OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	力学をつくる眼 ： 数理モデリングと現象解析から読む応用力学小史
Author(s)	中谷, 彰宏
Citation	
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/106207
rights	©Akihiro Nakatani 2026
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

「機械工学のための数理モデリングと現象解析入門」とあわせて読みたい

力学をつくる眼

数理モデリングと現象解析から読む応用力学小史

博士（工学） 中谷 彰宏 著

Web publication supported by
コ ロ ナ 社

まえがき—現象を見る，選ぶ，つなぐ

工学の教科書には，よくできた理論が完成した姿で現れます。材料力学なら，棒，はり，軸，柱があり，引張り，曲げ，ねじり，圧縮された柱が横に曲がる座屈という定型問題があります。流体力学なら，流れを記述する方程式と境界条件があります。有限要素法なら，物体を小さな要素に分け，連立方程式を解きます。そして学生は，その完成された体系を学びます。

完成された体系の背後には，複雑な現実から問いに必要なものを選び，どのような数学的対象へ置き換えるかという判断と操作があります。3 次元の物体を棒やはりとして表したり，粘性流れの一部を薄い領域として切り出したり，材料の応答を一つの式にまとめたりする作業です。こうして現象からモデルを作り，そのモデルを用いて現象の性質や振る舞いを調べる活動が，数理モデリングと現象解析です。ガリレオのはり理論のように，鋭い着眼が後世の修正と発展の出発点になった例もあります。

本書では，今日なら数理モデルを立て，現象を解析すると呼ぶこうした活動が，理論・応用力学の歴史のなかでどのように行われ，新しい問いへとつながってきたかをたどります。

知識は，研究者どうしのつながりを通じても育ってきました。バーガースは国際会議を組織し，ヒルは学術誌を編集し，W. Prager はブラウン大学に国際的な研究拠点を作りました。人が集い，論文を読み，研究者が場所を移すことで，問題の選び方や考え方そのものが伝わります。本書では，理論の内容とともに，こうした知識の移動にも目を向けます。

現代の専門分野はかつてないほど深くなっています。本書では，読者が自分の専門外の問題を見たときにも「これは，あの問題と同じ構造ではないか」と気づくための手掛かりを示したいと思います。

本書は，教科書『機械工学のための数理モデリングと現象解析入門』[1)]（以下，本編と呼びます）を補う読本です。本編にコラム「コーヒーブレイク」として構想していた内容の一部をもとに，新たに起稿したものです。本編が数理モデルの立て方と現象解析の方法を順序立てて扱うのに対し，本書では，本編とは異なる視点から，何をモデルとして取り出し，そのモデルから現象の何を読み取るかという考え方が，力学の歴史のなかでどのように形づくられてきたかをたどります。著者自身が研究課題としてきた材料力学，固体力学，計算力学を主軸に題材を選び，流体力学や熱力学との接点にも目を向けます。

専門語は必要に応じて用いますが，大学で力学を学んでいない読者にも筋道を追えるよう，初出ではできるだけ日常の言葉による説明を添えます。また，各章には「このひとはどう学んだか」などのコラムを置きます。日本語で広く定着した人名はカタカナ表記とし，近年の研究者など読み方が定着していない場合は原綴りで紹介します。原綴りで記す人名は，初出では必要に応じてファーストネームのイニシャルを添え，以後は原則として姓のみを記します。

本編との対応表は，必要に応じて参照できるよう付録に置きました。

2026 年 8 月

中谷 彰宏

目　　次

1. 見ることから始まる—レオナルド，ガリレオ，はり

1.1 変形から何を取り出すか …… 1
1.2 ガリレオ—強度を数学の問題にする …… 2
1.3 問いを見つけることが，新しい力学をひらく …… 2

2. 3 次元を 1 次元へ畳む—棒，はり，軸，柱

2.1 材料力学という大胆な縮約 …… 4
2.2 オイラーとベルヌーイ—断面の変形をどう仮定するか …… 4
2.3 サンブナン—遠くでは何を覚えていればよいか …… 5
2.4 ティモシェンコ—理論を学べる形にする …… 6

3. 「場」を発明する—グリーンとコーシー

3.1 物体内部の力を「場」として表す …… 8
3.2 グリーン—境界と内部を結ぶ …… 8

4. ゲッティンゲン—数学と工学が同じ廊下にいた時代

4.1 ゲッティンゲンを支えた応用力学の前史 …… 10
4.2 プラントルとクーラン—異なる近似の文化 …… 11

5. 固体は流れる—プラントル，オロワン，ヒル

5.1 塑性を「流れ」として表す …… 13
5.2 オロワン—現象から機構を考える …… 14
5.3 ヒル—個別現象を一般構造へ引き上げる …… 14

6. スケールとエネルギー地形—レイリー，マクスウェル，殻座屈

6.1 方程式の形を先に知る—次元解析と相似則 …… 16
6.2 状態の競合を描く—マクスウェルから殻座屈へ …… 17
6.3 マクスウェル条件と実際の遷移 …… 18

7. 原子から連続体へ—FPUT，次元低減，結晶安定性

7.1 FPUT—1 次元化が見せる別の力学 …… 19
7.2 原子と連続体の安定性を同じ問いで捉える …… 20

8. 計算そのものを力学にする—クーランから現代計算力学へ

8.1 計算が理論の一部になる …… 22
8.2 Marsden と Hughes—数学と力学の往復 …… 23
8.3 Oden，Belytschko，Hughes—計算力学を一つの学問にする …… 23
8.4 Ortiz—変分，原子，データを同じ問題として扱う …… 24

9. 知はどのように移動するか—学派からネットワークへ

9.1　人を集めることで知識をつなぐ—バーガース …… 26
9.2　戦争による移動と，戦後の循環 …… 27

10.　論文を越えて知をつなぐ—手紙，編集，講演会

10.1　手紙が知識を運んだ …… 29
10.2　編集も学問をつくる—ヒルと JMPS …… 31
10.3　講演会は生まれつつある知識を残す …… 32

11.　構成式からデータ駆動へ—モデル化の役割を広げる

11.1　構成式が担ってきたモデル化 …… 34
11.2　データ駆動が広げるモデル化の仕事 …… 35

12.　終章—モデルをつくり，現象を読み，次の問いをひらく

12.1　多様な学び方が力学をつくる …… 38

あとがきに代えて—史実と解釈のあいだ

付録：本編との対応表 …… 42
引用・参考文献 …… 43
索　　引 …… 50

1 見ることから始まる—レオナルド，ガリレオ，はり

1.1 変形から何を取り出すか

材料力学の授業では，はりを一本の線として描きます。実物のはりは 3 次元の物体であり，外から力（荷重）を受ければ，上側と下側では伸び縮みが異なり，断面は移動し，場合によっては反り，局所的には複雑な**応力**（物体の内部では，ある面を通じて両側が押し合ったり，引っぱり合ったり，ずらし合ったりする内力が働きます。応力は，その内力を単位面積あたりの量で表したものです）が生じます。そこから一本の線で表せる自由度を選び出すこと自体が，力学の重要なモデル化です。

レオナルド・ダ・ヴィンチのノート（手稿）には，構造物，はり，曲げ，破壊を観察した多くの素描があります。そこからは，変形した物体を線や面の関係として捉えようとする視覚的思考を読み取ることができます。数式として体系化される前に，現象の中から形と変形の関係を取り出す眼が働いていました。北川浩が『機械の研究』誌に連載した「レオナルドの『はりの問題』を解く」も，レオナルドの図を，後世の材料力学の言葉から読み直す試みでした[2)]。

本書では，「レオナルドがオイラー・ベルヌーイ理論をどこまで先取りしたか」という評価よりも，**画家として訓練された眼が，変形する物体のなかに力学的な構造を見出したこと**に注目します。後に技術史家 E. S. Ferguson が工学における非言語的・視覚的思考を**心眼**（図や絵，頭の中のイメージによって考える力。Ferguson はこれを英語で mind’s eye と表現した）という言葉で論じた

ことも，この点を考える一つの補助線になります[3)]。

1.2　ガリレオ—強度を数学の問題にする

ガリレオの『新科学対話』（*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, 1638）は，物体の運動とともに材料の強さを正面から論じた古典です。同書は，登場人物の対話を日ごとに分けて議論を進める構成をとり，その「第二日」では，片持ちはり（片方の端部のみが壁に支持されているはり）の破壊や寸法効果（太さや長さに応じて強度がどのように影響するか）が議論されます[4)]。ガリレオが強度の問題を数学の対象にした意義は大きいものです。曲げを受ける断面内部については，断面全体が一様な引張応力を受け，はりが壁との接合部の下端を軸として回転するというモデルを置きました。この仮定から得られる強度は，後世の曲げ理論による値のおよそ 3 倍になります。断面内部の応力状態をどう捉えるかが，最終的な数値を大きく左右することを示す例です。後世の曲げ理論は，この問題設定を受け継ぎながら，断面内部の応力と変形をより精密に捉える方向へ発展していきます。この誤りもまた，何を問い直せばよいかを次の世代へ示す手掛かりになりました。

この例は，数理モデリングでは計算の巧みさと同じくらい，内部で起きている現象をどう捉えるかが重要であることを示します。「式を解く」以前に，現象をどう切り取るかがモデルの骨格を決めます。

1.3　問いを見つけることが，新しい力学をひらく

ガリレオが提示した重要な問いの一つは，「大きさが変わると強さはどう変わるのか」「はりはなぜ折れるのか」という身近な現象を，数学で調べるべき工学問題として取り出したことにあります。研究では，答えを求めることと同じくらい，現象の中から何を問うべきかを見出すことが重要です。問いが定まると，何を測り，どの量を残し，どのような関係をモデルとして表すかが見えて

きます。

その後，**弾性論**（力を除けば元の形に戻る変形（弾性変形）を扱う理論），断面内の応力分布，**座屈**（柱やはりのような細長い部材が，圧縮する力を受けたときに，まっすぐな形を保てなくなり，急に横方向へ曲がる現象），破壊力学など，新しい問題と理論がそれぞれの文脈で発展しました。新しい問いがモデルを生み，モデルを用いた解析が次の現象と問いを見せる。こうした連鎖もまた，モデリングの歴史です。

このひとはどう学んだか：レオナルド・ダ・ヴィンチ

レオナルドは，書物の体系より先に，対象を描くことを通じて考えました。人体，水，機械，構造物が同じノートに並ぶのは，後世の学科区分よりも「形と動き」に注意を向けていたからでしょう。図を描くこと自体が，彼にとって現象を分解し直す方法だったように見えます[3)]。

レオナルドとガリレオは，同じ「曲がるはり」という現象を前にしながら，まったく違う道具で考えました。一方は眼で捉え，もう一方は式で捉えました。次章では，この二つの道具が，どのように一つの理論へまとめられていくかをたどります。

