

1DCAEと計算工学

(独) 産業技術総合研究所

手塚 明

Dec. 1, 2011

(1) 設計対象のより高度な複雑化及び新規化

設計対象が機能・構造的に複雑化し、システム思考やメカ/エレクトロ/ソフト(制御)協調が必須に。一方で、設計対象の複雑化のため、設計出戻りの負担・ダメージも増大。

(2) 設計対象への要求基準の高度化

PL法等の社会的な背景により、経年変化を考慮した安全性等の担保がますます要求されるようになった事。

(3) アジア諸国の追い上げ

一定の信頼性のものを安く製造し儲けるビジネスモデルでアジアが急迫。設計上流で高付加価値化する必要性。

(4) 他社部品の採用増加

海外展開等で、他社部品の採用が増加。ブラックボックス的な部品採用には要求仕様記述がしっかりしている事が必要。

(5) 設計匠の限界

設計匠の定年と応用力伝承の必要性。一方で、従来の設計匠自体もハンドリングできない設計対象の複雑化。

(6) CADやCM(計算力学)の援用

CADやCM援用により、一部の現象について、設計形状の性能を具体的な提示可能に。一方、これら欧米発の個室的ツールが日本型の「大部屋」「わいがや」設計の流れを阻害する傾向。

周辺状況

(3) アジア諸国の追い上げ

(2) 設計対象への要求基準の高度化

(4) 他社部品の採用増加

設計対象

(1) 設計対象のより高度な複雑化及び新規化

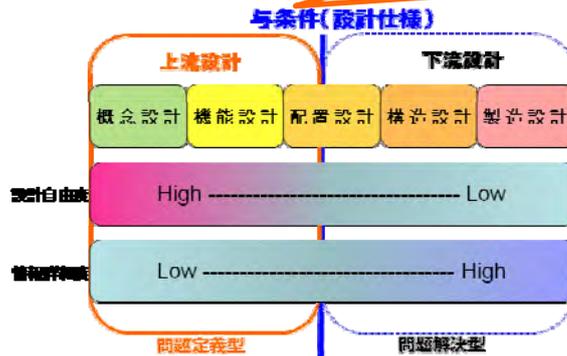
(5) 設計匠の限界

(6) CADやCM(計算力学)の援用



これらは上流設計での課題に起因する

海外向け「機能割切り&低価格」製品の仕様



顧客の潜在ニーズ把握が難しい

設計上流で設計仕様(与条件)を広く探索し決定するための見通し力向上

海外工場へのシフトが進む中で難しくなっている

設計匠の応用力の伝承 DBでは応用力は付かない

【顧客設定の見通し力】潜在的顧客

上下関係なく議論できるのが重要

【工程の見通し力】逆問題+制約条件

【時間の見通し力】将来想定

【相互の見通し力】情報共有

設計が実現可能かどうかは周辺技術に左右される

異分野の衆知を集めるのが重要

【情報の見通し力】情報爆発・情報抽出

【システムの見通し力】全体機能把握

異分野の共通技術が重要。←見えにくい。

重要なポイント。肝掴み説明ソフトが欲しい

全体機能把握と部品仕様決定が重要

(1)製品設計の組織能力の安定的向上

製品設計の組織能力は製造と異なり、年々、蓄積による向上がなく、不安定。成功事例を栄養にし、組織能力低下の歯止めをかけ、年次的に向上させていく仕組みが必要。

(2)チーフデザイナーを活かす仕組み

チーフデザイナーとその「言葉」(概念)を展開するチームがうまく使える「わいがや」「大部屋」的なツールが必要。

(3)メカ・エレキ・ソフト(制御)の部署割り思考の打破

メカ・エレキ・ソフト(制御)がうまく組める仕組みが必要。特に、ソフト(制御)も最初から議論に加わり、最後にツケがないようにするのが重要。

(4)オーバーフロントローディングの回避

過剰装備でオーバーフロントローディングにならずに、概念の展開が収束しそうか、解があるかどうかを確かめるツールが必要。

(5)バーチャルとリアルを行き来する仕組み

ファッションでは、チーフデザイナーのある「言葉」を元に、複数のスタイル画を壁に貼り、中央のデスクには複数の布を置いて、良さそうな布を切り取りスケッチにあてがったりして、バーチャル・リアルを行き来しつつデザインを決める。

