

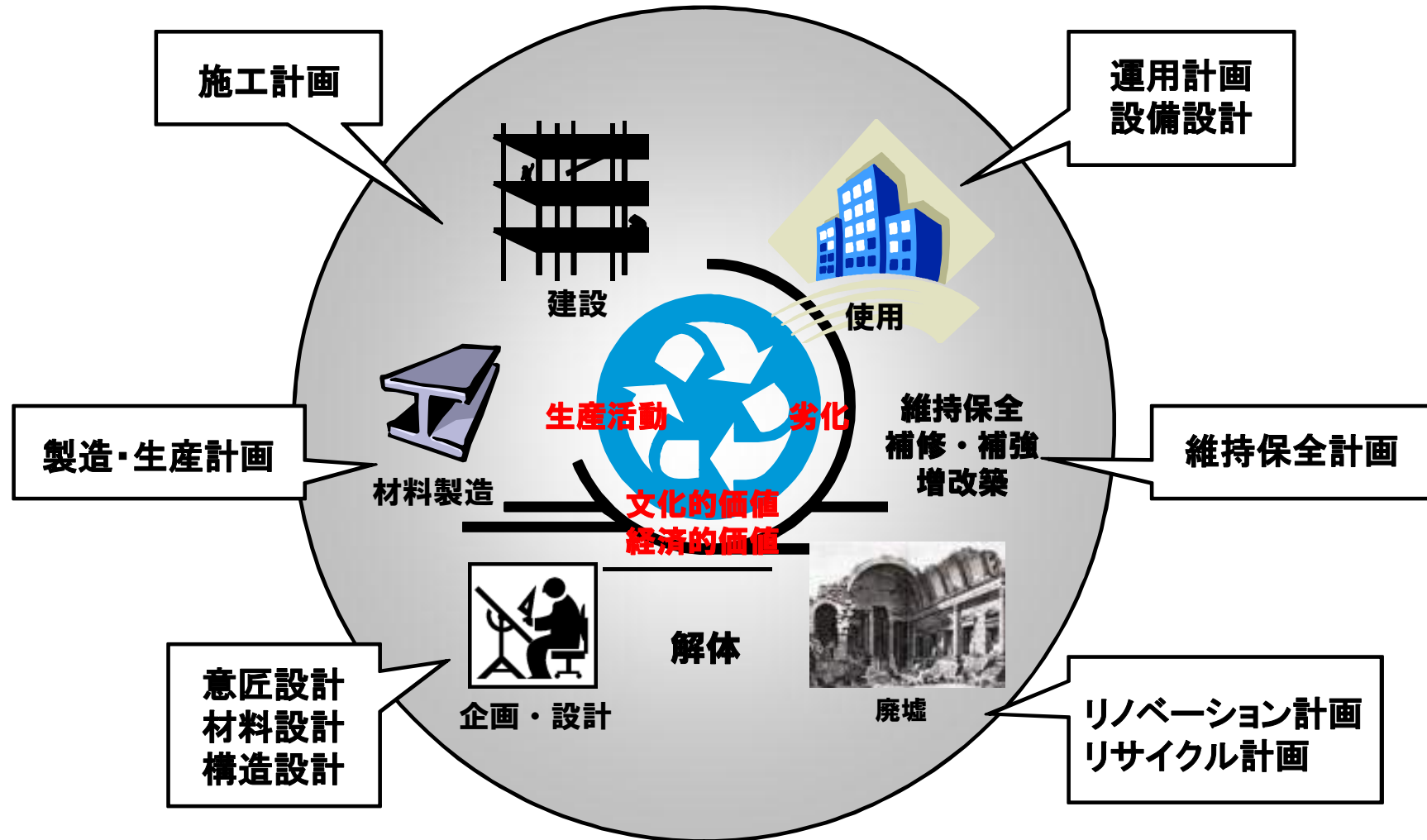
第24回 建材情報交流会 基調講演

『建築物の要求性能に基づく
建築材料の評価・選定手法とマテリアルデザイン』

東京大学 大学院工学系研究科 野口 貴文

1. はじめに

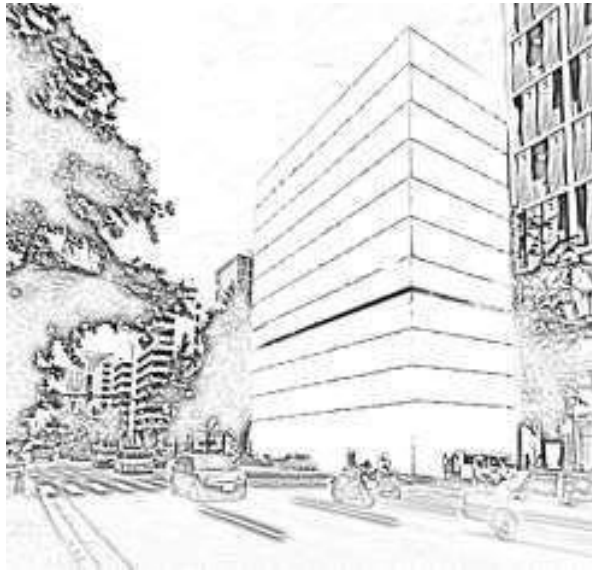
建築の一生と材料設計



様々なステージにおいて、様々な設計、計画立案がなされる

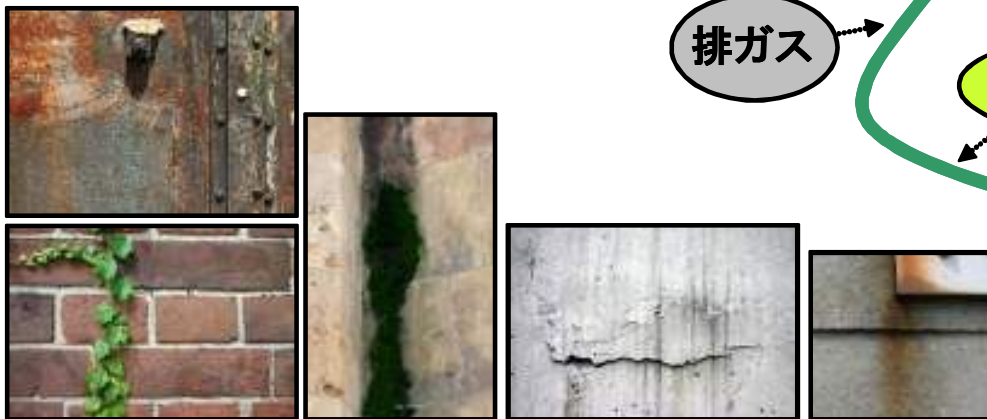
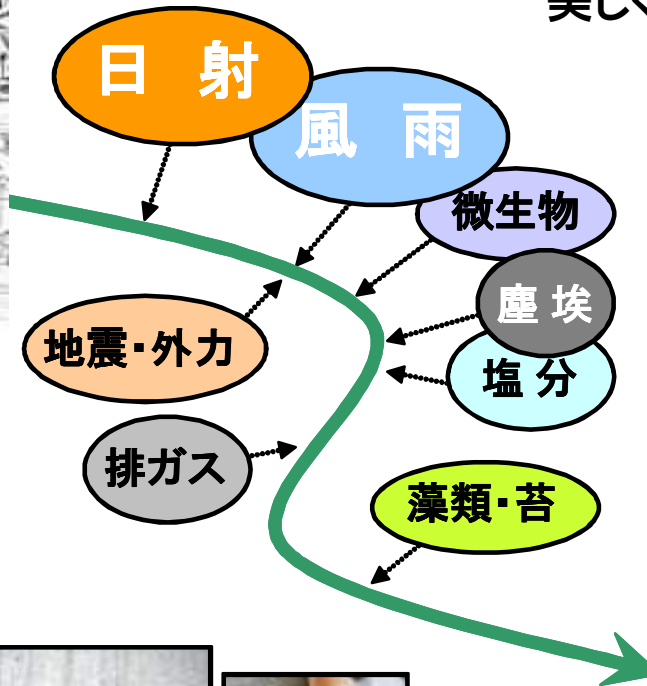
1. はじめに

建築の一生と材料設計



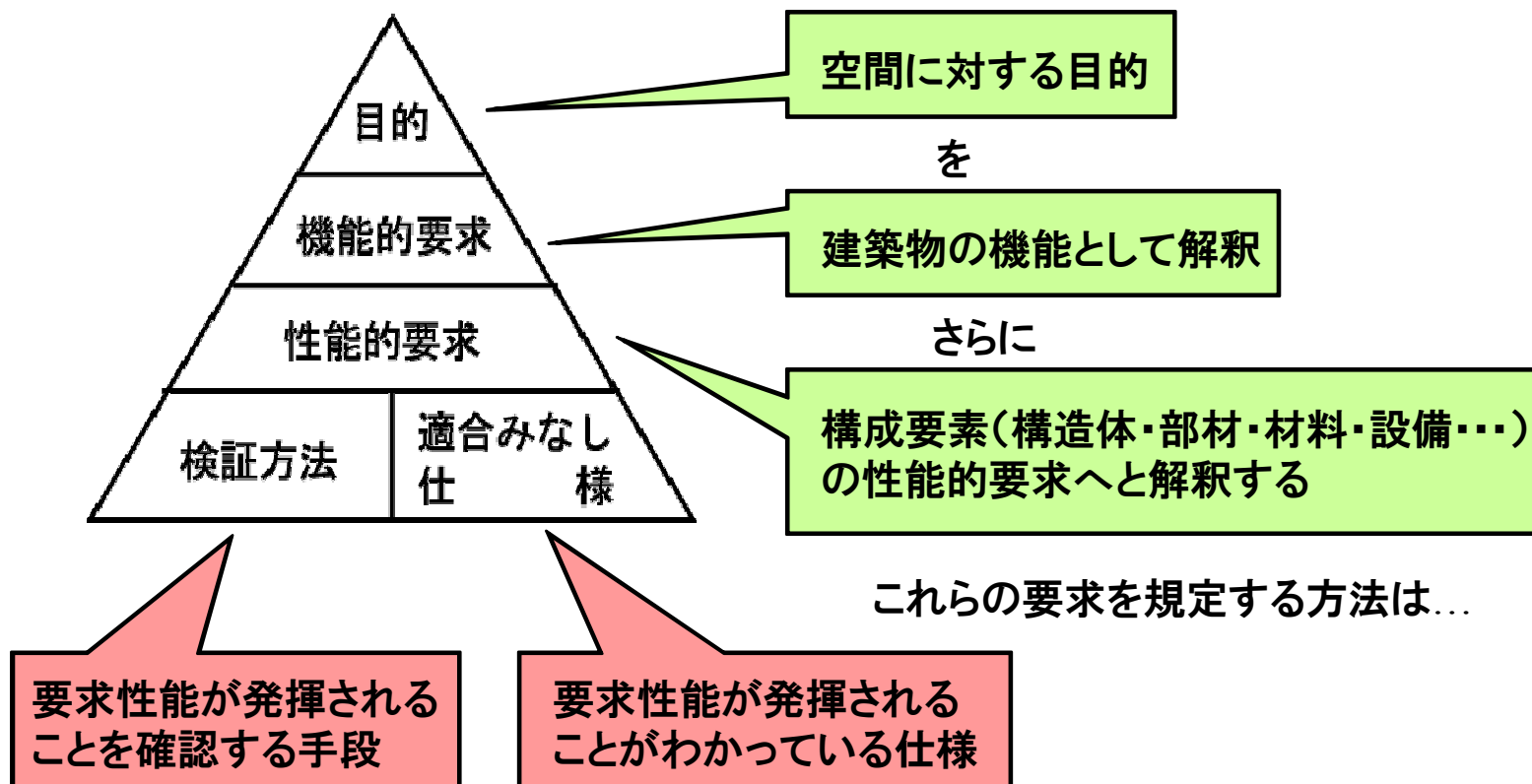
長期間に渡り様々な劣化因子に曝されることで
建築物は加齢してゆく

設計・材料選定・維持保全を適切に行うことで
美しく老化させることができるか



1. はじめに

性能指向型の階層構造



- 目的・設計因子を性能として読み解く手段
- 性能的要求を規定する
- 実現方法(性能指向型設計法)・検証方法の必要性

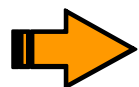
要求性能に基づく材料設計とは

- 建築物のライフサイクルの中で、要求される様々な性能を満たすよう（建築材料に関わる）設計因子を最適に決定する手法
- つまり、「材料の設計因子」が発揮するであろう「性能」をその「評価」に従い最適化する行為

建築物の性能設計・材料選定で解決すべき課題

- 要求機能を性能値として厳密に定義し評価することが困難な項目
→ **新しい評価手法の構築は可能か？**
- 同時に複数の性能が要求される問題の解決
→ **多基準での最適化を行うことは可能か？**
- 材料・構法・工法の組み合わせは無数・無限にある
→ **最適解・発見的解の探索は可能か？**

新しい評価手法の構築は可能か？



マテリアルデザインのための性能評価手法の構築
外装材料の意匠性能・視覚的印象の定量的評価の試み

- ① 二次元フーリエ変換による外装材の汚れの定量的評価
- ② 建築材料表面の光の反射特性
- ③ 建築材料の視覚的印象評価と生体情報

多基準での最適化を行うことは可能か？



遺伝的アルゴリズムによる材料選定最適化手法の構築

- ・パレート最適解集合の導出を目的とした多目的最適化システムの構築
 - ・上記汎用多目的最適化システムの有用性の実証研究
- ① コンクリートの調合設計最適化
 - ② 外壁材料の選定最適化
 - ③ RC造建築物の維持保全計画策定支援システム

2. 意匠性能・美観の定量的評価

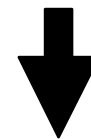
2. 意匠性能・美観の定量的評価

二次元フーリエ変換による外壁汚染度の定量的評価



外壁の汚染・劣化などは、美観を損なうだけでなく、都市景観の悪化、生活環境の低下にも結びつく。

その一方で、現状では汚染度を定量的に測定判断する妥当な手法が確立されているとは言えない。



サステイナブルな社会実現のため、維持・管理技術によって建築物のさらなる長寿命化が求められる

建築物の汚染度の定量評価手法は維持管理にとって重要



そこで、二次元フーリエ変換を使用した画像解析的手法によって、美観の観点からの外装材料の汚染度の定量的評価方法を提案

2. 意匠性能・美観の定量的評価

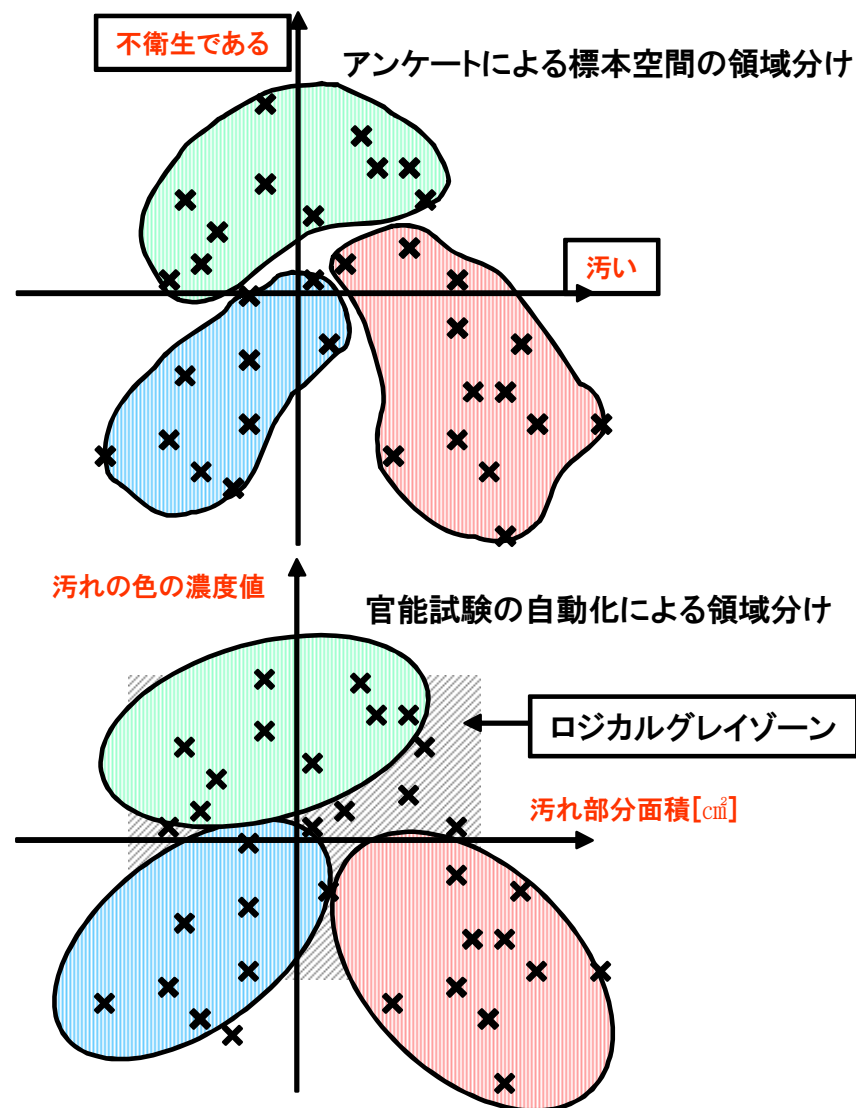
美観の評価 官能試験の問題

大量の人間を投入して行う官能試験の場合

- ・ 標本空間の領域分割はどうしても**恣意的**になりがち
- ・ 定量的な議論に収束せず、定性的な議論に終始してしまう
- ・ 領域の境界部分は、**工学的な理論的考察を行いき**
- ・ 標本空間と材料サンプルそのものに**互換性がない**

感覚量→物理量 に変換する理論で定量化して領域分け

- ・ 標本空間の領域分割はやはり**恣意的**になるが、より**数理的な分類**を行える
- ・ グレイゾーンを放置できる
- ・ **人間の感覚の曖昧な部分を無理に集約させることなく理論的・定量的な議論が可能となる**
- ・ 標本空間と材料サンプルの互換性を向上させることができる



2. 意匠性能・美観の定量的評価 既往の研究・従来の方法



元の外装材画像



2値化によって
汚れを抽出した画像

既往の汚れ度の抽出方法・研究

主に**2値化**を軸にした解析方法を使用



欠点

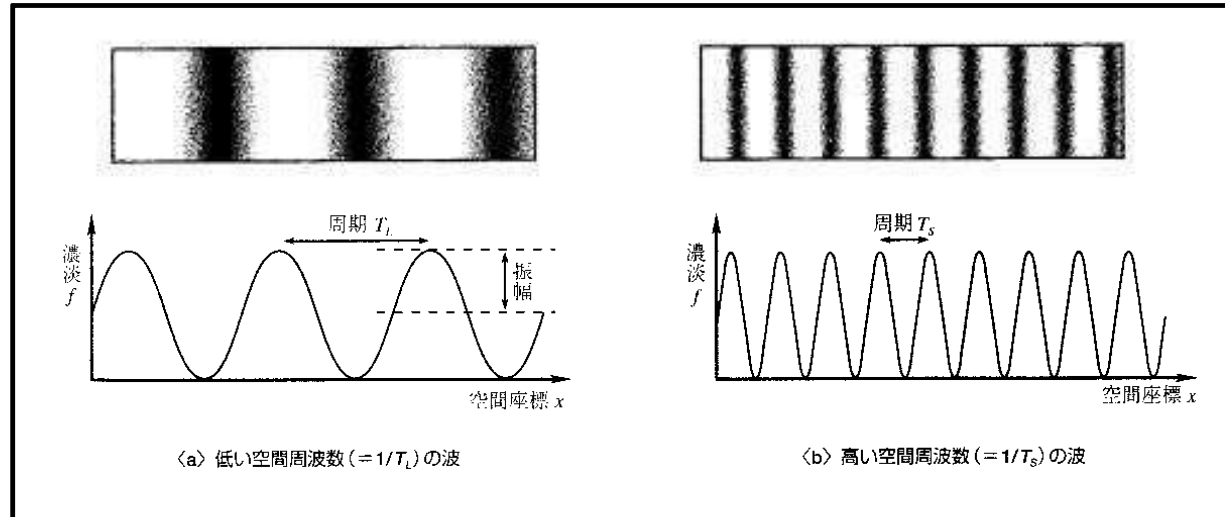
汚れを単なる**色差**として捉えていたため、
外装材がもつ**特徴的なテクスチャを考慮した汚れの抽出**
ができない



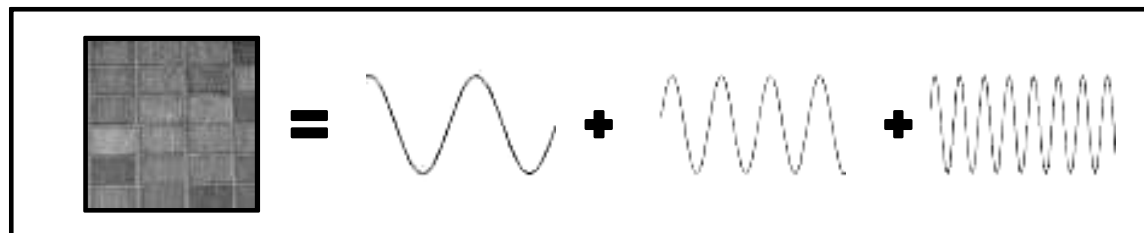
二次元フーリエ変換を使用することで、
外装材のテクスチャを考慮しながら、
美観の観点から汚れ度を抽出

2. 意匠性能・美観の定量的評価

二次元フーリエ変換による特徴量抽出



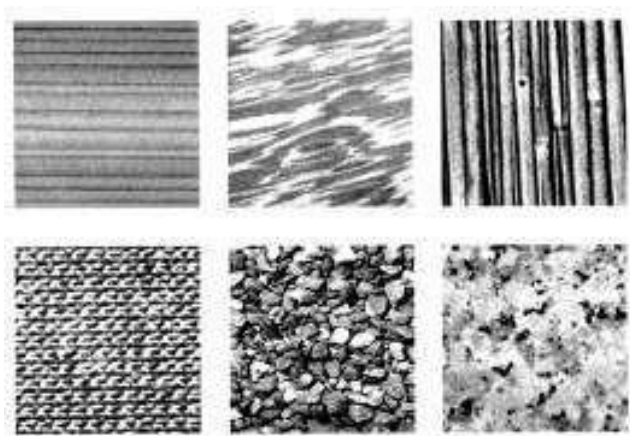
色の濃淡の繰り返しを波と見立てて、画像をこの2次元波の合計波と捉える



これを二次元フーリエ変換によって、**波の和の形に分解し特徴の抽出**を行う

2. 意匠性能・美観の定量的評価

二次元フーリエ変換の出力結果

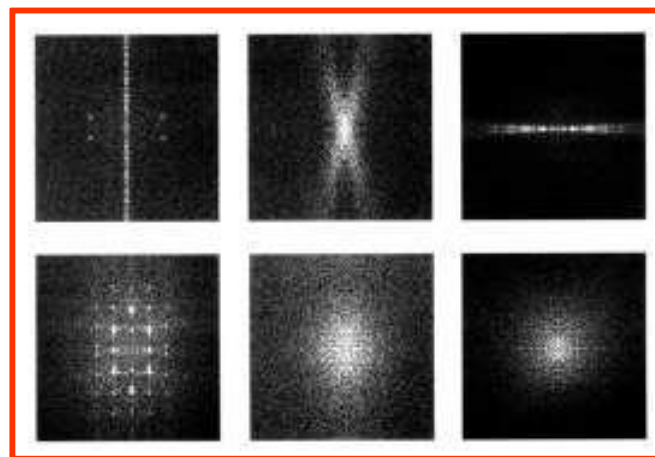


元画像

二次元フーリエ変換



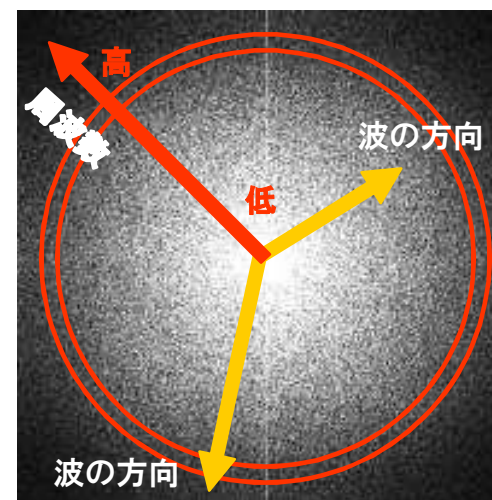
出力画像



PSP(Power Spectrum Picture)

- 中心からの距離 : 周波数
- 中心からの方向 : 正弦波の方向
- 色の濃淡 : その周波数・方向を持った波のパワースペクトル値

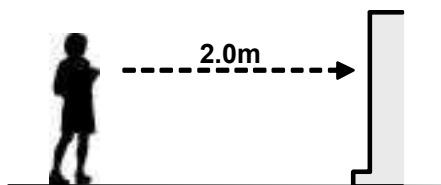
二次元フーリエ変換の出力画像PSPによって
様々なテクスチャの特徴抽出が可能になる



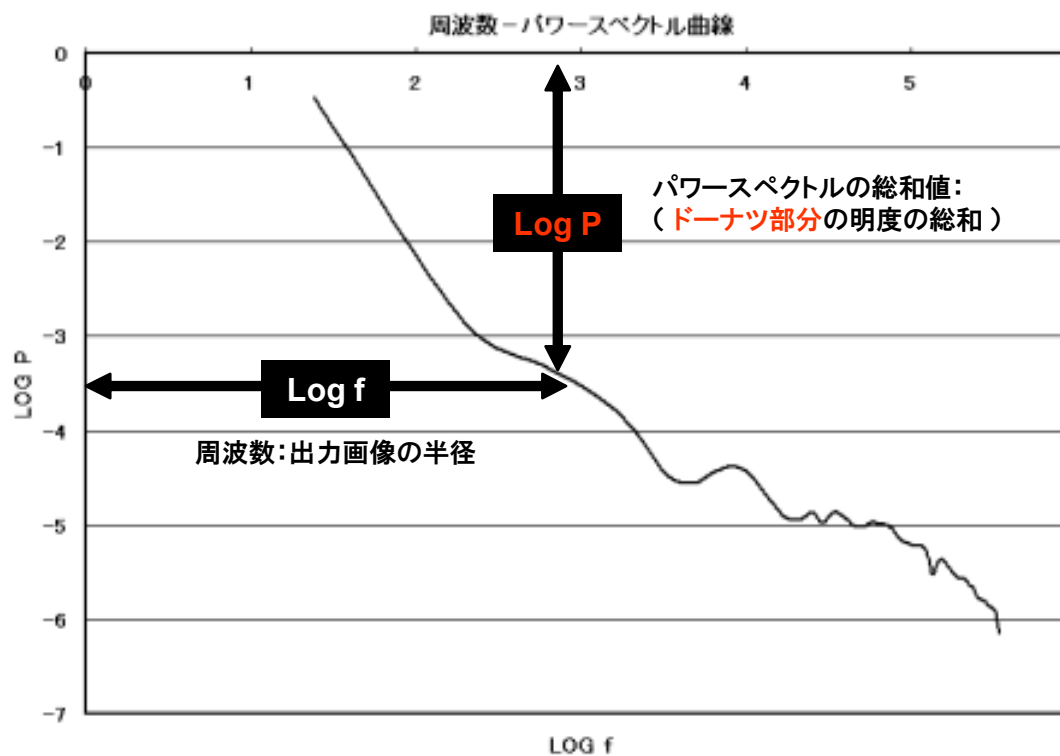
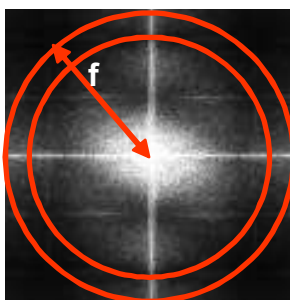
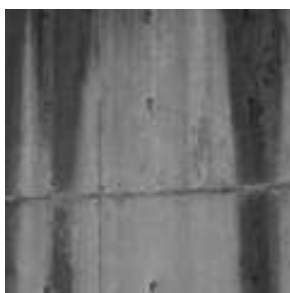
2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

二次元フーリエ変換によるコンクリート壁面の汚れ評価

たとえば、コンクリート壁面の汚れを抽出してみる...

