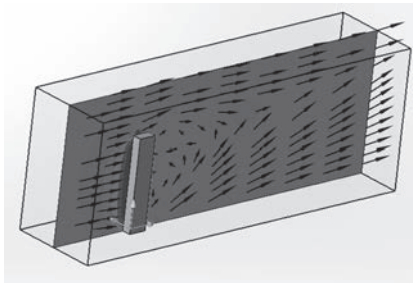
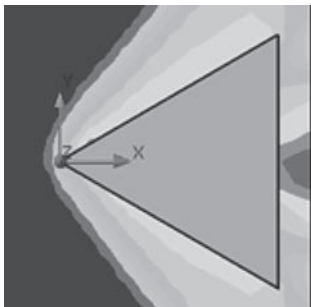


# SOLIDWORKS

## による CAE 教室

— 機構解析/流体解析 —

篠原主勲 著



コロナ社

## まえがき

私がシミュレーションの分野の1つである計算力学に出合ったのは、1999年に大学院の修士課程に入学したときでした。この計算力学は材料力学、流体力学、振動工学、伝熱工学などの力学現象を計算で予測することができます。そのため、この計算力学をうまく活用すれば、設計工程を大幅に縮小し、低コストのものづくりの開発が実現できることを意味していました。しかし当時は、実際の構造物が動作する複雑な物理現象を表現する解析手法、数理モデルや、大規模で高性能なコンピュータシステムを用い、膨大な数の計算やデータの記憶を必要とする処理環境が確立されていませんでした。そのため解析手法や数理モデルがどの程度、実際の構造物で生じる物理現象を表現することができるのかなど、未知数な部分が多く、解析による物理現象の再現性が未検証でした。CAEソフトウェアの中身を知らずに、ブラックボックスで構造物を設計することは大変危険であり、「実際の物理現象と解析手法などがどのように対応しているかをよく理解しておく必要がある」と指導教員、会社上司、先輩から私は教わってきた記憶があります。そういった計算力学の教育分野における時代背景からでしょうか？CAEの教材は、物理現象を示す数理モデルや解析手法の解説から始めることが一般的です。

2022年現在では、さまざまな物理現象に対応した解析手法が考案され、幅広い設計分野への適応が進んでいます。一方で、これらの複雑化した解析手法はかなり難解となり、大学の学部生に対して、これらの解析手法を講義したとしても、簡単に学生の理解が得られません。興味が持てず、計算力学の分野から脱落してしまう学生が後を絶ちません。そのような理由から、ソフトウェアのブラックボックス化を認め、解析結果のみを議論することで、学生の興味を引き付けることができるのではと思います、2020年に「SOLIDWORKSによるCAE教室-構造解析/振動解析/伝熱解析-」を執筆しました。この教科書を用いた大学の講義終了後における学生の授業評価アンケートのコメント欄を以下に抜粋します。

- ・「CAEの手法を解説しつつ、材料力学などの内容もしっかり解説されていた。」
- ・「CAEによって部品のシミュレーションができるのが面白かった。解析シミュレーションはこれからも使うものだろうから、その基礎・発展的な内容を知ることができてよかった。」
- ・「CAE解析は、最近いろいろな会社で使われている。あらかじめ大学でCAE解析を学ぶことにより、入社してからいち早く戦力になれると感じた。また、この講義はCAE初学者でも、わかりやすい解説によって問題なく課題を進めることができ、さまざまなCAE解析の知識を得ることができた。」
- ・「CAE解析のメリットはたくさんありましたが、その中でも実際にモノを作らなくてもいいというのが一番大きなメリットだと思いました。」
- ・「SOLIDWORKSのCAEを触ったのは初めてで少し新鮮でした。基本的な機能はやはり同じ

なのだなということがわかり、だいたいの使い方を理解していれば別の CAE も扱えそうだという謎の自信がわきました。また CAE の講義で材料力学の知識を使うことになったのは驚きました。」