2 3次元を1次元へ畳む—棒，はり，軸，柱

2.1 材料力学という大胆な縮約

材料力学は初等科目として教えられますが，その核心には，3次元連続体の情報を目的に応じて1次元の理論へ圧縮する高度な縮約があります。

棒では軸方向の伸びを残し，はりでは曲げを残し，軸ではねじりを残し，柱では圧縮と，それによって生じる横方向のたわみ（横変位）との連成という情報を残します。「棒」「はり」「軸」「柱」という区分は，同じ細長い3次元物体から，問題に必要な変形様式を選び分けた結果生まれたモデルそのものです。

この低次元化では，断面上に分布する応力の情報を，合力やモーメント（**力のモーメント**（力がある点のまわりに物体を回転させようとする働きの大きさ））という積分量にまとめて1次元理論へ持ち越します。点に作用する力だけでなく，曲げモーメントやねじりモーメントという高次の量が自然に現れるのは，数学的に言えば3次元分布を断面上で積分した結果です。つまり，低次元化では，細かな情報をまとめながら，**どの積分量を保存すればよいかを発見すること**が重要になります。

2.2 オイラーとベルヌーイ—断面の変形をどう仮定するか

オイラー・ベルヌーイはり理論の核心は，難しい微分方程式そのものより，断面がどのように変形するかについての運動学的な仮説にあります。変形前に平

面であった断面が，変形後も平面を保ち，中心線にほぼ垂直であると仮定することで，3 次元の変位場が中心線の変位と回転へ縮約されます。

これは，現代的にいえば「モデル縮約」です。その語が生まれる前から，物体の幾何学を観察し，残すべき自由度を選ぶというモデリングの核心が実践されていました。オイラーが柱の安定問題を扱った論文「Sur la force des colonnes」は 1757 年に書かれ，1759 年に刊行されました[5)]。柱を一本の曲線で扱いながら，そこに座屈という非自明な現象を取り込めることは，1 次元モデルの表現力をよく示しています。

モデル縮約には，もう一つ重要な側面があります。自由度や情報を減らすと，残した変数だけでは問題が決まらないことがあります。そのとき，省いた自由度の効果を，残した変数どうしの関係や条件として表し，問題を解ける形に完結させます。こうした役割を担うものを，ここでは広い意味で**クロージャー（完結関係）**（縮約したモデルを，残した変数だけで解ける形に完結させるための関係や条件）と呼びます。

歴史的には，仮定，縮約，完結の順序は一様ではありません。オイラー・ベルヌーイはり理論では，断面の運動学的な仮定が先にあり，それが 3 次元変位場の縮約を導きます。その上で材料の構成関係を用いると，曲げモーメントと，はりの曲がり方を表す曲率が結びつき，1 次元の問題が閉じます。一方，先に平均化や粗視化を行った結果として，新たな完結関係が必要になる理論もあります。また，どの自由度を残すかと，それらをどう結ぶかを同時に考える場合もあります。こうして見ると，力学の歴史には，**何を残し何を捨てるかという縮約と，残した変数で問題をどう完結させるかという二つの判断**が，さまざまな順序で現れます。

2.3　サンブナン—遠くでは何を覚えていればよいか

サンブナンのねじりと曲げの研究は，3 次元弾性論と工学的な部材理論の橋渡しとして重要です。1850 年代の一定断面をもつ柱状の物体のねじり・曲げに

関する研究では，断面形状，ねじり，反り，曲げが 3 次元弾性の問題として扱われました[6),7)]。

サンブナンの名で知られる原理も，低次元モデルの哲学と相性がよいものです。端部の荷重分布の細部が異なっても，合力と合モーメントが同じなら，その細部の影響は十分遠方では弱くなる。現代的な厳密化には注意が必要ですが，工学的には「遠くへ伝わる情報は何か」「どのように縮約できるか」という問いに答えています。

本書では，材料力学の価値を，**3 次元のどの情報を 1 次元に落とし込めば，工学的に有効な予測ができるかを長い時間をかけて理解を深めていったプロセス**に見出します。

2.4　ティモシェンコ—理論を学べる形にする

優れた理論は，教育体系として整理されることで次世代へ広く伝わります。ティモシェンコの一連の教科書と，材料強度の歴史を扱った著書 *History of Strength of Materials* は，材料力学・弾性・振動・安定性を，工学教育の言語に変換しました[8)]。

ティモシェンコの仕事には，研究上の新規性に加えて，成熟した知識を選び，順序を与え，例題として定着させるという大きな意義があります。学術史の上では，新しい理論を生み出した人と，**知識を学べる形にした人**の双方を位置づけることが重要です。

このひとはどう学んだか：ティモシェンコ

ティモシェンコはロシア帝国で教育を受け，ゲッティンゲンなど西欧にも学び，革命と移住を経て米国で教育体系を築きました。複数の国の教育文化を身をもって比較した経験が，個別理論を「教えられる体系」へ編集する広い視野につながったと見ることができます[9)]。

オイラー，サンブナン，ティモシェンコ——仮説を立てる人，遠くまで伝わる

情報を問う人，知識を並べ直し整理する人，この三人の仕事が統合されて，材料力学という一つの教育体系が完成しました。

3 「場」を発明する—グリーンとコーシー

3.1 物体内部の力を「場」として表す

物体を切ったとき，その切断面を通じて内部の一方が他方に力を及ぼします。この内部作用を前章では内力と考えました。内力を無数の微小な粒子間力として追うのか，それとも連続体の各点に定義された量として表すのかという問いとともに，19 世紀の連続体力学は，この表現を作り上げていきました。

コーシーの応力の概念が画期的なのは，内部作用を「面の向きに依存する表面力」として捉え，それを点における**テンソル**（向きによって値が変わる量を，向きに関わらず統一的に扱えるようにまとめた数学的対象）へまとめたことです。1820 年代のコーシーの議論は，現代の連続体力学の基礎となりました[10),11)]。ここでも重要なのは，数学的対象の発明です。以前から知られていた現象を，「切断面を通じた内部作用」という場として記述できる対象へ変換したことで，それまで別のものとして扱われてきた弾性体と流体を同じ保存則の言葉で扱えるようになりました。

3.2 グリーン—境界と内部を結ぶ

グリーンが 1828 年に私費出版した，電気と磁気の問題への数学解析の応用を論じた著作（*Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism*）は，後の数理物理に大きな影響を与

えました[12]。グリーンの恒等式，**グリーン関数**（ある点に加えた作用が，別の点にどう伝わるかを表す関数。この関数がわかれば，任意の分布に対する答えを積分によって組み立てられる），境界値問題という考えは，場の内部と境界との関係を整理する言語になりました。

グリーンの経歴は，学問の評価が知識流通の経路にも左右されることを示します。彼の初期の論文は私費出版で広く流通せず，後にケルヴィン（W. Thomson）らが再発見・再評価することになります。ここには，R. K. Merton が後に論じた科学の普遍主義という規範と，実際の知識流通の偶然性との緊張を見ることができます[13]。

グリーンは後年にはケンブリッジで教育を受け，研究者として承認されました。さらに後世になると，その仕事の重要性はより広く認識されていきます。初期の限られた流通と後年の評価をあわせて見ると，知識が届き，読み継がれ，価値を認められていくまでの複雑な経路が見えてきます。

このひとはどう学んだか：グリーン

グリーンは製粉業に携わりながら，ごく限られた正式教育ののち，ほぼ独学で数学を学び，40 歳でケンブリッジに入りました。独学歴と数学的成果を単純な因果関係で結ぶことはできませんが，既成の学科の中心から少し離れた場所で，境界と内部の関係という問いを自分の速度で追った経歴は，彼の仕事を読むときに押さえておきたい背景です[14]。

コーシーは物体の内部にテンソルという新しい対象を見出し，グリーンは境界のデータから内部を組み立てる関数を見出しました。方向は逆でも，両者はともに「場」という考え方を，具体的に計算できる道具に変えた点で結びついています。

4 ゲッティンゲン—数学と工学が同じ廊下にいた時代

4.1 ゲッティンゲンを支えた応用力学の前史

応用力学の長い前史には，オイラー，ラグランジュ，コーシー，ナヴィエ，サンブナン，ケルヴィン，レイリーらによる解析力学・連続体力学・数理物理の蓄積があります。20 世紀初頭のゲッティンゲンは，その蓄積の上で，数学，物理，工学，実験，近似計算が地理的・制度的に接近した場所として特別な役割を果たしました。

クラインの制度形成，ヒルベルトの数学，ルンゲの数値計算，プラントルの工学に近い物理学が近い距離にありました。プラントルが 1904 年ハイデルベルクの国際数学者会議で提示した**境界層**（流れる水や空気が固体の表面に接するごく薄い層。この層の中では粘性（ねばり）の効果が強くはたらき，少し離れるとその効果をほとんど無視できるようになる）の考えは，粘性が小さいという事実を「粘性をゼロにする」ことで表現せず，粘性効果が集中する薄い領域と外部流とに問題を分けるものでした[15)]。

良い近似では，方程式の項の大きさとともに，それぞれの項がどこで支配的になるかを見極めます。小さい係数をもつ項も，境界近くでは主役になります。プラントルの心眼は，**現象が起きる場所のスケール**を捉え，問題を粘性効果が支配的な領域とその外側に分けて組み立て直したところにあります。

この境界層近似も，広い意味ではモデル縮約の一つと見ることができます。ここでは空間の次元そのものを落とすのではなく，スケールに応じて支配項を

選び，境界層と外部流に異なる簡約モデルを用います。同時に，壁面での条件と外部流との整合によって二つの領域をつなぎます。前章のはり理論とは形が異なりますが，**何を残すかという縮約と，縮約した問題をどう完結させるかを一体として考える**点に，共通するモデリングの構造があります。

4.2　プラントルとクーラン—異なる近似の文化

プラントルの近似は，現象がどこでどのように起きるかという見通しを先に立て，それに合う領域・スケール・支配項を選ぶ様式です。一方，ヒルベルト・クーランの系譜では，**変分原理**（全体の量（エネルギーなど）を最小または最大にする状態を探すことで，方程式の解を特徴づける考え方），**偏微分方程式**（時間や位置によって変わる量どうしの関係を，その変化の度合い（微分）を使って表した方程式。温度や変形の分布が場所や時間とともにどう変わるかを記述するのに使われる），関数空間，近似解法を数学として組織する方向が発展しました。この二つは相補的です。現代の応用数学と計算力学も，現象に即した近似と数学的構造の組織化の両方を必要とします。

ここで本書がゲッティンゲンに見る核心は，**異なる方法をもつ人が，同じ問題を話せる制度**です。専門分化が進んだ現代にとっても，このような横断的な会話の場には大きな価値があります。

