

研究討論会(16) 応用力学委員会  
Beyond AI時代の土木に向けて  
～AIの先にあるもの～  
×3Dものづくり

これからの建設分野では、「インフラ分野のDX」、「BIM/CIMによる3次元データ活用」、「AI・ロボット／建設3Dプリンタ」など、従来とは次元の異なるデジタル技術を駆使した「3Dものづくり」の研究開発が期待されています。本WGは、これらの流れを加速・推進させるために3D設計へ橋渡しする新たな仕組みを計算力学の立場から検討します。

名古屋大学大学院工学研究科  
土木工学専攻 教授 加藤 準治

## デジタル技術で課題を改善できるのか？

### デジタル技術

- ・ AI, ディープラーニング
- ・ 遠隔無人施工, ロボット施工, 建設3Dプリンター
- ・ デジタルツイン (現実同様の仮想空間)
- ・ BIM/CIM (Building/Construction Information Modeling/Management)
- ・ インフラ分野のDX
- ・ 建設SaaS
- ・ 5G

### 建設分野の4つの主な課題

- ① 建設就業者・技能労働者の減少, 深刻な人手不足
- ② CO<sub>2</sub>排出量の削減
- ③ 社会インフラの老朽化
- ④ 非接触・リモート型の働き方への転換

⇒ 「従来どおりのモノを造る」という考え方では  
課題②, ③の改善は見込めない。

⇒ これまでの構造に固執しない新たな発想が必要

# 建設3Dプリンターによるものづくり：世界の動向

## 先端テクノロジーで橋を架ける

3Dプリンターで人や自転車が進める橋を造るプロジェクトが進むオランダ。建設業の労働生産性で日本を上回る欧州の国々では、業界構造の技術開発が相次ぐ。新技術を育て、積極的に現場に取り入れる風土が、生産性の向上を加速させる。



オランダの3Dプリンター橋  
(橋長8m, 2017年)



## 自動・情報化施工の例

- ・プレキャストコンクリートブロックを積層造形した事例
- ・型枠、鉄筋は不要
- ・省人化

日経コンストラクションより抜粋  
2017.12.25号

- ・3Dプリンターで樹脂製型枠を製作した事例
- ・曲面型枠も自由自在に造形。
- ・従来法に比べ75%コスト削減
- ・型枠の製作時間は6分の1
- ・省人化

### 【新たな使い道】型枠作りも3Dプリンターで自在に早く

英ロンドンで進む欧州最大の鉄道プロジェクト「クロスレール」では、駅部の壁面に仕上げ材として取り付けるコンクリートパネルの施工で大々的に3Dプリンターを活用した。ただし、3Dプリンターで作ったのはパネルそのものではなく、パネルを製作するための型枠だ。

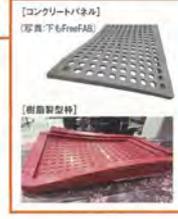
コンクリートパネルの製造は、英国の繊維補強コンクリート製品メーカーのGRCUKが担当している。クロスレール全体で使用するパネルは約3万8000枚に上る。設置する場所によってパネルの形状は異なり、計1400種類の型枠が必要になる。従来のように型枠を一つずつ合板などから切り出す手間は膨大だ。

そこで、GRCUKはオーストラリアの建築家、ジェームス・ガーディナー氏が開発した「FreeFAB」と呼ぶ技術を使っ

### ■ 駅壁面のコンクリートパネルの型枠は樹脂製



(写真:クロスレール)



【コンクリートパネル】

(写真:下もFreeFAB)

