのばらつきが製品の性能や品質に影響を与えにくくすることが大切だ。

品質工学のポイントは大きく二つある。「一つは，ばらつきの改善をまず終えてからチューニングすること。二つ目が直交表という考え方」（ミノルタ第1開発センター第1開発管理部課長研究員の高木俊雄氏）。

設計パラメータの中から，製品のばらつき改善に最も効果があるものと，その大まかな値を決める。次に，製品の性能や機能を満たすように，他の設計パラメータを変更していく——という順番だ。

基本的な設計が終わってから（設計パラメータを全部一度決めてしまってから），ばらつきの影響を抑えようとするのではない。ばらつきを抑えるための対策が他の性能や機能に悪影響を与える危険性があるからだ。

直交表は，設計パラメータ同士の組み合わせ方を工夫することで，すべての組み合わせを網羅せずに有効な結果を得るための方法。実験計画法（p.61の詳解キーワード参照）の中でも使われている。

品質工学では，性能に影響を与えにくい設計パラメータの水準（値）を見つけるために，それらの組み合わせに誤差の影響を加味して計算する。設計パラメータの水準ごとに，SN比と呼ばれるばらつきへの強さと，感度と呼ばれる特性への影響度合いの平均を算出。この二つの要因

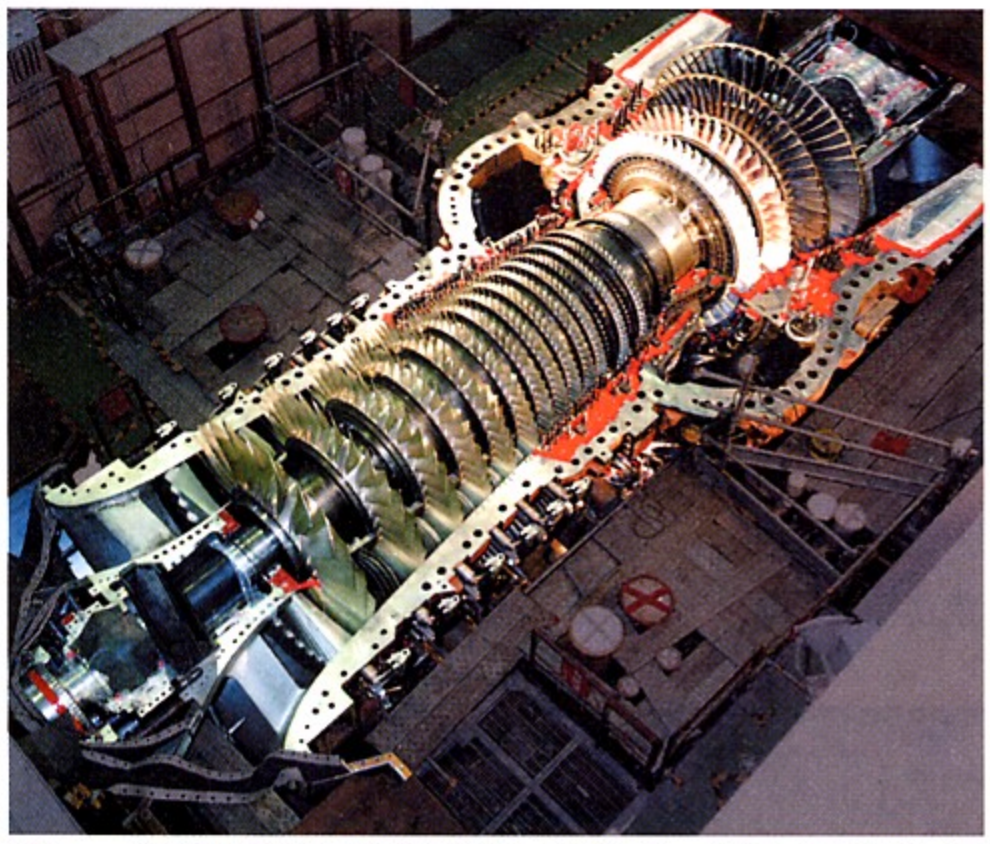

図4――三菱重工業が品質工学を適用したガスタービン。高効率化，コスト削減を実現するためにガスタービンの翼枚数は減少し，圧縮翼の幅は広くなってきている。その結果，従来より回避すべき振動モードが増えた。

