

# 第16回 コンクリート構造物の品質確保に関する技術講習会

## 角島大橋のLCC検討 脱炭素社会への懸念

徳山工業高等専門学校

温品達也

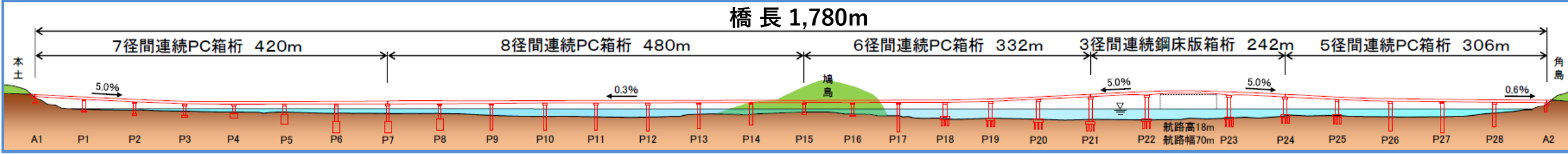
- ① 角島大橋の実績に基づき  
海上橋梁のライフサイクルコストを試算  
補修コストの高さと  
耐久性向上技術の意義を考える
- ② 持続可能な社会について  
何故、脱炭素が必要なのか



豊北町 佐々木医院 佐々木医師による空撮

# 角島大橋下部工

## ■ 角島大橋概要図<sup>1)</sup>



着工前



完成後

1) 角島大橋建設誌2001

# 角島大橋下部工

## ■ 角島大橋の施工状況<sup>1)</sup>

### 高強度プレキャスト橋脚の施工

橋脚躯体施工



PC上部エセグメント仮置き



PC上部エセグメント架設

1) 角島大橋建設誌2001

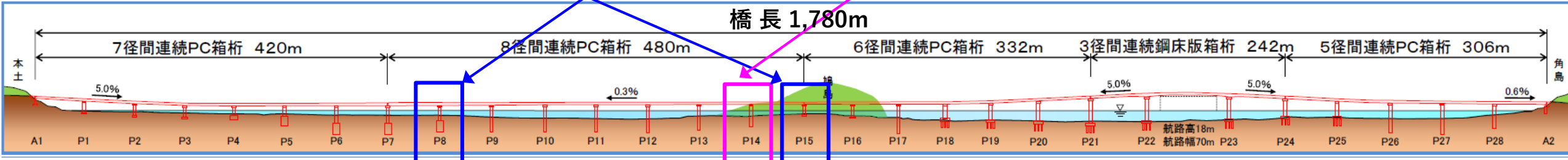
# 角島大橋下部工

## ■ 角島大橋概要図<sup>1)</sup>

現場打ち部のコア採取

PCa部のコア採取

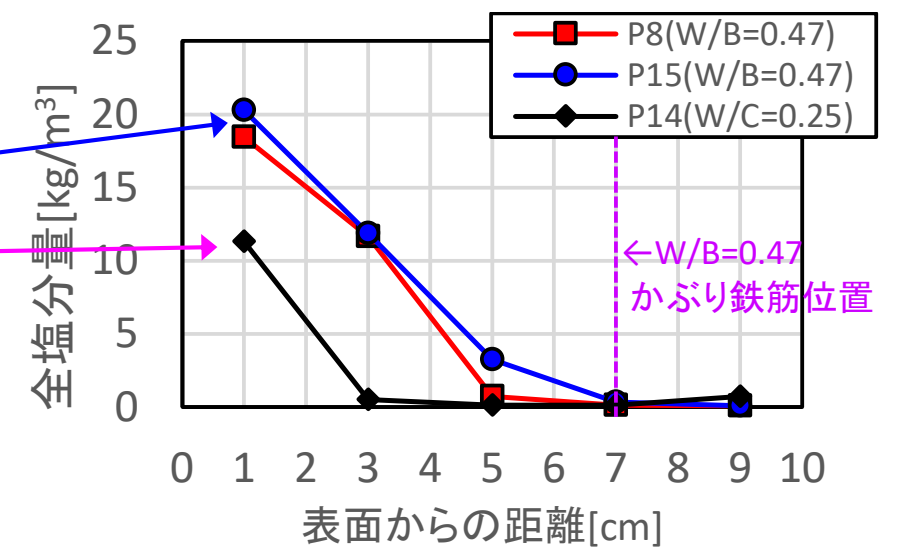
←全28のうち10橋脚がPCa



## ■ 下部工コンクリートの配合

| 対象部位  | 設計基準強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | セメント種類 | W/B  | s/a  | 単体体積重量[kg/m <sup>3</sup> ] |     |     |      |
|-------|--------------------------------|--------|------|------|----------------------------|-----|-----|------|
|       |                                |        |      |      | W                          | C   | S   | G    |
| 現場打ち部 | 30                             | BB     | 0.47 | 0.45 | 162                        | 345 | 821 | 1020 |
| PCa部  | 70                             | OPC    | 0.25 | 0.41 | 160                        | 640 | 655 | 978  |

## ■ 下部工 浸透塩分量 コア実測値17年<sup>2)</sup>

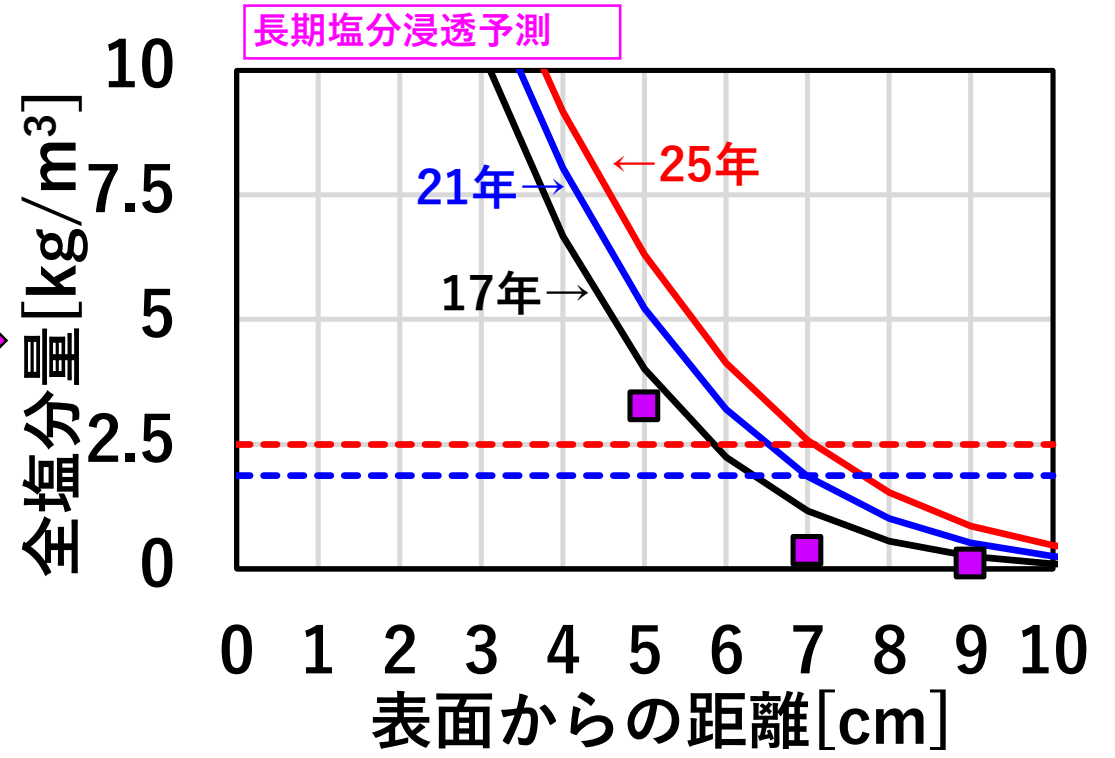
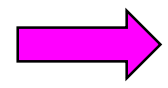
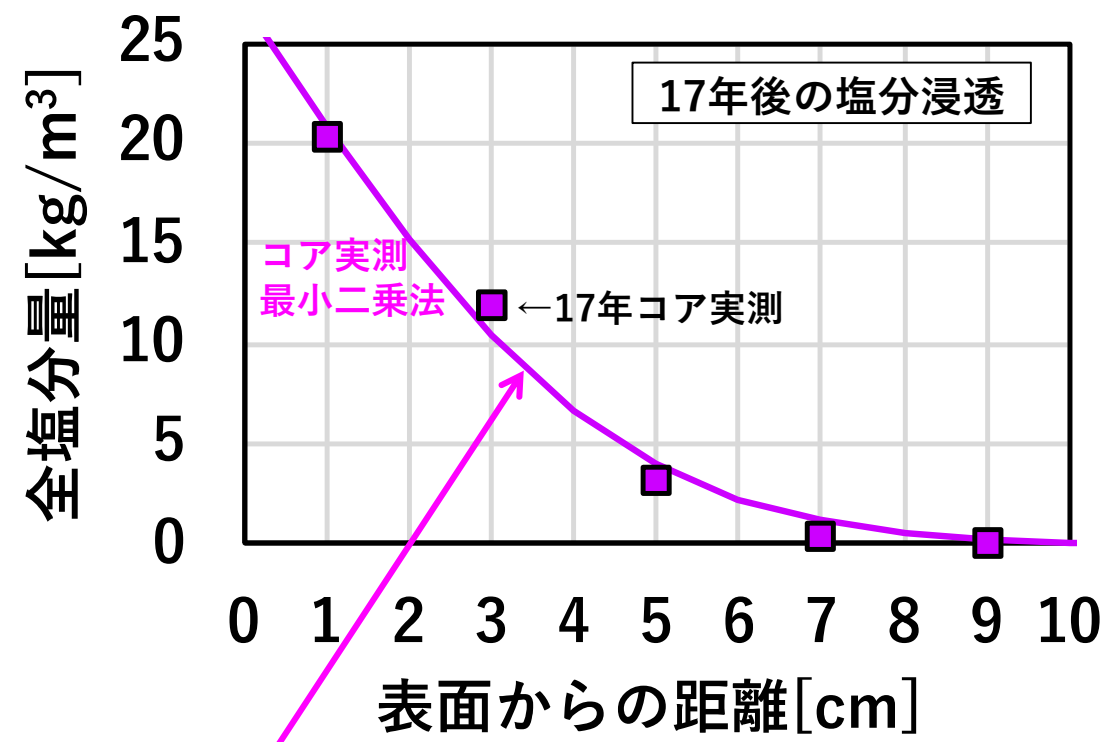


