

報告

大学教育の分野別質保証のための  
教育課程編成上の参照基準  
計算力学分野



平成29年（2017年）8月8日

日本学術会議

総合工学委員会・機械工学委員会合同

計算科学シミュレーションと工学設計分科会

この報告は、日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同 計算科学シミュレーションと工学設計分科会 計算力学小委員会での審議結果を踏まえ、計算科学シミュレーションと工学設計分科会において取りまとめ公表するものである。

日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同  
計算科学シミュレーションと工学設計分科会

委員長	吉村 忍	(連携会員)	東京大学副学長、大学院工学系研究科教授
副委員長	萩原 一郎	(連携会員)	明治大学研究・知財戦略機構特任教授、 東京工業大学名誉教授
幹事	金田千穂子	(連携会員)	株式会社富士通研究所特任研究員、大阪大学特任 教授
幹事	越塚 誠一	(連携会員)	東京大学人工物工学研究センターセンター長、大 学院工学系研究科システム創成学専攻教授
	高橋 桂子	(第三部会員)	独立行政法人海洋研究開発機構地球情報基盤セン ターセンター長
	藤井 孝藏	(第三部会員)	東京理科大学工学部情報工学科教授
	大倉 典子	(第三部会員)	芝浦工業大学学長補佐、工学部教授
	大島 まり	(連携会員)	東京大学大学院情報学環・生産技術研究所教授
	大富 浩一	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 特任研究員
	加藤 千幸	(連携会員)	東京大学生産技術研究所教授
	金子 成彦	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻教授
	岸本喜久雄	(連携会員)	東京工業大学環境・社会理工学院長、教授
	北村 隆行	(連携会員)	京都大学大学院工学研究科科長、機械理工学専攻 教授
	木村 文彦	(連携会員)	東京大学名誉教授
	久保 司郎	(連携会員)	摂南大学理工学部機械工学科教授、大阪大学名誉 教授
	小机わかえ	(連携会員)	神奈川工科大学工学部機械工学科教授
	小山田耕二	(連携会員)	京都大学高等教育研究開発推進機構情報メディア 教育系教授
	杉原 正顕	(連携会員)	青山学院大学理工学部物理・数理学科教授、 東京大学名誉教授
	中尾 充宏	(連携会員)	早稲田大学大学院基幹理工学研究科研究院教授、 九州大学名誉教授
	中橋 和博	(連携会員)	独立行政法人宇宙航空研究開発機構理事・航空本 部長、東北大学名誉教授（平成 28 年 2 月まで）
	橋口 公一	(連携会員)	エムエスシーソフトウェア株式会社技術顧問

			、九州大学名誉教授
宮内 敏雄	(連携会員)	東京工業大学名誉教授	
宮崎 則幸	(連携会員)	京都大学・九州大学名誉教授	
矢川 元基	(連携会員)	公益財団法人原子力安全研究協会会長、 東京大学名誉教授、東洋大学名誉教授	
山崎 光悦	(連携会員)	金沢大学学長	

日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同  
計算科学シミュレーションと工学設計分科会 計算力学小委員会

委員長	萩原 一郎	(連携会員)	明治大学研究・知財戦略機構特任教授、 東京工業大学名誉教授
副委員長	矢川 元基	(連携会員)	公益財団法人原子力安全研究協会会長、 東京大学名誉教授、東洋大学名誉教授
幹事	平野 徹		ダイキン情報システム株式会社顧問
幹事	後藤 彰		株式会社荏原製作所理事
	大島 まり	(連携会員)	東京大学大学院情報学環・生産技術研究所・教授
	小山田耕二	(連携会員)	京都大学高等教育研究開発推進センター教授
	越塚 誠一	(連携会員)	東京大学人工物工学研究センターセンター長、大学院 工学系研究科システム創成学専攻教授
	吉村 忍	(連携会員)	東京大学副学長、大学院工学系研究科教授
	畔上秀幸		名古屋大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻教授
	奥田昌宏		キヤノン株式会社解析技術開発センター上席研究員 (平成 28 年 12 月まで)
	西村直志		京都大学大学院情報学研究科複雑系科学教授

本報告の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務	盛田 謙二	参事官(審議第二担当) (平成 27 年 8 月まで)
	石井 康彦	参事官(審議第二担当) (平成 27 年 8 月から)
	松宮 志麻	参事官(審議第二担当)付参事官補佐
	柳原 情子	参事官(審議第二担当)付審議専門職

# 要 旨

## 1 はじめに

日本学術会議は、文部科学省高等教育局長からの依頼を受け、2010年（平成22年）7月に回答「大学教育の分野別質保証の在り方について」を取りまとめ、同年8月に文部科学省に手交した。同回答においては、大学（学士）専門課程の分野別質保証のための手法として、分野別の教育課程編成上の参照基準を策定することを提案している。日本学術会議では、回答の手交後、引き続きいくつかの分野に関して参照基準の策定を進めてきたが、今般、計算力学の学士専門課程参照基準（一部に大学院修士課程用を含む）が取りまとめられたことから、同分野に関連する学士専門課程や修士課程を開設している大学をはじめとして各方面で利用していただけるよう、ここに公表するものである。

## 2 計算力学の定義

計算力学は、有限要素法による自動車の衝突シミュレーション技術の開発・成功によって、理論、実験に次ぐ第3の科学としての地位を築き始めた。1) 固体・構造力学、2) 流体力学・流体工学；圧縮性・非圧縮性流れ、3) 破壊力学、4) 輸送現象、熱移動、5) 力学における変分法、などの自然現象を適切な支配方程式を用いて定式化・モデル化し、それを離散化して計算機上で数値的に解を求めるものである。最近では、機械工学、電気・電子工学、化学工学、土木・建築工学など様々な工学分野は勿論のこと、データを有効に活用した新たな知識発見へのニーズなどより広い分野にも及び、計算力学は、生命や交通渋滞、災害避難行動などの人文社会問題などを、計算機を用いて解くための学問領域をも含むようになっている。

## 3 計算力学固有の特性

計算力学は、産業製品の開発期間の劇的な短縮に貢献していることでも理解されるように、これまでにない価値を創造し、安心安全な社会の構築にも、欠かせない学問である。ただし、その実現のためには、関連する物理学、生物学、化学、機械工学、土木・建築工学、電気工学にわたる幅広い知識が必要となる。更に、課題ごとに、多様なアプローチの中から適切な方法を選択し、効率を上げるためには、数理科学や情報学との協働も必要となる。このようなことから本参照基準では、多様なアプローチ、計算力学の役割、他の諸科学との協働について述べた。

## 4 計算力学を学ぶすべての学生が身に付けることを目指すべき基本的な素養

計算力学の固有の特性を踏まえて、妥当なモデリングを得るための工学や科学、精度を保証し、計算速度を上げるための数値解析学、プリ・ポストや通信などのための情報学の学びを通じて獲得すべき基本的な知識・理解と、計算力学の学習を通じて獲得される専門的能力とジェネリックスキル、及び、これら能力の持つ職業上の意義について述べた。

## 5 勉学方法及び勉学成果の評価方法に関する基本的な考え方

計算力学を学ぶための勉学方法は、主に、講義、数値実験、演習、実習、課題研究がある。内容が多様であることから、目的に応じて選択や重み付けをするなど、有機的に組み合わせることが有益である。評価対象については、モデリングして、シミュレーションする演繹的能力、結果の分析とそれをまとめる帰納的能力、基礎知識に関するリテラシー、問題発見・分析・解決能力、コミュニケーション能力などがあるが、それぞれの教育内容・教育方法及び個々の勉学者の状況に即して、多様で柔軟な評価方法がとられる必要がある。

## 6 専門性と市民性を兼備するための教養教育

計算力学は、単に生活に利便性をもたらすものだけではない。並列化手法や膨大な入出力データを処理する HPC(High Performance Computing)として確立されてきた大規模計算力学の手法は、今後 IoT(Internet of Things)によってあらゆる機械がネットワーク接続され膨大なデータを生成・蓄積する時代において社会や人間の価値観にまで深い繋がりを持つ。また、システムやモデルの大規模・複雑化する技術のリスクとベネフィットを分析・認識することも大切である。専門知識と同時に広い教養を身に付けることが、技術的・社会的課題に対する的確な洞察力と解決への実行力を与える。