このひとはどう学んだか：プラントル

プラントルは，方程式を一般形のまま扱う前に，まず現象のどこで何が支配的かを見ました。理論と実験を近くに置く研究の仕方も，その考え方と響き合います。近似を「本質を選ぶこと」へ高めた点に，彼の学び方の個性が表れています[15)]。

現象についての物理的な見通しから入るプラントルと，数学の枠組みから入るヒルベルト・クーラン。この二つの流儀が同じ廊下ですれ違っていたことこそ，ゲッティンゲンという場所の価値でした。次章で見るヒルもまた，この二

つの流儀のあいだを往復した一人です。

5 固体は流れる—プラントル，オロワン，ヒル

この章で中心となる三人は，同じ現象——金属の塑性変形——に向き合いながら，異なる学び方，考え方をしています。現象の起こり方を先に捉える人，観察から機構を組み立てる人，個別の問題を一般構造へ引き上げる人という違いを意識しながら読んでいただきたい章です。

この章の背景をつなぐ存在として，G. I. Taylor にも触れておきます。Taylor は流体力学ではプラントルと長く科学的な書簡を交わし，その多くは乱流をめぐる議論でした[16)]。その一方で 1934 年には，結晶の塑性変形を転位の運動によって表現する理論を発表しています[17)]。同じ 1934 年にはオロワンも，結晶のすべりを格子欠陥の運動から考える仕事を発表しました[18)]。乱流から結晶塑性までを同じ研究者が扱っていたことは，現在の専門分野の区分から見ると意外にも映る，当時の応用力学の広がりをよく示しています。

5.1 塑性を「流れ」として表す

金属が荷重を受けて元に戻らない変形（**塑性変形**（荷重を取り除いても元に戻らず，永久に残る変形のこと））を起こすことは，古くから知られていました。そこから，この永久変形をどのような力学モデルとして表すかという新しい問いが生まれます。トレスカ，サンブナン，レヴィ，フォン・ミーゼスらを経て，塑性は，物体の中の各点にかかる応力の状態と，変形がどの方向へ進むかを定める関係式（**流動則**（塑性変形がどの方向へどれだけ進むかを，応力の状態から定める関係式））をもつ連続体理論へ発展します。

プラントルは 1920 年の硬さ問題をはじめ，力を抜いてももう変形が戻らない状態（**完全塑性体**（降伏に達した後は，応力を増やさなくても変形だけが進む，という理想化された材料モデル））の問題を，固体の「流れ」として扱いました[19)]。ここには，流体と固体を，運動学（物がどう動くかの記述）・保存則（質量やエネルギーが保たれるという条件）・構成関係（材料がどう応答するかを表す式）という共通の枠組みで見る可能性があります。両者を分ける重要な点もあります。理想的な塑性体は変形の速さに関係なく同じ抵抗を示し，普通の粘性流体（ニュートン流体）は，変形の速さ（速度勾配）が大きいほど強く抵抗します。ここで共通しているのは，連続体を「流動するもの」として記述する数学的骨格です。

5.2　オロワン—現象から機構を考える

オロワンの研究には，材料を観察し，破壊や塑性の背後にある仕組み（**機構**（現象がどのような物理的な過程を経て起きるのかという仕組み））を大胆に単純化して考える姿勢が見えます。転位論（結晶格子の中で原子の並びがずれて動くことで塑性変形が進む，という理論），脆性破壊（ほとんど変形しないまま急に壊れる破壊），氷河の塑性流動（氷という固体が，長い時間をかけてゆっくり流れるように変形する現象）など，対象は広くても，現象に即した力学モデルを作るという点が共通しています。

オロワンの研究スタイルの特色は，数学の能力の多寡よりも，現象についての物理的な理解を先に置き，必要な数学をそこへ結びつける点にあります。

5.3　ヒル—個別現象を一般構造へ引き上げる

ヒルはケンブリッジで数学を学び，戦時研究で装甲板に弾体が撃ち込まれる際の力学（装甲への弾体侵徹）の問題に関わり，その後オロワンの周辺で金属塑性を研究しました。1950 年，まだ若い時期に刊行した『塑性の数学理論』（*The*

Mathematical Theory of Plasticity）は，塑性論を体系的な数学理論として組み立てました[20),21)]。

ヒルの特徴は，塑性の個別公式を越えて，一般的な問いを引き出したことにあります。解がただ一つに定まるか（**一意性**（与えられた条件のもとで，解が一つに定まること）），釣り合いの状態がわずかな乱れに対して元に戻ろうとするか（**安定性**（釣り合いの状態が，わずかな乱れを受けても元の状態に留まろうとする性質）），エネルギーなどの量が実際の状態で変化しない（停留する）という条件から解を特徴づける考え（**エネルギー原理**（変形や運動に伴うエネルギーなどの量が停留する条件を使って，力学の状態や方程式を特徴づける考え）），そして材料がどう応答するかを表す式（構成関係）——これらの一般的な問題を，現実の固体力学から引き出したことです。1958 年の弾塑性体の一意性と安定性に関する論文は，その方向を明瞭に示します[22)]。翌 1959 年の論文では，塑性のように「材料が自然な時間スケールを持たない」問題に共通する基本原理をさらに整理しています[23)]。

本書ではヒルを，**工学現象が要求する問いを，一般化できる数学構造へ変換した力学研究者**と見ます。ヒルの仕事では，現象の具体性と数学的抽象化の往復そのものが理論を生み出しています。

プラントル，オロワン，ヒルには，現象の起こる場所と支配項から入る，材料の観察から入る，一般化へ向かうという異なる入口があります。次章以降でも，この違いがどのような理論の形につながるかに注目します。

このひとはどう学んだか：ヒル

ヒルは，具体的な問題を掘り下げながら，そこから一意性，安定性，エネルギー原理といった一般的な問いを引き出しました。個別問題を解くことからさらに進み，問題の背後にある数学構造まで一般化していく粘り強さが，彼の研究の特徴でした[21),22)]。

6 スケールとエネルギー地形—レイリー，マクスウェル，殻座屈

6.1 方程式の形を先に知る—次元解析と相似則

本編の第 2 章で扱う次元解析も，応用力学で現象を解析する方法を考えるうえで重要です。長さ，時間，質量などの次元に注目すると，現象を完全に解く前から，物理法則が取り得る形を絞ることができます。単位系を変えても法則の内容が保たれるという要請から，現象の骨格を先に読む方法です。

その歴史には長い前史があります。1761 年，F. Daviet de Foncenex は力の合成を論じるなかで，物理式の各項で単位・次元がつじつまよく一致するという**同次性**（一つの式のなかで足し算・引き算されるすべての項が，同じ次元（長さ，時間，質量などの組合せ）を持つという性質）を用い，19 世紀にはフーリエらが物理量の「次元」を明示的に扱いました。1878 年には J. Bertrand が物理公式の同次性を論じています。レイリーは 19 世紀後半，この方法を音響や流体を含む具体的な物理問題に繰り返し使い，工学的な推論法として定着させました。1914 年，バッキンガムは，複数の物理量の関係を，単位を持たない少数の量（無次元量）の関係へ書き換える考えを，現在「バッキンガムの π 定理」と呼ばれる形で体系化しました[24)~28)]。

この流れには，フーリエ，マクスウェル，A. Vaschy らの仕事も加わります。特に Vaschy は 1892 年，バッキンガムに先立って後の π 定理に相当する相似則を論じています。ここで重要なのは「誰が一番乗りだったか」を決めることよりも，**単位の任意性から，現象を支配する無次元の組合せを見つける**という

考えが，醸成され，しだいに一般的な方法へ育ったことです[29),30)]。

ファン・デル・ワールスの仕事は，この考えと次のエネルギー論を結ぶ格好の例です。1873 年の状態方程式に続き，1880 年には圧力，体積，温度をそれぞれ臨界値を基準とする量に直すことで，異なる物質の状態を共通の形で比較する「対応状態」の考えを示しました。物質ごとのスケールを取り除き，共通する関係を見るという点で，後世の次元解析・相似則につながる重要な先例です[31),32)]。

このひとはどう学んだか：レイリー

レイリーは，詳しい計算に入る前に，次元やエネルギーから答えの形を絞り，必要に応じて実験と結びつけました。理論，近似，実験を行き来しながら，「答えはどのような形をしていなければならないか」を先に考える姿勢が，次元解析を実際に使える推論法へ育てました[27)]。

6.2　状態の競合を描く—マクスウェルから殻座屈へ

ファン・デル・ワールスは 1873 年，液体と気体の連続性を扱う状態方程式を提示しました。マクスウェルは 1875 年，その**等温線**（温度を一定に保ったときの，圧力と体積などの関係を表す曲線）の不安定な部分を置き換える等面積構成を論じました[31),33)]。後世の熱力学では，これは二つの相の熱力学ポテンシャル（与えられた条件のもとで状態の安定性を比較するための量）が等しくなる相共存条件として理解されます。

この熱力学的なアイデアは，20 世紀の薄肉殻——厚さが半径や幅に比べて小さい曲面状の構造——の座屈にも持ち込まれました。フォン・カルマンと H.-S. Tsien は 1941 年，軸圧縮を受ける円筒殻について，座屈後（座屈した後）に現れる非線形な平衡状態を解析しました[34)]。Tsien はこの問題をさらに進め，翌 1942 年には座屈をエネルギーの観点から捉え，複数の釣り合い状態の相対的なエネルギーを比較する考えを示しました[35)]。この考えは，後にマクスウェル型

のエネルギー基準として論じられるようになります。

流体の相転移と構造物の座屈は現象として大きく異なりますが，複数の状態が競合し，その相対的なエネルギーが，外から変える荷重や温度などの条件（制御パラメータ）によって入れ替わるという数学構造を共有します。ここでのアナロジーは，複数の状態の競合とエネルギー比較という共通構造に基づいており，**異なる分野に共通する数学構造を発見する道具**になっています。

6.3　マクスウェル条件と実際の遷移

二つの状態のエネルギーが等しくなるマクスウェル条件は，状態間の競合を示す重要な基準です。実際の遷移には，二つの安定状態の間にあるエネルギーの壁に加えて，製作時から存在するわずかな形状のずれ（初期不整），外から加わる小さな乱れ，運動を続けようとする慣性，摩擦などによるエネルギーの散逸，原子・分子の熱運動による揺らぎなども関わります。

したがって，マクスウェル条件と局所安定性の喪失点は，エネルギー地形の異なる情報を表します。局所的な**曲率**（線や面がどの向きにどの程度曲がっているかを表す量。ここではエネルギー地形の谷や山の局所的な形を表す）が変化する点と，離れた二つの状態が同じ高さになる点を区別することで，遷移の見通しがよくなります。