ライフサイクルコストを検討するには  
寿命(限界状態)を予測する必要がある

1)角島大橋建設誌2001  
2)角島大橋長寿命化修繕計画報告書2012

# 限界状態の予測

## ■ コア実測から最小二乗法で算出した設計値による予測



$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1 \cdot c_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right)$$

↑ 26.9kg/m<sup>3</sup>
↑ 0.35cm<sup>2</sup>/y

コア実測値より最小二乗法を用いて C<sub>0</sub>とD<sub>d</sub>を算出し示方書予測式に基づき塩分浸透を予測

# 限界状態予測のポイント

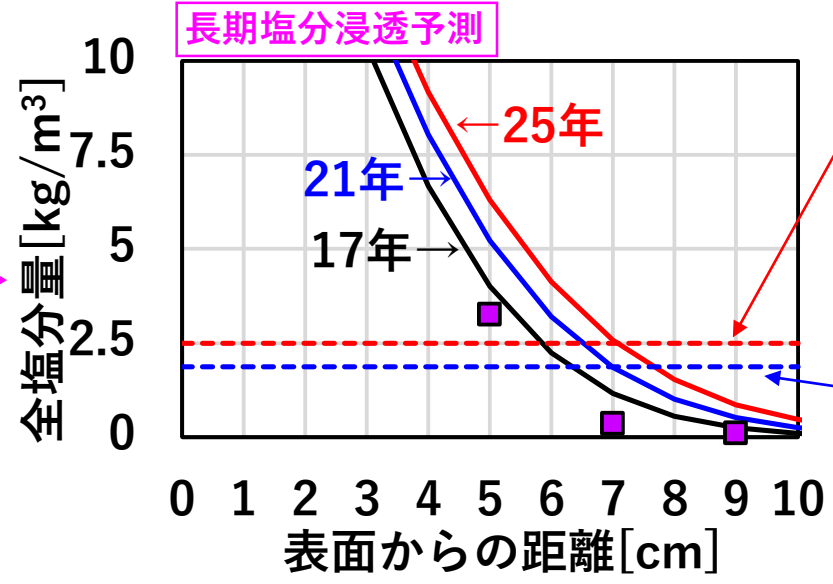
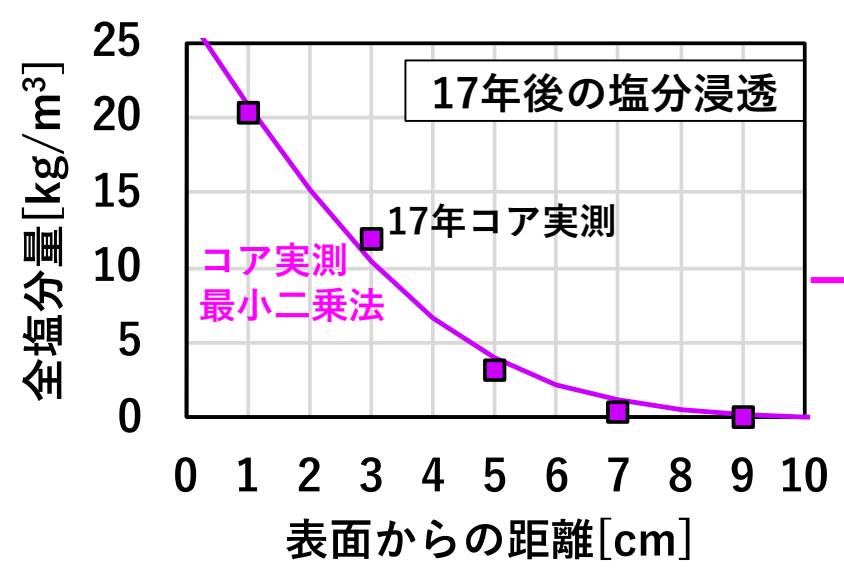
■ 何をもって限界状態とするのか、  
限界状態でどう措置するのか

- ・ かぶり鉄筋位置の塩分量？  
→ 補修基準とできる数値が存在しない



# 限界状態の予測

## ■ コア実測から最小二乗法で算出した設計値による予測



角島大橋補修目安(=2.5kg/m<sup>3</sup>)

- ・ 塩害を受けた土木構造物の補修指針(建設省)を参考に設定された
- ・ 補修は断面修復が計画されている

鋼材腐食発生限界濃度  $C_{lim}$  (=1.9kg/m<sup>3</sup>)

- ・ 示方書2017[設計編] W/B=0.47 BB配合

断面修復工法は腐食ひび割れが発生以降で実施することが一般的であり塩分量2.5kg/m<sup>3</sup>の潜伏末期で実施することは不経済となり得る

## ■ 設計時の照査だけでなく

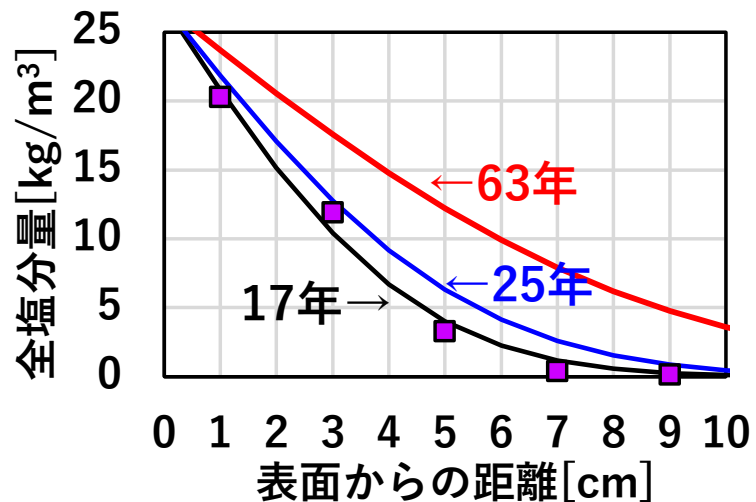
かぶり位置の塩分量に基づき補修時期まで検討することは  
→維持管理においては大きく安全側で不経済となる

## ■ 何をもって限界状態とするのか、 限界状態でどう措置するのか

- ・ かぶり鉄筋位置の塩分量？  
→ 補修基準とできる数値が存在しない
- ・ 腐食ひび割れ発生？  
→ ひび割れ発生の予測をどうすればいいのか  
今は、できるようになった

# 限界状態予測-進展末期(鋼材腐食量)

## ■ 最小二乗法 塩分浸透予測



$$I_{corr} = a(C_{Cl} - C_{lim})$$

塩分量 鋼材腐食発生限界濃度

$$a = \exp(-0.24d - 0.07D + 0.03H - 0.26) \kappa$$

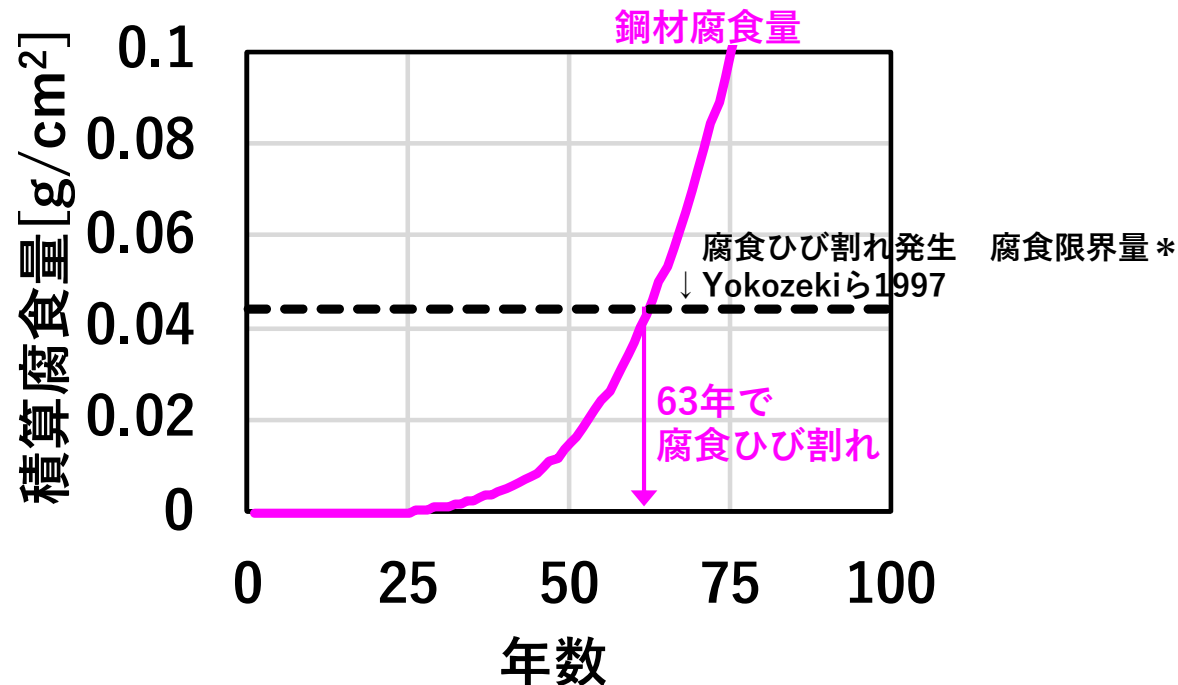
かぶり 鉄筋径 相対湿度

[OPC=3.1 BB=1]