## 7 専門基礎教育及び教養教育としての計算力学教育

計算力学は理論、実験に次ぐ第3の科学として、例えば計算音響学のようにこれまでの伝統的な学問の名称の頭に「計算」を付した新しい学問を起こすメタサイエンスとして、すべての諸科学の基盤の一つになっている。したがって、計算力学は、計算力学を専門に学ぶものに限らず、広く市民が持つべき教養の一部ともなりつつある。また、科学・技術の進歩から新たに生じる諸問題を解決し社会を発展させるためには、市民の一人一人が計算力学に関する知識を背景として、社会の制度や倫理に関する見識を有していなければならない。

専門基礎教育については、講義を概ね正しく理解するだけでなく、具体的な課題に対してモデリングや解析ができることが必要であり、講義で学んだことを実質化するためには計算力学実習が必要不可欠であり、評価は記述式ペーパー・テスト及び課題実習で行うのが良い。

## 目 次

1	はじめに.....	1
2	計算力学の定義.....	1
3	計算力学固有の特性.....	2
	(1) 計算力学に固有な視点.....	2
	(2) 多様なアプローチ.....	2
	(3) 計算力学の役割.....	3
	(4) 他の諸科学との協働.....	4
	(5) 日本の計算力学の特徴.....	4
	① 計算力学技術者の資格認定、NAFEMS との比較など.....	4
4	計算力学を学ぶすべての学生が身に付けることを目指すべき基本的な素養.....	5
	(1) 計算力学の学びを通じて獲得すべき基本的な知識.....	5
	① 物理現象.....	5
	② 数理的手法.....	7
	③ 社会的意義.....	10
	(2) 計算力学の学びを通じて獲得すべき基本的な能力.....	11
	① 計算力学に固有な能力.....	11
	② ジェネリックスキル.....	14
5	勉学方法及び勉学成果の評価方法に関する基本的な考え方.....	14
	(1) 勉学方法.....	14
	① 講義.....	15
	② 実験・演習・実習・課題研究.....	15
	(2) 評価方法.....	16
6	専門性と市民性を兼備するための教養教育.....	17
7	専門基礎教育及び教養教育としての計算力学教育.....	17
	<用語の説明>.....	19
	<参考資料 1> 審議経過.....	20

## 1 はじめに

計算機が出現したのが 60 数年前、演繹的に導き出された支配方程式を数理モデル化して計算機上で実装すべく重み付き残差法が開発されたのが 50 数年前である。今日では「古典的」となっている差分法、有限要素法、有限体積法、そして境界要素法で用いられる離散化法は、誤差解析、精度保証付き技術やアダプティブ法などで手法の深化が得られ、メッシュフリー法、スペクトル法、ウェーブレットなど新しい発想により、上述の古典的な手法は新たな展開を見せており、この 10 年間で様々な広がりや深化をもたらしている。科学・技術を推進するための、パラメータの組み合わせの可能性の確認は、年々超微細化、超大型化の上、複雑化しており、実験コストは指数関数的に伸びている。一方、計算機コストの上昇は線型的であるのに対し、性能は指数関数的に向上しているため、超巨大、超微細、強い非線形性をもつ現象など、実験がそもそも困難な課題は勿論、従来実験で行われていたものも計算力学に置換されるケースが広がっている。以上により計算力学の、理論、実験に次ぐ第 3 の科学としての地位はますます高くなってきており、その傾向は加速されていると言える。また、計算力学の適用範囲は、基礎方程式が存在せず、実験値データなどを用いて関係式などを推定し、得られたモデルを用いてシミュレーションする帰納的アプローチの人文社会科学の問題にも及んでいる。このような計算力学の広がりや、第 4 の科学“ビッグデータ”を支える統計科学におけるパラダイムシフトからも加速されている。1990 年代以降、計算機の進歩に伴い、データの大容量化が急激に進み、またインターネットの普及やデータベース技術の進歩によって巨大データへのアクセシビリティは飛躍的に向上した。これにより統計科学で扱えるデータの規模は超巨大化し、データを有効に活用した新たな知識発見へのニーズが計算力学分野にも及んでいる。以上のことを踏まえ、横糸としての学問である計算力学を、数理科学的な側面、情報科学的な側面、機械システム的な側面から検討を加え、同分野に関連する学部専門課程及び大学院専門課程を開設している大学をはじめとして各方面で利用していただくために、ここに計算力学分野の参照基準を公表するものである。

## 2 計算力学の定義

計算力学は、有限要素法による自動車の衝突シミュレーション技術の開発・成功によって、理論、実験に次ぐ第 3 の科学としての地位を築き始めた。1) 固体・構造力学、2) 流体力学・流体工学、圧縮性・非圧縮性流れ、3) 破壊力学、4) 輸送現象、熱移動、5) 力学における変分法、などの自然現象を適切な支配方程式を用いて定式化・モデル化し、それを離散化して計算機上で数値的に解を求めるものである。最近では、機械工学、電気電子工学、化学工学、土木・建築工学など様々な工学分野は勿論のこと、データを有効に活用した新たな知識発見へのニーズが計算力学分野にも及び、生命や交通渋滞、災害避難行動などの人文社会問題などを、計算機を用いて解くための学問領域をいう。主な研究分野は、工学・科学・人文社会分野における課題のモデリングとその解析的・数値解析的手法の選択及び開発、人工知能・並列計算、計算性能最適化などの援用のもと、有限要素法・境界要素法・有限差分法などの離散化解析手法を使用した課題解決などである。

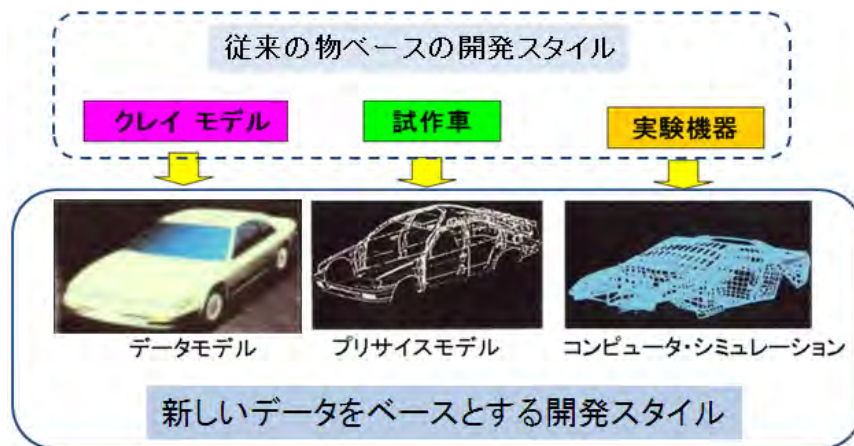


図1 自動車開発スタイルの変革

(出典) 萩原 一郎(2014)、計算科学における夢・ロードマップ、学術の動向、[特集1]第3の科学「計算力学の現状と課題」、Volume19, Number10, 12-17 より小委員会で作成

### 3 計算力学固有の特性

#### (1) 計算力学に固有な視点

計算力学は、これまで、輸送、エネルギー、生産などの個別の製品や、それらを複合したシステムの機能に関する知識基盤を提供し、さらにその中核領域から伸展して、情報、生命、材料の科学などを取り込みつつ機械産業のみならず、電子産業、情報産業、化学産業、福祉医療産業などの多様な製品や新たなシステムを生み出して、社会の期待に広範に答えている。このように計算力学の特徴は、工学、生物学、化学、物理の各課題やこれらの複合した課題に対し、そのモデリング、有限要素法を始めとするソルバー、並列計算実装、計算性能最適化など、基盤となる計算機科学の体系的な知識を駆使して、仮想設計、仮想製造、仮想実験により、これまで以上に広範囲な可能性の中から最適な方策を提示することができることである。環境的・資源的制約や経済性などを考慮しつつ、安全安心で人間の夢や希望に応えられるよう、各課題に対し、設計・製作に関する実現性や安全性に関する知恵を研究者、技術者、利用者へ供給することも、計算力学の役割である。計算力学は、仮想設計、仮想製造、仮想実験を超マイクロ構造から超マクロ構造まで同時に扱えることから、これまでの製造法を劇的に変革するポテンシャルを有す。例えば、自動車開発では、図1のように、これまでの、クレイモデルを作り、それを基に試作車を製造し、実験で性能を確認する物ベースの開発スタイルから、3次元CADによる車両の表現、モデルの精細化、シミュレーションによる性能確認とデータをベースとする開発スタイルへの変革が計算力学の利用により達成されている。これにより、自動車開発費の大幅な削減や大幅な開発期間短縮が得られている。適切な計算力学の使用なしでは、このように大きな成果を得ることはできないのである。