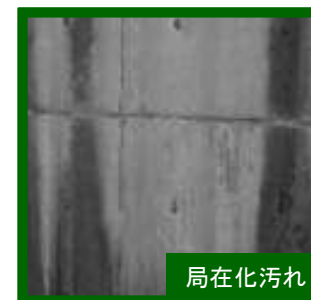
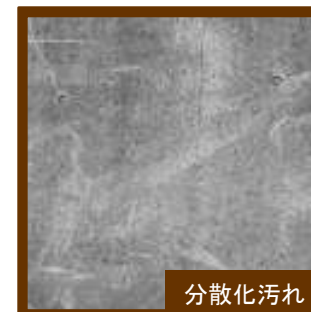
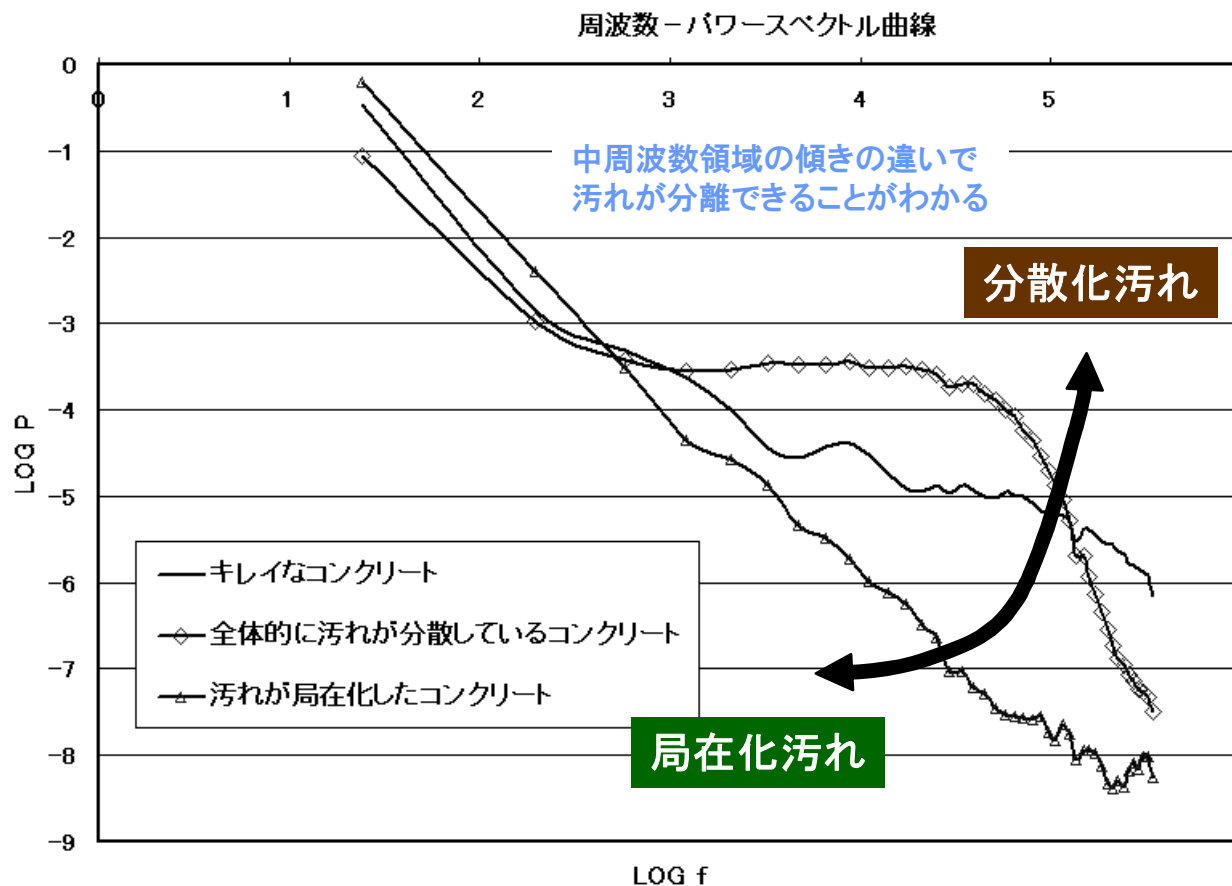


- ・ 曇天時に対面距離2mで打放しコンクリートの外壁を撮影
- ・ 画像を2DFFTにかけ、周波数の対数とそのパワースペクトル値の総和の対数を両軸にプロットする



2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

二次元フーリエ変換によるコンクリート壁面の汚れ評価



二次元フーリエ変換を用いることで、**テクスチャを考慮しながら**
美観の観点から**汚れ度を特徴量**として抽出することが可能

2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

視覚・美観に関する性能について

建築分野における色や表面に関する性能を

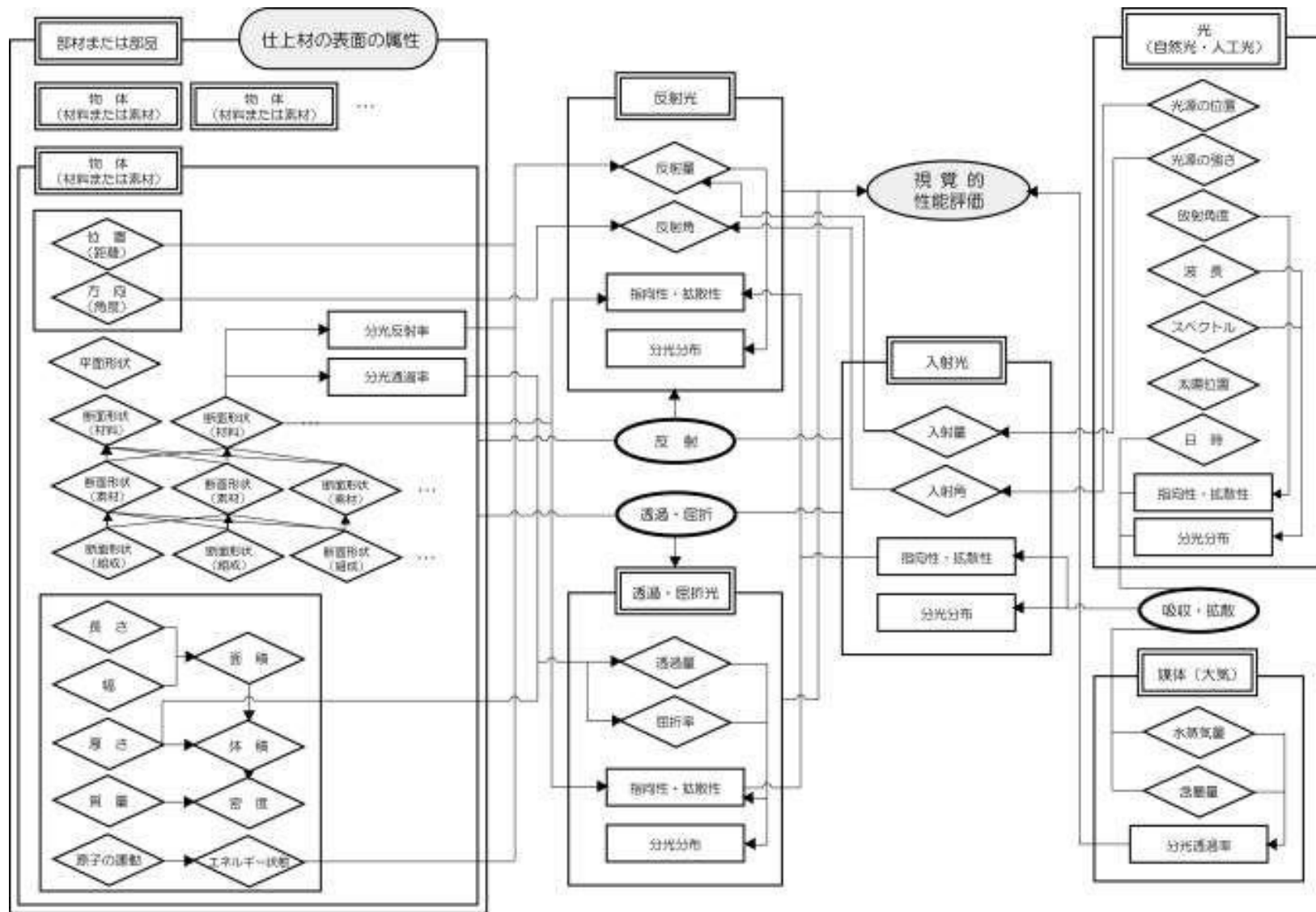
より詳細に記述することで美観性の評価に利用可能な指標として提案できないか

例えば、ISO 7361の性能項目の中の視覚に関する性能基準の記述

性能項目	定義	表現方法	備考
平滑性	ファサードの内部または外部の平滑性	a) 相対変位: 対角線の先端を結んだ直線に対する最大の変位 b) 歪度: 別の三つの角度によって定義された平面からの角度のひとつの距離 c) 局所平滑性: 0.2mごとに最大の局所変位を求める	精度は1%以内でとるものとする。
表面状態	ファサードの視認できる表面の見栄えに関するあらゆる属性値	a) 表面の粒度 b) 局所的な欠陥に関するもの。発砲, 突起, キズ, ひび割れ, 欠損, など。	仕様は将来ISOで決定
外装色単一性	ファサードを形成する各種要素の色彩種類の制限		仕様は将来ISOで決定
鏡面反射	ファサードの外表面が光を鏡面反射すること	a) 拡散反射を記述した楕円指示図. 表面の先端, あるいは拡散反射を記述した楕円指示図. 表面の先端, あるいは子午線断面にて, 垂直に照射された光と同じ方向に帰ってきた光に比例する長さが表現される図. これによって, 表面のどの角度がどの方向にもっとも反射しやすいかを調べることができる b) 半値角度: 垂直に照射した光の反射量が半分になる角度	IEC Standardsで規定
仕上げ受容性	様々な内面・外面の仕上げを受容するファサードの能力. ファサードに使われる, 使われない仕上げを記述したリストで規定される。	ファサードに使われる, あるいは使われない仕上げを記述したリストで規定される。	仕上げが適用されており, 性能・耐久性が確認されている状況で試験し使用は将来ISOで決定。

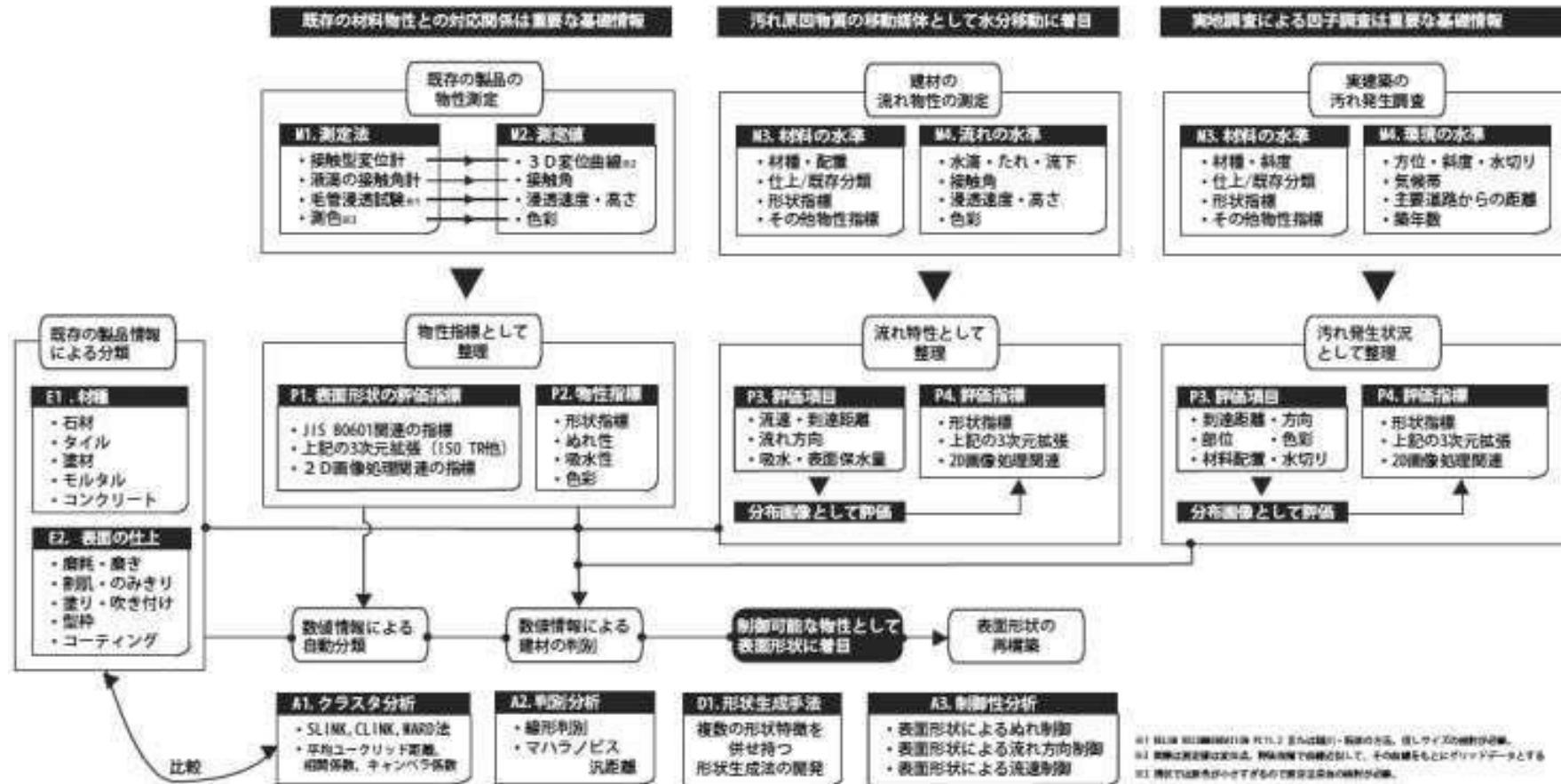
2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

仕上材の表面の属性と視覚的性能との関係



2. 意匠性能・美観の定量的評価

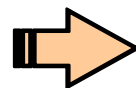
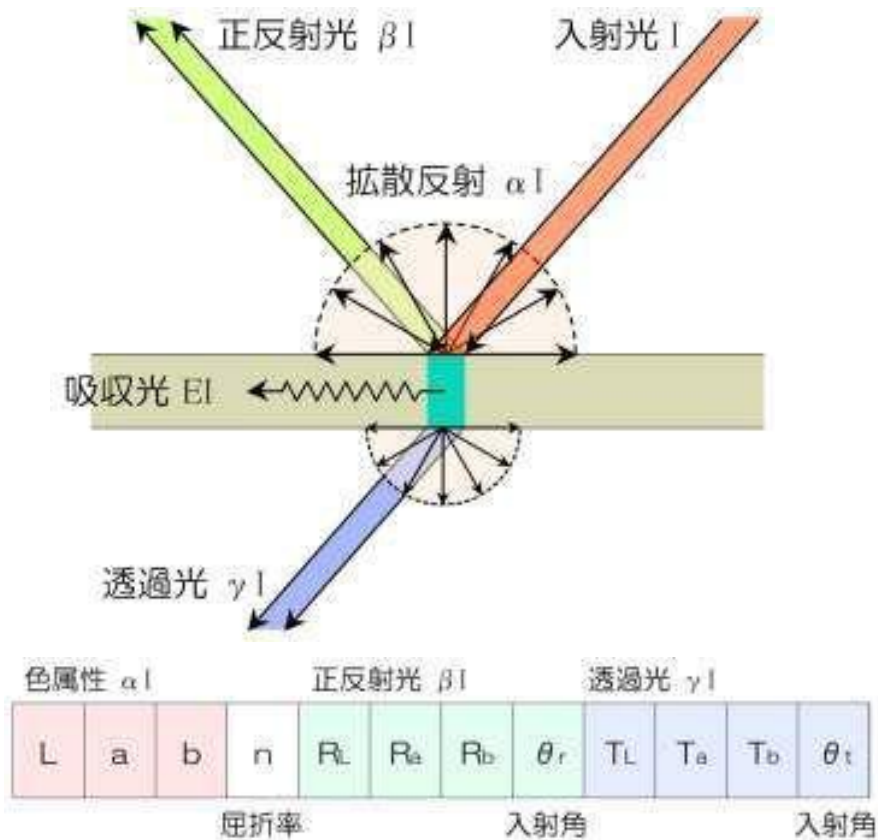
建築仕上材表面の汚れの発生メカニズム



2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

材料の視覚的データモデルの提案

たとえば、材料表面における光の挙動をモデル化する



0.9	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0.3	0.1	0.2	0.3	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.2	0.4	0.4
0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.9	0.7	0.7	0.1	0.9	0.9	0.4
0.3	0.3	0.8	0.1	0.4	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9
0.3	0.2	0.3	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9
0.3	0.2	0.3	0.7	0.1	0.7	0.9	0.9	0.7	0.8	0.8	0.9
0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8
0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.9	0.9	0.9	0.9	0.2
0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.9	0.9	0.9	0.9	0.1
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.9	0.9	0.9	0.2	0.1

反射特性評価へのCV理論の適用

現在、材料表面の**光沢感を示す値**(鏡面光沢度:JIS Z 8741)は客観的光沢(objective gloss)と呼ばれる指標で**心理的な光沢感**とは必ずしも一致しない

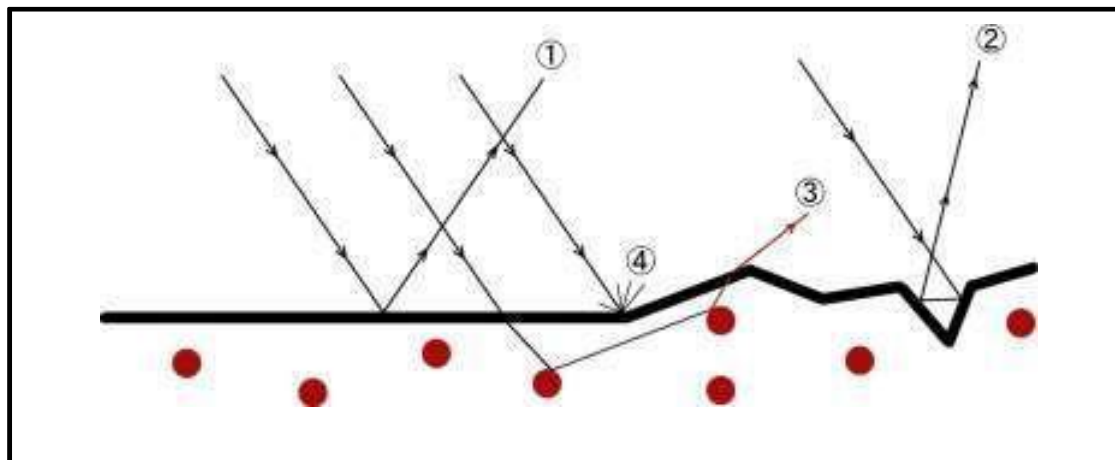


CV(Computer Vision)の分野において用いられる**微小面の凹凸を考慮したTorrance-Sparrowモデル**を外装仕上げ材料の表面における光学特性の評価に適用



量的な指標から、より質的な光沢感の指標を提案できないか検討した

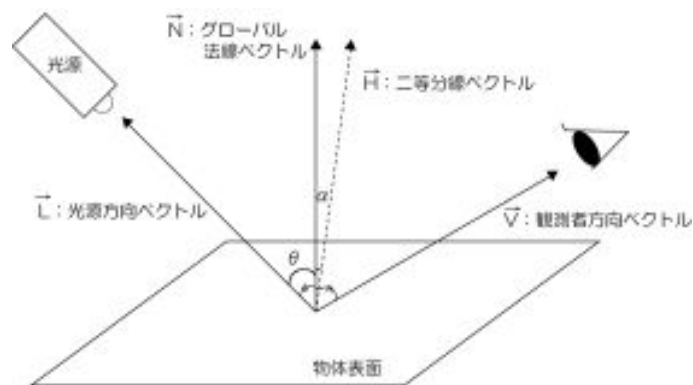
物体表面における反射特性 二色性反射モデル



- ① 鏡面反射成分
(物体表面と空気層間の境界で反射)
- ② 表面で2回以上反射された成分
- ③ 内部反射光成分
(物体表面を通過して色素などの粒子により散乱された後の反射)
- ④ 微細面での回折光成分

ここで②と④の成分は非常に小さいため、
①と③の和によって物体からの分光反射率を定義したモデルを
二色性反射モデルといいTorrance-Sparrowモデルなどの
基礎的なモデルとなっている

2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価 反射特性評価へのCV理論の適用



Torrance-Sparrowモデル

Torrance-Sparrowモデルとは鏡面反射に関するモデルであり、物体表面の各点における微小凹凸面の分布を仮定し、各点での正反射の度合いを考慮

$$I = I_d + k \frac{e^{-\alpha^2/2\sigma^2}}{\cos\theta} + I_a$$

ここで

I_d : 内部反射光の強度

I_a : 環境光の強度

k : 物体固有の鏡面反射を表す定数

σ : 微小表面粗さ

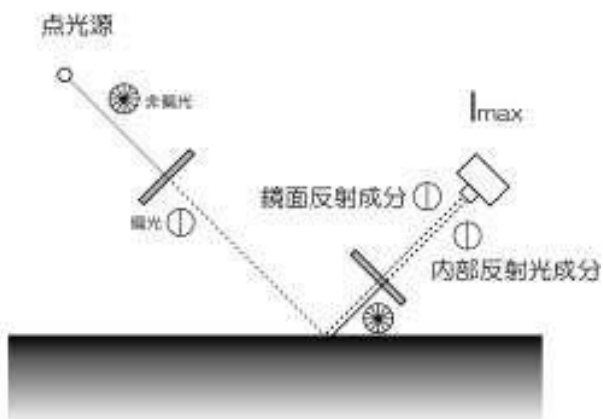
α : グローバル法線ベクトルと、光源方向ベクトルと観測者方向ベクトルの2等分線ベクトルとのなす角

Torrance-Sparrowモデルでは鏡面反射係数のほかに、**表面の幾何学的な情報(微小表面粗さ)**を含むため、**正確に鏡面反射成分を表現することが可能**

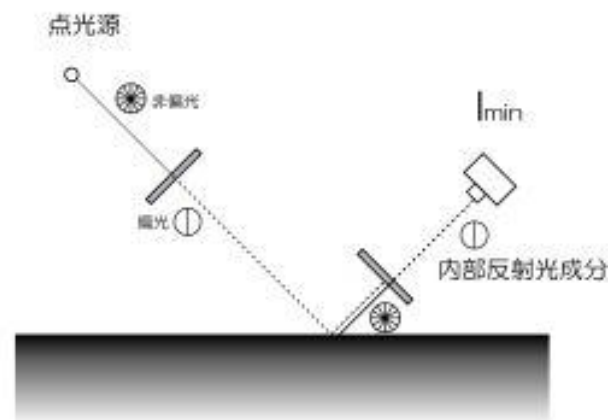
2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

偏光の原理を用いた鏡面反射成分の抽出

(入射側と反射側の偏光角が同じ場合)



(入射側と反射側の偏光角が垂直な場合)



① 点光源を仮定し、光源から放射される光に偏光板を通すことにより、入射光を直線偏光

② 反射光の観測機器の前にも偏光板を設置して角度を変化させ撮影を行い、明度が最大となる画像 (I_{max}) と最小となる画像 (I_{min}) を抽出

③ 鏡面反射成分を $I_{max} - I_{min}$ で分離する

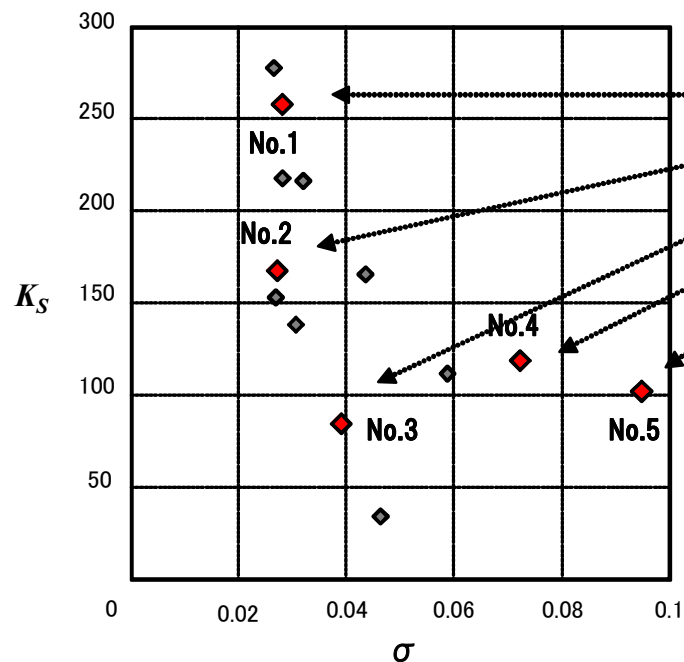
④ 測定によって得られた幾何学的情報 α 、 θ_r 、画像の輝度値 I_s から、下記の簡略化した式を用いて、**鏡面反射パラメータ σ 、 K_s** を求める

$$I_s = \frac{K_s}{\cos \theta_r} e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}}$$

⑤ **鏡面反射パラメータ K_s (鏡面反射光の強度: 人間の眼に与える光沢の刺激の大きさ) と、 σ (鏡面反射光の分布の広さ) を様々な建築材料について測定した**

2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

各種材料の鏡面反射特性の分布

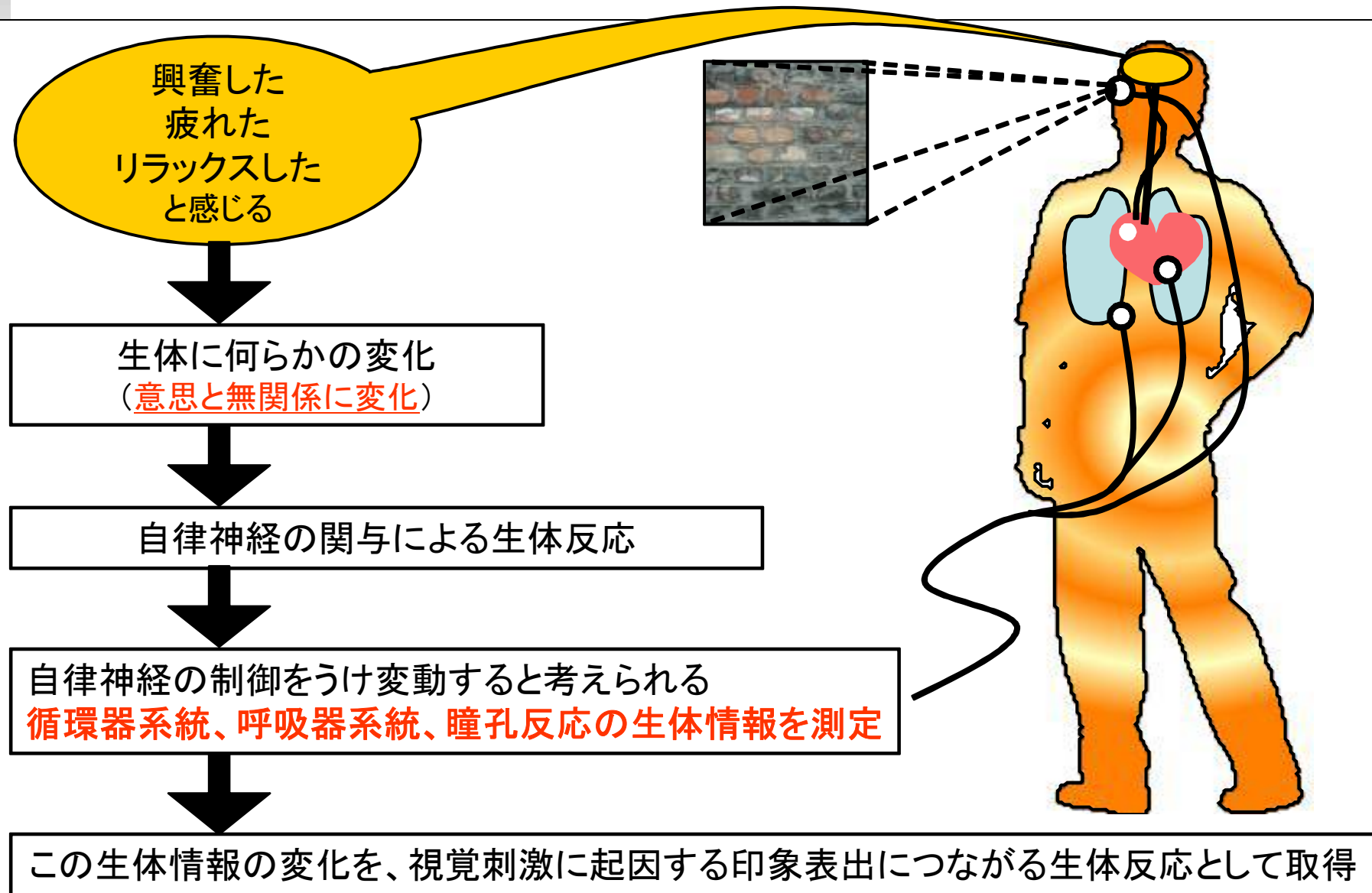


試料	試料名	材質	仕上げ
1	山西黒	花崗岩(御影石)	本磨き仕上げ
2	モカクリーム	砂岩	本磨き仕上げ
3	山西黒	花崗岩(御影石)	水磨き仕上げ
4	DF-W	チタン	梨地肌仕上げ
5	フロストガラス	ガラス	すりガラス
6	オパールガラス	ガラス	平面仕上げ
7	カラーラミセーフ	ガラス	平面仕上げ
8	マーフィル	大理石	本磨き仕上げ
9	コリアン	人造石	平面仕上げ
10	ヴィヴィック	施釉タイル	平面仕上げ
11	タイルカーペット	ビニル	平面仕上げ

σ (鏡面反射光の分布の広さ)が増大するほどより柔らかな光の分布を呈し、
 K_s (鏡面反射光の強度)が大きくなるほど強い光沢を呈することを確認

材料の鏡面反射の強さと凹凸による光の拡散の分布を捉えることが可能となり、反射の特性をより詳細に表現する指標を提案した

2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価 生体情報と印象の関係



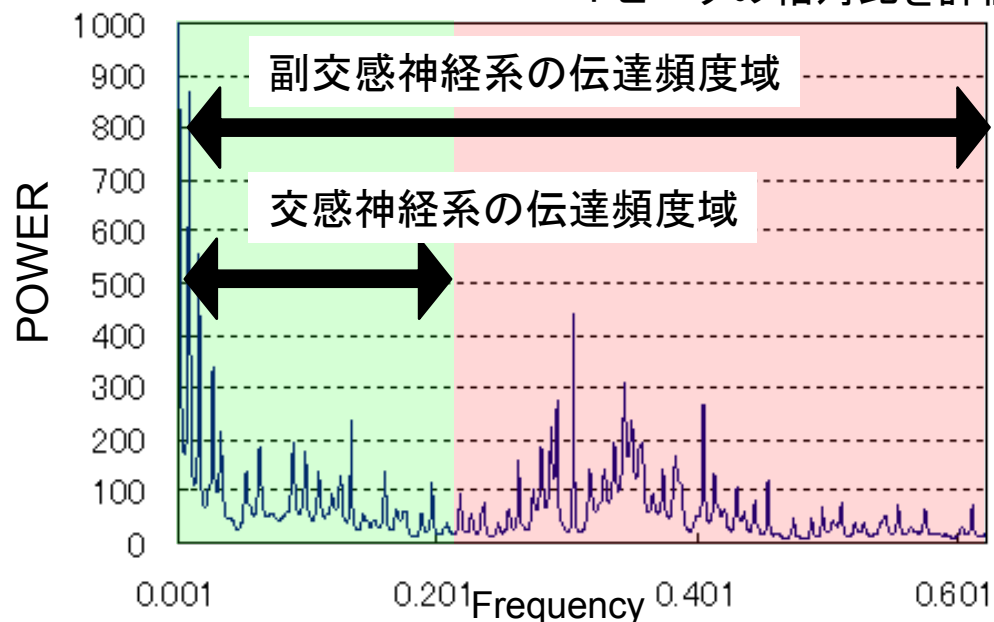
2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