\*コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術  
研究小委員会(338委員会)成果報告書その1・2

\*網野ら(2008)

## ⇒ かぶり鉄筋位置の鋼材腐食量

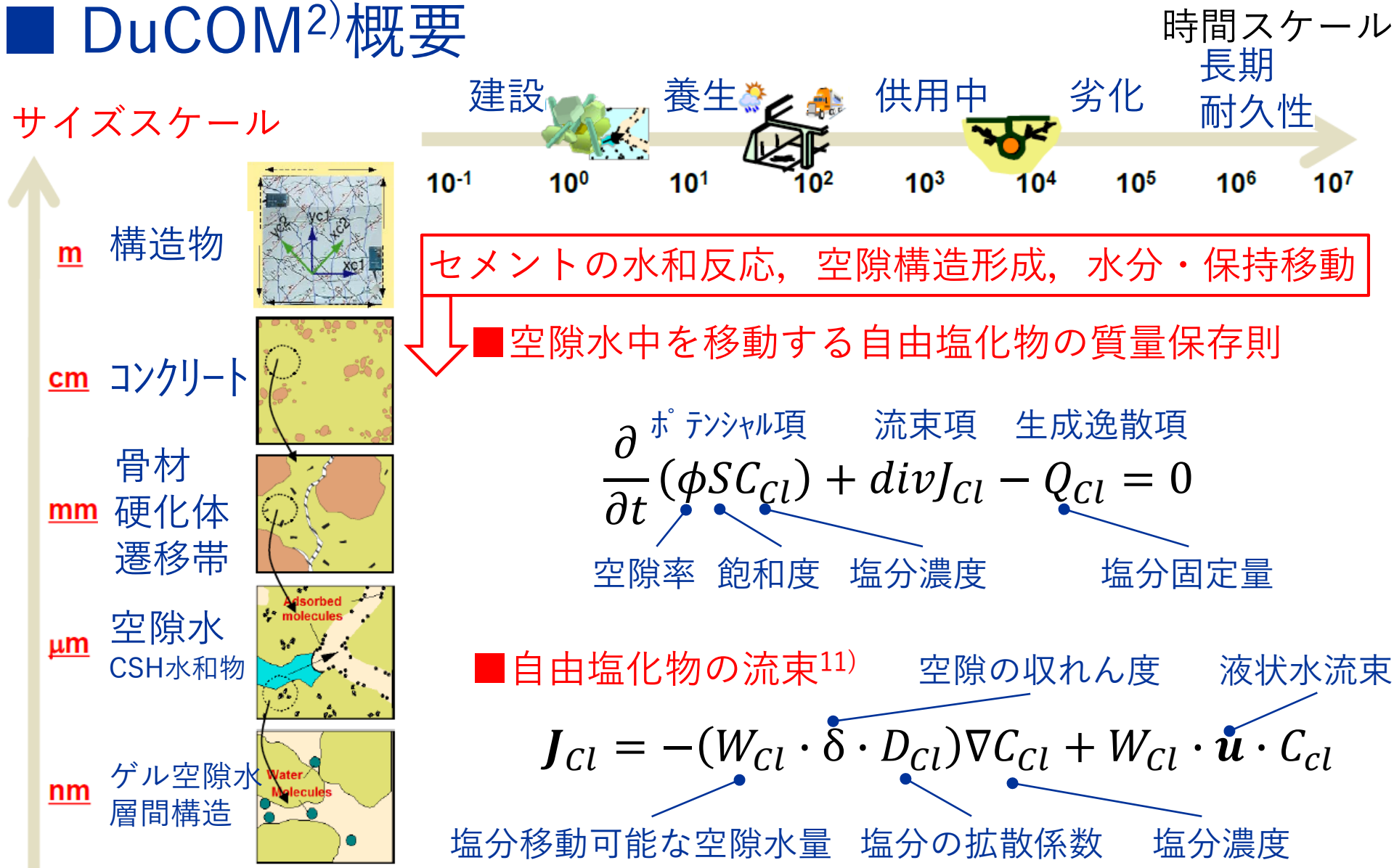


\*横関康祐先生

Yokozeki K., Motohashi K., Okada K., Tsutsumi T.

: A rational model to predict the service life of RC structures in marine environment, Forth CEMENT/ACI International Conference on Durability of Concrete, SP170-40, pp.777-798, 1997

## DuCOM<sup>2)</sup>概要



1)1990- 東京大学コンクリート研究室

2)高橋佑弥, 石田哲也, 岸利治: 微小空隙中の塩化物イオン・液状水移動に着目したセメント硬化体の遮塩性能評価モデル, 土木学会論文集E2, Vol.70, No.1, pp.118-133, 2014

# 熱力学連成解析システム DuCOM 1)

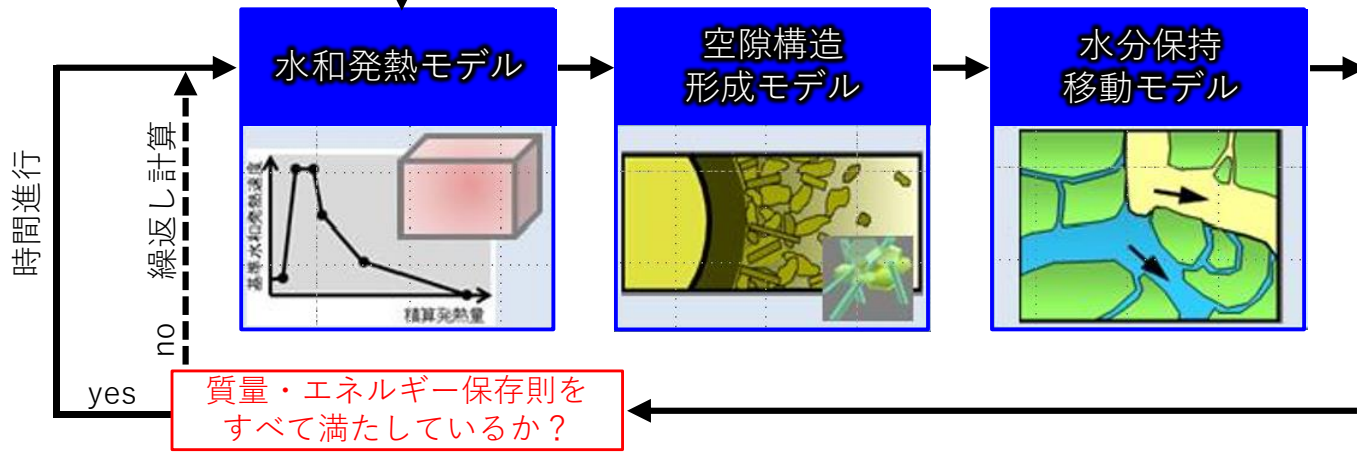
本解析モデルを対象に検討を実施した

## ■入力情報

寸法, 形状, 配合打込み温度  
養生・環境条件

## ■各自由度の支配方程式

$$\frac{\partial S(\theta_i)}{\partial t} + \text{div} J_i(\theta_i, \nabla \theta_i) - Q(\theta_i) = 0$$