#### (2) 多様なアプローチ

最終的に必要とする人工物を安全性及びコストを考慮して最適に設計するには、計算力学なくしては困難であり、この実現には次の多様な項目を実施することが必要である。



- 1) 非線形現象を含む複雑な設計最適化解析には、複数の設計変数を多様に変化させて多数の解析を行うアンサンブル・コンピューティングにより設計解空間を探索するケースがある。その際に、初期設計条件から出発し目的関数を最適化（最大化、或は最小化）するための条件変更・探索には、非線形計画法や共役勾配法等の数理的手法の他に遺伝的アルゴリズムやニューラル・ネットワークなどの知識工学的手法も有用である。
- 2) 3次元の構造物を離散化モデルとして形状設計し、構造健全性を評価するための構造力学解析と、周囲環境負荷や機能性を評価するための流体力学、熱力学など、異なる物理現象が連成するマルチフィジクス解析も時に実施する。
- 3) 最近の自動車設計において広く適用されている Model Based Development は、個々のコンポーネントの数値モデルを組み合わせ、更にエンジン制御回路の運転制御ソフトウェアの動作も含めてモデリング言語を用いて統合化し、自動車の運転性能と振動騒音特性を同時に時系列的に机上予測するマルチパラダイム統合設計システムを利用するものである。これは、他分野でも有効であり、この手法も時に活用する。
- 4) 対象人工物の構造材料として複合材料が使われることが多くなり、そのマイクロ構造や破壊過程を考慮したマルチスケール解析も時に必要となる。
- 5) 電子機能素子などの設計・評価を行う場合、材料の電子物性を考慮するために原子・格子スケールの量子力学モデルを基にしたマルチスケール解析も行う。  
このように計算力学の適切な活用には関連する学問の基盤も利用できるレベルに把握しておく必要がある。  
計算力学は次のように、気象予測などにも適用されている。
- 6) 時々刻々変化する気象データから短期的な将来気象を予測するための解析や、地殻変動によって引き起こされる地震や津波による地域や都市の災害シミュレーションのように、長期的な将来起こりうる災害等に備えるための予測解析がある。
- 7) これらの予測解析で広く活用されているデータ同化手法は、ベイズ統計学と状態空間モデルを組み合わせ、多数の実計測データを継続的に用いて予測解析の精度を改善してゆく数理的手法であり、今後工学分野での応用として解析結果と計測データを融合したデータ駆動型シミュレーション技術が使用されている。  
更に、基礎方程式が存在せず、実験値データなどを用いて関係式などを推定し、得られたモデルを用いてシミュレーションする帰納的アプローチの人文社会問題にも及んでいる。

### (3) 計算力学の役割

計算科学が第3の科学として相応しい役割を演じるためにも計算力学を学ぶものは、対象とする自然や人文社会系の知識に基づいて、上述の基盤となる計算機科学の体系的な知識を獲得する必要がある。科学・技術を推進するための、パラメータの組み合わせの可能性の確認は、年々超微細化、超大型化の上、複雑化しており、実験コストは指数関数的に伸びている。一方、計算機コストの上昇は線型的であるのに対し、性能は指数

関数的に向上しているため、超巨大、超微細、強い非線形性をもつ現象など実験がそもそも困難な課題は勿論、従来実験で行われていたものも計算力学に置換されるケースが広がっている。

例えば、環境の破壊を極力小さくし、最小限の費用で安全安心を得たいという人間の夢や希望を叶える、より現実的で大規模な方策の検討は、もはや計算力学なしでは困難である。

現時点の知識から設計・製作に関する実現性や安全性に関する知恵を技術者に供給する場合も、計算力学の利用により始めて深く広い範囲の中からの最適値を与えることができる。すなわち、計算力学は、人工物の機能発現の具体的な知恵を提示すること、そしてその限界をも示すことに対する大きな責務がある。

以上のように計算力学の、理論、実験に次ぐ第3の科学としての役割はますます高くなってきており、その傾向は加速している。

#### (4) 他の諸科学との協働

計算力学は、上述のように理工学分野などで扱われる様々な課題や自然現象を適切な支配方程式を用いて定式化・モデル化し、それを離散化して計算機上で数値的に解を求めるものである。特に、工学分野での計算力学活用の目的は、最終的に必要とする人工物を安全性及びコストを考慮して最適に設計することである。そのために3次元の構造物を離散化モデルとして形状設計し、構造健全性を評価するための構造力学解析と、周囲環境負荷や機能性を評価するための流体力学、熱力学など、異なる物理現象が連成するマルチフィジクス解析の必要性が高い。さらに、最近の自動車設計において広く適用されている Model Based Development は、上述のように、今後の日本のモノづくりを改革するために必要なものとして計算力学技術者としても学ぶ必要がある。

HPC (High Performance Computing) として確立されてきた大規模計算力学の手法は、その並列化手法や膨大な入出力データを処理するアルゴリズムを含めて、今後 IoT (Internet of Things) によってあらゆる機械がネットワーク接続され膨大なデータを生成・蓄積する時代において、AI やデータ駆動型サービスのシステム・モデルに対しても水平展開すべき技術である。

計算力学は、以上のように多彩な学術領域からなる特徴を有し、その考察の内容は基礎的・基盤的で極めて広範な事象を対象とし、あらゆる学術と相互作用を持つ。

#### (5) 日本の計算力学の特徴

##### ① 計算力学技術者の資格認定、NAFEMS との比較など

計算力学技術者とは、これから設計しようとする製品をコンピュータ上に仮想的に構築し、その中で変形や振動、熱伝導、流体などの様々な力学挙動を精密に評価することにより、製品開発の効率化を図り、同時に性能向上や品質向上を目指すデジタルエンジニアである。コンピュータ上で力学挙動の精密な評価を担う計算力学は、デジタルエンジニアリングの中核を担う基盤技術であり、ほとんどあらゆる理工学分野で

活用されており、最近では生命・医学や人文・社会学関係にも応用が進んできている。また計算力学技術は、エンジニアリングの現場では、CAD (Computer-Aided Design) や CAM (Computer-Aided Manufacturing) と対比されて、CAE (Computer-Aided Engineering) と呼ばれる。

国際 CAE 技術団体「NAFEMS」は、解析専任者でなくても設計者が有限要素法を効果的に利用し、適切な解析を行うことができることを目指すべく有限要素法ガイドブックを発刊している。そこでは有限要素法やその数学理論を解説するだけではなく、適切なモデル化手法、解析における各種仮定、解析結果の解釈に関する幅広い知識がまとめられており、ソフトウェアの基本トレーニングでカバーされない知識を補うための実践的なガイドとして活用可能である。一方、我が国ではより積極的に、固体力学分野の有限要素法解析技術者、振動分野の有限要素法解析技術者、熱流体力学分野の解析技術者の資格認定として、それぞれの初級、2級、1級、上級アナリストが設けられている。

#### 4 計算力学を学ぶすべての学生が身に付けることを目指すべき基本的な素養

##### (1) 計算力学の学びを通じて獲得すべき基本的な知識

計算力学を学ぶ者は、シミュレーションを成功に導くための、工学や化学・物理・生物などのサイエンスと、数理モデリング・計算スキーム・ソルバーの開発などの数値解析やソフトウェア科学、更に、並列計算実装・計算性能最適化・ハードウェア等からなる計算機科学と、広いスペクトルの範囲で連携できる能力が求められる。そのため、上述の関連する工学や基礎科学及び学際分野に興味を持ち、それらの核となる理論を総合的かつ俯瞰的な視点から理解しておくことが望まれる。ここでは、主体的な視点を持って積極的にその学術を学び取る勉学の意欲が重要である。なお、計算力学は現代社会の在り方や個人の生活に深く関わっているがゆえに、計算力学に関する学術を学ぶ者は、計算力学が社会や個人生活の持続性や発展性に重大な責任を担っていることを認識しなければならない。

##### ① 物理現象

計算力学は、多くの複雑な因果関係から構成される物理現象のうち、ある観点で因果法則を絞り込み、これらを偏微分方程式の形で表現し、数値解法を提供する。数値解法において、現実の物理現象を再現できるように、例えば、固体・流体・電磁界の観点でそれぞれ、計算固体・流体・電磁力学が確立され、普及している。計算力学で、最初に成功裡に適用されたのが、計算固体力学である。この計算固体力学において、ひずみと応力とが線形関係にあるという前提で構成された方程式をベースに線形構造解析理論が組み立てられている。このような線形理論だけでも製造業の世界で多くの問題を解決してきた。ひずみと応力との間の材料非線形に加えて、大ひずみを考慮した理論構築（幾何学的非線形）がある。非線形性を考慮する解析機能も機械設計者が日常的に利用するツールとして整備され、様々な構造設計に利用されている。