(6)日本型「わいがや」「大部屋」に合うツール

欧米流個室型ツールではなく、日本型「わいがや」「大部屋」に合うツールが必要

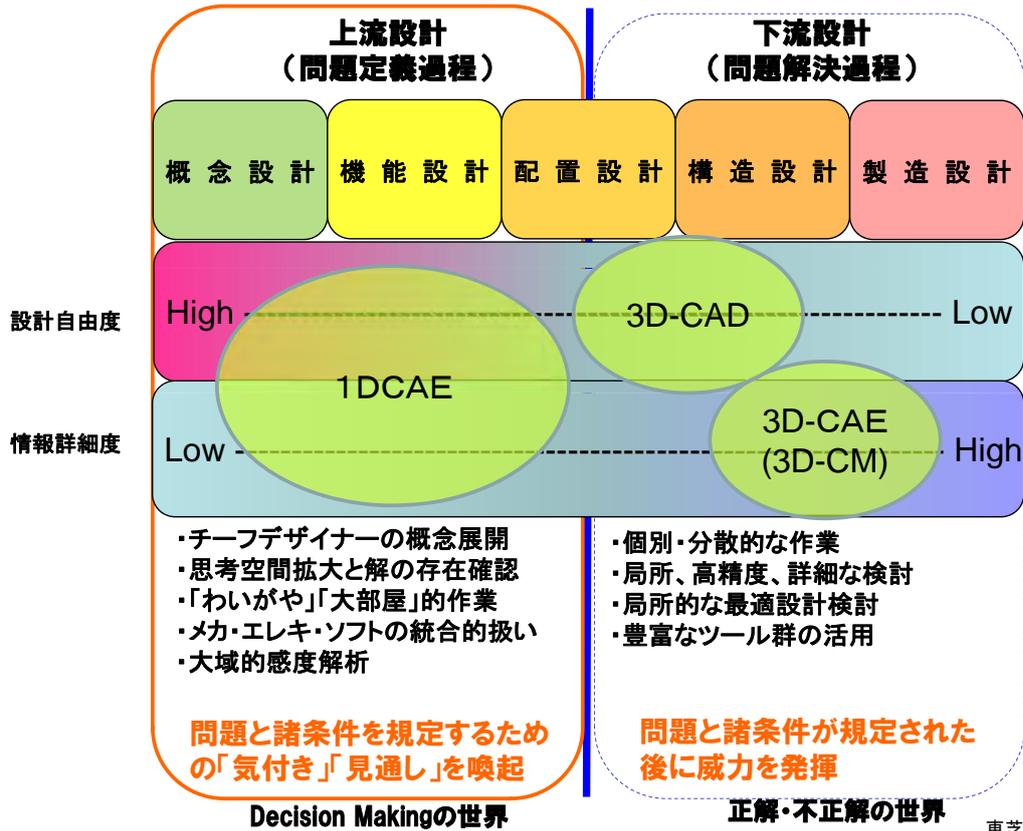
設計組織

- (1)製品設計の組織能力の安定的向上
- (2)チーフデザイナーを活かす仕組み
- (3)メカ・エレキ・ソフト(制御)の部署割り思考の打破
- (4)オーバーフロントローディングの回避
- (5)バーチャルとリアルを行き来する仕組み
- (6)日本型「わいがや」「大部屋」に合うツール



これらを解決するツール(考え方)が欲しい!

与条件(設計仕様)



東芝 大富氏のスライドを基にした

0. 応用現場でのニーズ

- 1) 直ちに“精緻な計算”ではなく → まずは概略を知りたい
- 2) 厳密な解より → “様子”やメカニズムを知りたい
- 3) 一つの状態を領域的に詳細に知ることよりも
→ 系全体、システム全体を把握したい
- 4) 安定している状態よりも → なぜ不安定になるかを知りたい

ファーストオーダー・アナリシス

シニアフェロー

菊池昇



コンピュータと通信技術の飛躍的な進展から生まれたIT革新の時代。

複雑系を相手にしてしまう今の時代とは逆行し、単純明快簡略化することで物事を捉えるという古く経験豊かな概念。IT技術で古さをコーティングし斬新さを装う。

昔ながらの設計者には当たり前のこと。それを若い設計者に使って貰いたい。FOA (ファーストオーダー・アナリシス)。対象が複雑であればあるほど、使える機器が精密であればあるほど、中りを上手くつけることが出来なければ、意味の無いデータの山。その中りを、個々の勘や経験だけではない方法でつきたい。多くの勘と経験を積み重ねたい。組織化したい。そのためのFOA。

個々の設計者が学習と発展が出来る方法。この考え方を古典的な機械や構造物の設計分野で実験的に実践したい。

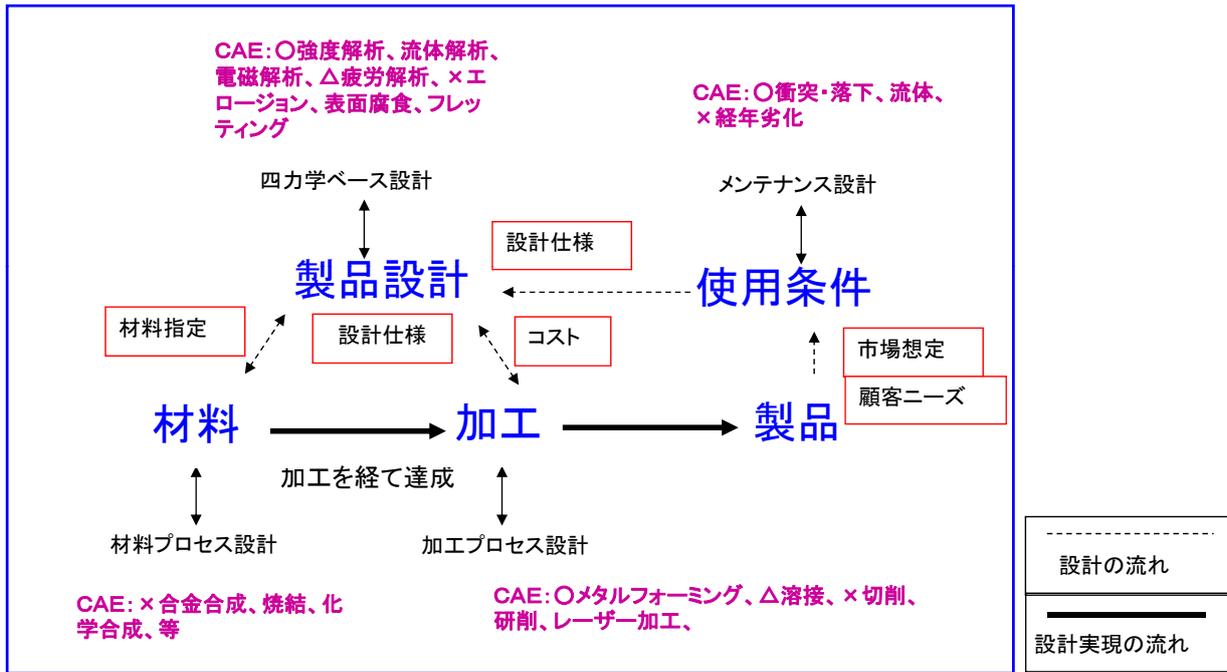
菊池昇、「特集：ファーストオーダーアナリシス」、豊田中研R&DLレビューVol.37 No.1(2002)より