この見方に立つと，オイラーの柱座屈，ヒルの安定性，W. T. Koiter の座屈後理論，状態が急に別の状態へ移る現象を分岐の形から捉える J. M. T. Thompson の見方，現代の局在座屈（変形が一部に集中する座屈）や，複数の安定形状をもつ多安定メタマテリアルを，共通の語彙で比較できます。ここで注目するのは，直接の系譜そのものより，異なる現象のあいだに見出される**構造上の類似**です。こうした類似が，実際の研究者どうしの交流を通じて発見されることもあります。その例は，第 10 章で手紙や編集という知識伝達の回路とともに見ます。

7 原子から連続体へ—FPUT，次元低減，結晶安定性

7.1 FPUT—1 次元化が見せる別の力学

1955 年の Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou（FPUT）数値実験は，弱い非線形性をもつ 1 次元の質点列で，振動のエネルギーがどのように移り変わるかを調べた初期の計算機実験です。ここでいう**振動モード**（多数の質点が一定の関係を保ちながら振動する基本的な振動の型）のあいだで，時間がたてばエネルギーが広く行き渡ると予想されていました。ところが実際の計算では，いったん広がったエネルギーが初めに近い状態へ戻る「再帰」が現れました[36)]。単純に見える格子でも，非線形性が加わると長時間の振る舞いは直感どおりにはなりません。

1 次元 FPUT 鎖を 3 次元結晶と比べると，波動現象の整理の仕方そのものが変わります。波を「どこにあるか」ではなく波長と進む向きで整理する**波数空間**（波を，位置ではなく波長や進行方向を表す量で記述する空間）の幾何，振動の向き（偏極），横向きに振動する波，結晶中の欠陥の形，共鳴条件（複数の振動が効率よくエネルギーを交換できる周波数や波長の組合せ）などが，空間の次元によって変わります。自由度を減らすことは，現象を単に小さく写すことではなく，力学系そのものの構造を組み替える操作でもあります。

本編で「アダマールの次数低減法」と呼んだ考えを思い出すと，この点がよく見えます。高い次元の波動問題と低い次元の波動問題を関係づけると，単に座標の数が減るだけではなく，波の伝わり方の性質そのものが変わります。た

とえば**ホイヘンスの原理（アダマールの意味での強い形）**（波の影響が波面の到達する瞬間に現れ，通過後に「尾」を引いて残らないという性質）が成り立つかどうかは空間の次元に依存します[37]。

1 次元 FPUT 鎖は，**特定の問いを際立たせるように作り直した力学世界**と見ることもできます。モデルを単純化したために，かえって，厳密な解を多くもつ特殊な構造（可積分性），形を大きく崩さず伝わる局在波（ソリトン），長い時間の後に状態が戻る再帰などが見えやすくなりました。

FPUT 格子は，歴史的な数値実験を越えて，現在の非線形格子研究にもつながるモデルです。非線形格子では，振動エネルギーが格子の一部に集中して周期的に振動する**離散ブリーザー**（離散的な格子の一部にエネルギーが局在して続く非線形振動）や，その移動，安定性，エネルギー輸送が現在も研究されています。土井祐介は長年にわたりこの問題を研究し，格子の変位に応じて蓄えられるエネルギーを表すポテンシャルに特定の対称性をもたせました。その結果，周囲に小さな振動の「裾」をほとんど残さず滑らかに移動する離散ブリーザーを許す格子を見出しています[38),39)]。ここでは，与えられた格子の運動を調べることからさらに進んで，**実現したい動きから逆に格子の構造を考える**という方向へ，FPUT から続く問いが展開しています。

7.2　原子と連続体の安定性を同じ問いで捉える

ヒルは 1975 年，変形が小さいという近似を置かず大きな変形まで扱う「有限ひずみ」のもとで，欠陥を含まない理想化された結晶（完全結晶）の弾性と安定性を論じ，1977 年には F. Milstein と理想結晶の安定性解析を発表しました[40),41)]。塑性論で知られるヒルの研究は，ここで原子レベルの格子の安定性へ広がります。ヒルの中心的な問いを「状態がいつ一意・安定でなくなるか」と捉えると，連続体から結晶格子へ対象が変わっても，同じ問いが研究を導いていたことが見えてきます。

原子系では，原子配置を少し動かしたときポテンシャルエネルギーがどちら

向きに増減するかを調べます。連続体では，小さな追加変形に対する応力の増え方を表す「接線剛性」や「増分構成関係」を調べ，構造物では，一つだった釣り合いの道筋が複数へ分かれる「分岐」が起こるかを調べます。使う量は違いますが，いずれも**エネルギー地形**（状態を横軸，その状態のエネルギーを高さとして描いた地形のような見方）の谷・山や曲がり方から，平衡状態の近くが安定かどうかを読むという共通の発想をもちます。

このような横断的な眼をもつと，分子動力学，連続体安定性，構造座屈，相転移を，異なるスケールで現れる状態選択の問題として結びつけて読むことができます。

このひとはどう学んだか：M. Tsingou

Tsingou は，ロスアラモス研究所の初期電子計算機 MANIAC で実行できる手順へ理論家の問いを翻訳しました。FPUT の最初の報告では著者名に入らず謝辞に置かれましたが，数値実験を実際にプログラムした彼女の仕事は，計算機時代には「解く方法を実装すること」自体が学問になることを先取りしていました[42), 43)]。

FPUT の 1 次元鎖とヒル・Milstein の結晶格子は，どちらも，次元やスケールを変えることで見え方が変わる不安定性を扱っています。次章では，この「安定性を調べる」という問いが，計算機の上でどのように扱われるようになったかをたどります。

8 計算そのものを力学にする—クーランから現代計算力学へ

8.1 計算が理論の一部になる

有限要素法は「偏微分方程式をコンピュータで解く技術」と解釈できますが，20 世紀後半の計算力学はさらに一歩進みました。連続的に分布する未知量を有限個の数値へ置き換えることを**離散化**（連続的な場や方程式を，コンピュータで扱える有限個の点・要素・数値の問題へ置き換えること）といいます。計算は，既に完成した理論を数値化する手段から，**元の理論がもつどの構造を離散化後にも残すべきかを問う力学**へと広がりました。

クーランの変分的近似，有限要素法の発展，材料の非線形な応答を一歩ずつ追う計算法，大きな変形，物体どうしの接触，破壊の計算が進むと，モデルと計算手順（アルゴリズム）を完全に切り離すことが難しくなります。

1983 年にノースウェスタン大学で開催された，米国国立科学財団（NSF）と国防高等研究計画局（DARPA）に関係するワークショップの会議録は，「非線形材料挙動の大規模計算の理論的基礎」を主題とし，その時代の空気をよく残しています。T. J. R. Hughes，J. W. Hutchinson，A. Needleman，T. Belytschko らの講演や指定討論に加えて，多くの章で「総合討論」が話者名付きで記録されています[44)]。

完成した論文を読むと「最終的に何が主張されたか」が分かります。議論の記録を読むと，「同時代の研究者がどこを疑ったか」が分かります。形成途上にあった計算力学の中で，構成式，安定性，実験，大規模計算，アルゴリズムの

関係を皆で問い直していたことが生き生きと伝わってきます。

8.2 Marsden と Hughes—数学と力学の往復

J. E. Marsden と T. J. R. Hughes の『弾性論の数学的基礎』(*Mathematical Foundations of Elasticity*) は，3 次元弾性を，曲がった空間や座標変換を扱う微分幾何，関数そのものを数学的な空間の点として扱う関数解析などの言葉で整理し，数学者・技術者・物理学者を同じ対象へ招く本でした[45)]。

Marsden は，運動の時間発展を調べる力学系，エネルギーと共役変数で運動を記述するハミルトン力学，対称性，分岐，幾何学的力学に通じる数学者でした。Hughes は計算力学の中心人物です。二人の共同は，数学から力学へ，力学から数学へという二方向の交通が成立していたことを象徴します。

後に J. C. Simo，J. E. Marsden，M. Ortiz らの仕事を通して，連続体の幾何学的・変分的構造を壊しにくい数値積分法へと展開します。T. R. Kane らの**変分積分法**（運動方程式を直接差分化する代わりに，運動を決める作用の停留条件そのものを離散化して時間発展を求める方法）は，「式を離散化する」のではなく「原理を離散化する」という発想を明確にしました[46)]。

このひとはどう学んだか：J. E. Marsden

Marsden は，数学を力学の構造を見通すための言葉として使いました。弾性，ハミルトン力学，対称性，数値積分を行き来した仕事からは，同じ構造が別の現象にどう現れるかを学び続けた研究者像が見えます[45),46)]。

8.3 Oden，Belytschko，Hughes—計算力学を一つの学問にする

J. T. Oden，T. Belytschko，I. Babuška，T. J. R. Hughes が 2003 年にまとめた「計算力学の研究の方向性」(*Research Directions in Computational Mechanics*) は，計算力学を計算科学・工学の中核分野として位置づけていま

す[47]。

ここには異なる数学文化が同居しています。その背景には，Oden の変分法・関数解析・適応解析，Babuška の数値解析と近似理論，Hughes の連続体力学と有限要素法，Belytschko の非線形動力学・破壊・メッシュフリー法・拡張有限要素法（XFEM）といった，異なる数学・力学の文化があります。彼らが同じ「計算力学」という語で会話したこと自体が重要です。

8.4　Ortiz—変分，原子，データを同じ問題として扱う

M. Ortiz は，この再統合を現代まで引き延ばした代表的な力学研究者の一人です。1996 年の E. B. Tadmor，M. Ortiz，R. Phillips による準連続体法は，原子分解能が必要な場所では原子を残し，遠方では連続体表現へ縮約する方法でした[48]。

準連続体法では，原子一つひとつを見る必要がある場所は細かく扱い，そのほかでは多数の原子の自由度を代表点へまとめる**粗視化**（細かな自由度を一つずつ追わず，目的に必要な平均量や代表量へまとめるなどの数学的操作）を行って，原子モデルと連続体モデルを一つの計算の中で使い分けます。これは材料力学で 3 次元応力場を断面力へ圧縮した発想の，現代的な多重スケール版と見ることもできます。

さらに T. Kirchdoerfer と M. Ortiz のデータ駆動計算力学は，「ひずみを与えれば応力がどう決まるか」という構成式の関数形を先に決めず，実測・計算された材料データと，力が釣り合うという平衡条件，変形が空間的につじつまよくつながるという適合条件を直接結びつけようとします[49]。どのデータ同士を「近い」とみなすかを決める尺度や，どの状態量をデータとして並べるかを選ぶこと自体が，ここでのモデル化になります。

クーランから Ortiz まで，計算力学は，理論家と数値解析家の道が交差しながら発展してきました。一冊の本を共著し，一つの学術集会で議論を交わし，一

つの分野に名前を与えるという共同作業を通じて，計算そのものが力学になっていく過程を，この章ではたどりました。

9 知はどのように移動するか—学派からネットワークへ

9.1 人を集めることで知識をつなぐ—バーガース

研究者の系譜には師から弟子へ向かう線がありますが，20 世紀の応用力学では，そこに大学間の移動，学術集会での出会い，学術誌を介した交流，戦争や政治による国境を越えた移動が重なります。系譜は一本の木から，次第にネットワークとして見えてきます。

