



最適化とは何か？

東京理科大学 山川誠



背景

■ 数理ツール(AI・最適化)の発展

- 計算機能力・計算技術の向上
- 人工知能や機械学習の技術発展
- 積層造形のようなデジタル製造技術の普及

➡ 設計・開発プロセスへの数理ツール導入が進む

■ 機械, 航空機, 自動車などの分野

- 数理ツールが製品のコスト低減や機能性向上へ活用。
- CAE ソフトウェアには数理ツールとの連携機能が組み込まれる。

➡ プリポスト機能の充実度といった使い勝手が重視される段階

最適化とは？

■ 最適化 (Optimization)

- 制約条件の下で目的関数を最小化(最大化)するプロセスのこと
- 一般に次の形で表される.

minimize $f(x)$

subject to $x \in S$

x : 設計変数, f : 目的関数, S : 実行可能集合(許容領域)

■ 数理計画 (Mathematical programming)

- 変数、条件が有限個の最適化の総称
- 1940年代: 線形計画法が登場する。
- 第二次大戦期: 軍事的関心から組織的に研究される。
- 第二次大戦後: 様々な分野に応用が広まる。

構造最適化

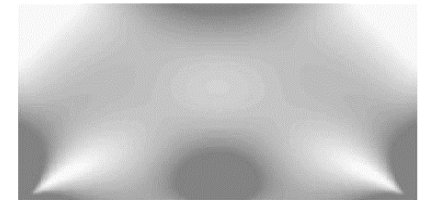
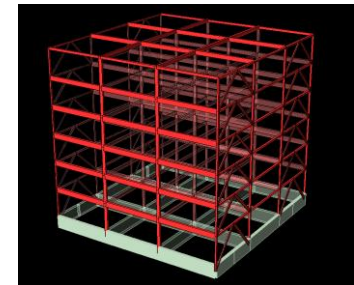
- 最適化の手法を構造設計へ適用したもの
- 構造物の応答に関する条件のもとで何らかの指標を最小化(最大化)

構造最適化

最適設計（断面性能最適化）：骨組構造の断面性能の最適化

位相最適化：骨組構造の部材配置、あるいは平板やシェルなどの連続体での開口部の最適化

形状最適化：骨組構造の節点位置（平板の境界形状やシェルの曲面形状も含む）の最適化



構造最適化の歴史

■ 現代的な数理工学に基づく構造最適化の起源

- 数理工学での「最適化」は1940年代に開発された線形計画法が起源
- 1950年代の骨組構造物の解析的研究
- 線形計画問題として定式化できる塑性設計問題

■ 1960年代

- 骨組やトラスの部材断面を弾性剛性を考慮した最適化
- 変断面部材形状の最適性などについて変分原理に基づく研究
- シェル構造物の最適化(球形シェル、円筒シェル)

■ 1970年代～現在

- 位相最適化
- AI利用
- 付加製造技術(3Dプリンタ)への応用
- 座屈や不安定現象を考慮した非線形性の強い問題

} 近年特に増加傾向

構造最適化の例

■ 問題例その1

- 与えられた構造性能を確保しながら
- 必要コストを最小化する

Minimize コスト
subject to 構造性能 $\geq$ 下限値

■ 問題例その2

- 与えられたコストの範囲内で
- 構造性能を最大化する

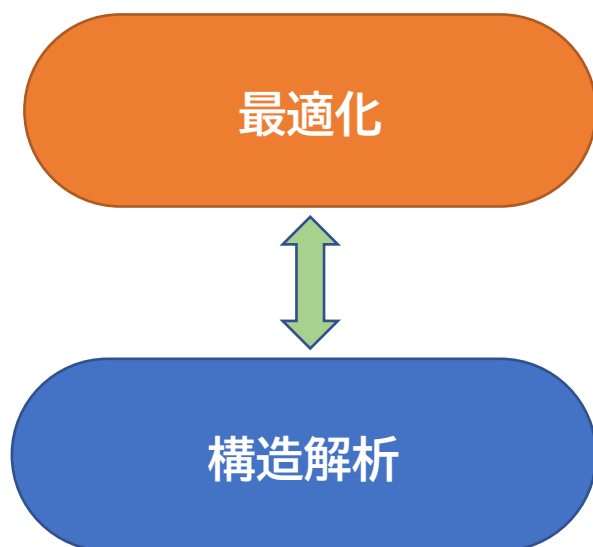
Maximize 構造性能
subject to コスト $\leq$ 上限値

数学的にはコストを下げる問題と性能を上げる問題どちらも扱える

➡ 構造性能と経済性のバランスを扱う中間的な問題も扱える

構造最適化の方法

- 構造解析と最適化がセット
- 多くの繰り返し計算が必要



✚ 発見的手法

- 近似解を効率的に得られる
- メタヒューリスティクス: 発見的手法の組み合わせ

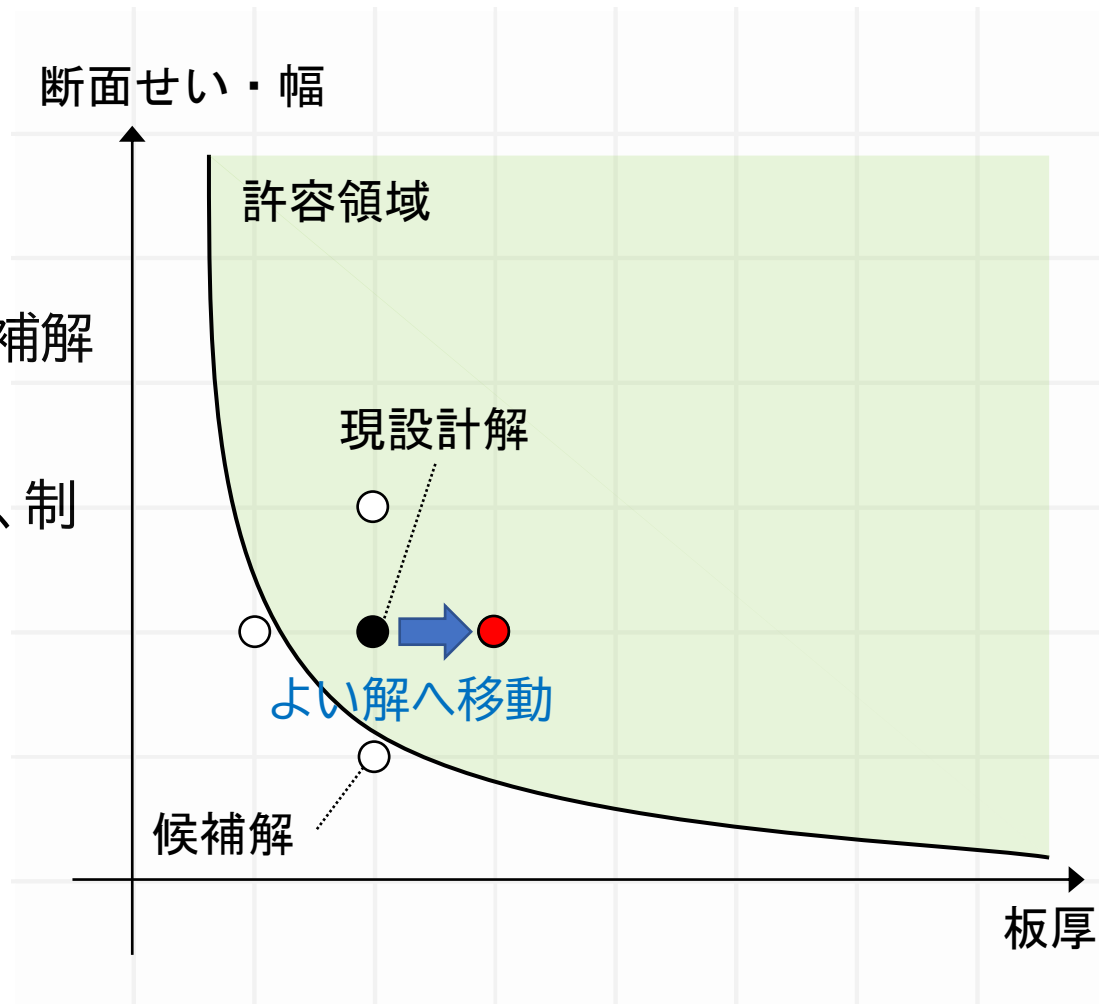
✚ 発見的手法の分類

- 集団を進化させる方法
 - ✓ 多くの解を保持した多点探索に基づく
 - ✓ Genetic algorithm (GA)
- 1つの解を進化させる方法 ➡ **今回採用**
 - ✓ 局所探索 (Local search)
 - ✓ Simulated annealing (SA)

局所探索法

■ 基本的な考え方

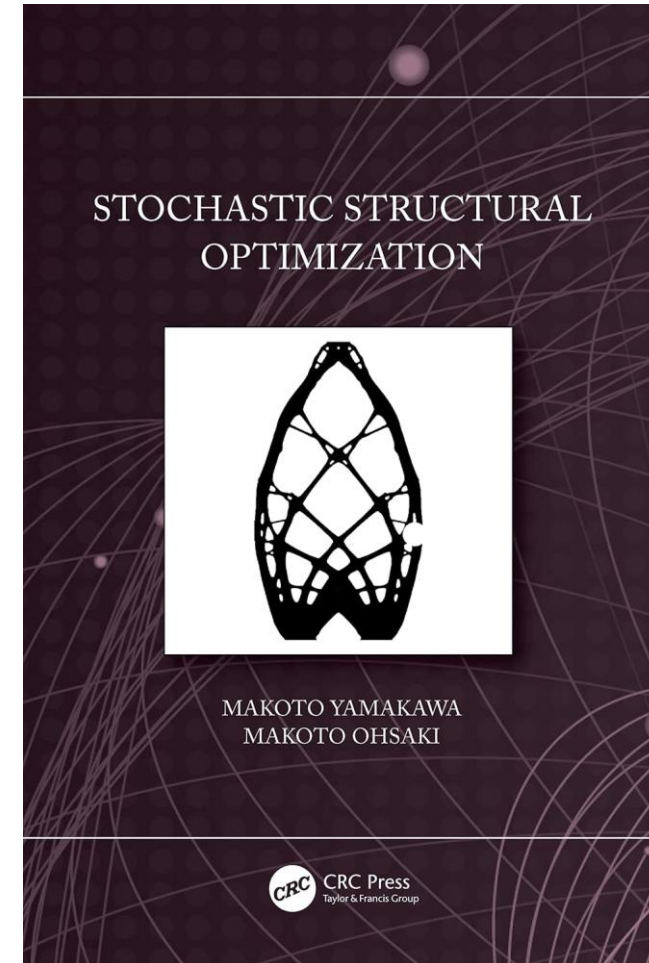
- 初期の設計解を用意する
- 現設計解の一部を変更して近傍の候補解集合をつくる
- 候補解集合について構造解析を行い、制約条件と目的関数を評価する
- よりよい設計解があれば移動する
- 改善しなくなるまで繰り返す



局所探索法

■ 基本的な考え方

- 初期の設計解を用意する
- 現設計解の一部を変更して近傍の候補解集合をつくる
- 候補解集合について構造解析を行い、制約条件と目的関数を評価する
- よりよい設計解があれば移動する
- 改善しなくなるまで繰り返す

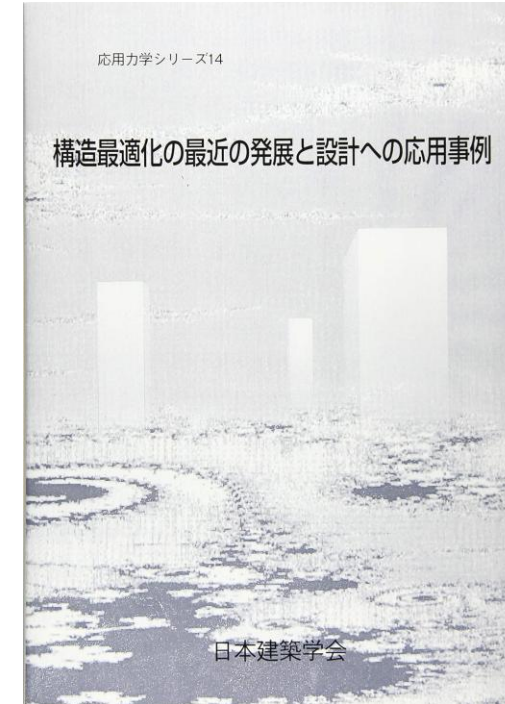


構造最適化の状況

■ 建築分野

- 大量生産されないものが多く、特定の構造物の設計のための最適化は、一般に効果が大きいとはいえない
- 超高層骨組や大スパン構造などの特殊な建物は建設コストが大きく、高度な設計が求められ最適化の効果がある

➡ 構造最適化の応用事例が増加傾向



日本建築学会 応用力学シリーズ14
構造最適化の最近の発展と設計への応用事例
(2020)

構造最適化の状況

■ メリット

- 一般的な建物でも、ソフトウェアが整備されれば設計プロセスでの省力化が見込まれる。
➡ **建物単体のコスト削減に限定されない**
- コストと性能のバランスを定量的に評価可能
➡ **客観的評価を示せる**

体育館施設の公募型プロポーザルへの 構造最適化の適用例

福岡県大牟田市に位置する総合体育館等の建設工事に係る実施設計及び新築工事において、公募型プロポーザルの最優秀賞提案者として、当社を含む企業体を選定されました。

当社を含むチームでの技術提案は、「LCアリーナ工法」の応用版として構造最適化法にてフレーム全体を偏心率、剛性率を最小化する為、適所にエキスパンションジョイントを配置して構造最適化を計りました。

【大牟田市HPリンク】↓

[「大牟田市（仮称）総合体育館等整備に係る設計・施工事業者審査委員会を開催しました」](#)