測定する生体情報

- RRI(心拍変動) : 心拍の時間間隔を測定したもの。
SBP(収縮期血圧) : フィナプレス型血圧計で測定したもの。
RESPI(呼吸波形) : 呼吸バンド法によって胸まわりの変位を測定するもの。
瞳孔面積 : 赤外線撮影によって時系列で撮影動画から測定するもの。

RRI(評価項目)

- 高周波数域HF (0.15 Hz) : 副交感神経との関連があるとされている
低周波数領域LF (0.04-0.15 Hz) : 交感神経、Mayer Waveと関連
LF/HF : ピークの相対比を評価するための評価項目

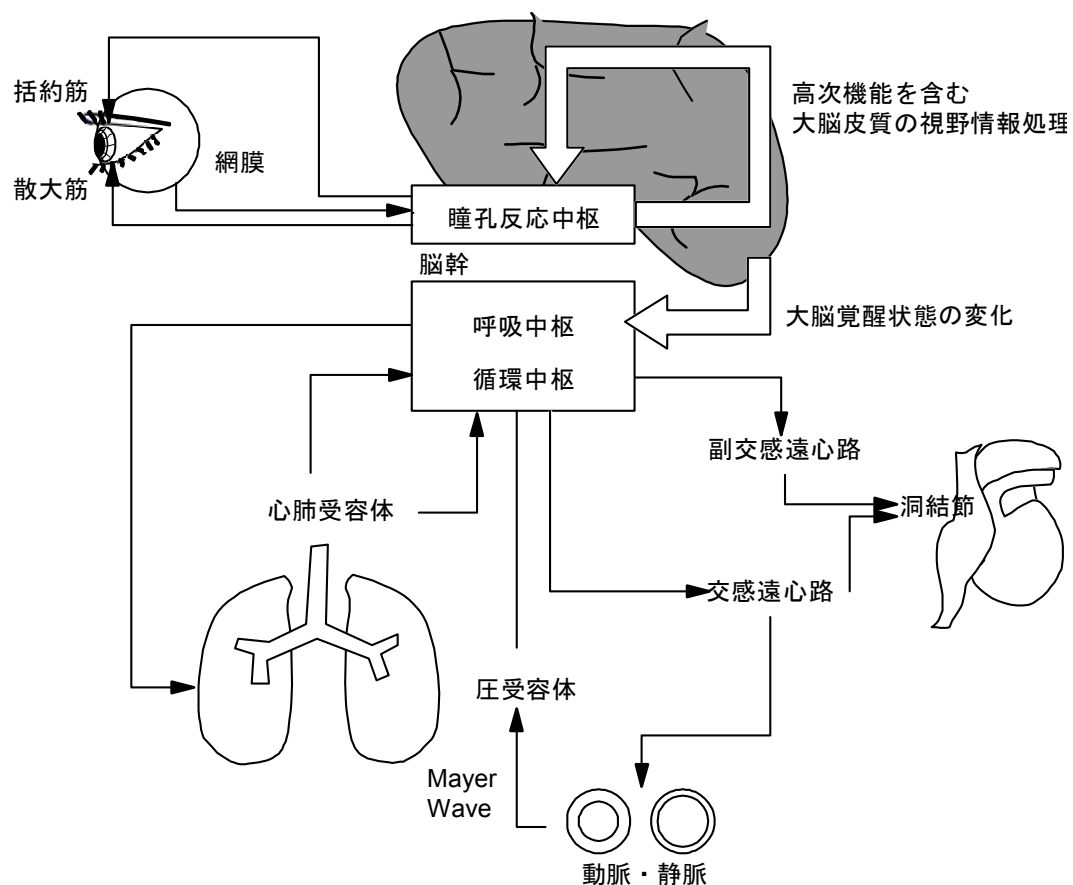


RRIの周波数分布

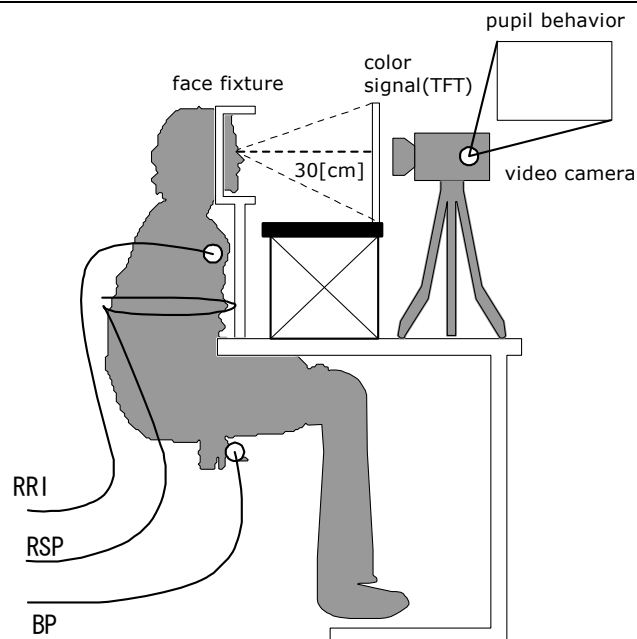
2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

瞳孔・呼吸・循環器官制御における自律神経の仮説モデル

- ① 視覚刺激は瞳孔反応中枢から大脳皮質の視覚野を經由し、視蓋前域を通じて瞳孔を変化させる。
- ② 視覚情報によって変化した大脳皮質によって、脳全体の覚醒レベルが変化し、これによって、一時的な呼吸・循環器官に変動を与え、生体情報の変化として現れる。



2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価 実験概要



測定項目：
 RRI (1.6times/sec)
 RSPI(1.6times/sec)
 SBP (1.6times/sec)
 瞳孔半径 (30times/sec)
 瞳孔中心座標(30times/sec)

モニターの**信号刺激**を見続けることによって生じる生体情報変化を取得する。

刺激信号の水準

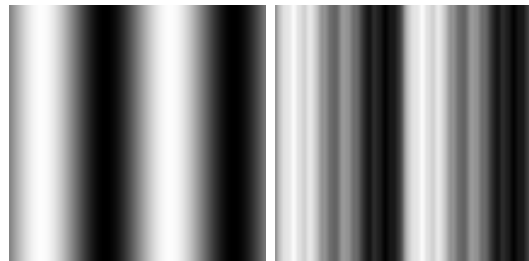
	信号呈示	試験体	目的
実験1	10秒間隔で信号反転 合計2分間	色タイル → 黒背景 正弦波 → ゆらぎ関数	信号の切替が、生体にスタートル反応・即時的な反応を起こすかの検証
実験2	5分間凝視	色タイル 縞・ゆらぎ模様	刺激による経時的・累積的な生体反応を取得する

2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

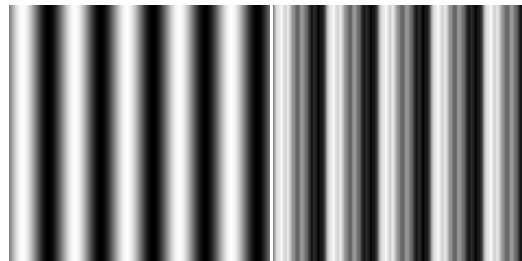
実験概要

試験体の種類

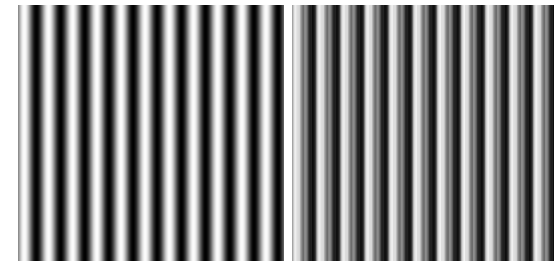
縞・ゆらぎ模様(1つの正弦波にゆらぎ関数を付加したもの)



2[HZ]



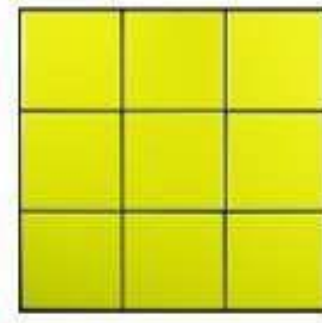
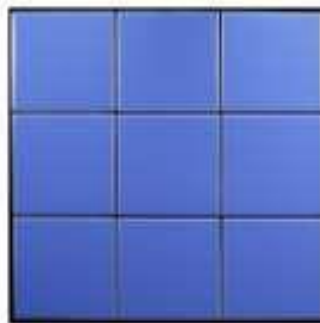
5[HZ]



11[HZ]

$$\text{ゆらぎ関数} \\ f_{fluctuations} = \sum_{j=0}^{\infty} 2^{-j} \sin(2^j \times f_{base})$$

色タイル



実験概要

被験者について

実験者数累計:36人(20-31歳の男女)

試験環境

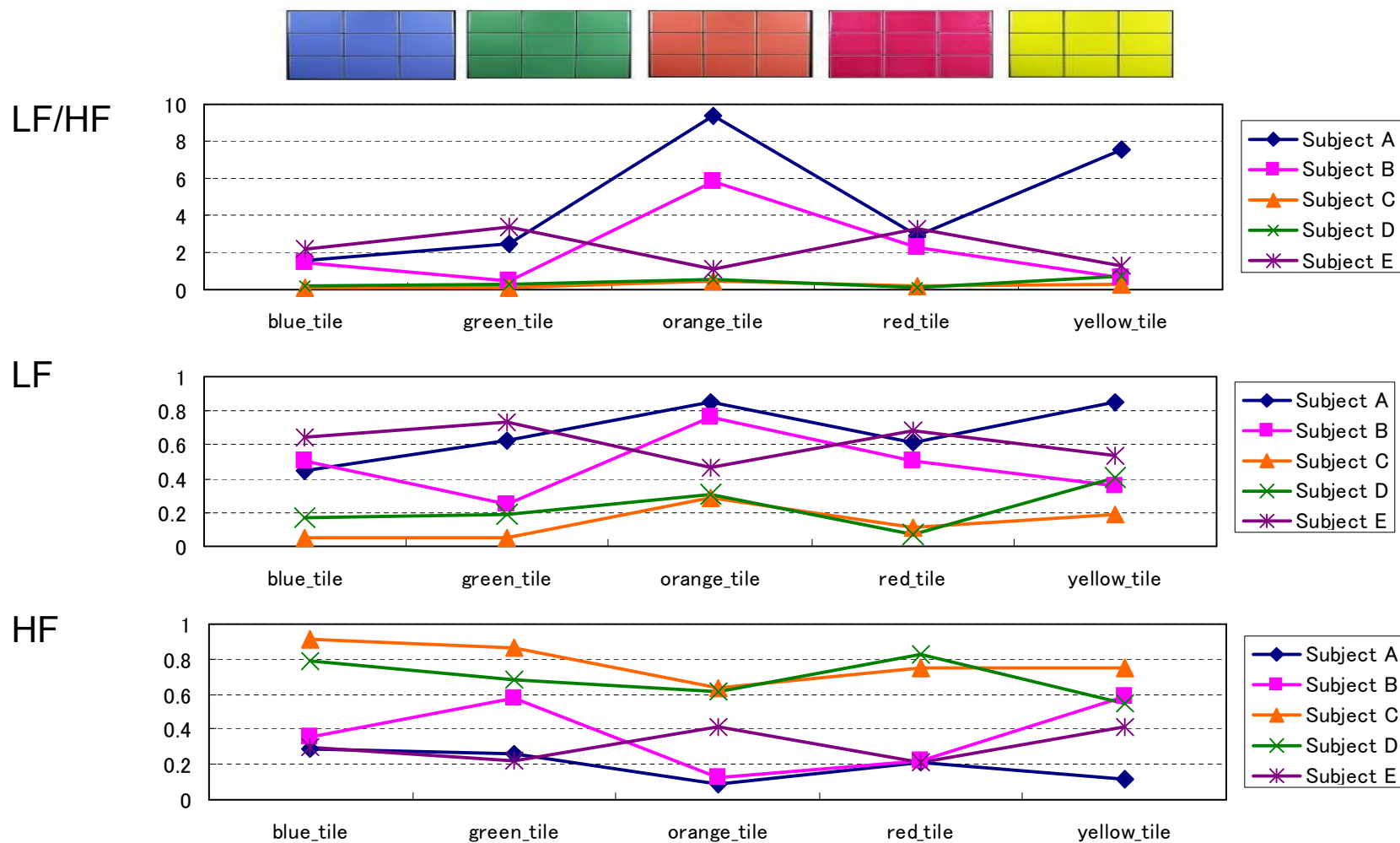
- ・ 毎回同じ居室の同じ場所に設備を設置し、室温20度前後に保たれた居室内で実験
- ・ メガネ、コンタクトを使用している人は申告してもらった。
- ・ コンタクトレンズに関しては、瞳孔を大きく見せる機能のあるものや、色つきレンズはしてもらわないようにした。
- ・ 試験前に、カメラチェックを行い、まつげが長い人はビューラーで上に上げてもらった。
- ・ 被験者ごとに試験を行う順番はランダムに代えた。
- ・ 試験と試験の間の時間は極力、自由にしてもらい、十分な休みが取れたところで試験を再開した。(試験時間2分につき5分から10分休憩)
- ・ 食後3時間以上経過した状態を確認した。
- ・ 持病、体の調子、前日の睡眠時間などを確認した。

2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

実験1-1（10秒間隔で色タイル→黒バックの繰返し呈示）

被験者:5人 MemCalcによる周波数解析の結果(2分間全体)

➡ 被験者ごとに個人差があり、呈示信号ごとの生体反応特徴はない。

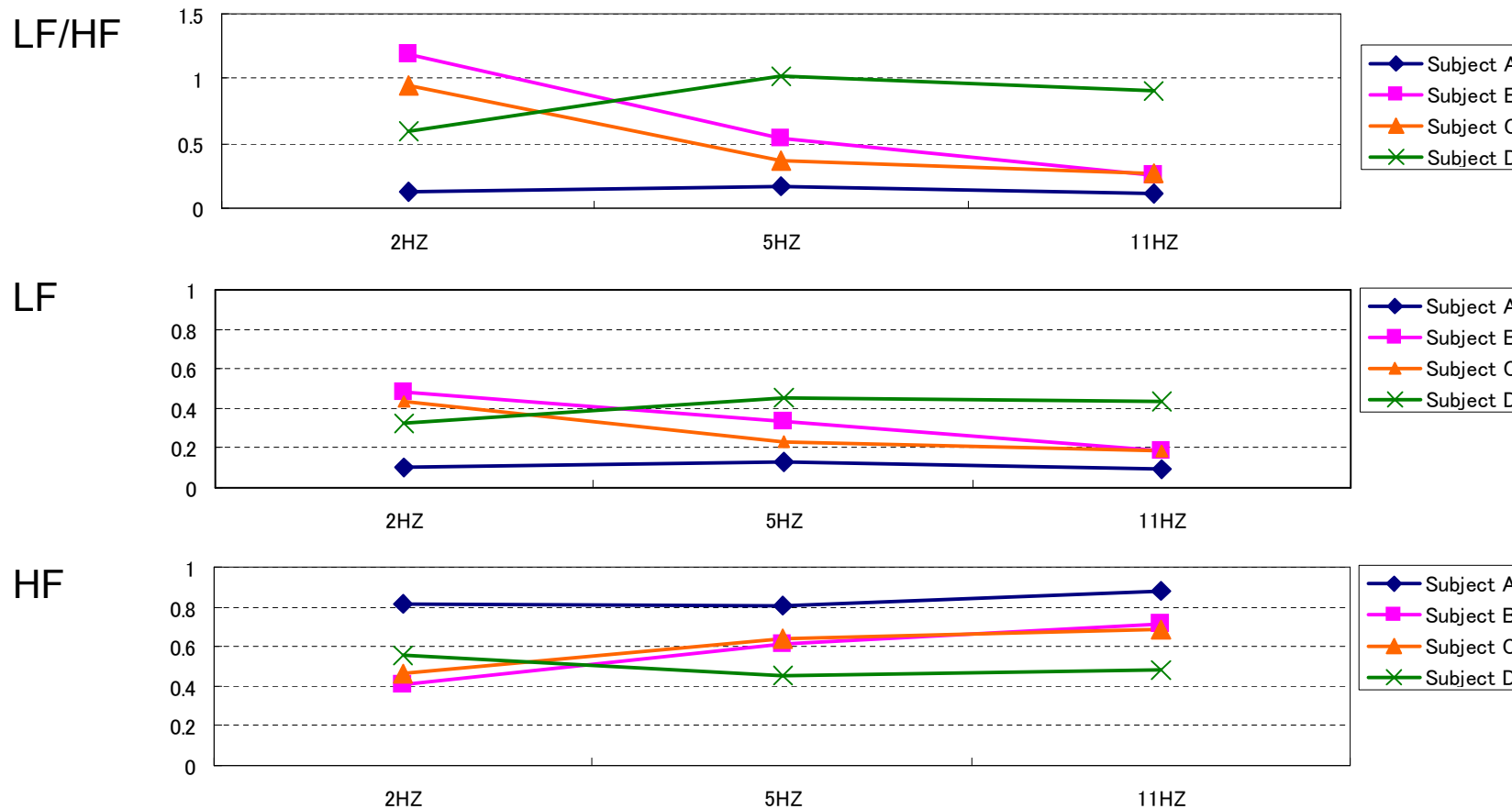
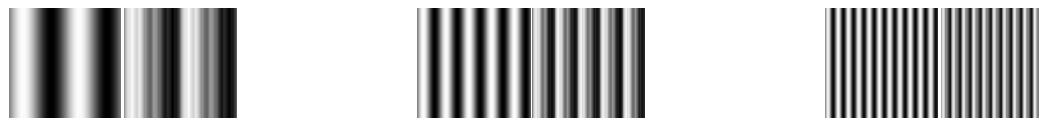


2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

実験1-2 (10秒間隔で正弦波模様→ゆらぎ模様の繰返し呈示)

被験者:4人 MemCalcによる周波数解析の結果(2分間全体)

➡ 被験者ごとに傾向が異なる。



2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

実験1-2 (10秒間隔で正弦波模様→ゆらぎ模様の繰返し呈示)

MemCalcによる時間-周波数解析(40秒ごと・80秒間の時系列データの周波数分布)



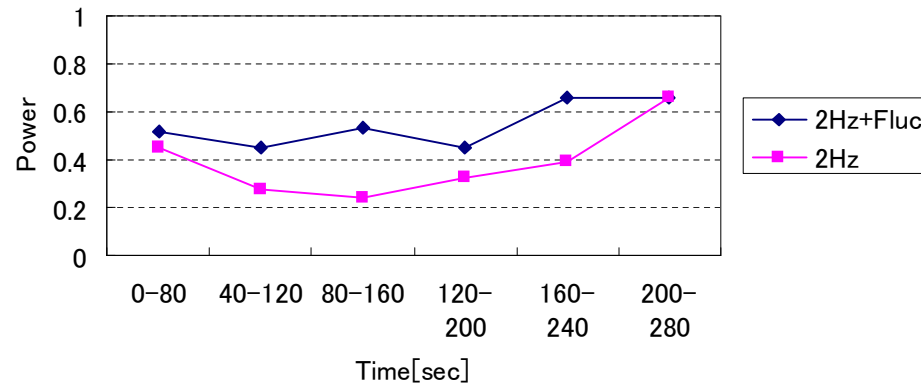
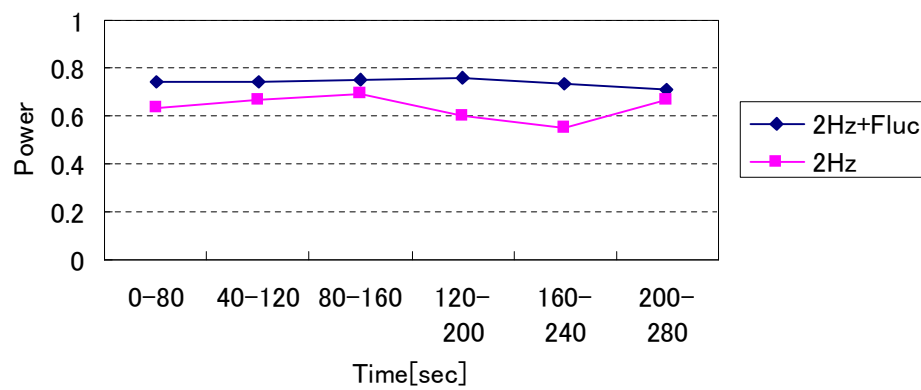
正弦波2HZの縞模様



HF : (正弦波模様の信号) < (ゆらぎ関数を加算した信号)

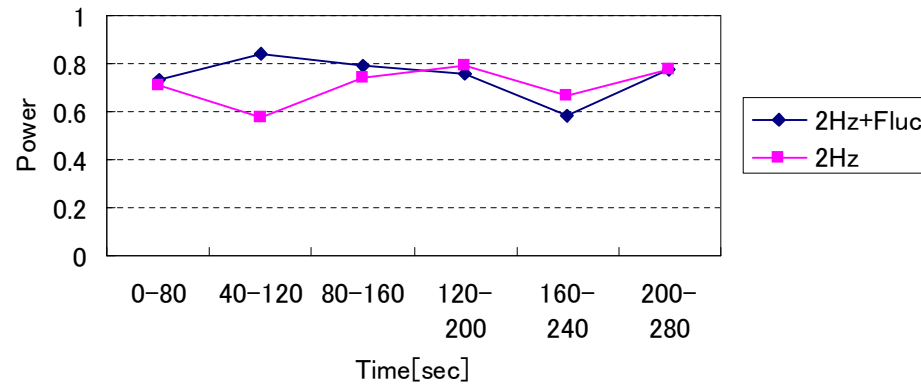
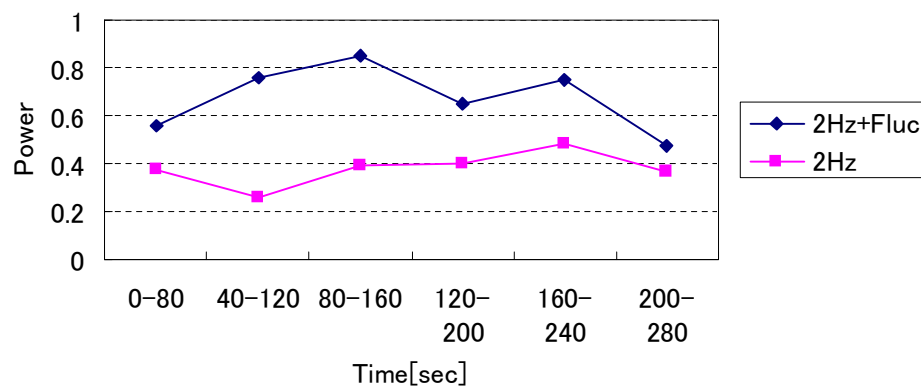
Subject K

Subject N



Subject O

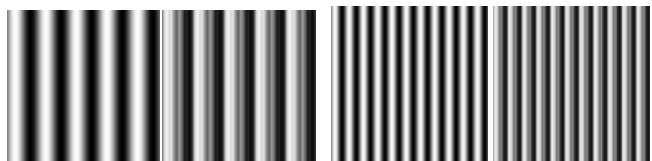
Subject T



2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

実験2-1（5分間凝視：正弦波模様）

MemCalcによる時間-周波数解析(40秒ごと・80秒間の時系列データの周波数分布)

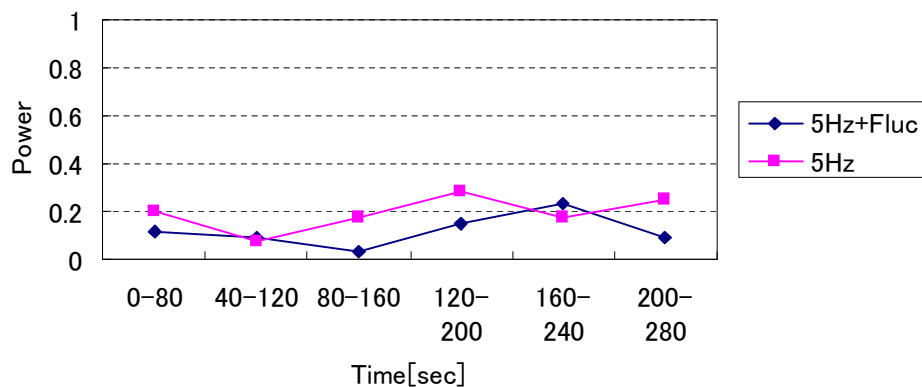


正弦波5,11HZの縞模様

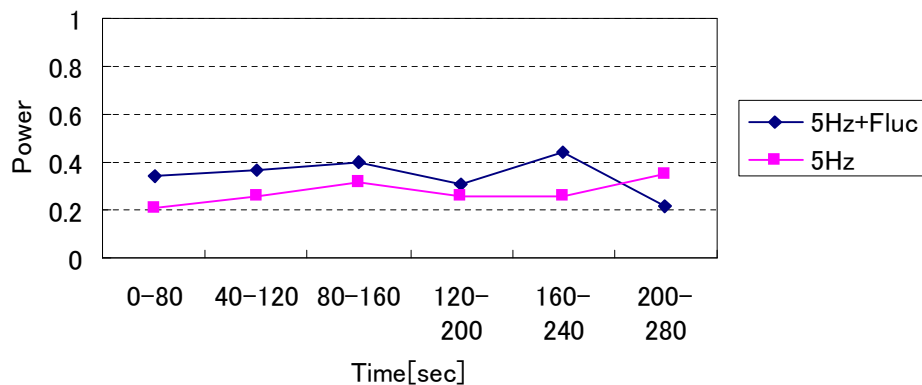


LF、HF、LF/HF：被験者ごとに挙動が異なるが
あまり単波模様とゆらぎ関数模様で差がでてこない。

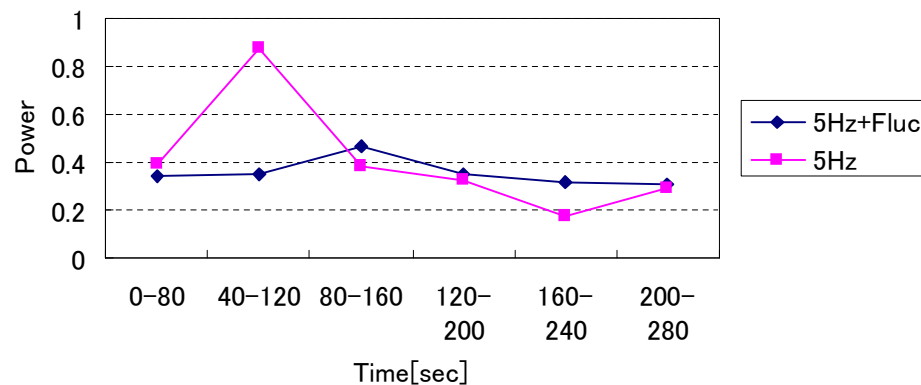
Subject K



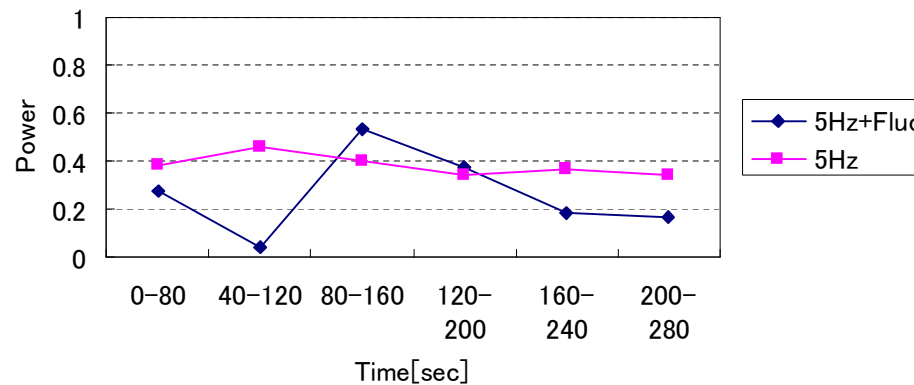
Subject O



Subject N



Subject T



2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

実験2-1（5分間凝視：正弦波模様）

MemCalcによる時間-周波数解析(40秒ごと・80秒間の時系列データの周波数分布)