計算流体力学も計算力学の重要な構成要素である。計算流体力学は、飛行機、高速

列車、自動車の空力性能評価を効率よく実施でき、風洞実験の代替として利用されてきた。複雑な障害物まわりの流れ場を高精度・高効率で計算できる解析理論が組み立てられているので、飛行機の着陸時における翼上の流れの剥がれの再現などが行えるようになっている。また、新幹線においては、車両形状の最適化に重要な役割を果たし、車両内における静粛性の向上に大きく貢献している。さらに、乗用車においては、燃費の改善と風切り音の低減に大きく貢献している。最近はそれらに加えて、モバイル端末やノート PC といった電子機器の熱対策において必要不可欠な技術として位置付けられている。これらのシミュレーションができる事を目標に関連する現象の把握と数理的手法の把握が求められる。

計算電磁力学では、マクスウェルの偏微分方程式を数値的に解くことにより、対象物と電磁場の相互作用を計算するための解析理論が組み立てられているので、アンテナ・レーダー・衛星などの通信システム、フォトニックデバイス、高速シリコンエレクトロニクス、医療画像撮影装置、携帯電話のアンテナなど広く設計に利用されている。最近では超電導モータの設計への利用が目新しい。超電導モータを設計する際に、モータの効率を高め、コイル線材が超電導状態を維持するために、超電導線に印可される垂直磁場の低減が求められる。このために、計算電磁力学が必要不可欠な技術として位置付けられ関連する現象の把握と数理的手法の把握が求められる。

計算力学は、このように固体・流体・電磁界の分野で、それぞれ適用事例を増やしてきたが、合わせて構造—流体連成など、連成問題にも適用が拡大している。例えば、ヒトの心臓拍動現象を再現するには、心筋の運動と血液の流れの双方を考慮しなければならない。計算固体・流体力学との連成により、心臓の拍動、血液を送り出す様子、それらが血圧や心電図にどう現れてくるのかまでを一貫して再現する心臓シミュレータも現実のものとなってきた。また、計算固体・電磁力学との連成により、発電床の設計に役立てることができるようになった。発電床は、上を歩くことにより発電する仕組みを持つ床型の装置で、装置内に圧電素子が内蔵されており、歩行した際や車が通過した際に生じる圧力のエネルギーを、効率良く電気エネルギーに変換する。圧電素子とは、圧電体に加えられた力を電圧に変換する、あるいは電圧を力に変換するものである。さらに、計算流体・電磁力学との連成により、電導性の流体による物理現象を解明することが可能となった。この物理現象の特徴は、電導性流体の中では流体の運動が磁場の変化をもたらして電流を誘起し、その電流と磁場との相互作用から流体への力を生じ、よって流体の運動自身に変化する、というものである。パイプにプラズマなどの流体を流し、このパイプに垂直な方向に磁界をかけると、パイプ内に張った電極を通して横方向に電流が流れる。この原理を利用した発電機の設計には、この連成機能が重要な役割を果たす。これらのシミュレーションが可能となるよう関連の現象把握と関連する数値解析手法の把握が求められる。

以上のように、工学的に重要な新しい物理現象を再現するにあたっては、その現象における因果法則を明らかにして、これらを偏微分方程式の形で表現し、適切な数値解法の利用や新たに開発することで対応されてゆく。

## ② 数理的手法

### ア 差分法に関する基本的事項

微分方程式を解くために微分を差分商と称される有限差分近似で置き換えて得られる差分方程式で近似するという離散化手法を用いる数値解法である。18世紀にオイラーが考案したと言われる。

### イ 有限要素法に関する基本的事項

方程式が定義された領域を小領域要素に分割し、各小領域における方程式を比較的単純で共通な補間関数で近似する。構造力学分野で発達し、他の分野でも広く使われている手法である。その背景となる理論は、関数解析と結びついて、数学的に整然としている。例えば、板の面内圧縮引っ張りを表す空間方向の2階の微分方程式は、Greenの公式を使って1階の微分だけが含まれる式（1次導関数の積分の形）に変形できる程度の関数解析の理解は要求される。

### ウ 粒子的手法に関する基本的事項

連続体に関する方程式を数値的に解くための離散化手法の一つで、計算対象物を粒子の集まりとして表すことからこのように呼ばれる。主に流体解析、構造解析に用いられる手法で、代表的なものとしてSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法、MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法などがある。流体解析においては、ラグランジュ法に属し、有限体積法、有限要素法に代表されるオイラー法では対流項が最も煩雑で、かつ理解しにくい部分であるのに対し、対流項を計算しないで済ませられるという特徴を持つ。その他の主なメリットとして、計算格子の作成を必要としない点が挙げられる。構造解析においては、大変形にも容易に対応できる。その一方で、有限要素法、有限体積法に比べるとその歴史はまだ浅く、解析ソフトの数も少ない。また、乱流モデルなどの物理モデルの整備もまだ十分でないことから、工学的な利用は現在のところ限定的である。しかし、有力で将来性ある手法であるためその存在と本手法の得失の理解が望まれる。

### エ 境界要素法に関する基本的事項

境界要素法は種々の波動問題、音響学、破壊力学、形状最適化、電磁気学などの特殊な用途において非常に有効な計算力学の手法である。有限要素法では、領域を分割するのに対し、境界要素法は文字通り境界だけの分割で済むので、モデルの作成は容易であるし、放射音などでは圧倒的に境界要素法の方が有利である。一方、有限要素法で最終的に解く連立方程式のマトリクスが有するバンド性、対称性は得られず、結果として、放射音なども大規模構造では困難という問題もあったが、近年では、高速多重極法などの開発などにより、適応範囲が飛躍的に拡大している。

以上、有限要素法に比し有効な点も多く、有限要素法との得失の理解が望まれる。

### オ ソフトコンピューティングに関する基本的事項

計算機科学、人工知能、機械学習、さらには他の工学分野の計算技法の集成であり、非常に複雑な事象の研究・モデル化・解析を行うものである。ターゲットとなる事象は、例えば、従来の場合では、低コストでは対処できないものや、あるい

は従来手法では解析できないものや、さらには完全な解法が見つかっていないものなどである。従来の手法では、比較的単純な系しかモデル化できず、正確な解析もできなかった生物学、医学、人文科学などといった分野の扱う系は複雑であり、それまでコンピュータを使った数学的かつ解析的な手法では扱いにくかったのである。もちろん、系の複雑さは相対的なものであり、従来の手法が役に立たないというわけではない。以上、本項の代表的な事例を学んでおくことが望まれる。

#### **カ 並列コンピューティングに関する基本的事項**

並列コンピューティングとは、複数のマイクロプロセッサやコンピュータに処理を分散して割り当て、同時に計算・処理を行うことで、システム全体の処理性能を向上させる技術の総称である。大規模なスーパーコンピュータはプロセッサ単体の性能向上と同時に、並列コンピューティングによりシステム全体の性能向上を図っている。並列コンピューティングの代表的な手法としては、1台のコンピュータに複数のマイクロプロセッサを搭載する「マルチプロセッサ」や、一つのマイクロプロセッサに複数のプロセッサコアを搭載する「マルチコアプロセッサ」などがある。これらの技術は最近ではパソコンなどにも応用されるようになってきている。スーパーコンピュータなどで用いられる手法としては、プロセッサとメモリ、I/Oチップなどを実装した「ノード」と呼ばれる処理単位を複数つなげて1台のコンピュータシステムを構成する手法がある。一つのノードをマルチプロセッサ化、マルチコア化することにより、さらに並列度を上げている場合が多い。パソコンなど汎用的なコンピュータを複数接続して、あたかも1台のコンピュータのように振舞わせる技術は特に「クラスタリング」と呼ばれ、大企業や大学、研究所などでコンピュータの信頼性や性能を向上させる手法として広く用いられている。また、インターネットなどを利用して種類の異なる多数のコンピュータを接続し、大規模に処理を分散して進める方式は「グリッドコンピューティング」あるいは「分散コンピューティング」と呼ばれ、世界規模で運営されているプロジェクトもいくつか存在する。並列コンピューティングは理論的にはプロセッサやノードの数を増やしていけばその分だけ性能を向上させることができるが、現実には扱う問題は計算順序などに依存関係が生じる場合が多いため、実際にはそれぞれのプロセッサへ常に均等に処理を割り振ることは難しい。プロセッサの数が増えたとすべてのプロセッサを100%使い切ることが急激に困難になってくるため、数が増えた分だけ線形に性能が向上するわけではない。しかし、プロセッサ単体の性能向上には物理的な限界も指摘され始めており、今後もコンピュータの性能向上を進めるためには並列コンピューティングを活用することが必須になると予想されている。このため、並列コンピューティングに適したプログラミングやソフトウェアに関する技術の研究・開発の重要性が増大している。本項では、関連する用語の理解と、各プロセッサに均等に処理を割り振る基本的な考え方の理解が要求される。