JSC株式会社HP (<http://www.japansc.com/>) より

➡ **公的施設のプロポーザルへの
有効性が報告される。**

構造最適化の状況:雑誌特集

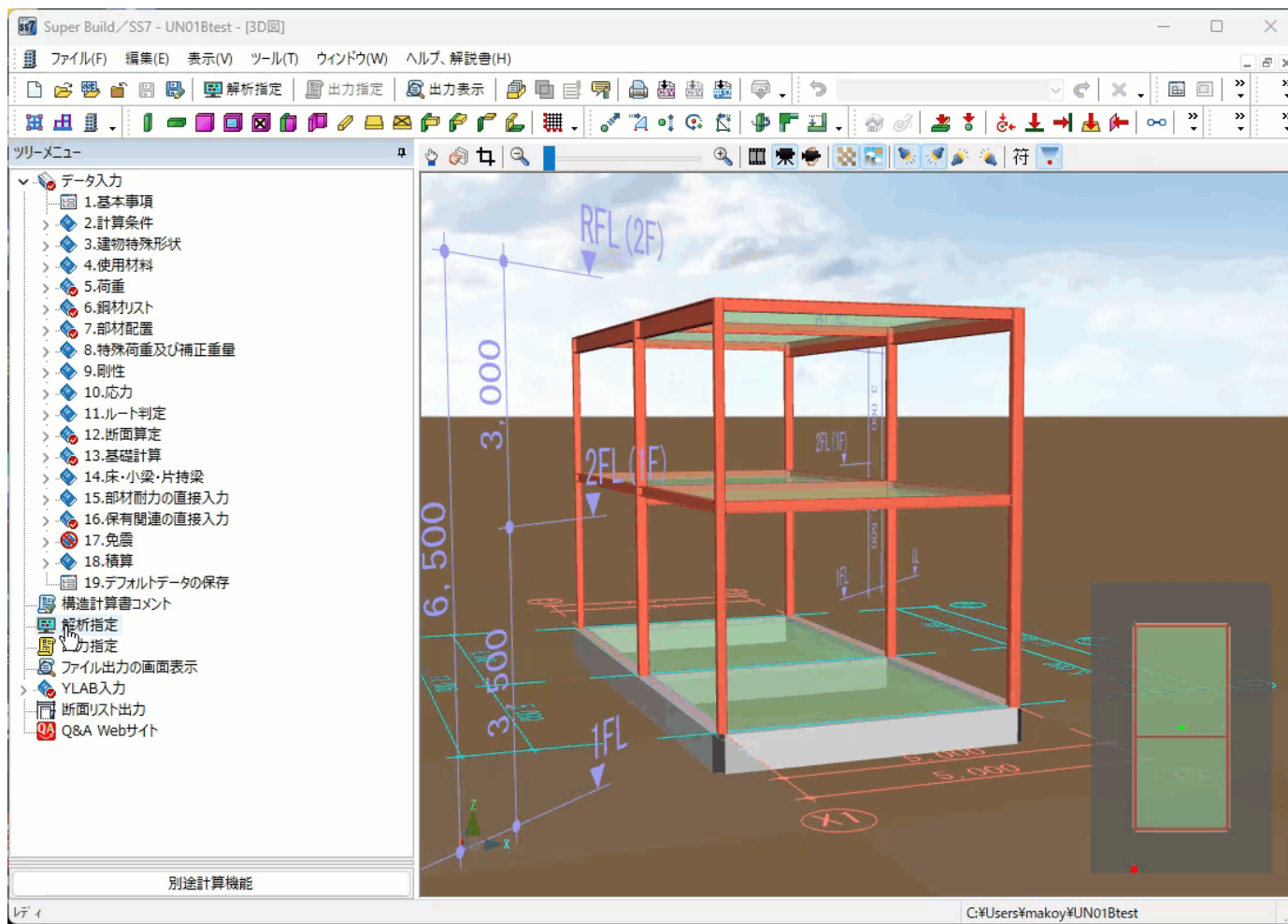
- 建築技術2024年4月号『実務に役立つ構造最適化入門』
- 実務側でも最適化に興味を持つ人が増えている

目次

I. 構造最適化と構造設計 浜田英明.....	52	V. 設計から施工に至るプロセスの全体最適を目指して 田村尚土.....	108
II. 初心者が知りたい構造最適化 大崎 純.....	56	VI. 構造最適化のツール	
III. 構造最適化の基本		イメージベース構造解析ソフトウェア VOXELCON 石井恵三.....	110
最適設計問題 山川 誠.....	60	構造最適化におけるGrasshopperの活用 夏目大彰.....	112
形状/断面/位相最適化 木村俊明.....	62	modeFRONTIERが活用されている理由 田中 実.....	114
数値計画法の建築工学への応用 藤田慎之輔.....	66	一貫構造計算プログラムを利用した最適設計 岡崎英二 + 國光修五 + 松下敏志.....	116
発見的手法による不静定な平行弦トラスの最適化 横須賀洋平.....	68	Excel VBAの活用 松本慎也.....	118
骨組の最適化 松本慎也.....	70	Python (パイソン) 最適化ライブラリーの活用 藤田慎之輔.....	120
形状決定 三木優彰.....	72	VII. 構造最適化との付き合い方 金箱温春.....	122
多目的最適化 木村俊明.....	74	【architectural design】	
建築構造におけるロバスト最適設計問題とその解法 藤田皓平.....	76	海田町庁舎 現代計画・野沢建築工房設計共同体.....	12
機械学習と最適化 林 和希 + 大崎 純.....	78	災害に備えつつまちにうるおいを加える開かれた庁舎 今井信博 + 岡本祐紀.....	16
構造設計者を強力にサポートする、構造設計プロセスに応じた		多段階の水害リスクに備える防災計画 今井信博 + 井上拓哉.....	24
三つの構造AI 九嶋壮一郎 + 前田周作 + 川上沢馬 + 松原由典 + 木下拓也.....	80	居心地がよい開かれた建築をつくるための環境デザイン 石黒健太 + 岩崎 遊.....	28
IV. 構造最適化を用いた設計紹介		庁舎建築に求められる高い耐震性能の実現 山辺豊彦 + 大島嘉彦.....	30
構造最適化法を用いた単層格子屋根 森田 明 + 柳沼大樹.....	82	施工計画 中島朋史.....	34
Active bendingが作用する梁・トラス・膜・ケーブル要素による			
複合張力構造 横須賀洋平.....	86		
遺伝的アルゴリズムを活用した自由曲面架構の設計 和田大典.....	88		
応力関数による引張圧縮混合型シェルの形状決定 三木優彰.....	92		
最適化形状とデジタルファブリケーション 後藤一真.....	96		
超高層建築物への構造最適化適用 武居秀樹.....	100		
3Dプリンターと最適化技術を使ったものづくり 木下拓也.....	104		



構造最適化の状況：一貫計算プログラムと最適設計



- ユニオンシステムと共同開発

➡ 開発・サポート体制の充実

- SS7の入力モデルをそのまま最適化

➡ 業務導入へのハードルが低い

- 構造設計の知識があれば最適化の専門家でもなくても使える

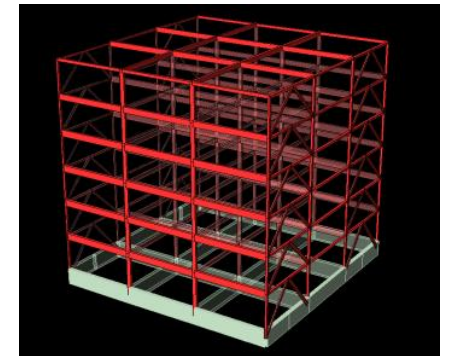
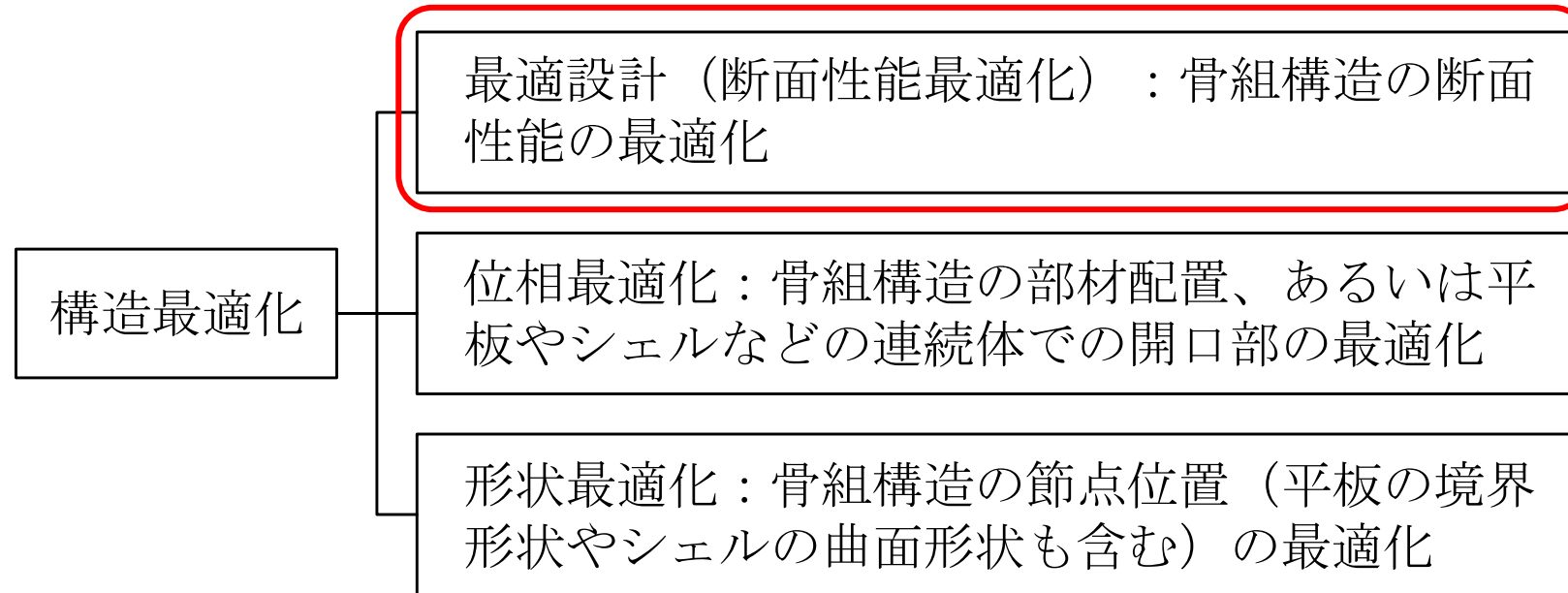
➡ 最適化を使うための工夫が少ない