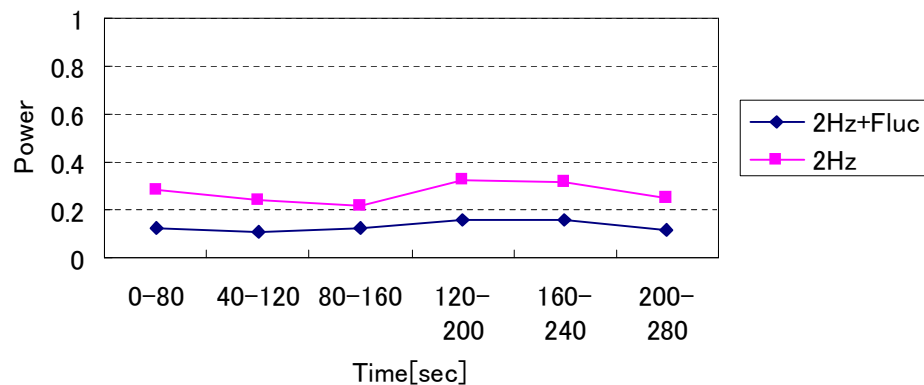


正弦波2HZの縞模様

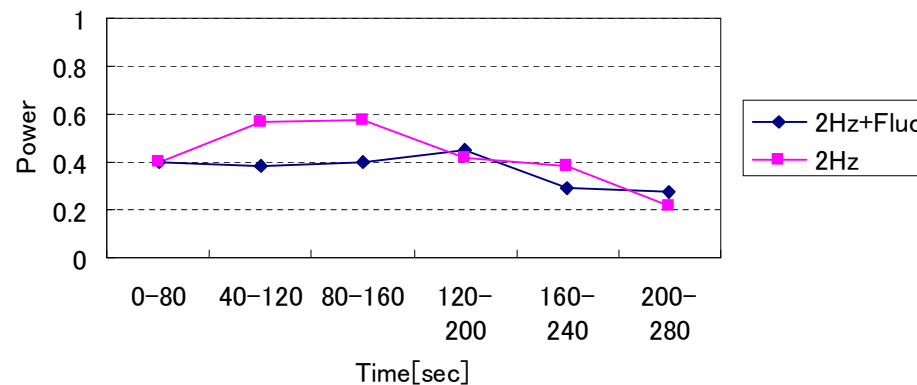


LF : (正弦波模様の信号) > (ゆらぎ関数を加算した信号)

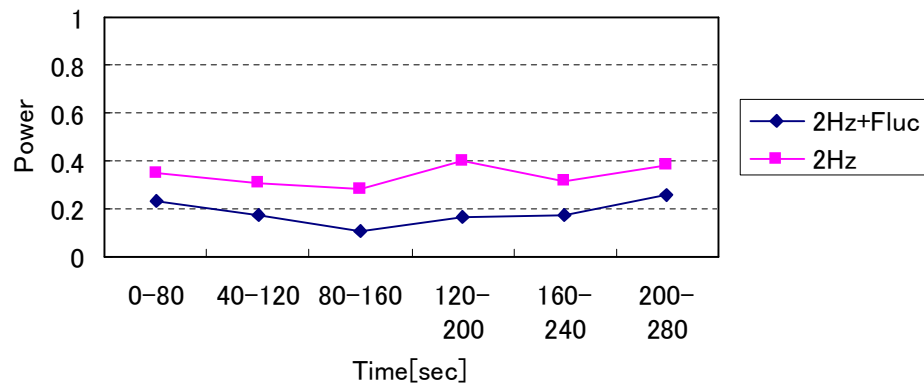
Subject K



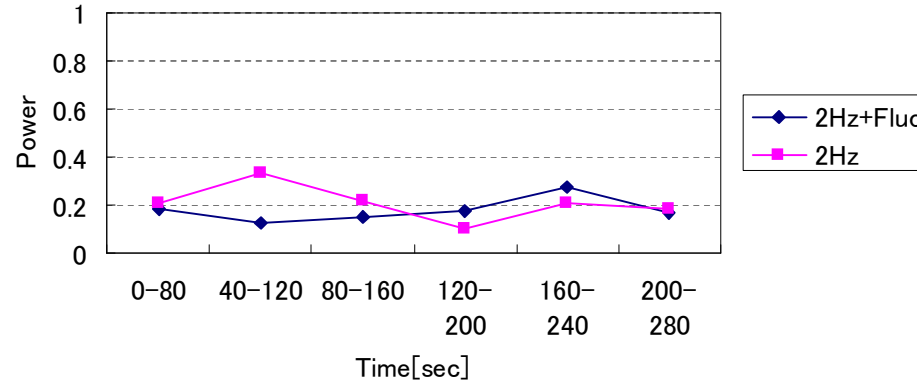
Subject N



Subject O



Subject T



2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

実験2-1（5分間凝視：正弦波模様）

MemCalcによる時間-周波数解析(40秒ごと・80秒間の時系列データの周波数分布)

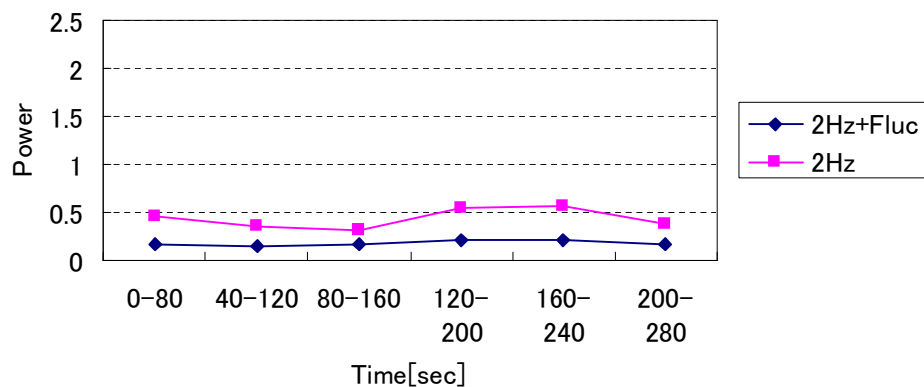


正弦波2HZの縞模様

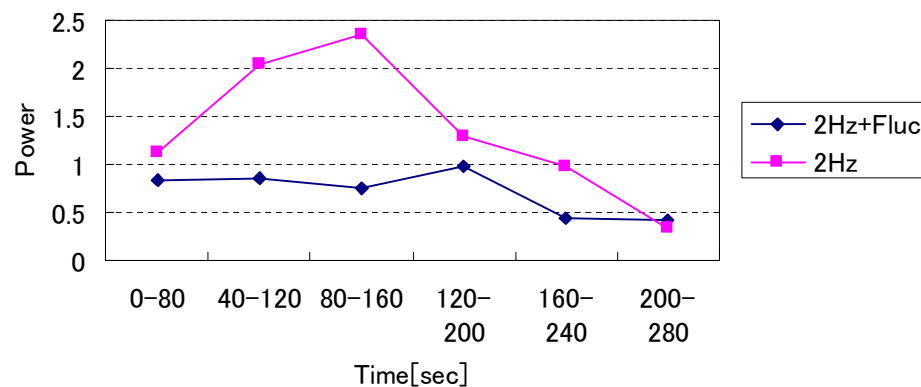


LF/HF : (正弦波模様の信号) > (ゆらぎ関数を加算した信号)

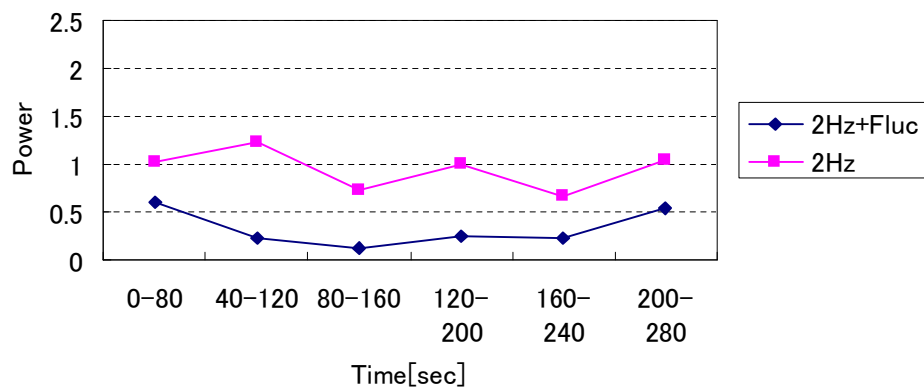
Subject K



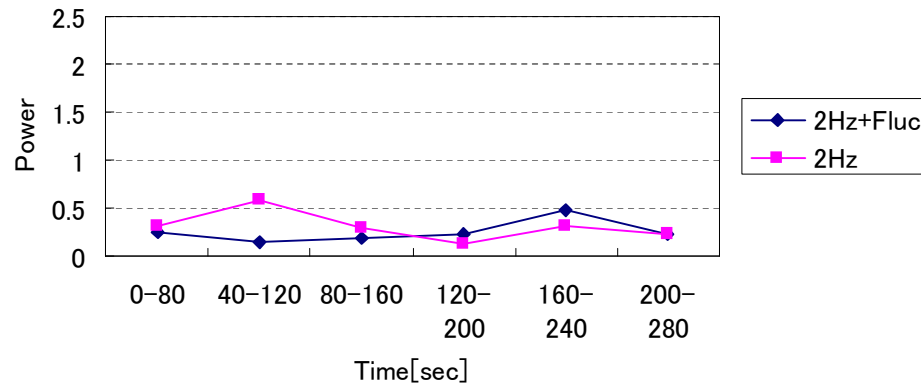
Subject N



Subject O



Subject T



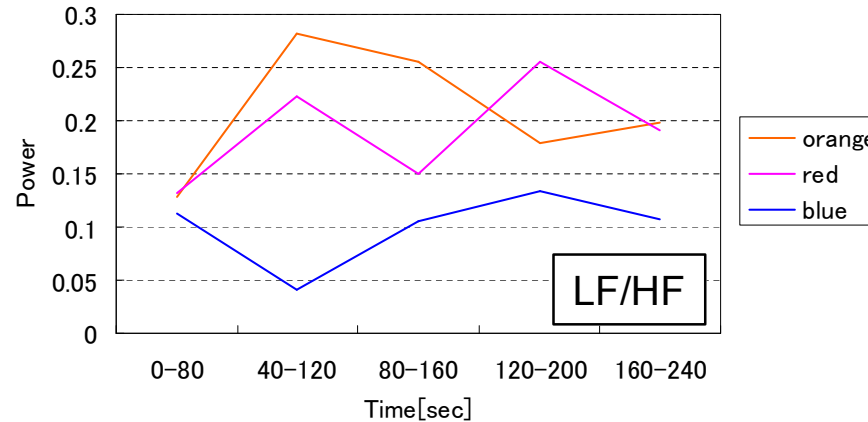
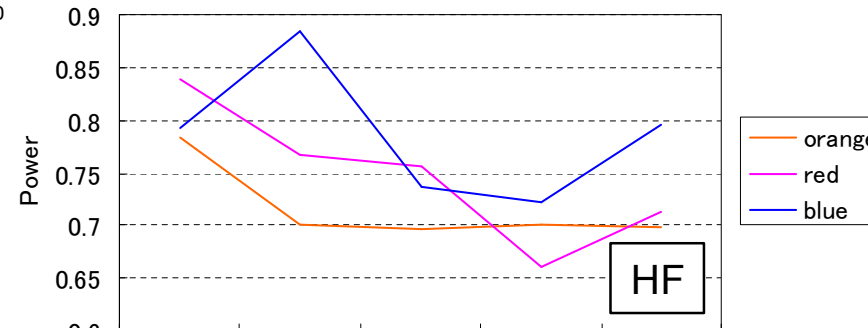
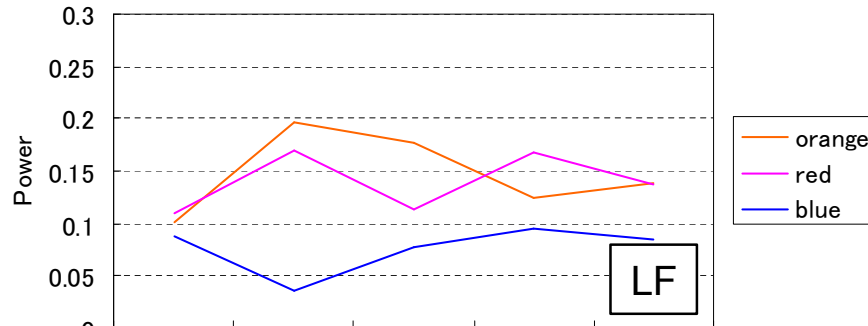
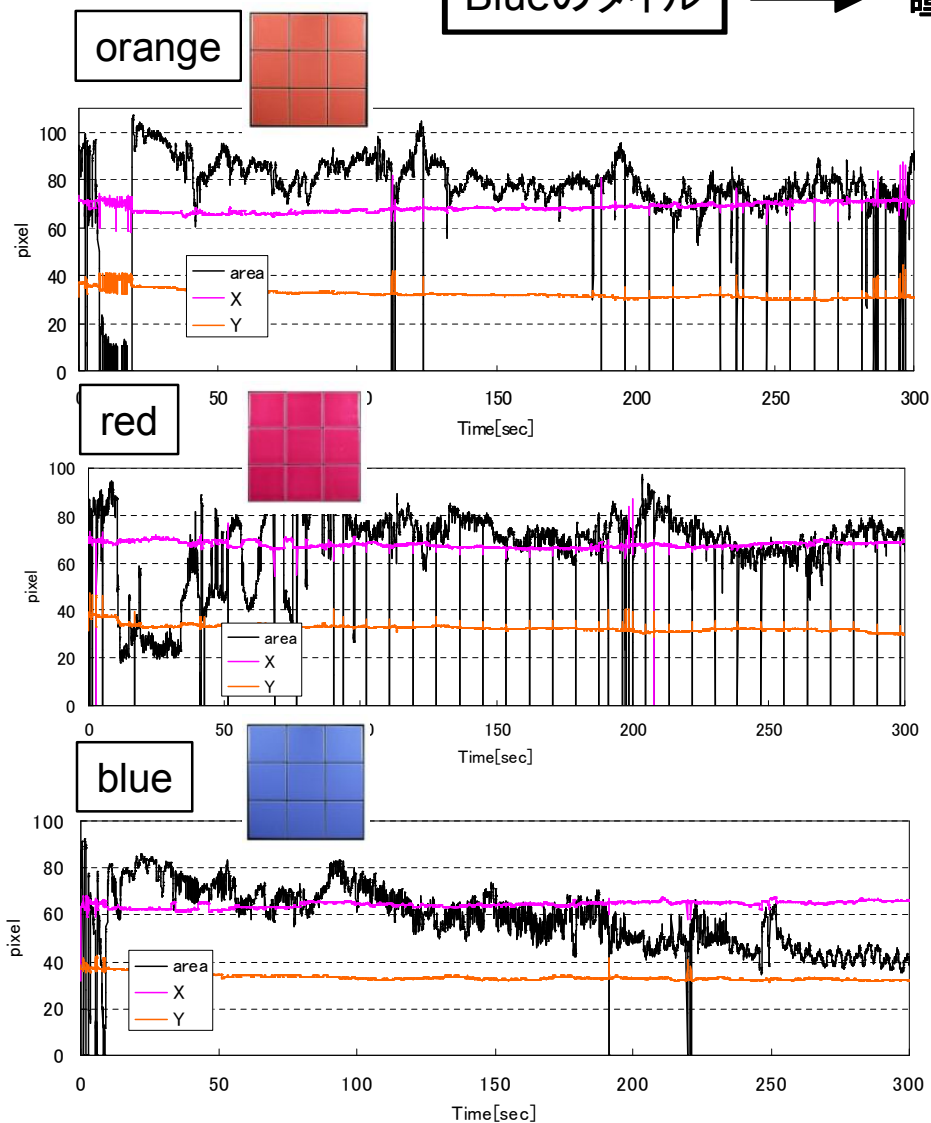
2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

実験2-2（5分間凝視：被験者R・色タイル）

Blueのタイル



瞳孔面積縮小、LFとLF/HFが低い



ここまでの実験のまとめ

結果

1. 構成しているスペクトルが異なる視覚刺激を被験者に呈示した場合、その**刺激の差異によって、生体情報に変化が現れる**ことを確認した。
2. 嗜好性の高い画像を長期的に見ることにより、瞳孔径とRRIにおいて、副交感神経側に優勢であることを示す傾向が現れた。このことは、**視覚刺激と脳の視覚野、その生体反応としての心拍変動が連動的に作用し、嗜好性の高い視覚刺激に対して、選択的な挙動を示している**ことを示唆している。

➡ 一般的な人間の挙動というものを示すことは出来ないかも知れないが、**建材を見たときの言葉とは違う個人個人の生体情報を元にした、視覚刺激に対する適性を評価する手法**としての利用可能性

課題

➡ 被験者数、再現性、個人的差異などを踏まえると、さらなる再現性の検証が必要である。また建材を試験体に用いた生体情報変化を検証する必要がある。

2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

実験3-1（短期色刺激の切り替え）

色刺激を3-7秒のランダムな間隔で切り替え、切り替えによるRRIの切り替え反応を取る。

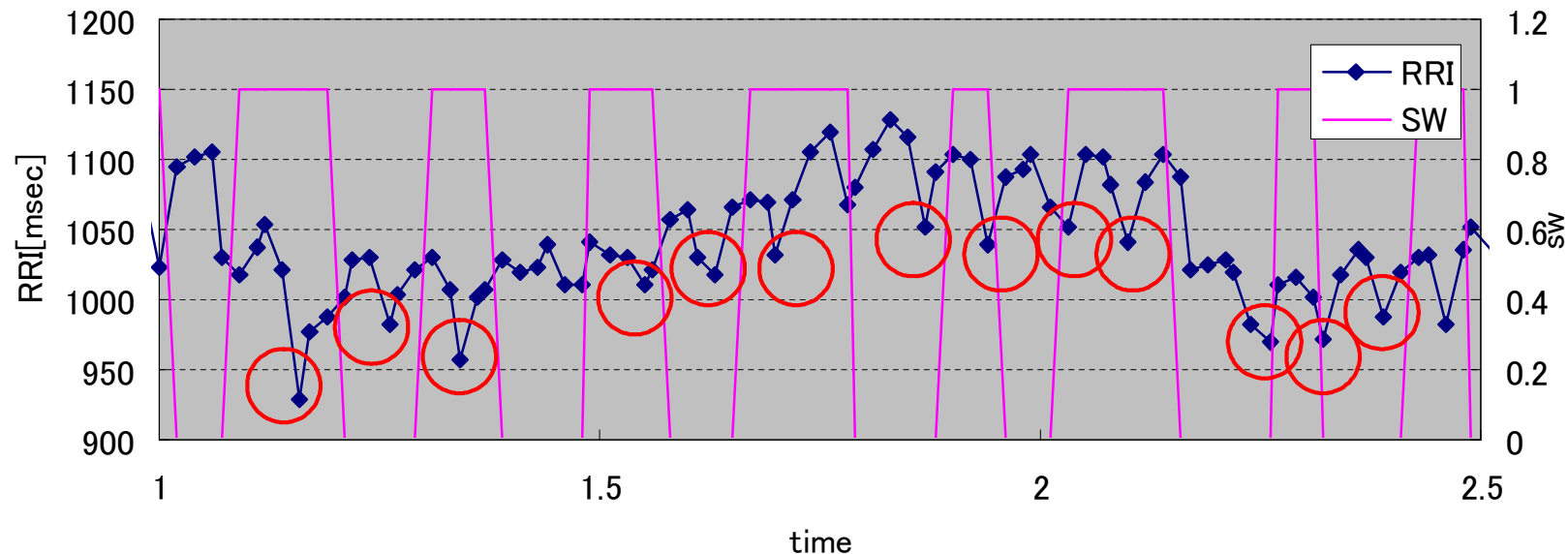
被験者3人(20代男性2人、女性1人)

試験時間: 被験者一人について、40回の切り替えを行った。

評価方法:

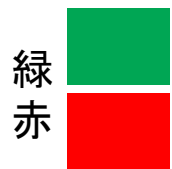
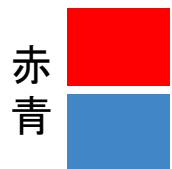
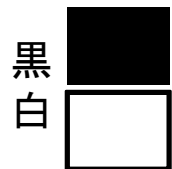
RRI、瞳孔半径を測定し、切り替えによって起こったと思われる、

ハイパスをかけて、0.15HZ以上の急峻な心拍変動のパワースペクトルの総和を算出。

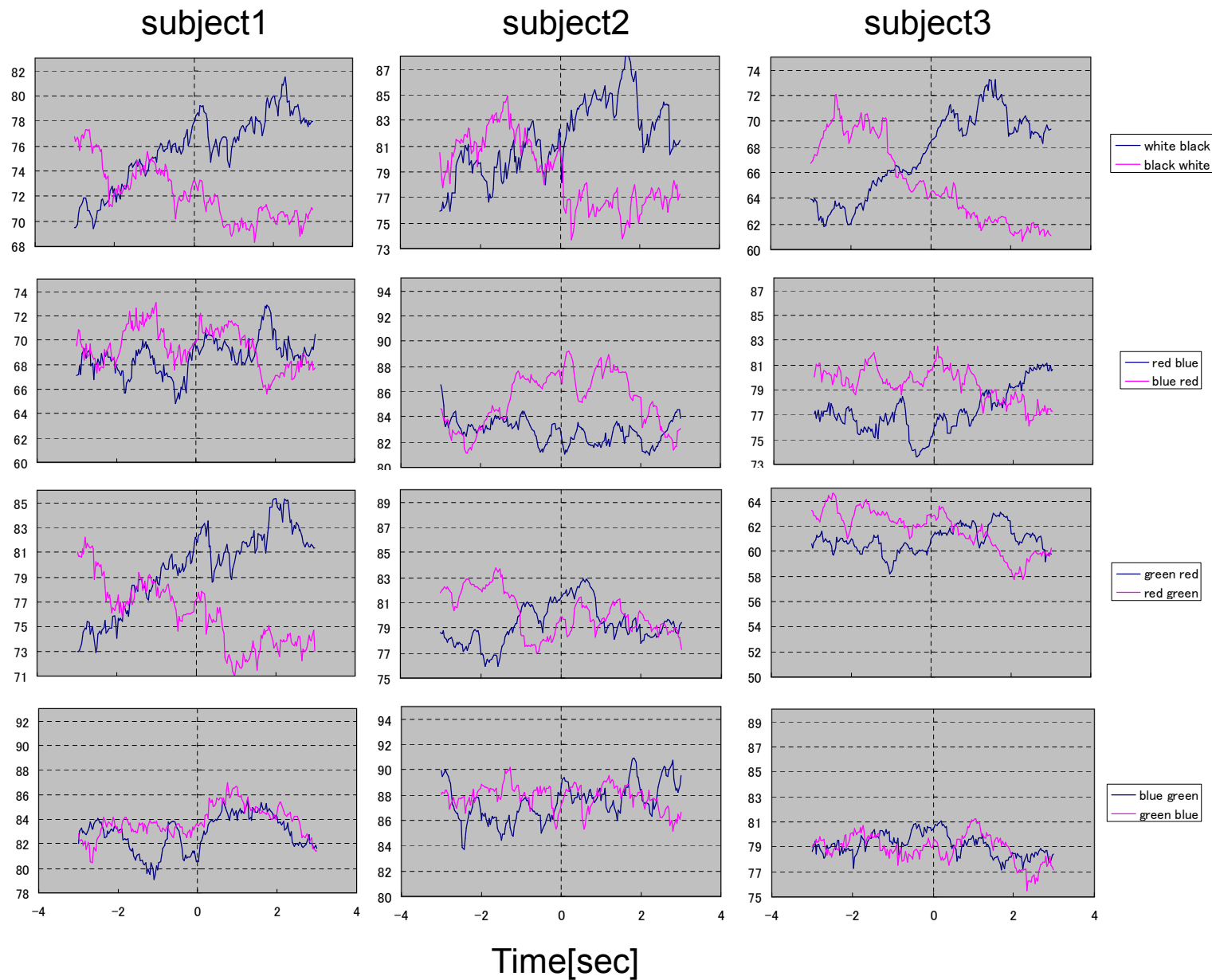


2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

実験3-1 (短期色刺激の切り替え-瞳孔面積)

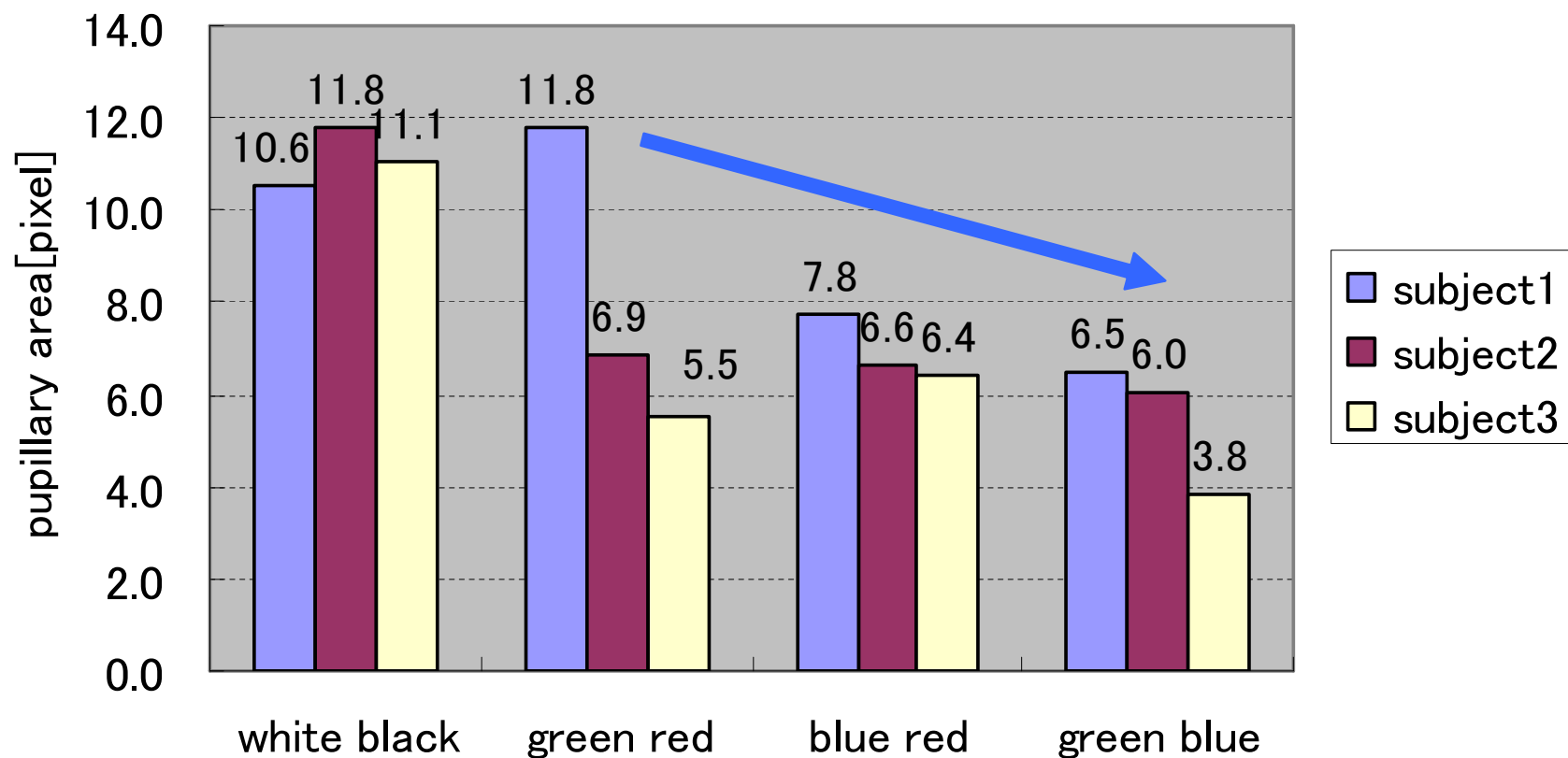


Pupillary area[pixel]



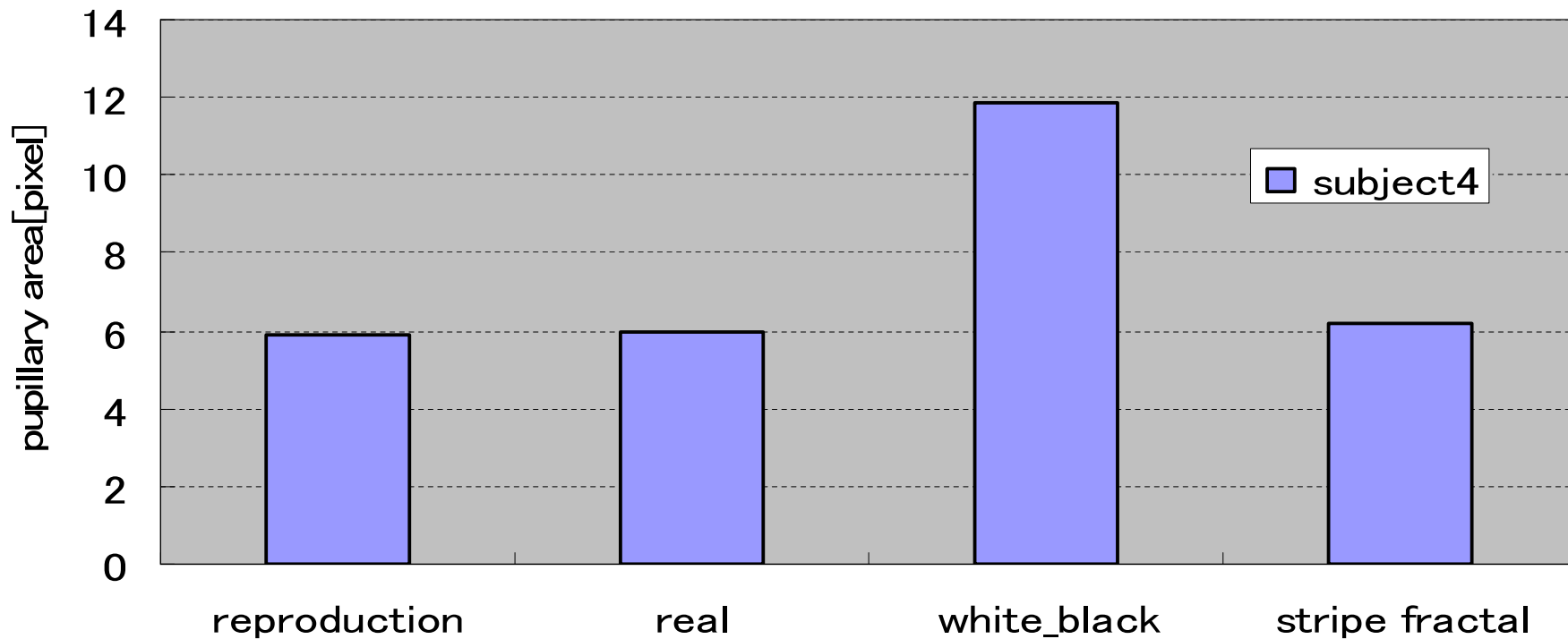
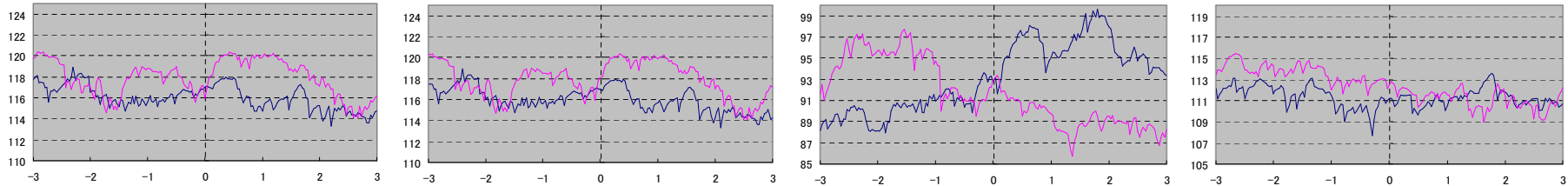
実験3-1（短期色刺激の切り替え-瞳孔面積）

