

(公財)科学技術交流財団

建設技術のデジタル革新に関する研究会

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

公益財団法人 科学技術交流財団 研究交流事業
「建設技術のデジタル革新に関する研究会」

建設業就業者の高齢化や人手不足など様々な社会的問題が深刻化する中、これからの社会インフラの高度な発展を見据え、建設現場のIT化 (**i-Construction**) が加速し、**建設デジタル技術**に関する様々な取り組みが行われています。特に、最近では、**建設ロボット**や**建設3Dプリンタ**などの**自動施工技術**が、建設分野におけるイノベーションのひとつとして世界的に注目されています。

このような技術革新のもとでは、もはや従来の標準的な構造や材料に固執せず、これまでの知見を活かしながら要求性能を満足する**最適構造**をコンピュータ (**3次元設計**) で見出し、その3次元データを建設プロジェクト全体で共有して、作業の効率化と自動施工に役立てる新たなプロセスの構築が期待されます。

本研究会は未来の社会インフラの発展を念頭に、**建設・機械・ロボット・情報工学・材料化学**分野にまたがる、多次元・領域横断的な観点からデジタル革新による新しい建設技術について、ハイレベルな情報交換と技術トレンドの把握を目的とします。

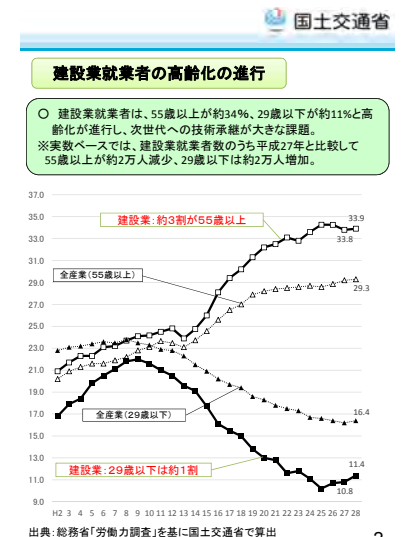
- 活動期間と回数： 2年間（年3、4回程度）
- 活動内容： 話題提供、外部講師による講演、シンポジウム、見学会
- 研究会座長： 名古屋大学大学院土木工学専攻 教授 加藤 準治
- 事務局： 科学技術交流財団 業務部 古川 寿三枝・e-mail: furukawa@astf.or.jp

未来の社会インフラのための最適設計と自動施工デジタル革新への期待

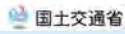
名古屋大学大学院工学研究科
土木工学専攻 教授 加藤 準治

社会的課題

- ① 建設就業者・技能労働者の減少、深刻な人手不足
- ② CO₂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



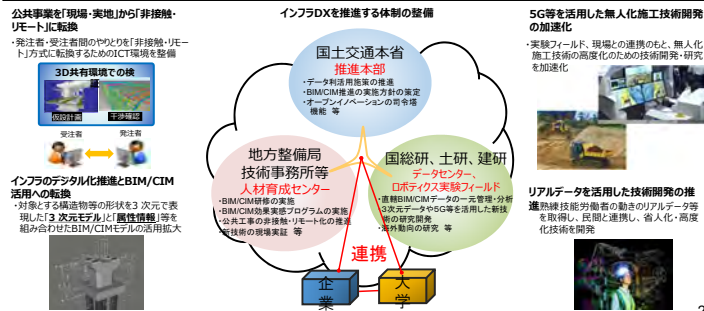
インフラ分野のDX(デジタル・トランスフォーメーション)の推進



2020. 7. 29

- 新型コロナウイルス感染症対策を契機とした非接触・リモート型の働き方への転換と抜本的な生産性や安全性向上を図るため、5G等基幹テクノロジーを活用したインフラ分野のDXを強力に推進。
- インフラのデジタル化を進め、2023年度までに小規模なものを除く全ての公共工事について、BIM/CIM※活用への転換を実現。
- 現場、研究所と連携した推進体制を構築し、DX推進のための環境整備や実験フィールド整備等を行い、3次元データ等を活用した新技術の開発や導入促進、これらを活用する人材育成を実施。

※BIM/CIM (Building/Construction Information Modeling, Management)



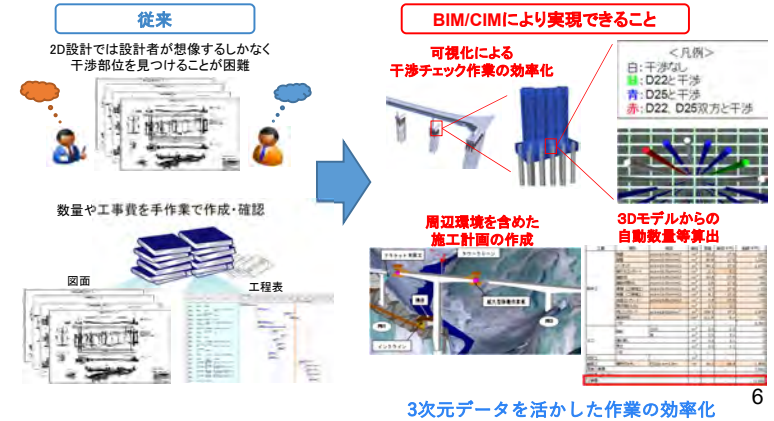
2

モノのDX:BIM/CIMの導入による建設生産プロセスの変革



※BIM/CIM:Building/Construction Information Modeling, Management

- 複数の図面から推察していた内部構造や組立形状が一目で分かるようになる
- 更に、数量や工事費の自動化が可能となり、受発注者双方の働き方が変革



6

デジタル技術で課題を改善できるのか？

デジタル技術

- ・ 無人施工、ロボット施工
- ・ AI、ディープラーニング
- ・ データ駆動型
- ・ デジタルツイン (現実同様の仮想空間)
- ・ BIM/CIM (Building/Construction Information Modeling/Management)
- ・ 建設SaaS
- ・ インフラ分野のDX
- ・ 5G

- ① 建設就業者・技能労働者の減少、深刻な人手不足
- ② CO₂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