➡ 逆に構造の知識がより求められる

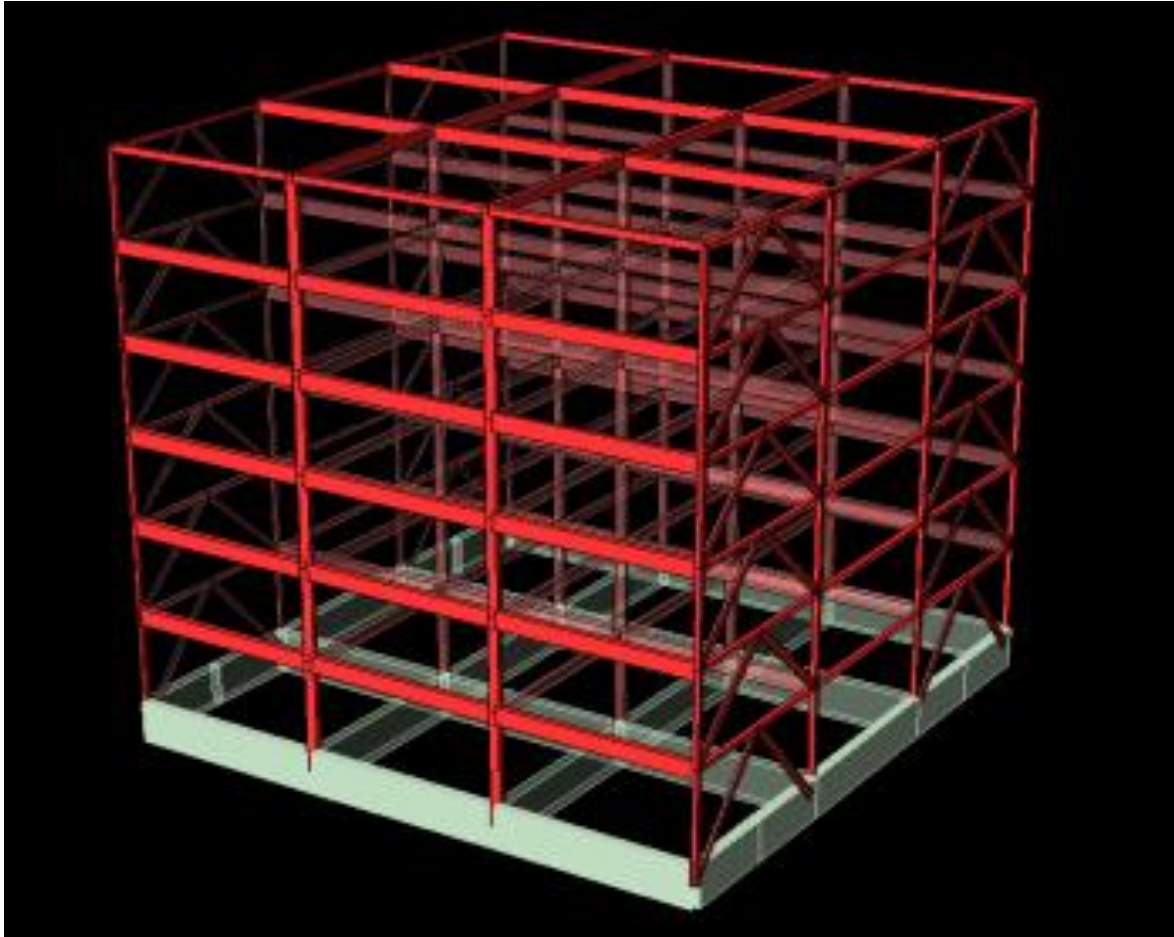


構造最適化と最適設計

構造最適化の分類



建物の最適設計



■ 最適設計の例

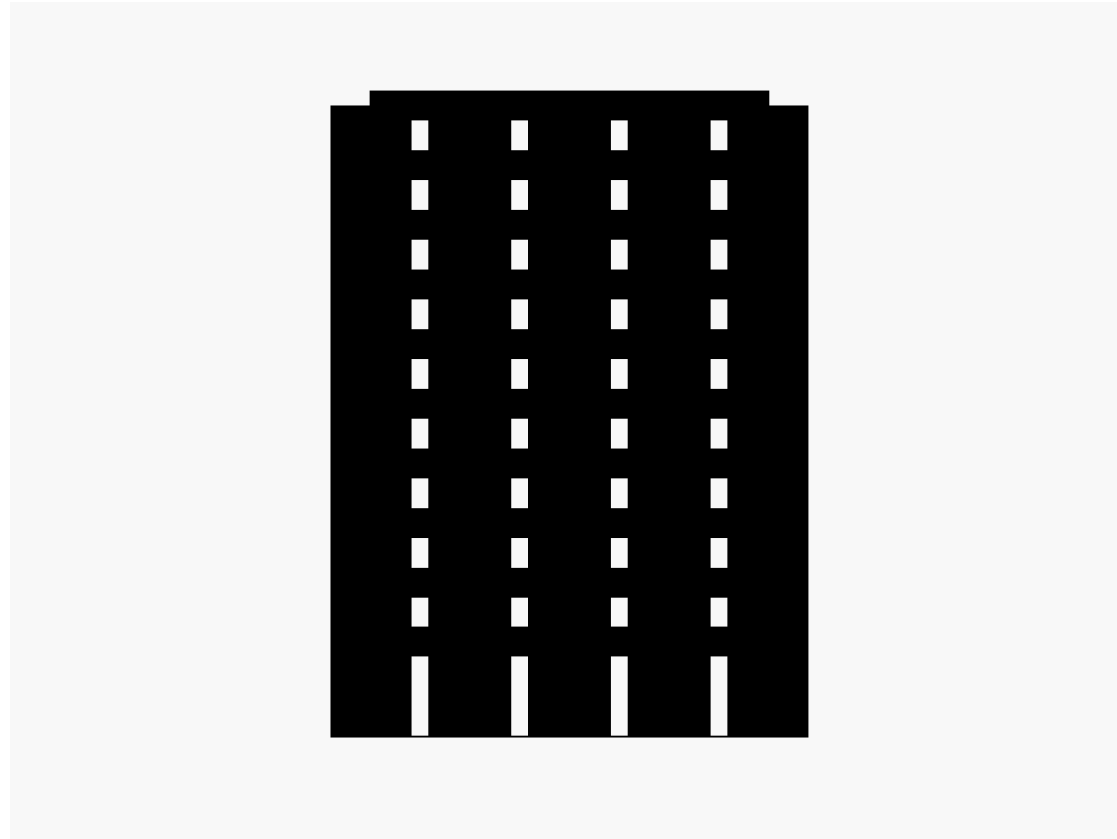
- 設計条件
 - ✓ 地震に対する安全生
 - ✓ 現実的な施工性
 - ✓ 法律で定められた条件
- 最もコストの小さい設計

■ 現状と課題

- 現実的な規模の建物では膨大な計算量
- 近年の計算機の発展により可能になっている。

最適設計の例

- 設計条件を満たしながら不要な部分を削っていく



鋼構造骨組の最適設計問題

■ 最適設計問題の構成要素

- 目的関数
- 制約条件
- 設計変数(値を求めるもの)
- パラメータ(変数とせず与えるもの)

分類	例
目的関数	・ 鋼材量 ・ 材料コスト・建設コスト ・ 構造性能(変形, 耐力) ・ 梁せい ・ Co2排出量
制約条件	・ 構造規定 ・ 施工性 ・ 使用性・計画上の要請
設計変数	・ 断面・ブレース寸法 ・ ダンパー量
パラメータ	・ 構造形式 ・ 基礎 ・ 壁配置箇所 ・ ブレース配置箇所 ・ ダンパー種類・配置箇所

鋼構造骨組の最適設計問題

目的関数

- 柱梁の鋼材量
- コスト係数を乗じた材料コスト
- CO2排出量の考慮も可能
- 係数設定例

分類	製造	形鋼	鋼種	コスト係数 (千円/ton)	GHG単位量 (ton-GHG/ton)
通常鋼材	高炉	JISH	SN490B	160	2.155
		SHH	SN490B	205	2.155
		BCR	BCR295	195	2.155
		BCP	BCP325	245	2.155
	電炉	JISH	SN490B	150	0.904
		BCP	BCP325	235	0.904
グリーン鋼材	高炉	JISH	SN490B	195	0
		SHH	SN490B	245	0
		BCR	BCR295	235	0
		BCP	BCP325	285	0
	電炉	JISH	SN490B	156	0

分類

例

目的関数

- 鋼材量
- 材料コスト・建設コスト
- 構造性能(変形, 耐力)
- 梁せい
- Co2排出量

制約条件

- 構造規定
- 施工性
- 使用性・計画上の要請

設計変数

- 断面・ブレース寸法
- ダンパー量

パラメータ

- 構造形式
- 基礎
- 壁配置箇所
- ブレース配置箇所
- ダンパー種類・配置箇所

鋼構造骨組の最適設計問題

■ 制約条件

- 構造性能・施工性に関する条件を考慮
- 設定例

許容応力度比	0.95以下
層間変形角	1/210以下
梁たわみ	1/300以下
幅厚比	梁:FAランク, 柱FBランク以上
細長比(保有耐力横補剛)	梁:130+20n以下, 柱:200以下
保有耐力接合(仕口部)	文献 [10]
梁段差 (保有水平耐力)	150mm以上 (必要保有水平耐力以上)

分類

例

目的関数

- 鋼材量
- 材料コスト・建設コスト
- 構造性能(変形, 耐力)
- 梁せい
- Co2排出量

制約条件

- 構造規定
- 施工性
- 使用性・計画上の要請

設計変数

- 断面・ブレース寸法
- ダンパー量

パラメータ

- 構造形式
- 基礎
- 壁配置箇所
- ブレース配置箇所
- ダンパー種類・配置箇所

鋼構造骨組の最適設計問題

設計変数

- 断面寸法・断面性能
 - ✓ H形鋼や角形鋼管などの規格品

$B, t_f \backslash H, t_w$		200						250						300						350					
		12	16	19	22	25	28	16	19	22	25	28	32	19	22	25	28	32	36	22	25	28	32	36	
650	12																								
	16																								
700	9																								
	12																								
	14																								
	16																								
750	12																								
	14																								
	16																								
	16																								

外法一定H形鋼の例

- 変数グルーピング
 - ✓ 複数断面への同一変数の割り当て
 - ✓ 同一階の梁せいや同じ通りの柱のせいを揃えるなど
 - ✓ 得られる設計解に大きな影響
 - ✓ 試行錯誤が必要

分類

例

目的関数

- 鋼材量
- コスト
- 構造性能(変形, 耐力)
- 梁せい
- Co2排出量

制約条件

- 構造規定
- 施工性
- 使用性・計画上の要請

設計変数

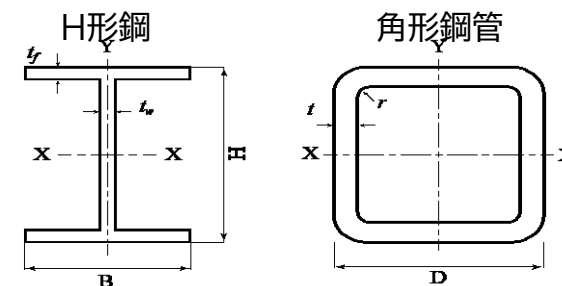
- 断面・ブレース寸法
- ダンパー量

パラメータ

- 構造形式
- 基礎
- 壁配置箇所
- ブレース配置箇所
- ダンパー種類・配置箇所

鋼構造骨組の最適設計問題

find $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_m\}$ (設計変数：断面寸法)
 minimize $V(\mathbf{x})$ (目的関数：鋼材量)
 subject to $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$ (制約条件)



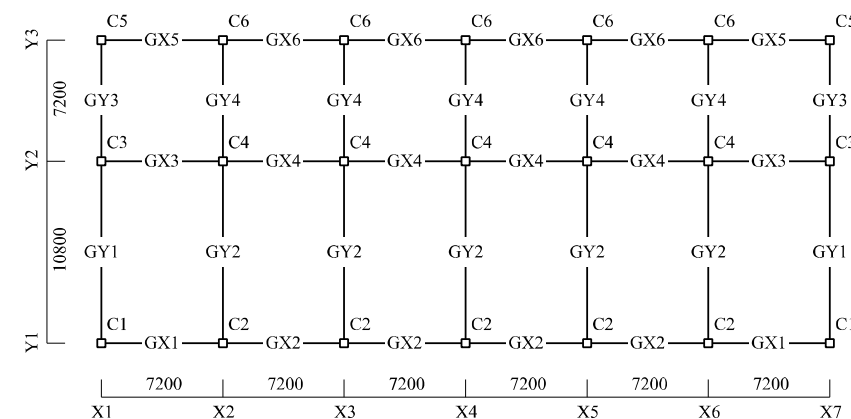
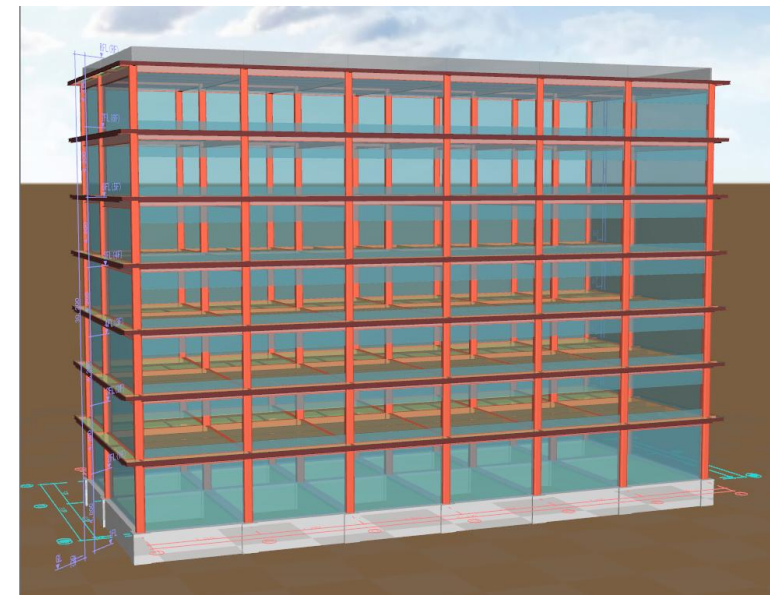
寸法値	柱	D	$350\text{mm} \leq D \leq 1000\text{mm}$
		t	$12\text{mm} \leq t \leq 40\text{mm}$
	梁	H	$400\text{mm} \leq H \leq 1000\text{mm}$
		B	$200\text{mm} \leq B \leq 400\text{mm}$
		t_w	$9\text{mm} \leq t_w \leq 22\text{mm}$
		t_f	$12\text{mm} \leq t_f \leq 40\text{mm}$
幅厚比	柱		$D_k / t_{dk} \leq 33\sqrt{235 / F}$
	梁	ウェブ	$(H_{i(j)} - 2t_{fj}) / t_{wj} \leq 60\sqrt{235 / F}$
		フランジ	$B_{i(j)} / 2t_{fj} \leq 9\sqrt{235 / F}$

許容応力度比	柱	$\left \frac{M_k}{Z_k f_{bk}} \right + \left \frac{N_k}{A_k f_{ck}} \right \leq 1$
	梁	$\left \frac{M_j}{Z_j f_{bj}} \right \leq 1$
層間変形角		$\frac{\delta_i}{h_i} \leq \frac{1}{200}$
梁中央たわみ		$\frac{d_j}{l_j} \leq \frac{1}{300}$
柱梁耐力比		$\frac{\sum M_{pc,r}}{\sum M_{pb,r}} \geq 1.5$

対象モデル:S造7階建モデル

■ 建物概要

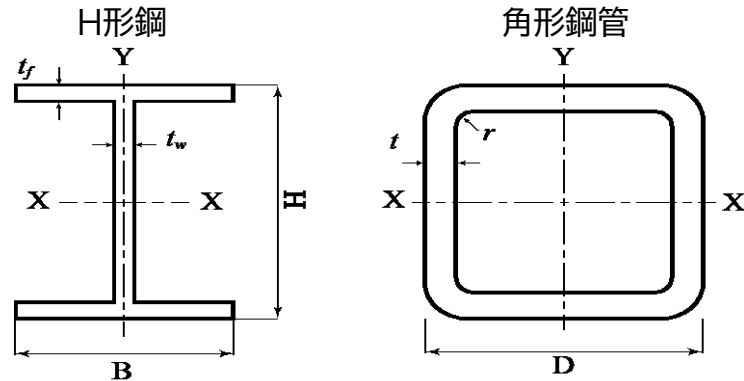
- 用途:事務所
- 構造種別:鉄骨造純ラーメン
- 階数:地上7階
- 建物高さ: 30.2m
- X方向: 43.2m
- Y方向: 18m



三宅朗彦, 河南孝典, 野田亜久里, 中里太亮, 稲山正弘: 木質垂壁ラーメン構法の開発研究 ～その2スギCLTを対象とした接合部実験と有限要素法による解析～, 熊谷組技術研究報告, 第81号, 2021.