切り替え前後3秒間の瞳孔面積変化(オンオフ・オフオンの最大値-最小値の平均)



2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

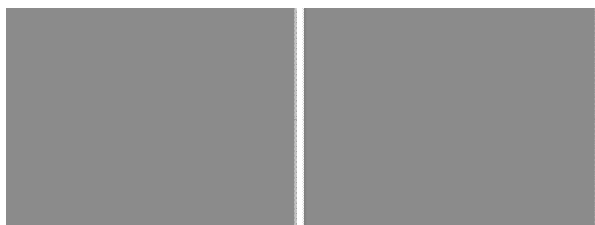
実験3-2（短期色刺激の切り替え-瞳孔面積）



2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

実験3-3（短期色刺激の切り替え・建材のみ）

0. baseline



1. real to reproduction



red tile

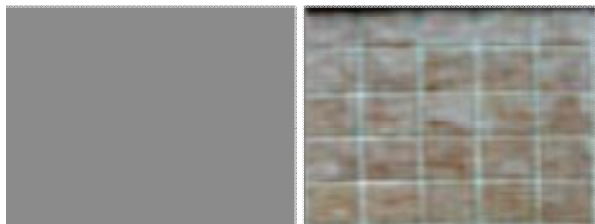


red small tile

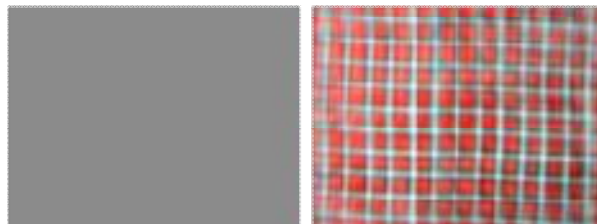


red+green tile

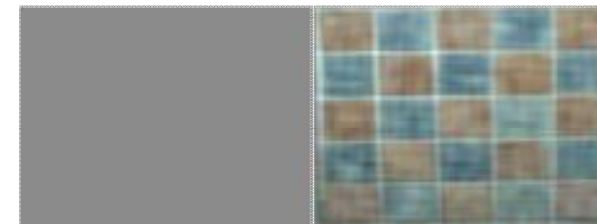
2. gray to reproduction



red tile



red small tile



red+green tile

被験者 : 6人(男4人、女2人(23-33歳))
時間間隔 : 8秒~13秒で合計14回切り替え
試験体 : ベースラインを考慮した建材試験体と画像
(輝度統一済)
評価方法 : 瞳孔半径を測定し、切り替えによって起こったと思われる面積変化を加算平均し、各試験の(瞳孔面積変化量)-(ベースラインの試験の面積変化量)を算出して評価。

2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

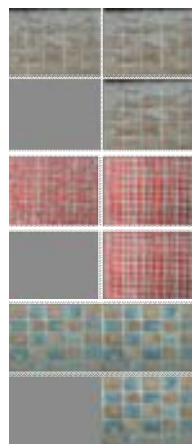
実験3-3（短期色刺激の切り替え・建材のみ）

結果まとめ

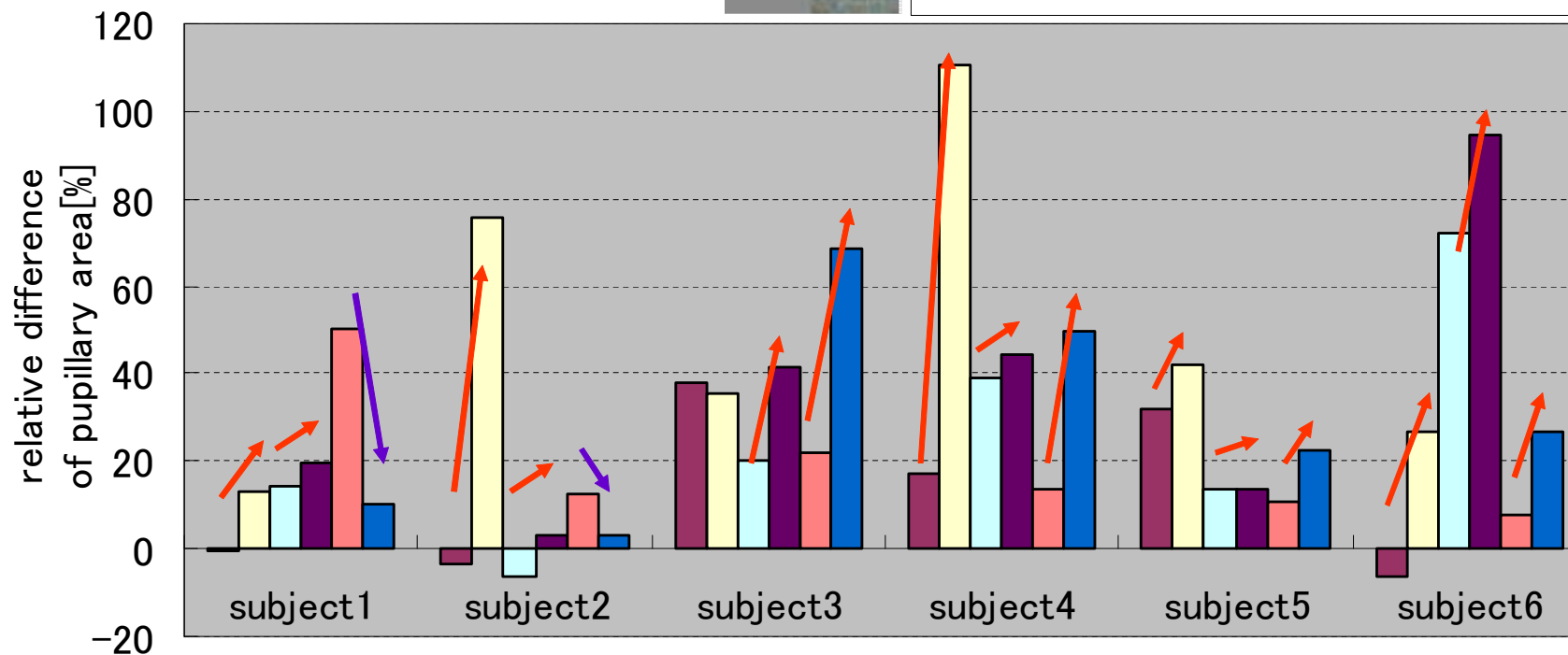
1. 全被験者で実画像と再構成画像の瞳孔面積差よりほぼ同じ又は増加傾向:



2. ばらばらの傾向を示したもの:



- real+reproduction(red tile)
- gray+red tile
- real+reproduction(red small tile)
- gray+red-small
- real+reproduction(red-green tile)
- gray+red-green tile



2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

まとめ

実験3-1

- ・心拍変動のパワースペクトル量には各被験者に共通な傾向はみられなかった。
- ・瞳孔面積の変化は、輝度だけでなく色の変化によっても生じることが確認され、
緑→赤や赤→青のように、補色関係に近いものほど面積変化が大きいことが確認された

実験3-2

- ・黒→白の切り替えによる瞳孔面積変化が最も大きい。
- ・実画像と再構成画像の瞳孔変化は類似性が高い。すなわち、瞳孔に関しては再構成画像によってテクスチャ成分を調整しても実画像と同等の効果が得られる。

実験3-3

- ・輝度を統一した無彩色信号(灰色)と建材の再構成画像の切り替え試験において、
瞳孔が実画像と再構成画像の瞳孔面積変化量よりも大きく変化した。
被験者全員に共通して変化する試験体(赤タイル系)と
被験者ごとに異なる挙動を見せた試験体(赤・緑タイル)が存在した。

2. 意匠性能・視覚的印象の定量的評価

結論

最終的に建材の色と模様の違いによって瞳孔面積変化が変化し、被験者全体に共通的に変化する刺激と被験者ごとに異なる刺激が存在することを確認した。これは

入力: 視覚情報

出力: 人間の生体反応としての瞳孔

の入出力関係が存在し、人間が「比較的共通に持っている入出力関係」と、「被験者ごとに異なる入出力関係」によって構成されていることを示している。

何かを見ることによって起こる瞳孔の誘発反応が、材料や空間などの視覚情報が人間に与える第一的な初期作用とすると、この初期作用の変化に注目することによって、

共通の入出力関係は、

赤色が、一般的に、「刺激的」とか「警告・注意」というイメージを付与しやすく、青色が、「クールだ」とか落ち着いたイメージを付与しやすいように

多くの人間が共有しやすい初期的な印象を評価できる可能性がある。

異なる入出力関係は、それぞれの嗜好性を評価できる可能性がある。

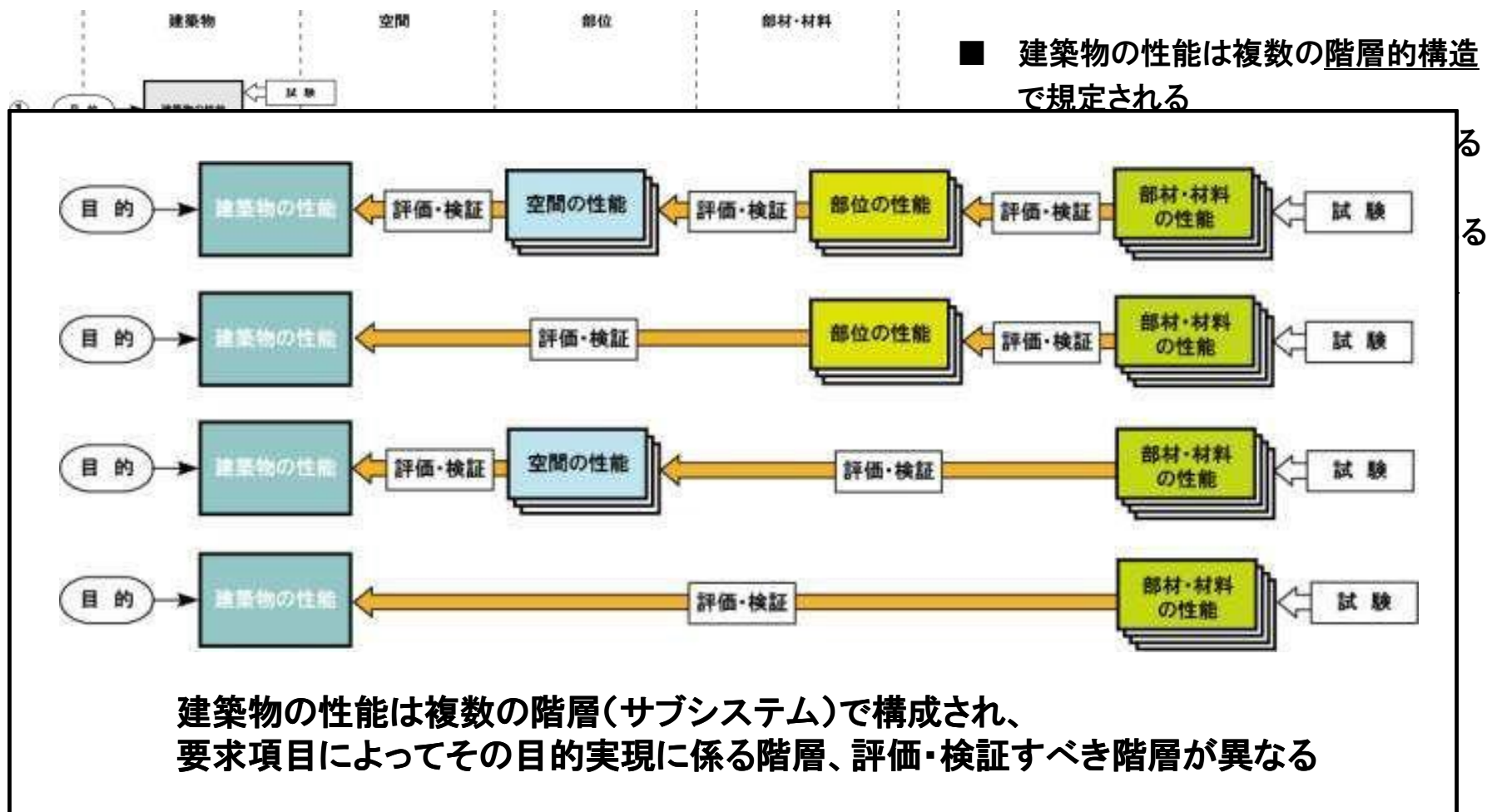
今後は、再現画像によって抽出された画像の特長量と、瞳孔面積を中心とした生体情報変化を組み合わせることによって、その関係性をできるだけ多くの被験者について検証することが求められる。

以上、本研究は、材料の表面の視覚情報をモデル化し、それが人間に与える影響を生体情報の変化量として定義するためのフレームワークについて研究を行った。

3. 性能指向型材料設計の体系化と支援システムの構築

3. 性能指向型材料設計の体系化と支援システムの構築

建築物の階層的表現と性能

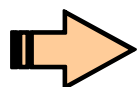


3. 性能指向型材料設計の体系化と支援システムの構築

多基準最適化システムの構築

従来の最適化・設計手法

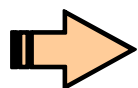
- エンジニアによる判断
- 設計者による判断
- エキスパートシステム



経験的・推論的な最適化・設計行為

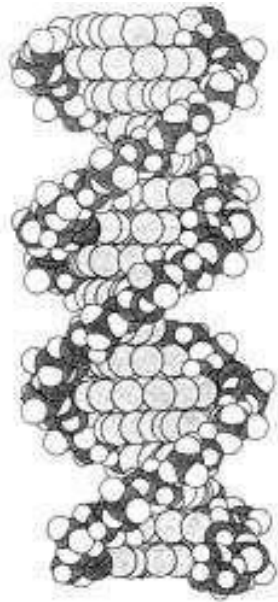
現在の最適化・設計手法

- 性能論に立脚した設計手法
- コンピュータシミュレーションによる最適化手法の適用
 - ・ 遺伝的アルゴリズム(GA)、免疫的アルゴリズム(IA)
 - ・ 人口知能(AI)
 - ・ ニューラルネット など



理論的・研究的な最適化・設計行為

3. 性能指向型材料設計の体系化と支援システムの構築 遺伝的アルゴリズム（GA）とは？



自然界における生物の進化の原理（選択淘汰・突然変異）に着想を得たアルゴリズムで、生物の進化を模した確率的探索・学習・最適化の手法である。離散的な量を扱う最適化問題に対して様々な工学分野で広く利用されている。

例：

- ・ 地域施設の配置計画
- ・ 空間構造形態創生
- ・ スケジュール管理問題
- ・ 都市巡回問題など

3. 性能指向型材料設計の体系化と支援システムの構築

遺伝的アルゴリズム（GA）とは？

【一般的なGAのプログラムフロー】

① 最適化の対象となる因子を0、1の配列で表す。これを**遺伝子型**と呼ぶ。

② 遺伝子型に対応する最適化要因を**表現型**と呼ぶ。

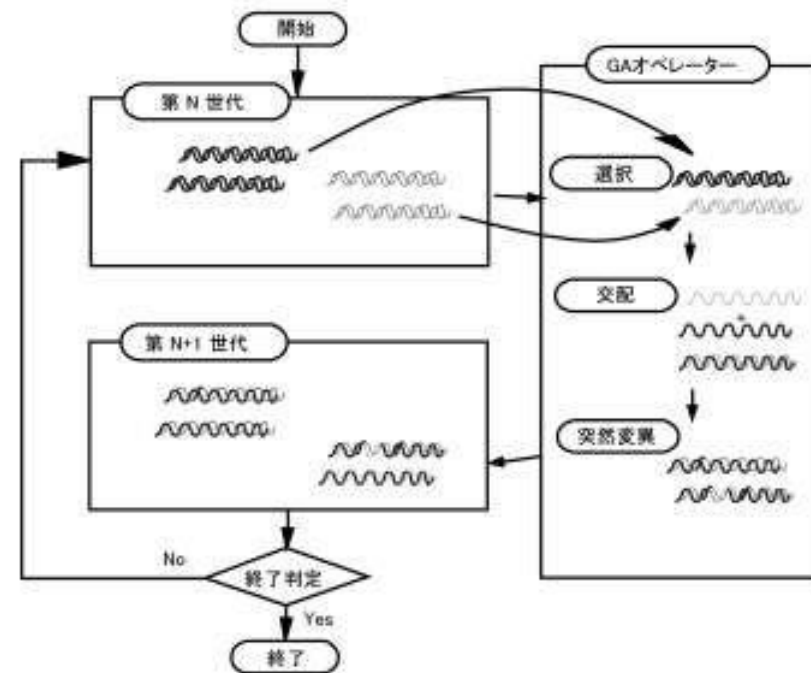
例：

遺伝子型 : 0101010111100101

表現型 : X=202831

③ 表現型に対して設定された評価値を算定し、それによって**適応度が決定**され選択が行われる。

④ 操作は遺伝子に対してのみ行う。

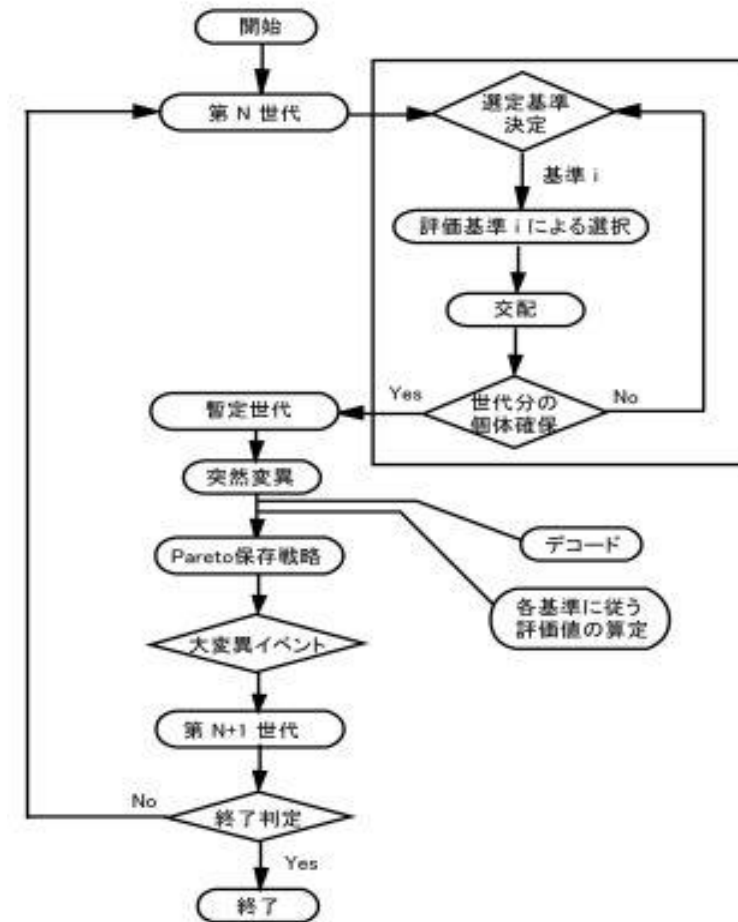


3. 性能指向型材料設計の体系化と支援システムの構築 汎用多基準最適化支援システムの特徴

提案する最適化システム プログラムフローの特徴

- ① 複数の評価基準に対し
ランダムに評価基準を
選択して交叉を行う
- ② 次世代へ残す個体の選択を
親世代と子世代を合わせて
評価する
- ③ **パレート保存戦略**

多基準での意思決定者の嗜好を十分に汲み取る手法の一つとしてパレート最適の概念を導入する



ref. Tamaki, H., Mori, M., and Araki, M.: Multi-Criteria Optimization by Genetic Algorithms, Abstracts of the Third Conference of the Association of Asian-Pacific Operational Research Societies within IFORS, 51, 1994

3. 性能指向型材料設計の体系化と支援システムの構築

パレート最適戦略とは？

最適解

評価項目	elements	value			
		w	x	y	z
	A	3	2	4	1
	B	5	5	5	5
	C	2	3	1	4
	D	4	1	3	2

パレート最適解

評価項目	elements	value			
		w	x	y	z
	A	5	4	3	1
	B	2	5	1	4
	C	1	2	4	1
	D	4	3	5	2

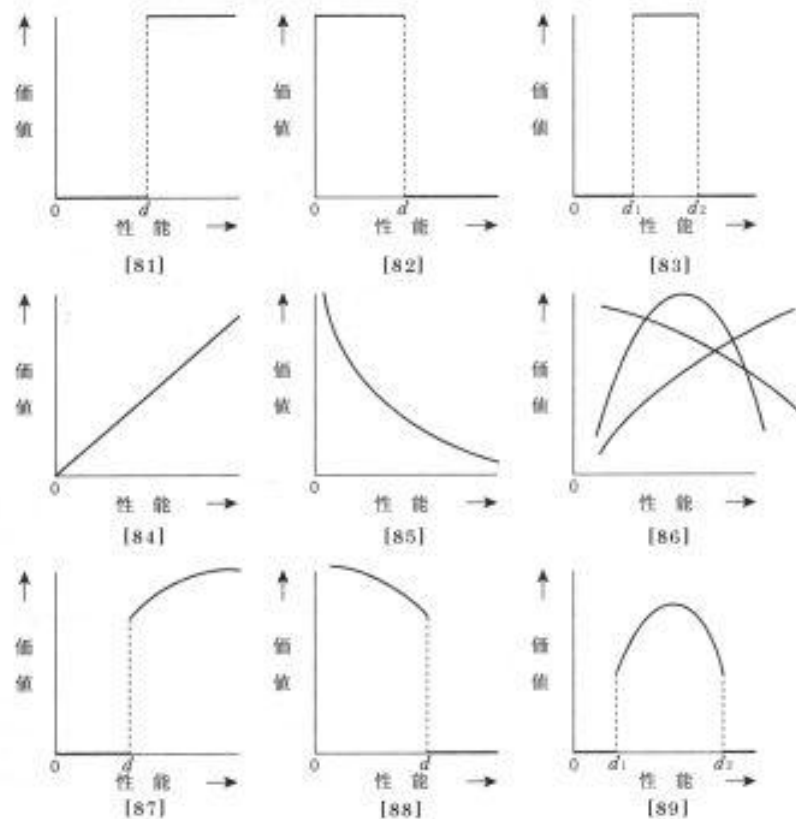
トレードオフの関係

パレート最適解:

多目的最適化問題においてトレードオフの関係にある各目的に対して、様々なバランスで良い評価値をとる解の可能性の保存として全て残した解集合

3. 性能指向型材料設計の体系化と支援システムの構築

性能と価値との関係の分類



■ 建築物には多数の性能が要求され、その評価・検証方法も多数存在する

■ これら性能と評価は、必ずしも線形関係に無い

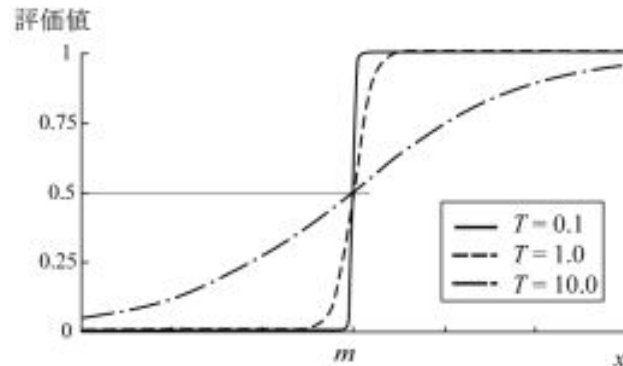
■ 各性能によって評価の概形が変化する

- 制約条件的
- 単調増加／減少
- 極値を取るもの など

ref. 白山他 建築材料設計研究会編著:性能からみた建築材料設計用教材, 彰国社

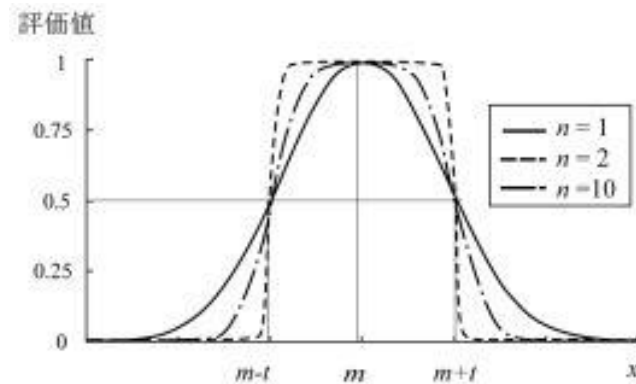
3. 性能指向型材料設計の体系化と支援システムの構築

性能評価関数のモデルの提案



制約型評価関数：要求性能に対してある値以上もしくは以下であれば要求を満たしていると評価

$$A_1(x) = \frac{1.0}{1.0 + e^{\pm(x-m)/T}}$$



単峰型評価関数：要求性能に対して一定の範囲を許容し性能値がそれ以上でも以下でも価値が減少すると評価

$$A_2(x) = \frac{2.0}{1.0 + e^{-(x-m)^{2n}/T}}$$

- メリット：① 性能の評価を可能とする(選好構造の表現)
② ある程度の概形は全て捉えることができる
③ 制約条件をペナルティ関数として表現することができる
- デメリット：評価関数の傾きの決定方法は職人的になりがち

まとめ

同時に複数の性能が要求される組み合わせ問題を解決するため
次のような研究開発をおこなった

- 性能評価関数の導入・定義を行った
- 性能指向型設計に対する最適化論的アプローチにより、
性能指向型設計の多基準最適化表現の提案を行った
- パレート最適解の導入により、汎用多基準最適化支援システムの
構築を行った

以下、本支援システムの適用事例を紹介しその有用性・可能性を示す

4. コンクリートの調合設計支援システム（mixGA）

コンクリートの調合設計問題とは

一つの調合・コンクリートに複数の要求がなされる

⇒ 多目的最適化の問題と捉えることができる

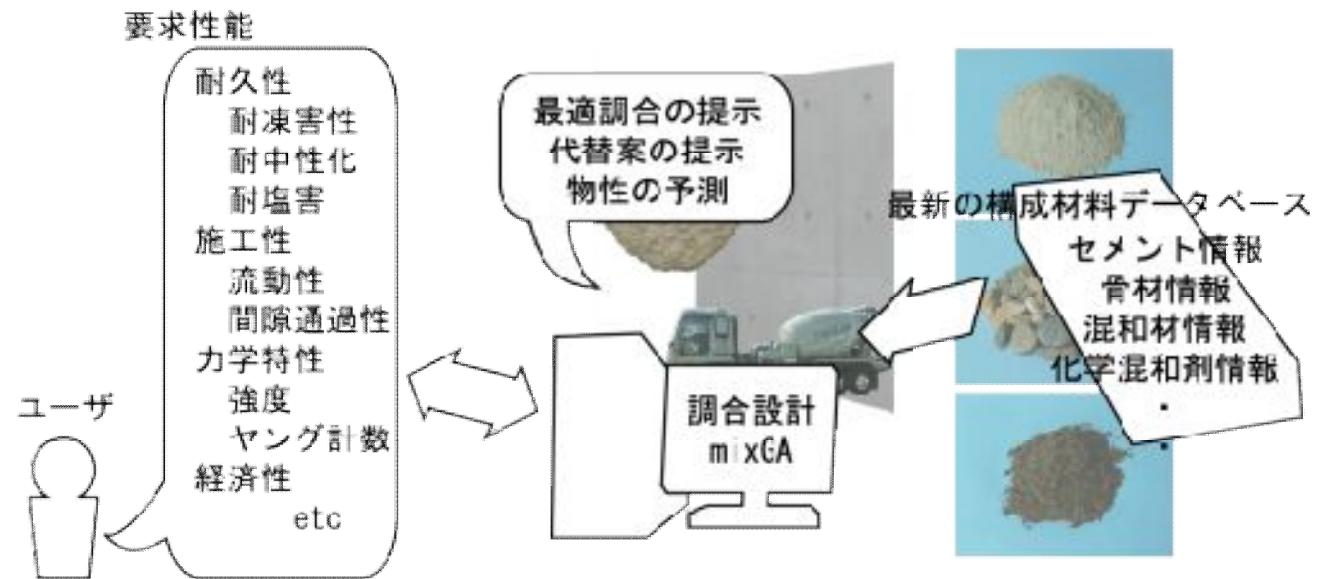
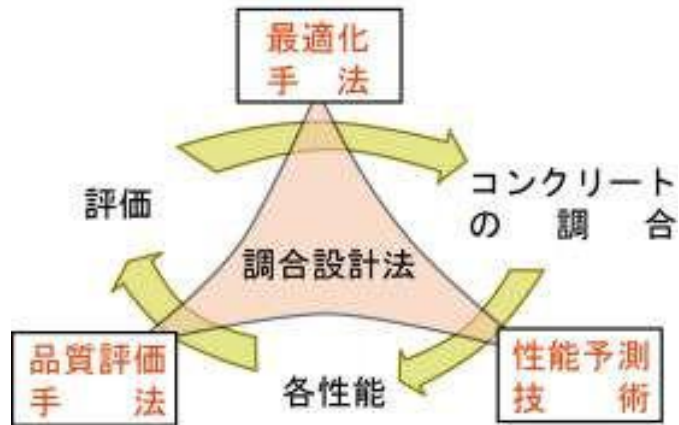
⇒ 多目的最適化の最適解としてパレート最適解の概念を用いることによる解決