- ドレスデン工科大学の研究チームは、「繊維補強コンクリート (FRC)」に関して世界をリードし、自動・情報化施工技術の本格的な開発を進めている。



土木構造物への適用に向けた研究開発



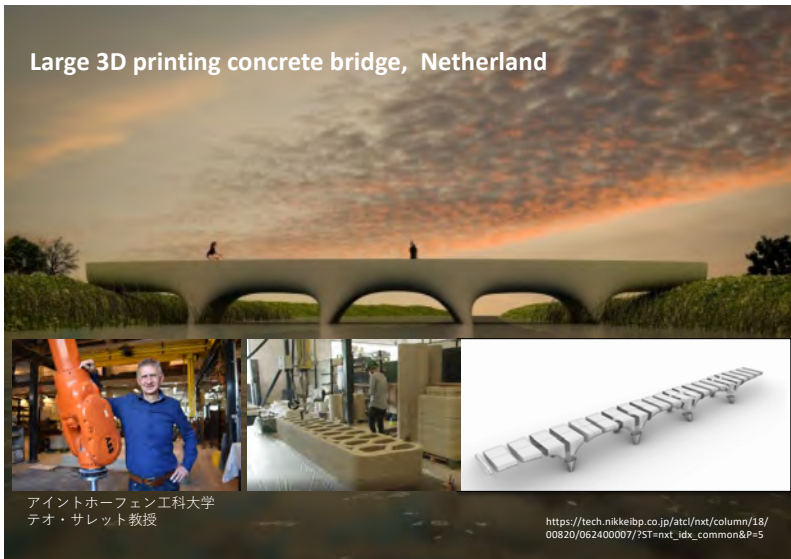
Concrete bridge by 3D printing at Spain



<https://www.thelocal.es/20170202/worlds-first-3d-printed-bridge-opened-in-madrid>

Spain (2017)

Large 3D printing concrete bridge, Netherland

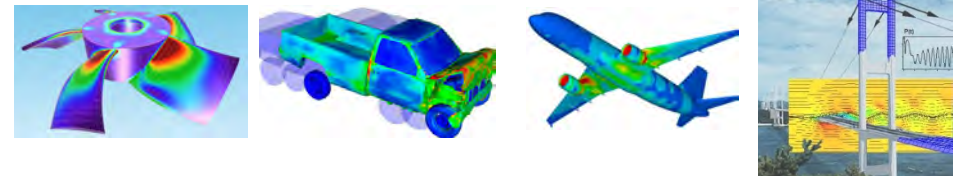


アイントホーフェン工科大学
テオ・サレット教授

https://tech.nikkeibp.co.jp/atcl/column/18/00820/062400007/?ST=next_idx_common&P=5

Computer Aided Engineering (CAE)

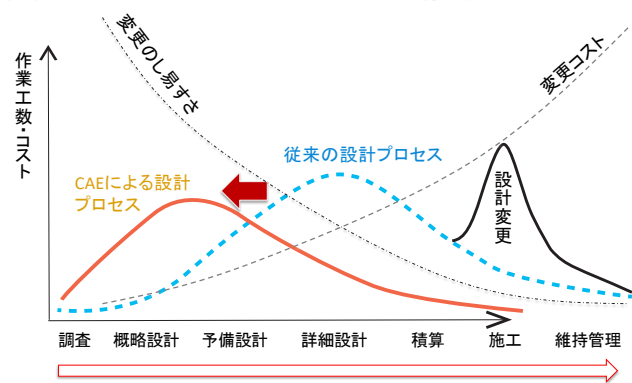
コンピュータ技術を活用したものづくり（有限要素法をはじめとする解析技術の活用）



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。

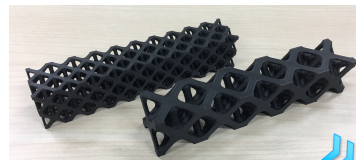
「**計算力学**」は、21世紀のものづくりの「**キーテクノロジー**」

CAEを活用したフロントローディングの推進

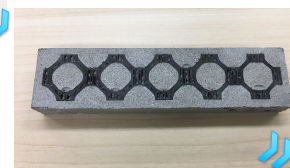


- CAEを早い段階で導入することで手戻りを減らし、開発期間を短縮
- **新材料**や**新機構**、および**トポロジー最適化**の導入でさらなる効果が期待できる。

連続FRP・高強度セメントによるFRC構造の自動施工化



「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)