・「CAD, CAM, CAE を使用することで開発の効率が上がると思いました。これから実際の数値も踏まえて使用していくと思うので、使用方法や応用を理解しておきたいと思いました。」

・「CAE の基礎的なことが少しわかり、社会に出てからも必要なスキルだと思うので続けて勉強したいです。」

・「CAE 解析を利用している企業を探していたらたくさんあって驚きました。」

・「コロナ禍で仕方がないことですが、CAD や CAE の講義を、しっかりと学校で先生に直接指導のもとで受けたいと、オンライン講義受講中に感じました。」

・「CAE を用いれば、実際のを製造し、実験で評価するよりも低コストで、さらには少ない時間で評価することができることがわかった。」

・「授業を通して、CAE とはどのようなものなのか、CAE では何ができるのかということや、線形・非線形解析、伝熱解析などの基本的な CAE 解析の方法などを理解することができました。遠隔授業となってしまったため、教科書に記載されているすべての内容を行うことはできませんでしたが、この夏休みの期間を利用し、授業ではできなかった円柱のねじりの解析や、梁の振動解析なども行ってみたいと思いました。後期の授業では CAM について学べるようなのでとても楽しみです。」

2020 年度において世界中を襲った新型コロナウイルス (COVID-19) の蔓延のため、遠隔授業がメインとなりましたが、当初の想定以上に、本講義の学生の学習意欲が高いことがわかりました。またコメント欄を確認すると、もっと複雑なシミュレーションもやってみたいと思っている学生も多いことがわかりました。そのようなことから、「SOLIDWORKS による CAE 教室 - 機構解析 / 流体解析 -」を執筆しました。SOLIDWORKS の CAE の機能の中から SOLIDWORKS Motion および SOLIDWORKS Flow Simulation を取り扱います。SOLIDWORKS Motion による解析は一般には機構解析もしくはマルチボディダイナミクスと呼ばれています。SOLIDWORKS Flow Simulation による解析は流体解析と呼ばれています。これらの機能を用い、本書では、基礎的な CAE を学習します。

最後に CAE 教育において、ソフトウェアの使い方には終始するのではなく、各種の力学の知識の重要性を前提に、シミュレーションを体感しながら、知識の定着を図るコンセプトにご賛同いただき、本書出版にご尽力いただいたコロナ社に感謝申し上げます。

2022 年 6 月

篠原主勲

# 目 次

<b>1. マルチボディダイナミクス (機構解析)</b>	1
<b>2. SOLIDWORKS Motion 共通操作</b>	2
<b>3. 球の運動</b>	
3.1 球の運動	28
3.2 水平投射を解析してみましょう	29
3.3 操作手順	30
3.4 課題解答例	41
<b>4. ベルト</b>	
4.1 ベルト	42
4.2 ベルト伝動装置の理論	42
4.3 ベルト伝動装置を解析してみましょう	42
4.4 操作手順	43
4.5 課題解答例	54
<b>5. ブレーキ</b>	
5.1 ブレーキ	56
5.2 単ブロックブレーキの理論	56
5.3 単ブロックブレーキを解析してみましょう	57
5.4 操作手順	57
5.5 課題解答例	69
<b>6. 砂時計</b>	
6.1 砂時計	71
6.2 砂時計を解析してみましょう	71
6.3 操作手順	72
6.4 課題解答例	87

## 7. スロットレーシング

7.1 スロットレーシング	89
7.2 周回走路1周あたりの周回時間	89
7.3 スロットレーシングを解析してみましょう	89
7.4 操作手順	90
7.5 課題解答例	105

## 8. スライダークランク機構 (機構解析)

8.1 スライダークランク機構	107
8.2 スライダークランク機構の理論	107
8.3 スライダークランク機構を解析してみましょう	108
8.4 操作手順	109
8.5 課題解答例	125

## 9. スライダークランク機構 (機構-構造連成解析)

9.1 連成解析によるスライダークランク機構	127
9.2 スライダークランク機構の応力分布を解析してみましょう	127
9.3 操作手順	127
9.4 課題解答例	137