無限ともいえる調合組合せの中から解を見つける必要性

⇒ 非線形・不連続問題であると同時に膨大な数の探索空間

⇒ 準最適解を短時間に見つけることのできる遺伝的アルゴリズムの採用による解決

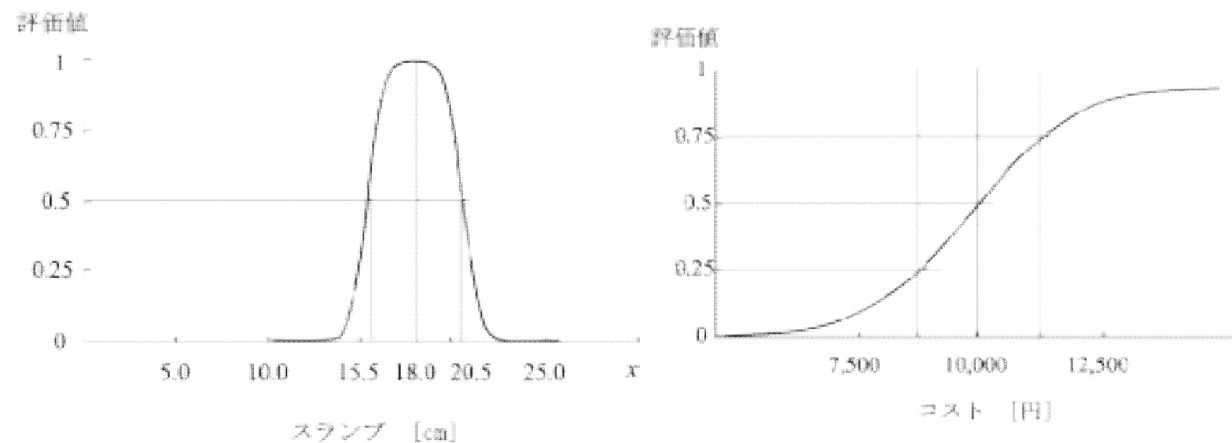
4. コンクリートの調合設計支援システム 外壁への要求性能と材料の選定



4. コンクリートの調合設計支援システム

コンクリートの調合設計の多基準最適化表現

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{説明変数} : x \in \{X \mid \text{任意の実現可能なコンクリートの調合}\} \\ \text{目的関数} : f_i(\mathbf{x}) = A_i(P_i(\mathbf{x})) \quad (i = 1, 2, \dots, k) \\ \text{制約条件} : g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \end{array} \right.$$



性能評価関数の例(スランプ、コスト)

4. コンクリートの調合設計支援システム

遺伝子 (Genotype) mixGA上のコンクリート調合

- 遺伝子は**2進法表記**による“01”の数字の列として表す
- 各数列は材料種類を表す**ID部分**とコンクリート1m³中の体積を表す**体積部分**に分かれる

セメント		細骨材		粗骨材		混和材		混和剤	
sort	volume	sort	volume	sort	volume	sort	volume	sort	volume
01	0011	00	0110	01	0001	11	1111	11	1100

4. コンクリートの調合設計支援システム

コンクリート調合の性能予測

使用材料の物性データ

Component Database	
Cement ID, type, sepcific-gravity, strength, price	Addition ID, type, specific-gravity, specific surface area, price
Fine aggregate ID, factory, sort, shape type, specific-gravity, adsorption-rate, maximum size, solid-content, F.M., price	Admixture ID, type, effectiveness, water-reducing rate, recommended-adding rate, supposed-air-volume, price
Coarse aggregate ID, factory, sort, shape type, specific-gravity, adsorption-rate, maximum size, solid-content, F.M., price	

コンクリートの性能

Property / Performance of concrete	
Strength	Creep per load
Specific-gravity	(Plastic viscosity)
Young's modulus	(Yield value)
Carbonation speed coefficient	Setting time
Chlorides diffusion coefficient	Durability factor
Drying shrinkage	Price
Slump	

* Relative dynamic modulus of elasticity after 300 cycles of freezing and thawing action

- 遺伝子型で表現された調合に使用される材料物性のデータを参照
- 要求される各性能を、調合と物性データのみから予測
 - 高精度の性能予測関数を準備
- それらの性能をもとに各遺伝子の優劣情報として評価する

4. コンクリートの調合設計支援システム

要求性能値とmixGAによる最適解集合

	圧縮強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]	中性化抵抗性 [cm/year ^{0.5}]	遮塩性 [cm ² /year]	耐凍害性	スランプ [cm]	凝結始発 [hour]	凝結終結 [hour]	価格 [yen]
Case 1	60	26	0.27	1.0×10 ⁻⁶	0	18	5	8	5,000
Case 2	40	25	0.25	0.5×10 ⁻⁸	100	15	5	8	10,000

上記の要求性能を満たすコンクリート調合をmixGAによって探索

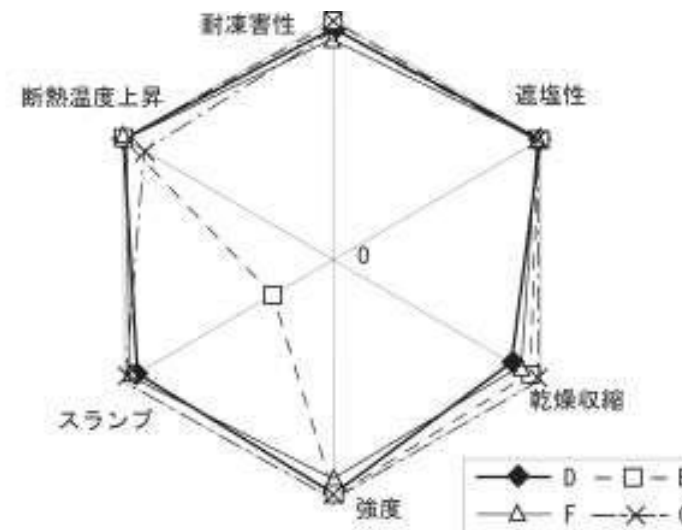
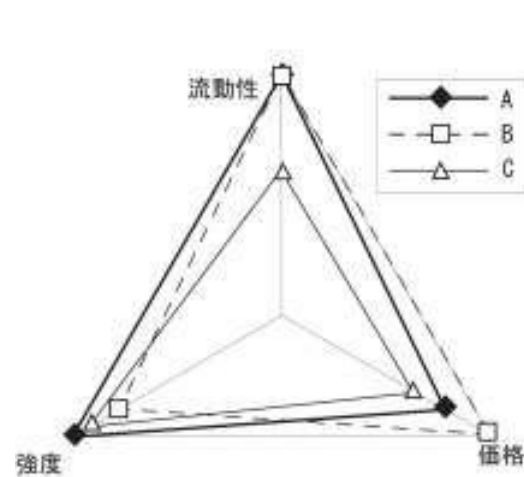


下記の最適解集合を得た

	調合	W/B	水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材	化学混和剤	化学混和剤
Case1	A	0.42	138	275(OPC)	52(BS)	936(CR)	987(GR)	—	—
	B	0.43	145	264(HESC)	76(BS)	967(CR)	925(GR)	0.232(AC)	0.006(AE)
	C	0.41	145	301(MHC)	52(BS)	962(CR)	921(GR)	—	0.048(AE)
Case2	D	0.47	132	280(LHC)	—	1035(CR)	898(GR)	0.115(HRWR)	0.512(AE)
	E	0.47	132	281(LHC)	—	1029(CR)	893(GR)	0.005(HRWR)	0.526(AE)
	F	0.47	131	281(LHC)	—	1028(CR)	906(GR)	0.195(HRWR)	0.512(AE)
	G	0.48	132	273(MHC)	—	1034(CR)	898(GR)	0.022(HRWR)	0.526(AE)

4. コンクリートの調合設計支援システム 試行結果の性能評価

	調合	W/B	水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材	化学混和剤	化学混和剤
Case1	A	0.42	138	275(OPC)	52(BS)	936(CR)	987(GR)	—	—
	B	0.43	145	264(HESC)	76(BS)	967(CR)	925(GR)	0.232(AC)	0.006(AE)
	C	0.41	145	301(MHC)	52(BS)	962(CR)	921(GR)	—	0.048(AE)
Case2	D	0.47	132	280(LHC)	—	1035(CR)	898(GR)	0.115(HRWR)	0.512(AE)
	E	0.47	132	281(LHC)	—	1029(CR)	893(GR)	0.005(HRWR)	0.526(AE)
	F	0.47	131	281(LHC)	—	1028(CR)	906(GR)	0.195(HRWR)	0.512(AE)
	G	0.48	132	273(MHC)	—	1034(CR)	898(GR)	0.022(HRWR)	0.526(AE)



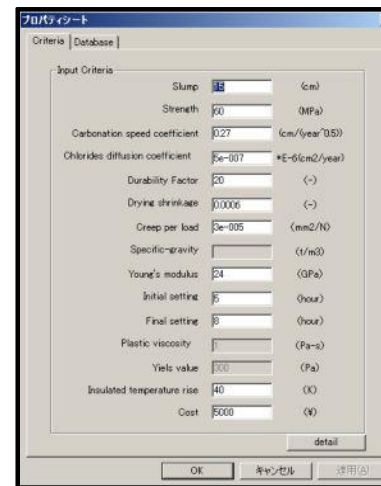
上記最適解集合の要求性能満足度を性能評価関数によって確認

4. コンクリートの調合設計支援システム まとめ

コンクリートの調合設計を多基準最適化問題と捉え、調合最適化支援システム (mixGA) の開発を行った

- ① 問題の最適化記述と多基準最適化問題に対するパレート最適解の採用
- ② 各物性値・指標の評価関数の提案
- ③ 各物性値・指標の高精度の予測技術の開発
- ④ 多基準最適化問題の解法システムとしてのGAの導入

その結果、コンクリートの調合設計に対して本最適化手法の有効性を確認、性能指向型材料設計法の可能性を示した

A screenshot of the 'Input Criteria' dialog box in the mixGA software. The dialog box is titled 'Input Criteria' and contains a list of input parameters with their respective values and units. The parameters are: Slump (18 cm), Strength (50 MPa), Carbonation speed coefficient (0.27 cm/year^{0.5}), Chlorides diffusion coefficient (5e-007 *E-6cm²/year), Durability Factor (20 -), Dry shrinkage (0.0006 -), Creep per load (3e-005 mm²/N), Specific gravity (1/m³), Young's modulus (24 GPa), Initial setting (5 hour), Final setting (8 hour), Plastic viscosity (1 Pa-s), Yield value (50 Pa), Insulated temperature rise (40 °C), and Cost (5000 ¥). There are 'OK', 'キャンセル', and '適用(O)' buttons at the bottom.

下記、野口研究室ホームページで
コンクリート調合最適化mixGAの
情報・ソフトウェアを公開中

<http://bme.t.u-tokyo.ac.jp/>

4. 建築外壁材料の性能指向型選定手法（wall G A）の開発

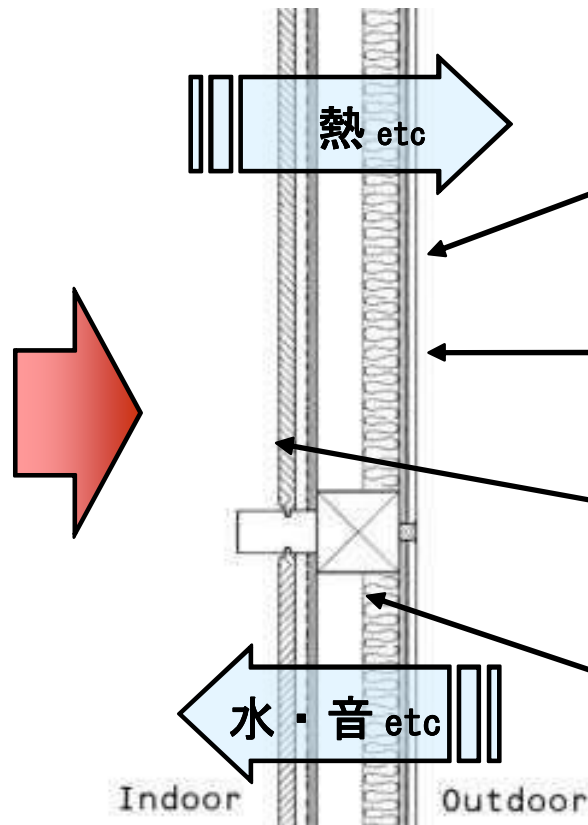
5. 建築外壁材料の性能指向型選定手法

外壁への要求性能と材料の選定

設計者・ユーザーの要求性能

多種多様な建築材料・部材

・耐熱性
・耐湿性
・耐水性
・断熱性
・遮音性
・気密性
・耐凍害性
・防耐火性
・耐汚染性
・耐衝撃性
・変形追従性
・意匠性
・造形性
・経済性
etc



5. 建築外壁材料の性能指向型選定手法

外壁材料の選定最適化の問題点

外壁材料の最適化問題では、コンクリートの調合設計のように混合量を連続的に変化させることのできる材料の組み合わせとは異なり、材料のデータが**離散的**となるものがほとんどである



多種の材料の離散的データの組み合わせ最適化をおこなう問題点

データベース上で各材料に与えられたID番号による遺伝子の交叉では

材料自体の優劣が遺伝子型に情報として含まれない

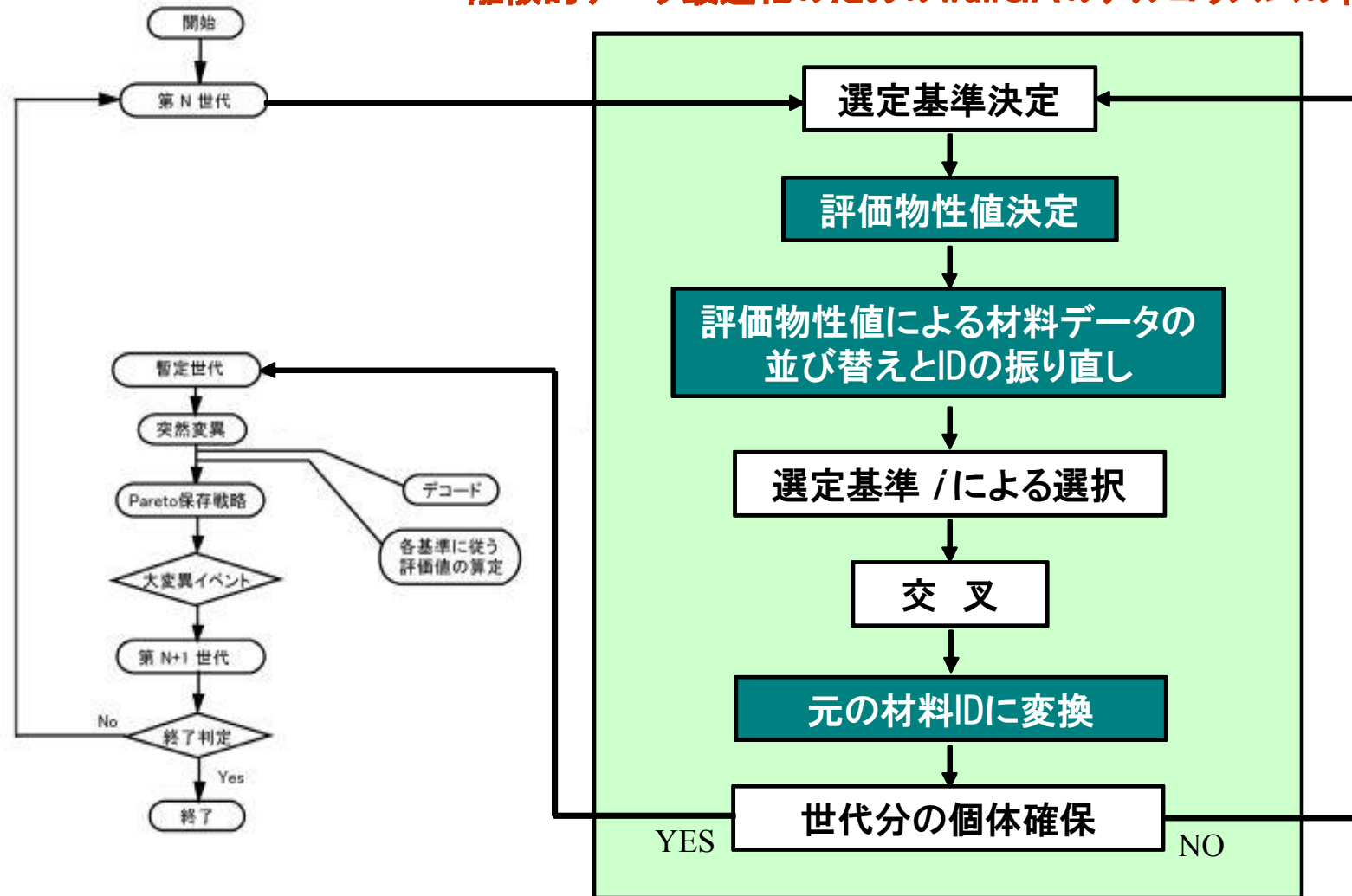


材料IDを評価基準となる各性能予測関数に対して影響のある物性値
(またはその組み合わせ)による優劣であらかじめ並べ替える

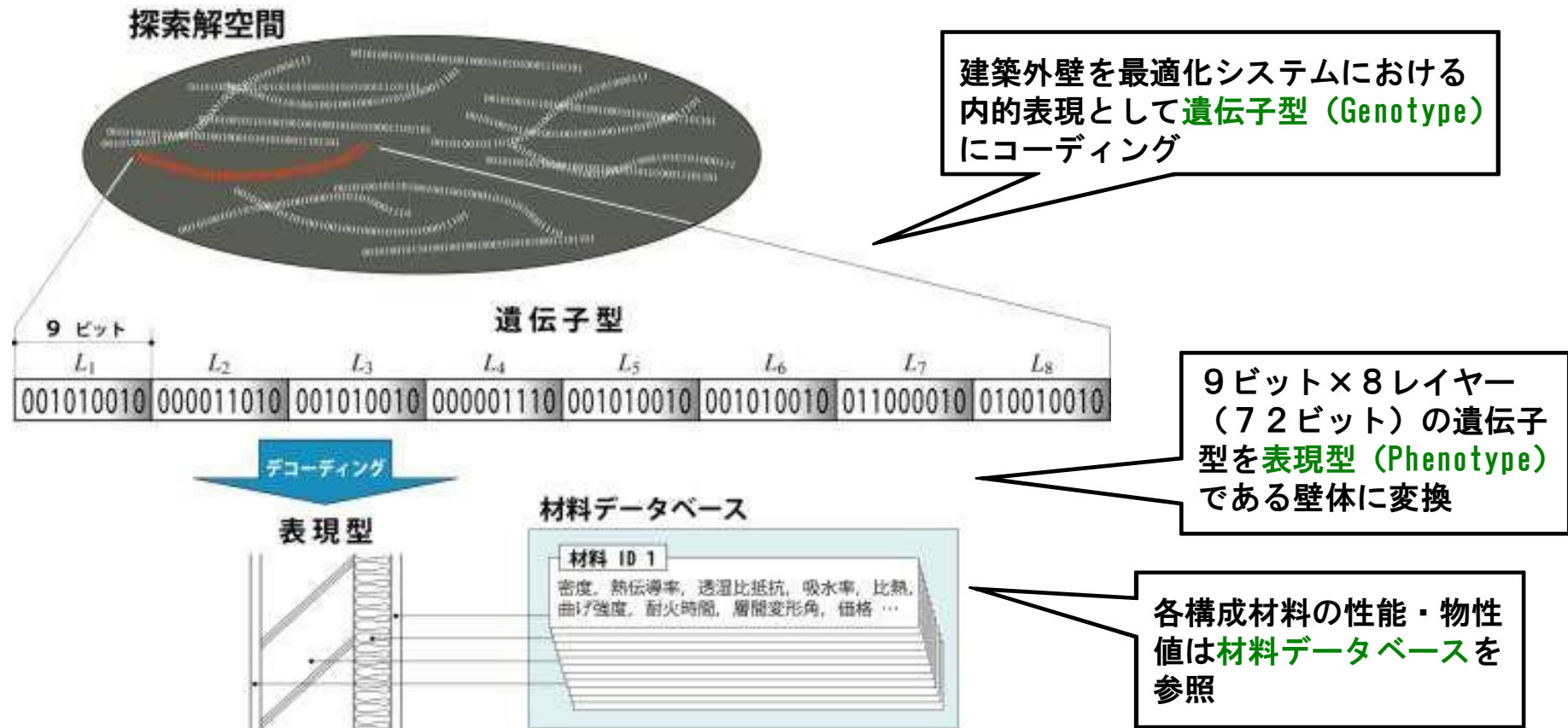
ID順位戦略の導入

5. 建築外壁材料の性能指向型選定手法 外壁材料の選定最適化の問題点

離散的データ最適化のためのwallGAのアルゴリズムの特徴



5. 建築外壁材料の性能指向型選定手法 外壁を表現する遺伝子の概要



5. 建築外壁材料の性能指向型選定手法 外壁材料データベースの整備

遺伝子型によって表現された外壁の性能を予測するためには、構成要素となりうる全ての材料の性能値または物性値をデータベースに登録しておく必要がある

約100種類の製品の外装材・下地材・機能材・内装材のデータを収集して物性値を登録

同一製品でスペックが異なるものを含めて約200種の材料をデータベースとして使用

大分類	小分類	大分類	小分類	
断熱材	グラスウール断熱材	金属系内外装材	アルミニウム合金板	
	仕上げ付断熱材(間仕切り)		アルミスパンドレル	
	ロックウール断熱材		金属プラスチック複合材	
	グラスファイバー		アルミ樹脂積層複合版	
合成樹脂系断熱材	硬質ポリウレタンフォーム	金属系断熱複合板	アルミ外装材	
	吹付けウレタンフォーム		アルミ接着ハニカムパネル	
吹付ロックウール	吹付ロックウール	ステンレス板	塗装ステンレス	
型枠兼用断熱材	けい酸カルシウム板	メッキ鋼板	溶融亜鉛めっき鋼板	
木質積層パネル	化粧積層空板	メッキ鋼板	ガルバリウム鋼板	
スレート板	波形スレート	セメント板	セメント板	
	スレート波板	防音・遮音材	防音建材	
プラスチック板	プラスチックサイディング		遮音材	
	シート類		透湿防水シート	吸音材
防湿気密フィルム			遮音材	
遮音シート		防音・遮音材	吸音・遮音パネル	
透湿防水防風シート		無機系外装材	高強度外装材	
木質系外装材	外装下地材	無機系外装材	押し出し成形セメント板	
	防水外装材		ケイ酸カルシウム板	
	パーティクルボード		サイディング	
	高圧木毛セメント板		ポリエステル不燃化粧板	
	打ち込み形枠兼用		フッ素樹脂フィルムラミネート	
	パーティクルボード		不燃パネル	
	木毛セメント板		フレキシブルボード	
	MDF		タイル	
	不燃材		ケイ酸カルシウム板	
	化粧板		石膏ボード	石膏ボード
木質系内装材	不燃天然木化粧パネル	石膏ボード	繊維混入石膏板	
ALCパネル	パワーボード		無機繊維強化石膏ボード	
自然素材断熱材	ALCパネル	塗材	塗材	
	麻繊維断熱材		アクリルゴム系外壁塗膜防水材	
金属系外装材	パンチングメタル	合成樹脂板	メラミン不燃化粧板	
	再生アルミニウム板		ポリカーボネート	
	ホーロー鋼板		メタクリル樹脂板	
	塗装鋼板	人造大理石	人造大理石	
	フッ素樹脂鋼板		珪酸カルシウム成型板	
	鋼板製外装材		調湿性壁材	けい酸カルシウム調湿建材
	遮熱鋼板		セメント系材料	モルタル
内装材	自然素材壁紙		コンクリート	

5. 建築外壁材料の性能指向型選定手法

外壁への要求性能と材料の物性値の関係

		材料の物性値													
		板材系	貼材系	板材系	貼材系	厚さ	密度	耐火時間	不燃等の区分	吸水率	熱伝導率	透湿比抵抗	比熱	厚さ固定	厚さ任意
		層間変形角	曲げ強さ	支点間距離	接着強度									価格	単位長さ価格
		rad	N/mm ²	mm	N/mm ²	mm	kg/m ³	h	—	%	W/mK	mhmmHg/g	KJ/kg・K	yen	yen/mm
外壁への要求性能	断熱性能					○						○			
	蓄熱性能					○	○						○		
	保温性能					○	○					○	○		
	透湿性能					○						○			
	防露性能					○						○	○		
	遮音性能					○	○								
	耐火性能							○							
	防火性能								○						
	耐震性能	○	○	○	○	○									
	耐風圧性能	○	○	○	○	○									
	防水性能											○			
	施工性					○	○								
経済性					○								○	○	

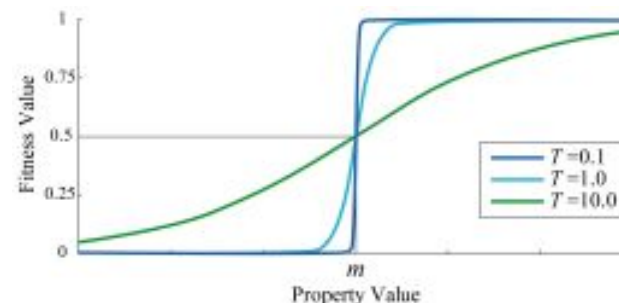
- 全ての材料に定義される属性は同じである。今回の最適化における性能予測関数の定数として用いていない属性（ヤング係数など）は、表には示していない
- 属性値が得られない材料に関しては文献調査などによりその材料の一般値で補完
- 全ての材料について使用部位や機能を特定することなく同等に評価する材料選定を行うため、単一のリレーショナルデータベースを用いた

5. 建築外壁材料の性能指向型選定手法

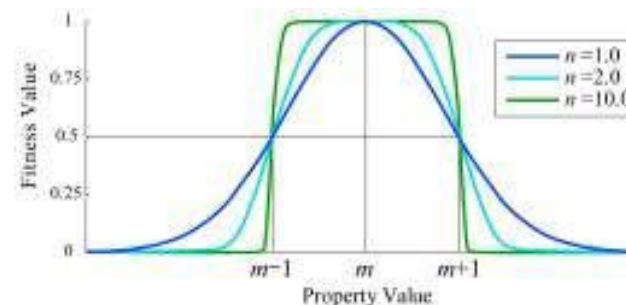
要求項目と評価指標および性能評価関数

- 最適化の過程で想定されうる多数の外壁の各種性能を、要求に対する適合度で評価
- この評価の関数表現によって、性能の高低による価値の変動や要求の厳密さが表現される

i	要求項目	物性値・指標	$P(x)$	評価関数 $A(\rho)$
1	断熱性能	熱貫流抵抗(m^2K/W)	R	制約型
2	蓄熱性能	熱容量(kJ/K)	C	単峰型
3	保温性能	温度変化率($1/h$)	δ	単峰型
4	透湿性能	湿気貫流抵抗($m^2 \cdot h \cdot mmHg / g$)	K'	単峰型
5	防結露性	比較湿度	ψ	制約型
6	遮音性能	平均透過損失(dB)	TL	制約型
7	耐火性能	耐火時間(h)	T	制約型
8	防火性	不燃等の区分	—	制約型
9	耐震性能	(板状材)層間変形角(rad)	θ	制約型
		(貼材)接着強度(N/mm^2)	S_b	
10	耐風圧性能	(板状材)曲げ強さ(N/mm^2)	M	制約型
		(貼材)接着強度(N/mm^2)	S_b	
11	視覚的性能	表面粗さ(mm)	Ra	単峰型
12	防水性能	吸水率($\%$)	W_p	制約型
13	施工性	単位厚さあたり重量(kg/mm)	m	制約型
14	経済性	単位厚さあたり価格(yen/mm)	C_{cost}	逆数(制約型)