1D-CAEのイメージ

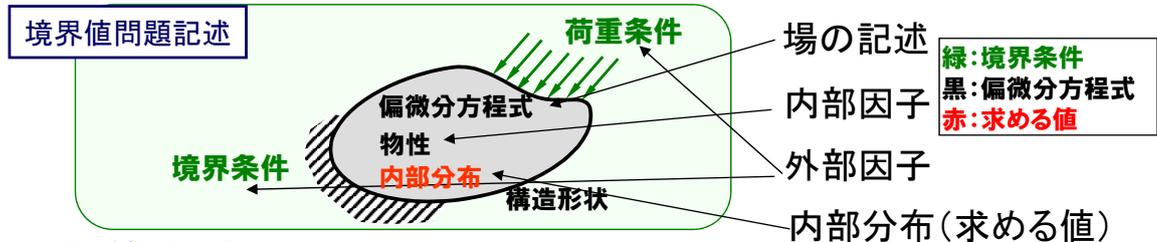
企画CAEとは

燃費・性能・排気性能を高度に両立させる企画パラメータの最適化





連続体力学ベースCAE(計算力学)の守備範囲は限定的
 分子動力学ベースCAE(計算科学)は実用に必要な計算規模が担保されていない。
 以下、連続体力学ベースCAEをCAEと呼ぶ。



計算力学
 =境界値問題を近似的に解く方法

境界値問題
 =偏微分方程式+境界条件

計算力学の汎用性とはどういうことか?

- 構造形状、材料係数(偏微分方程式に関連)
 荷重条件、支持条件(境界条件に関連)
 の設定が自在であること
- 偏微分方程式を変えても数値手法が共通に使えること

計算力学の守備範囲拡大が求められている問題

- ・複数の現象が連成している問題
- ・複数の空間スケールの現象が連成している問題

連成の形態

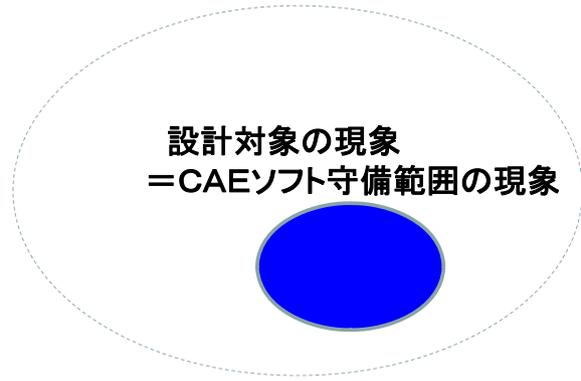
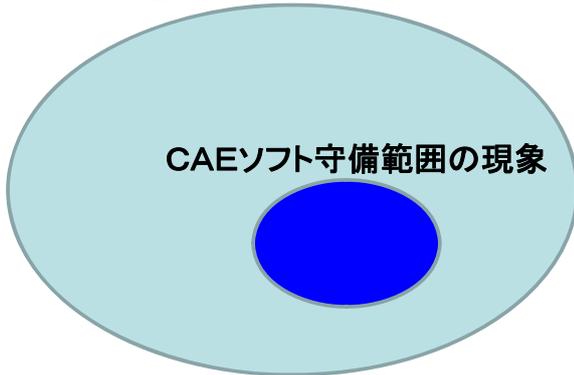
- ①支配方程式が連成する場合(複数の支配方程式で変数を共有する場合)
- ②境界・荷重条件を通して連成する場合
- ③物性への影響を通して連成する場合

連成形式の例

	複数の現象の連成	複数の空間スケールの連成
支配方程式の連成	流体の支配方程式と移流の支配方程式が連成した二相流解析	
境界・荷重条件を介しての連成	熱応力を考慮した構造解析	ミクロスケールとマクロスケール間で均質化係数を介して数値的的材料試験を行う均質化法
物性を介しての連成	粘性の温度依存がある流れの熱流体解析	