効果図を見て，採用すべき設計パラメータと水準を選び出す（図3）。

この際，設計パラメータの数が多くなってくると実験（または計算）回数が膨大になってしまう。そこで，現実的な実験回数で有効な結果を得られるようにするものが直交表だ。すべての組み合わせは計算しないが，各設計パラメータの水準の出現回数や組み合わせ方はすべて均一になるようになっている。

## 機能向上でばらつきが顕在化

品質工学が必要となる理由は，製品の種類やメーカーの立場によって様々だ。例えば三菱重工業高砂製作所では，長期にわたる信頼性を確保するため，品質工学によるロバスト設計に取り組んでいる。同製作所の製品はタービンやポンプなど，長期的な信頼性を求められる製品がほとんどだからだ。

品質工学への取り組みは2000年に部分的な活動がスタートした。2001年からは設計/製造/品質の各部門から集まったコンカレントチームでロバスト性を含む品質の向上活動[*3]が本格化。このコンカレントチームは圧縮機，燃焼機といった要素部品単位で結成されている。

同製作所で最近品質工学を適用した事例としては，ガスタービン（図4）の圧縮機動翼の振動解析がある。近年，ガスタービンの高効率化を実現するため，圧縮機動翼ではワイドコード化（幅広化），薄肉化が進んでいる。同時に，コスト削減を実現するため翼の枚数減も進んだ。

その結果，共振しないように設計で考慮すべき振動モードが増えてきている（図5）。また，振動モードが発生する周波数の間隔も狭くなっている。

加工誤差が与える固有振動数への影響を従来通りだとすると，固有振動数を非常に狭い範囲に設計しなくてはならなず，設計の自由度は限定される。だからといって，加工精度を上げれば，コストアップにつながってしまう。

