

2013年度夏学期・総合科目一般
人間社会と交通システム
「交通システムの安全」

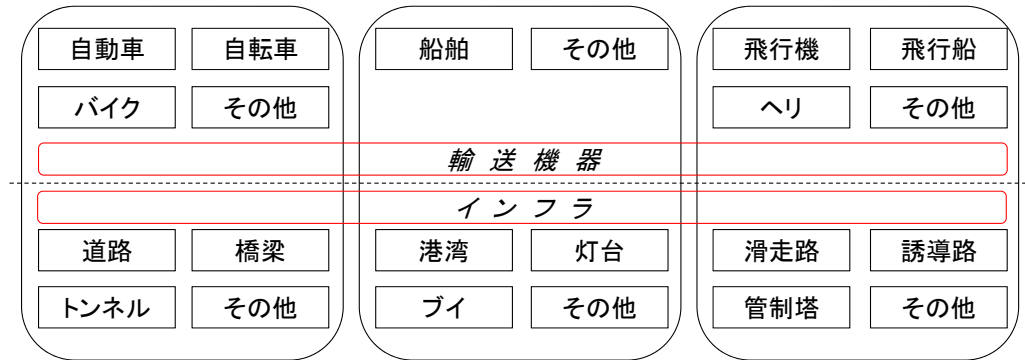
平成25年6月18日(火)
14:50~16:20

工学部システム創成学科
Cコース(知能社会システムコース)
村山英晶

講義内容

- 交通システムを担う構造物の安全性
 - どんなリスクがあるのか？
- リスクとの向き合い方
 - どうすればリスクを下げられるのか？
- 構造ヘルスマモニタリング
 - 構造物を賢くする！
- 光ファイバセンサによる構造ヘルスマモニタリング
 - 最新技術の応用！

交通システム(ハードウェア)



輸送機器・インフラを構成する構造物の安全性の確保

構造物とは

- 荷重を支えることを目的とする材料の集合体
 - 機械・土木建築・輸送機器・生活用品などの人工物
- 課せられるミッション
 - あらかじめ決められた環境・期間において、壊れることなく形状を保つこと



構造物の設計寿命



- 部品の摩耗・疲労や性能の観点から、大規模な補修・補強・改造をしなくても構造システムとしての役割を果たせる期間. 設計時に予測・決定される.

建築構造物の設計寿命?

- 25年
- 50年
- 100年



Dept. of Systems Innovation, Tokyo Univ.

2013年度駒場総合科目

2013/6/18

5

構造物の設計寿命



- 部品の摩耗・疲労や性能の観点から、大規模な補修・補強・改造をしなくても構造システムとしての役割を果たせる期間. 設計時に予測・決定される.

輸送機器(船・航空機)の設計寿命?

- 25年
- 50年
- 100年



Dept. of Systems Innovation, Tokyo Univ.

2013年度駒場総合科目

2013/6/18

6

構造物の設計寿命



- 部品の摩耗・疲労や性能の観点から、大規模な補修・補強・改造をしなくても構造システムとしての役割を果たせる期間. 設計時に予測・決定される.

特例



使い捨てロケット



ピラミッド

Dept. of Systems Innovation, Tokyo Univ.

2013年度駒場総合科目

2013/6/18

7

構造物の設計寿命



- 部品の摩耗・疲労や性能の観点から、大規模な補修・補強・改造をしなくても構造システムとしての役割を果たせる期間. 設計時に予測・決定される.
- 設計寿命は余裕を持って決められているため、それを超えて運用されてもすぐに壊れるというわけではない.

しかし、...

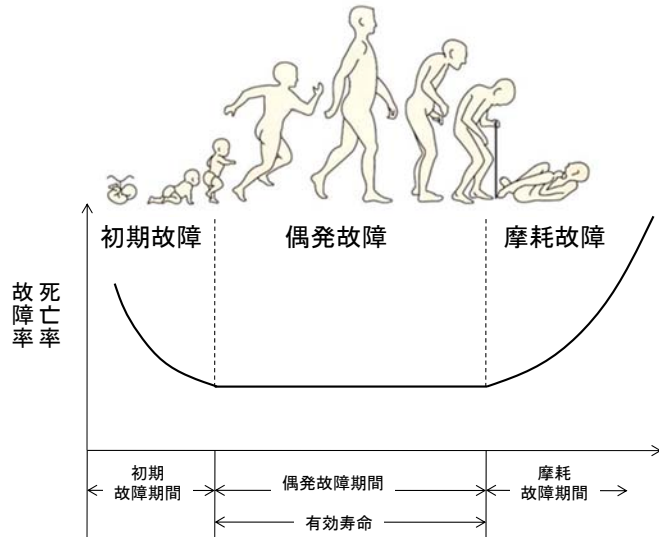
Dept. of Systems Innovation, Tokyo Univ.

2013年度駒場総合科目

2013/6/18

8

故障率(リスク)の経時変化



バスタブ曲線(故障率の経時変化)

故障率=単位時間あたりの故障確率

初期故障



- 設計不良・製造不良

構造物の分野における世界の三大大事故



リバティー船(1942)
溶接不良&低温脆性破壊



コメット機(1954)
応力集中&疲労破壊



タコマ橋(1940)
渦流出&自励振動

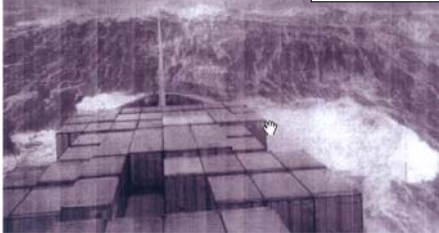
偶発故障



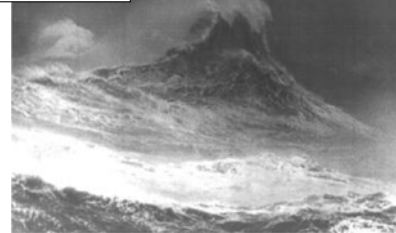
- 想定外の状況

- 過大荷重
- ヒューマンエラーによる異常な運用・運転

海上における想定外の波浪



コンテナ船を襲う大波



日本の南洋における三角波

スリーマイル島の原発事故(米国, 1979)
チェルノブイリ原発事故(ウクライナ, 1986)

摩耗故障



- 疲労・腐食



アロハ航空243便(米, 1988)
機齢19年
疲労き裂
搭乗員1名が行方不明

+ ずさんな検査



エリカ号(仏, 1999)
船齢25年
腐食
10,000トンの油流出

+ 嵐



プレステージ号(西, 2002)
船齢26年
腐食
30,000トンの油流出

+ 嵐

2つの事例で疲労・腐食による事故の経緯を見てみましょう

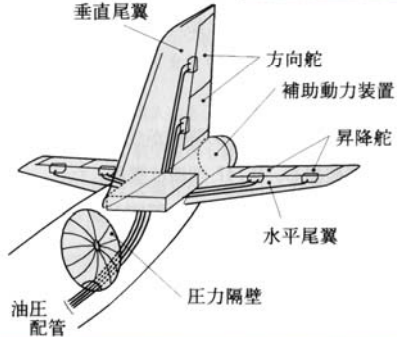
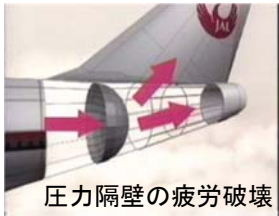
日本航空123便の事故(1985年・疲労破壊)