【樹脂製型枠】

て、3Dプリンターで樹脂製の型枠を作ることになった。1つの型枠の製作に要する時間は約2時間半。従来ならば16時間かかるところを、大幅に短縮できる。

流し込んだコンクリートが固まったら、熱を加えて型枠を溶かし落とす。この時に集めた樹脂は、別の型枠の作成に再利用できるので、資材の無駄もない。

## 土木構造物への適用に向けた研究開発

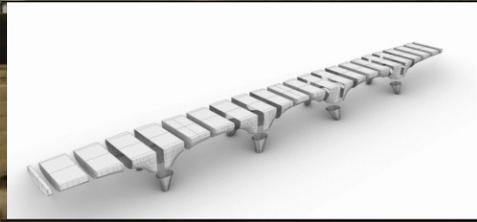


<https://mx3d.com>

## Large 3D printing concrete bridge, Netherland



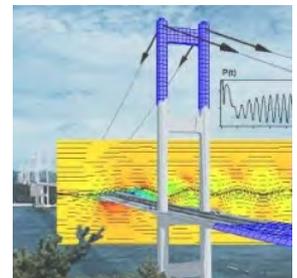
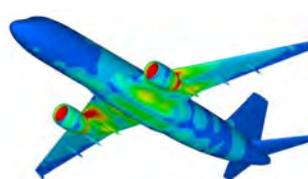
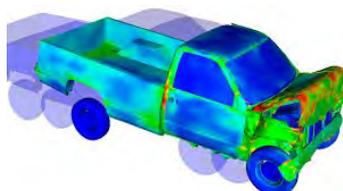
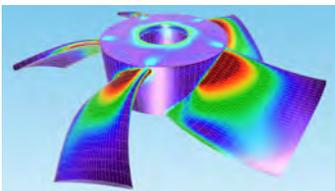
アイントホーフェン工科大学  
テオ・サレット教授



[https://tech.nikkeibp.co.jp/atcl/nxt/column/18/00820/062400007/?ST=nxt\\_idx\\_common&P=5](https://tech.nikkeibp.co.jp/atcl/nxt/column/18/00820/062400007/?ST=nxt_idx_common&P=5)

## Computer Aided Engineering (CAE)

コンピュータ技術を活用したものづくり（有限要素法をはじめとする解析技術の活用）



力学の計算は、古典力学に始まり、コンピュータによる解析技術と組み合わせられて進化し続けています。それが**計算力学**という分野です。

**「計算力学」**は、21世紀のものづくりの**「キーテクノロジー」**

## 材料体積制約付き剛性最大化問題のトポロジー最適化の例

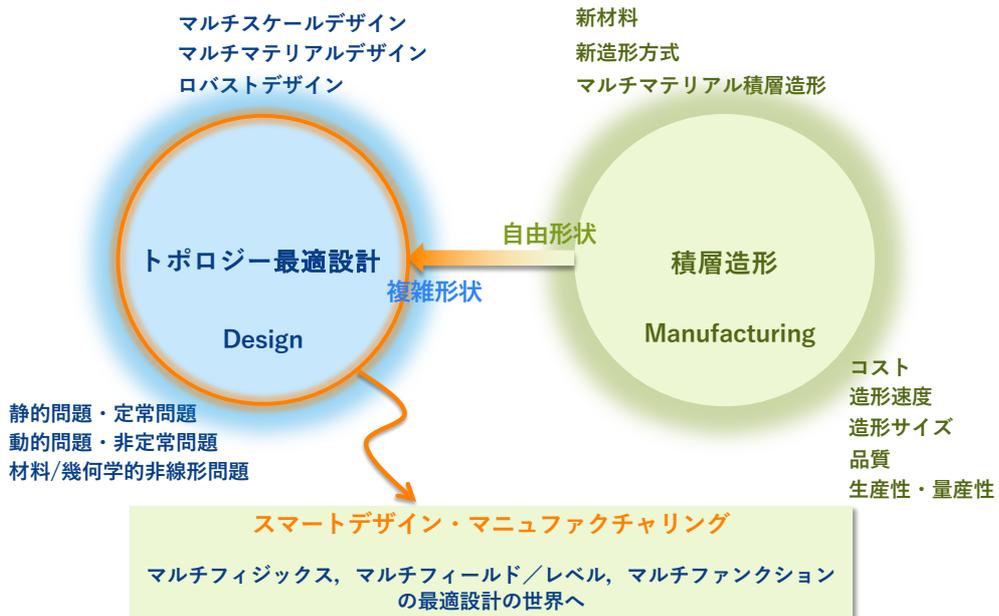
最適な「かたち（材料配置）」を力学の原理  
と数値シミュレーションによって見出す方法論



自作の有限要素法・トポロジー設計用プログラムで計算：所要時間 数分

Ogawa (2017)