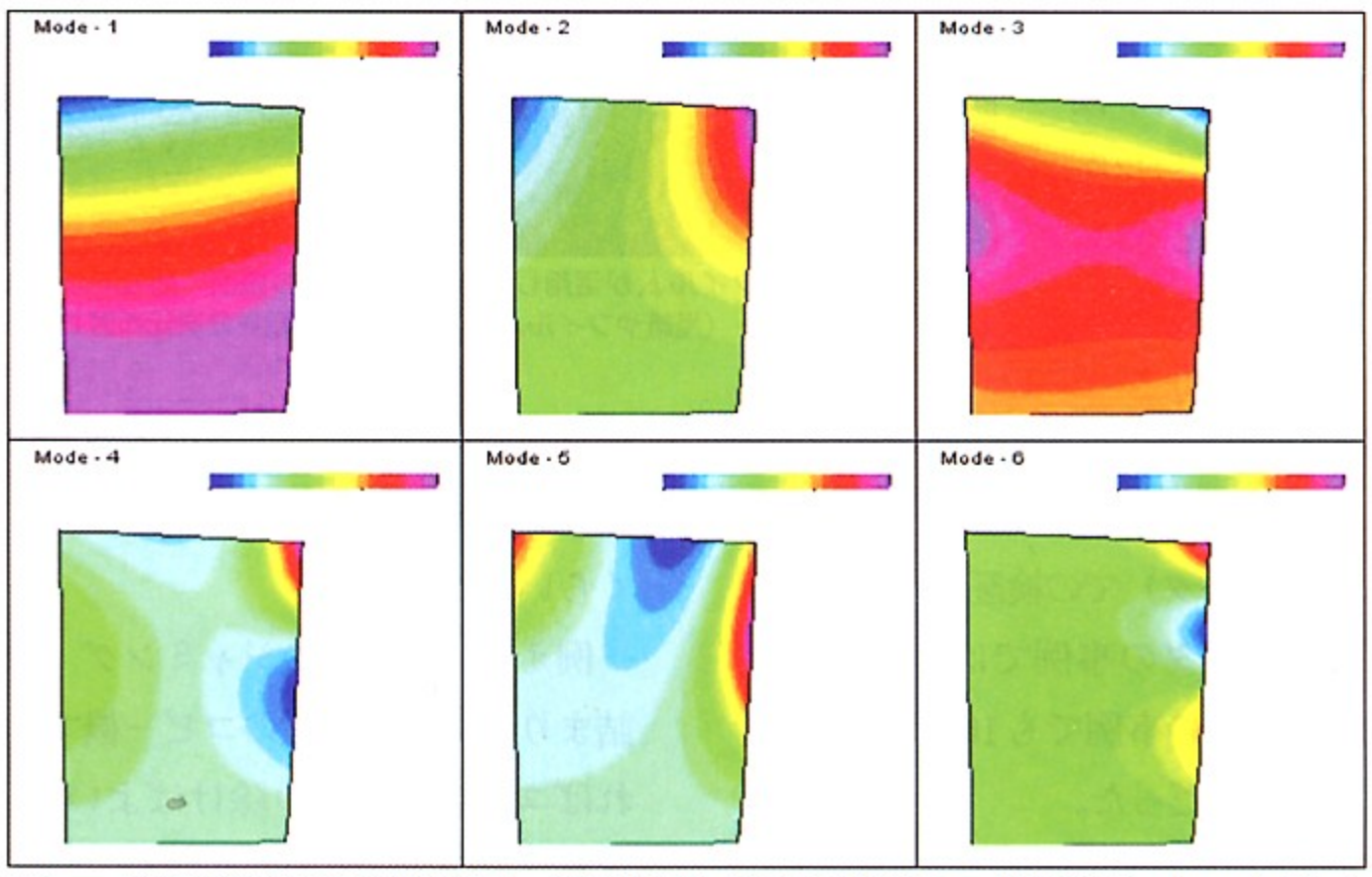


図5――圧縮機動翼の振動解析の結果。ここに示した六つの振動モードのうち，「mode-5」と「mode-6」（下段の中央と右）がワイドコード化によって新たに発生した。

＊3　正式名称は「機器信頼性向上活動」。

そこで品質工学を適用し，加工誤差が固有振動数に与える影響を小さくすることに成功。信頼性を維持したまま性能向上とコスト削減を実現した。

翼の根本から先端までを4等分した五つの断面それぞれの形状を決める寸法のうち，13個を設計パラメータとして選択。要因効果図から，SN比が最大となる水準を持つ設計パラメータは，最も根本に近い断面の二つの寸法と，その上の断面の二つの寸法と判明した。

それら四つの水準を初期条件から変えることで，振動数のばらつき（標準偏差）を7.5Hzから3.5Hzと53％減少できた。

限られた開発期間の中では，品質工学を適用できる課題が限られてくる。そこに，CAEを利用する価値が生まれる。

富士写真フイルムが品質工学とCAEを組み合わせるようになった経緯を見てみよう。同社の写真プリンタ[*4]や医療用画像処理装置といった製品は，顧客にとって業務に無くてはならない位置づけ。そのため，求められる信頼性が工場の設備と同じくらい高い。

例えば，同じ紙のジャミング（紙詰まり）でも，一般のコピー機であればユーザーが取り除けばよいが，写真プリンタでは故障扱いとなる。場合によってはサービスマンが来て処置するまで顧客の業務が止まる。基本的にあってはならないことだ。

同社で品質工学への取り組みが始まったのは6～7年前。1999年には医療機器において2次元の搬送シミュレーション（図6）と品質工学を組み合わせた[*5]。それ以前は，「直交表を使って実験しており，数カ月かかることもあった」（富士写真フイルム宮台技術開発センターの渡辺一哉氏）という。