学問を人から人へ伝える回路には，人を集めること，論文を選び書くこと，研究者が拠点を移ることなどがあります。学術集会で交わされる言葉と，論文に印刷される言葉は，同じ知識を異なる速度と永続性で運びます。この二つの回路を，本章と次章でそれぞれ見ていきます。

バーガースはデルフトで流体・空気力学を研究する一方，C. B. Biezeno とともに 1924 年の第 1 回国際応用力学会議を組織しました。これは，後の国際理論応用力学連合（International Union of Theoretical and Applied Mechanics; IUTAM）へつながる国際的な学術交流の重要な出発点でした[50)]。

バーガースの功績には，非線形波動を扱うバーガース方程式や結晶構造の格子欠陥である転位におけるバーガース・ベクトルとともに，研究者が会う場を作り，国際的な学問共同体を組織した役割があります。

このひとはどう学んだか：バーガース

バーガースは 1921 年にフォン・カルマンと出会い，その後長い研究上の交流を続けました[51]。その交流は，Biezeno とともに組織した 1924 年デルフトの第 1 回国際応用力学会議へつながります。人に会い，異なる考えに触れ，やがて自ら人を集める場を作ることも，学問を育てる一つの方法です。

9.2　戦争による移動と，戦後の循環

1930 年代以降，ドイツ・中欧から米国へ大規模な科学者の移動が起こりました。クーラン，フォン・カルマン，フォン・ミーゼス，W. Prager らの移動は，米国の応用数学・応用力学を大きく変えました。戦後になると，この流れはさらに往復的になり，欧州，米国，そして東アジアを結ぶ研究者の移動と共同研究へ広がっていきます。

欧州ではデルフト，ケンブリッジ，デンマーク，フランス，ドイツ，イタリアなどに研究拠点が残り，再編されました。英国では 1930 年代にも制度的な連続性が比較的保たれ，ケンブリッジをはじめとする拠点に数学と力学を近くに置く文化が続きました。こうした拠点は伝統を保ちながら，欧州力学会（European Mechanics Society; EUROMECH）などを介して国境を越える交流の場にもなりました。

研究拠点の強さは，異なる方法を使う研究者が，同じ現象をそれぞれの側から理解し合うことによっても育ちます。ケンブリッジでは，材料科学を背景とする M. Ashby と，固体の力学を理論・実験・計算の間で考える N. Fleck が，金属フォーム（発泡金属）や格子材料などの問題を共同で研究しました[52]。1996 年に開設されたケンブリッジ大学のマイクロメカニクス研究センター（Cambridge Centre for Micromechanics）は，工学，応用数学，材料科学，物理学の研究者を結ぶ学際的な拠点として構想されています[53]。方法の違いは，同じ現象を別の側から見るための資源になります。異なる方法を使う相手の仕事を，相手の論理に従って理解することが，こうした共同体を支えていました。

戦後世代は大西洋を往復します。A. Needleman と V. Tvergaard の長期にわたる共同研究，E. Van der Giessen と A. Needleman による，結晶中の線状の欠陥である転位を一つずつ追って塑性変形を調べる離散転位塑性論の展開は，その典型です[54),55)]。Van der Giessen がデルフトからデンマーク工科大学（Technical University of Denmark; DTU），ブラウン大学へ学び，その後欧州へ戻った経路も，研究者の移動が知識を循環させる一例です。

戦後の知識循環は，東アジアにも広がりました。ブラウン大学で Prager を中心とする塑性力学研究グループに加わった王仁は，中国へ戻って北京大学で教育・研究と国際交流を担いました[56)]。1991 年北京の IUTAM シンポジウムには北川浩も招かれ，結晶塑性論と分子動力学を結ぶ研究を報告しています[57),58)]。北川の著書『塑性力学の基礎』は中国語に翻訳され，王仁が校を担当し，中国の教科書にも参考文献に挙げられています[59),60)]。

この段階の「学派」は，同じ建物に集まる人々から，**移動する若手，共同研究，国際的な学術集会，学術誌によって維持される分散型の共同体**へと広がります。そこでは論文の内容に加えて，問題の選び方，論文の読み方，疑問の持ち方といった研究の作法も，日常的な議論と移動を通じて伝わります。

研究者の移動が知識を運ぶ一方で，論文と手紙も，離れた場所の研究者を結ぶ回路になります。次章では，ヒルという一人の編集者を通じて，このもう一つの回路をたどります。

10 論文を越えて知をつなぐ—手紙，編集，講演会

10.1 手紙が知識を運んだ

学術誌がまだ十分に整備されていなかった時代から，研究者の手紙は，結果を知らせ，問題を送り，意見を求め，人と人を結ぶ通信網として重要な役割を担ってきました。17 世紀のメルセンヌはその代表例です。オランダにいたデカルトの主要な通信相手となり，各地の研究者から届く問いを伝える一方，ガリレオの力学の著作をフランス語圏へ紹介しました。個々の研究者が直接知り合っていなくても，メルセンヌのような仲介者を介して問題と情報が移動しました[61)]。

知識の伝わり方は手紙だけでもありません。ガリレオは 1609 年，オランダで遠くの物を大きく見せる器具が作られたという情報を得て，自ら光学系を作り直し，倍率を高めて天体観測へ用いました。伝わってきた発明の情報を手掛かりに，自分の問題へ翻訳して新しい装置へ作り替えた例です[62)]。知識の移動では，何が伝わったかと同じくらい，受け手がそれを何へ作り替えたかが重要になります。

18 世紀には，若いラグランジュが変分問題についてオイラーへ結果を送り，書簡による議論を続けました。オイラーは 1756 年，20 歳のラグランジュをベルリン・アカデミーの外国会員候補として提案しています。二人は直接会う機会のないまま長く書簡を交わしましたが，その通信だけでも，研究内容を評価し，若い研究者を学問共同体へ迎え入れる信頼関係が成立しました[63),64)]。

20 世紀にも同じ働きは残っています。Thompson は，1963 年にヒルへ手紙を書いた際，それまで知らなかった Koiter の座屈後研究を教えられたと回想しています。当時 Koiter の 1945 年のデルフト学位論文はオランダ語で，英訳が米国航空宇宙局（NASA）から刊行されるのは 1967 年でした[65),66)]。ここではヒルが，Thompson の問題と 18 年前の研究との構造上のつながりを見抜き，文献を人へ手渡しています。

計算と通信の時間

研究には，その時代の道具が決める「時間」がありました。日本で広く使われたタイガー計算器は，ハンドルを回して四則演算を行う機械式計算器で，1960 年代後半に電子式卓上計算機が普及するまで科学計算にも使われていました[67)]。著者は北川浩先生から，二人で朝から手回し計算器を使って計算し，夕方に検算するという作業を繰り返していた時代の話を伺ったことがあります。

電子計算機が使われるようになってからも，プログラムやデータをパンチカードの束として入力する時代が長く続きました[68)]。北川先生からは，遠隔地で計算するために用意したパンチカードを小包で送っていた時代の話も伺いました。さらに後年，A. Needleman からは，大きなデータやプログラムについて，通信回線で転送するよりも記録媒体そのものを宅配便で送る方が速いことさえあった，と聞きました。当時は磁気テープやディスクを Federal Express（現 FedEx）で物理的に運ぶこともあったそうです。計算機が電子化されても，情報を運ぶにはなお物理的な時間が必要でした。

通信や計算に時間を要した時代にも，研究者の知的な応答は驚くほど速いことがありました。ガリレオは 1609 年，オランダで遠くを見る器具が作られたという情報を得ると，数か月のうちに自ら望遠鏡を作り，さらに性能を高めました[62)]。Thompson は，ヒルから手書きの返事が翌日に届くことが，当時の JMPS（後述）の楽しみの一つだったと回想しています[66)]。情報を運ぶ媒体の速さと，受け取った情報から何を見出し，どう応答するかという知的な速さは，同じものではありません。

今日では，大型計算機センターの入出力棟に足を運ぶ必要はなくなり，プログラム，計算結果，実験データをほとんど瞬時に共有でき，計算そのものも桁違いに速くなりました。本編で述べたクラウド化や AI 共生も，こうした道具の変化の延長にあります。その一方で，何を確かめ，何を信頼し，何を次の問いへ結びつけるかという判断には，今も人間の仕事が残ります。研究を支える道具が変わ

るたびに，人間が担う役割も変わってきたと見ることができます。

10.2　編集も学問をつくる—ヒルと JMPS

ヒルは 1952 年創刊の *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*（以下 JMPS）の創刊編集者でした。投稿された論文を選ぶとともに，前節の Thompson への手紙のように，研究者と既存研究を結びつける知的な仲介者としても働きました[21),66)]。

バーガースは人を同じ場所へ集めることで問題を結びつけ，ヒルは自分の机に集まる論文を読むことで知識を結びつけました。学問共同体には，対面の場を作ることと，文章を読みつなぐことという異なる「つなぎ方」があります。

31 歳の編集者ヒル

ヒルは 1952 年，31 歳で JMPS の創刊編集者となり，1968 年まで編集を担いました[21)]。Thompson は後年，1963 年に論文を投稿した際にヒルから受け取った手書きの手紙を紹介しています。そこでは，Thompson が考えていた安定性問題に関連して Koiter の研究が紹介されていました[66)]。

この逸話からは，ヒルにとって編集が，完成した論文を選ぶ仕事と，投稿された研究の中にある問いを読み取り，それを過去の研究へつなぎ，自分の知識を著者へ返す仕事とを結びつける活動であったことが見えてきます。雑誌の編集そのものが，研究者と研究者，現在の問いと過去の知識を結ぶ学問的な仕事になっていました。

完成した研究成果を発表することとともに，まだ形の整っていない他人の問いに向き合い，自分の知識を必要な相手へ手渡すことも，学問共同体を支える仕事です。ヒルの編集は，論文を選ぶ仕事であると同時に，知識を次の研究へつなぐ仕事でもありました。

10.3　講演会は生まれつつある知識を残す

1984 年に S. Nemat-Nasser らが編んだ会議録が面白いのは，各講演の後に，話者名を伴う議論が収録されていることです[44]。学術講演のあとに実際に交わされた質疑が，研究の過程を伝える記録として残っています。

論文は，整理された研究成果を後世へ残す優れた媒体です。そこに講演会の質疑や総合討論の記録が加わると，知識が生まれつつある途中の姿も見えてきます。誰がどこを疑い，著者がその場でどう答えたかという記録から，同時代の研究者が何を問題だと感じていたかが見えてきます。