設計変数

● 柱梁の断面寸法



	梁	柱
規格	JIS規格H形鋼 外法一定H形鋼	冷間成形 角形鋼管
鋼種	SN490	BCP325 BCR295
変数	H, B, t_w , t_f	D, t

● 外法一定H形鋼(抜粋)

$B, t_f \backslash H, t_w$		200						250						300						350					
		12	16	19	22	25	28	16	19	22	25	28	32	19	22	25	28	32	36	22	25	28	32	36	
650	12			○	○	○	○		○	○	○	○			○	○	○								
	16															○	○	○	○	○					
700	9	○	○	○	○			○	○																
	12				○	○			○	○	○			○	○	○	○				○	○			
	14									○	○	○			○	○	○	○				○	○	○	
	16															○	○	○	○	○			○	○	○
750	12								○	○	○														
	14										○	○			○	○	○					○	○	○	
	16																○	○	○				○	○	○

● 冷間プレス成型角型鋼管(抜粋)

D \ t	16	19	22	25	28	32	36
400	○	○	○	○			
450	○	○	○	○	○	○	
500	○	○	○	○	○	○	○
550	○	○	○	○	○	○	○
600	○	○	○	○	○	○	○
650	○	○	○	○	○	○	○
700	○	○	○	○	○	○	○
750	○	○	○	○	○	○	○
800		○	○	○	○	○	○

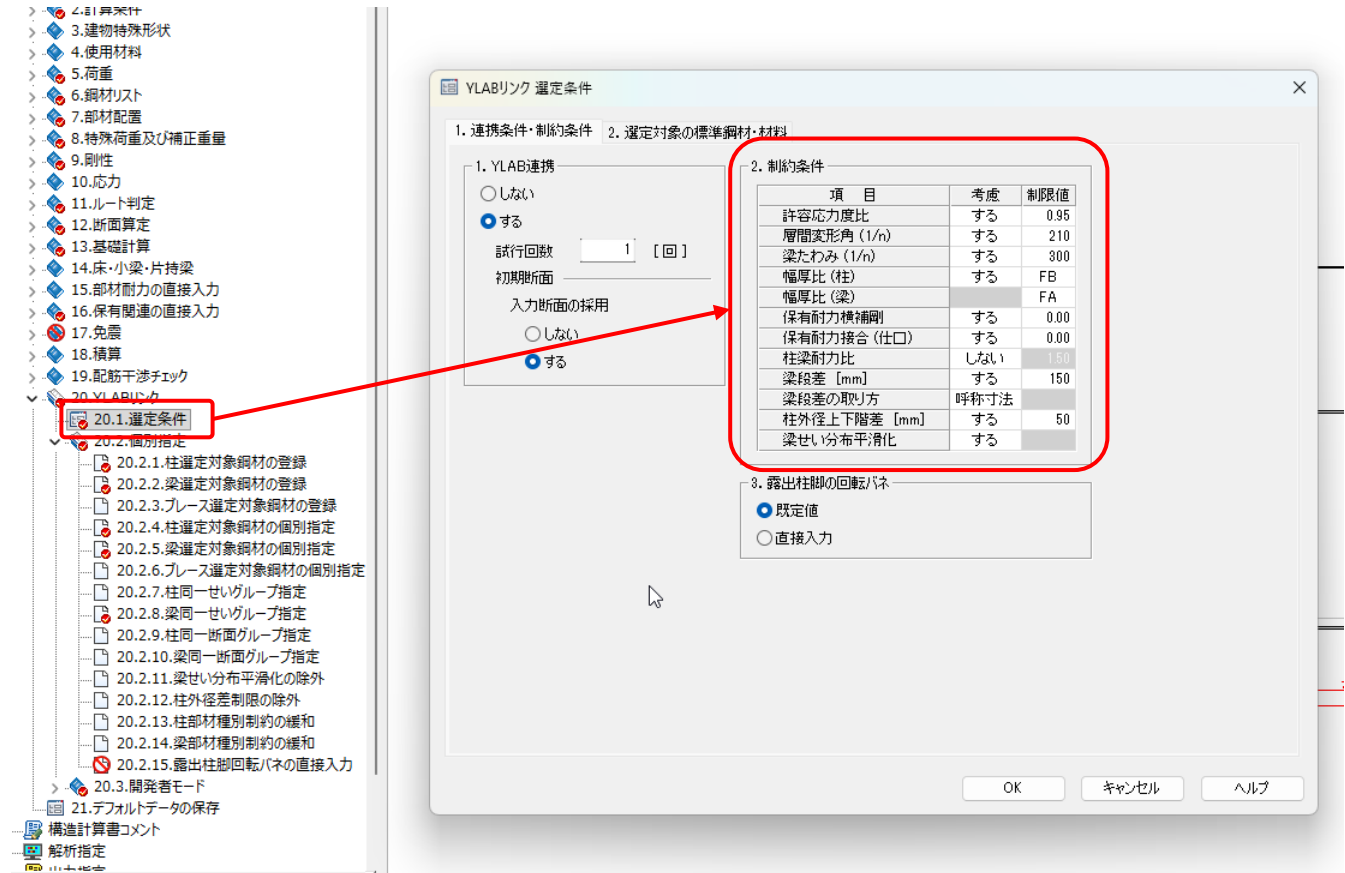
制約条件

■ ルート3の設計条件

- 許容応力度比 ≤ 0.95
- 層間変形角 $\leq 1/210$
- 幅厚比:柱FB－梁FA
- 梁たわみ $\leq 1/300$
- 保有耐力横補剛
- 保有耐力接合(仕口)
- 梁段差:「なし」または「150mm以上」
- (保有水平耐力)

■ その他

- 柱脚:ハイベースNEO
- 基礎梁・ピン支点



目的関数

■ 鋼材量／材料コスト

$$f(x) = \sum_i c_i \rho_i L_i A_i(x)$$

c_i : コスト係数 ρ_i : 単位重量

L_i : 部材長さ A_i : 部材断面積

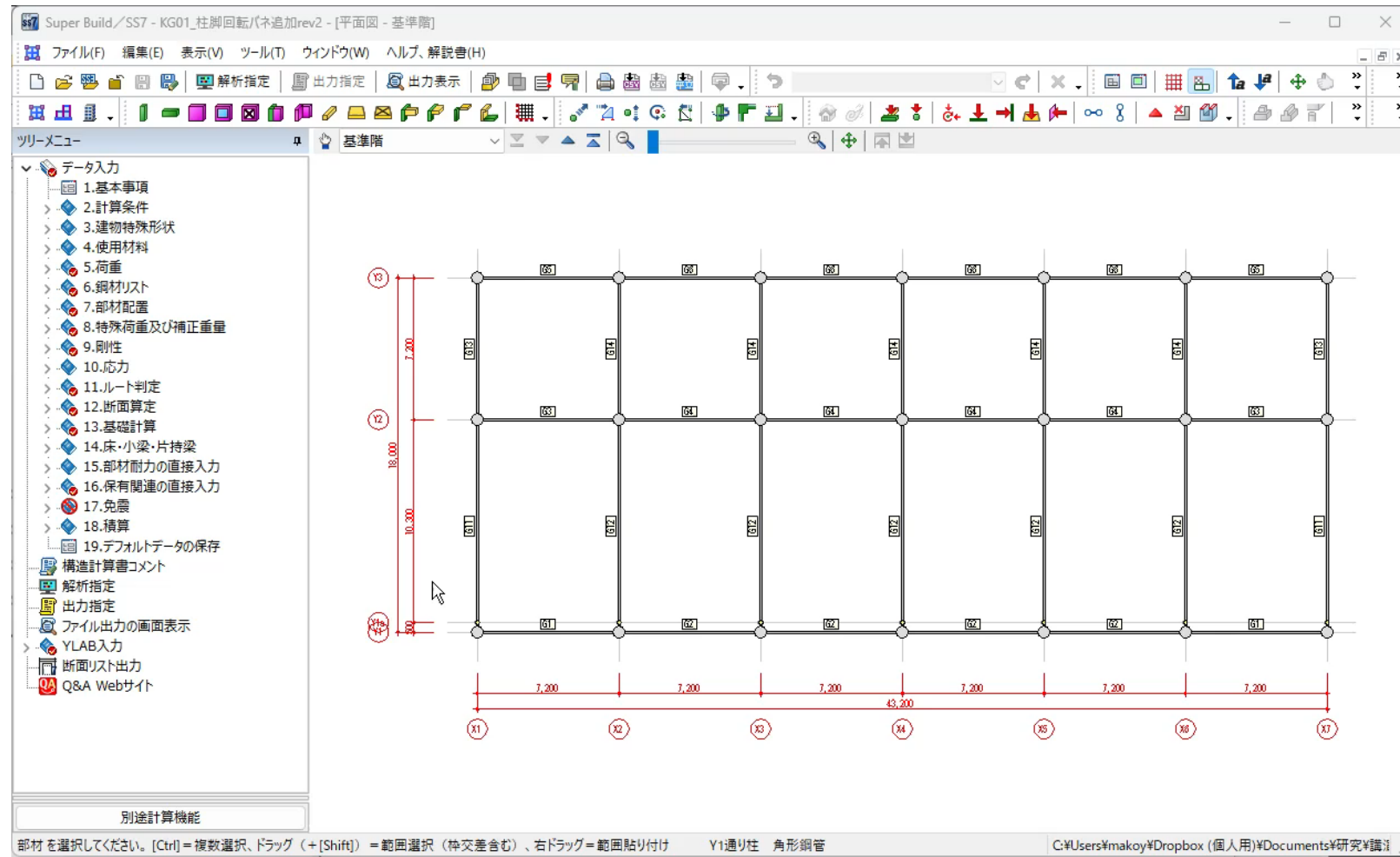
形鋼	鋼種	コスト係数 (千円/ton)	GHG単位量 (ton-GHG/ton)
JISH	SN490B	160	2.155
SHH	SN490B	205	2.155
BCR	BCR295	195	2.155
BCP	BCP325	245	2.155

The screenshot displays a software interface for selecting steel materials. The left pane shows a list of selection criteria, with '20.2.2. 梁選定対象鋼材の登録' (Register selected beam steel material) highlighted. The right pane shows two tables: '柱選定対象鋼材の登録' (Register selected column steel material) and '梁選定対象鋼材の登録' (Register selected beam steel material). The beam table lists materials like SN490B, SN490B, and SN490B with their respective costs and GHG values. Red boxes and arrows highlight the selected items in both tables.

名称	数	タイプ	材料	コスト係数 円/kg	コスト定数 円	最小せい	最大せい	フェーズ番号
柱鋼材1	2	BCR	BCR295	195	0	0	0	1
		BCP	BCP325	245	0	0	0	1

名称	数	タイプ	材料	コスト係数 円/kg	コスト定数 円	最小せい	最大せい	フェーズ番号
梁鋼材1	4	スーパーハイスレンドH	SN490B	205	0	0	0	2
		細幅	SN490B	160	0	0	0	1
		中幅	SN490B	160	0	0	0	1
		広幅	SN490B	160	0	0	0	1

最適化の実行



最適化結果

	(参考)設計例		鋼材重量最小		鋼材コスト最小	
	重量 (ton)	コスト (千円)	重量 (ton)	コスト (千円)	重量 (ton)	コスト (千円)
合計	562	118,355	472	97,714	490	86,484
部材別						
S梁	311	60,602	279	56,444	288	47,086
S柱	251	57,754	194	41,270	202	39,398
断面種別						
JISH	68	10,848	15	2,387	264	42,174
SHH	243	49,754	264	54,056	24	4,912
BCR295	76	14,879	123	24,079	202	39,398
BCP325	175	42,875	70	17,192	0	0

※「設計例」:構造設計者による断面設計

鋼材重量最小:断面

階	C1	C2	C3	C4	C5	C6
RF	□-450x450x14x35	□-500x500x16x40	□-450x450x14x35	□-450x450x14x35	□-450x450x14x35	□-450x450x14x35
6F	□-500x500x16x40	□-550x550x19x47.5	□-500x500x16x40	□-500x500x19x47.5	□-500x500x16x40	□-500x500x16x40
5F	□-550x550x19x47.5	□-550x550x19x47.5	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-500x500x19x47.5	□-550x550x19x47.5
4F	□-550x550x19x47.5	□-550x550x19x47.5	□-600x600x22x77	□-600x600x22x77	□-500x500x16x40	□-550x550x19x47.5
3F	□-550x550x19x47.5	□-550x550x19x47.5	□-600x600x22x77	□-600x600x22x77	□-500x500x16x40	□-550x550x19x47.5
2F	□-600x600x22x77	□-600x600x22x77	□-600x600x22x77	□-600x600x22x77	□-500x500x19x47.5	□-550x550x22x55
1F	□-600x600x22x77	□-600x600x22x77	□-600x600x22x77	□-600x600x22x77	□-500x500x19x47.5	□-550x550x19x47.5
層	G1	G2	G3	G4	G5	G6
RFL	H-450x200x9x14x13	H-450x200x9x14x13	SH-450x200x9x16x13	H-450x200x9x14x13	H-450x200x9x14x13	H-450x200x9x14x13
7FL	SH-600x300x12x19x13	SH-600x250x12x19x13	SH-450x200x9x19x13	SH-600x200x12x22x13	SH-600x250x12x22x13	SH-600x250x12x22x13
6FL	SH-600x300x14x19x13	SH-600x300x12x19x13	SH-600x300x12x16x13	SH-600x250x12x19x13	SH-600x300x12x16x13	SH-600x300x12x16x13
5FL	SH-600x300x14x32x13	SH-600x300x12x28x13	SH-600x300x12x19x13	SH-600x300x14x19x13	SH-600x300x12x19x13	SH-600x300x12x16x13
4FL	SH-800x400x14x28x18	SH-650x300x12x25x13	SH-650x300x12x25x13	SH-650x300x12x22x13	SH-650x300x12x19x13	SH-650x300x12x19x13
3FL	SH-800x400x14x28x18	SH-650x300x12x25x13	SH-650x300x14x28x13	SH-650x300x14x19x13	SH-650x300x12x19x13	SH-650x300x12x19x13
2FL	SH-800x350x14x25x18	SH-650x200x12x25x13	SH-650x300x12x22x13	SH-650x300x12x19x13	SH-650x300x12x22x13	SH-650x300x12x19x13
層	G11	G12	G13	G14		
RFL	SH-600x300x12x19x13	SH-600x250x14x28x13	SH-600x300x12x19x13	SH-600x300x12x19x13		
7FL	SH-600x300x12x19x13	SH-750x300x14x28x18	SH-600x300x12x19x13	SH-600x300x12x19x13		
6FL	SH-800x350x14x25x18	SH-800x300x14x28x18	SH-600x300x12x16x13	SH-600x300x12x19x13		
5FL	SH-800x350x14x25x18	SH-800x300x14x28x18	SH-600x300x12x19x13	SH-600x300x12x25x13		
4FL	SH-800x300x14x28x18	SH-800x300x14x28x18	SH-800x350x14x28x18	SH-800x300x14x28x18		
3FL	SH-800x300x14x25x18	SH-800x300x14x25x18	SH-800x300x14x28x18	H-800x300x14x26x18		
2FL	SH-800x300x14x25x18	SH-800x300x14x25x18	SH-800x300x14x28x18	SH-800x300x14x28x18		