清水建設技術研究所

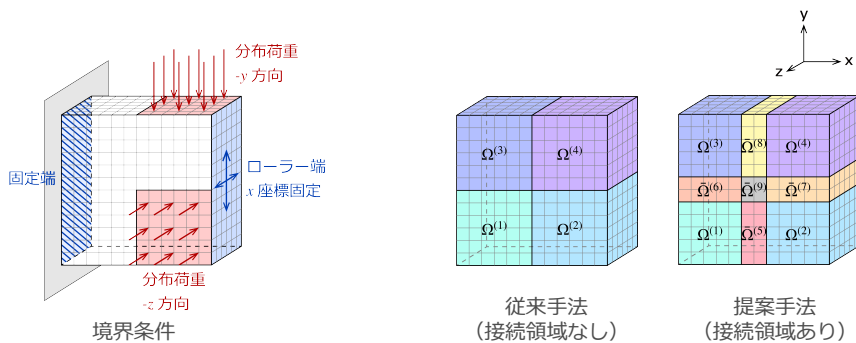


自動建設機械施工が可能か？

- 錆びない構造 → 将来の維持補修費の大幅な削減
- 最適設計 → 軽量化, CO₂排出量の削減
- ロボット施工化 → 省人化

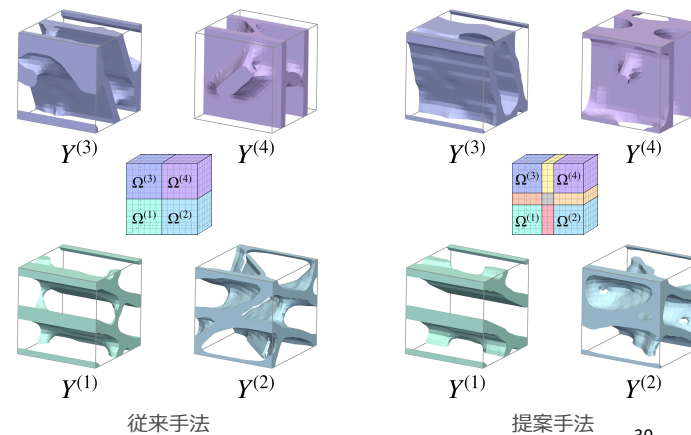
連続FRP 最適化計算例

2方向の荷重が作用する直方体構造物を4つの領域に分割して剛性を最大にするFRPの形を求めた例

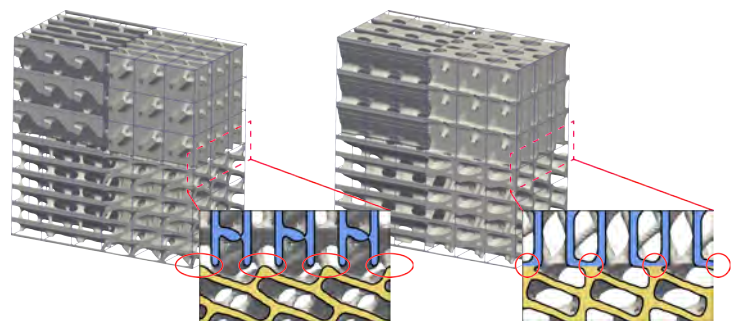


Matsui (2020)

連続FRP 最適化計算例



連続FRP 最適化計算例



従来手法

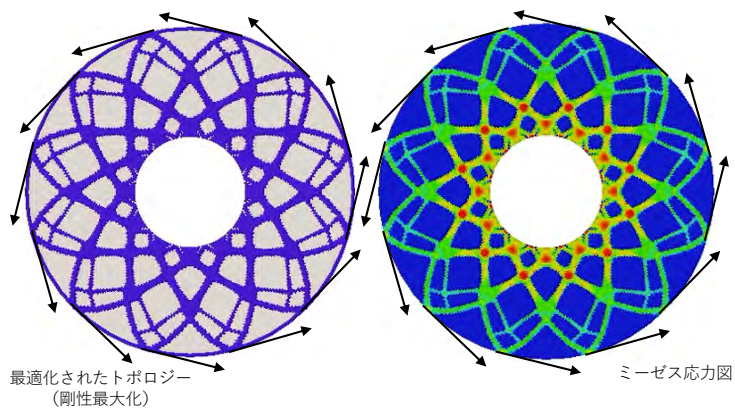
提案手法

提案手法により 連続なマイクロ構造境界が得られた

連続FRP 最適化計算例



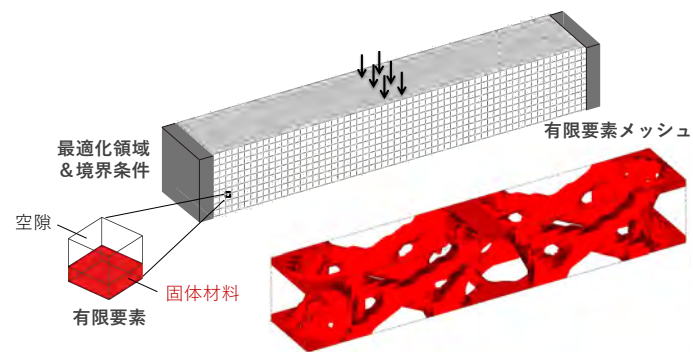
最適なかたちをコンピューターで導き出すトポロジー最適化



最適化されたトポロジー
(剛性最大化)

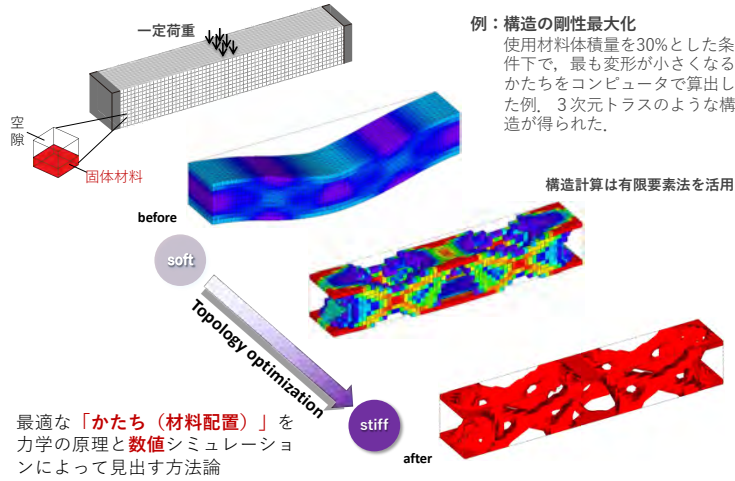
ミーゼス応力図

トポロジー最適化



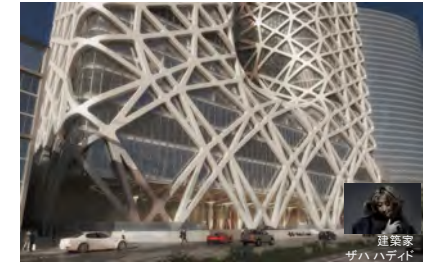
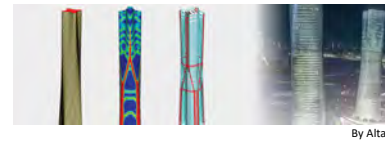
例：剛性最大化
(使用材料20%)