## 進化するCAEによるものづくり



## トポロジー最適化と積層造形を用いたものづくり：航空宇宙分野

Siemens PG Finspång:  
Reimagining designs for greater performance

SIEMENS  
Ingenuity for life



Unrestricted © Siemens AG 2019

### ガスタービン・エンジンの例：

燃焼温度の制御シミュレーションを実施して、冷却通路の設計や燃焼の最適化を実施した例。燃焼部の**パーツ数を13個から1個に削減**、**生産のリードタイムは26週から3週に短縮**され、さらに大幅な軽量化を実現したとされる。

## 連続FRP・高強度セメントによるFRC構造の自動施工化（を考える）



将来的には…



清水建設技術研究所

建設3Dプリンターの開発が進む

「連続炭素繊維複合材料」の3Dプリンターによる補強材の造形（名大・加藤研）

- ・ 錆びない構造 → 将来の維持補修費の大幅な削減
- ・ 3D最適設計 → 軽量化，使用材料とCO<sub>2</sub>排出量の削減
- ・ ロボット施工 → 省人化

## 主応力分散制約によるロバスト設計法の提案

### ● 主応力方向の分散制約

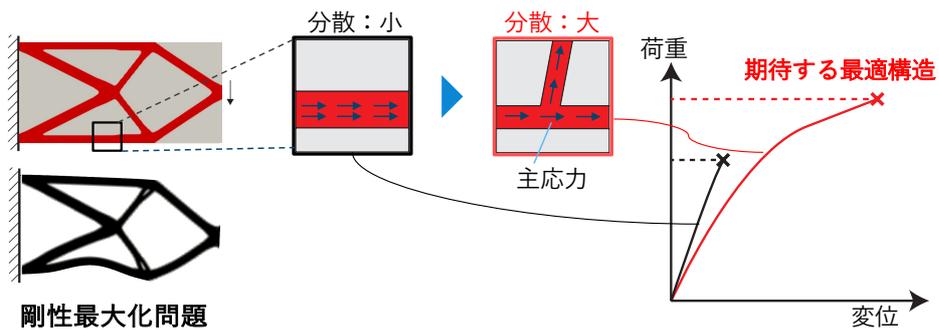
Kamada et al. (2021)

#### ● 構造の枝分かれを増やすための制約条件

構造の枝分かれが多い

▶ 構造部材が多く、部材の細長比が小さくなると期待

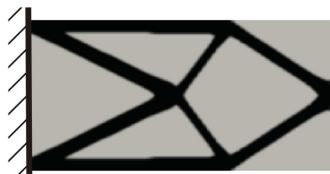
#### ● 構造部材の角度 $\approx$ 構造部材中の主応力方向 として定式化