講演会には，過去の仕事を次の問題へつなぐ役割もあります。その一つが記念シンポジウムや記念特集です。そこでは過去の業績を手掛かりに，そこから新しい問いを見出し，最新の問題へ展開する研究が持ち寄られることがあります。人を記念する場が，**新しい問いを発見し，次の研究領域をひらく場**になることもあります。

このひとはどう学んだか：A. Needleman

A. Needleman は，自分の研究を，まず力学の法則に従う**理想化したモデル**を作り，それを計算することによって，実験から直接は見えにくい機構への洞察を得る仕事だと述べています[69]。空孔の成長から延性破壊を考えるモデル，材料内部の界面がはがれる過程を界面の結合力と開口量の関係で表すモデル，転位の運動を一つずつ扱う離散転位塑性論など，対象は変わっても，複雑な現象から支配的な機構を切り出し，計算可能で見通しのよい問題へ作り替える姿勢は一貫しています[54),55),70]。こうして作られたモデルの多くが他の研究者にも使われ，2015 年の伝記的紹介では，Science Citation Index（学術論文の引用情報を収録する索引）に基づき，材料科学と工学の双方で被引用数の特に多い研究者の一人に数えられています[70]。

もう一つ印象的なのは，人との共同そのものを研究の一部として楽しんでいたことです。同じ紹介文には，離散転位研究がブラウン大学の数人の博士研究員（ポスドク）から急速に広がり，一つの研究者集団，さらには学派と呼べる共同体を形づくったこと，Needleman が共同研究の相乗効果とともに人との交流その

ものを好み，学会のコーヒーブレイクでも研究者との会話から新しい問題の種を拾っていたことが記されています[70]。本人の米国機械学会ティモシェンコ・メダル受賞講演も，自分の失敗や家族の逸話を交えたユーモアに富んでいます[69]。長く続く共同研究と若い研究者が集まる環境には，モデルの明快さだけでなく，こうした気さくな研究交流のあり方も関わっていたと見ることができます。

手紙，編集，講演会は，論文と並んで学問を支えてきました。人を集めること，文献を知らせること，生まれつつある議論を残すことが，次の問いと理論が育つ条件を作っています。

11 構成式からデータ駆動へ—モデル化の役割を広げる

11.1 構成式が担ってきたモデル化

連続体力学では，保存則に加えて，材料がどのように応答するかを構成式として与えることで問題が閉じます。弾性，塑性，粘性，損傷（**損傷**（材料の内部に生じる微小なき裂や空隙が積み重なり，材料が徐々に力を伝えられなくなっていく過程やその度合いを表す概念）），クリープなどの構成式は，材料の複雑な内部機構を，限られた状態変数（**内部変数**（温度や応力のように外から直接測れる量ではなく，材料の内部の状態——たとえば損傷の進み具合や転位の密度——を表すために導入する変数））と関係式へ圧縮したものです。

この意味で構成式は，保存則だけでは決まらない材料の応答を与え，連続体の問題を完結させる関係として，クロージャーの典型と見ることができます。歴史的には，構成式は主として巨視的な実験と理論の往復から発達してきました。現代的に眺めれば，連続体モデルが明示的には扱わない微視的な自由度の効果を，少数の状態量の関係へ集約する役割も担っています。

構成式の歴史は，数学的な形式の歴史であると同時に，人間が「この材料では何を状態として覚えておくべきか」と考えてきた歴史でもあります。直接は見えにくい内部状態を表す内部変数，どの応力状態から永久変形が始まるかを示す降伏曲面，変形履歴によってその条件がどう変わるかを表す硬化則，結晶中で原子面がずれ動く向きを表す結晶すべり系などは，いずれも材料の「記憶」をどのような変数へ置き換えるかという選択です。

このひとはどう学んだか：北川浩

北川浩は大阪大学で機械工学を学び，1968 年に「数値解法による二次元弾，塑性問題の研究」で工学博士を取得しました。研究の出発点は，材料を連続した物体として永久変形を記述する連続体塑性力学と数値解析でしたが，1995 年の日本機械学会計算力学部門業績賞受賞時の回想では，大きな変形まで扱う有限ひずみ塑性論の研究を進めた後，平衡から外れて変化している系を熱力学の枠組みで扱う非平衡熱力学へ関心を広げ，さらに原子・分子モデルを用いる計算へ進んだ経緯を自ら記しています。そこでは，構成式を精緻にするほど物質のミクロな状態へ近づく道筋がかえって見えにくくなる，という連続体力学への問題意識が大きな契機であったと述べています[71)]。

同じ回想には，若い頃にルクレティウスの『物の本質について』を読み，複雑な自然現象が単純な原子的ダイナミクスから生じうるという考えに強く惹かれたことも記されています。理論を深く学ぶほど，その理論が何を記述し，どの部分を外から与えられた前提に委ねているかという境界も見えてきます。その研究の歩みは，既に身につけた方法の射程を問い直すことを，次の学びへつなげていった一つの例として読むことができます。

11.2　データ駆動が広げるモデル化の仕事

2016 年の T. Kirchdoerfer と M. Ortiz のデータ駆動計算力学は，材料の応答を表す関数形をあらかじめ決める方法に加えて，材料データと，力が釣り合う平衡条件，変形が空間的につながる適合条件を直接結びつける新しい枠組みを提示しました[49)]。この発想によって，構成式を中心に組み立ててきた連続体計算のモデル化に，新しい選択肢が加わりました。

この見方からは，データ駆動計算力学を，クロージャーのあり方を広げた試みとして読むこともできます。材料応答を一つの関数形として与える代わりに，材料データと物理的な制約を直接組み合わせることで，計算すべき状態を定めます。何を捨て，何を残し，残した情報を何によって結びつけるかという問題は，ここでも形を変えて現れています。

データ駆動の枠組みでは，何を材料の「状態」として測るか，二つのデータ

をどの尺度で近いと判断するか，力やエネルギーの保存，物体の対称性，熱力学に整合する条件をどこまで保持するか，という判断が新たな中心課題になります。人間の仕事は「関数の形を仮定すること」から，**データを比較し探索する舞台そのものを設計すること**へ比重を移していくのかもしれません。

この意味で，データ駆動化はモデル化の役割を変えます。データが多いほど，何を状態として観測し，どの制約を残し，何を比較可能とみなすのかという判断が重要になります。構成式の形を直接与える仕事から，モデルが成立する舞台を設計する仕事へと重心が移ります。

このひとはどう学んだか：M. Ortiz

Ortiz は，若い頃の構成式研究から，準連続体法，変分積分，データ駆動へと，問題に応じて使う数学の言葉を変えてきました。それまでの方法を土台にしながら，問いに必要な構造をその都度選び直す姿勢が，原子からデータまでを一つの力学として扱う仕事につながっています[46),48),49)]。

構成式からデータ駆動への展開は，何を明示的にモデル化し，何をデータと制約に委ねるかという役割分担を広げています。先人が作った問いを，現在の計算能力とデータ環境のなかで組み直し，新しいモデル化の方法へつなげていくという点で，ここまで見てきた応用力学の歴史と連続しています。

12 終章—モデルをつくり，現象を読み，次の問いをひらく

専門化は，近代科学の大きな成功です。一つの問題を深く掘り下げることによって，現在の材料，構造，流体，計算，データ科学は築かれてきました。その深さを保ちながら，分野の間に共通する考えへ目を向けることが，本書の最後の主題です。

専門を越えて話すための共通言語として，何が増減せず保たれるかを見る保存則，状態を比較するエネルギー，わずかな乱れへの応答を見る安定性，向きや位置を変えても変わらない性質を探す対称性，現象の大きさを整理するスケール，微小な変化から状態を特徴づける変分，細かな自由度を代表量へまとめる粗視化といった考えがあります。材料力学，流体力学，機械力学，熱力学の科目は別々でも，その背後ではこれらの考えが何度も現れます。

読者に持ってほしいのは，目の前の現象や問題に向き合ったとき，別のところで見た現象や考えとの「つながり」に気づく眼です。座屈を見て相転移を思い出し，格子不安定性を見て連続体安定性を思い出し，塑性流動を見て流体を思い出し，有限要素法を見て変分原理を思い出し，FPUT 鎖を見て次元を落とすことが物理を変えると気づく，といったつながりです。

本書で繰り返し見てきたのは，良いモデルが，問いに必要な構造を現実の中から選び取ることによって生まれるということです。レオナルドの眼，オイラー・ベルヌーイの運動学，サンブナンの断面力，プラントルの境界層，ヒルの安定性，マクスウェル型のエネルギー基準と殻座屈のアナロジー，準連続体法の適応的粗視化，データ駆動力学の構成式を迂回する発想——これらに共通するのは，複雑な現象のどこに構造があるかを見つけることです。

12.1　多様な学び方が力学をつくる

各章の「このひとはどう学んだか」を並べてみると，学問への入口の違いが見えてきます。レオナルドは式より先に眼で考え，グリーンは独学で一つの問いを追い，プラントルは現象の起こり方を先に捉えました。ヒルは具体的な問題を一般構造へ引き上げ，M. Tsingou は理論家の問いを計算機で実行できる形へ翻訳しました。J. E. Marsden は数学と力学を往復し，バーガースは人を集め，A. Needleman は長い共同研究や人的交流を通じて問いを育て，M. Ortiz は原子からデータまで問題に応じて枠組みを選び直しました。

画家のように見る人，独学で進む人，現象を具体的に捉えるところから入る人，数学の枠組みから入る人，人を集めて学問を作る人，机の上で書くことによって学問を作る人。それぞれの学び方には異なる強みがあります。**自分がどの型に近いかを知り，そこから別の型の人とつながること**が，学問の幅を広げます。異なる型の人々が同じ問いに別の角度から向き合うことで，本書でたどってきたような理論の連なりが生まれました。

そのために必要なのは，現象についての工学的な直感と，それを一般化する数学との間を往復することです。

> 現象から何をモデルとして取り出すかを判断する眼と，そのモデルを用いて現象を読み解く数学。その往復から新しい問いが生まれ，応用力学の領域がひらかれてきました。

歴史を学ぶと，現在の教科書に現れる簡潔なモデルが，どのような問い，単純化，数学化，検証を経て形づくられたかが見えてきます。ある研究者が現象の中に新しい問いを見出し，別の研究者がモデルを組み立て，さらに別の研究者が数学や計算によって新しい振る舞いを見出す。学術集会，雑誌，研究室は，そうした発見を次の世代へつないできました。

力学の進歩は，**現象の中から新しい問いを見つけ，その問いに応える「現実の**

縮約」と，縮約したモデルを完結させる関係や条件を発見してきた歴史として読むことができます。その歴史を知ることが，次のモデルを作る若い人に，まだ名前のついていない問題を見つけるきっかけと，自分自身の学び方を広げるきっかけを与えるなら，本書の目的は果たされます。