## 10. 流体解析

10.1 流体解析	138
10.2 流体解析における支配方程式	138
10.3 流線, 流脈線および流跡線	139
10.4 セル	141
10.5 乱流強度	141

## 11. SOLIDWORKS Flow Simulation 共通操作

### 12. ベンチュリ管 (内部流れ解析)

12.1 ベンチュリ管	155
12.2 ベンチュリ管を解析してみましょう	156
12.3 操作手順	156
12.4 課題解答例	167

**13. 円柱まわりの流れ（外部流れ解析）**

13.1 円柱まわりの流れ	169
13.2 抗力係数とレイノルズ数	169
13.3 ストローハル数	170
13.4 円柱まわりの流れを解析してみましょう	171
13.5 操作手順	171
13.6 課題解答例	179

**14. 楔のまわりの高速流れ（圧縮性流体解析）**

14.1 楔のまわりの高速流れ	181
14.2 楔のまわりの高速流れの理論	181
14.3 楔のまわりの高速流れを解析してみましょう	182
14.4 操作手順	183
14.5 課題解答例	191

**15. 平板流れ（熱流体解析）**

15.1 平板流れ	194
15.2 境界層の理論	194
15.2.1 境界層	194
15.2.2 プラントル数	195
15.2.3 境界層方程式	195
15.2.4 プロフィール法	196
15.3 平板流れを解析してみましょう	197
15.4 操作手順	198
15.5 課題解答例	206

**16. 風の力による梁のたわみ（構造-流体の連成解析）**

16.1 風の力による梁のたわみ	209
16.2 風の力による梁のたわみの理論	209
16.3 風の力による梁のたわみを解析してみましょう	210
16.4 操作手順	211
16.5 課題解答例	217

索引	220
----	-----

# 1章 マルチボディダイナミクス（機構解析）

SOLIDWORKS のアドインの1つとして SOLIDWORKS Motion があります。モーション (Motion) とは日本語訳すると“動き”になります。シミュレーションの分野では、SOLIDWORKS Motion による解析は**機構解析**もしくは**マルチボディダイナミクス**と呼ばれます。シミュレーションの分野には、構造解析、振動解析、伝熱解析、流体解析などさまざまな解析があります。これらの解析と機構解析はなにが違うのでしょうか？構造解析、振動解析、伝熱解析、流体解析は CAD ソフトより作成した形状をメッシュ分割しなければなりません。CAD 形状を細胞のような微小な領域に分割することで、その領域のさまざまな物理量を得ることができるようになります。一方で機構解析では、このメッシュ分割の作業を必要としません。構成する部品であるボディおよびボディを結合するジョイント、ばねなどの力を発生する要素などの抽象概念を、CAD 形状に置き換えます。これらの要素の組合せより、直鎖構造、木構造、閉ループ構造を構成します。これらの構造を用い、複数のボディの相互作用を、運動方程式に基づいて解析します。機構解析は、複数の部品の動き（例えば、加速度、速度、位置など）を捉えることを得意とします。一方で、ボディ（部品）をメッシュ分割しないため、部品の内部の物理情報（例えば、応力やひずみなど）を得ることは得意ではありません。また、ボディ（部品）を剛体でモデル化します。剛体とは非常に硬い物体という意味です。すなわちどんなに力を負荷しても、ボディ（部品）は変形しません。

ボディの相互作用による運動方程式の定式化には、絶対座標による定式化と、相対座標による定式化があります。絶対座標による定式化は、絶対座標系から観測したボディ（部品）の位置を定義し、拘束条件下での運動方程式を構築します。このような定式化に基づいて、1970 年代にマルチボディダイナミクスの最初の商用ソフト ADAMS（アメリカ系）が開発されました。それに対して、1980 年代に開発された SIMPACK（ドイツ系）は相対座標系による定式化が採用されています。相対座標による定式化は、1つのボディ a（部品 a）は絶対座標を用いて配置決めを行うものの、その隣りのボディ b（部品 b）については、ボディ a とボディ b の結合部の位置の情報を利用し、ボディ a に対してボディ b の位置を相対的に決めます。このようなアプローチは、絶対座標の定式化と比較し、解くべき運動方程式の数を減らすことができ、またリカーシブな定式化<sup>†</sup>と組み合わせることで、高速計算を実現することができます。SOLIDWORKS Motion は ADAMS のソルバーを使用しています。ただし弾性体が扱えないなど、機能が制限されています。