部位	機能	現象	現象の主な評価手段	CAE/実験のタイプ	評価パラメータ	評価手法	他の機能・現象との干渉関係	備考
タービン最終段	ロータ軸と翼の結合部(植込み部)	フレTTィング疲労	・CAE & 実験	(CAEの場合) 市販CAE(接触解析) (実験の場合) 標準試験/モックアップ	・接触端部の応力 ・相対すべり量	・流体振動を考慮した構造解析 ・縮小モデルモックアップ	・環境(温度、湿度、腐食成分) ・翼振動 ・遠心力	
		腐食	・実験	・標準試験	・腐食深さ ・SCC有無	・浸漬試験 ・板曲げ試験(CBB)	・表面処理 ・翼振動	
		構造強度	・CAE	・市販CAE	・許容応力比	・遠心場における応力評価	・振動 ・環境 ・加工公差	
	翼有効部	翼性能	・CAE & 実験	(CAEの場合) 市販CAE/自社製CAE (実験の場合) モックアップ	・流力特性	・流体・構造連成解析 ・縮小モデルモックアップ	・上流側、下流側の各種構造	
		水滴エロージョン	・CAE & 実験	(CAEの場合) 市販CAE/自社製CAE (実験の場合) 噴霧試験、スピニング	・衝突速度角度 ・水滴量 ・減肉量	・水滴の経路解析 ・衝突解析 ・エロージョンシールド材との関係	・上流ノズルとの距離 ・湿度 ・蒸気環境	
		振動	・CAE主体 ・実験 ・最終的に実サイズ回転試験	(CAEの場合) 市販CAE (実験の場合) 単翼および群翼モックアップ	・共振周波数 ・振動モード ・減衰量	・定格回転数での離調 ・過渡時の振動特性 ・制振構造(タイワイヤ、シュラウド等)	・蒸気特性 ・上流ノズル構造 ・植込み部構造	
		構造強度	・CAE	・市販CAE	・許容応力比	・遠心場における応力評価	・振動 ・環境 ・加工公差	

設計対象の現象



広義のCAE = 設計対象の現象を何とか扱う

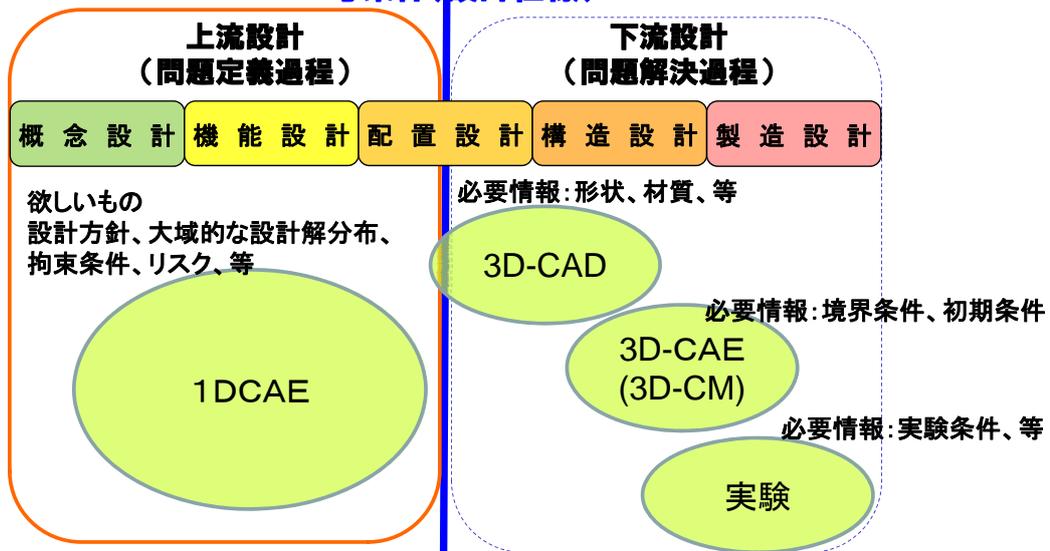
狭義のCAE = CAEソフト守備範囲の都合で設計を考える

1DCAEでは基本的に広義のCAEの立場を取る。

しかし、実験と計算力学をどのように連成させるかは大きな課題。未だ統一的方法論はなく、現状では問題に応じた注意深い検討が必要。

ここでは、狭義のCAEの立場の範囲で、3D-CAEをどのように使うかを主に議論し、広義のCAEに3D-CAEをどのように使うかは一部の事例を示すにとどめる事とする。

与条件(設計仕様)



設計の方針を立てたい。

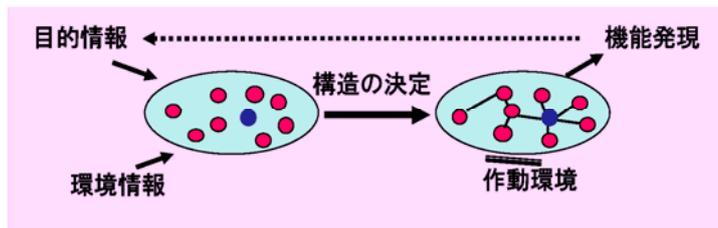
そのために、大域的な設計解分布が知りたい。

計算・実験の条件が欲しい。

3D-CAEは1DCAEに使えるのか？どのような工夫をすれば使えるのか？

シンセシスの問題とクラス

シンセシスの問題 “機能(目的)から構造(行動)へ”:
設計主体の目的を満たす機能が作動環境下で発現する設計対象の構造決定問題



しかし、目的や環境に関する情報は事前に完全に知りうるだろうか？

- ▶ クラスI: 目的および環境に関する情報が完全であるため、設計対象を閉じたシステムとして記述可能となる。**最適解探索が中心課題**
- ▶ クラスII: 目的情報は完全であるが、環境情報が未知あるいは変動するため、設計対象は環境に開いたシステムとなる。**適応的解探索が中心課題**
- ▶ クラスIII: 目的情報が不完全であるために、設計対象は設計主体に開いたシステムとなる。目的確定と解探索がカップリングする。**共創的解探索が中心課題**