美浜原発配管破裂の事故(2004年・腐食/壊食)

摩耗故障

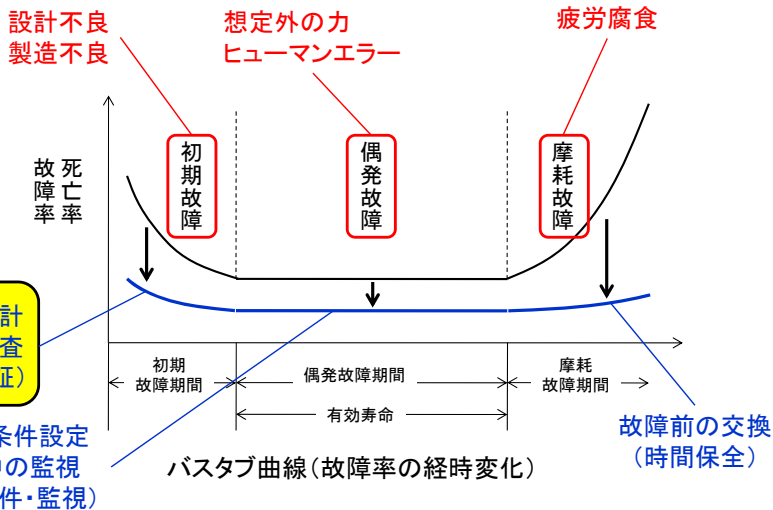


日本航空123便の事故 (1985年・疲労破壊)



- 日本航空123便羽田発大阪行
 - Boeing 747型機
 - 離陸12分後、高度7,200m付近で後部圧力隔壁の破壊とそれに伴って生じた垂直尾翼構造の破壊により姿勢制御が不能となる。
 - 乗員乗客524名中520名が死亡。航空機単独の事故としては世界最大規模。

故障率を下げるには？



摩耗故障



美浜原発配管破裂の事故 (2004年・腐食/壊食)



- 関西電力(株)美浜原子力発電所
- 加圧水型軽水炉 (PWR)
- 事故: 2004年8月9日に発生
- 3号機のタービン建屋(3階建て)内で配管が破裂して高温の蒸気が噴出。配管は二次配管なので放射能汚染はなかった。
- 死者5名, 重体1名, 重軽傷5名

炭素鋼製復水管(外径約560 mm, 肉厚約10 mm, 冷却水の圧力10 MPa, 温度142°C)
最大で約570 mmにわたってめくれるように破裂。800トンの冷却水が噴出。破裂した部分の肉厚は最小で0.4 mm, 大半は2~3 mmに減少。基準値は4.7 mm。

設計・検査の難しさ

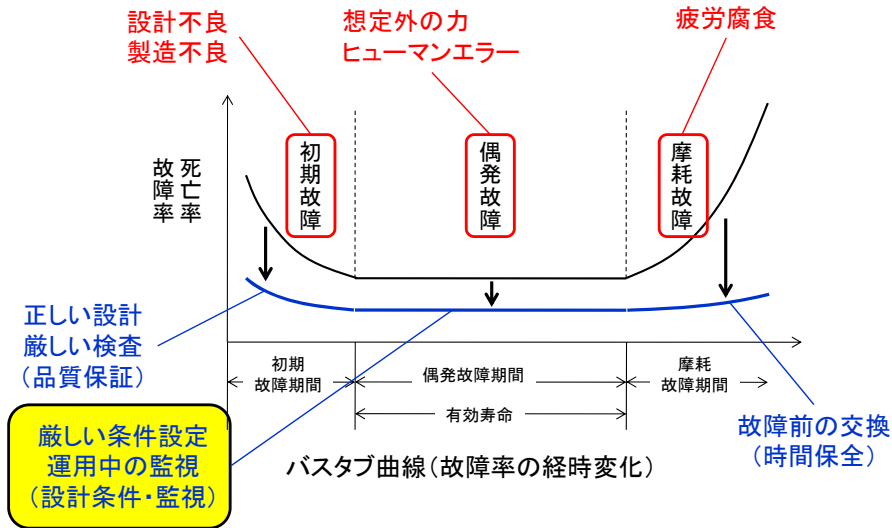


- Millennium Bridge
 - 英国・テムズ川
 - 紀元2000年を記念して開通
- 長さ325 m
- 設計者
 - Norman Foster (Foster+Partners)
 - ブリツカー賞受賞*の著名建築家
- 構造設計
 - Arup社
 - 世界有数の設計コンサルタント

軽快さを強調した羽のような斬新なデザイン

開通後、歩行者により橋桁が横に揺れ、その振幅が数センチに達したため、開通2日後に封鎖

故障率を下げるには？



条件設定・運用中の監視の難しさ

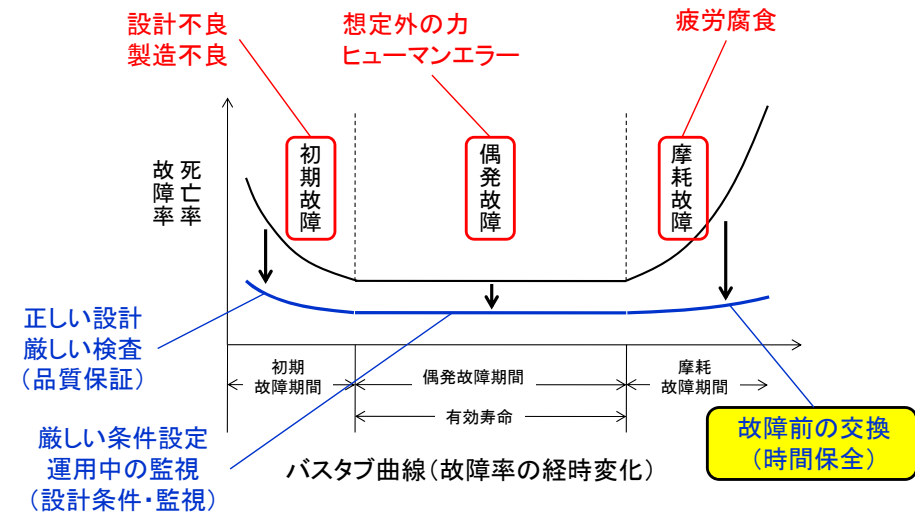


- ミネアポリス高速道路崩落事故(米国)
 - 2007年8月1日、9名死亡、100名以上が負傷
 - 補修工事中の事故(1957年建造)



人間による検査はかならずしもあてにならない

故障率を下げるには？



故障前の交換の難しさ



- 事後保全
 - 壊れた後に修理・交換すること

例
家電(テレビ、洗濯機、冷蔵庫)
建造物のなかで荷重を受け持たない部分

- 予防保全
 - 時間保全

適用対象が限られます

- 壊れる前に定期的に点検・修理・交換すること

例
自動車、エレベーター、火災報知器
建造物のなかで激しく動く部分(回転機)