トポロジー最適化



例：構造の剛性最大化
 使用材料体積量を30%とした条件下で、最も変形が小さくなるかたちをコンピュータで算出した例。3次元トラスのような構造が得られた。

最適化の実用例：建設



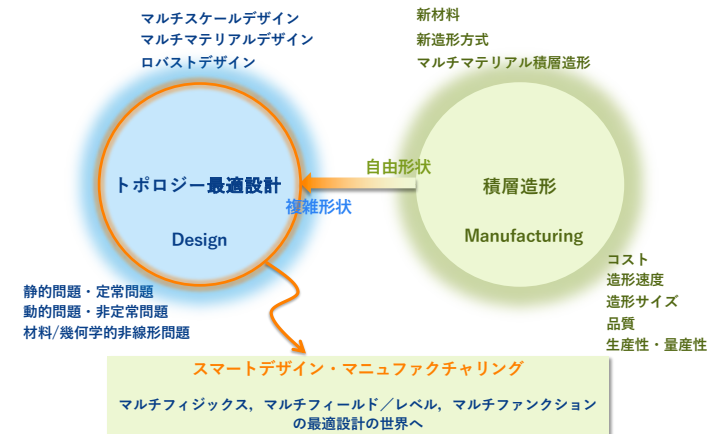
おまけ：サルギナトベール橋



スイスの建築デザイナーのマイヤール氏による3ヒンジアーチ。アーチリブの途中が大きく膨らんだ特徴的な外観をもつ。

荷重方向の不確かさを考慮したロバスト・トポロジー最適設計 (2D)
 (もちろん条件は完全には再現できていませんが。。。)

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：産業界の動向



3Dプリンターにより製作された「La Bandita」のボディ／フレーム。米ハックロッド社との共同開発。ボディやシャシーは、Al合金やカーボン素材を組み合わせる。フロアやバウトレーンは米テスラ（Tesla）製を基本とする。

<https://tech.nikkeibp.co.jp/atcl/nxt/column/18/00063/00029/7P=2>

ハックロッドのシャシー製作例

トポロジー最適化と積層造形を用いたものづくり：産業界の動向

Siemens PG Finspång:
Reimagining designs for greater performance

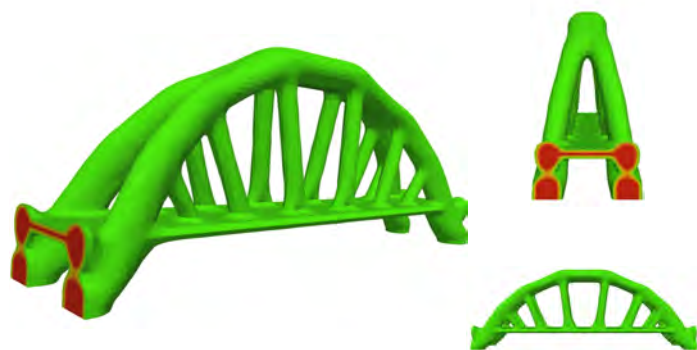


Illustration © Siemens AG, 2017

ガスタービン・エンジンの例：

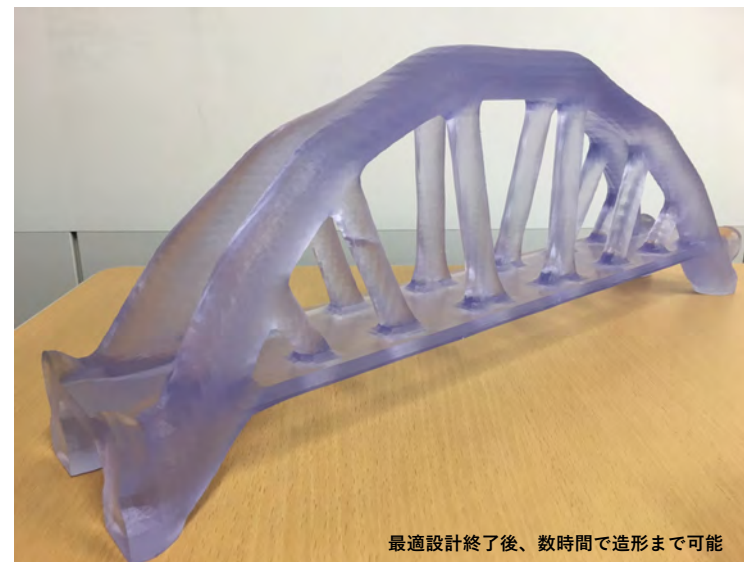
燃焼温度の制御のシミュレーションを実施して、冷却通路の設計や燃焼の最適化を実施した例。燃焼部の**パーツ数を13個から1個に削減**、**生産のリードタイムは26週から3週に短縮**され、さらに大幅な軽量化を実現したとされる。

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



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

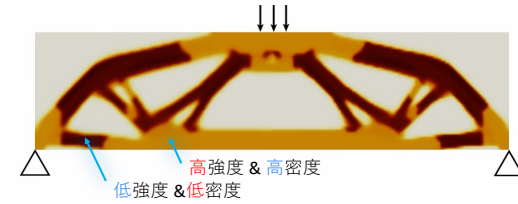
Ogawa (2017)



最適設計終了後、数時間で造形まで可能

トポロジー最適化の計算事例

マルチマテリアル・トポロジー最適化

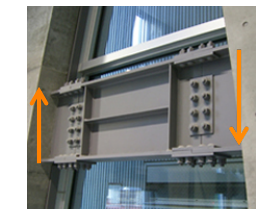


応力値と重さに制約をかけたマルチマテリアルの剛性最大化問題

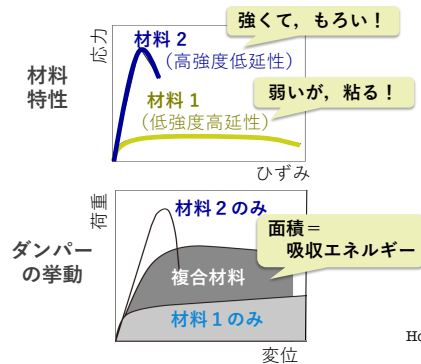
Watanabe (2018)

エネルギー吸収性能最大化のための最適化問題

マルチマテリアルかつ壊れる状態を考慮したトポロジー最適化
(複合材料の塑性変形を考慮したトポロジー最適化)