鋼材コスト最小:断面

階	C1	C2	C3	C4	C5	C6
RF	□-500x500x16x40	□-500x500x16x40	□-500x500x16x40	□-450x450x14x35	□-450x450x14x35	□-500x500x16x40
6F	□-500x500x19x47.5	□-500x500x22x55	□-550x550x22x55	□-500x500x16x40	□-500x500x22x55	□-500x500x16x40
5F	□-500x500x22x55	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-500x500x22x55	□-500x500x16x40
4F	□-500x500x22x55	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-500x500x22x55	□-550x550x22x55
3F	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55
2F	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-550x550x25x62.5	□-550x550x25x62.5	□-550x550x22x55	□-550x550x25x62.5
1F	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55	□-550x550x22x55
層	G1	G2	G3	G4	G5	G6
RFL	H-300x300x10x15x13	H-300x300x10x15x13	H-300x300x10x15x13	H-300x300x10x15x13	H-300x300x10x15x13	H-300x300x10x15x13
7FL	SH-800x350x14x28x18	H-600x200x11x17x13	H-440x300x11x18x13	H-588x300x12x20x13	H-340x250x9x14x13	H-588x300x12x20x13
6FL	H-800x300x14x26x18	H-600x200x11x17x13	H-588x300x12x20x13	H-588x300x12x20x13	SH-450x250x9x16x13	H-588x300x12x20x13
5FL	H-800x300x14x26x18	H-588x300x12x20x13	H-588x300x12x20x13	H-588x300x12x20x13	H-800x300x14x26x18	H-588x300x12x20x13
4FL	H-800x300x14x26x18	H-588x300x12x20x13	H-588x300x12x20x13	H-588x300x12x20x13	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18
3FL	H-800x300x14x26x18	H-588x300x12x20x13	H-588x300x12x20x13	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18
2FL	H-800x300x14x26x18	H-588x300x12x20x13	H-588x300x12x20x13	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18
層	G11	G12	G13	G14		
RFL	H-588x300x12x20x13	SH-600x250x12x28x13	H-588x300x12x20x13	H-588x300x12x20x13		
7FL	H-588x300x12x20x13	H-588x300x12x20x13	H-800x300x14x26x18	H-588x300x12x20x13		
6FL	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18	H-588x300x12x20x13		
5FL	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18		
4FL	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18		
3FL	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18	SH-800x350x16x25x18		
2FL	H-800x300x14x26x18	H-800x300x14x26x18	SH-800x400x16x25x18	H-800x300x14x26x18		

鋼材コスト最化:S梁検定比

■ 検定比

- 全部材で指定の0.95以下を満たす
- 多くの部材で0.8以下

■ 最大値

- 2G14 - 0.93
- RG3 - 0.93
- RG12 - 0.92

➡ 2FLとRFLは応力で決まる傾向

S梁検定比一覧 - 結果3														
層	符号	M					Q				保有耐力接合(仕口)			
		仕口左	左端	中央	右端	仕口右	仕口左	左端	右端	仕口右	左端		右端	
											M	Q	M	Q
5FL	5G1	0.59	0.59	0.03	0.59	0.59	0.22	0.21	0.21	0.22	1.00	0.47	1.00	0.47
5FL	5G2	0.59	0.59	0.04	0.59	0.59	0.22	0.21	0.21	0.22	0.94	0.42	0.94	0.42
5FL	5G3	0.87	0.87	0.07	0.87	0.87	0.31	0.29	0.29	0.31	0.94	0.42	0.94	0.42
5FL	5G4	0.77	0.77	0.06	0.77	0.77	0.29	0.27	0.27	0.29	0.94	0.42	0.94	0.42
5FL	5G5	0.63	0.63	0.05	0.63	0.63	0.23	0.22	0.22	0.23	1.00	0.47	1.00	0.47
5FL	5G6	0.70	0.70	0.07	0.70	0.70	0.25	0.24	0.24	0.25	0.94	0.42	0.94	0.42
5FL	5G11	0.60	0.60	0.12	0.55	0.55	0.18	0.17	0.16	0.17	1.00	0.31	1.00	0.31
5FL	5G12	0.72	0.72	0.20	0.63	0.63	0.22	0.21	0.21	0.22	1.00	0.31	1.00	0.31
5FL	5G13	0.59	0.59	0.06	0.66	0.66	0.23	0.22	0.23	0.24	1.00	0.47	1.00	0.47
5FL	5G14	0.67	0.67	0.11	0.74	0.74	0.27	0.26	0.27	0.28	1.00	0.47	1.00	0.47
4FL	4G1	0.63	0.63	0.03	0.63	0.63	0.23	0.22	0.22	0.23	1.00	0.47	1.00	0.47
4FL	4G2	0.60	0.60	0.04	0.60	0.60	0.22	0.21	0.21	0.22	0.94	0.42	0.94	0.42
4FL	4G3	0.84	0.84	0.07	0.84	0.84	0.30	0.29	0.29	0.30	0.94	0.42	0.94	0.42
4FL	4G4	0.78	0.78	0.06	0.78	0.78	0.29	0.28	0.28	0.29	0.94	0.42	0.94	0.42
4FL	4G5	0.68	0.79	0.07	0.79	0.68	0.23	0.22	0.22	0.23	1.00	0.47	1.00	0.47
4FL	4G6	0.57	0.66	0.04	0.66	0.57	0.21	0.20	0.20	0.21	1.00	0.47	1.00	0.47
4FL	4G11	0.63	0.63	0.12	0.56	0.56	0.18	0.17	0.17	0.18	1.00	0.31	1.00	0.31
4FL	4G12	0.72	0.72	0.20	0.64	0.64	0.22	0.22	0.21	0.22	1.00	0.31	1.00	0.31
4FL	4G13	0.65	0.65	0.07	0.73	0.73	0.25	0.25	0.25	0.26	1.00	0.47	1.00	0.47
4FL	4G14	0.74	0.74	0.11	0.86	0.86	0.31	0.29	0.30	0.31	1.00	0.47	1.00	0.47
3FL	3G1	0.65	0.65	0.04	0.65	0.65	0.23	0.22	0.22	0.23	1.00	0.47	1.00	0.47
3FL	3G2	0.59	0.59	0.04	0.59	0.59	0.22	0.21	0.21	0.22	0.94	0.42	0.94	0.42
3FL	3G3	0.81	0.81	0.09	0.81	0.81	0.28	0.27	0.27	0.28	0.94	0.42	0.94	0.42
3FL	3G4	0.68	0.68	0.05	0.68	0.68	0.25	0.24	0.24	0.25	0.99	0.47	0.99	0.47
3FL	3G5	0.69	0.80	0.07	0.80	0.69	0.24	0.23	0.23	0.24	1.00	0.47	1.00	0.47
3FL	3G6	0.59	0.68	0.04	0.68	0.59	0.22	0.21	0.21	0.22	0.99	0.47	0.99	0.47
3FL	3G11	0.65	0.65	0.12	0.59	0.59	0.18	0.18	0.17	0.18	1.00	0.31	0.99	0.31
3FL	3G12	0.73	0.73	0.19	0.66	0.66	0.22	0.22	0.22	0.22	1.00	0.31	0.99	0.31
3FL	3G13	0.73	0.73	0.07	0.82	0.82	0.28	0.27	0.28	0.29	0.99	0.47	1.00	0.47
3FL	3G14	0.77	0.77	0.10	0.85	0.85	0.30	0.29	0.29	0.30	0.99	0.47	0.99	0.47
2FL	2G1	0.68	0.68	0.04	0.68	0.68	0.24	0.23	0.23	0.24	1.00	0.47	1.00	0.47
2FL	2G2	0.61	0.61	0.05	0.61	0.61	0.22	0.21	0.21	0.22	0.94	0.42	0.94	0.42
2FL	2G3	0.86	0.86	0.10	0.86	0.86	0.29	0.28	0.28	0.29	0.94	0.42	0.94	0.42
2FL	2G4	0.69	0.69	0.05	0.69	0.69	0.25	0.24	0.24	0.25	1.00	0.47	1.00	0.47
2FL	2G5	0.72	0.84	0.08	0.84	0.72	0.24	0.23	0.23	0.24	1.00	0.47	1.00	0.47
2FL	2G6	0.58	0.67	0.04	0.67	0.58	0.22	0.21	0.21	0.22	1.00	0.47	1.00	0.47
2FL	2G11	0.65	0.65	0.12	0.57	0.57	0.18	0.17	0.18	0.18	1.00	0.31	1.00	0.31
2FL	2G12	0.74	0.74	0.20	0.67	0.67	0.23	0.22	0.22	0.23	1.00	0.31	1.00	0.31
2FL	2G13	0.64	0.64	0.07	0.71	0.71	0.28	0.27	0.27	0.28	0.99	0.52	0.99	0.52
2FL	2G14	0.85	0.85	0.11	0.93	0.93	0.34	0.33	0.32	0.33	1.00	0.47	1.00	0.47

鋼材コスト最小:S柱検定比

■ 検定比

- 全部材で指定の0.95以下を満たす
- 多くの部材で0.8以下

■ 最大値

- 1C2 – 0.91
- 1C4 – 0.89

➡ 1FL柱脚が支配的

➡ 柱脚製品は検討が別途必要

S柱検定比一覧 - 結果3

結果3

階	符号	M			Q		組合せ	
		柱頭	中央	柱脚	柱頭	柱脚	柱頭	柱脚
RF	RC1	0.58	0.21	0.43	0.10	0.10	0.58	0.43
RF	RC2	0.76	0.26	0.61	0.13	0.13	0.76	0.61
RF	RC3	0.69	0.18	0.52	0.14	0.14	0.69	0.53
RF	RC4	0.84	0.26	0.70	0.16	0.16	0.84	0.70
RF	RC5	0.53	0.14	0.45	0.10	0.10	0.53	0.45
RF	RC6	0.49	0.11	0.50	0.10	0.10	0.50	0.51
6F	6C1	0.47	0.14	0.46	0.10	0.10	0.47	0.46
6F	6C2	0.51	0.16	0.50	0.11	0.11	0.51	0.50
6F	6C3	0.44	0.14	0.51	0.14	0.14	0.45	0.52
6F	6C4	0.66	0.25	0.59	0.13	0.13	0.66	0.59
6F	6C5	0.45	0.10	0.45	0.11	0.11	0.44	0.45
6F	6C6	0.55	0.14	0.55	0.13	0.13	0.55	0.55
5F	5C1	0.45	0.18	0.49	0.09	0.09	0.45	0.48
5F	5C2	0.52	0.19	0.53	0.11	0.11	0.52	0.52
5F	5C3	0.47	0.18	0.49	0.13	0.13	0.47	0.50
5F	5C4	0.58	0.22	0.58	0.14	0.14	0.58	0.58
5F	5C5	0.42	0.17	0.46	0.09	0.09	0.42	0.45
5F	5C6	0.57	0.21	0.60	0.11	0.11	0.57	0.60
4F	4C1	0.48	0.23	0.50	0.08	0.08	0.47	0.48
4F	4C2	0.60	0.24	0.60	0.11	0.11	0.58	0.59
4F	4C3	0.53	0.22	0.55	0.14	0.14	0.52	0.54
4F	4C4	0.59	0.28	0.61	0.15	0.15	0.60	0.61
4F	4C5	0.52	0.19	0.49	0.09	0.09	0.51	0.49
4F	4C6	0.59	0.19	0.61	0.14	0.14	0.60	0.62
3F	3C1	0.51	0.25	0.51	0.09	0.09	0.49	0.49
3F	3C2	0.65	0.29	0.66	0.11	0.11	0.63	0.64
3F	3C3	0.61	0.28	0.62	0.15	0.15	0.60	0.60
3F	3C4	0.65	0.34	0.69	0.16	0.16	0.66	0.69
3F	3C5	0.54	0.23	0.52	0.11	0.11	0.53	0.52
3F	3C6	0.61	0.25	0.62	0.14	0.14	0.62	0.63
2F	2C1	0.53	0.30	0.53	0.08	0.08	0.51	0.51
2F	2C2	0.70	0.35	0.73	0.11	0.11	0.68	0.71
2F	2C3	0.64	0.29	0.68	0.15	0.15	0.63	0.66
2F	2C4	0.73	0.35	0.74	0.16	0.16	0.73	0.74
2F	2C5	0.58	0.29	0.61	0.11	0.11	0.57	0.61
2F	2C6	0.61	0.29	0.63	0.14	0.14	0.62	0.63
1F	1C1	0.62	0.47	0.82	0.11	0.11	0.61	0.81
1F	1C2	0.73	0.44	0.91	0.12	0.12	0.72	0.90
1F	1C3	0.73	0.44	0.86	0.15	0.15	0.72	0.85
1F	1C4	0.75	0.46	0.89	0.15	0.15	0.75	0.88
1F	1C5	0.67	0.40	0.83	0.12	0.12	0.67	0.83
1F	1C6	0.67	0.45	0.86	0.13	0.13	0.67	0.85

鋼材コスト最小:層間変形角

■ 変形角制限

- 全階で指定の1/210以下を満たす

■ 最大値

- X方向
 - ✓ 3F~RF:1/213
 - ✓ 2F:1/216
- Y方向
 - ✓ 6F:1/213
 - ✓ 3F:1/214
 - ✓ 2F:1/213