© Kanji Ueda

7

本来は顧客ニーズと設計、コトづくりともものづくりの関係議論のための概念であるが、ここでは上流設計と下流設計との関係の議論に援用

← 下流設計

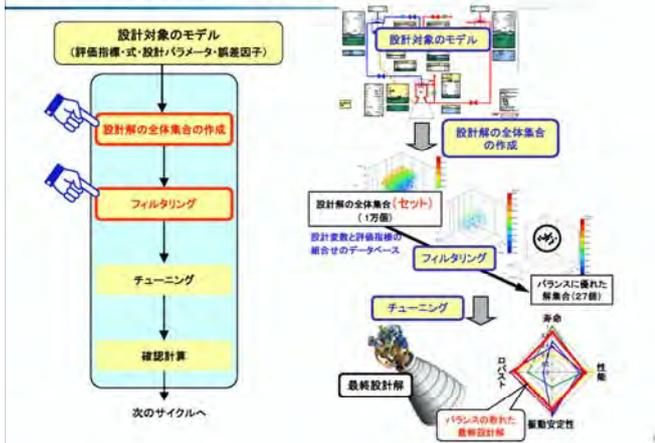
← 下流設計ベース
← 下流設計

← 上流設計

上田 次、 「ものづくりの価値創成一クラスIIの根拠無き成功体験からの脱却を」、COCN「グローバルもの(コト)づくりWG2「コトづくりを意識したものづくりにおける新しい価値の創生」第5回会議 講演資料から(2011)

1DCAEと3D-CAE; 共創的解探索の事例1

セット・ベースド・デザイン(SBD) フロー



(株)IHI ものづくり改革推進本部 呉 宏堯様講演資料より

【事例】
フィルタリングで設計解の選定理由が見える化。円滑な合意形成が容易

初期 10000個設計解
どの点でも推力98kNのエンジン
(セット・ベースド・デザイン)

設計解の全体集合 (1万個)
設計数と評価指標の
組合せのデータベース

フィルタリング

チューニング

バランスに優れた
解集合 (27個)

最終設計解

パラメータの優れた
最終設計解

高品質な設計解
バランスに優れた
設計解 (27個)が残った

制約条件フィルタリング
超臨界燃焼 (高周波安定)
+ポンプ改修リスク小

制約条件フィルタリング2
インジェクタ温度250K以上
(高周波安定)

高信頼化フィルタリング
寿命、低周波安定性、SN比

トリミング特性フィルタリング
オフィス調整代確保で
最終フィルタリング

選定された設計解
- 寿命キープ
- 性能キープ
- 安定性キープ
- ロバストキープ

性能を少しだけ犠牲にすれば、他の特性がゲンと改善する設計解が見つかった。

設計思想が見える・残る仕組み。
要求条件と制約条件を最後に使うので、条件変更時の後戻りが少ない。
(数学モデルの再計算が不要)

10000個の設計解の母集団から、制約条件やロバスト条件でフィルタリングすることで、状況に応じた適切な解が得られる。

Copyright © 2011 IHI Corporation. All Rights Reserved.

設計開発現場におけるセット・ベースド・デザインの活用



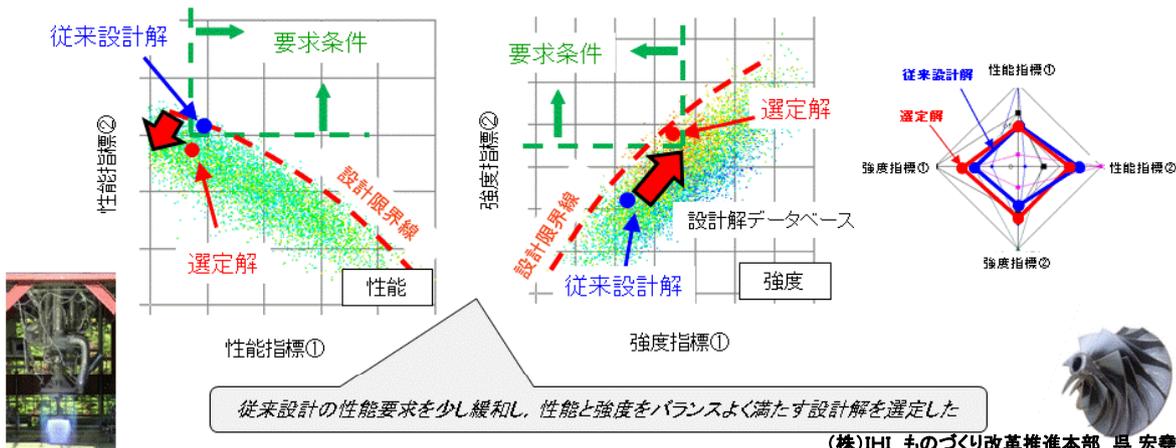
- ・従来設計(試行錯誤設計)の約半分以下の時間で、従来設計と同等以上の設計解が得られた。
- ・設計限界を見極めて、選定した設計解が性能と強度のバランスが良い解であることを示せた。
- ・要求条件が変わっても、設計解の選び直しは容易。
- ・大量の設計解を求めようとすることで、設計プロセスが固定化(標準化)。