現状の低降伏点鋼ダンパー

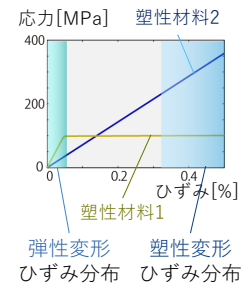


Hoshiba (2016)

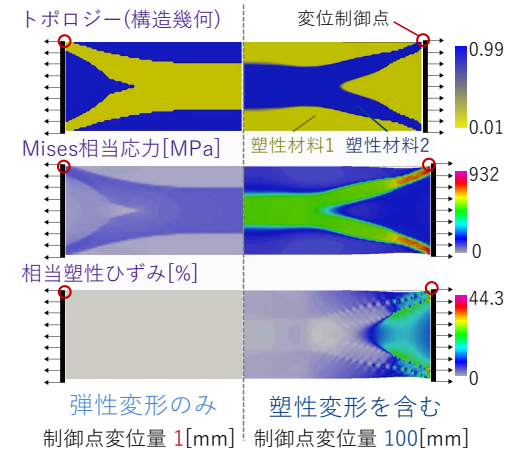
2相材料最適化計算例: case-1 (引張り変形)

エネルギー吸収性能最大化

Case1: 引張



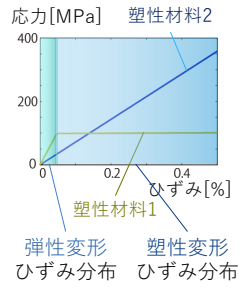
個々の材料の特長を活かす
最適な材料配置



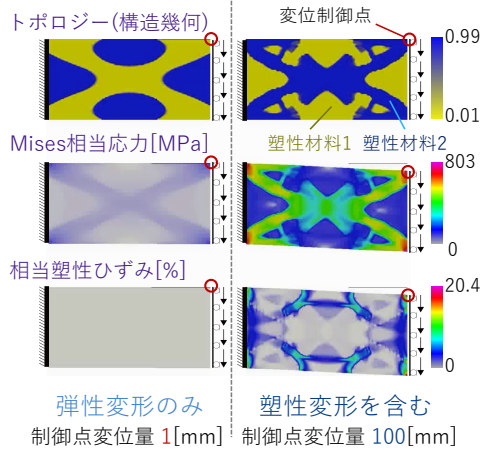
2相材料最適化計算例: case-2 (せん断変形)

エネルギー吸収性能最大化

Case2: せん断



複雑な材料挙動を考慮した
最適な材料配置に収束



メタマテリアルの設計: 2D・等方性

目標とする負のポアソン比: $\nu_t = -0.2$

$$\text{目的関数: } f(s) = \frac{1}{2} \sum_{i,j,k,l=1} w_{ijkl} (C^{H} - C^*)^2$$

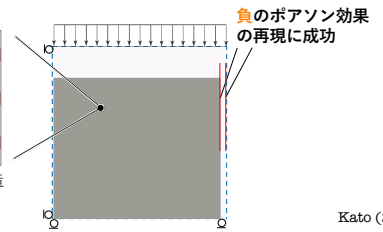
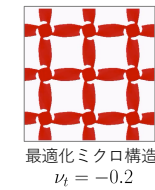
■ ヤング率 10.0 [GPa]
ポアソン比 0.3 材料体積比 50%

目標とする材料剛性行列

$$C^H = \begin{pmatrix} 6.0 & -1.2 & 0.0 \\ -1.2 & 6.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{pmatrix}$$

最終の均質化材料剛性行列

$$C^H = \begin{pmatrix} 5.90 & -1.17 & 0.0 \\ -1.17 & 5.90 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.17 \end{pmatrix}$$

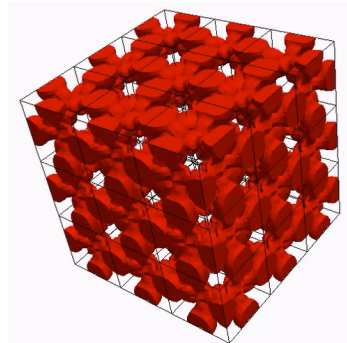
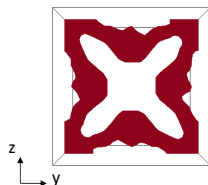
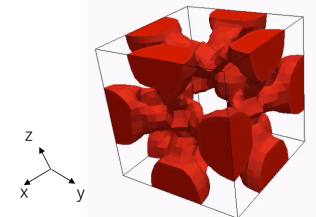


Kato (2018)

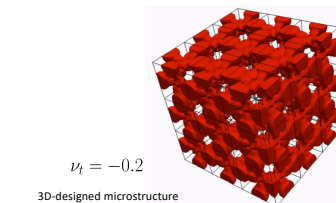
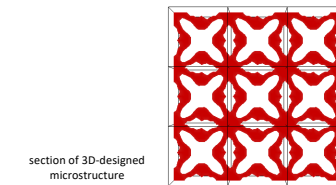
メタマテリアルの設計: 3D・等方性

目標とする負のポアソン比: $\nu_t = -0.2$

□ 空隙
■ ヤング率 10.0[GPa]
ポアソン比 0.3



メタマテリアルの設計: 3D・等方性



メタマテリアルの設計：3D・異方性

目標とするポアソン比の値：
 $E_x = 0.6, E_y = 0.2, E_z = 0.4$
 $\nu_{xy} = -0.3, \nu_{xz} = -0.3, \nu_{yz} = -0.1$
 $\nu_{yx} = -0.1, \nu_{zx} = -0.2, \nu_{zy} = -0.2$

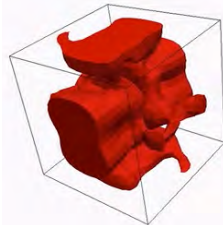
$$\min f(\mathbf{s}) = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^d \omega_{ij} (C_{ij}^H - C_{ij}^*)^2$$