剛性最大化問題

## 主応力分散制約によるロバスト設計法の提案

### ● 通常の剛性最大化



細長い構造部材

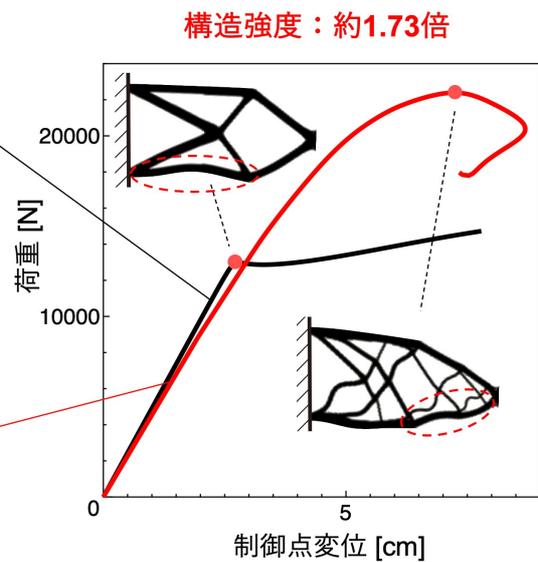
▶ 座屈を生じやすい

### ● 提案手法 ( $\bar{v}' = 0.015$ )



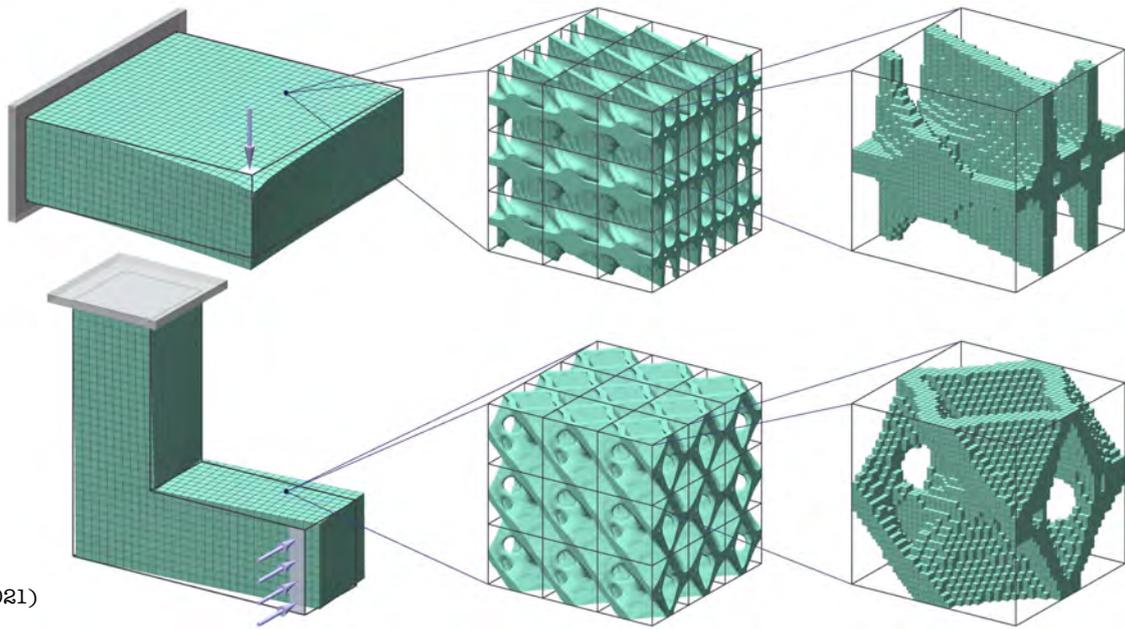
短い構造部材+サポート材

▶ 座屈を抑制



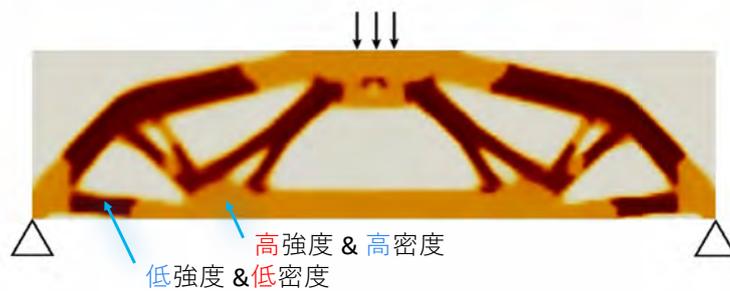
線形計算の最適化の枠組みで、付加的に構造強度を改善できる手法

## マルチスケールトポロジー最適化：マクロとミクロ構造の両方を考慮



Matsui (2021)

## マルチマテリアル・トポロジー最適化



応力値と重さに制約をかけたマルチマテリアルの剛性最大化問題

Watanabe (2018)

## まとめ

- ① デジタル技術（特にロボットによる自動施工・遠隔無人施工）の推進は喫緊の課題
- ② 3次元化の波（BIM/CIMの推進、まずはこれに追従）
- ③ BIM/CIMが定着すれば、CAEによる3次元構造設計が導入しやすくなり、フロントローディングの効果が期待できる
- ④ 計算と計測におよびAIによる最適制御
- ⑤ 3次元構造設計に対する設計基準の整備が必要。

- ・ 社会に大きな変革をもたらすのは、「道具」の発明（出現）
- ・ 計算力学は、21世紀のキーテクノロジー
- ・ 新しい分野の開拓であり、協力してマーケットを作り、育てる活動が必要



# 建設技術のデジタル革新 に関する研究会

MAKE NEW STANDARDS.  
東海国立  
大学機構

NAGOYA  
UNIVERSITY

公益財団法人 科学技術交流財団  
Aichi Science & Technology Foundation