⇒ 1万個(*)の設計解は、設計開発現場では無駄ではないという実感

(*) 非常に多いという意味

【セット・ベースド・デザインが目指す設計プロセス】

1D-CAE + 計算自動化で設計解は常時計算・データベースへ蓄積。実工事では設計解を都度“求める”から“検索する”へ。

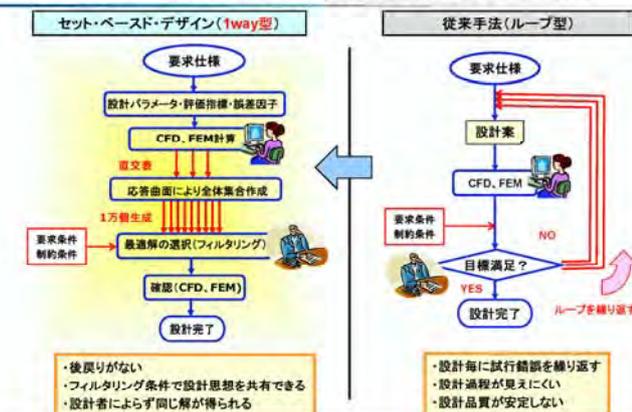


従来設計の性能要求を少し緩和し、性能と強度をバランスよく満たす設計解を選定した

(株)IHI ものづくり改革推進本部 呉 宏亮様講演資料より

計算と思考の分離。計算しながら考えるから、考えることに集中

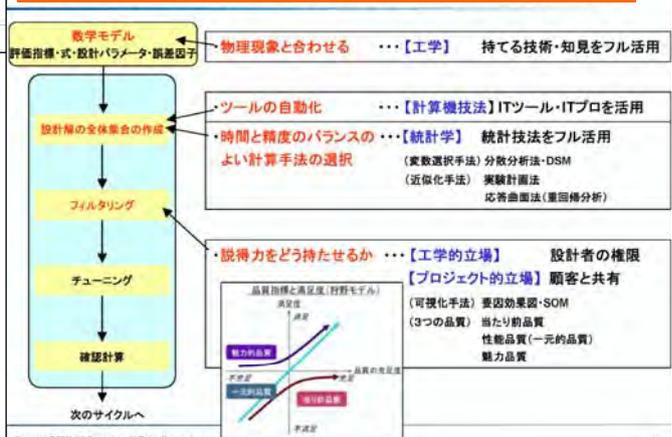
(株)IHI ものづくり改革推進本部 呉 宏亮様講演資料より



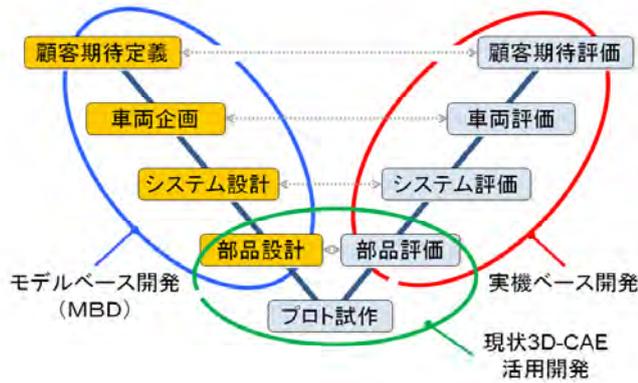
- ・後戻りがない
- ・フィルタリング条件で設計思想を共有できる
- ・設計者によらず同じ解が得られる

- ・設計毎に試行錯誤を繰り返す
- ・設計過程が見えにくい
- ・設計品質が安定しない

SBDのポイント - 設計者の工夫のしどころ・知恵の使いどころ -



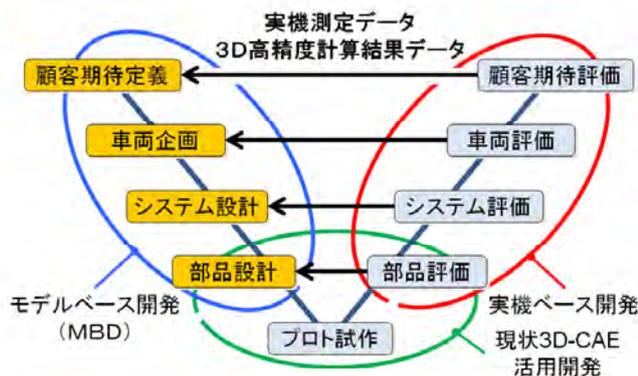
車両開発プロセス



車両開発プロセス
～車両開発プロセスとCAE活用～

プロセス	定義	活用CAE
車両企画	-顧客要求→車両、システム機能要求へのブレークダウン -車両企画(諸元)最適化	物理・統計モデル
システム設計	-システム機能要求→部品機能要求へのブレークダウン -システム機能最適化	1D-CAE
部品設計	-部品機能最適化 -部品機能試作前評価	3D-CAE