要素数：20 × 20 × 20要素

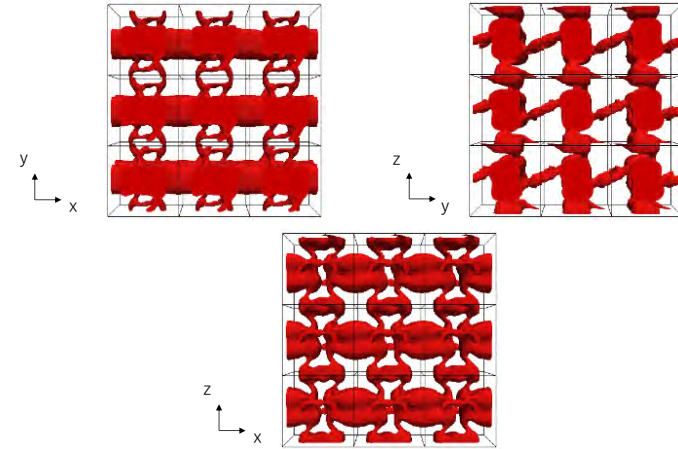
材料体積比：40%

<input type="checkbox"/>	空隙	
<input checked="" type="checkbox"/>	ヤング率	10.0[GPa]
<input checked="" type="checkbox"/>	ポアソン比	0.3

最適化マイクロ構造



メタマテリアルの設計：3D・異方性



ラティス構造 (Infill 構造とも言われる)



<https://www.linkedin.com/pulse/lightweight-lattices-liberate-new-product-performance-marc-saunders>

多孔質格子構造

- ・軽量化が可能
- ・放熱効果が高い

優れた特性

ただし、これまでは製造が困難であった



ラティス構造

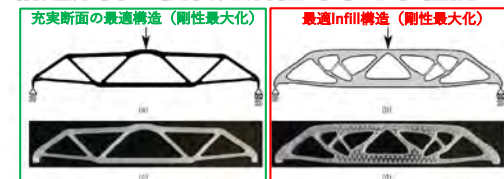


3Dプリンターによる鋼橋の架設
(オランダのDelft大学の研究グループ)

3Dプリンターの発展により、製造可能になってきた。ただし、設計が困難

トポロジー最適化の導入が必要不可欠に！

Infill 構造が持つ優れた潜在的な力学性能

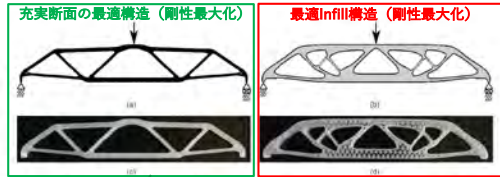


材料体積量同じ

Fig. 2. Two specimens: diamond (a, b) and fabric (c, d) specimens. Left: solid specimen (standard business construction). Right: porous specimen with triangle infill (cutting approach).

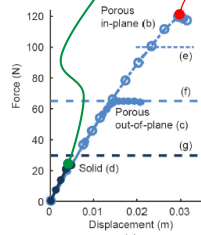


Infill 構造が持つ優れた潜在的な力学性能



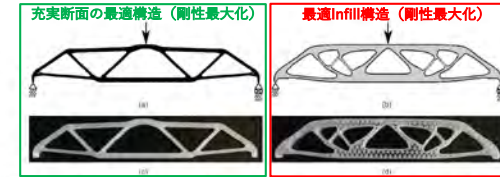
材料体積量同じ

Fig. 2. Test specimens: (a) solid and (b) infill (c, d) specimens. (left: solid specimen (standard minimum compliance); right: porous specimen with triangle infill (loading approach)).



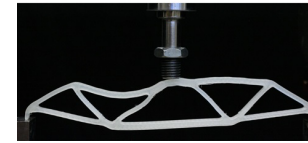
Infill 構造の座屈荷重は充実断面の最適構造よりも **5 倍ほど大きい** という最新の実験報告があった (冗長性が非常に高い)。

Infill 構造が持つ優れた潜在的な力学性能



材料体積量同じ

Fig. 2. Test specimens: (a) solid and (b) infill (c, d) specimens. (left: solid specimen (standard minimum compliance); right: porous specimen with triangle infill (loading approach)).



早い段階で座屈を生じた



細い部材で局所座屈が連続的に生じることで冗長性が増し、全体として高い座屈性能を発現した

主応力分散制約によるロバスト設計法の提案

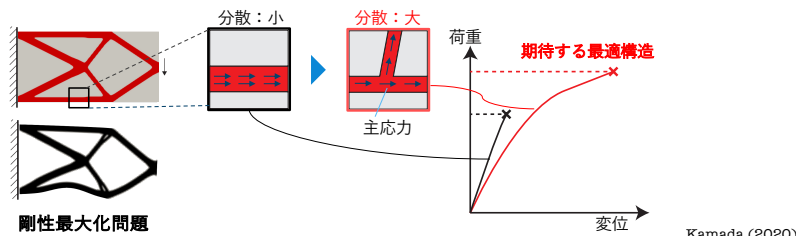
● 主応力方向の分散制約

- 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

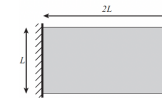
▶ 構造部材が多く、部材の細長比が小さくなると期待

- 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



Kamada (2020)

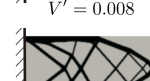
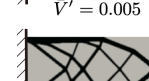
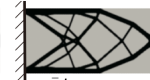
主応力分散制約によるロバスト設計法の提案