#### **キ 最適化手法に関する基本的事項**

最適化手法には、簡易的に求める最適性規準法があるが感度解析を利用する数理

計画法が基本である。感度が求まらない非線形問題には応答曲面法が使用される。また、ソフトコンピューティングを使う場合もある。しかし、いずれにしても、構造最適化の場合、寸法を変える寸法最適化、形状を変える形状最適化、位相を変える位相最適化と3つの形態がある。

#### ク プリプロセッサに関する基本的事項

ソルバーに必要な入力データを作成するためのソフトウェア。FEM 構造解析であれば、メッシュを作成したり、境界条件や荷重を設定したりして解析モデルを作り、最後にソルバーに渡すためのインプットファイルを出力。どのソフトウェアも使いやすいグラフィカルなユーザーインターフェース(GUI)を持ち、3Dモデルを見ながらマウスなどを使って解析モデルが簡単に作成できるようになっている。

#### ケ ポストプロセッサに関する基本的事項

ソルバーで計算した結果を表示するためのソフトウェアである。計算結果を3Dモデル上でグラフィカルに表示したり、アニメーションで見せたり、グラフを作成したり、さまざまな方法で結果を参照できるようにする。ソルバーが出力する膨大な数値データをテキストで見るのは大変な作業であり、計算結果を人に説明するにもテキストでは説得力がなく、グラフィカルに表示する方法が取られる。

#### コ 精度保証に関する基本的事項

数理学上に現れる関数方程式の解を、その存在証明及び誤差評価込みで数値的に厳密に捉えようという方法がある。

自然界のモデルから導かれる関数方程式の解を数値計算によって近似的に求める場合、離散化による誤差に加えて、計算機による丸め誤差が発生する。「精度保証付き数値計算」はこれら二つの誤差を厳密に評価することによって数値計算の信頼性を保証する。また、この方法は理論的に解の存在証明が困難な解析学の問題に対するアプローチとしても重要である。

#### サ 材料特性に関する基本的事項

人工物の設計で使用される線形構造解析に必要となる材料特性は弾性係数（ヤング率）とポアソン比であるが、得られた応力値から構造健全性を評価するためには材料の脆さによって評価すべき応力成分が異なる。降伏点を有する一般的構造材（軟鋼）や延性材料の場合は最大せん断ひずみエネルギー説を基にフォンミーゼス応力によって評価するが、鋳鉄やコンクリートのような脆性材料の場合は最大主応力（引張）説によって評価をする必要がある。また、FRP等の複合材料を使用する場合は、異方性材料特性を考慮する必要がある。一方、ゴムのような非線形特性を持つ材料の場合は、構成式としてMooney-Rivlinモデルに代表されるひずみエネルギー密度関数を使用する必要がある。また、通常の使用条件においても大変形を伴い接触摩擦係数も考慮する必要がある。これらの物性値は、実材料の実験計測から得られたデータをカーブフィットして求められることが多い。

特に、塑性変形を伴う塑性加工の場合や高温条件下で長時間使用される場合などでは、使用する材料の非線形構成式やクリープ特性等の温度依存物性値を用いるこ

とで、塑性ひずみの蓄積やスプリングバック量の精度良い予測が可能となる。

以上、本項では、上記の代表的な材料を使ったシミュレーションで留意すべきことがどのように異なるかの把握が必要である。

### ③ 社会的意義

科学・技術は、人類を厳しい自然から守り、強固な社会基盤を構築し、その経済発展を支えるために高度な発展を遂げてきた。さらに現代では、環境と調和した持続可能な社会の構築や、安全でより快適な市民生活の実現、多様な価値観の下での合意形成などが求められている。これらに係わる科学・技術課題の多くは、特定分野の深い学術的知識と、多様な学問領域にまたがる広範な学術知識の両者の活用を必要としていることに加え、実験による再現や観察が難しいという問題もある。こうした複雑系の課題に取り組み、多様な価値観を有する個人や社会集団の合意を形成する解を導出するには、理論科学、実験科学に次ぐ第3の科学である計算力学によるシミュレーション手法の適用無くしては、解決することができない。

例えば、巨大地震による津波や、集中豪雨による都市型の洪水、あるいは巨大化する台風などを予測し、的確な防災・減災対策を講じるには、こうした自然災害の発生予測精度を更に高めることが重要であり、スーパーコンピュータを用いた自然災害予測への取組が継続されている。また、限られた地球資源の下で、環境と調和し持続可能な形で、人類の生存と発展に必要なエネルギーや水、化学製品を供給するためには、発電所や水処理施設、化学プラントなどの社会インフラを効率的に運用することが不可欠であり、こうした社会ニーズに答えるため、流体力学や熱力学、機械力学や化学工学など、多様な学術領域に係わるシミュレーション手法が複合的に活用されている。さらに、道路や橋梁、建築物、プラント、機械装置など、あらゆる人工物を安全に運用するためには、自然災害や人的ミスなどによるリスクを含めた安全設計が重要である。そのため、人工物に対する低コスト化ニーズに答えながら、複雑な構造物やシステムの安全性と機能を担保することは、経験的あるいは理論的に扱える範囲を超えることが大半であり、固体・構造力学、破壊力学や機械力学などに係わるシミュレーション手法が重要となる。また、近年における社会ニーズは、例えば低振動で低騒音・快適音環境といった、より安心して快適な人工物の実現を求めている。現実世界の物理現象の多くは、流体、熱、電気・電子、機械、構造など様々な学術領域が複雑に絡み合う事が多く、マルチスケールやマルチフィジックスを扱うシミュレーション手法に依存する所が大きい。シミュレーション手法の基本的目的は現象の再現・解明にあるが、近年ではシステムの最適制御、機能・効果の多目的最適化、製造誤差を考慮したロバスト設計など、「設計科学」の活用が求められている。シミュレーション手法を基盤とした設計科学の発展は、性能や機能、安全性の追求に止まらず、実験的には挑戦困難な革新的コンセプトへのチャレンジや、さらには物理現象を最適に制御するためのロジックやデバイスなど、より良い未来社会の実現につながると期待される。なお、計算力学によるシミュレーションの成果を社会還元につなげるには、



「社会実装」の観点、すなわち、研究の結果得られた新たな知見や技術が、将来製品化され市場に普及する、あるいは行政サービスに反映されることにより、社会や経済に便益をもたらすことが大切である。計算力学の社会実装として、例えば、気候変動予測シミュレーション技術に関するものが特に注目されている。文部科学省が、2015年10月に開始した事業「気候変動適応技術社会実装プログラム」では、気候変動に伴って増加する極端気象現象（猛暑や豪雨）等への自治体による地域特性に応じた適応策の導入を支援することを目的としている。この場合、計算力学により、計算した気候予測シミュレーション結果をもとに、地方自治体の担当者による適応策の策定を支援するためのソフトウェアを開発し、製品化することが社会実装の具体例となる。

## (2) 計算力学の学びを通じて獲得すべき基本的な能力

計算力学の対象は多彩であり、その勉学内容や勉学方法も多様であるが、計算力学の勉学を通じて獲得される具体的能力には基本的な共通性がある。それは、計算力学の体系的知識を踏まえた論理的なモデリング能力、計算力学の体系的知識に基づく分析的な問題解決能力、計算力学の体系的知識に基づいた類推による他分野の理解能力、個々の知識を応用・総合し、制約条件の下で所定の機能を実現する能力、計算力学の体系的知識を踏まえた論理的でごまかしのない明快な説明能力、と整理することができる。また、計算力学の勉学の過程を経て科学的なものの考え方を身に付けることができる。