故障前の交換の難しさ

橋(橋梁)のことを考えてみましょう

ー 日本にはどのくらいの橋がありますか？

- 高度経済成長期(1954年～1973年の約20年間)に多く建設されました
- 1960年までに13,000橋、1970年までの41,000橋
- 現在、長さ15m以上の道路橋は約150,000橋



1960-70に建設された橋の数
41,000 - 13,000 = 28,000橋

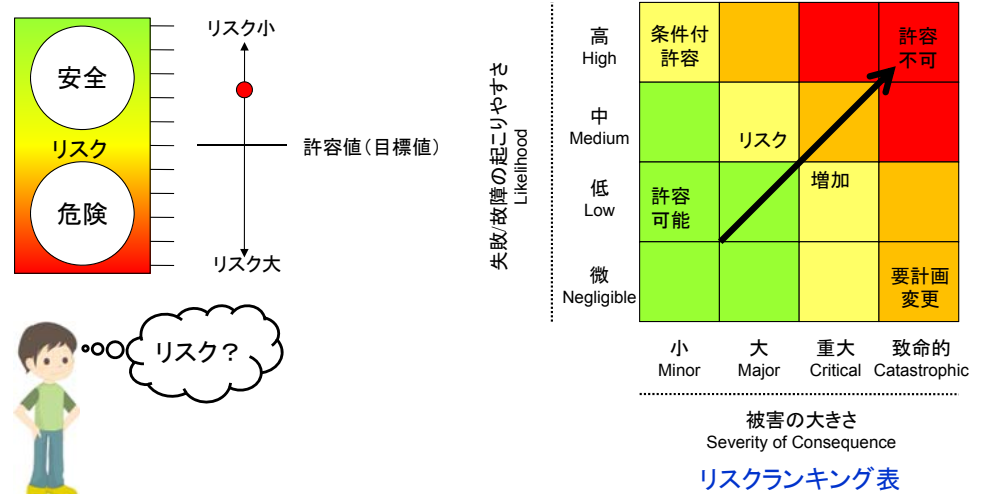
10年で交換するためには
28,000 ÷ 365日 ÷ 10年 = 8橋/日

お金 資源 エネルギー

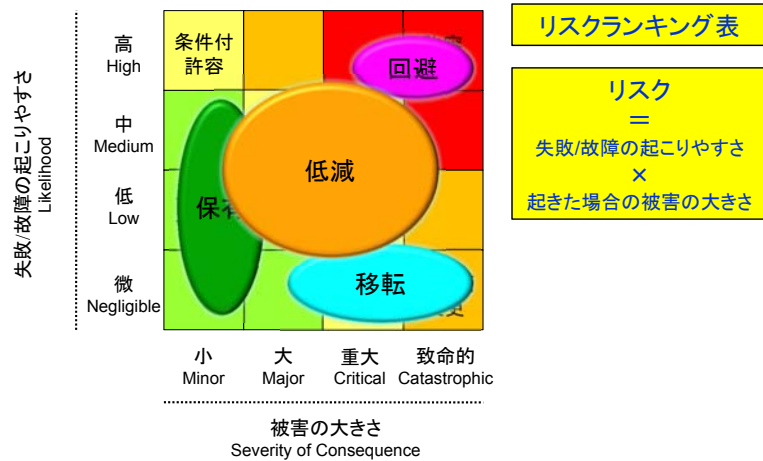
リスク

・ リスク =

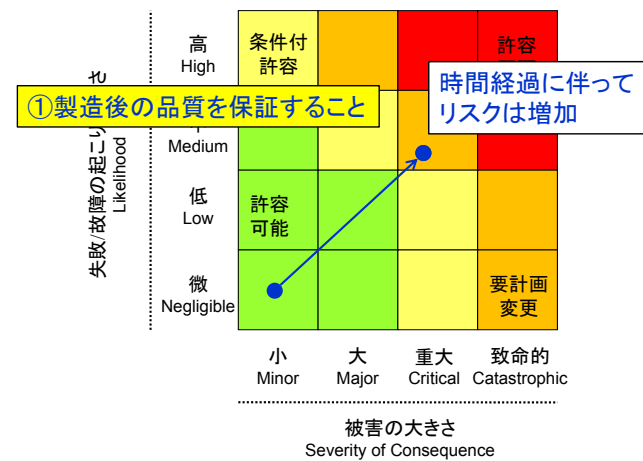
「失敗/故障の起こりやすさ」×「起きた場合の被害の大きさ」



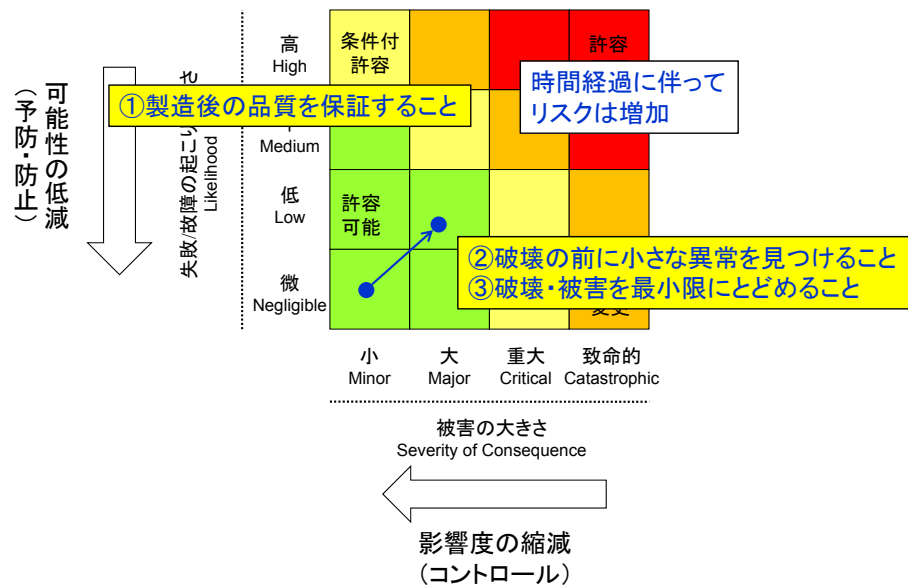
リスクとどう向き合うのか？



リスクとどう向き合うのか？



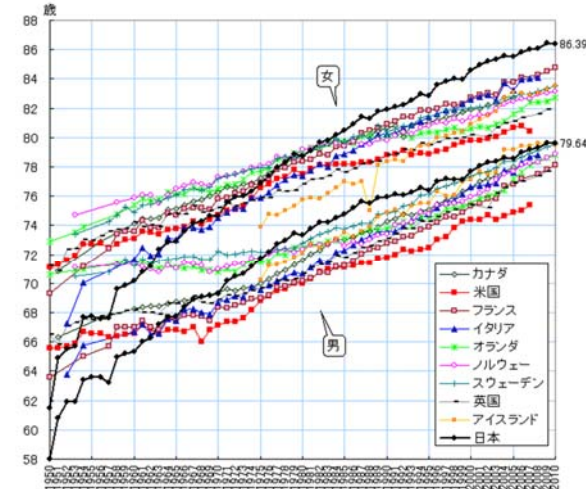
リスクとどう向き合うのか？



人間の平均寿命の推移



主要先進国における平均寿命の推移



日本人の平均寿命

2010年
86.39歳(女性)
79.64歳(男性)