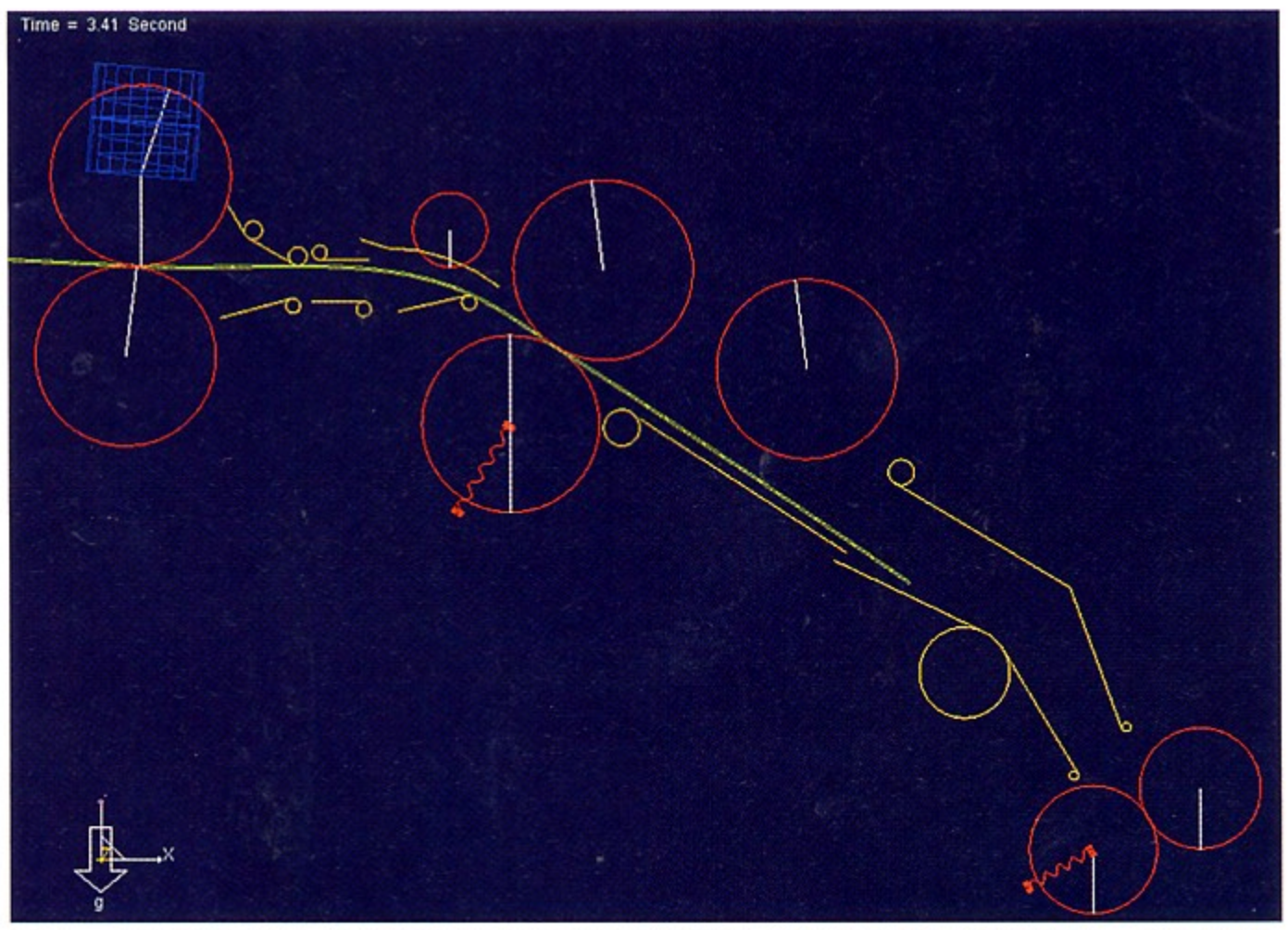


図6――富士写真フイルムが活用している機構解析の画面。同社では市販の機構解析ツールを活用して，様々なペーパー（用紙やフイルムなど）の搬送挙動を2次元断面で解析している。

きっかけは，ある製品での不具合発生だった。その試作段階で，品質工学を適用していなかった部分で問題が起きた。品質工学を適用して開発していた部分があっただけに，簡単には設計変更できない。

## CAEによって品質工学が強くなる

品質工学の実践には様々な条件（パラメータ）での検証が必要だ。例えばマツダの事例では200回以上，三菱重工の事例でも100回以上の計算が必要だった。

このような回数を実物で実験していては時間・コストがかかりすぎる。

しかし，開発期間は限られており時間がない。たまたまその当時，市販の機構解析ツールを活用した搬送シミュレーションが完成しており，実験の代わりにそれを適用。1週間で解決策を決定できた。

その後，医療機器部門が品質工学

＊4　写真プリンタは，ミニラボシステムとも呼ばれる。デジタルカメラの画像を印刷するだけでなく，ネガやリバーサルフィルムの画像をスキャナでデータ変換し，レーザにより銀塩カラーペーパーに焼き付けて現像処理する機能も持つ。

＊5　当時は「ADAMS」（米MSC.Sftware社），2001年以降は「RecurDyn」（韓国FunctionBay社）を使用している。

とCAEを組み合わせることで大きな効果を得たという噂を聞いて，他部門がCAEを導入するに至った。写真プリンタの部門では，品質工学を適用して実験ベースで検討し始めていた課題に，CAEを適用してみたところ，数週間のトレーニングで同等の効果を出せるようになった。

しばらくCAEと実験の両方を用いる時期があったが，2001年からはCAEベースだけで課題を解決できるようになったという。さらに，CAEを使わないとだめだと考え方が変わっていった。