### ① 計算力学に固有な能力

#### ア 職業上の意義

ソフトハードの時代、すなわち、新しい製品の開発もソフトに裏打ちされて始めて迅速に最適なもの得られる時代となっており、従来実験で検討されていた課題も計算力学に置き換わっていることを認識すべきである。理工系の大方が従事するエンジニアや研究者は、計算力学の本質を把握することが重要である。利用する計算力学のソフトがたとえ欧米製でも、中身を理解することにより、その限界や適切な使い方が得られ、業務は大いに捗ることとなる。我々が直面する課題の解決には、特定分野での深い学術的知識に加え、多様な学問領域にまたがる広範な学術知識が必要となる場合が多い。計算力学を勉学する学生は、シミュレーションの精度保証に対する基本的素養と、物理現象を解析的に分析する視点を獲得することで、より広い学術の理解・習得の入口に立つことができる。例えば、「ものづくり」プロセスにおいて、シミュレーション手法を援用した仮想実験を反復すれば、比較的短い期間で体系化・形式知化された技術や、「ものづくり」の根幹にかかわるエンジニアリングセンスを獲得することができる。こうしたシミュレーション手法の活用力は、短納期での開発や、安全性や信頼性を担保した上での厳しいコスト低減、従来の経験的アプローチでは達成困難な性能・機能の実現や、革新的設計へのチャレンジなどに不可欠なものとなっている。シミュレーション手法により、見えない現象を可視化し、物理メカニズムを解明・理解することは、価値観の異なる個人や社会集団の壁を乗り越えて、成果を共有する上でも有効である。計算力学を勉学する学

生は、物理現象を解析・分析することに止まらず、獲得した知見を統合して課題解決を行う、数値最適化やロバストデザインなどの「設計科学」への展開も期待できる。以上、計算力学は、極めて多様な領域をカバーできるため、大きなプロジェクトに必須のものである。この遂行には、多分野の人たちの協働が不可欠である。計算力学の学術を勉学する中で、学生は、広い視野の重要性を理解し、他分野への興味・勉学姿勢や協働への勉学方法を獲得できる。

## イ 市民生活上の意義

かつて実験が主体であった課題も計算力学への置換が、どんどん進んでいるが、特に実験が困難な海洋・宇宙等のフロンティア、地震災害、原子力、核融合などでは、計算力学の独壇場である。これらも、一般市民生活に非常に関わるものであるが、身近な機械製品では機械工学などと比べ一般市民からの意識的距離は遠い。すなわち、計算力学は、これまでの物をベースとする開発スタイルからデータをベースとする開発スタイルへの変革により、開発期間の大幅な短縮に貢献し、製造者に多大な恩恵を与えている。一方で、情報処理、情報通信、情報蓄積など情報技術を駆使するものでもある計算力学は消費者にも大きな恩恵を与えている。必要な時に必要な製品情報の検索や世界中の消費者間の情報共有などにより消費者は、今まで以上に製造者に緊迫感を与えることが可能になっているからである。言わば、21世紀においては、19世紀の巧みの技を20世紀の大量生産のコストで提供することが要求される。この一般市民の要求に応えるには、極論すれば、消費者も思いついたら即、仮想設計・仮想製造できる社会の実現である。このように、計算力学は、最先端の科学・技術の推進の側面と大衆化という、二つの一見相反する要求に応じて行く必要がある。この期待に応えるためには、すなわち、1) 計算機能力の更なる向上、2) これまでの、確定した微分方程式を対象とする演繹的モデリングに加えて、不確かさも考慮した帰納的モデリング技術の更なる向上、3) メッシュ生成、並列処理、可視化技術などの更なる向上、といった課題を克服し、一般市民の関心の深い社会問題にも計算力学の適用範囲を広げ、解析システムをより使い易くする必要がある。このように、一般市民・消費者の潜在的な要望を満たし、身近な製品においても一般市民から、より身近な存在になる日も間近いし、計算力学を学ぶ者はこのような意識をもって業務にあたり学ぶことが重要である。

## ウ 学問・社会の変化と計算力学の勉学

衝突シミュレーション技術の成功は、1億円程度もする衝突試作車の台数を大幅に削減できたことから、自動車メーカーの経営者に、他の特性も実験からシミュレーションに代替してみようという勇気を与えた。以来、計算力学が対象とする時空間スケールは人間にとって身近なものから、宇宙から細胞まで大きく拡がり、複雑・大規模なシステムも開発・利用されている。計算力学は、製品やシステムを構成する個々の要素の機能の最適化のみならず、取り巻く環境の中でのシステムそのもの

の適切さの議論にも、もはや欠かせない。扱うシステムの巨大化、極小化、更に、求められる高機能化に伴い、計算力学も今日では「古典的」となっている差分法、有限要素法、有限体積法、そして境界要素法で用いられる離散化法も、誤差解析、精度保証付き技術やアダプティブ法などで手法の深化が図られ、メッシュフリー法、スペクトル法、ウェーブレットなど新しい発想により、上述の古典的な手法は新たな展開を見せており、適用領域も確実に拡大している。この拡大には、数理解析的側面は勿論のこと、情報科学に関する知識も取り入れることによって得られた面も多いことにも注目する必要がある。このように計算力学の発展は、多様な分野の融合により新規の分野開拓がなされると、また新たな課題が出現し計算力学は日々発展を遂げている。例えば、環境問題などの地球規模の問題にも見られるように、現代社会が抱える課題は、ますます多様化・複雑化している。これらには、研究分野を超えて様々な分野の知を結集して統合し、課題解決に当たらなければならない。そのためには、各分野の知識の深化とともに分野間の知の体系・構造を理解することが重要である。計算力学は社会の発展をもたらすリード役であり、その内容は常に諸科学と融合し変化している。また、人間生活との連携が深い分野であるがゆえに、社会の変化に伴って学術内容にも進展が求められる。

## エ 獲得されるであろう具体的能力

計算力学の対象は工学から、物理、生物、化学、地球科学と多彩であり、その勉学内容や勉学方法も多様である。教員がどのような方向性を強調するか、及び、学生がどのようなアプローチを選択するかによって、専門的な知識・理解が異ってくる。しかし、人間生活や社会の質の向上や安全安心に資する諸問題の認識と解決を共通に志向することから、計算力学の勉学を通じて獲得される具体的能力には基本的な共通性があり、その能力は以下のようにまとめられる。

- 1) 計算力学の現状及び今後について、十分な裏づけを持った意見を持つことができる。
- 2) 計算力学に関する他者の意見を理解し、適切に評価し、位置づけることができる。
- 3) 新たに開発された計算力学技術に関して適切な解釈を与え、自らの意見を表明したり、実践に関与したりできる。
- 4) 使用環境や条件についての十分な理解の下で、適切にシステムを稼働させることができる。
- 5) 計算力学に関する特定の課題や諸問題について、文献やデータを収集して吟味し、解決できる。
- 6) 計算力学とは何かについて、それを専門としない者に説明できる。

計算力学の学びを通じて獲得すべき基本的な能力は、次のように整理することができる。

- 1) 帰納的能力：計算力学の体系的知識を踏まえて論理的に問題設定をする能力

- 2) 解析的能力：計算力学の体系的知識に基づき分析して問題を解決する能力
- 3) 理解能力：計算力学の体系的知識に基づいた類推により他分野を理解する能力
- 4) 設計能力：個々の知識を応用・総合し、制約条件の下で所定の機能を実現する能力
- 5) 説明能力：計算力学の体系的知識を踏まえた論理的でごまかしのない明快な説明をする能力

## ② ジェネリックスキル

計算力学の学修を通して獲得されることが期待されるジェネリックスキルは数多くあるが、その中でも以下のものは重要である。これらのジェネリックスキルは計算力学の特性と深く関連しており、計算力学の学修を通して効果的に養うことができると考えられる。特に現象のモデル化・解析結果の解釈は、計算力学の特性と深く関連しているものの、それを通して育成される能力は、実証性、チャレンジ精神、行動力など、計算力学の枠組みを超えて発揮されるものであり、市民生活をする上でも重要なことから、ここではジェネリックスキルとして分類している。

- 1) 数理的・論理的思考力
- 2) 数値解析に関わる実践的理解
- 3) 計算力
- 4) 現象の数理モデル化の能力
- 5) 物理現象の理解の深化
- 6) 情報処理一般、特にプログラミング能力
- 7) 問題発見能力・問題解決能力
- 8) 空間・図形認識能力
- 9) 形状デザイン能力
- 10) チームで仕事をするための能力
- 11) 分野開拓・自己啓発能力

## 5 勉学方法及び勉学成果の評価方法に関する基本的な考え方

計算力学を学ぶための勉学方法は、主に、講義、数値実験、演習、実習、課題（学士課程卒業論文や修士論文）研究がある。内容が多様であることから、目的に応じて選択や重み付けをするなど、有機的に組み合わせることが有益である。評価対象については、演繹的能力、帰納的能力、基礎知識に関するリテラシー、問題発見・分析・解決能力、コミュニケーション能力などがあるが、それぞれの教育内容・教育方法及び個々の勉学者の状況に即して、多様で柔軟な評価方法がとられる必要がある。