1950年
61.50歳(女性)
58.00歳(男性)

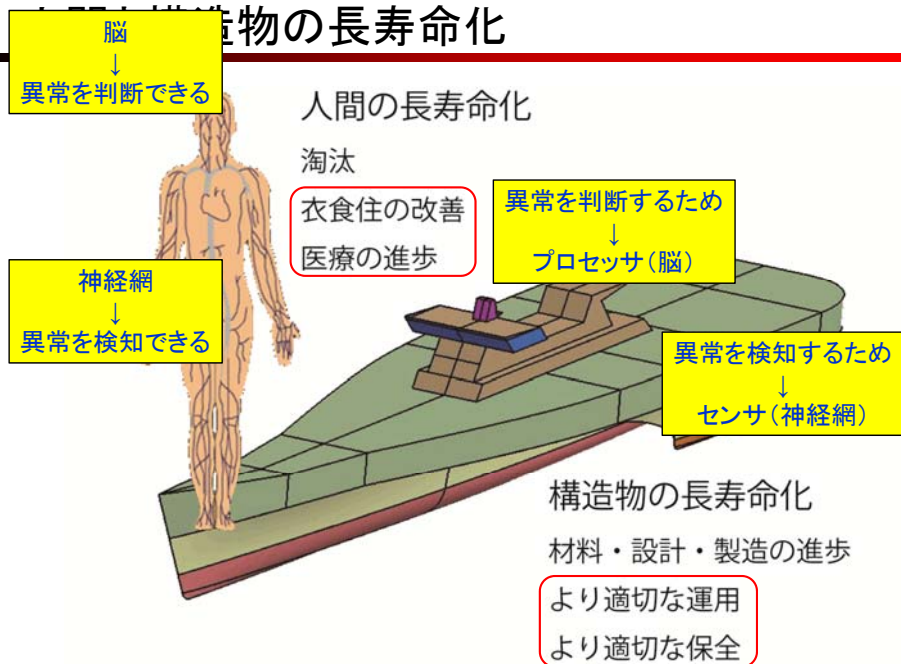
日本人の寿命は過去60年間で
20歳以上伸びました

元気な老人はたくさんいます

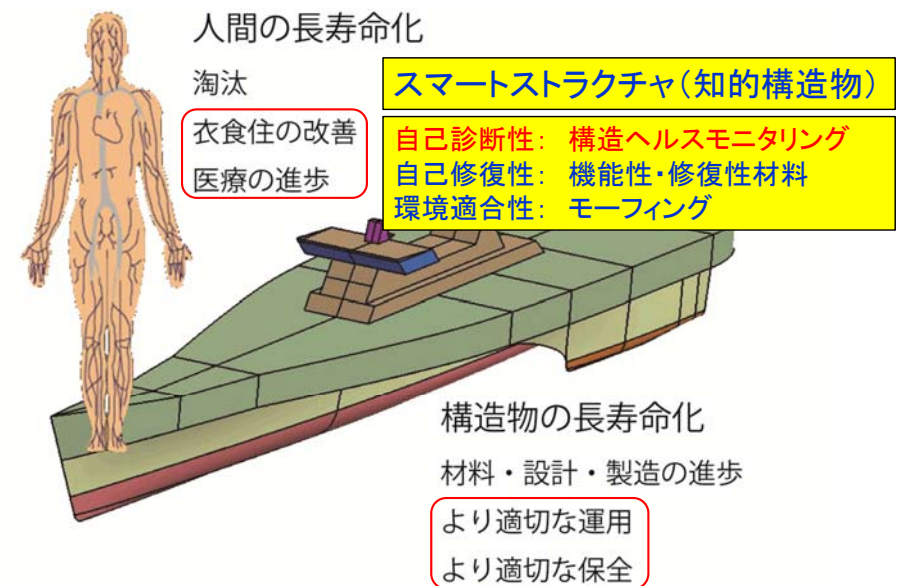
人間を参考に考えてみよう

(資料) 厚生労働省「完全生命表」「簡易生命表」(日本とそれ以外の2007~10年データ)
WDI Online 2008.7.31、社会保障人口問題研究所「人口統計集2005」(1959年以前)

構造物の長寿命化



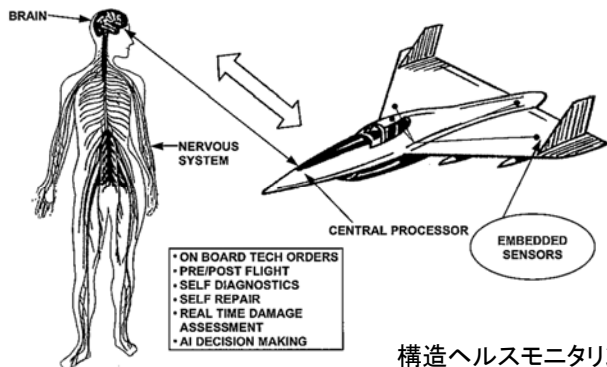
人間のように賢い構造物



構造ヘルスマモニタリングの実現のためには



- 痛みを検知できる神経網を創る必要がある
- 異常を判断できる脳を創る必要がある

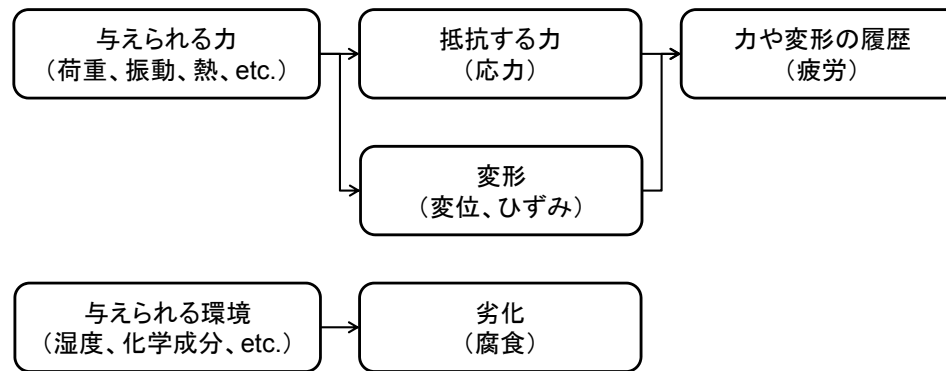


構造ヘルスマモニタリングの概念図

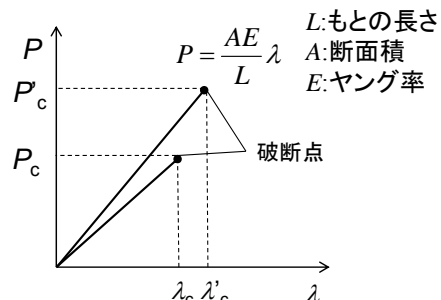
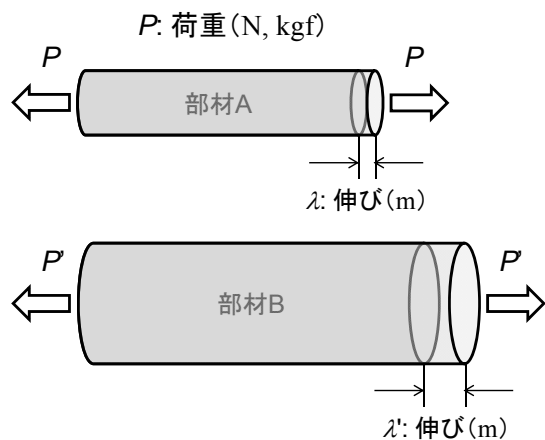
どんな神経が必要か？