CAEで定量的に正確な評価は難しいが，定性的な評価は比較的妥当な結果を得られる。品質工学では基本的に様々な設計パラメータを比較できればよいからCAEに向く。

また，品質工学では設計パラメータを意識的にばらつかせる必要がある。場合によってはそれを実物で再現するのは難しいが，CAEであればある程度の無理は利く。その意味でも，CAEは品質工学に向いていると言える。

## パラメータの選択がカギ

品質工学を利用する際には，設計パラメータ（制御因子）をどうとるか，誤差因子は何なのかを決めることが非常に重要。多めにとれば，必要なパラメータが漏れる危険性は低くなるが，多すぎては検証に時間がかかりすぎる。適切なパラメータの選定には，その製品に関する技術力が不可欠だ。

マツダが中子の位置精度に大きく影響する要因として八つの設計パラメータを選んだ際も，「実際にはこの倍以上の因子を検討した」（マツダパワートレイン技術部第2素材技術グループの垣田健氏）。鋳造に関するベテラン技術者などと相談しながら，絞り込んでいった。

三菱重工の圧縮機動翼の設計パラメータは形状を決める寸法だったが，具体的にどの寸法とするかは，次のような方法で決定した。

まず，設計パラメータの数と振動数のばらつき（標準偏差）の相関関係を全モードについて調査した。その結果，13個程度の設計パラメータを使用すれば全モードの振動数の標準偏差を推定できると判断し，感度の高い13因子を選んだ。

CAEを活用する際は，設計パラメータを微小変化させて誤差因子とする場合が多いが，設計パラメータとは全く異なる誤差因子となることもある。

例えば，富士写真フイルムが業務用の写真プリンタの開発で品質工学を適用した事例を見てみよう。媒体（カラー印画紙）のカールによって露光ムラが発生してしまうという現象がある。そこで，カールによるば