### 塩化物イオン移動モデル

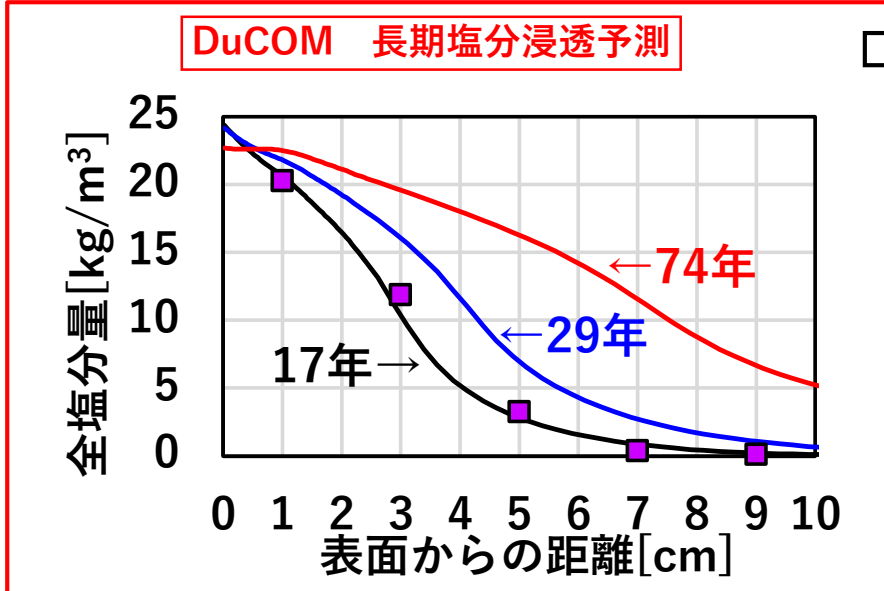
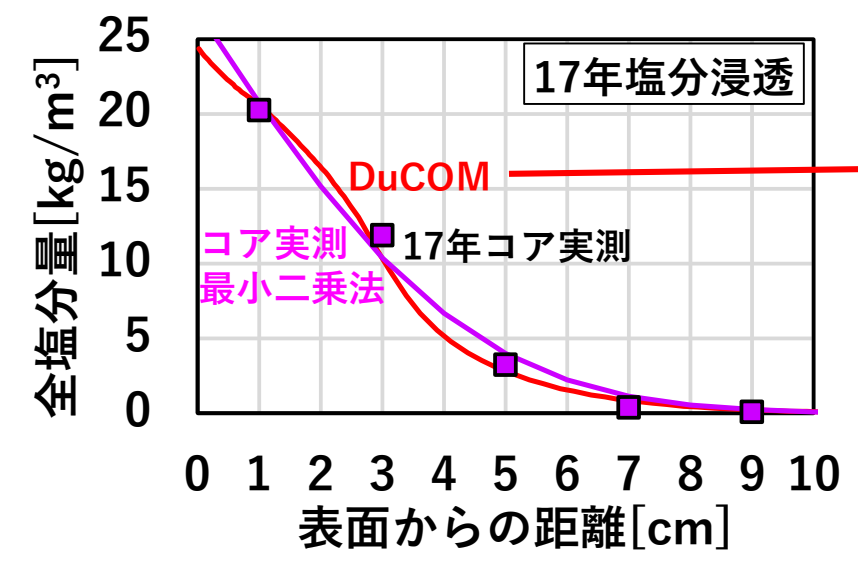
$$J_{cl} = -(\underbrace{W_{cl} \cdot \delta \cdot D_{cl}}_{\text{拡散項}}) \nabla C_{cl} + \underbrace{W_{cl} \cdot \mathbf{u}}_{\text{移流項}} \cdot C_{cl}$$

$J_{cl}$ : 流束  
 $W_{cl}$ : 収れん度  
 $\delta$ : Cl-拡散係数  
 $D_{cl}$ : Cl-濃度  
 $\mathbf{u}$ : 速度ベクトル  
 $C_{cl}$ : Cl-濃度

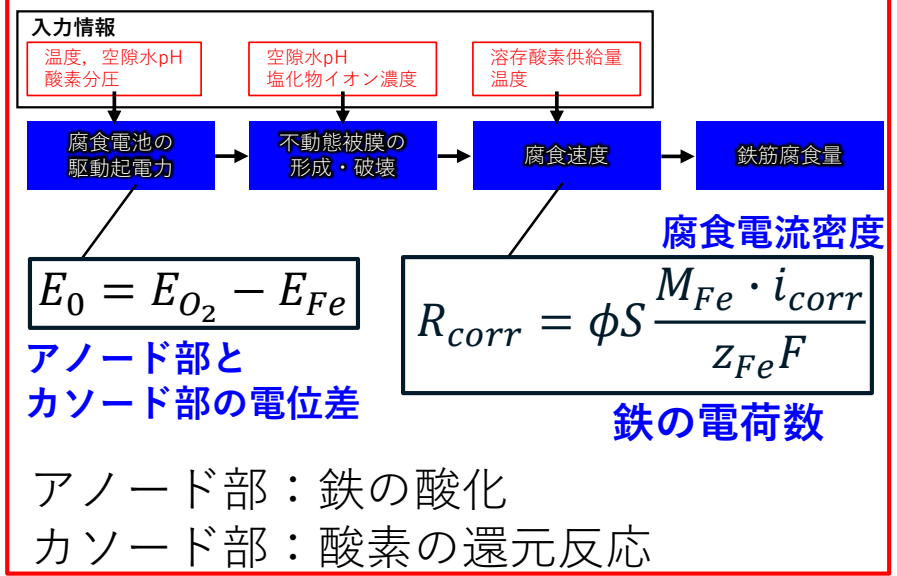
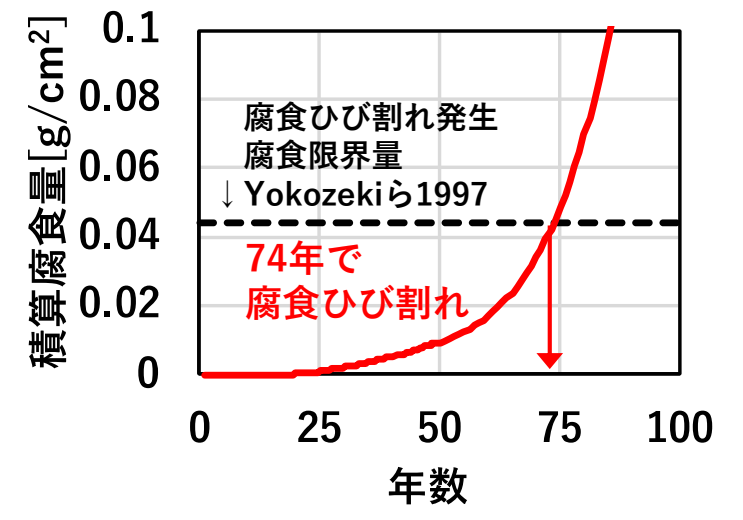
存在する構造物はコア採取により  
限界状態予測が可能  
今回は、長寿命化対策のケースの限界状態を  
予測してLCCを算出するために解析予測を実施

# DuCOMによる塩分浸透予測

## DuCOM予測 コア実測から最小二乗法で算出した設計値による予測の比較

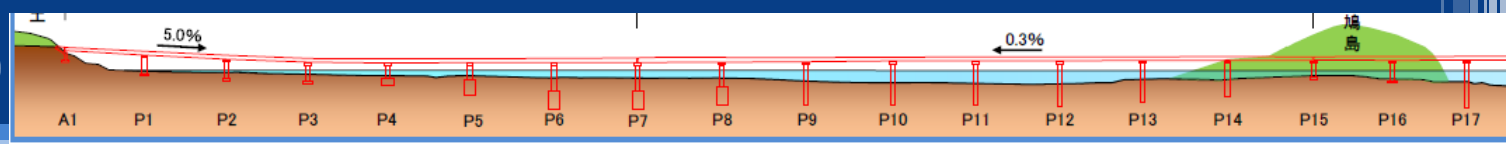


## かぶり鉄筋位置の鋼材腐食量



# LCC算定に必要な建設コスト

# 建設コスト(LCC評価)



■残存した資料に基づき算出した各橋脚の施工費と**躯体高さあたりの施工費**  
(設計時資料は6年間で破棄される)

| 橋脚No.        | 1                 | 2・3               | 4             | 5             | 6・7・8             | 9-14              | 15・16       | 18-25        |
|--------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|-------------|--------------|
| 基礎形式         | 直接基礎              | 直接基礎              | オープンケーソン      | ニューマチックケーソン基礎 |                   | PCウェル             | 吊り込み式直接基礎   | 鋼製水中7-チング    |
| 基礎工          | ¥7,800,000        | ¥7,100,000        | ¥41,400,000   | ¥131,500,000  | ¥133,500,000      | ¥63,900,000       | ¥31,200,000 | ¥198,800,000 |
| 柱躯体          | ¥15,100,000       | ¥21,100,000       | ¥7,100,000    | ¥29,300,000   | ¥29,200,000       | ¥8,600,000        | ¥11,100,000 | ¥212,500,000 |
| 仮設工          | ¥11,600,000       | ¥33,200,000       | ¥600,000      | ¥11,600,000   | ¥51,900,000       | ¥0                | ¥2,100,000  | ¥15,100,000  |
| 合計(円)        | ¥34,500,000       | ¥61,400,000       | ¥49,100,000   | ¥172,400,000  | ¥214,600,000      | ¥72,500,000       | ¥44,400,000 | ¥426,400,000 |
| 合計(万円)       | <b>3450万円</b>     | <b>6140万円</b>     | <b>4910万円</b> | 17240万円       | 21460万円           | 7250万円            | 4440万円      | 42640万円      |
| 柱躯体高(m)      | 13                | 13.5              | 10.5          | 12            | 20                | 33.4              | 11          | 19           |
| 基礎高(m)       | 2                 | 2                 | Ave × 1.3 6   | 11            | 13                | 0                 | 2           | 3            |
| 柱躯体工費(/m)    | <b>¥1,001,987</b> | <b>¥1,409,320</b> | ¥478,650      | ¥2,268,819    | <b>¥1,356,291</b> | <b>¥1,913,174</b> | ¥820,530    | ¥11,184,211  |
| 柱躯体+仮設工費(/m) | ¥2,053,846        | ¥4,022,222        | ¥733,333      | ¥3,408,333    | ¥4,055,000        | ¥2,170,659        | ¥1,200,000  | ¥11,978,947  |

平均値を13m橋脚の標準的な施工費と仮定し、一般および現場管理を考慮するために1.3倍 = 6,283万円  
さらに**デフレータ**変動で  
**1.45倍 = 9,111万円**  
**↑ 場所打ち橋脚の施工費**