- 材料・構造の損傷・破壊に関わるものを測ればよい



強度と変形



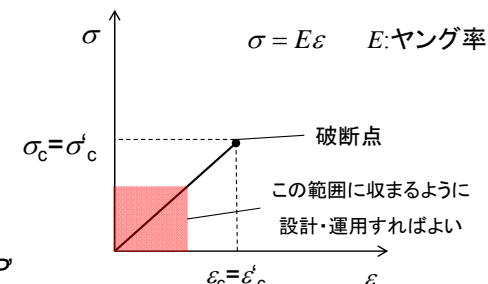
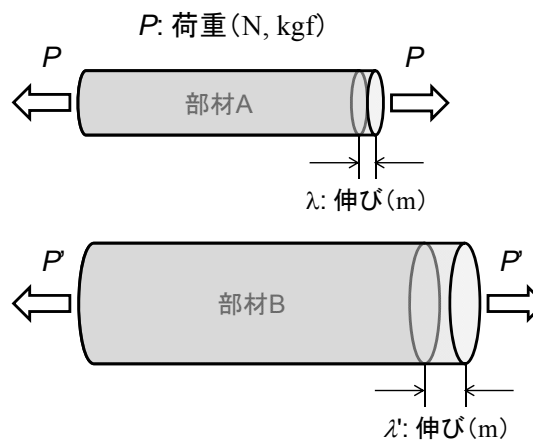
荷重と伸びの関係(フックの法則・1678)

部材毎に壊れる荷重が異なる
↓
設計がとても面倒

$$\frac{P}{A} = E \frac{\lambda}{L}$$

σ : 応力 (N/m²=Pa, kgf/m²)
 ε : ひずみ (無次元量)

強度と変形



応力とひずみの関係(コーシー・1822)

材料が同じであれば同じ応力で壊れる
↓
強度 ≡ 壊れるときの応力
↓
設計しやすい

実際の構造物の応力が分かればよい

$$\frac{P}{A} = E \frac{\lambda}{L}$$

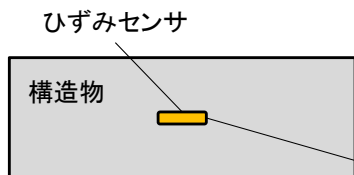
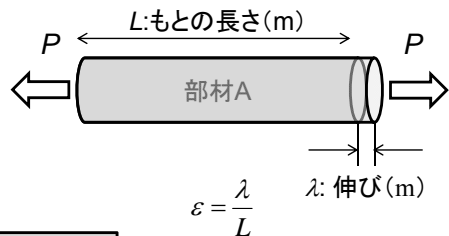
σ : 応力 (N/m²=Pa, kgf/m²)
 ε : ひずみ (無次元量)

実際の構造物で応力は分かるか？

結論： 直接は測れません

- ∵ 荷重が分からないから
- でも、実験室では測れます
- つまり、ひずみから応力を求めることはできます

$$\sigma = E\varepsilon \quad E: \text{ヤング率}$$



伸び縮みが分かればよい

光で構造物のひずみを測る技術

光ファイバ

石英光ファイバ



国際光ファイバネットワーク

プラスチック光ファイバ



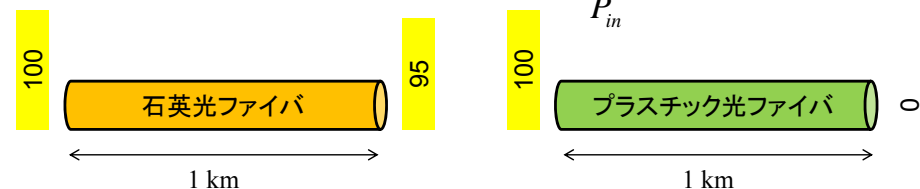
フォトニクスに貢献してきた人たち

- **マイケルソン (1852 – 1931・アメリカ)**
 - 光の干渉に関する研究により1907年にノーベル物理学賞
 - ・ 光ファイバ干渉計の開発につながる
- **アインシュタイン (1879 – 1955・スイス)**
 - 光電効果の解明により1921年にノーベル物理学賞
 - ・ レーザー・受光器の開発につながる
- **ラマン (1888 – 1970・インド)**
 - 光の散乱に関する研究により1930年にノーベル物理学賞
 - ・ 光ファイバ温度センサの開発につながる
- **タウンズ (1915 – ・アメリカ)**
 - レーザーの基本原理の発明により1964年にノーベル物理学賞
- **カオ (1933 – ・イギリス／アメリカ)**
 - 光ファイバの開発により2009年にノーベル物理学賞
 - ・ 光ファイバ通信・光ファイバセンサの発展につながる

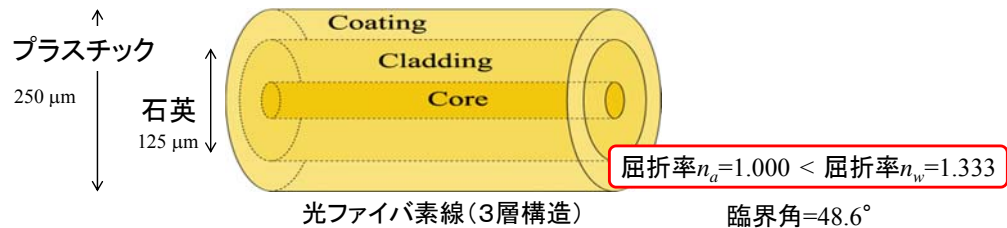
光ファイバ

| 種類 | 石英光ファイバ | プラスチック光ファイバ | |
|------|-------------------------|------------------------------------|--------|
| 用途 | 長長距離、長距離 公衆通信網大規模LAN | 短距離 (~50m) 構内配線・オーディオカーエレクトロニクス | |
| 構造 | コア | 石英ガラス | |
| | (外径) | 10 μm | 980 μm |
| | クラッド (外径) | 石英ガラス | プラスチック |
| 伝送損失 | 0.2 dB/km | 200 dB/km | |