制約型評価関数



単峰型評価関数

制約型評価関数 : 要求性能に対してある値以上もしくは以下であれば要求を満たしていると評価

単峰型評価関数 : 要求性能に対して一定の範囲を許容し、性能値がそれ以上でも以下でも価値が減少すると評価

5. 建築外壁材料の性能指向型選定手法

外壁材料データベースの整備

- 表に示す値を要求性能・環境条件として、外壁材料選定の最適化試行をおこなった
- 初期個体数：1040個、世代数：100世代、とした

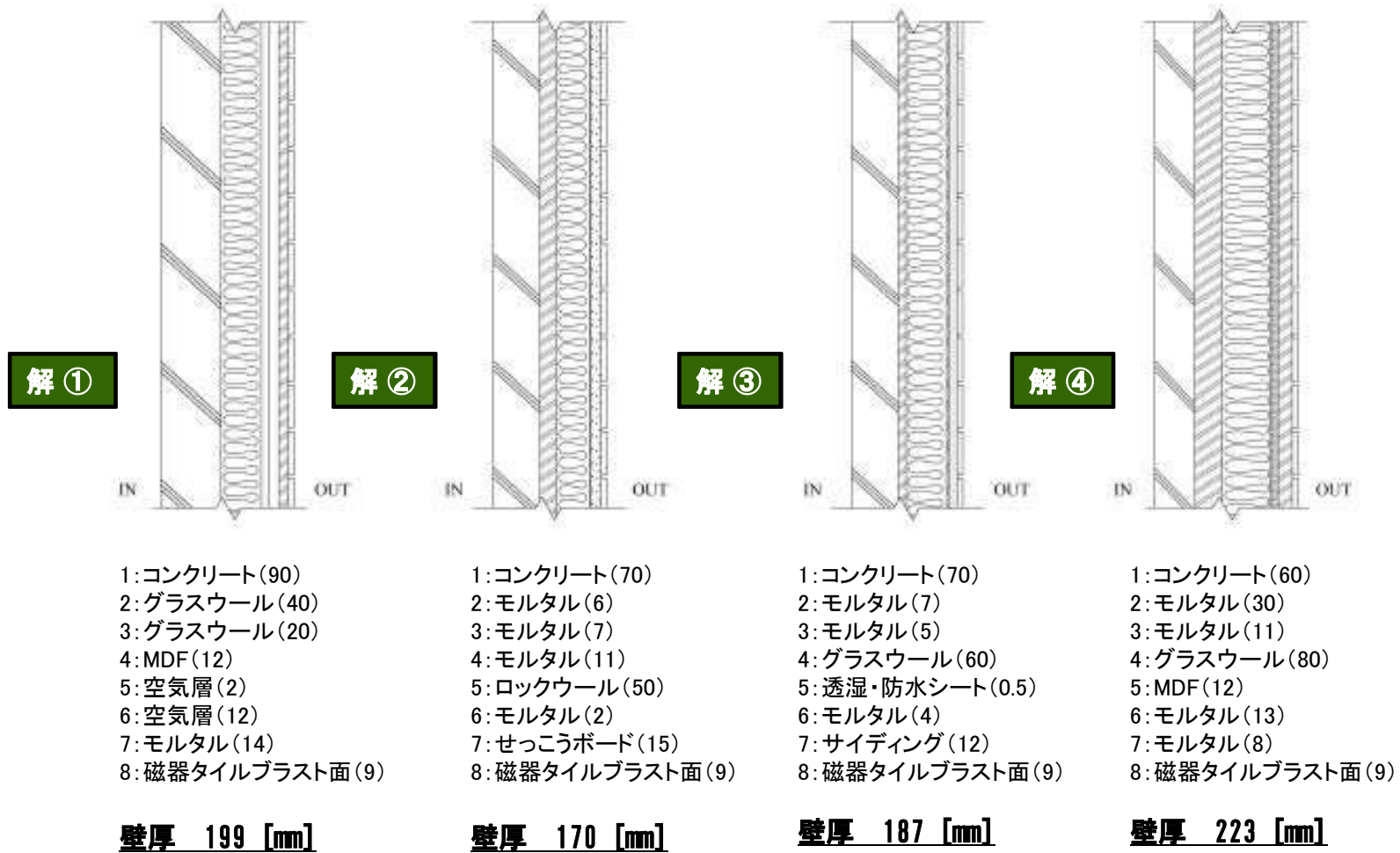
最適化試行における要求性能値

要 求 性 能	要求項目	物性値・指標	要求値
	断熱性能	熱貫流抵抗(m ² K/W)	1.1
	蓄熱性能	熱容量 (kJ/K)	200
	保温性能	温度変化率 (1/h)	0.1
	透湿性能	湿気貫流抵抗 (m ² ・h・mmHg / g)	200
	防結露性	比較湿度	結露なし
	耐震性能	(板状材)層間変形角(rad)	1/150
		(貼材)接着強度(N/mm ²)	0.4
	耐風圧性能	(板状材)曲げ強さ(N/mm ²)	260
		(貼材)接着強度(N/mm ²)	0.4
	防水性能	吸水率(%)	10
	視覚的性能	表面粗さ(mm)	0.4
		表面形状特性	1.5
経済性	単位厚さあたり価格(yen/mm)	20000	
防火性	不燃等の区分	難燃	
—	壁の厚さ(mm)	200	

環境条件	値
温度 (°C)	25 (室内)
	5 (室外)
相対湿度 (%)	60 (室内)
	50 (室外)

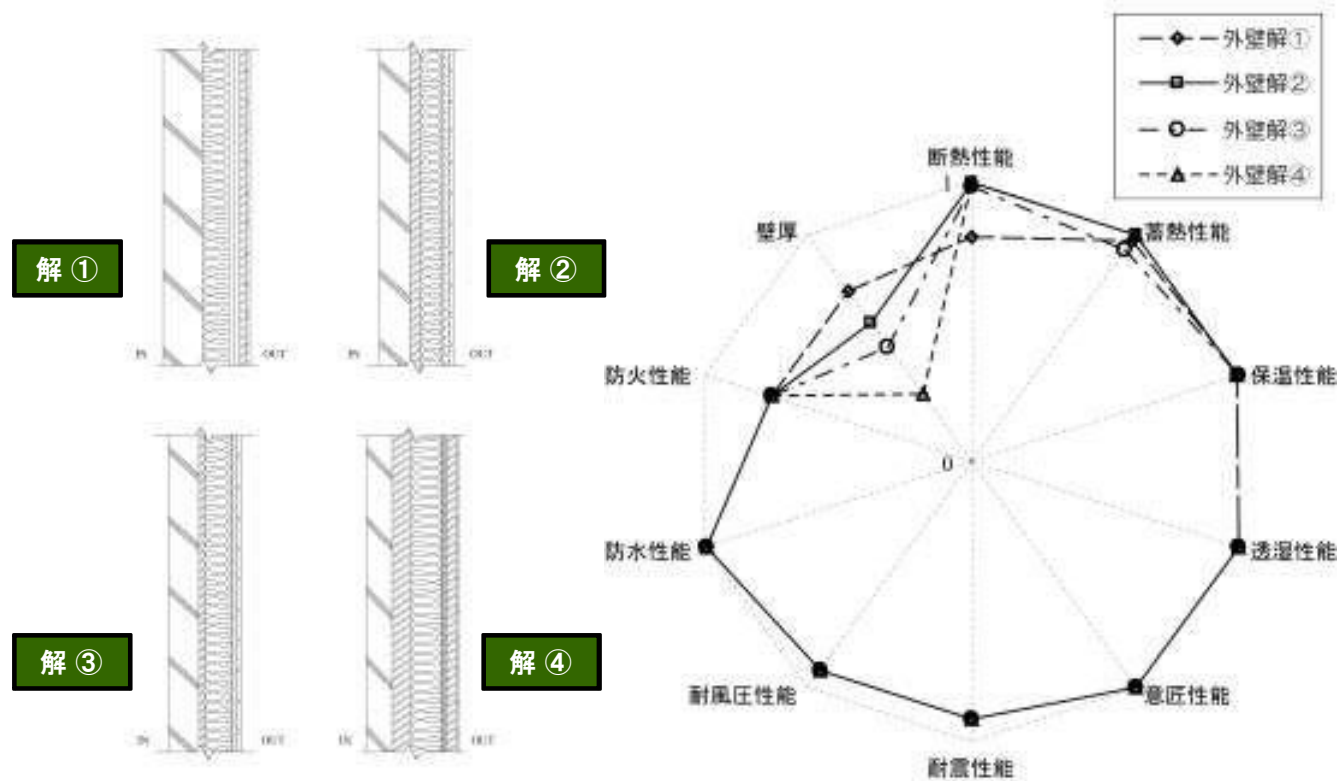
5. 建築外壁材料の性能指向型選定手法 外壁材料の最適化試行結果

wallGAによって最適化された解集合のうち要求性能の評価値が上位4つの外壁最適解



5. 建築外壁材料の性能指向型選定手法

外壁材料の最適化試行結果と性能評価



- wallGAによって全ての要求性能をほぼ満足する最適外壁解が得られた
- 壁厚の評価が他の項目に比べて低いが、データベースの拡充によって選択肢を増加する、または材料の厚さと性能の関係をシステムに組み込むことで解決可能

5. 建築外壁材料の性能指向型選定手法

まとめ

複数の要求性能を満足する建築外壁材料の組み合わせを提案可能な建築外壁材料最適化支援システム (wallGA)を開発した

- ① 建築外壁の材料選定の最適化問題としての記述
- ② 材料データベースの作成
- ③ 各物性値・性能指標の予測関数化
- ④ 離散的データによる解法システムとしてのwallGAの導入

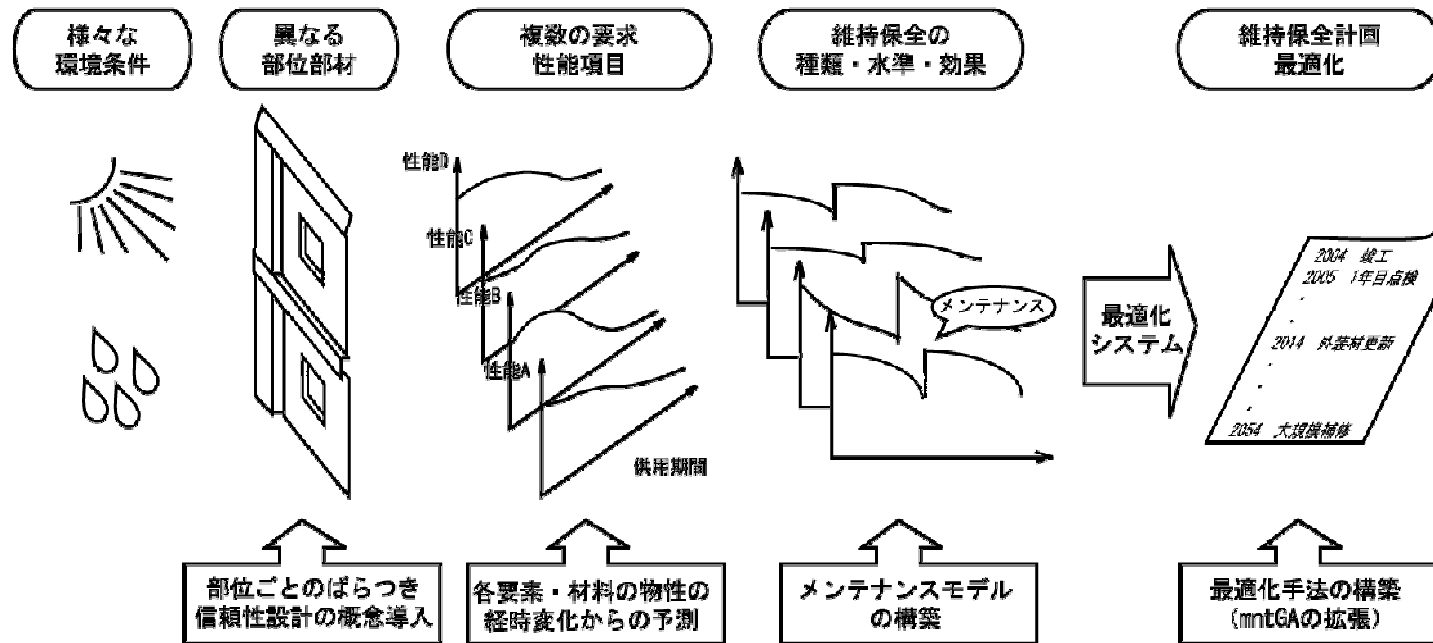
その結果、コンクリートの調合設計同様に外壁材料の選定最適化に対してもシステムの有効性を確認、性能指向型材料設計法の可能性を示した

性能による外壁材料選定手法における課題

- ① 性能項目の工学的に妥当な表現の提案
(定量的定義と定性的定義を合理的に組み合わせて表現)
- ② 接合・施工の方法を性能影響要因として評価可能か
- ③ 開口部が組み込まれた部材としての性能評価および最適解導出
- ③ 最適解に対するユーザーの要求満足度を評価する手法

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 背景と目的



他基準最適化問題としての維持保全活動

- 鉄筋コンクリート造建築物の劣化モデルの構築
- 維持保全行為の影響を評価するためのメンテナンス効果の実装
- 汎用多基準最適化システムへの実装

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム

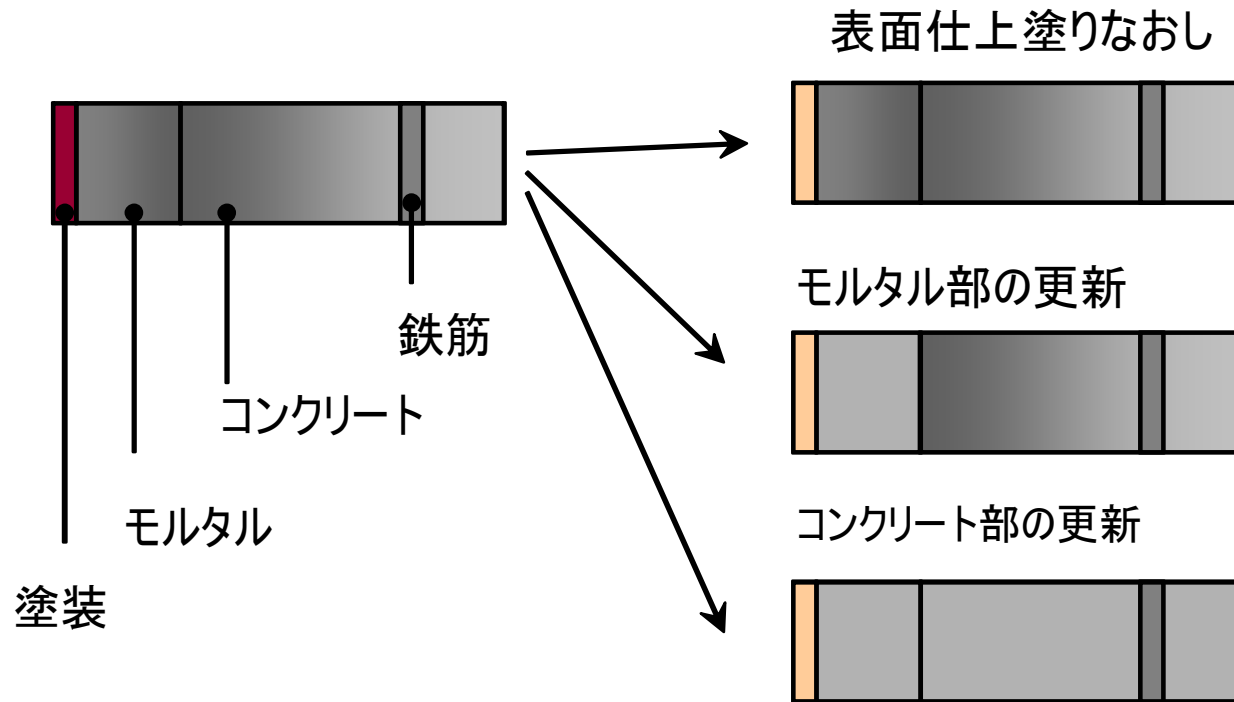
維持保全計画策定の多基準最適化表現

【鉄筋コンクリート造建築物の維持保全計画策定問題の多基準最適化表現】

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{説明変数} : x \in \{X \mid \text{任意の実現可能なコンクリートの調合}\} \\ \text{目的関数} : f_i(\mathbf{x}) = A_i(P_i(x)) \quad (i = 1, 2, \dots, k) \\ \text{制約条件} : g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \end{array} \right.$$

要求性能に対応する物性値と性能評価関数					
i	要求性能	$P_i(x)$	物性値	物性値予測式	性能評価関数 $A_i(p)$
1	供用期間	L_s	中性化が鉄筋位置に到達していない期間	拡散反応モデル	制約型
2	経済性	C_{ost}	供用期間中の補修施工費	積算資料による	制約型

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 遺伝的アルゴリズムの適用

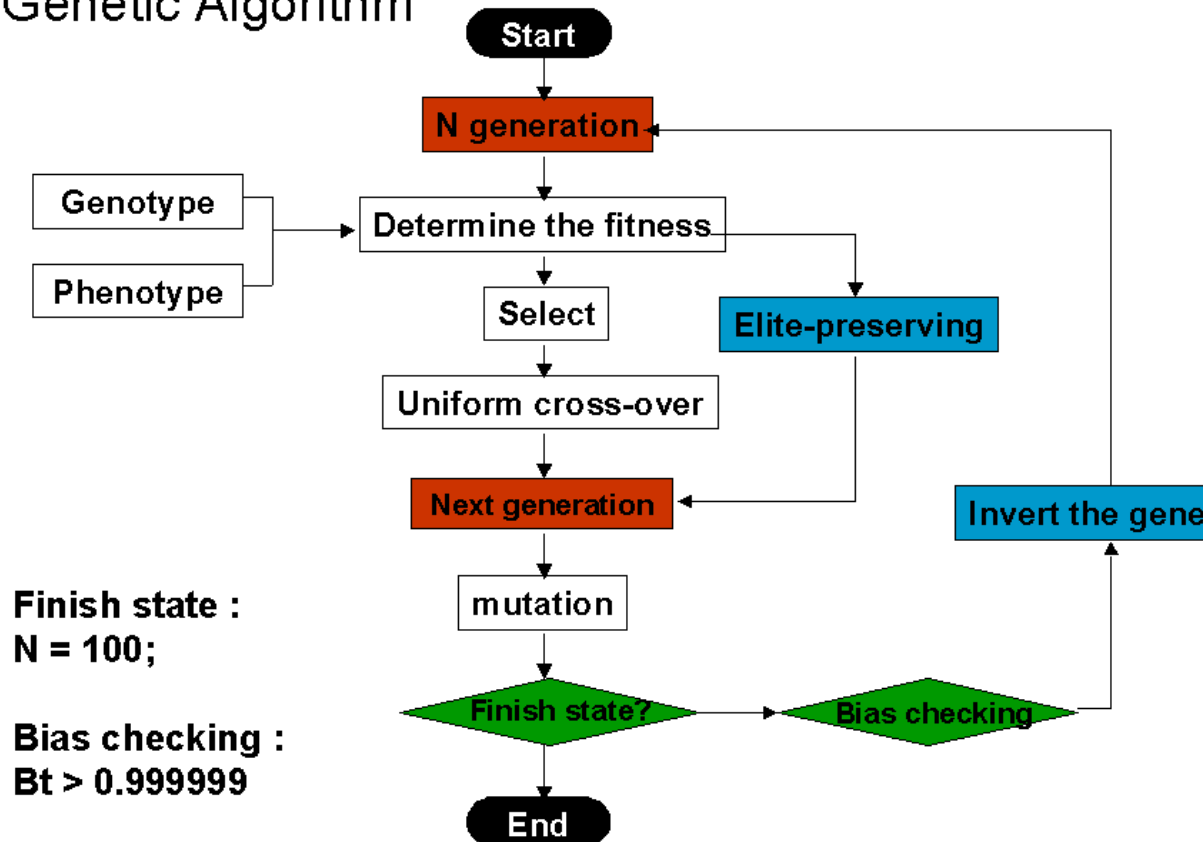


補修の水準

- ① 表面塗装の塗りなおし
- ② モルタル部の更新
- ③ コンクリート部の更新

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 遺伝的アルゴリズムの適用

Genetic Algorithm



プログラムフロー

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 遺伝的アルゴリズムの適用

データ構造

Environment object

concentration of CO₂, temperature, relative humidity

Concrete object

diffusion number of CO₂, reaction rate between CO₂ and Ca(OH)₂

Mortar object

diffusion number of CO₂, reaction rate between CO₂ and Ca(OH)₂

Finish coating object

Permeability of CO₂, service life, effect of repair, cost

Timetable of a repair program

Timetable, cost

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 遺伝的アルゴリズムの適用

遺伝子コーディング

1st. action		2nd. action		8th. action	
Type	Interval	Type	Interval		Type	Interval

01 11 00 10 00 01

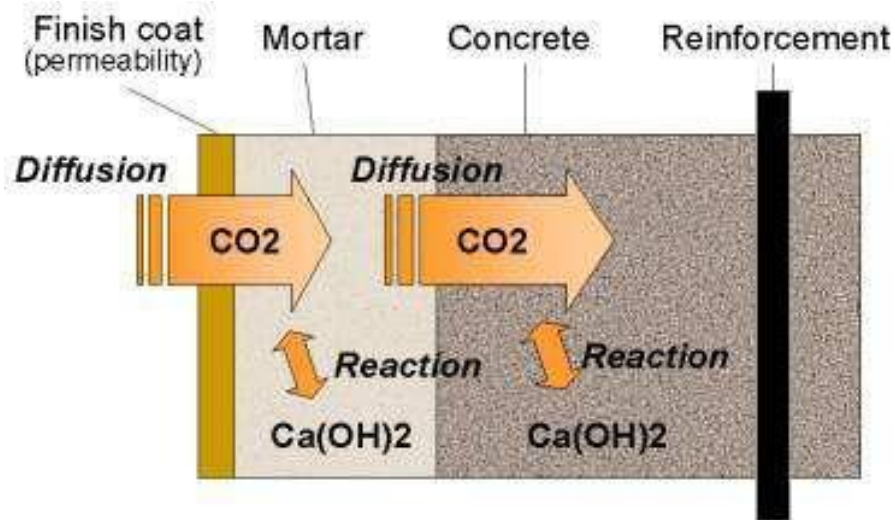
genotype

Type 00 : A : No action
01 : B : Reapplication of finish coat
10 : C : Chipping and reapplication of mortar
11 : D : Chipping and patching of concrete

Interval 00 : 5years
01 : 10years
10 : 15years
11 : 20years

補修計画を補修間隔と補修方法のセットにより表現することで遺伝子情報の世代間伝達がよくなるよう設計

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム コンクリートの中酸化モデル

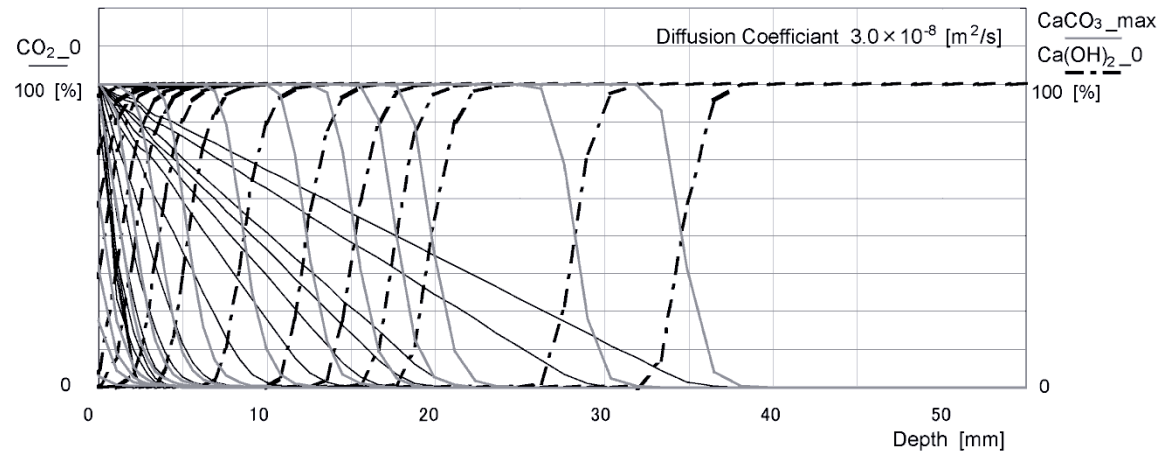


コンクリート・モルタル部の二酸化炭素移動

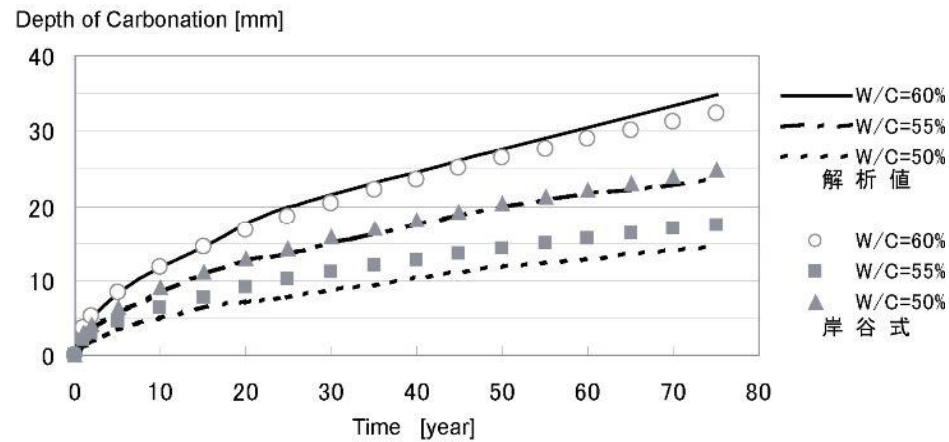
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eCO_2} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - Q_e \quad \text{反応拡散方程式}$$

$$Q_e = \kappa_C \cdot C \cdot Ca \quad \text{中性化一次反応項}$$

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム コンクリートの中性化モデル

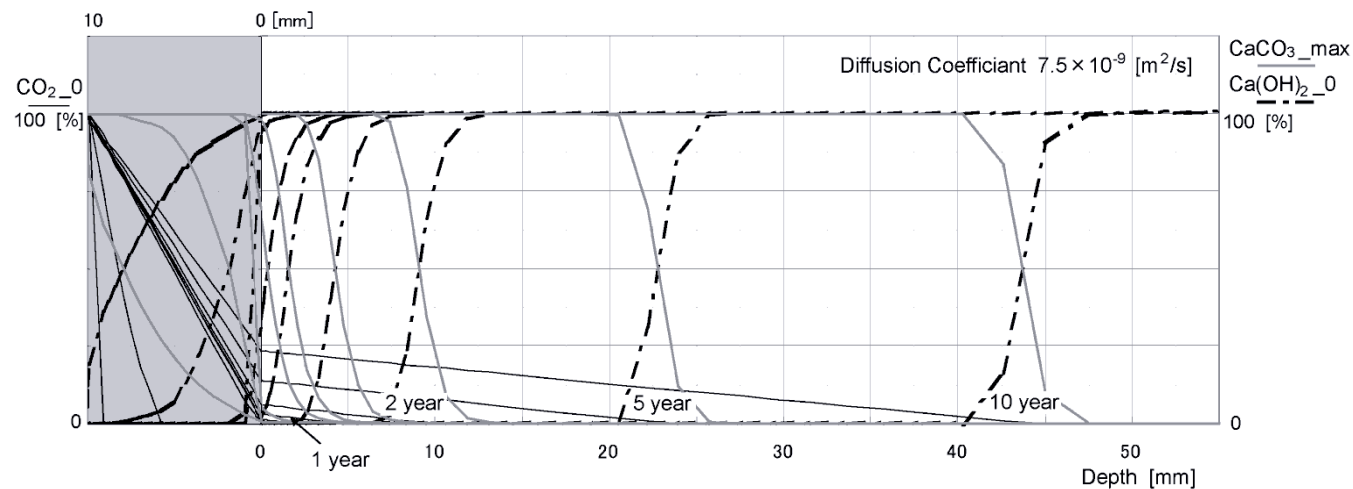


コンクリート中のCO₂, Ca(OH)₂, CaCO₃濃度の経時変化予測



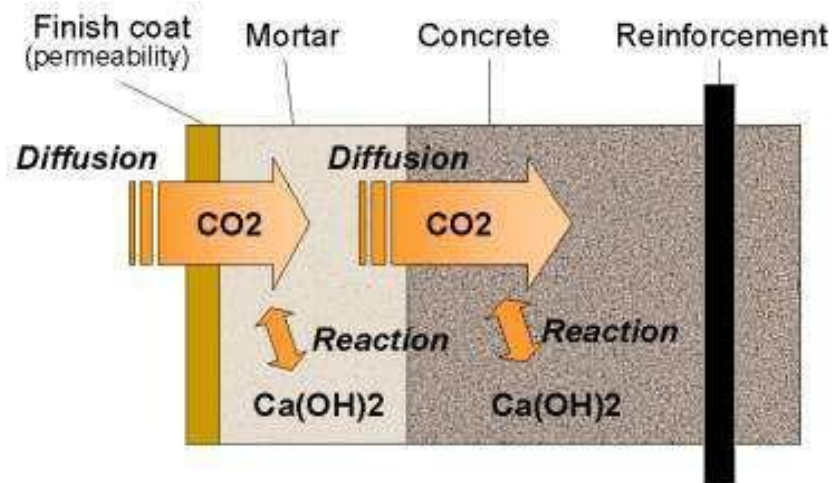
中性化深さ予測と既往の予測式の比較

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム モルタル系材料の中性化モデル



ポリマーセメントモルタル中の CO_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 濃度の経時変化予測

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 仕上げ材料の中酸化抑制モデル



仕上げ材の二酸化炭素移動

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = -D_s \frac{\partial C_s}{\partial x}$$