あとがきに代えて—史実と解釈のあいだ

本書で述べた言葉のいくつかは，本書が現代の数理モデリング教育という目的から与えた解釈を含んでいます。史料そのものに記されている用語と，本書の整理のための用語を区別して読んでください。

一方，論文の刊行年，学術集会の開催，共同研究，手紙や回想で確認できる発言などは，できるだけ一次資料や当事者の資料を参照しています。本文中の引用は，原典，代表的な研究史，当事者の回想など，記述の根拠をたどるための手掛かりとして記しています。史料から直接確認できることと，本書でそこから読み取れるものとして記した内容とは，区別して読む必要があります。

歴史叙述では，「後から見れば同じ数学に見える」ことと，「当時の研究者が実際に影響を受けた」ことを分ける必要があります。マクスウェルと殻の座屈，ヒルと原子論的安定性，ゲッティンゲンと戦後計算力学について述べた内容の中には，直接の引用・人的関係が確認できる場合もあれば，後世から見た概念的な類似にとどまる場合もあります。

各章に置いた「このひとはどう学んだか」などのコラムについても同様な注意が必要です。本人が書き残した回想や伝記的記録から確認できる部分に加えて，業績の性質や研究の展開から本書が読み取った部分も含まれます。したがって，これらのコラムは人物像を確定する小伝ではなく，読者が異なる学び方・研究の進め方を考えるための補助線として読んでください。

なお，本書の力学史と不安定性に関する議論の一部は，日本学術会議公開シンポジウム「第 4 回理論応用力学シンポジウム——力学と新学術の融合——」で行った基調講演をもとに，その後の視点を加えて再構成したものです[72)]。

付録：本編との対応表

本書と，本編『機械工学のための数理モデリングと現象解析入門』[1)]（全 6 章）との対応関係を示します。並行して読む場合の目安として，必要に応じて参照してください。

本書の章	本編の対応箇所
1 章　見ることから始まる（レオナルド，ガリレオ，はり）	1 章（数理モデリングとは何か）
2 章　3 次元を 1 次元へ畳む（棒，はり，軸，柱）	1 章, 5.3（ルジャンドル変換とラグランジュ関数法）
3 章　「場」を発明する（グリーンとコーシー）	1 章（構成関係式），3 章（偏微分方程式・複素関数論との関係），5.2（グリーン関数）
4 章　ゲッティンゲン	3 章（偏微分方程式），6 章（計算力学の前史）
5 章　固体は流れる（プラントル，オロワン，ヒル）	5.4（安定性問題）
6 章　スケールとエネルギー地形（レイリー，マクスウェル，殻座屈）	2 章（次元解析），5.4.5（カタストロフ理論：状態の急変を扱う理論）
7 章　原子から連続体へ（FPUT，次元低減，結晶安定性）	4 章（発展方程式），5.4（安定性問題）
8 章　計算そのものを力学にする（クーランから現代計算力学へ）	6 章（コンピューターによる現象解析）
9 章　知はどのように移動するか	——（本編になし。本書独自の軸）
10 章　論文を越えて知をつなぐ	——（本編になし。本書独自の軸）
11 章　構成式からデータ駆動へ	5.1（構成関係式），6 章末尾（AI 共生時代）

引用・参考文献

1）中谷彰宏：機械工学のための数理モデリングと現象解析入門，（2026），コロナ社
2）北川 浩：“レオナルドの「はりの問題」を解く（1）――眼と手により獲得された知識への接近”，機械の研究，Vol. **62**, No. 3, pp. 337–344，（2010），（連載は（7）Vol. **62**, No. 9 まで）
3）Ferguson, E. S.：Engineering and the Mind's Eye，（1992），MIT Press Cambridge, MA
4）Galilei, G.：Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze，（1638），Elsevirii Leiden
5）Euler, L.：“Sur la force des colonnes”，Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin，Vol. **13**, pp. 252–282，（1759），Presented in 1757
6）Barré de Saint-Venant, A.-J.-C.：“Mémoire sur la torsion des prismes, avec des considérations sur leur flexion ainsi que sur l'équilibre intérieur des solides élastiques en général”，Mémoires des Savants étrangers, Académie des Sciences，Vol. **14**, ,（1855）
7）Barré de Saint-Venant, A.-J.-C.：“Mémoire sur la flexion des prismes”，Journal de Mathématiques Pures et Appliquées，Vol. **1**, pp. 89–189，（1856）
8）Timoshenko, S. P.：History of Strength of Materials，（1953），McGraw-Hill New York
9）Timoshenko, S. P.：As I Remember: The Autobiography of Stephen P. Timoshenko，（1968），D. Van Nostrand Princeton, NJ
10）Cauchy, A.-L.：“Recherches sur l'équilibre et le mouvement intérieur des corps solides ou fluides, élastiques ou non élastiques”，Bulletin de la Société Philomatique，pp. 9–13，（1823），Reprinted in Œuvres complètes d'Augustin Cauchy, série 2, tome 2, pp. 300–304
11）Truesdell, C.：“Cauchy and the Modern Mechanics of Continua”，Revue d'histoire des sciences，Vol. **45**, No. 1, pp. 5–24，（1992）
12）Green, G.：An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism，（1828），Privately published Not-

tingham

13) Merton, R. K. : “A Note on Science and Democracy”, Journal of Legal and Political Sociology, Vol. **1**, pp. 115–126, (1942)

14) Cannell, D. M. : George Green: Mathematician and Physicist 1793–1841: The Background to His Life and Work, (1993), Athlone Press London

15) Prandtl, L. , “Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung”, In *Verhandlungen des III. Internationalen Mathematiker-Kongresses in Heidelberg* pp. 484–491 (1904)

16) Trinity College Library, Cambridge, “Correspondence with L. Prandtl”, Papers of Sir Geoffrey Taylor (G. I. Taylor), TAYL/D/65 (1923–1938), Scientific correspondence, mainly on turbulence; letters dated 1923, 1927, 1930–1938; accessed 15 August 2026

17) Taylor, G. I. : “The Mechanism of Plastic Deformation of Crystals. Part I—Theoretical”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Vol.**145**, No. 855, pp. 362–387, (1934)

18) Orowan, E. : “Zur Kristallplastizität. III. Über den Mechanismus des Gleitvorganges”, Zeitschrift für Physik, Vol. **89**, pp. 634–659, (1934)

19) Prandtl, L. : “Über die Härte plastischer Körper”, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, pp. 74–85, (1920)

20) Hill, R. : The Mathematical Theory of Plasticity, (1950), Clarendon Press Oxford

21) Sewell, M. J. : “Rodney Hill. 11 June 1921–2 February 2011”, Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society, Vol. **60**, , (2014)

22) Hill, R. : “A General Theory of Uniqueness and Stability in Elastic-Plastic Solids”, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. **6**, No. 3, pp. 236–249, (1958)

23) Hill, R. : “Some Basic Principles in the Mechanics of Solids without a Natural Time”, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. **7**, No. 3, pp. 209–225, (1959)

24) Daviet de Foncenex, F. : “Sur les principes fondamentaux de la méchanique”, Mélanges de philosophie et de mathématique de la Société royale de Turin, Vol. **2**, pp. 299–323, (1761), Volume covering 1760–1761

25) Martins, R. d. A. , “The Early History of Dimensional Analysis: I. Foncenex

and the Composition of Forces”, In *Studies in History and Philosophy of Science I*: Extrema: Quamcumque Editum (2021)

26) Bertrand, J. : “Sur l’homogénéité dans les formules de physique”, Comptes rendus hebdomadaires des séances de l’Académie des sciences, Vol. **86**, pp. 916–920, (1878)
27) Rayleigh, J. W. S. : The Theory of Sound, (1877), Macmillan London
28) Buckingham, E. : “On Physically Similar Systems: Illustrations of the Use of Dimensional Equations”, Physical Review, Vol. **4**, No. 4, pp. 345–376, (1914)
29) Vaschy, A. : “Sur les lois de similitude en physique”, Annales télégraphiques, Vol. **19**, pp. 25–28, (1892)
30) Macagno, E. O. : “Historico-Critical Review of Dimensional Analysis”, Journal of the Franklin Institute, Vol.**292**, No. 6, pp. 391–402, (1971)
31) van der Waals, J. D. , Over de Continuïteit van den Gas- en Vloeistoftoestand, PhD thesis Leiden (1873)
32) van der Waals, J. D. , “Onderzoekingen omtrent de overeenstemmende eigenschappen der toestands-vergelijkingen der verschillende stoffen” (1880), Koninklijke Akademie van Wetenschappen, Amsterdam; historical publication available through KNAW
33) Maxwell, J. C. : “On the Dynamical Evidence of the Molecular Constitution of Bodies”, Journal of the Chemical Society, Vol. **28**, pp. 493–508, (1875)
34) von Kármán, T. and Tsien, H.-S. : “The Buckling of Thin Cylindrical Shells under Axial Compression”, Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. **8**, pp. 303–312, (1941)
35) Tsien, H.-S. : “A Theory for the Buckling of Thin Shells”, Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. **9**, pp. 373–384, (1942)
36) Fermi, E. , Pasta, J. and Ulam, S. , “Studies of Nonlinear Problems, I”, Technical Report LA-1940 Los Alamos Scientific Laboratory (1955)
37) Hadamard, J. : Lectures on Cauchy’s Problem in Linear Partial Differential Equations, (1923), Yale University Press New Haven
38) Doi, Y. and Yoshimura, K. : “Symmetric Potential Lattice and Smooth Propagation of Tail-Free Discrete Breathers”, Physical Review Letters, Vol.**117**, No. 1, p. 014101, (2016)
39) Doi, Y. and Yoshimura, K. : “Construction of Nonlinear Lattice with Poten-

tial Symmetry for Smooth Propagation of Discrete Breather", Nonlinearity, Vol. **33**, No. 10, pp. 5142–5175, (2020)