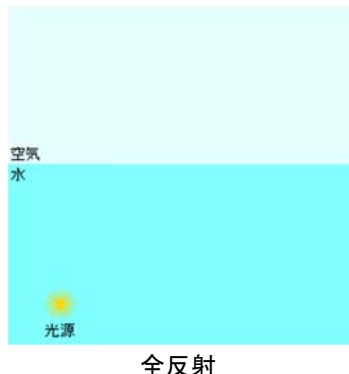
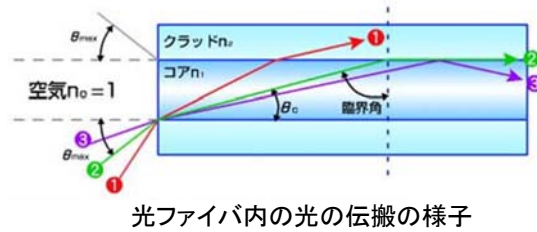
$$\text{Loss [dB]} = 10 \times \log \frac{P_{out}}{P_{in}}$$



光ファイバ内での光の伝搬(反射・屈折)

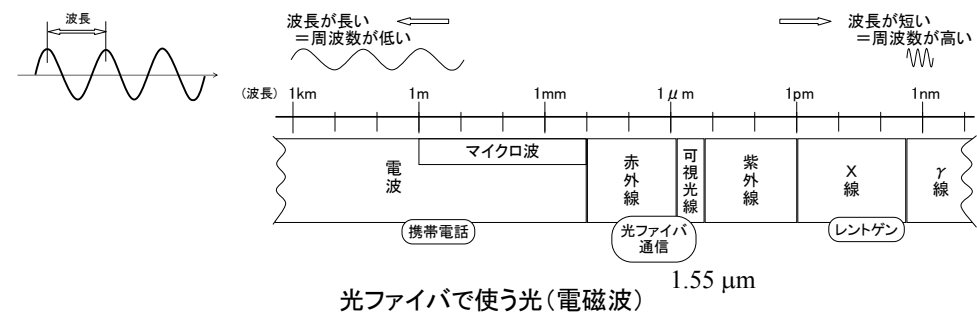
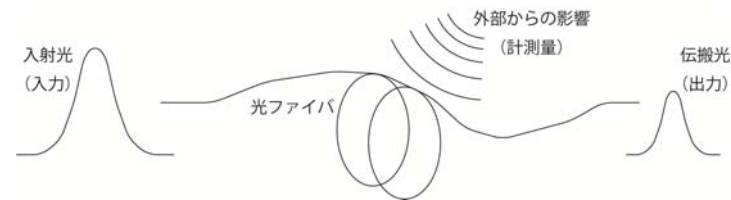


屈折率 $n_{cl}=1.45 < \text{屈折率 } n_{co}=1.45 \times 1.002$
臨界面角=86.4°



Dept. of Systems Innovation, Tokyo Univ.

光ファイバセンサ

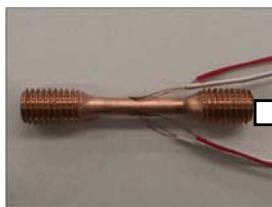
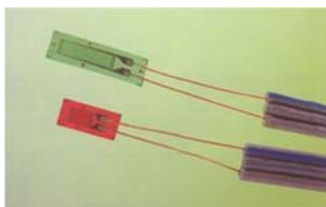


Dept. of Systems Innovation, Tokyo Univ.

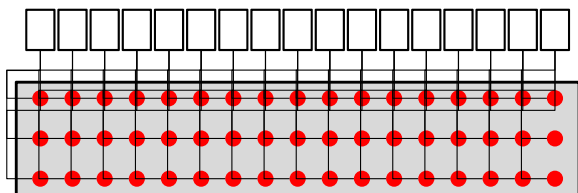
電気でひずみを測る



・ ひずみゲージ(ポイントセンサ)



計測器



Dept. of Systems Innovation, Tokyo Univ.

電気でひずみを測る

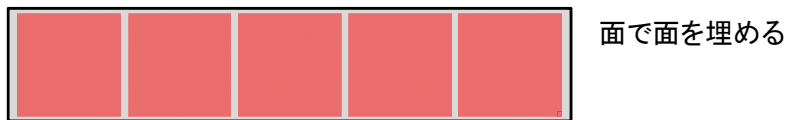
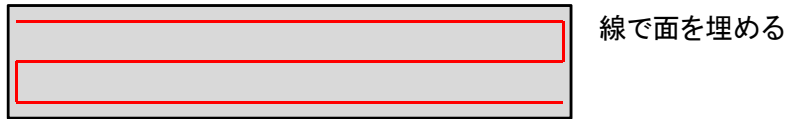
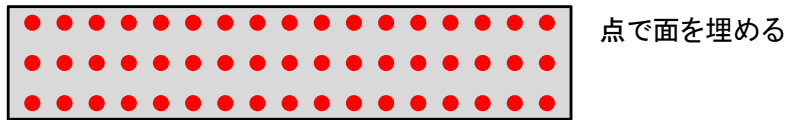


Dept. of Systems Innovation, Tokyo Univ.

効率的に広範囲の計測をするには？



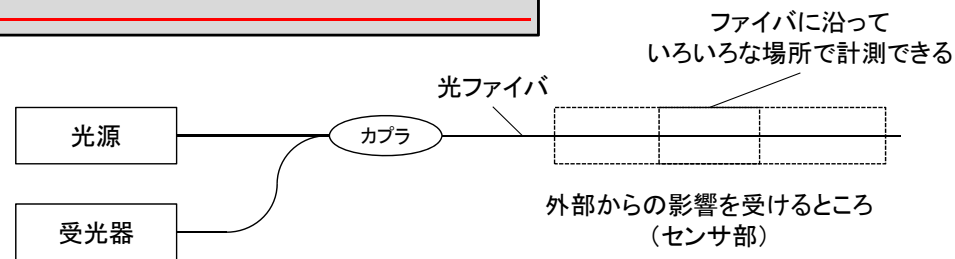
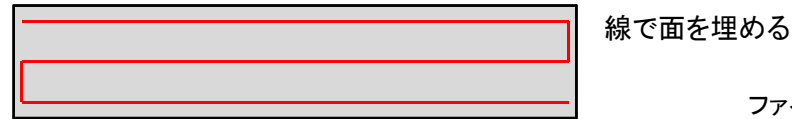
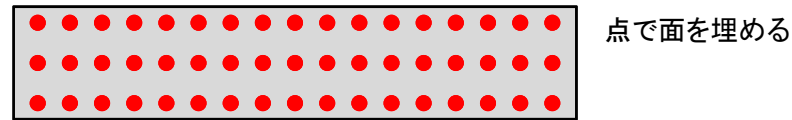
神経網をつくる = なるべくたくさんの位置で計測したい