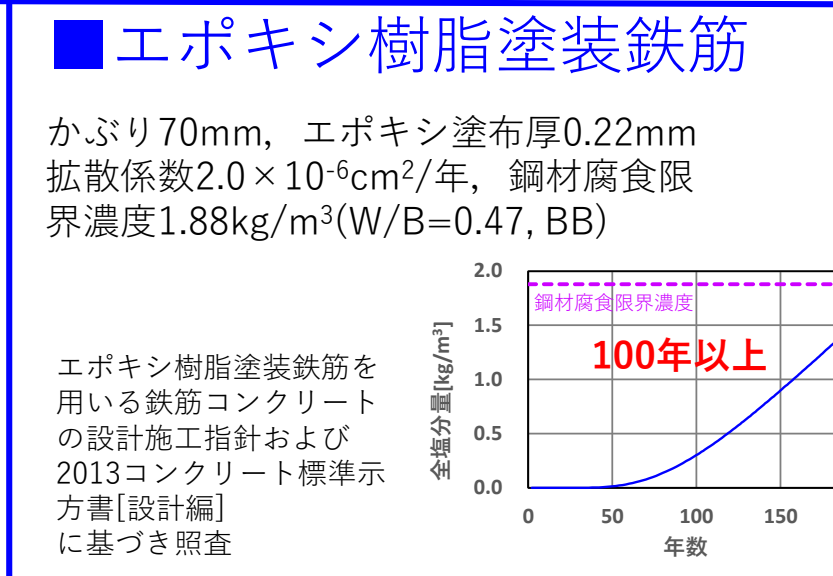
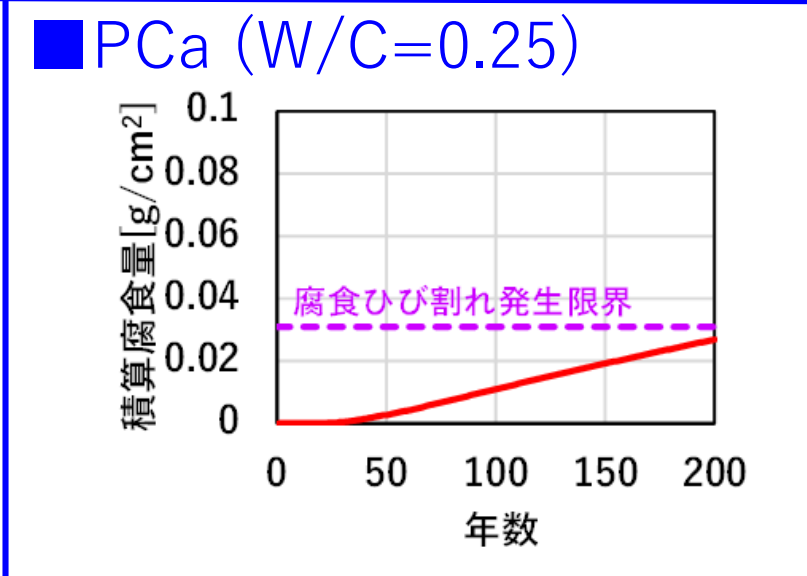
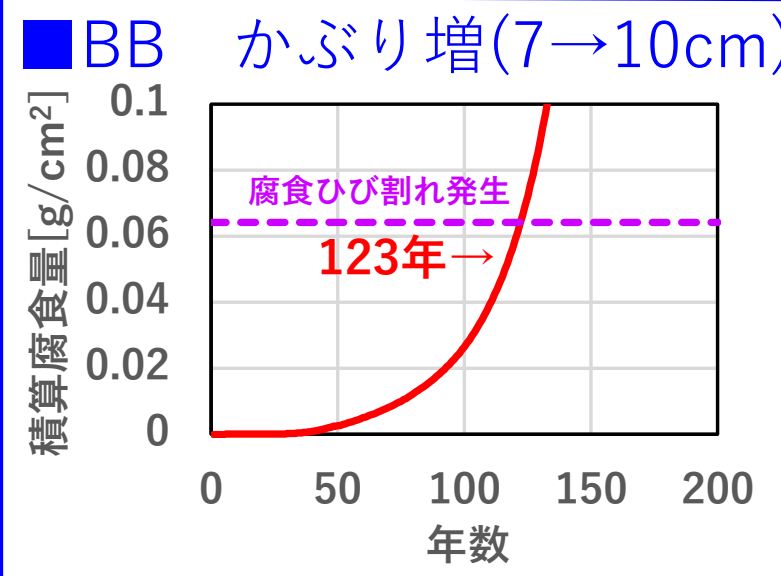
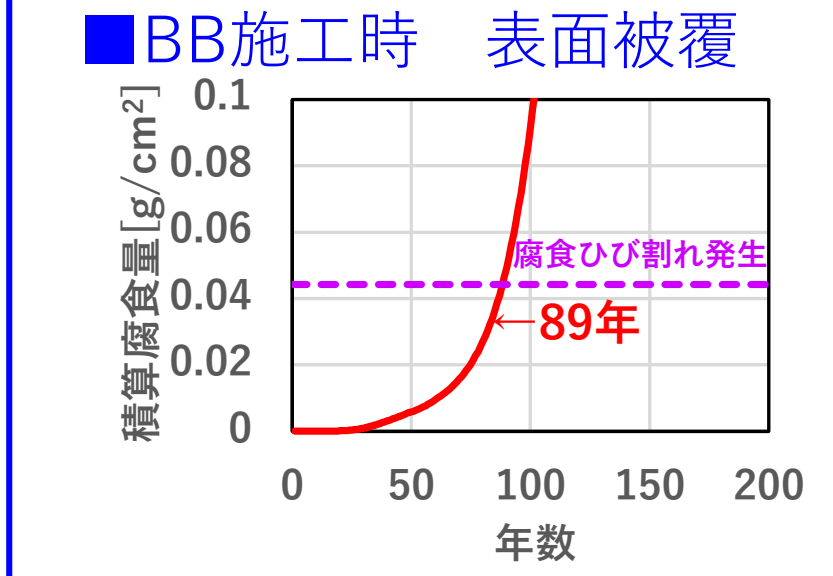
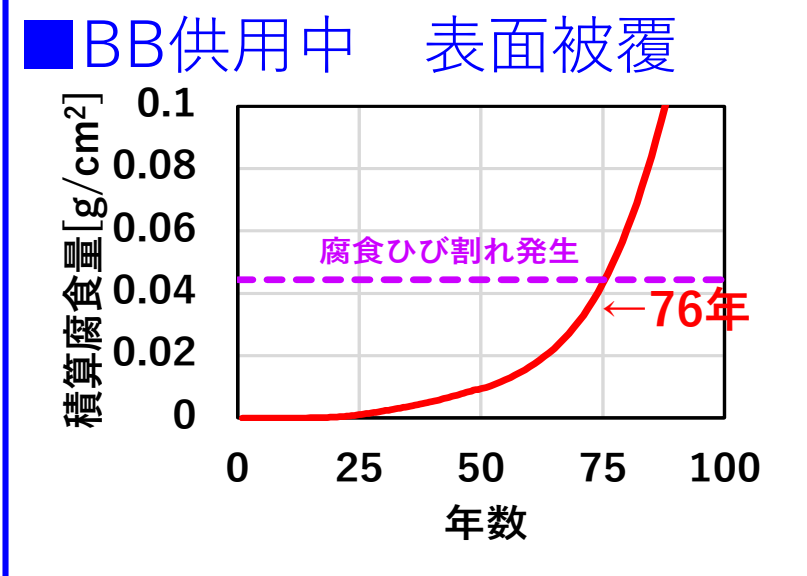
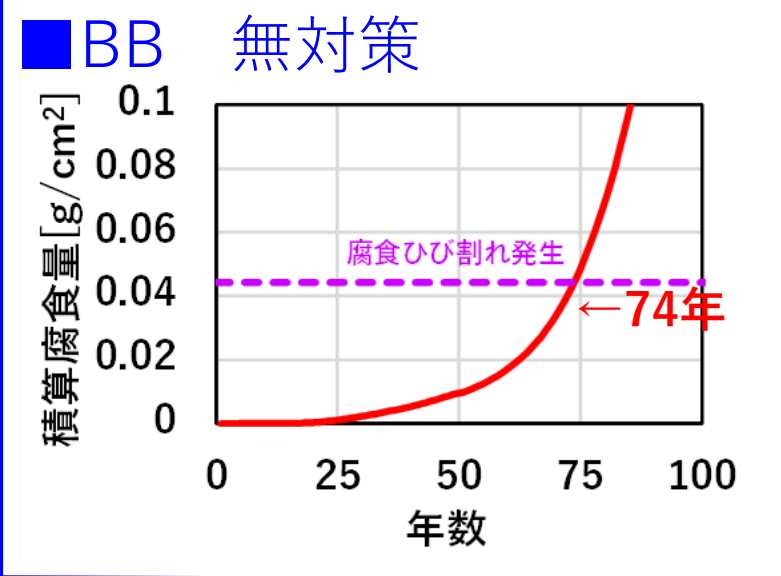
平均値の1.3\*1.45倍 = **236万円**  
**場所打ち部柱躯体1mあたりの施工費**

1.3\*1.45倍 = **360万円**  
**PCa部柱躯体1mあたりの施工費**



# 塩害対策の評価

## 塩害対策について修正塩分移動モデル・鋼材腐食モデルによりひび割れ発生年を予測



橋脚1基の標準建設コスト：**9111万円**

| 項目                          | かぶり70⇒100mmによる変更点      | 増加費用         |
|-----------------------------|------------------------|--------------|
| コンクリート数量                    | 269⇒273m <sup>3</sup>  | 32.4万円       |
| スペーサ変更                      | かぶり100mm対応のスペーサへ変更     | 7.08万円       |
| ひび割れ対策                      | ひび割れ補強繊維を各リフト基部へ5段配置する | 58.8万円       |
| <b>かぶり増に伴う増加コスト合計*1.45⇒</b> |                        | <b>152万円</b> |