---

<sup>†</sup> 岩村誠人：マルチボディダイナミクス入門，森北出版（2018）

## 2章 SOLIDWORKS Motion 共通操作

3章から16章にかけて、SOLIDWORKSの操作による作業を行います。またMicrosoft OfficeのExcelを用い、グラフや表を作成します。各章の作業において、共通の作業があります。この章では、その作業を抽出し、【2.1】～【2.28】にまとめました。3章以降に登場する記号▶は再生を示します。【番号】の作業内容がわからない場合は、適時、この章を読み返してください。操作の順番ですが、複数の図を左から右へ、上から下へと読み進んでください。また図内の①、②、③、…は【番号】内における操作の手順を示します。番号順に操作を行ってください。文章中の「」はSOLIDWORKS画面上の文字列を示します。また文章中の「クリック」は、マウスの左をクリックしてください。

### 【2.1】 SOLIDWORKSの起動と初期設定 (図2.1～図2.3)

① 「SOLIDWORKS」アイコンをクリック



図2.1 SOLIDWORKS アイコン

② 「ファイル」をクリック→③ 「新規」をクリック



図2.2 新規

④ 「部品」をクリック → ⑤ 「OK」をクリック



図2.3 新規 SOLIDWORKS ドキュメント

【2.2】 SOLIDWORKSの終了 (図2.4～図2.5) アセンブリを作成する際に、操作手順を簡略化および誤操作を避けるため、本書ではSOLIDWORKSの終了を故意に行う場合があります。アセンブリとは、複数の部品からなる組み立て品です。その組み立て品の中で、ある部品