効率的に広範囲の計測をするには？



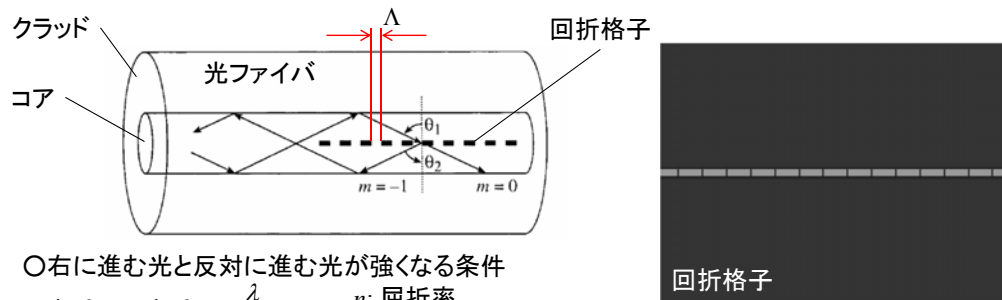
神経網をつくる = なるべくたくさんの位置で計測したい



光ファイバに沿って測れるのか？



- 回折を利用する: 回折格子



○右に進む光と反対に進む光が強くなる条件

$$n \sin \theta_2 = n \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda}$$

n : 屈折率
 m : 回折の次数

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n \sin \theta_1} = \frac{1}{2} \times \frac{\lambda}{n}$$

λ : 光の波長
 Λ : 格子間隔

$$\left(\because m = -1, \theta_2 = -\theta_1 = \frac{\pi}{2} \right)$$

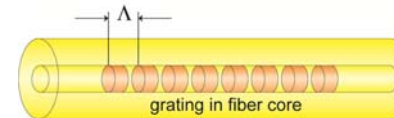
光ファイバ内を伝搬する光の波長の半分の間隔の格子

反対方向に進む光が強くなる: 反射光が観測できる

光ファイバに沿って測れるのか？



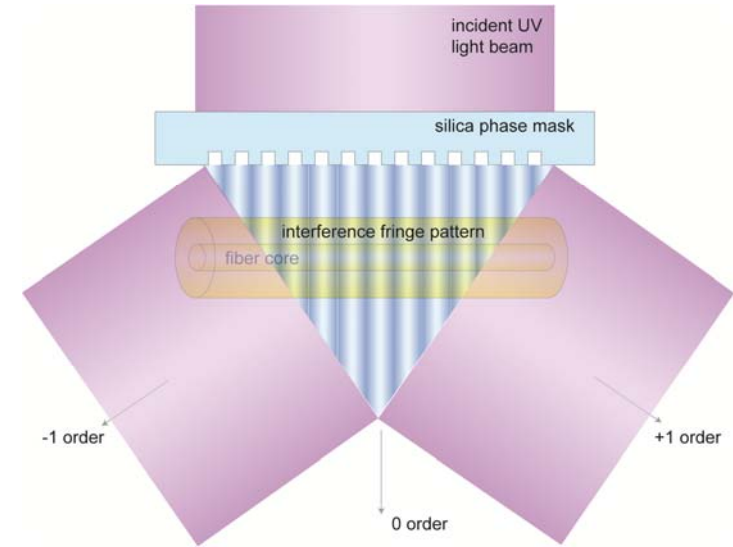
- FBG (Fiber Bragg Grating)
 - 1978: Hill(カナダ)が原理を発案
 - 1989: Meltz(カナダ)が製造方法を発明



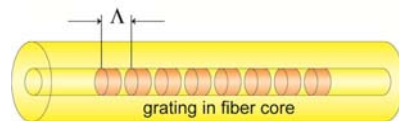
FBGの作り方



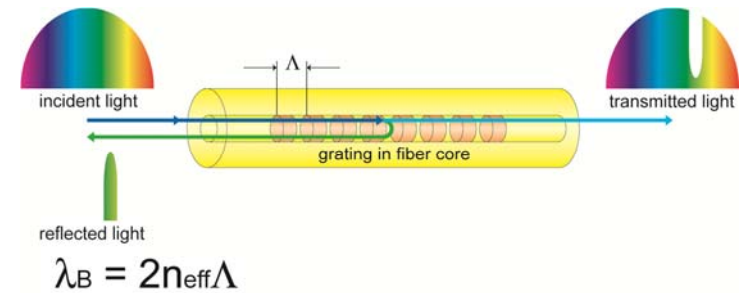
FBGの作り方



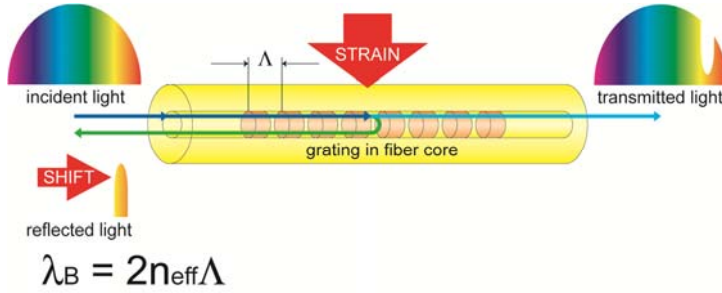
FBGの作り方



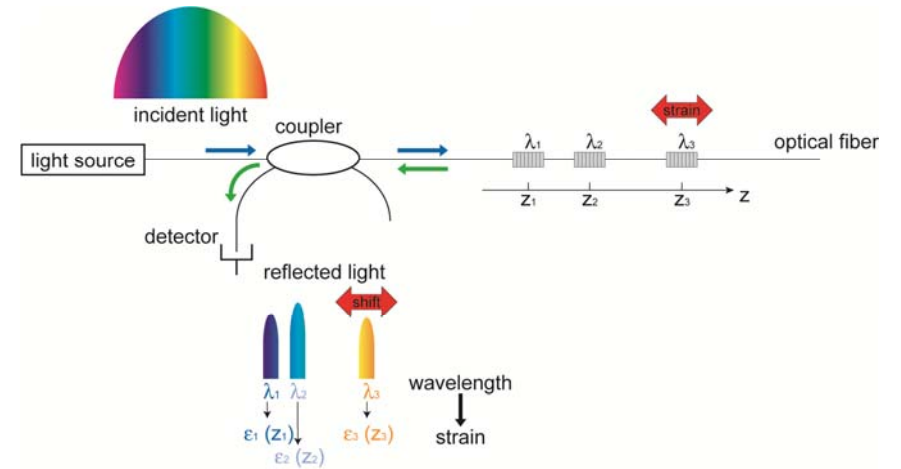
FBGによるひずみ計測



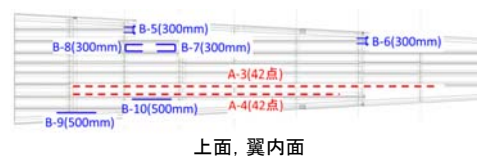
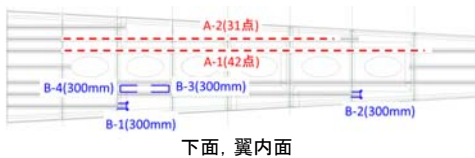
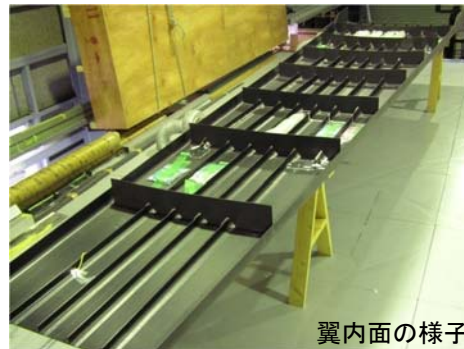
FBGによるひずみ計測