### (1) 勉学方法

計算力学は、社会との関わりが強く、人々が安全で快適で豊かな社会生活を送るため

に必要な科学・技術と深く結びついた総合的な学問であるので、学習の効果を上げるためには、講義、実験、演習、実習、課題研究（卒業論文や修士論文を含む）等、多種多様な教育方法が有効である。特に総合的な学問であることに配慮し、機械工学、電気・電子工学、化学工学、土木・建築工学などの工学にとどまらず、数理科学、情報学、物理学、化学、生物学、地球科学へと視野を広げさせる教育方法が望ましい。しかしながら、学部や修士課程の教育においては、これらの方法がすべて必要不可欠という訳ではなく、目的に応じて柔軟に組み合わせられるべきものである。たとえば、実験、演習、実習等を講義と組み合わせて、理論と実際の関係性を修得させる方法も有効である。通常、以下のような多種多様な教育方法が考えられている。

### ① 講義

多様な数理的アプローチ方法に関する基礎、その応用目的と手法、実践例、最先端の動向、などの計算力学に関する多様な知識・適用方法を体系的にバランスよく学ぶ機会を与える。知識の体系の効果的な学修には、古典的な講義に加えて、グループ・ディスカッションなどのアクティブラーニングや反転授業など、様々な形態の授業を工夫することが重要である。計算力学においても、教育方法の改善に向けた不断の努力が必要である。もし可能であれば、講義の一環としても、いくつかの応用事例の学習を通じて、計算力学の将来発展につながる一般化について議論することも重要であろう。なお、上記を丁寧に説明することも大切であるが、学ぶ側に考えさせることも大切である。また、計算力学を学ぶことに十分な動機を持っているかの確認も必要である。

### ② 実験・演習・実習・課題研究

計算力学の学修には、講義に加えて各種の実験・演習・実習・ゼミナールが極めて重要である。実験・演習・実習・ゼミナールを通して、講義で学んだ知識が定着し、知識を基盤とする各種の計算力学に固有の能力が獲得される。実験・演習・実習・ゼミナールは、これらが発展した学習形態であるプロジェクト学習とともに、協調性・コミュニケーション能力・プレゼンテーション能力、指導力・リーダーシップといったジェネリックスキルを養う格好の場でもある。なお、計算力学の学修においては、これらの能力を養うために、計算力学の知識の体系のうち、特に「課題と解析結果の可視化」を効果的に活用すべきであろう。ジェネリックスキルの中でも、モデル化と解析結果の表現法を行う能力は、特に計算力学の学修を通して獲得されることが期待されている。計算力学の講義では、モデル化の技術や関連する各種の理論を教える機会が多くあるが、演習やプロジェクト学習においては、モデル化の技術や理論を現実世界や業務に対して適用することが適切であろう。

#### ア 実験

教育効果を高めるためには講義と組み合わせて実施することが考えられる。理論と実践とを結びつけて理解できる実験は、学修方法として効果的であるだけでなく、学生の学修意欲を高める効果がある。自然法則に従う事柄を再現することによって認識科学の理解を深める。また、想定条件において予想された統合効果を再現して

みることによって、設計科学の理解を促進する。さらに、ある理論や仮説が正しいかどうかなどを実際に試してみることによって、各種の数理アプローチ法やモデリングに関する確証を得ることができる。

## イ 演習

実践と深く結びついた計算力学を学ぶためには、多くの領域における具体的事例や研究成果から、明らかにすべき諸課題を自ら発見し、それらの問題を分析し、その解決策を検索して行く問題解決型の学修、すなわち数値シミュレーションを中心とする演習が重要である。実際的問題の理解のために、事例の検討やロールプレイングの実施、チーム協働作業による解法の発見等も有効である。

具体的問題に対する演習を通じて、学ぶ側が自らの理解度を知ることができる。また、理論と実際との比較から、現実の多様性・複雑性を認識することも大切である。

## ウ 実習

実際のものづくりなどを通じた経験は、基礎知識の理解を深めるとともに、その知識を実践としての技術に取り込んでゆく設計科学の知識と方法論を経験することができる。さらに、その経験を通じて計算力学が社会へ貢献する意義を体感し、チームとして行動する価値を知り、コミュニケーションの重要性を理解できるであろう。また、場合によっては国内にとどまらず海外における技術動向を知ことができ、結果として海外での活動が国際協力につながることもある。

## エ 課題研究（卒業論文、修士論文）

課題研究においては、与えられた課題又は自ら設定した課題について、モデリングと数値解析を行う。研究の進め方としては、学生と指導教員が個別に意見交換し、研究の方向性を相談する等の指導は受けるものの、最終的には学生自らの力で課題解決の糸口を見出していくことになる。その過程における必要な情報や知識の探索や獲得を通じて問題発見・分析・解決のための能力を総合的に養う。また、科学文献の精読やレポート作成を通じてリテラシーを身に付ける。このように学生が自ら課題を設定し、その課題を解決していく過程が重要である。

## (2) 評価方法

計算力学分野における学修成果の評価方法においては、それぞれの分野がカバーしている領域が広いので、評価は、多様で柔軟な評価方法の組合せを取らざるを得ず、主要なものを下記に挙げるが、その他の評価尺度もあり得る。

- 1) 基礎知識の理解度を評価する（主に、講義、演習）。
- 2) 専門知識の理解度を評価する（主に、講義、実験、演習）。
- 3) 知識の総合化能力を評価する（主に、課題研究、システム設計）。
- 4) リテラシーを評価する（主に、システム設計、課題研究）。
- 5) 課題発見・分析・解決能力を総合的に評価する（主に、課題研究）。
- 6) コミュニケーション能力を評価する（主に、設計、課題研究）。

- 7) マネジメント能力を評価する（主に、課題研究、実習）。
- 8) 倫理的事項についての判断力を評価する（主に、演習、設計、課題研究）。

## 6 専門性と市民性を兼備するための教養教育

計算力学を専門に学ぶものが身に付けるべき教養について述べる。計算力学の専門性を十全なものとするためには、周辺諸科学の教養を学修する必要がある。計算力学の適用は充実と広がりを示し、諸科学との境界において新たなメタサイエンスと位置付けられる応用計算力学を生み出し続けている。従って、計算力学を学ぶものは、計算力学が実際に応用される場に積極的に出て行き他分野の専門家と協働するためにも、諸科学に関する幅広い教養を有している必要がある。また、他のメタサイエンスに関する教養も重要である。特に数理科学と情報科学と深く関連しており、計算力学を学ぶものは、数理科学と情報科学をマイナーの専門として学ぶべきであろう。数理科学と情報科学以外にも、機械工学、土木・建築工学、物理学、化学、生物学などがメタサイエンスとして重要である。また、人文社会科学を含めた周辺諸科学の教養は、計算力学を学ぶものが良き市民として民主的な社会に貢献するためにも重要である。人工物のほとんどすべて何らかの計算力学によって開発されている現在、計算力学を学ぶものが社会で果たすべき役割は日増しに大きくなり、直面する問題も非常に複雑である。たとえば、社会の安定という面では、計算力学は災害予知や軽減にまで利用されるに至っている。このような状況下では、社会の安定のために利他的な貢献を自律的に行うマインドと、計算力学の深い専門性を兼ね備えた市民性の厚さが問われることになる。計算力学を学ぶものがそのような市民性を形成するためには、計算力学のスキルや知識はもとより、社会の成立に対する妥当な展望と現実問題の複雑性を多面的に捉える視野や発想をもたらす周辺諸科学を教養として学修が必須である。計算力学を学んだものが、以上で述べたような教養を背景に、民主的な社会の形成に貢献することは、計算力学を学ぶことの社会的意義や職業的意義をさらに強固にすると考えられる。

このように計算力学のもつ本質的意義から、計算力学は社会・人間との関連性が深い。計算力学に関する知は、自然法則に対する認識や活用についての素養を与えるだけでなく、物・エネルギー・情報と社会・人間との関わり合いについての洞察を与える。とくに、市民性の観点からは、人工物と社会・人間との関連において人文・社会科学に関する理解が大切となる。