➡ 1F以外は指定値近辺

層間変形角 - 結果3

結果3 EX+ 全階 全構造

階	X軸	Y軸	柱構造	階高	δ_x	δ_y	δ	最大層間変形角
				mm	mm	mm	mm	
RF	X1	Y1	S	4200	19.6513	-0.7551	19.6513	1/ 213
6F	X1	Y1	S	4200	19.7063	-0.6568	19.7063	1/ 213
5F	X1	Y1	S	4200	19.6770	-1.1146	19.6770	1/ 213
4F	X1	Y1	S	4200	19.6541	-2.6804	19.6541	1/ 213
3F	X1	Y1	S	4200	19.6675	-3.2550	19.6675	1/ 213
2F	X1	Y1	S	4200	19.3751	-3.3620	19.3751	1/ 216
1F	X1	Y1	S	4800	19.7890	-2.2768	19.7890	1/ 242

層間変形角 - 結果3

結果3 EY+ 全階 全構造

階	X軸	Y軸	柱構造	階高	δ_x	δ_y	δ	最大層間変形角
				mm	mm	mm	mm	
RF	X5	Y1	S	4200	0.0000	17.5620	17.5620	1/ 239
6F	X7	Y1	S	4200	0.0000	19.6896	19.6896	1/ 213
5F	X1	Y1	S	4200	0.0000	18.5860	18.5860	1/ 225
4F	X7	Y1	S	4200	0.0000	18.6884	18.6884	1/ 224
3F	X7	Y1	S	4200	0.0000	19.5894	19.5894	1/ 214
2F	X7	Y1	S	4200	0.0000	19.6821	19.6821	1/ 213
1F	X7	Y1	S	4800	0.0000	20.0111	20.0111	1/ 239

鋼材コスト最化:(参考)保有水平耐力

■ Q_u/Q_{un}

- 全階で1.0以上を満たす

■ 最小値

- X方向 RF, 6F:1.39
- Y方向 RF:1.32

■ 注意

- 最適化計算で保有水平耐力は直接考慮していない
- 層間変形角制限を厳しくする等で間接的に扱うことは可能

必要保有水平耐力比較表 - 結果3

結果3 X正加力 全階

階	主体構造	Ds	Fe	Fs	Fes	Qud kN	Qun kN	Qu kN	Qu/Qun	判定	層間変形角	備考
RF	S	0.30	1.000	1.000	1.000	18387.9	5516.4	7679.9	1.39	OK	1/102	
6F	S	0.30	1.000	1.000	1.000	25437.5	7631.3	10624.2	1.39	OK	1/102	
5F	S	0.25	1.000	1.000	1.000	31357.1	7839.3	13096.5	1.67	OK	1/102	
4F	S	0.25	1.000	1.000	1.000	36347.4	9086.9	15180.8	1.67	OK	1/106	
3F	S	0.25	1.000	1.000	1.000	40340.1	10085.1	16848.4	1.67	OK	1/109	
2F	S	0.25	1.000	1.000	1.000	43388.0	10847.0	18121.4	1.67	OK	1/111	
1F	S	0.25	1.000	1.000	1.000	45484.6	11371.2	18997.0	1.67	OK	1/135	*1

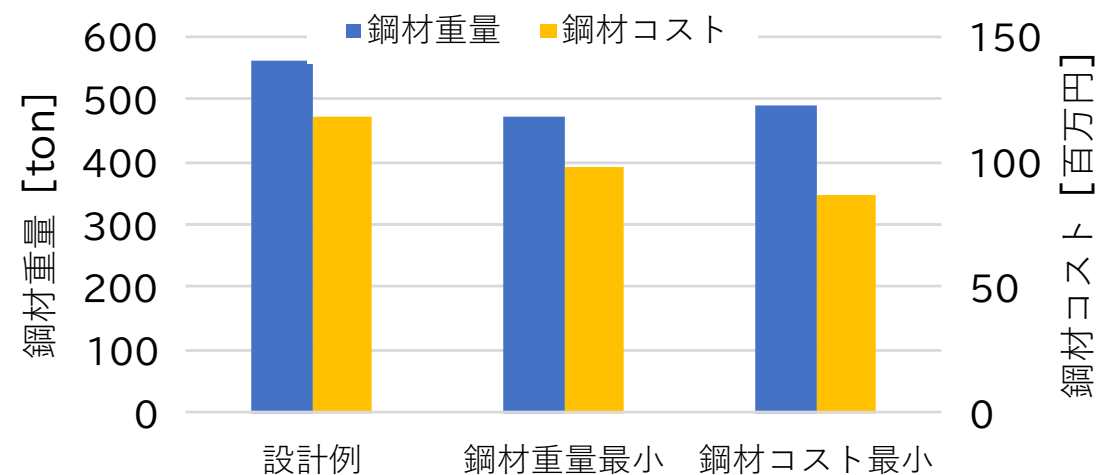
必要保有水平耐力比較表 - 結果3

結果3 Y正加力 全階

階	主体構造	Ds	Fe	Fs	Fes	Qud kN	Qun kN	Qu kN	Qu/Qun	判定	層間変形角	備考
RF	S	0.30	1.000	1.000	1.000	18387.9	5516.4	7321.5	1.32	OK	1/121	
6F	S	0.25	1.000	1.000	1.000	25437.5	6359.4	10128.5	1.59	OK	1/106	
5F	S	0.25	1.000	1.000	1.000	31357.1	7839.3	12485.5	1.59	OK	1/113	
4F	S	0.25	1.000	1.000	1.000	36347.4	9086.9	14472.5	1.59	OK	1/110	
3F	S	0.25	1.000	1.000	1.000	40340.1	10085.1	16062.3	1.59	OK	1/103	
2F	S	0.25	1.000	1.000	1.000	43388.0	10847.0	17275.8	1.59	OK	1/100	
1F	S	0.25	1.000	1.000	1.000	45484.6	11371.2	18110.6	1.59	OK	1/128	*1

鋼材重量／鋼材コスト最小設計比較

	鋼材重量 [ton]	鋼材コスト [千円]
【参考】設計例	562	118,436
鋼材重量最小設計	472	97,714
鋼材コスト最小設計	490	86,484



※「設計例」:構造設計者による断面設計

鋼材重量／鋼材コスト最小設計

■ 考察

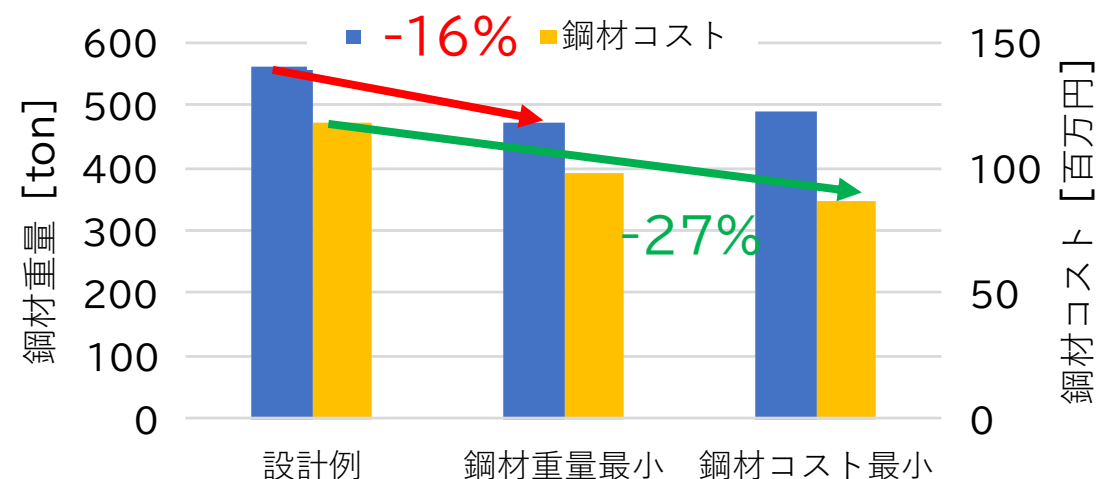
- 設計例 ➡ 鋼材重量最小設計

- ✓ 外法一定H, BCPが多用される
- ✓ 鋼材重量16%削減

- 設計例 ➡ 鋼材コスト最小設計

- ✓ JISH, BCRが多用される
- ✓ 鋼材コスト27%削減

➡ 鋼材量を落とす設計とコストを下げる設計は
異なってくる





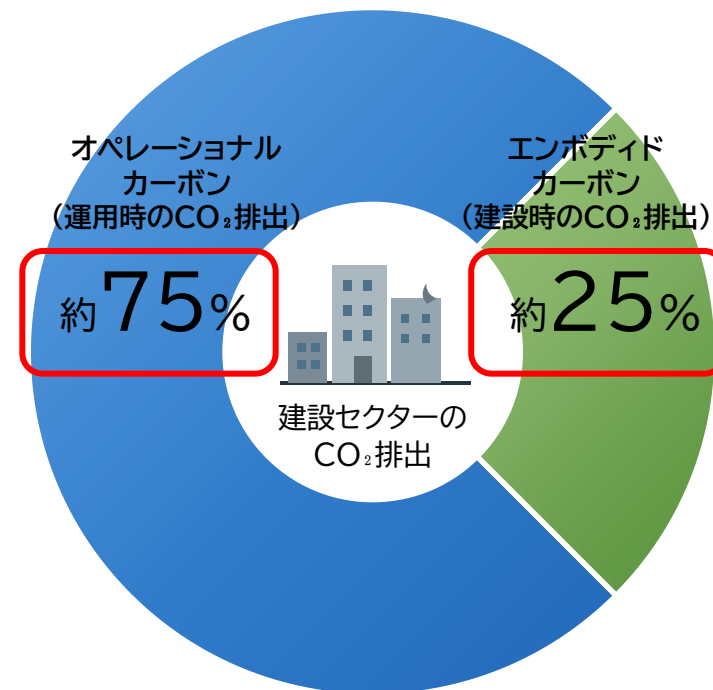
最適化とライフサイクルアセスメント

建築分野の環境負荷

■ CO2排出の区分

- オペレーショナルカーボン
 - ✓ 建物の運用で発生するCO2
 - ✓ 建設セクター全体の約75%
- エンボディドカーボン
 - ✓ 建物の建設で発生するCO2
 - ✓ 建設セクター全体の約25%