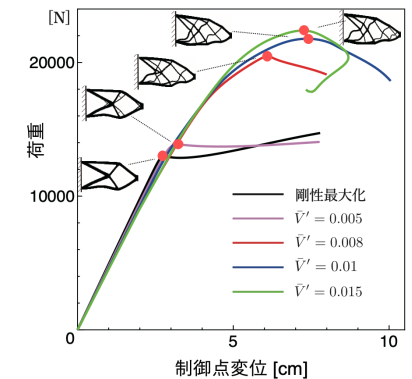
- 通常の剛性最大化



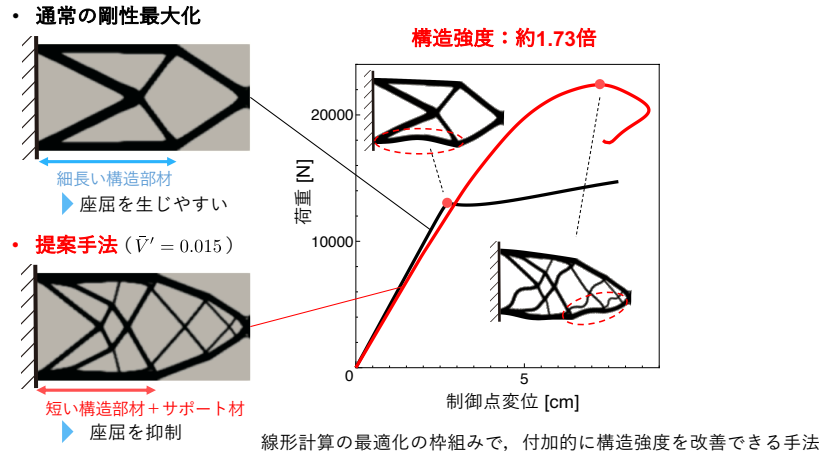
- 提案手法



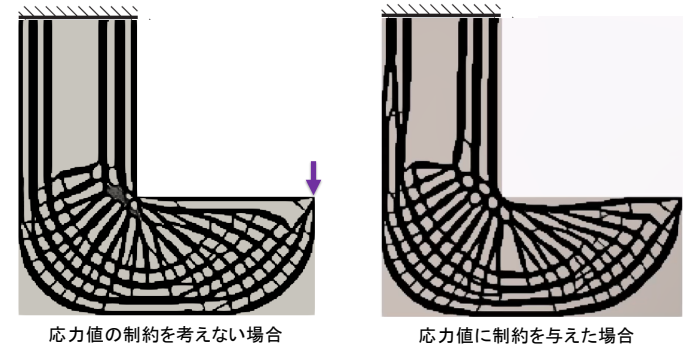
- 荷重-変位曲線



主応力分散制約によるロバスト設計法の提案



局所体積制約を課したInfill 構造の最適化+応力制約

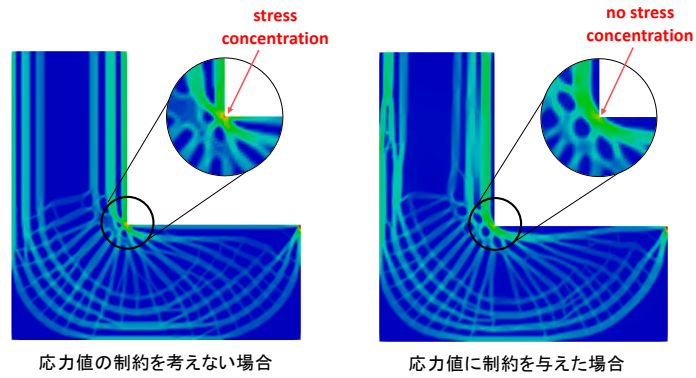


空隙の多い特殊な構造

応力を緩和する丸い隅角部が現れる

Kamada (2020)

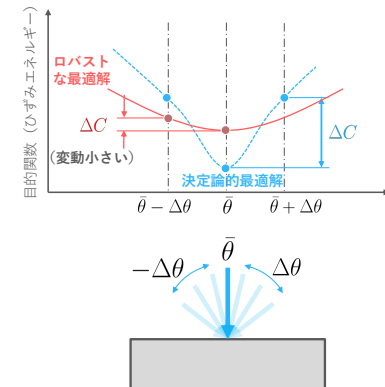
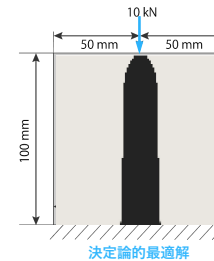
局所体積制約を課したInfill 構造の最適化+応力制約



不確かさを考慮したトポロジー最適化：微小変形

外荷重のバラツキを考慮した剛性最大化 (角度のバラツキを例に)

他の不確かさ：
荷重の大きさ、位置、
材料物性値、境界条件、
形状など



Nishino (2019)

不確かさを考慮したトポロジー最適化：微小変形

目的関数と制約条件

平均コンプライアンスの期待値と標準偏差を最小化

$$\min \hat{C} = E[C] + \alpha \sqrt{V[C]}$$

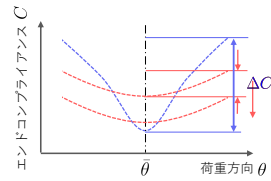
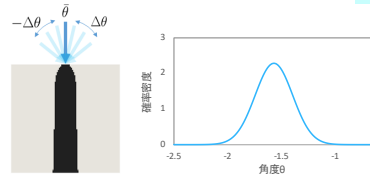
期待値 標準偏差