実機、3D-CAEの設計上流での活用



実機、3D-CAEの設計上流での活用

プロセス	実機測定、3D-CAE結果	モデルベース開発での活用 (1D-CAE, 物理・統計)
顧客評価	製品車での市場評価 (燃費、性能、音...)	顧客期待、要求 (Rating) データベース→期待値定義
車両評価	試作車両でのシャシ台計測 (燃費、性能、音)	車両性能目標設定 車両全体系ベースモデル
システム評価	エンジンのベンチ計測 (エンジン燃費、性能、音)	エンジン性能目標設定 エンジン全体系ベースモデル
部品評価	部品単体計測 詳細3D-CAE計算結果	3D-CAEモデル、結果、計測値 →1D縮退モデル(高精度)

車両企画段階での燃費、音、走りの最適化
～モデルの分類～

モデルの分類	説明	例	現状用途
①物理モデル	物理的現象、法則を表す数式モデル。設計パラメータは寸法ではなく、特性値「仮説」モデルを含む	ナビエ・ストークス 「乱流」「燃焼」「反応」「気泡」	制御開発
②統計モデル	実験式または、物理式(係数=実測同定)との混合	重回帰式	
③1次元離散化モデル	3次元寸法→1次元で表現(径、長さ、面積、容積...)形と境界条件を与えることにより「支配方程式」を解く	・ナビエ・ストークス ・運動方程式	ハード骨格設計
④3次元離散化モデル	3次元形状と境界条件を与え、直接的に「支配方程式」を解く	・ナビエ・ストークス ・運動方程式	ハード詳細設計

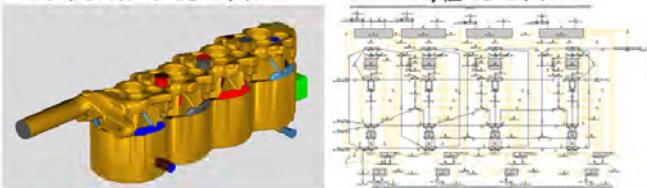
トヨタ自動車(株) エンジンプロジェクト推進部 沢田龍作様講演資料より

参考資料1

～1次元・3次元モデル～

エンジンW/J 3Dモデル

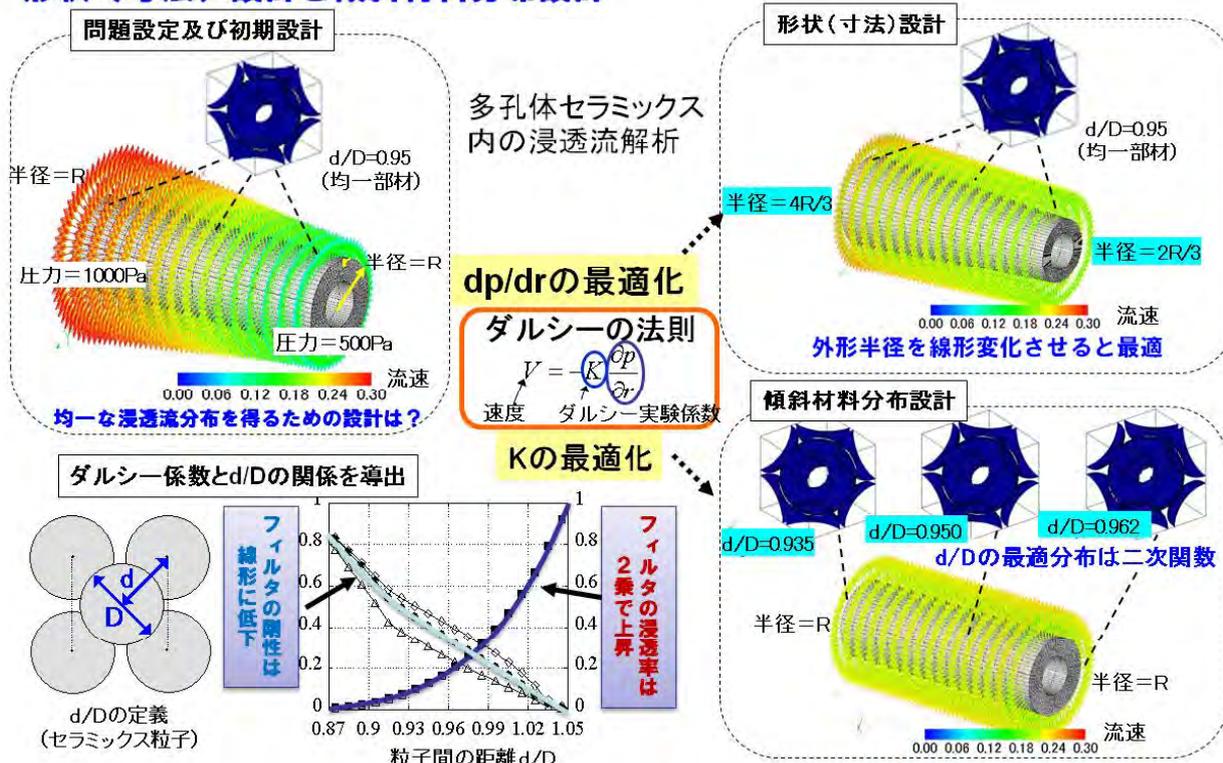
等価 1Dモデル



形状(3次元寸法)
境界条件(入口、出口流量+ポンプ)
支配方程式(ナビエ・ストークス)
→圧力損失、流速、熱伝達係数(水～金属)