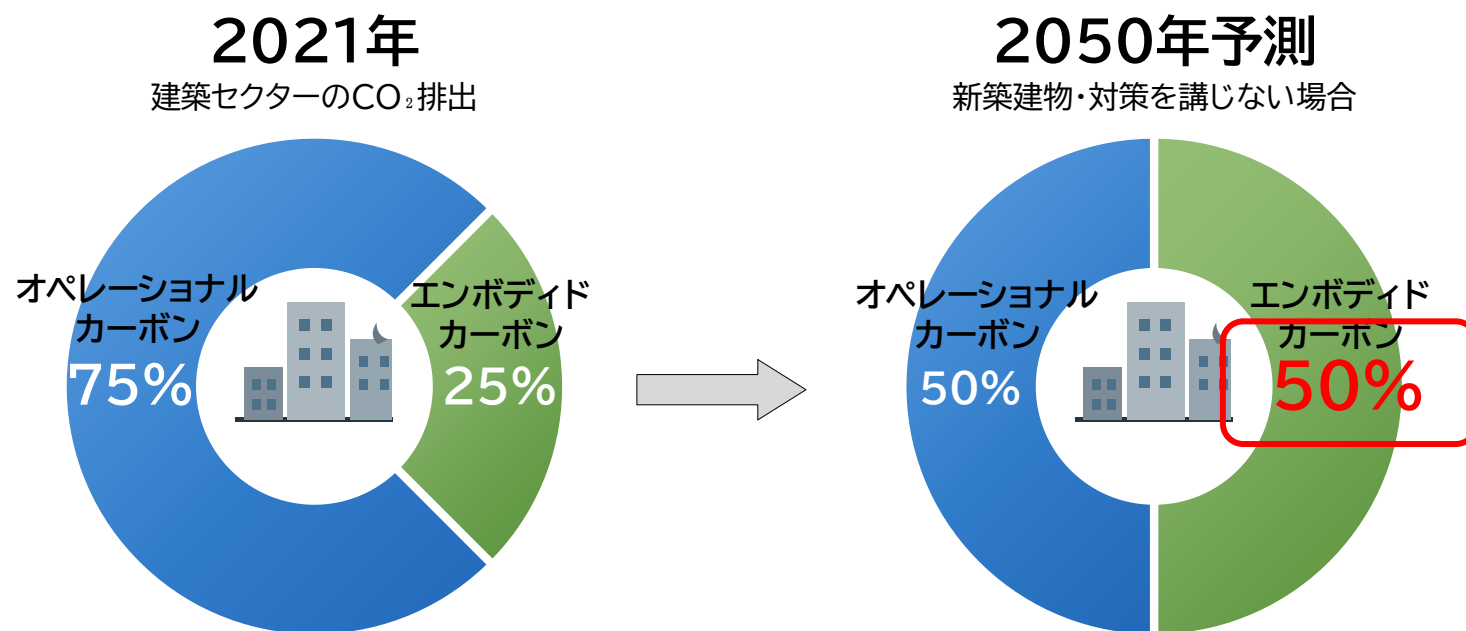
建設セクターにおける CO₂排出の区分



OECD(2025)Zero-Carbon Buildings in Cities:
A Whole Life-Cycle Approachより作成

エンボディドカーボンの重要性

- 対策を講じない場合、2050年には新築建物のライフサイクル排出量の約**50%**をエンボディドカーボンが占めると予測



OECD(2025)Zero-Carbon Buildings in Cities: A Whole Life-Cycle Approachより作成

建築分野の環境負荷

■ 鉄骨造建物のCO2排出量

- ライフサイクル全体のCO2排出量は, 鋼材製造過程において70~80%を占めるとの試算例

➡ 建築構造の観点から鉄骨造建物のエンボディドカーボン削減を検討

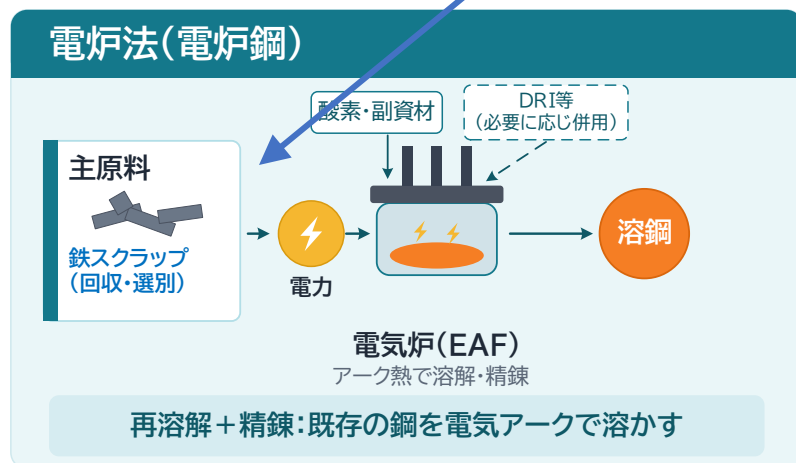
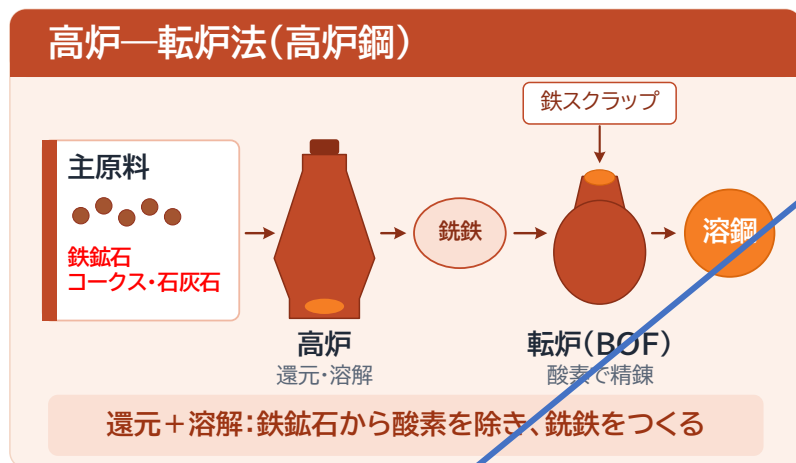
➡ 温室効果ガス(GHG: greenhouse gas) 排出量と鋼材コストの分析例

構造最適化手法を利用

Material	Product stage (%)	Transport (%)	Construction & demolition (%)	Disposal (%)	Carbonation (%)
Steel	81	11	3	0	4
RC	65	16	11	0	7
Timber	46	19	4	32	N/A

J. Hart, B. D' Amico, and F. Pomponi: Whole-life embodied carbon in multistory buildings: Steel, concrete and timber structures. Journal of Industrial Ecology, 25(2), 403-418, 2021.

鋼材の環境負荷低減



鉄スクラップが主原料

低コスト・低GHG

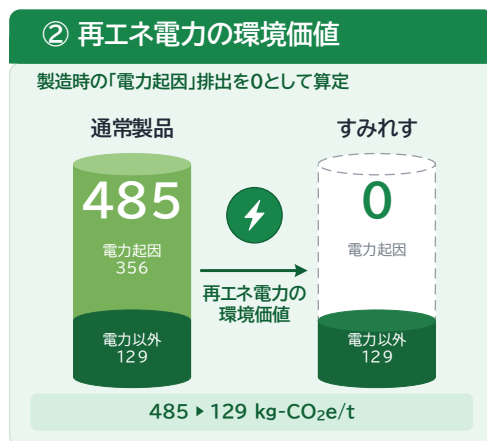
分類	製造	形鋼	鋼種	コスト係数 (千円/ton)	GHG単位量 (ton-CO2e/ton)
通常鋼材	高炉	JISH	SN490B	160	2.155
		SHH	SN490B	205	2.155
		BCR	BCR295	195	2.155
		BCP	BCP325	245	2.155
	電炉	JISH	SN490B	150	0.904
		BCP	BCP325	235	0.904
グリーン鋼材	高炉	JISH	SN490B	195	0
		SHH	SN490B	245	0
		BCR	BCR295	235	0
		BCP	BCP325	285	0
	電炉	JISH	SN490B	156	0

(建設会社ヒアリングより)

鋼材の環境負荷低減

■ グリーン鋼材

- マスバランス法・再生可能エネルギー電力利用などによりGHG排出量削減
- 一般に**コスト増**
- 簡単のため**GHG単位量は0**と扱う



高コスト・低GHG

分類	製造	形鋼	鋼種	コスト係数 (千円/ton)	GHG単位量 (ton-CO ₂ e/ton)
通常鋼材	高炉	JISH	SN490B	160	2.155
		SHH	SN490B	205	2.155
		BCR	BCR295	195	2.155
		BCP	BCP325	245	2.155
	電炉	JISH	SN490B	150	0.904
		BCP	BCP325	235	0.904
グリーン鋼材	高炉	JISH	SN490B	195	0
		SHH	SN490B	245	0
		BCR	BCR295	235	0
		BCP	BCP325	285	0
	電炉	JISH	SN490B	156	0

出典:JFE「JGreeX」および中部鋼鈹「すみれす」の公表資料を基に作成

(建設会社ヒアリングより)

グリーン鋼材の使用例

■ 後樂園 PREX

- 設計・施工:株式会社熊谷組
- 事業者:住友商事株式会社
- 建物規模:鉄骨造 地上10階建て
- 竣工:2025年5月
- 建物用途:事務所、店舗、駐車場

■ エンボディドカーボン削減

- 主要鉄骨部材のうち約半分にグリーン鋼材採用
- エンボディドカーボン削減量
 - ✓ 全体:約1,013t-CO₂e(30%)
 - ✓ 鉄骨材:約952t-CO₂e(80%)

※出典:住友商事「後樂園PREX」物件資料(2025年5月)

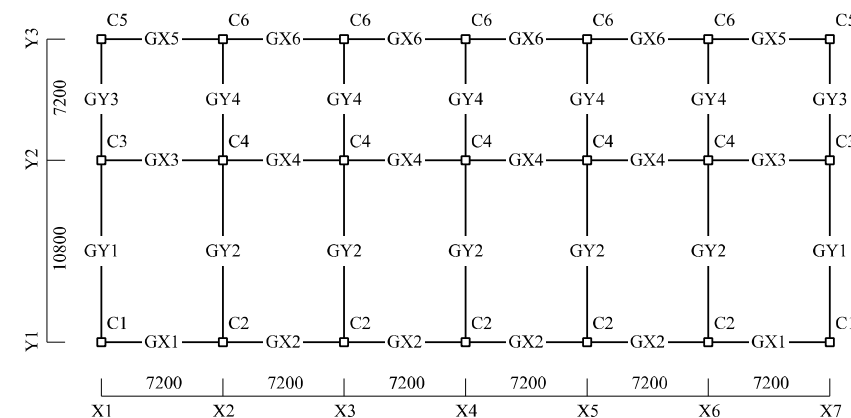
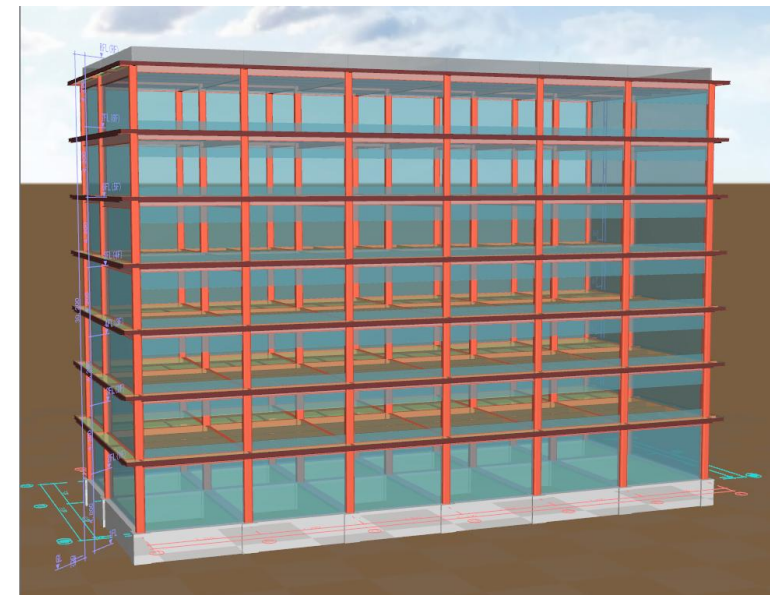


対象モデル:S造7階建モデル

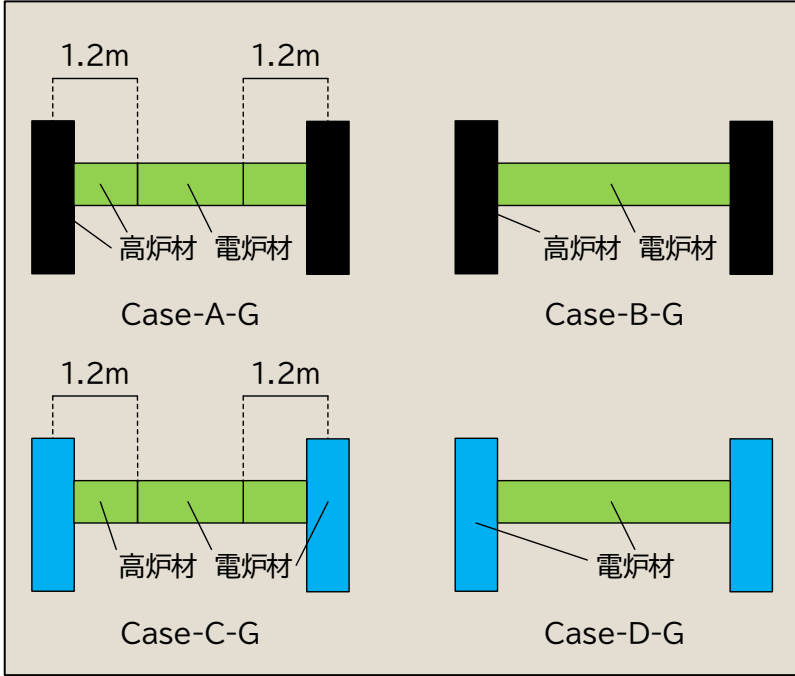
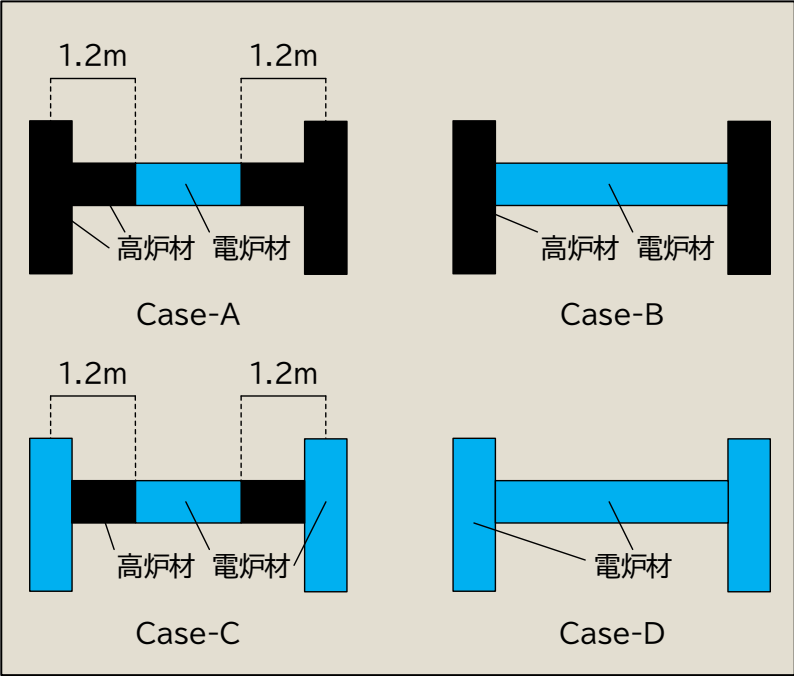
■ 建物概要

- 用途:事務所
- 構造種別:鉄骨造純ラーメン
- 階数:地上7階
- 建物高さ: 30.2m
- X方向: 43.2m
- Y方向: 18m

三宅朗彦, 河南孝典, 野田亜久里, 中里太亮, 稲山正弘: 木質垂壁ラーメン構法の開発研究 ～その2スギCLTを対象とした接合部実験と有限要素法による解析～, 熊谷組技術研究報告, 第81号, 2021.