40) Hill, R. : "On the Elasticity and Stability of Perfect Crystals at Finite Strain", Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Vol. **77**, pp. 225–240, (1975)
41) Hill, R. and Milstein, F. : "Principles of Stability Analysis of Ideal Crystals", Physical Review B, Vol. **15**, No. 6, pp. 3087–3096, (1977)
42) Dauxois, T. : "Fermi, Pasta, Ulam, and a Mysterious Lady", Physics Today, Vol. **61**, No. 1, pp. 55–57, (2008)
43) Grant, V. , "We Thank Miss Mary Tsingou", Los Alamos National Laboratory, National Security Science (2020), Historical account of Mary Tsingou and the FPUT numerical experiment
44) Nemat-Nasser, S. , Asaro, R. J. and Hegemier, G. A. , editors: Theoretical Foundation for Large-Scale Computations of Nonlinear Material Behavior, (1984), Martinus Nijhoff Publishers Dordrecht Proceedings of the Workshop, Evanston, Illinois, October 24–26, 1983
45) Marsden, J. E. and Hughes, T. J. R. : Mathematical Foundations of Elasticity, (1983), Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ
46) Kane, C. , Marsden, J. E. , Ortiz, M. and West, M. : "Variational Integrators and the Newmark Algorithm for Conservative and Dissipative Mechanical Systems", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. **49**, No. 10, pp. 1295–1325, (2000)
47) Oden, J. T. , Belytschko, T. , Babuška, I. and Hughes, T. J. R. : "Research Directions in Computational Mechanics", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.**192**, pp. 913–922, (2003)
48) Tadmor, E. B. , Ortiz, M. and Phillips, R. : "Quasicontinuum Analysis of Defects in Solids", Philosophical Magazine A, Vol. **73**, No. 6, pp. 1529–1563, (1996)
49) Kirchdoerfer, T. and Ortiz, M. : "Data-Driven Computational Mechanics", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.**304**, pp. 81–101, (2016)
50) International Union of Theoretical and Applied Mechanics, "Some of IUTAM's History and Records of the First International Congress for Applied Mechanics, Delft 1924" (2023), IUTAM historical archive; 1924 proceedings

edited by C. B. Biezeno and J. M. Burgers

51) University of Maryland, Institute for Physical Science and Technology, “Jan Burgers' Biography” (2026), Burgers archive biography; records his 1921 meeting and long professional and personal association with Theodore von Kármán

52) Ashby, M. F. , Evans, A. G. , Fleck, N. A. , Gibson, L. J. , Hutchinson, J. W. and Wadley, H. N. G. : Metal Foams: A Design Guide, (2000), Butterworth-Heinemann Boston

53) Cambridge Centre for Micromechanics, “Micromechanics Research Group”, University of Cambridge, Department of Engineering (1996), The Centre was opened in March 1996 as an interdisciplinary research centre linking Engineering, Applied Mathematics, Materials Science and Physics; accessed 15 August 2026

54) Tvergaard, V. and Needleman, A. : “Analysis of the Cup-Cone Fracture in a Round Tensile Bar”, Acta Metallurgica, Vol. **32**, No. 1, pp. 157–169, (1984)

55) Van der Giessen, E. and Needleman, A. : “Discrete Dislocation Plasticity: A Simple Planar Model”, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, Vol. **3**, No. 5, pp. 689–735, (1995)

56) 北京大学, “王仁——我国塑性力学和地球动力学的奠基人与开拓者”, 北京大学新闻网 (2006)

57) Wang, R. and Drucker, D. C. , editors, Constitutive Relations for Finite Deformation of Polycrystalline Metals: Proceedings of the IUTAM Symposium Held in Beijing, China, July 22–25, 1991 Beijing and Berlin (1992) : Peking University Press and Springer-Verlag

58) Kitagawa, H. and Nakatani, A. , “Crystal Plasticity Model and Molecular Dynamics (Numerical Simulation of Plane Strain Inhomogeneous Deformation)”, In Wang, R. and Drucker, D. C. , editors, *Constitutive Relations for Finite Deformation of Polycrystalline Metals*: Springer-Verlag (1992), Proceedings of the IUTAM Symposium held in Beijing, China, July 22–25, 1991

59) 北川 浩 著, 王 仁 校, 刘 文斌, 张 宏 译：塑性力学基础, (1983), 高等教育出版社『塑性力学の基礎』(日刊工業新聞社, 1979) の中国語訳

60) 王 仁, 黄 文彬, 黄 筑平：塑性力学引论（修订版）, (1992), 北京大学出版社

北京

61) Garber, D. and Roux, S. , “Marin Mersenne”, The Stanford Encyclopedia of Philosophy (2022), Substantive revision 13 June 2022; discussion of Mersenne’s correspondence network and his mediation of Descartes and Galileo

62) Van Helden, A. : “The Invention of the Telescope”, Transactions of the American Philosophical Society, Vol. **67**, No. 4, pp. 1–67, (1977)

63) Freguglia, P. and Giaquinta, M. : The Early Period of the Calculus of Variations, (2016), Birkhäuser Cham

64) Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, “Sitzungsprotokoll der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin vom 26. August 1756” (1756), Registres de l’Académie; records Euler’s proposal of Lagrange-Tournier as an external associate

65) Koiter, W. T. , Over de Stabiliteit van het Elastisch Evenwicht, PhD thesis Technische Hogeschool Delft (1945), English translation: NASA Technical Translation F-10,833, 1967

66) Thompson, J. M. T. : “Advice to a Young Researcher: With Reminiscences of a Life in Science”, Philosophical Transactions of the Royal Society A, Vol.**371**, No. 1993, p. 20120425, (2013)

67) 国立科学博物館, “タイガー計算器 No.59”, 理工電子資料館「計算機・コンピュータ」(2026), 1923–1924 年頃製の手回し計算機。1960 年代後半まで科学計算などに広く使用されたことを解説。2026 年 8 月 15 日閲覧

68) Columbia University Computing History, “IBM Punch Cards”, Columbia University (2023), Overview of punched-card input for programs and data through the mid-1970s; accessed 15 August 2026

69) Needleman, A. , “Speech of Acceptance of the 2011 Timoshenko Medal”, Applied Mechanics Division Honors and Awards Banquet; text reproduced on iMechanica (2011), 15 November 2011

70) Benzerga, A. A. , Deshpande, V. S. and Van der Giessen, E. : “Biographical Sketch of Alan Needleman”, Journal of Applied Mechanics, Vol. **82**, No. 7, p. 070201, (2015)

71) 北川 浩, “日本機械学会計算力学部門業績賞を受賞して”, 日本機械学会計算力学部門ニュースレター No.16 (1995), 1995 年 11 月 15 日講演, 日本機械学会計算力学部門ウェブサイト掲載

72) 中谷彰宏，“微視的構造の不安定性に起因するマルチスケール力学特性”，日本学術会議公開シンポジウム「第 4 回理論応用力学シンポジウム――力学と新学術の融合――」基調講演（2019），2019 年 1 月 23 日，日本学術会議講堂

索　　引

【あ】

安定性 15

【い】

一意性 15

【え】

エネルギー原理 15
エネルギー地形 21

【お】

オイラー（L. Euler） 1
オイラー・ベルヌーイはり理論 4
王 仁（R. Wang） 28
応力 1
オロワン（E. Orowan） 13

【か】

可積分性 20
ガリレオ（G. Galilei） 2
完全塑性体 14

【き】

機構 14
北川 浩（H. Kitagawa） 1
境界層 10
曲率 18

【く】

クーラン（R. Courant） 11
クライン（F. Klein） 10
グリーン（G. Green） 8
グリーン関数 9
クロージャー（完結関係） 5

【け】

計算力学 11
結晶すべり系 34
ケルヴィン（W. Thomson, Kelvin） 9
現象解析 i

【こ】

硬化則 34
構成式 22
降伏曲面 34
コーシー（A.-L. Cauchy） 8
国際理論応用力学連合 26

【さ】

座屈 3
サンブナン（A. J. C. B. de Saint-Venant） 5
サンブナンの原理 6

【し】

次元解析 16
準連続体法 24
心眼 1
振動モード 19

【す】

数理モデリング i

【そ】

相似則 16
粗視化 24
塑性変形 13
ソリトン 20
損傷 34

【た】

対応状態 17
弾性論 3

【ち】

力のモーメント 4

【て】

低次元化 4
ティモシェンコ（S. P. Timoshenko） 6
データ駆動計算力学 24
デカルト（R. Descartes） 29
テンソル 8

【と】

等温線 17
同次性 16
トレスカ（H. Tresca） 13

【な】

内部変数 34

【は】

バーガース（J. M. Burgers） 26
波数空間 19
バッキンガム（E. Buckingham） 16
バッキンガムのπ定理 16

【ひ】

ヒル（R. Hill）　14
ヒルベルト（D. Hilbert）　10

【ふ】

ファン・デル・ワールス（J. D. van der Waals）　17
フーリエ（J. Fourier）　16
フォン・カルマン（T. von Karman）　17
フォン・ミーゼス（R. von Mises）　13
プラントル（L. Prandtl）　10

【へ】

ベルヌーイ（Bernoulli）　1
偏微分方程式　11
変分原理　11
変分積分法　23

【ほ】

ホイヘンスの原理（アダマールの意味での強い形）　20

【ま】

マクスウェル（J. C. Maxwell）　16
マクスウェル条件　18

【め】

メルセンヌ（M. Mersenne）　29

【も】

モデル縮約　5

【ゆ】

有限要素法　22

【ら】

ラグランジュ（J.-L. Lagrange）　10

【り】

離散化　22
離散転位塑性論　28
離散ブリーザー　20
流動則　13

【る】

ルンゲ（C. Runge）　10

【れ】

レイリー（J. W. Strutt, Rayleigh）　10
レオナルド・ダ・ヴィンチ（Leonardo da Vinci）　1
連続体力学　8

【A】

M. Ashby　27

【B】

I. Babuška　23
T. Belytschko　22
J. Bertrand　16
C. B. Biezeno　26

【F】

N. Fleck　27
F. Daviet de Foncenex　16

【H】

T. J. R. Hughes　22
J. W. Hutchinson　22

【I】

IUTAM　26

【J】

Journal of the Mechanics and Physics of Solids（JMPS）　31

【K】

W. T. Koiter　18

【M】

J. E. Marsden　23
F. Milstein　20

【N】

A. Needleman　22
S. Nemat-Nasser　32

【O】

J. T. Oden　23
M. Ortiz　24

【P】

W. Prager　27

【S】

J. C. Simo　23

【T】

G. I. Taylor　13
J. M. T. Thompson　18
H.-S. Tsien　17
M. Tsingou　19
V. Tvergaard　28

【V】

E. Van der Giessen　28
A. Vaschy　16

— **著者略歴** —

1988 年　大阪大学工学部機械工学科卒業
1990 年　大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了（機械工学専攻）
1993 年　大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了（機械工学専攻），博士（工学）
1993 年　大阪大学助手
1995 年　大阪大学講師
1997 年　大阪大学助教授
1999 年　米国ブラウン大学客員准教授（2000 年まで）
2004 年　大阪大学教授
　　現在にいたる

力学をつくる眼：
数理モデリングと現象解析から読む応用力学小史

Mind's Eye for Mechanics: A Concise History of Applied Mechanics in Mathematical Modeling and Analysis of Phenomena

©Akihiro Nakatani 2026

2026 年 9 月 8 日　初版第 1 刷 Web 発行

著　　者　中谷彰宏
掲載協力　株式会社　コロナ社
　　代表者　牛来真也

112-0011　東京都文京区千石 4-46-10
　　株式会社　**コ ロ ナ 社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
　　Tokyo Japan
ホームページ　https://www.coronasha.co.jp