形状(1次元寸法:径、長さ、容積)
形状特性(圧力損失+曲がり、オリフィス)
境界条件(入口、出口流量+ポンプ)
支配方程式(ナビエ・ストークス)
→圧力損失、流速、熱伝達係数(水～金属)

形状(寸法)設計と傾斜材料分布設計



代表寸法を変化させた上記の3D-FEAの自動計算にはメッシュフリー法(X-FEM)が必須。

減肉評価

水滴エロージョン損傷の評価式
 $ER_m \propto d_{3-2}^{2.5 \sim 3.1} \cdot V_d^5 \cdot G_w^{0.9 \sim 1.0}$

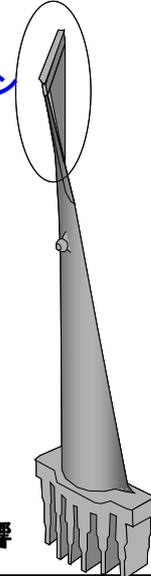
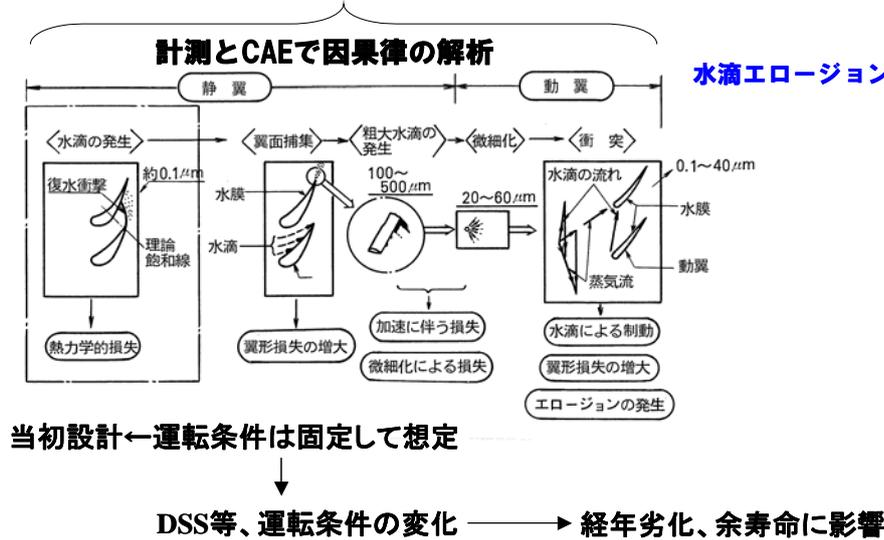
平均エロージョン率 ← d_{3-2} (平均水滴直径)
 水滴衝突速度 ← V_d
 衝突水滴流量 ← G_w

脆化評価

エロージョン試験機による、脆化の因子の特定、物性のパラメライズ実験式構築が必要

現象メカニズム不明

システム設計と運転条件に依存 材料に依存



価値創造型ものづくり力強化に資する協調型フロントローディング設計支援技術開発に関する調査研究、機械システム振興協会、(2004)より

(1) 製品設計の組織能力の安定的向上

製品設計の組織能力は製造と異なり、年々、蓄積による向上がなく、不安定。成功事例を栄養にし、組織能力低下の歯止めをかけ、年次的に向上させていく仕組みが必要。

(2) チーフデザイナーを活かす仕組み

チーフデザイナーとその「言葉」(概念)を展開するチームがうまく使える「わいがや」「大部屋」的なツールが必要。

(3) メカ・エレキ・ソフト(制御)の部署割り思考の打破

メカ・エレキ・ソフト(制御)がうまく組める仕組みが必要。特に、ソフト(制御)も最初から議論に加わり、最後にツケがないようにするのが重要。

(4) オーバーフロントローディングの回避

過剰装備でオーバーフロントローディングにならずに、概念の展開が収束しそうか、解があるかどうかを確かめるツールが必要。

(5) バーチャルとリアルを行き来する仕組み

ファッションでは、チーフデザイナーのある「言葉」を元に、複数のスタイル画を壁に貼り、中央のデスクには複数の布を置いて、良さそうな布を切り取りスケッチにあてがったりして、バーチャル・リアルを行き来しつつデザインを決める。

(6) 日本型「わいがや」「大部屋」に合うツール

欧米流個室型ツールではなく、日本型「わいがや」「大部屋」に合うツールが必要

設計組織

- (1) 製品設計の組織能力の安定的向上
- (2) チーフデザイナーを活かす仕組み
- (3) メカ・エレキ・ソフト(制御)の部署割り思考の打破
- (4) オーバーフロントローディングの回避
- (5) バーチャルとリアルを行き来する仕組み
- (6) 日本型「わいがや」「大部屋」に合うツール



ツール(仕組み)により組織能力を向上する

これらを解決する1DCAEへの期待は大きい。その実現のためには3D-CAEも含む既存ツールとうまくつなげる事が効果的。(その際、機能は何かを徹底的に考え、メカ・エレキ・ソフト(制御)の連成で展開する事が重要。)

但し、共創すべきは顧客ニーズ、コトづくりに対してであり、チーフデザイナーの概念を展開するツールが重要。

産総研では、肝となる因子と因子相互関係等の議論に有効なデザインブレインマッピングの開発を推進中。また、設計研究開発に係わる産学官連携のあり方についても議論中(FTAidは産学官での研究開発の一例)。