と他の部品との干渉の有無や、組み立て品の動作の中で、どのようにその部品が動作するかなどを、アセンブリを通して確認することができます。

① 「ファイル」→②「終了」

③ 「すべて保存」をクリック

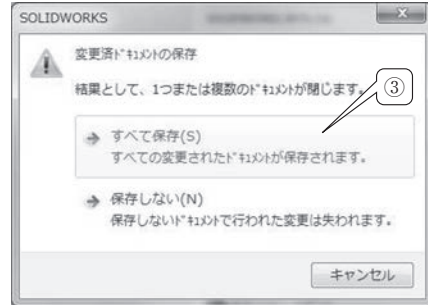


図 2.5 すべて保存

図 2.4 終了

**【2.3】アセンブリの新規作成 (図 2.6～図 2.8)**

① 「ファイル」→②「新規」→③「アセンブリ」をクリック→④「OK」をクリック

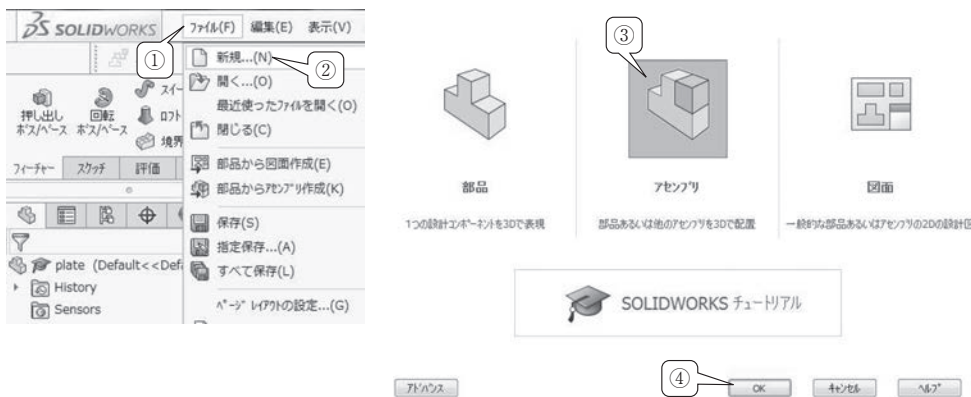


図 2.6 アセンブリの新規作成

## 4 2. SOLIDWORKS Motion 共通操作

○ SOLIDWORKS のファイルを選択します。⑤ 「test」フォルダに、ball.SLDPRT および plate.SLDPRT の2つのファイルがあるとします。キーボードの ctrl キーを押しながら、ball.SLDPRT および plate.SLDPRT をクリックし、これらのファイルを反転させます→⑥ 「開く」をクリック

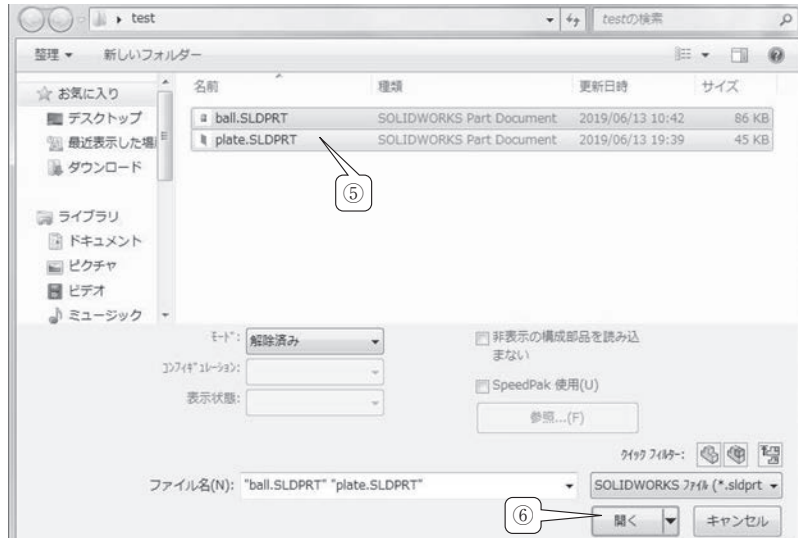


図 2.7 ファイルの選択/開く

⑦ 「ball」と「plate」の配置を決める必要があります。ポインタをマウスで移動すると、「ball」とポインタが一体となり、移動します。マウスのホイールの回転操作より、物体の拡大縮小が行われます。適当な位置でマウスをクリックします。次に「plate」とポインタが一体となり、移動することがわかります。適当な位置でマウスをクリックします。このようにして、複数の部品を配置します。