かぶりを70→100mmに変更した場合の建設コスト：**= 9263万円**

| 項目                          | 柱躯体を場所打ち⇒PCaによる変更点 | 増加費用         |
|-----------------------------|--------------------|--------------|
| PCa化                        | PCaと仮設を除いた場所打ちとの差額 | 1641万円       |
| 仮設                          | PCa化による型枠支保工費の削減   | -794万円       |
| <b>PCa化に伴う増加コスト合計*1.45⇒</b> |                    | <b>847万円</b> |

PCa化した場合の建設コスト：**= 9958万円**

# 建設コスト：エポキシ樹脂塗装鉄筋

橋脚1基の標準建設コスト：**9111万円**



| 項目                               | 数値        |
|----------------------------------|-----------|
| D16・D22鉄筋費                       | ¥6,9000/t |
| エポキシ樹脂塗装費                        | ¥6,6000/t |
| エポ筋の塗装工場から現場までの運搬費<br>(神戸→角島大橋)  | ¥19,901/t |
| エポ筋/鉄筋のコスト比                      | 2.24      |
| 柱躯体の鉄筋量                          | 15.5t     |
| 躯体鉄筋費                            | 107.1万円   |
| 躯体エポ筋費                           | 240.5万円   |
| <b>エポ筋使用に伴う増加コスト合計*1.1⇒147万円</b> |           |

} 建設物価2020.4  
←国土交通省の積算基準2019



柱躯体の鉄筋をエポキシ樹脂塗装鉄筋に変更した場合の建設コスト：**= 9258万円**

# 予防・補修コスト：表面被覆と断面修復

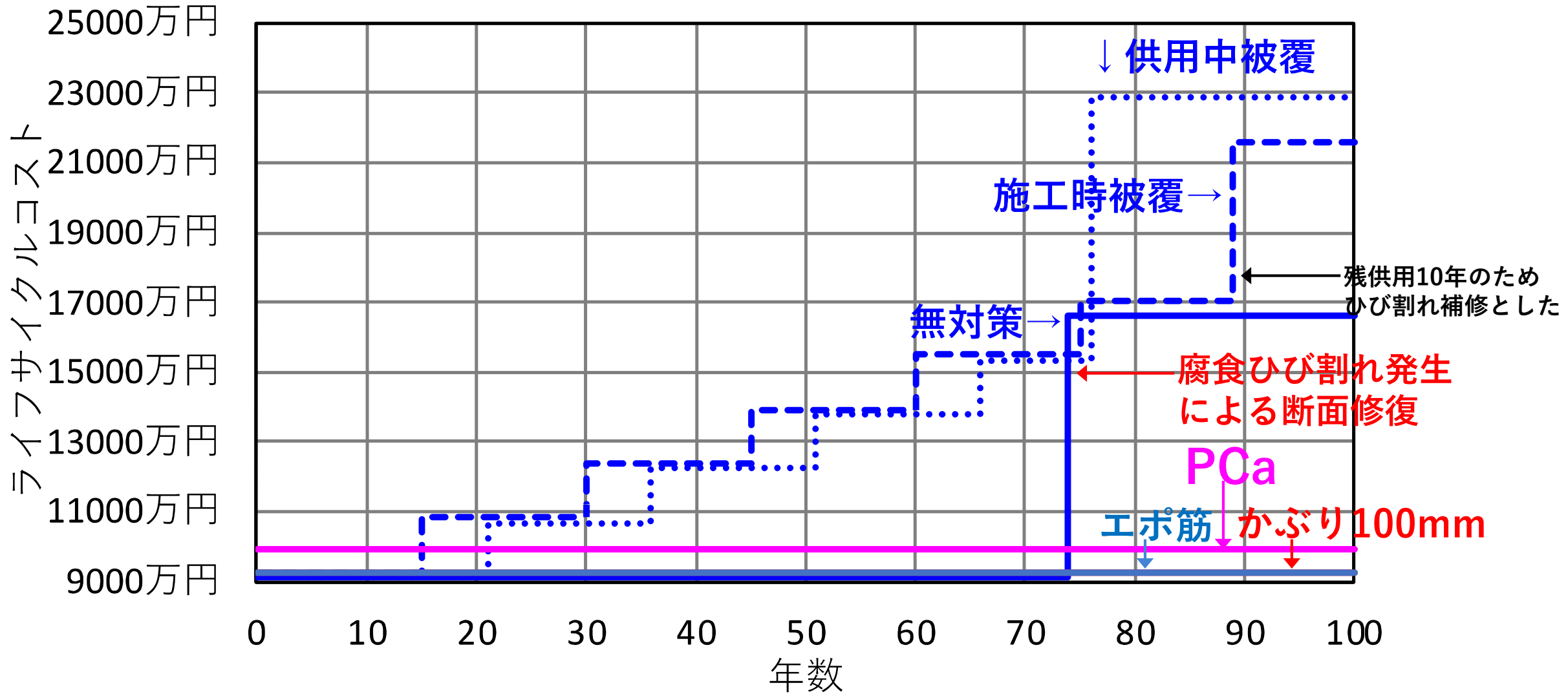
- ・ 2020・2021の角島大橋補修実績から海上橋梁1橋脚あたりの費用を算出

## ■ 表面被覆の費用(予防対策)

| 作業項目                    | 単価*     | 数量               | 小計            |
|-------------------------|---------|------------------|---------------|
| ゴンドラ足場工                 | —       | —                | 1361万円        |
| 交通誘導                    | ¥11,700 | 一式               | 48万円          |
| 表面被覆                    | ¥16,300 | 93m <sup>2</sup> | 152万円         |
| <b>表面被覆工法1回/1橋脚の費用⇒</b> |         |                  | <b>1562万円</b> |

## ■ 断面修復の費用(補修対策)

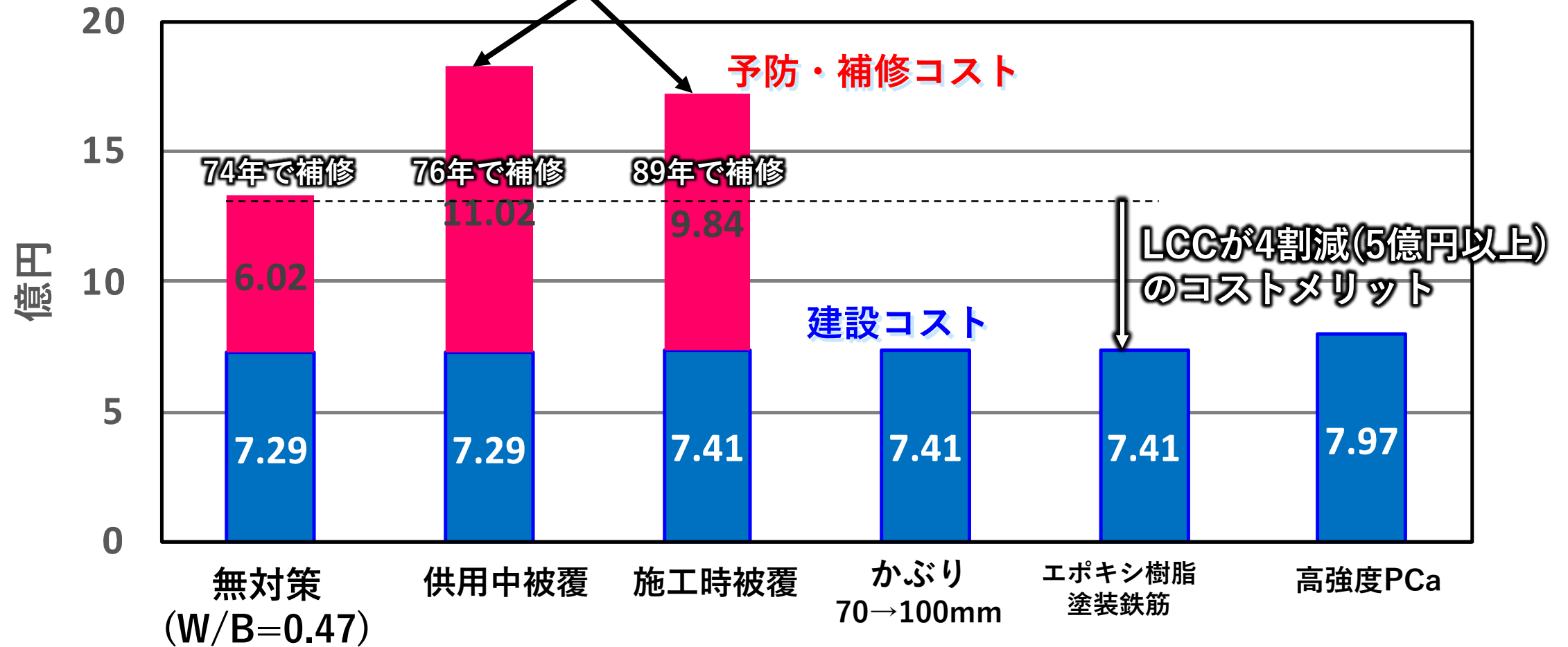
| 作業項目                    | 小計            |
|-------------------------|---------------|
| ゴンドラ足場工                 | 4084万円        |
| ひび割れ充填工法                | 18万円          |
| ひび割れ低圧注入工法              | 29万円          |
| 左官断面修復工法                | 69万円          |
| 表面被覆                    | 152万円         |
| ライニング工                  | 2876万円        |
| 支承防錆工                   | 156万円         |
| 交通誘導                    | 145万円         |
| <b>表面被覆工法1回/1橋脚の費用⇒</b> | <b>7528万円</b> |