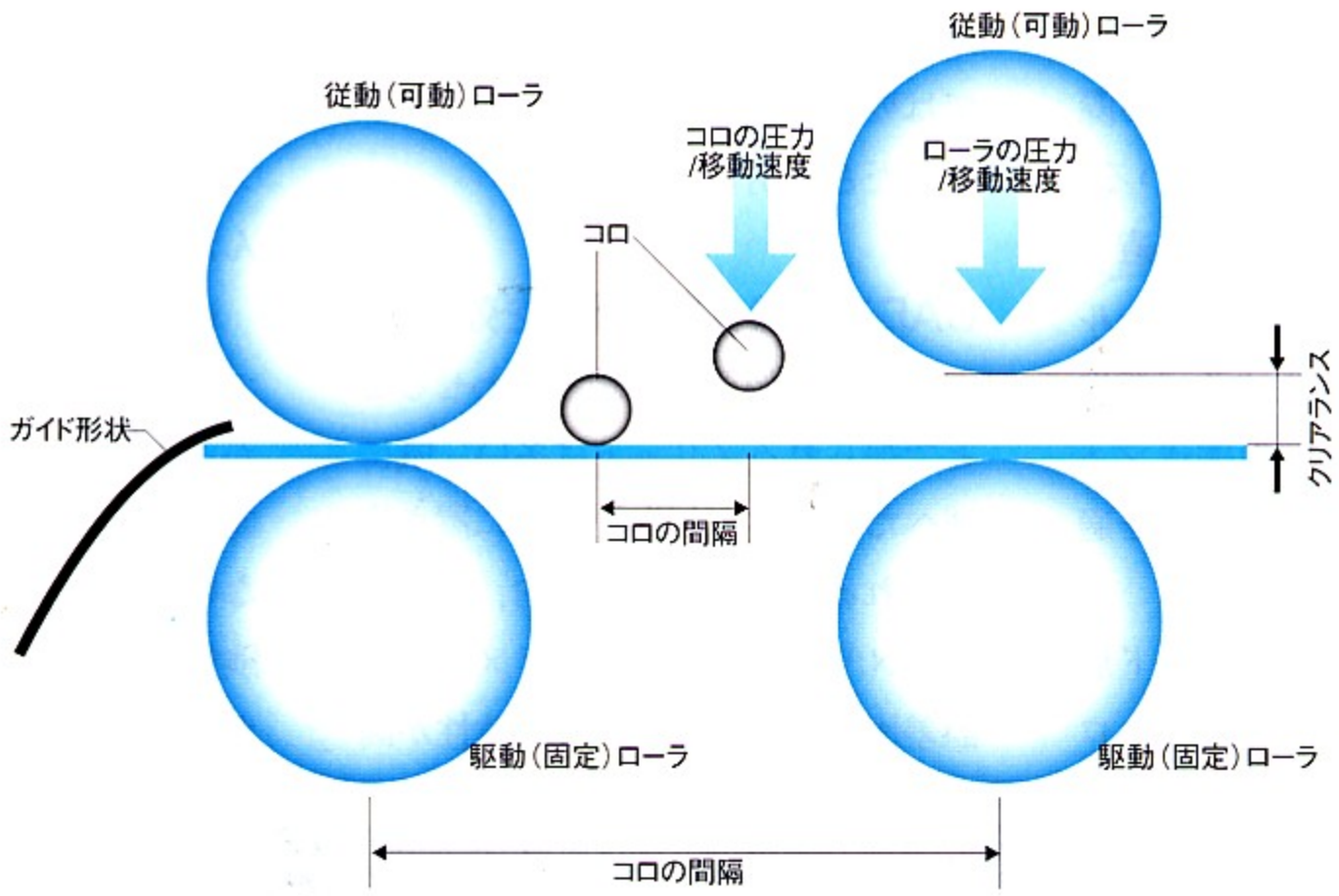


図7——副走査搬送機構の模式図。ペーパーにカール状態（そりや巻きぐせ）があった場合でも露光ムラが発生しない（露光位置でのペーパーの浮き量が小さくなる）ように，カール状態の変化に強い設計を見つけだすのが目的だ。

らつきがあっても，ムラが発生しないような設計を目的とした。

露光場所がある副走査搬送機構（図7）は，2対のニップローラ（下が駆動，上が従動）によってペーパーを搬送。ローラとローラの間でレーザ走査によってペーパーを露光する。

この機構では，ペーパーの先端と後端で起きる負荷変動による露光ムラを防ぐため，従動側のニップローラを先端もしくは後端が通過する際に待避させるように制御している。しかし，このニップローラが待避してペーパーを解除した時に，カールによって露光ムラが発生する可能性もある。そこで，2次元の搬送シミュレーションを使った品質工学を適用した。

設計パラメータとしてはガイド形状，コロの間隔，ローラの間隔，ローラの圧力，コロの圧力，ローラの移動速度，コロの移動速度クリアランスなどを選択。誤差因子は，下向きにカールする「巻きぐせ」と，乾燥時の乳剤による収縮によって上向きにカールする「そり」という2種類とした。

これは，品質工学を適用する目的として，「カールの状態が影響を与えて露光ムラとならない」という明確な目的があったためだ。この事例では要因効果図から，コロの圧力が重要だと判明している。

## CAEでの繰り返し計算を効率化

CAEと品質工学を組み合わせることで得られるメリットは多い。既に述べたように，実験をCAEに置き換えられることによる時間的，コスト的なメリットや，設計パラメータや誤差因子の設定における柔軟性が高いことなどがある。

CAEではさらに，繰り返し計算を自動実行することで効率化できる。様々なパラメータでの解析モデルの作成や計算の実行，結果の集計などを自動化するツールを使う。

例えば三菱重工では，最適化支援ツール「iSIGHT」（米Engineous Software社）の導入により，品質工学に伴う計算の大幅な省力化，効率化を実現した。前述の動翼の設計では合計108回[*6]の振動解析を実施しているが，実行時間は約10時間で済んだ。

iSIGHT導入以前は，直交表に基づいて手作業で入力していた。手間がかかるばかりか，入力ミスなど人為的なミスが発生する可能性も低くない。iSIGHTによって，これらの危険性を回避でき，作業を効率化できた。