s.t. $Kd(\theta) = F(\theta)$

$$C = F^T(\theta)d(\theta)$$

$$\sum_{s=1}^{N_e} \rho_s v_s \leq V_{\max}$$

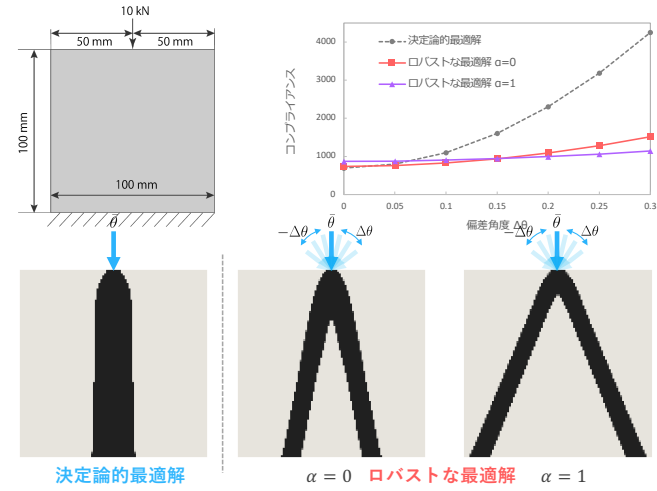
不確かな荷重条件



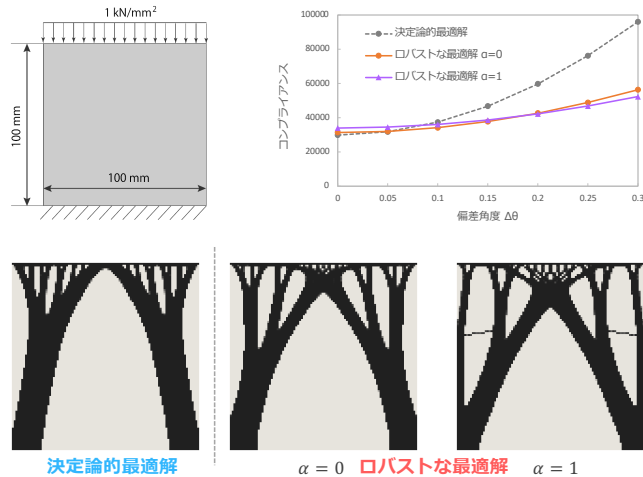
$\sqrt{V[C]} \rightarrow \min$: C の変動を抑制

$E[C] \rightarrow \min$: 平均的に C を最小化

不確かさを考慮したトポロジー最適化：微小変形

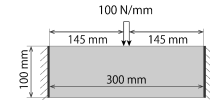


不確かさを考慮したトポロジー最適化：微小変形



不確かさを考慮したトポロジー最適化：有限変形

荷重方向は標準偏差 $\sigma_\theta = 5^\circ$ の正規分布に従う確率変数と仮定



- 材料モデル: Neo-Hookean
- 体積制約 20%

目的関数: $\min C = f_{\text{ext}}^T d$
決定論的最適解

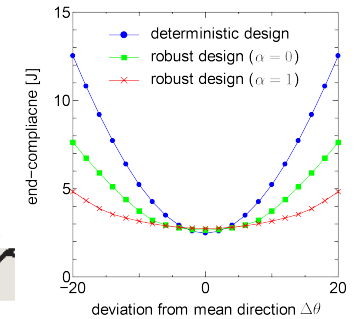


目的関数: $\min C_R(s) = E[\hat{C}] + \alpha \sqrt{V[\hat{C}]}$

ロバスト最適解1 ロバスト最適解2



期待値のみ最小化 期待値と標準偏差を最小化



マルチマテリアルによる振動抑制トポロジー最適化

●最適化問題

$$\min \phi = \int_0^T u_{target}^2(t) dt$$

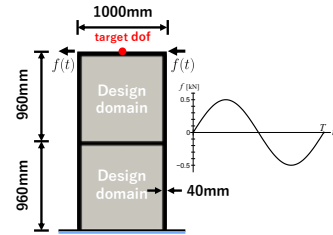
$$\text{s.t. } h_1 = \frac{1}{V} \sum_e s_1 (1 - s_2) v_1 - V_1 = 0 \quad \text{材料1体積制約}$$

$$h_2 = \frac{1}{V} \sum_e s_1 s_2 v_1 - V_2 = 0 \quad \text{材料2体積制約}$$

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = f(t)$$

$$u(0) = \dot{u}(0) = 0, \quad t \in [0, T]$$

●境界条件



●想定する材料ケース

- Case1. ヤング率のみが異なる2材料
- Case2. 密度のみが異なる2材料
- Case3. 粘性のみが異なる2材料

- 設計領域：フレーム構造内部
- 目的関数対象点：上部中央点の水平変位
- 荷重条件：上部にsin波荷重が作用
40Hzと100Hzの2つの周波数を想定

Endo (2019)

最適化計算例3：粘性が異なる2材料

使用材料	ヤング率	密度	粘性項
仮想粘性材料(黄)	44 GPa	2.7 g/cm ³	$C_e = \alpha K_e + \beta M_e$ $\alpha = 10^{-4}, \beta = 1$
仮想材料(黒)	44 GPa	2.7 g/cm ³	$C_e = 0$

ポアソン比：0.34

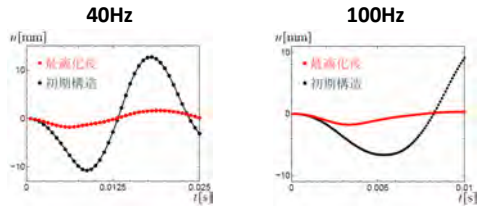
体積比率
 仮想粘性材料：10%
 仮想材料：30%

●最適化結果



最適化計算例3：粘性が異なる2材料

●着目変位時刻歴応答

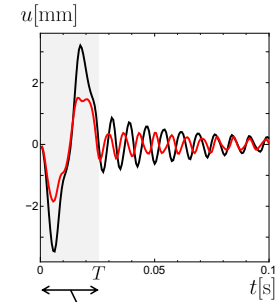


●最適化結果

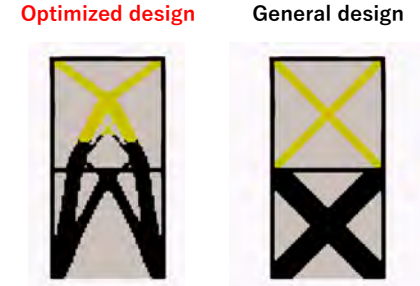


一般的な構造との時刻歴応答の比較

●着目変位の時刻歴応答



荷重作用時間 (40Hz)
 =最適化計算で考慮する時間



仮想粘性材料：10%
 仮想材料：30%

最適化結果は荷重作用時間内での変位を大幅に抑制している

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 「CO₂排出量の削減」と「インフラの老朽化対策」には、FRC構造は有効。
- ⑤ CAEを活用した「次世代型の3次元設計・施工システム」

研究会として（将来的に）

- ① 具体的に何を造るか（未来の構造は何か？）、他にどこに適用できるか？
- ② ロボット・専用機・建設機械の開発
- ③ 材料開発（繊維材、樹脂、セメント、混和剤ほか）
- ④ 一般の技術者が使用可能なFEM & 最適設計用ソフトウェアの開発
- ⑤ 3次元設計を前提とした設計基準の作成は将来的に必要
- ⑥ 構造性能の実験検証

- ・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

研究会として（将来的に）