かぶり増・エポ筋・PCaは建設コストが増加するものの経済的なLCCとなった

## ■ 8橋脚分

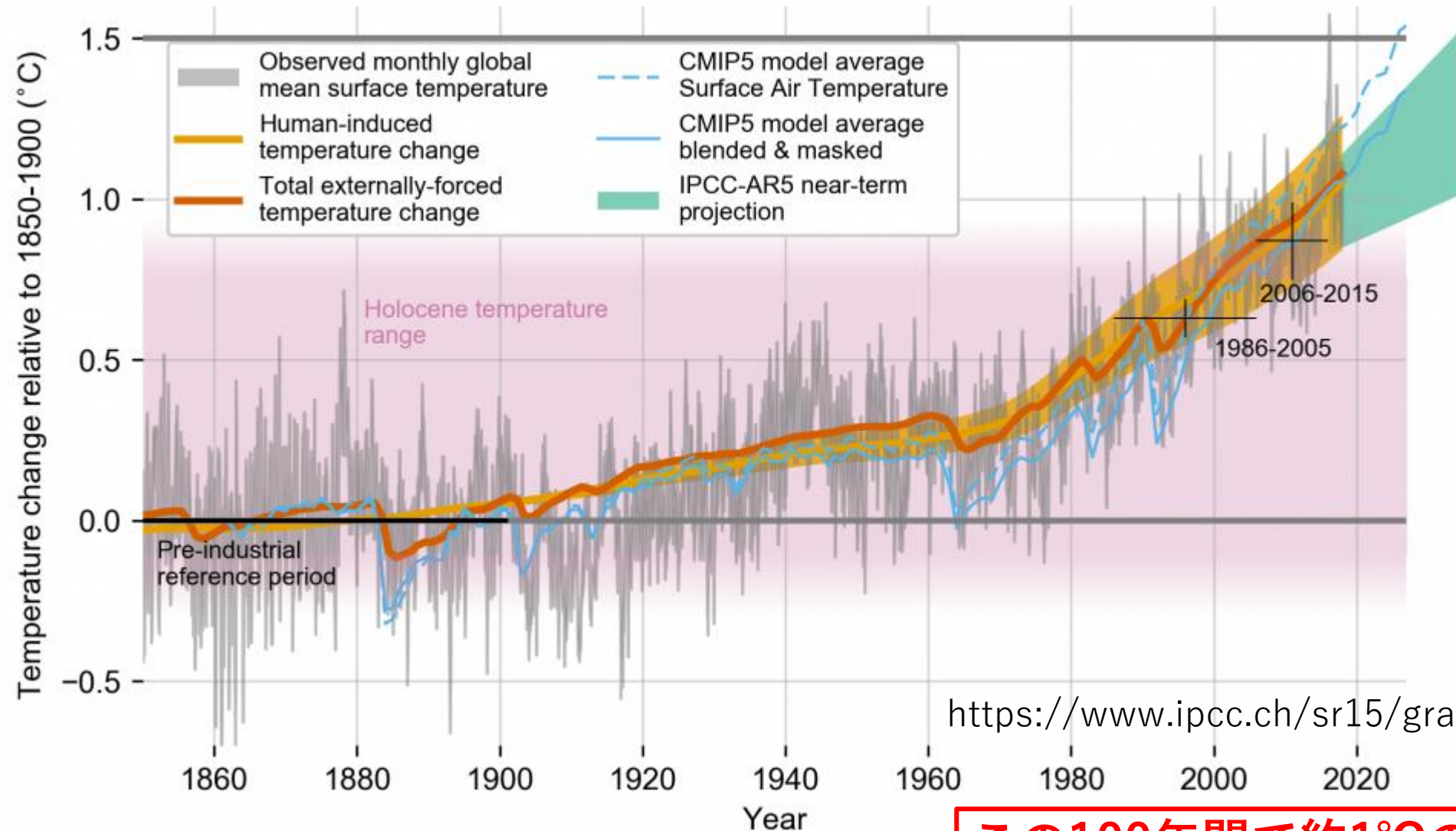
表面被覆により延命化されるものの  
100年間では補修を要するためLCCが増大(被覆の定期再塗布+腐食ひび割れ補修)



- ①角島大橋の実績に基づき  
海上橋梁のライフサイクルコストを試算  
補修コストの高さと  
耐久性向上技術の意義を考える
- ②持続可能な社会について  
何故、脱炭素が必要なのか

# 思考停止したCO<sub>2</sub>削減活動についての考え

## ■地球の気温はどうなっているのか？



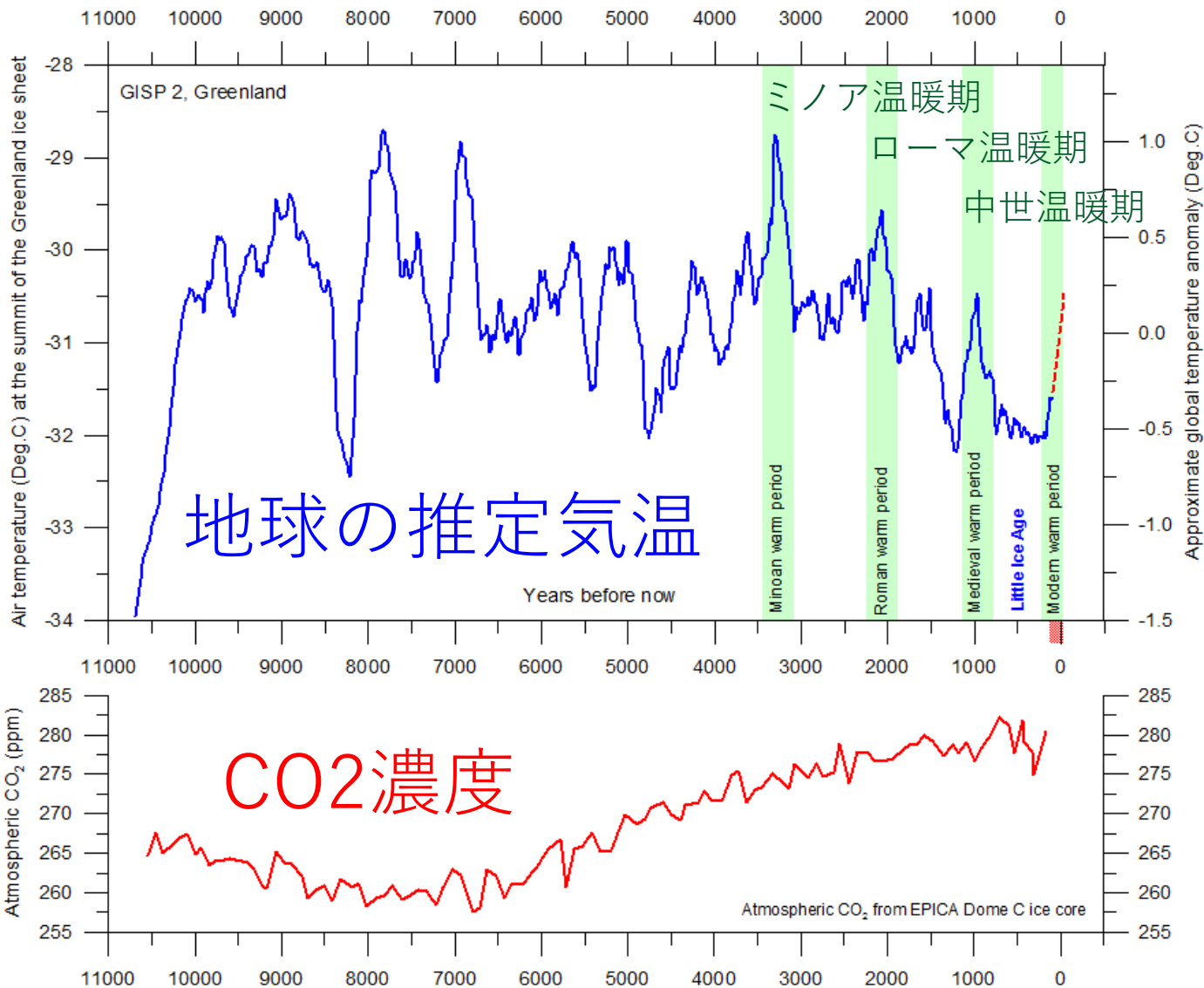
[https://www.ipcc.ch/sr15/graphics/#cid\\_455](https://www.ipcc.ch/sr15/graphics/#cid_455)

**この100年間で約1°Cの上昇**



# さらに広い視点を持つと

\*1:渡辺正「地球温暖化」狂騒曲, \*2:<https://wattsupwiththat.com/>ほか



■地球は寒冷と温暖を繰り返す

■温暖期に文明が繁栄  
寒冷期には冷害や飢饉が多く発生

■現在は小氷期から温暖化している

■長いレンジで見るとCO<sub>2</sub>濃度の増加とともに寒冷化しているともいえる

→気候変動が複雑な要因が相互作用

■CO<sub>2</sub>濃度の増加で作物の収穫量は1.3倍増, この33年で植物は10%増加し, サハラやアマゾンではUSA国土の2倍増えた\*1CO<sub>2</sub>による砂漠化や飢饉は認められていない

# なぜCO<sub>2</sub>を削減したいのか

\*1:渡辺正「地球温暖化」狂騒曲

- IPCCなど地球温暖化の研究・広報に固執する団体
- 技術成熟した国や企業における次世代の差別化技術・広報
- 人類の行為による危機回避というドラマチックなストーリー  
非常に反論しづらい