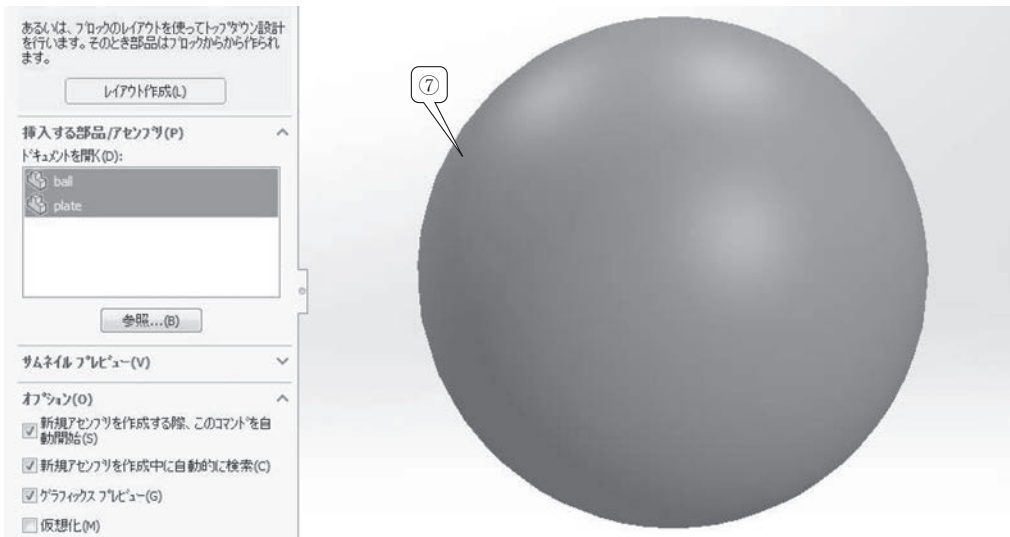


図 2.8 配 置

**[2.4] 単位系の設定 (その1) (図 2.9~図 2.10)** 本書で ① 「ツール」をクリック→② 「オプション」をクリック

は、SOLIDWORKS による解析によって得られた解析値を検証するため、材料力学、振動工学、伝熱工学などに基づく理論値もしくは実験値と比較します。比較するためには単位に注意する必要があります。本書では変数と単位が並ぶときのみ、単位を括弧 [ ] で記述することになります。CAD 形状を作成するときに、ミリメートル mm で作成すると、単位換算が必要になります。無用な混乱を避けるため、本書では**国際単位系 (SI)** に統一し、作業を行うものとし、国際単位系 (SI) は基本単位の組合せです。長さの単位として m (メートル)、質量の単位として kg (キログラム)、時間の単位として s (秒) を用います。長さの単位を mm (ミリメートル) に設定すると、理論値 (もしくは実験値) と SOLIDWORKS 解析値が一致しませんので注意してください。SOLIDWORKS では複数の単位系が準備されています。本書では国際単位系 (SI) を意味する MKS の単位系のみを使用します。M は metre, K は kilogram, S は second の頭文字を示します。その操作手順は次のようになります。



図 2.9 オプション

③ 「ドキュメントプロパティ」タブをクリック → ④ 「単位」をクリック → ⑤ 「MKS (m, kg, 秒)」にチェック → ⑥ 「OK」をクリック



図 2.10 単位系の設定

# 索引

## ▷学術用語◁

<b>【あ～う】</b>		射影面積	169	<b>【な行】</b>	
圧縮性流体	181	斜方投射	28	ナビエ・ストークス方程式	138
圧力	155	自由度	11	熱拡散率	195
圧力比	190	従動車	42	熱伝達率	195
位置	1	自由落下	28	熱伝導率	195
運動量保存の式	181, 195	重力	71	熱流束	195
<b>【え】</b>		ジョイント	1, 107	熱流体解析	194
エネルギー保存の式	181, 195	衝撃波	181	粘性	194
円柱まわりの流れ	169	振動解析	1	粘度	169
鉛直投射	28	<b>【す】</b>		<b>【は】</b>	
<b>【お】</b>		水平投射	28	発生周波数	170
応力	1, 209	ストローハル数	170	はねかえり係数	29
音速	181	砂時計	71	反発係数	29
温度境界層	194	スライダークランク機構	107	反力	12
<b>【か】</b>		スロットレーシング	89	<b>【ひ】</b>	
回転比	42	<b>【せ】</b>		非圧縮性流体	181
界面セル	141	静解析	127	ひずみ	1, 209
加速度	1	静止摩擦係数	17	比熱比	181
カルマン渦	170	接続部	107	<b>【ふ】</b>	
関節	107	絶対座標	1	風圧	209
<b>【き、け】</b>		セル	141	プラントル数	195
機構解析	1, 127	<b>【そ】</b>		ブレーキ	56
木構造	1	相対座標	1	ブレーキドラム	56
境界層方程式	195	層流	169	<b>【へ】</b>	
原動車	42	速度	1	平板流れ	194
<b>【こ】</b>		速度境界層	194	閉ループ構造	1
構造解析	1, 127	<b>【た行】</b>		ベルト伝動装置	42
拘束条件	11	代表流速	169	ベルヌーイの定理	155
剛体	1, 107	弾性係数	14	ベンチュリ管	155
抗力	169	弾性体	1	<b>【ほ】</b>	
抗力係数	169	単ブロックブレーキ	56	ポアソン比	14
国際単位系	5	直鎖構造	1	<b>【ま行】</b>	
誤差	41	定圧比熱	195	摩擦係数	56
固体セル	141	てこ	56	摩擦力	56
固有振動数	170	てこクランク機構	107	マッハ数	182
<b>【し】</b>		伝熱解析	1	マルチボディダイナミクス	1
質量密度	14	等速運動	28		
		動摩擦係数	17		