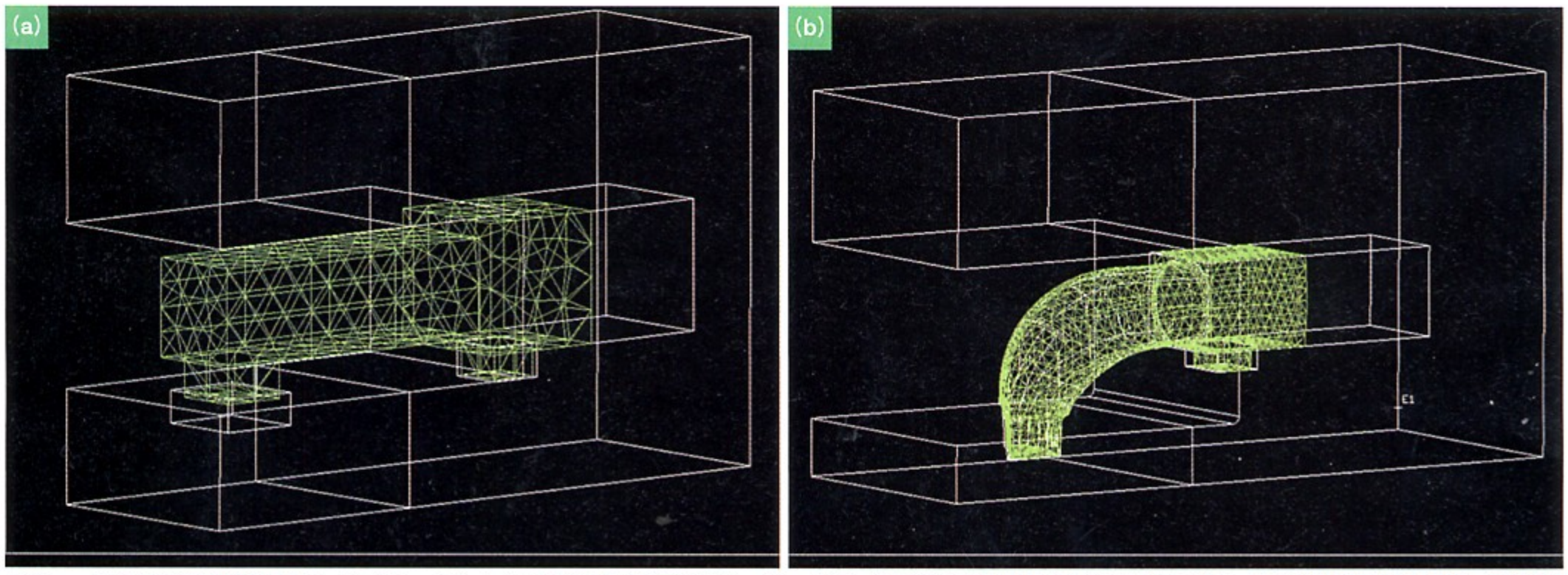


図8――約4万要素の簡易化したメッシュ（a）と約10万要素の詳細なメッシュ（b）。必要最小限の形に簡略化することで，解析の計算時間を短縮。200回以上の繰り返し計算を限られた期間内で完了することができた。

＊6　設計パラメータ（制御因子）を割り振ったL27直交表×誤差因子を割り振ったL4直交表の積となる。

このようにCAEを活用することで多くの計算回数に抵抗無くチャレンジできる。実は冒頭で紹介したマツダの事例では，設計パラメータの数の割には計算回数が多い。それは，誤差因子の扱い方が一般的な方法と異なるからだ。

通常，品質工学では誤差因子の調合ということが行われる。これは，誤差因子の定性的な傾向を把握できる場合，類似の誤差因子をまとめるものだ。これにより，計算回数を少なくできる。

しかし，マツダの事例ではその傾向が不明確。つまり，誤差因子をどちらに振れば寸法が大きくなるのか，これらを組み合わせた場合に影響が逆になることはないのか——といったことが不明だった。