## 7 専門基礎教育及び教養教育としての計算力学教育

計算力学には多様な知識の連携が求められることから、計算力学を学ぶ者には、縦糸的学問である機械工学、土木・建築工学などから特に関連する分野を、また横糸的学問である数理科学や情報科学などから特に関連する分野も専門と考え深くかかわることが求められる。そのみならず、縦糸的学問とも横糸的学問とも直接関連しない分野も、その初歩やその発展に関する一般動向を知ろうとする意欲と理解力が求められる。今日の課題は、かつて見られないほど複雑・大規模化しており、もはや計算力学の知識なしでは合理的な判断はなし得ない。だからこそ計算力学の教育は、それを学ぶ者に専門的技術内容を専門

外の人に一般的な言葉で説明するなどの説明能力とともに、計算力学分野及び他分野の専門家からの説明を理解するための基本的素養を身に付けることが要請される。すなわち、実社会では他分野との有機的な協働が不可欠であり、自らの専門分野を相対的に捉え、その限界を認識するとともに、コミュニケーション能力を備えて専門分野を異にする人々との間で知の基盤を共有して対話を成立させることが肝要である。このような知識や能力は、人工物に囲まれて生活する現代における市民に必須の技術教養の一つである。計算力学技術は、人類社会に共通する基盤を有している。したがって、専門性を兼ね備えた市民として世界的視野を涵養することが重要である。社会的合意形成に際して、技術のもたらすリスクとベネフィット及びその原因や理由を適切に分析・認識し、他者とのコミュニケーションをもって社会的課題に対する意思決定へ関与することが市民に求められる。計算力学を学ぶ者はその情報を提供する責務があることを自覚しなければならない。以上のように、計算力学は、単なる生活の利便性をもたらすものではなく、社会や人間の価値観にまで深い繋がりをもつものである。専門知識と広い教養を身に付けることが、技術的・社会的課題に対する的確な洞察力と解決への実行力を与えるであろう。



## <用語の説明>

### 1 メッシュフリー法

偏微分方程式の境界値問題を離散化近似で従来の有限要素法のようなメッシュ無しで近解を得る数学的アプローチの総称である。多くのアプローチが存在する。

### 2 スペクトル法

フーリエ級数などを使うことで、未知数の要素を三角関数に分けて計算する方法のことをいう。数学的には、微分方程式で表される流体の関係式を、微分を使わない代数の式に近似する。そして新しくできた方程式を解くことで次の状態を見ていこうとするものである。

### 3 ウェーブレット

ウェーブレット変換は、周波数解析の手法の一つ。基底関数として、ウェーブレット関数を用いる。フーリエ変換によって周波数特性を求める際に失われる時間領域の情報を、この変換においては残すことが可能である。フーリエ変換でも窓関数を用いる窓フーリエ変換で時間領域の情報は残せたが、窓幅を周波数に合わせて固定する必要があるため、広い周波数領域の解析には向かなかった。ウェーブレット変換では、基底関数の拡大縮小を行うので、広い周波数領域の解析が可能である。しかし、不確定性原理によって精度には限界がある。フーリエ変換では、 $N$  をデータのサイズとしたときに  $N \log N$  のオーダーで計算量が増える ( $O(N \log N)$ ) が、ウェーブレット変換では  $O(N)$  の計算量でできる利点がある。

### 4 アダプティブ法

有限要素法においては、メッシュを無限小化することで数値解が厳密解に収束することが数学的に保証されているが、全自由度が無限大の剛性マトリックスを解くことはコンピュータに大きな負荷がかかり現実的には不可能である。すなわち、解析精度を上げるにはある自由度内でより精度の良いメッシュを生成することが必要となってくる。「精度のよいメッシュであること」の十分条件は「要素次数が高次であること」や「要素寸法が小さいこと」であることが知られているが、最適なメッシュとする指標は漠然としたもので経験則からの予想でしかない。そこで、より解析の精度を必要とする要素を事後評価により導出し、それらのメッシュのみを自動的に制御するアダプティブ法が有効であるとされている。

## ＜参考資料 1＞ 審議経過

平成26年（2014年）

- 12月1日（月） 計算力学小委員会（第1回）  
（計算科学シミュレーションと工学設計分科会と合同開催）  
役員の選出、23期の進め方について討議

平成27年（2015年）

- 5月19日（水） 計算力学小委員会（第2回）  
計算力学小委員会で参照基準を作成することを決定
- 12月7日（月） 計算力学小委員会（第3回）  
（計算科学シミュレーションと工学設計分科会と合同開催）  
章・節・項について議論

平成28年（2016年）

- 5月11日（火） 計算力学小委員会（第4回）  
参照基準各項目ごとの担当者を決定
  
- 12月5日（月） 計算力学小委員会（第5回）  
（計算科学シミュレーションと工学設計分科会と合同開催）  
参照基準（案）について議論

平成29年（2017年）

- 3月15日（水）～3月21日（火）  
計算科学シミュレーションと工学設計分科会（第5回）（メール審議）  
報告案「大学教育の分野別質保証のための教育課程編成上の参照基準－計算力学分野－」について承認

6月23日（金）日本学術会議大学教育の分野別質保証委員会（第23期・第8回）  
報告案「大学教育の分野別質保証のための教育課程編成上の参照基準－計算力学分野－」  
について承認

## <参考資料2> シンポジウム開催

### 第6回計算力学公開シンポジウム

主催：日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同

計算科学シミュレーションと工学設計分科会

共催：可視化情報学会、CAE 懇話会、日本応用数理学会、日本機械学会、日本計算工学会、日本計算数理工学会、日本計算力学連合、日本シミュレーション学会、アジア太平洋計算力学連合、国際計算力学連合

協賛：自動車技術会

#### 〔開催趣旨〕

第I部では、我が国を代表する計算力学関連学会が一堂に会し、各学会を代表する若手が最新の成果を披露する日本における広い分野の計算力学研究と活用の成果をまとめて聞くことができる貴重な機会です。

第II部では、現在日本学術会議において作成が進められている「計算力学参照基準」について、検討状況を紹介するとともに議論を行い、その結果をフィードバックし「計算力学参照基準」づくりに活かして行くことを考えています。多数の方のご参加を期待しています。

#### 〔次第〕

総合司会：吉村忍（日本学術会議連携会員、計算科学シミュレーションと工学設計分科会委員長、東京大学大学院工学系研究科副研究科長、システム創成学専攻教授）

10:00 開会の辞

矢川元基（日本学術会議連携会員、原子力安全研究協会会長）

第I部若手研究者による講演(10:10-15:40)

10:10-10:40

講演1（日本計算数理工学会）

奥村大（大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻准教授）

「ゲル材料の膨潤誘起不安定解析」

10:40-11:10

講演2（CAE 懇話会）

内藤正登（住友ゴム工業（株）研究開発本部研究第一部主査）

「次世代高性能タイヤ開発のマルチスケール・シミュレーション」

11:10-11:40

講演3（日本機械学会計算力学部門）

山田崇恭（京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻助教）

「トポロジー最適化の新展開」

11:40-12:10

講演 4 (日本計算工学会)

加藤準治 (東北大学大学院工学研究科土木工学専攻准教授)

「マルチスケルトポロジー最適化と積層造形への展開」

12:10-13:40 昼休み

13:40-14:10

講演 5 (日本計算力学連合)

大西有希 (東京工業大学工学院システム制御系助教)

「四面体を用いた平滑化有限要素法による大変形解析の最新動向」

14:10-14:40

講演 6 (日本シミュレーション学会)

後藤和哉 (合同会社 PExProCS 代表)

「大規模アセンブリ構造解析のための多点拘束条件処理手法」

14:40-15:10

講演 7 (可視化情報学会)

八木佐也香 (日本電信電話 (株) アクセスサービスシステム研究所研究員)

「Storyline を適用した連続数値型時系列データ可視化の一手法」

15:10-15:40

講演 8 (日本応用数理学会)

高安亮紀 (筑波大学大学院システム情報工学研究科リスク工学専攻助教)

「常微分方程式の爆発解に対する数値的検証法」

休憩

第 II 部パネル討論「計算力学参照標準について」(16:00-17:20)

パネラー

萩原一郎 (日本学術会議連携会員、明治大学特任教授、  
先端数理科学インスティテュート所長)

越塚誠一 (日本学術会議連携会員、東京大学人工物工学研究センターセンター長、  
工学系研究科システム創成学専攻教授)

平野 徹 (ダイキン情報システム (株) 顧問、NPO 法人 CAE 懇話会長)

17:20 閉会の辞

萩原一郎 (日本学術会議連携会員、明治大学特任教授、  
先端数理科学インスティテュート所長)