無次元量	169				
メッシュ分割	1				
モーター	89				
<b>【や行】</b>					
ヤコビアン	21				
揚力	169				
<b>【ら】</b>					
乱流	170				
乱流強度	141				
		<b>【り】</b>			
		流出口	155	両てこ機構	107
		流跡線	140	リンク機構	107
		流線	139	<b>【れ】</b>	
		流速	138, 155	レイノルズ数	169
		流体	138	連成解析	127
		流体解析	1, 138	連続の式	181, 195
		流体加振力	170	<b>【英字】</b>	
		流体セル	141	CAD	12
		流入口	155	Computer-Aided Design	12
		流脈線	140	MKS	5
		両クランク機構	107	SI	5

▷SOLIDWORKS 操作で使われる用語◁

<b>【あ】</b>		最大インテグレートステップ		<b>【は行】</b>	
アセンブリ	2	サイズ	20, 21	非固定	17
アドイン	6, 12, 142	最大繰り返し	19, 20	秒毎のフレーム数	20
アニメーション	13	サーフェスゴール	150	フィーチャー	10, 31
<b>【い】</b>		サーフェスプロット	153	ベーシックモーション	13
イタレーション	19	<b>【し】</b>		ボディ	1
位置付けのみに使用	35	使用可能なアセンブリ構成部品	132	ボリュウムゴール	150
一致	11	詳細設定オプション	20	<b>【も】</b>	
<b>【う】</b>		初期のインテグレートステップ		モーション解析	13
ウィザード	142	サイズ	21	モーション解析詳細設定オプション	20
<b>【お】</b>		<b>【す】</b>		<b>【英数字】</b>	
押し出しボス/ベース	10	スケッチ	30	Front	7
<b>【か行】</b>		<b>【せ】</b>		GSTIFF	19, 21
回転ボス/ベース	31	正接	11	Pack and Go	24
外部流れ	143	接触タイプ	16	Right	7
荷重インポート	132	選択構成部品	132	SI2_GSTIFF	21
合致	11	<b>【そ】</b>		SOLIDWORKS Flow Simulation	142
カーブ	16	ソリッドボディ	16	SOLIDWORKS Motion	1
グローバルゴール	150	<b>【た行】</b>		SOLIDWORKS Simulation	6
固定	17	断面プロット	153	SOLIDWORKS Motion Manager	
ゴールプロット	153	中心点円弧	30	step-size	19
<b>【さ】</b>		同心円	11	Top	7
最小インテグレートステップ		<b>【な】</b>		WSTIFF	21
サイズ	21	内部流れ	143	XYプロット	153
				3D接触解像度	88

— 著者略歴 —

2006年 東京大学大学院工学系研究科 システム量子工学専攻 博士課程修了, 博士(工学)  
2011年 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 / 情報・計算工学センター (JAXA/JEDI)  
2013年 大同大学工学部機械システム工学科准教授  
2020年 大同大学工学部機械システム工学科教授  
現在に至る

**SOLIDWORKS による CAE 教室 — 機構解析 / 流体解析 —**

CAE Training Using SOLIDWORKS

— Computational Multibody Dynamics / Computational Fluid Dynamics —

© Kazunori Shinohara 2022

2022年7月27日 初版第1刷発行



検印省略

著者 <sup>しの</sup>篠 <sup>はら</sup>原 <sup>かず</sup>主 <sup>のり</sup>勲  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 新日本印刷株式会社  
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社  
CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04680-9 C3053 Printed in Japan

(新宅)



**JCOPY** <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。