\*2:川口恵美+掛谷英紀+有馬純ほか「SDGsの不都合な真実」

欧米日本

CO<sub>2</sub>削減→再生可能エネルギーの普及  
→発展途上国の火力発電支援撤退

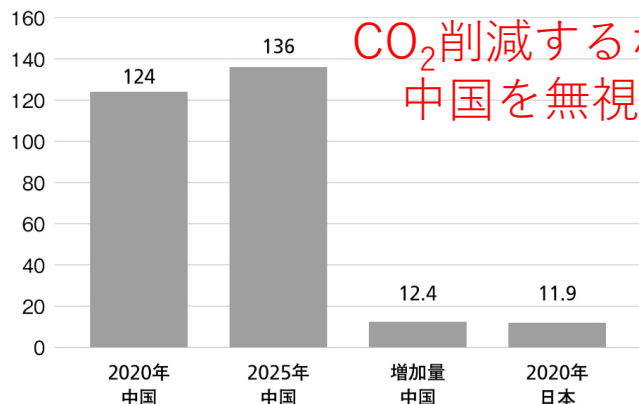
ソーラーパネル：結晶シリコン50%が中国シェア→ウイグル強制労働  
レアアース：70%が低コストの中国シェア→大気土壌水質汚染

電気自動車も同様の状況にある

CO<sub>2</sub>等の排出量の日中比較

中国の独占状態：火力発電所の増設

単位：億トン



CO<sub>2</sub>削減するなら  
中国を無視できない

■ 日本はCO<sub>2</sub>削減に年間5兆円をかけ、4人家族で¥13000/月

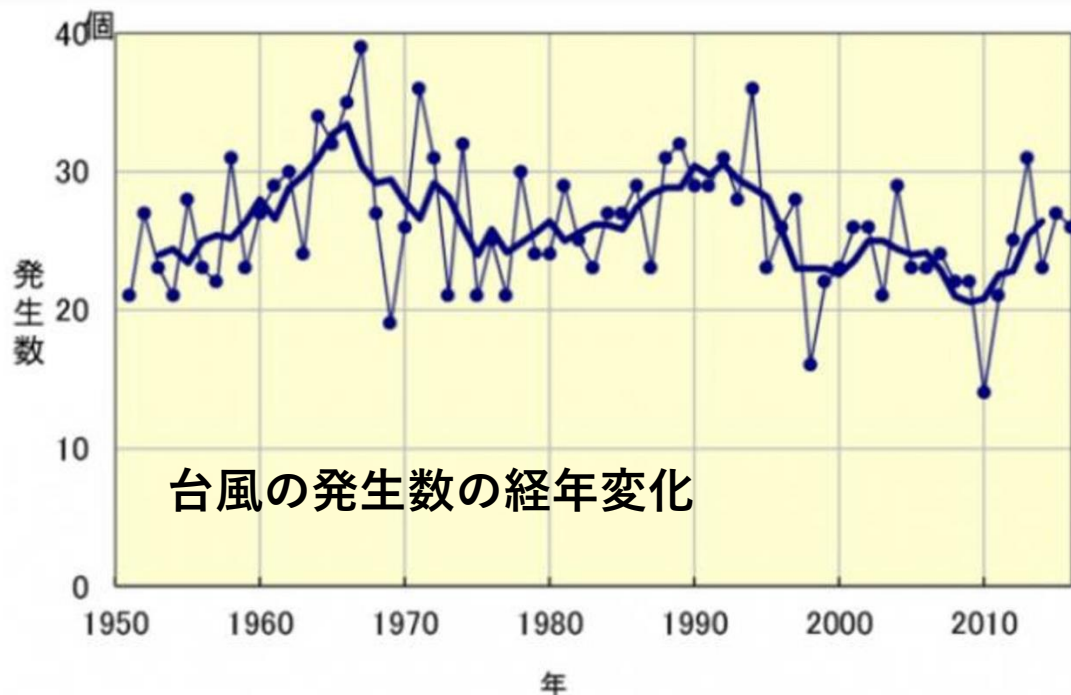
■ マイクロプラスチックとエコバッグの関係

- ・ エコバッグを何回使えばいいのか？
- ・ エコバッグの使用で海洋プラスチックゴミが減っているのか？

# 激甚災害は本当に増えているのか？ 観測データをちゃんと見ているか？

\*1:杉山大志「地球温暖化のファクトフルネス」 \*2:渡辺正「地球温暖化」狂騒曲

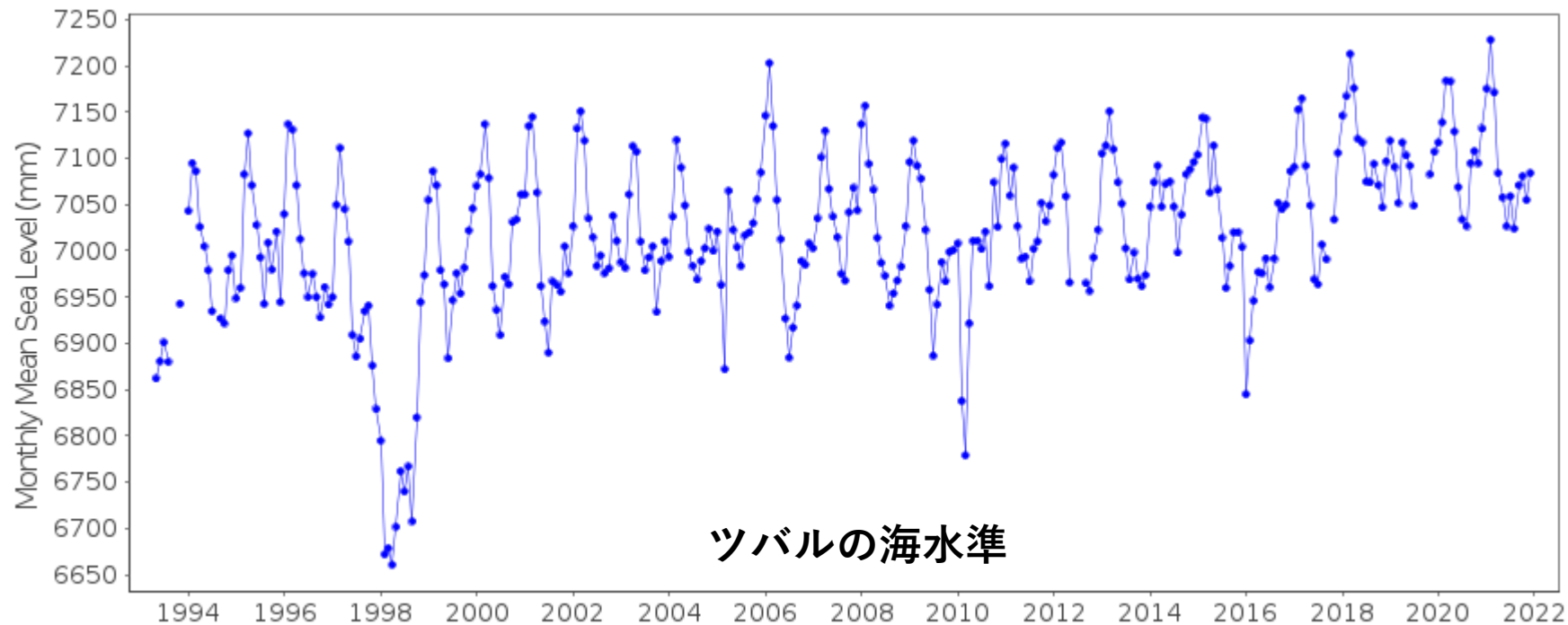
- 台風は増えていないし，強くなっていない\*1
- 豪雨は30年間で100ミリ/時間から101ミリ/時間に増加した\*1
- シロクマは倍増しているし，海面上昇は極めてゆるやか  
ツバルの面積は44年で3%増加している\*1 \*2



# 激甚災害は本当に増えているのか？ 観測データをちゃんと見ているか？

\*1:杉山大志「地球温暖化のファクトフルネス」 \*2:渡辺正「地球温暖化」狂騒曲

- 台風は増えていないし，強くなっていない\*1
- 豪雨は30年間で100ミリ/時間から101ミリ/時間に増加した\*1
- シロクマは倍増しているし，海面上昇は極めてゆるやか  
ツバルの面積は44年で3%増加している\*1 \*2



[https://www.psmsl.org/data/obtaining/rlr.monthly.plots/1839\\_high.png](https://www.psmsl.org/data/obtaining/rlr.monthly.plots/1839_high.png)

# この先に起こること

\*1:杉山大志「地球温暖化のファクトフルネス」 \*2:渡辺正「地球温暖化」狂騒曲

- 日本は80兆円使って地球気温を0.001°C低下させた\*1 \*2
- 2050年までにCO<sub>2</sub>を80%削減すれば、  
200兆円ほど使って地球を最大0.003°Cしか冷やせない\*2
- そして、台風の数や強度は変わらず、  
豪雨は良くて101ミリから100ミリに減らすことができる\*1  
一方で、穀物生産や植生の増加にはブレーキがかかる

1970年代以前には地球寒冷化が叫ばれていた

現状技術や人間の時間スパンで気候変動を正しく理解するには限界がある

**脱炭素にここまでコストをかける価値がありますか？**

**少子高齢化対策、社会インフラ長寿命化、労働人口減少により力を注ぐべきではないですか？**

**安直なSDGSの遂行で日本へ脅威を与える国の力を増強していませんか？**

**我々技術者はフェアなデータを見極める必要がより強く求められています**