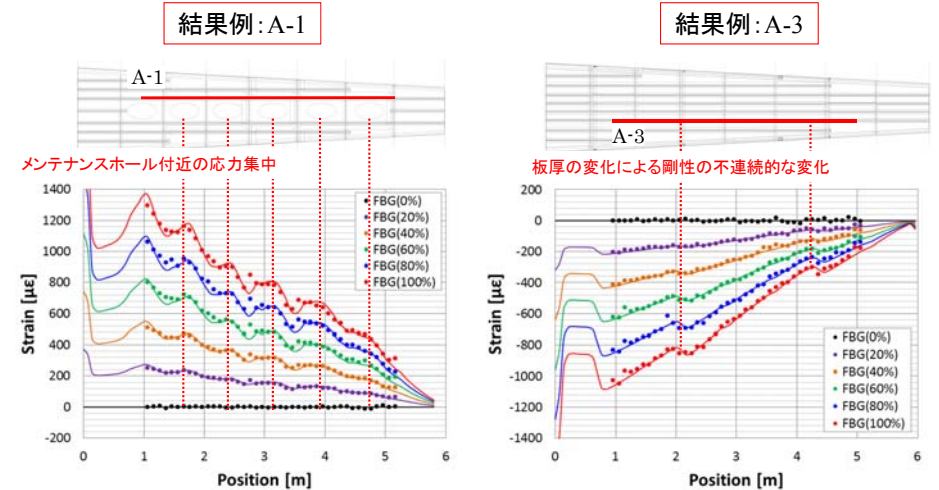
FBGを使った多点計測



FBGを使った多点計測



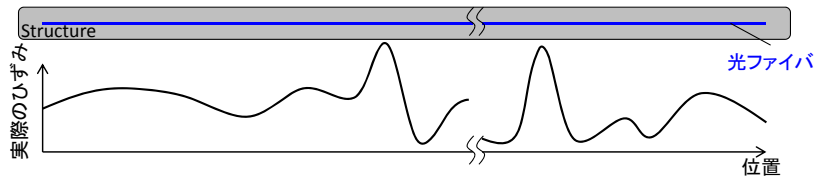
FBGを使った多点計測



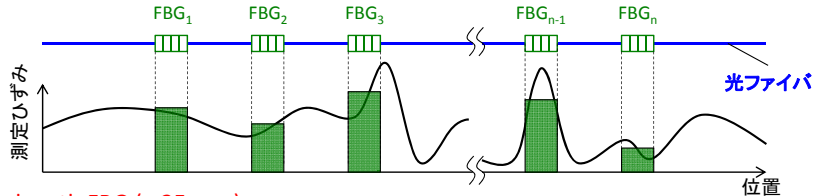
たくさんの位置で正確なひずみの計測ができる！

40点/4m = 10点/1m → もっと高密度にできないのか？

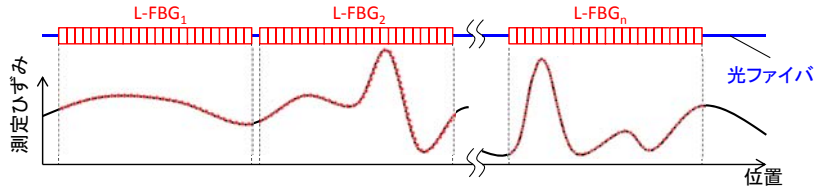
FBGを使った超高密度の多点計測



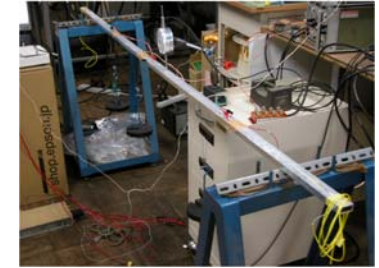
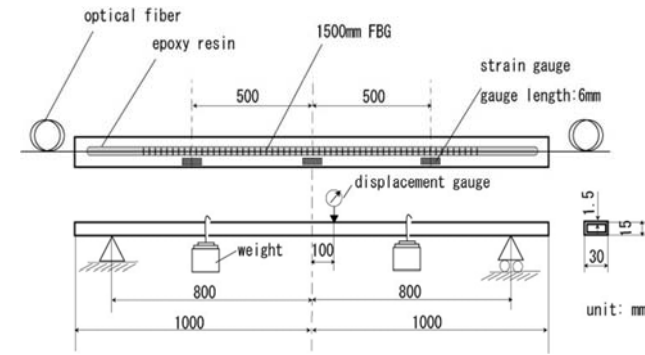
Conventional FBG (5 – 25 mm)



Long-length FBG (> 25 mm)



FBGを使った超高密度の多点計測

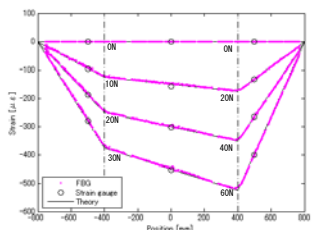
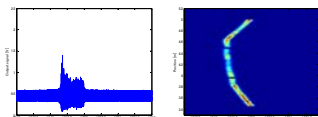
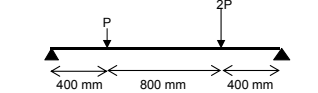


実験の様子

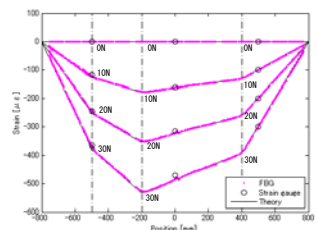
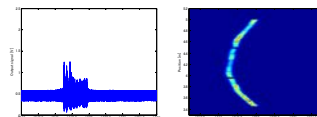
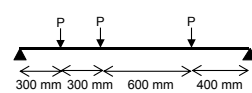
FBGを使った超高密度の多点計測



Case 1 (P=10, 20, 30 N)



Case 2 (P=10, 20, 30 N)



40点/4m = 10点/1m → 1,000点/1m (100倍！)

現在のステージ



- 航空機・船舶への利用
 - 実用化にはまだ課題があります
 - 経済的な効果を明らかにする必要があります
- 橋梁・高架橋への利用
 - 実用化に向けてトライアルが進んでいます
 - 実際の現場で効果を示す必要があります



過大荷重の問題



- 交通システムを担うインフラ・輸送機器のリスク
 - 近年, 特に老朽化によるリスクが顕在化
- 技術的な観点からのリスクの低減
 - 痛みを感じることができる“賢い”構造物の実現
- 最新技術の応用
 - 光ファイバセンサを用いた効率的なモニタリングシステム



- 問①: 交通システムを担うインフラまたは輸送機器の構造物としての老朽化問題を具体的な事故例(橋梁, トンネル, 船舶, 航空機などの事故例)を挙げて述べよ.
- 問②: 上記の事故を防止するために必要な対策について考えを述べよ. 対策については, 2つの視点(①技術開発, ②新ルールの策定や運用・組織体制の改善)から考えること.
- 備考: 根拠とした情報は, それぞれ参考文献やURLとして示すこと.
- 分量: A4・2~3ページ程度.
- 締切: 7月23日(火)
- 提出先: 教務課レポートボックス