このため，すべての誤差因子の組み合わせを計算できるように 直交表に割り付け，信頼性を高めた。誤差因子の組み合わせだけで12通りある。

結果，設計パラメータの組み合わせ（18通り）に対して，標準条件（誤差なしの場合）と誤差条件12回をそれぞれ実施し，合計234回の計算を実行する必要があった。

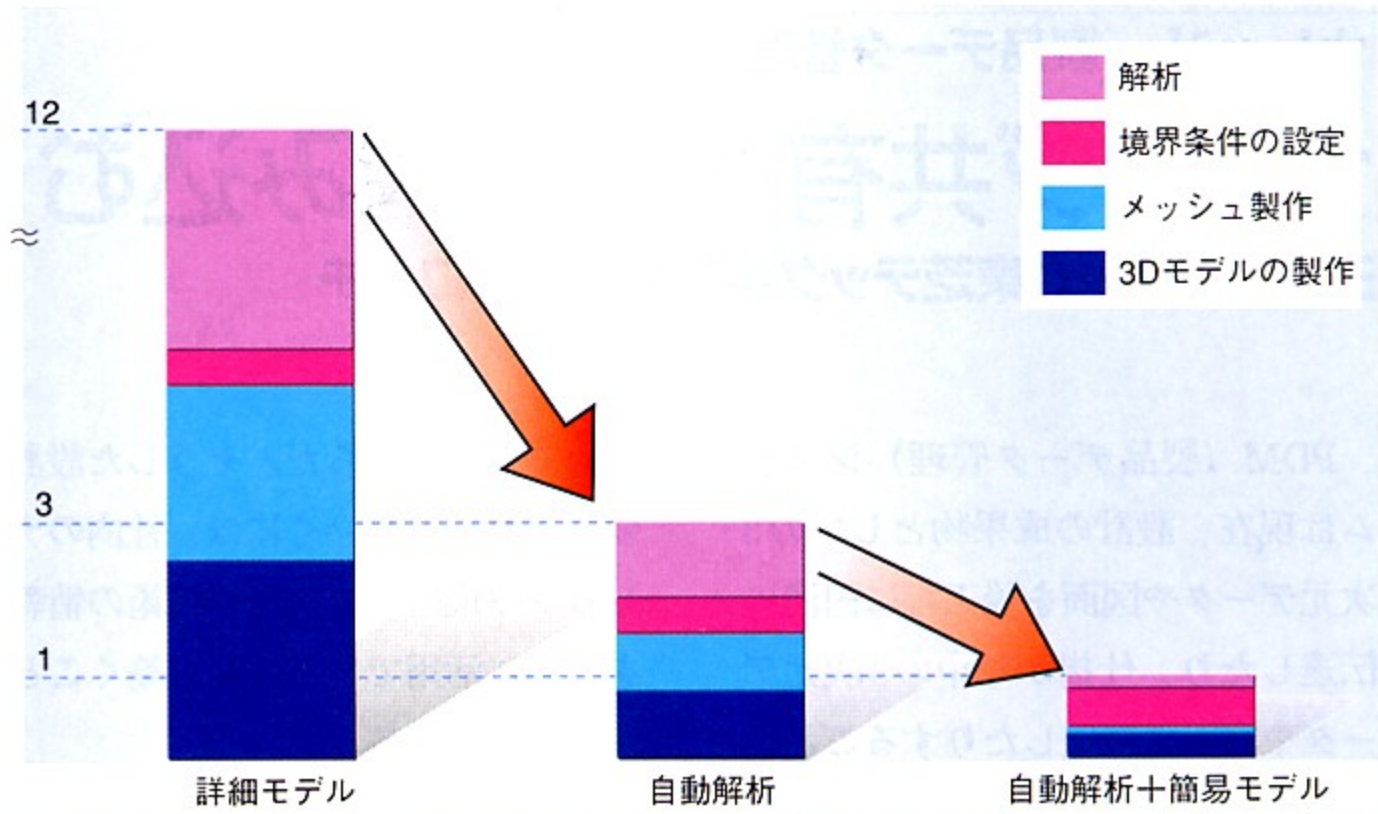


図9——マツダの解析時間の比較。自動解析によって40分の1，簡易モデルによってさらに10分の1に解析時間を短縮している。

## 簡易モデルで期間短縮

今回は線形静解析だったが，直交表に従って，234回も解析モデルの作成・実行，データ処理などを行っていては膨大な時間がかかる。このためマツダでは，iSIGHTを使った解析プロセスの自動化と，解析モデルの簡易化によって解析期間を短縮している。

モデルの簡易化では，約10万要素の詳細なモデルを約4万要素の簡易モデルにした。（**図8**）。もちろん，最終的には詳細モデルでの計算も実行し，結果に大きな差がないことは確認した。

形状を簡易化しても効果を得られることは，詳細な形状が決まっていない段階でも適用可能なことにもつながる。基本的な形状さえ決まっていれば，簡易モデルは作成できるからだ。

このような工夫によって，詳細モデルと手動を組み合わせた場合と比較して，解析プロセスの自動化によって40分の1，解析モデルの簡易化によってさらに3分の1に解析期間を短縮（**図9**）。合計で，手作業による計算工数を120分の1にすることができた。

＊　＊　＊

品質工学は，田口玄一氏〔(オーケン（本社東京）社長〕が考案した手法のため，タグチメソッドとしても知られている。

品質工学の適用範囲は生産技術分野での適用から始まり，製品設計，さらには研究開発へと広がってきている。間違った使い方をしては効果を得られないが，とにかく取り組んでみることが大切なはずだ。

**参考文献**

(1) 浜田「Zより過激なRX-8の中身」，『日経メカニカル』，2003年2月号，pp.49-53，解説。