境界条件

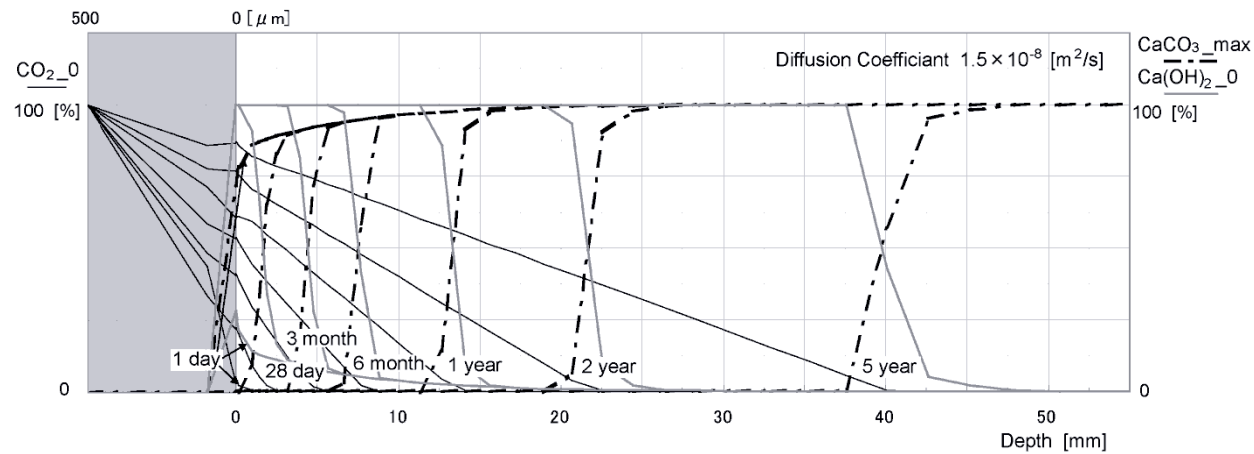
$$\overline{C_{s_{out}}} = S_s \cdot p_{out}$$

外気側

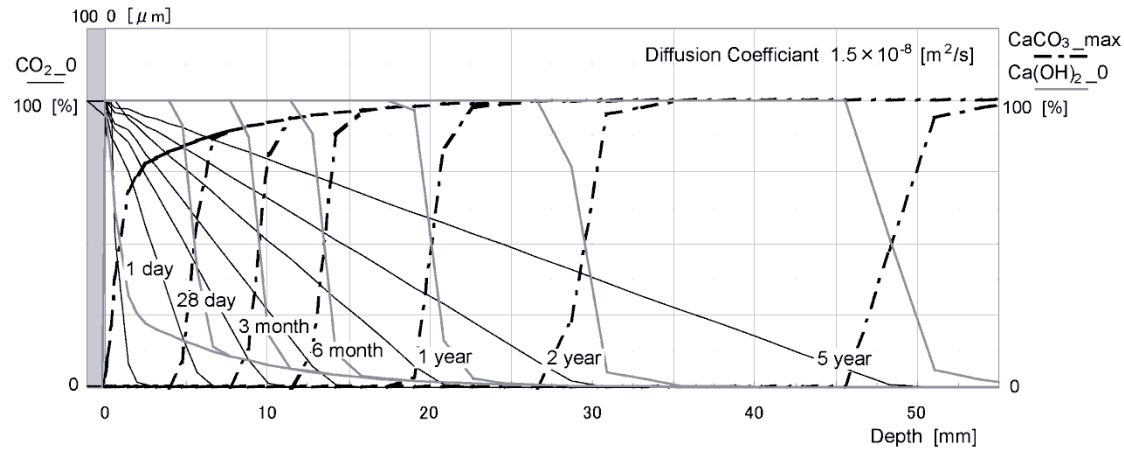
$$\overline{C_{c_{out}}} = S_c \cdot P_{out} = S_c \cdot \overline{C_{s_{con}}} / S_s$$

コンクリート側

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 仕上げ材料の中酸化抑制モデル

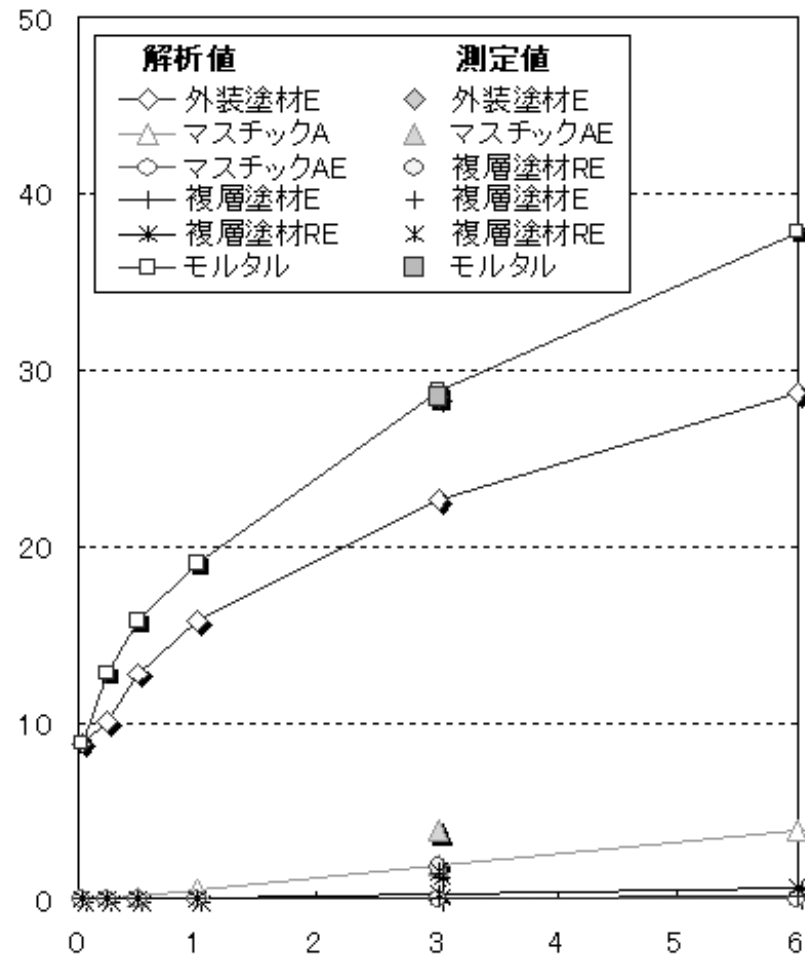


仕上げ材を施した場合のコンクリート中の CO_2 , Ca(OH)_2 , CaCO_3 濃度の経時変化予測(マスチックA)

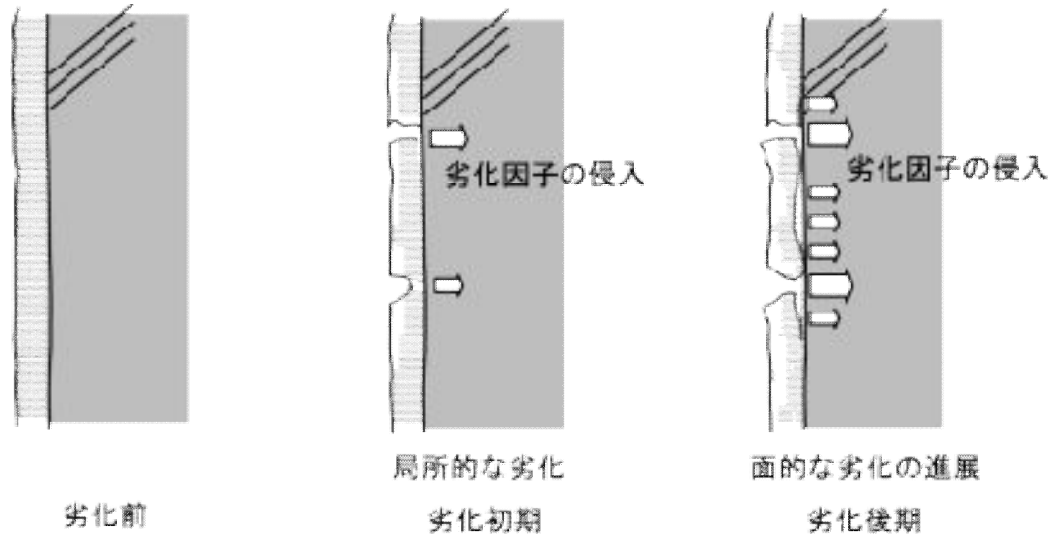


仕上げ材を施した場合のコンクリート中の CO_2 , Ca(OH)_2 , CaCO_3 濃度の経時変化予測外(塗装材E)

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 仕上げ材料の中酸化抑制モデル

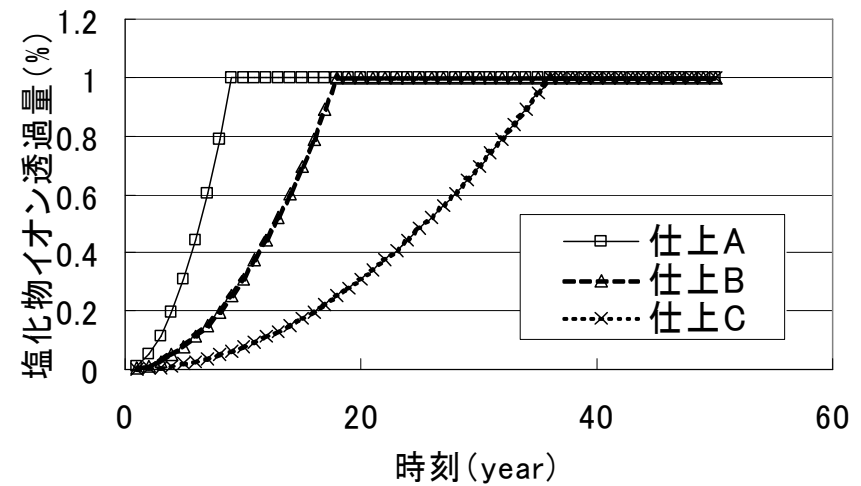


6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 仕上げ材料の経年劣化

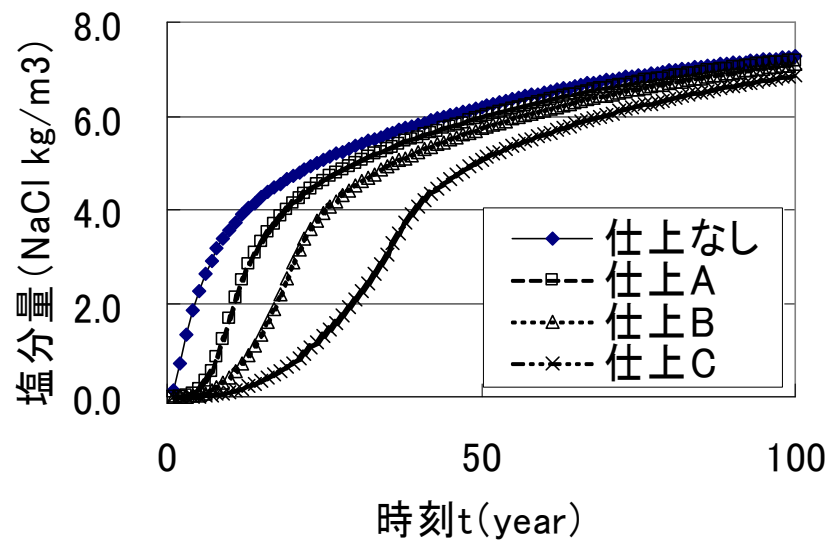
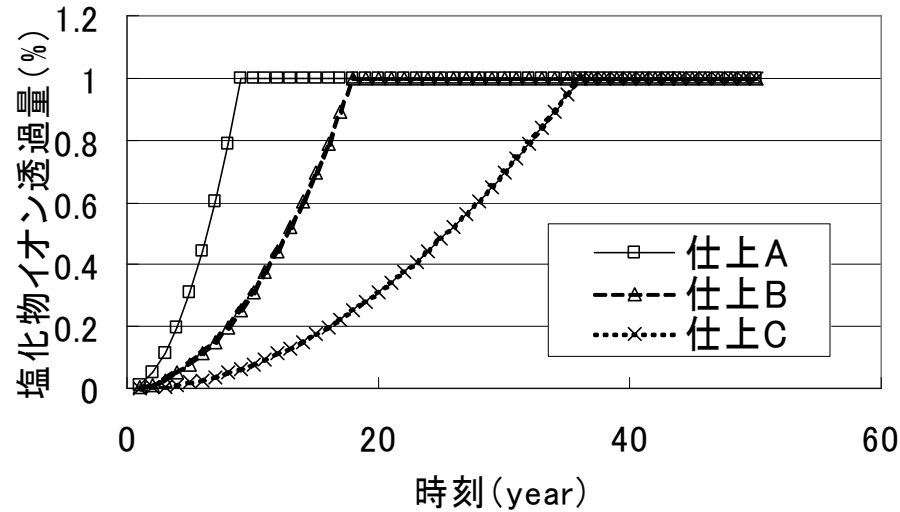


浸透係数の増加として表現

$$S_S(t) = (S_{SF} - S_{S0}) \times \left(\frac{t}{L_S} \right)^2 + S_{S0}$$



6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 遺伝的アルゴリズムの適用



各表面仕上材の劣化による
塩化物イオン透過量の
経時変化解析

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 遺伝的アルゴリズムの適用

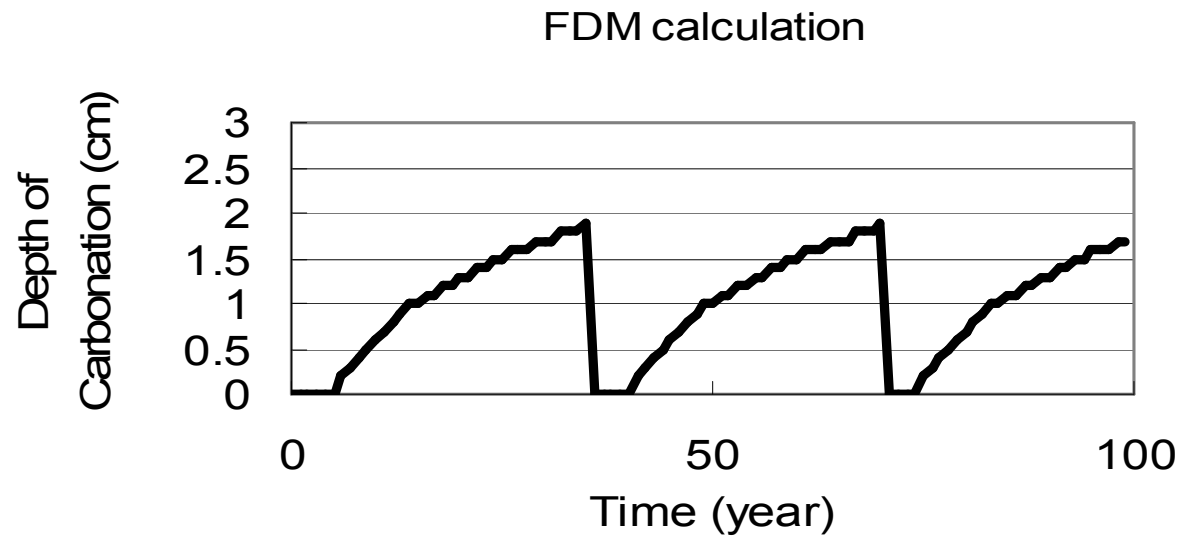
【ケースA】

制約条件として、供用期間60年間で、かぶり厚さの20mmの点(鉄筋位置)で、塩分濃度が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超えない。

【ケースB】

あらかじめ劣化した躯体を初期条件とし、さらに供用期間30年の要求を与えた場合の最適補修計画を求める。限界状態は、かぶり厚さ20mmの点(鉄筋位置)で、塩分濃度が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超えない。

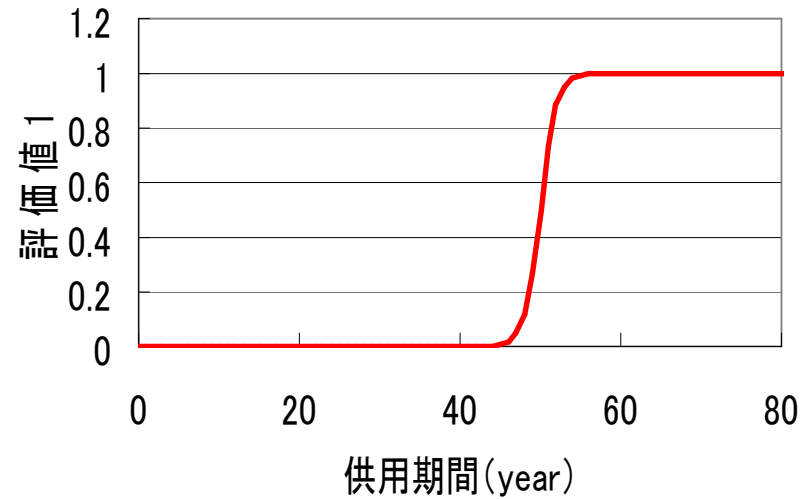
6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 解析結果の適用



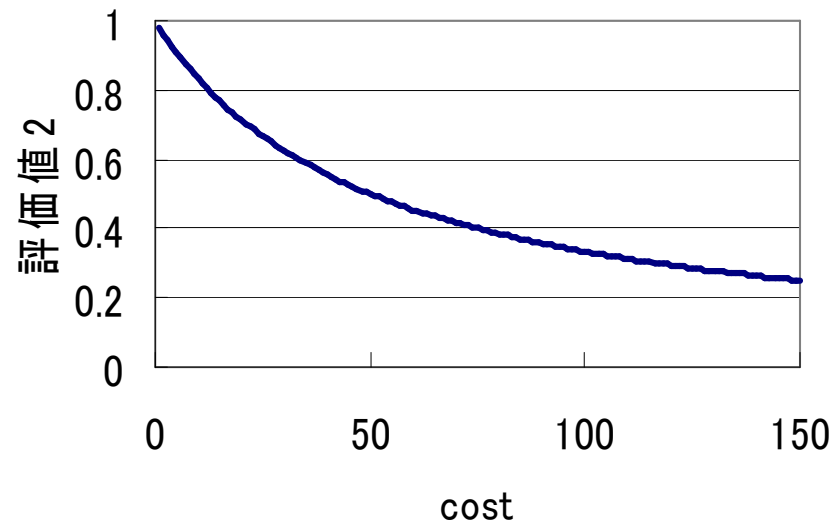
5year	Reapplication of finish coat
35year	Chipping and patching of concrete
40year	Reapplication of finish coat
70year	Chipping and patching of concrete
75year	Reapplication of finish coat

6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 評価関数の概形

耐用年数の評価



コストの評価

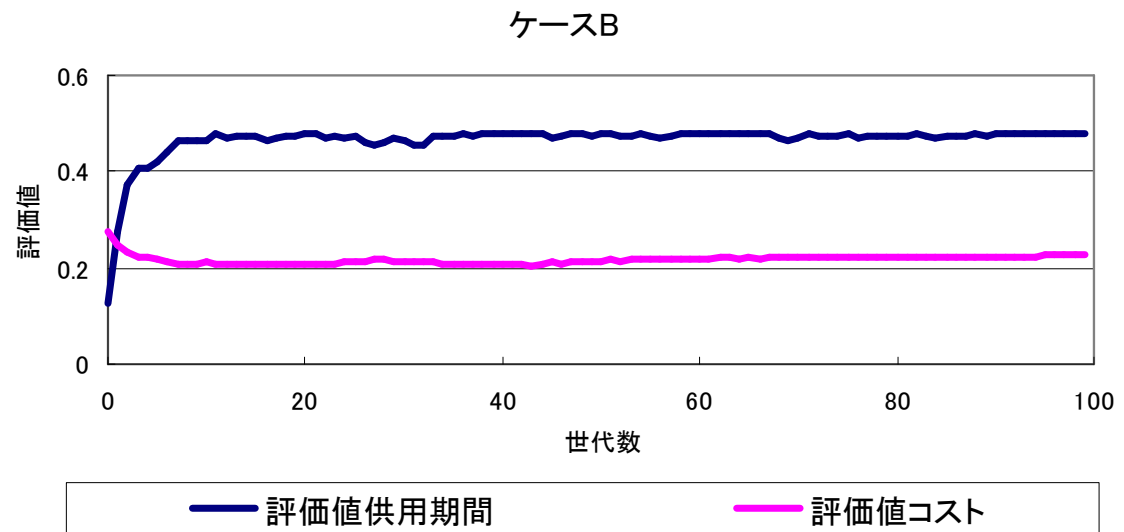
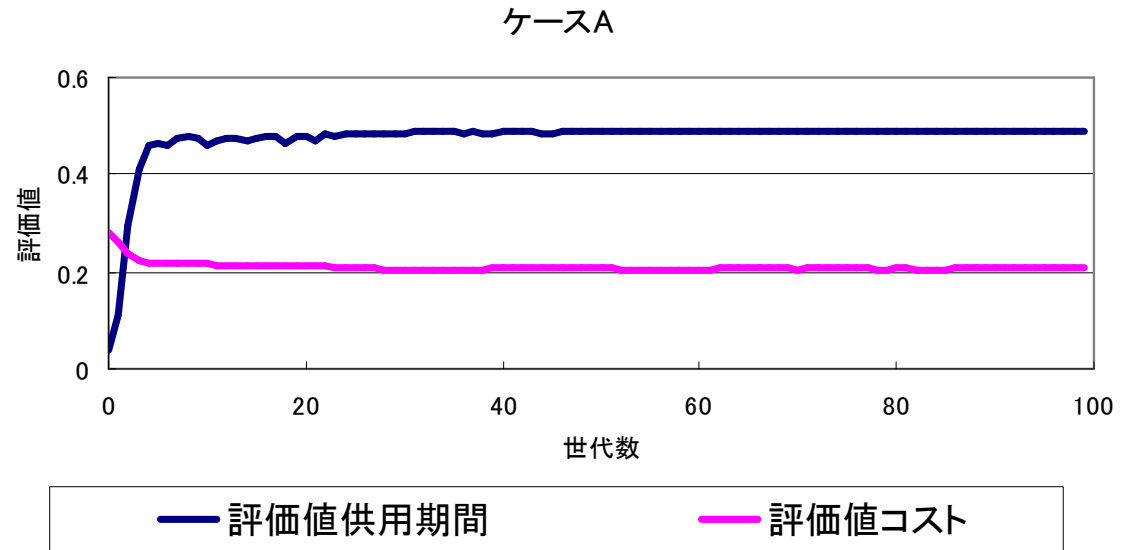


6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 遺伝的アルゴリズムの適用

各評価値の
推移



ケースA、B
どちらも比較的
早い段階で最
適解が導出さ
れている。



6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 遺伝的アルゴリズムの適用

解析結果

ケース A			ケース B		
補修時期	補修方法※1	仕上材種※2	補修時期	補修方法	仕上材種
6	補修C	A	30	補修B	C
15	補修C	C	36	補修B	C
24	補修C	C	39	補修A	C
33	補修C	C	48	補修A	B
42	補修A	C	54	補修B	B
48	補修B	C	63	補修B	A
57	補修C	C			

※1

補修A：表装材

補修B：モルタル

補修C：コンクリート

※2 表-1に示す仕上種類

A：耐用年数9年

B：耐用年数18年

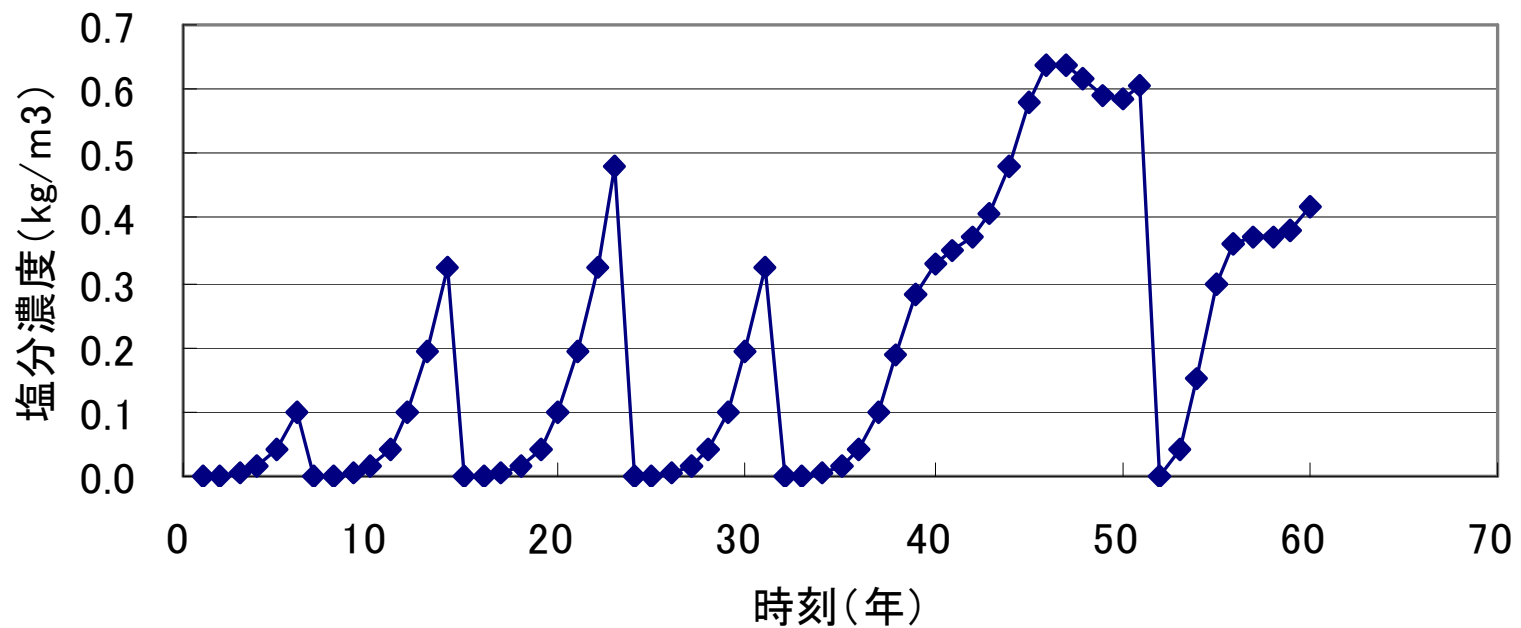
C：耐用年数36年

導出された最適解

解析結果

解析結果 ケースA

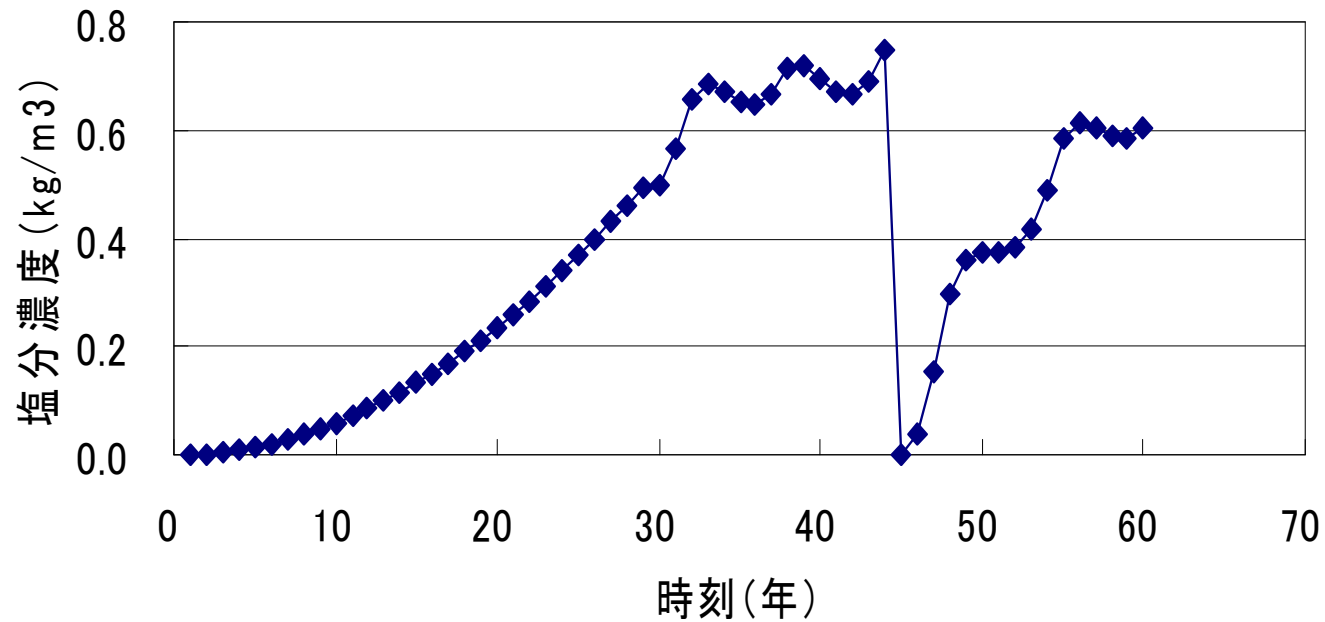
鉄筋位置での塩分濃度履歴(最適補修計画 ケースA)



6. RC造建築物の維持保全計画策定支援システム 解析結果

解析結果 ケースB

鉄筋位置での塩分濃度履歴(最適補修計画 ケースB)



まとめ

- 中性化および塩害に対する補修・改修計画最適化問題について、離散スケジューリング問題を仮定し、改良共存GAによって、多目的最適解の導出を試みた。
- 鉄筋コンクリート構造物の中性化予測モデルとして、反応拡散モデルの構築を行い、さらに、仕上げ材料の中性化抑制効果の理論的実装を行った。その結果、本手法により仕上げ材料およびモルタルの躯体保護効果を定量的に評価可能なモデルを得た。
- これらを用いて、補修・改修問題の最適化に対して汎用多基準最適化システムへの実装を行い、維持保全計画策定問題に対しても有効な解の導出が可能であることを確認した。

さいごに