鋼材ケース設定



部位	形鋼	通常鋼材		グリーン鋼材	
		高炉材	電炉材	高炉材	電炉材
梁端部	JISH	○	○	○	○
梁中央部			○		
梁	SHH	○		○	

部位	形鋼	通常鋼材	
		高炉材	電炉材
柱	BCR	○	
	BCP	○	○

鋼材ケース設定

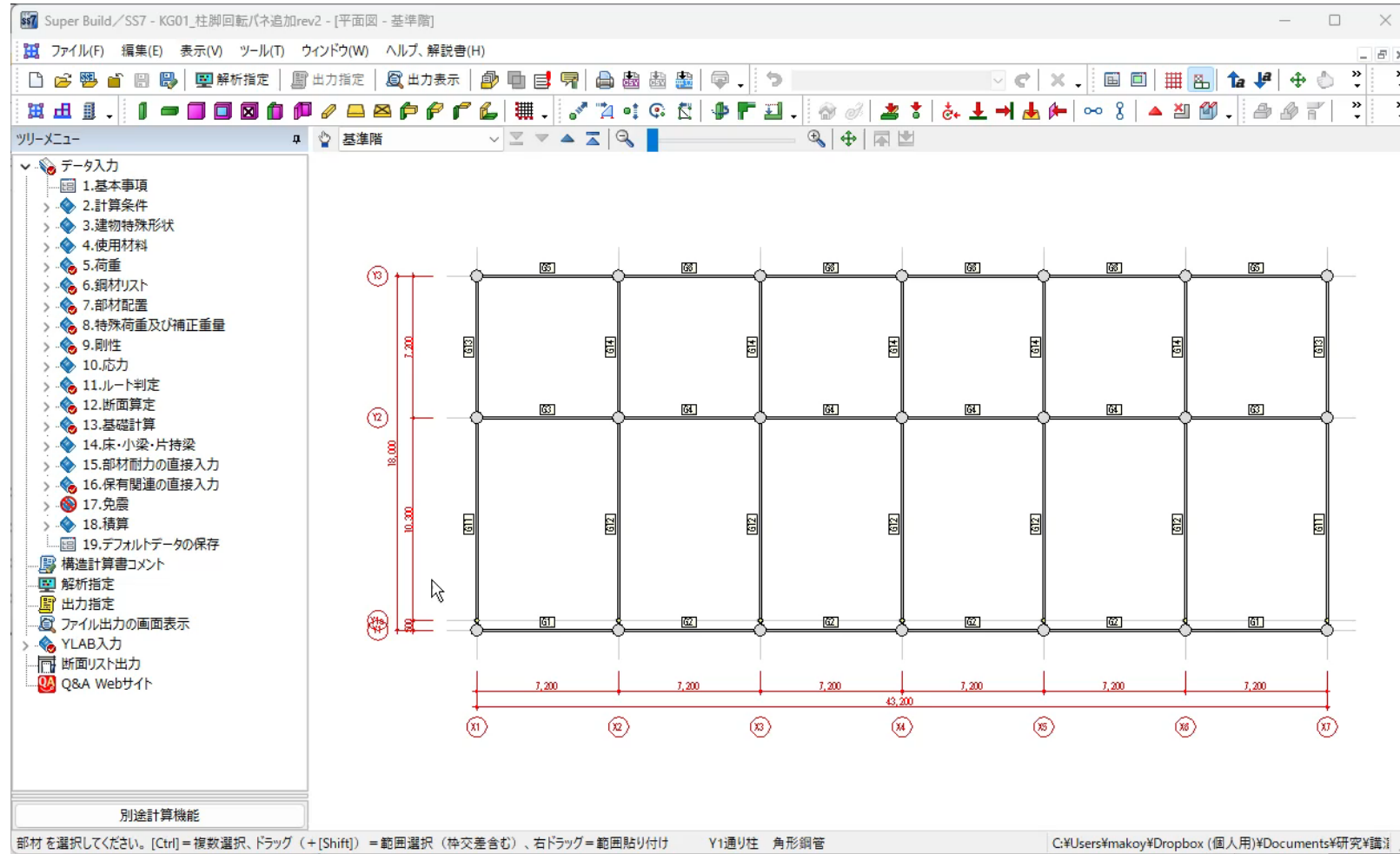
解析 ケース	梁端部	梁中央部	柱	
	JISH	JISH	BCR	BCP
A1	P	E	P	
A2	P	E	P	P
A3	P	E		P
B1	E	E	P	
B2	E	E	P	P
B3	E	E		P
C2	P	E	P	E
C3	P	E		E
D2	E	E	P	E
D3	E	E		E

解析 ケース	梁端部	梁中央部	柱	
	JISH		BCR	BCP
A1-G	GP	GE	P	
A2-G	GP	GE	P	P
A3-G	GP	GE		P
B1-G	GE	GE	P	
B2-G	GE	GE	P	P
B3-G	GE	GE		P
C2-G	GP	GE	P	E
C3-G	GP	GE		E
D2-G	GE	GE	P	E
D3-G	GE	GE		E

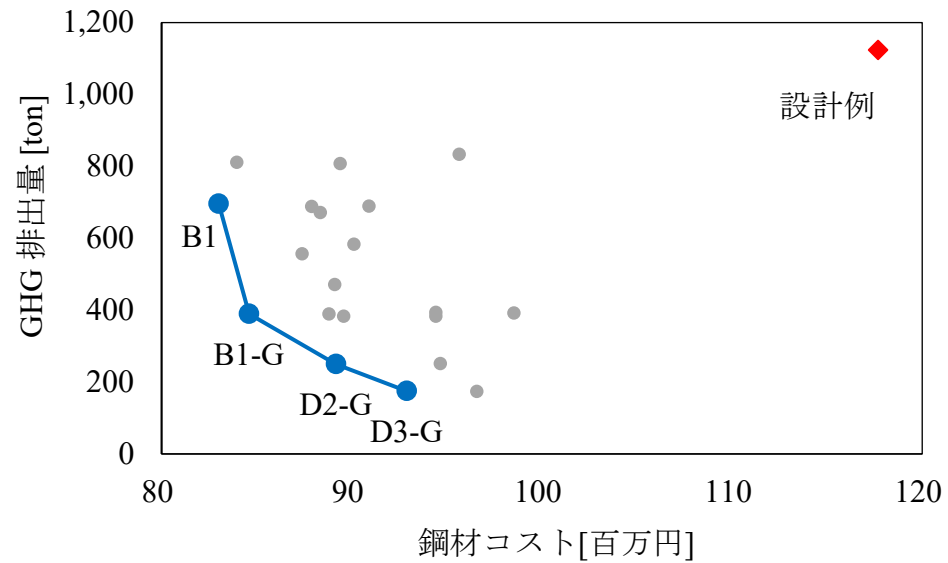
グリーン鋼材

P:高炉材, E:電炉材, GP:グリーン鋼材(高炉材), GE:グリーン鋼材(電炉材)

最適化の実行

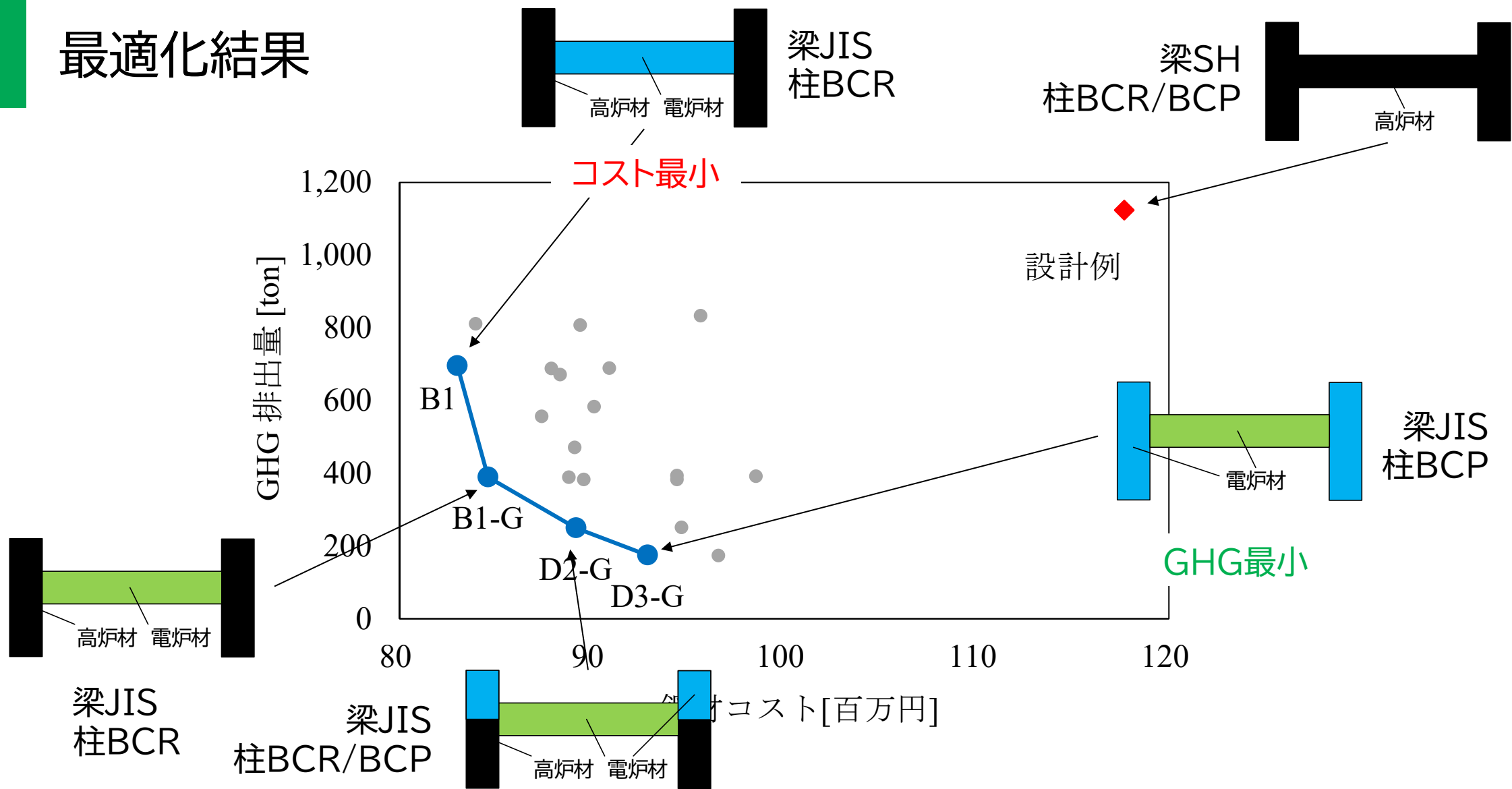


最適化結果

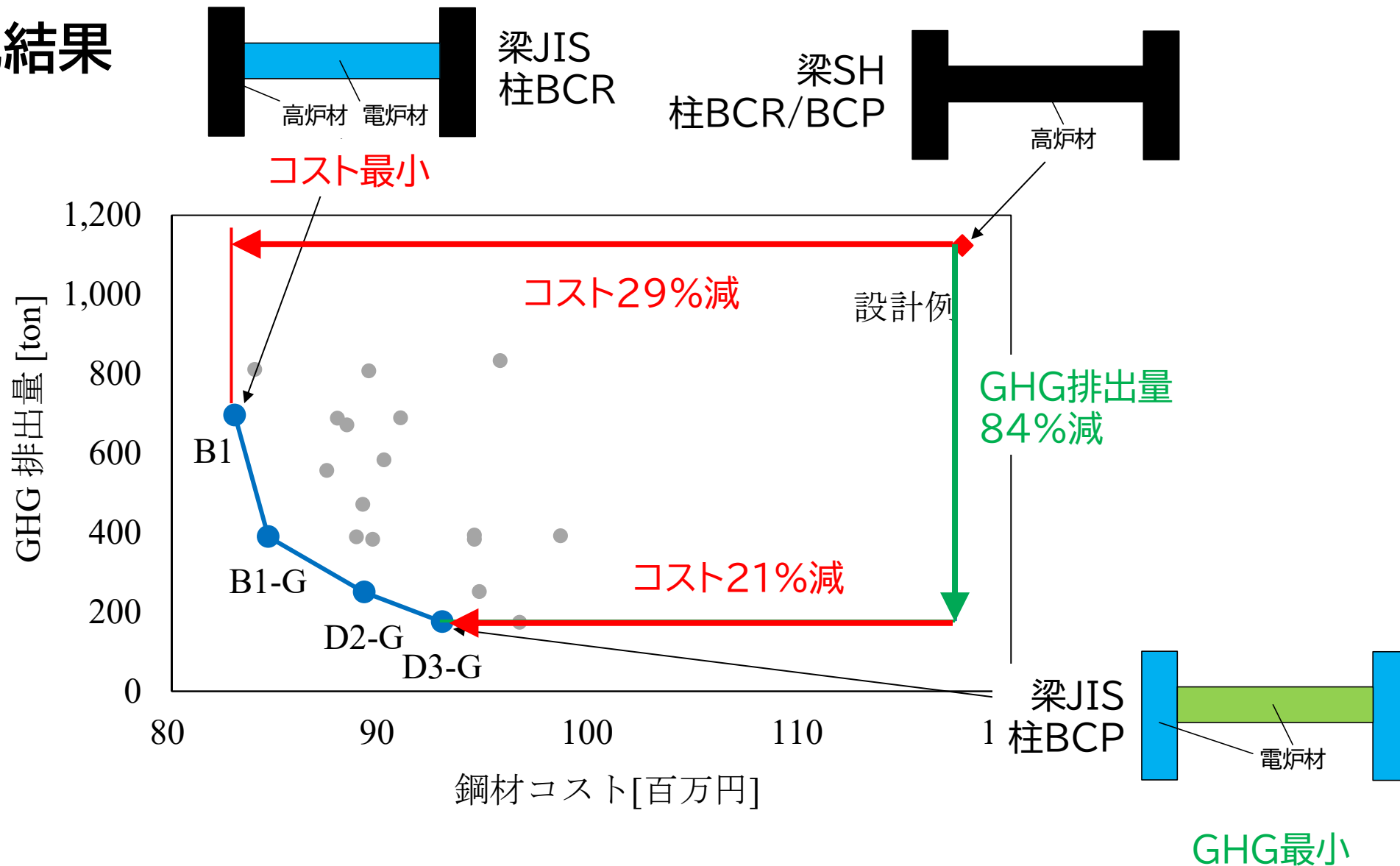


解析 ケース	鋼材重量 (ton)	鋼材コスト (百万円)	GHG排出量 (ton)
設計例	562	118	1,123
B1	499	83	696
B1-G	497	85	390
D2-G	498	89	250
D3-G	503	93	175

最適化結果



最適化結果





まとめ

- 構造最適化は、コスト・性能・環境負荷を定量的に比較するための意思決定支援手法である
- 目的関数が変われば設計解も変わる
 - 鋼材量最小と鋼材コスト最小は必ずしも一致しない
 - 鋼材コストとGHG排出量のトレードオフと選択肢を可視化できる
 - 本例では、設計例に対して鋼材コスト21%削減とGHG排出量84%削減の両立が可能
- 一貫構造計算との連携により実務導入しやすくなる。
 - 条件設定と結果の判断には構造設計者の知識が不可欠である
 - 設計者に代わって答えを決めるのではなく、よりよい判断のための選択肢を示すもの