

## 話題提供 2

### 低環境負荷土木構造物設計

#### 土木構造と環境



伊藤義人 氏

SGST 常任理事 (名古屋大学教授)

(宇佐美) どうもありがとうございました。それでは引き続きまして、2番目の話題提供ですが、名古屋大学の伊藤義人先生にお願いしたいと思います。伊藤義人先生もSGSTの常任理事です。ご存じの方がほとんどだと思いますが、先生は現在名古屋大学工学研究科の教授で、附属図書館の館長を務められています。最近環境負荷低減型設計法の開発に非常に精力的に取り組まれておられますが、そういうところから今日ご講演をいただきます。よろしくお願いいたします。

(伊藤 名古屋大学) 今ご紹介いただきましたように、附属図書館長をしております。このスライドにだてに附属図書館長と書いているのではなく、実際に使っている時間の半分ぐらいは、附属図書館長として仕事しております。

これは私のトレードマークのトップページですけれども(スライド1)、これは館長室から見た景色です。今は左の写真のような感じで、この部屋は非常に気に入っています。既にお話しがありましたけれども、土木分野においても環境問題が非常に重要になってきているということで(スライド2)、特に地球温暖化問題に関連して、先ほどから出てきておりますCO<sub>2</sub>排出量、あるいは廃棄物排出において、建設業は相当問題を含んでいるということです。これもよく出てきますけれども、CO<sub>2</sub>ですとかあるいはエネルギー消費量の中に占める、土木・建築というのは4分の1とか3分の1とか、いろいろ言われますけれども、相当大きな責任があるということです(スライド3)。

ただ、気をつけなければいけないのは、これは結果責任も全部含んでいますので、土木事業の中で、例えば鉄を使えば、鉄鉱石から製品まで全部を含んだ形でCO<sub>2</sub>排出量を、全部結果責任で考えています。そういう意味では、こういう問題が重要ですよというときには当然こういう図を使いますが、土木分野だけだという話をすると、例えば施工だとか製作だけに限ると、もっとずっと小さいということもあります。

最初に今日は20分しかだめだということですので、2つのお話だけをします。1つ目は環境負荷低減型土木設計ガイドラインです(スライド4)。2002年3月に出版されましたけれども、平成11年から13年にかけて、国際博覧会協会、2005年に愛知万博がありますけれども、そ

## 低環境負荷土木構造物設計 —土木構造と環境—



名古屋大学  
大学院工学研究科教授  
附属図書館長  
伊藤 義人

SGST 25周年  
記念シンポジウム  
平成15年6月27日  
メルパルク名古屋




スライド1 トップページ

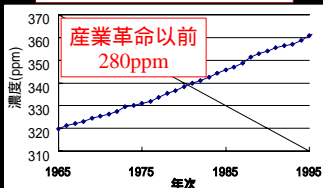
### 環境問題

人類が直面している環境問題

- 資源・エネルギーの枯渇
- 地球温暖化
- オゾン層破壊
- 大気汚染
- 水質汚染
- 土壌汚染
- 廃棄物
- 生物多様性等...

様々な環境問題に  
配慮しなければならない

#### 二酸化炭素濃度の推移

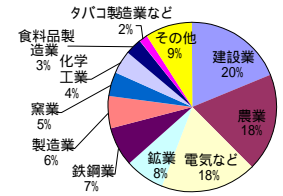


濃度(ppm)

年次

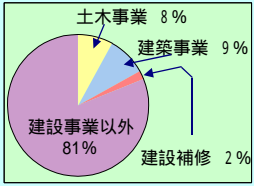
産業革命以前 280ppm

#### 産業廃棄物発生量の内訳

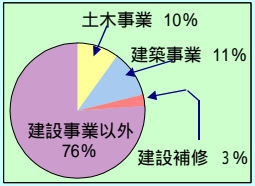


スライド2 環境問題と地球温暖化

### 全産業に対する建設部門の占める エネルギー消費量およびCO<sub>2</sub>排出量の比率



エネルギー消費量



CO<sub>2</sub>排出量

(土木研究所資料より抜粋)

スライド3 エネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量

この協会から土木学会に委託されまして、田邊先生（名大教授）が委員長になりまして、こういうガイドラインを作りました。私も小委員会の委員長でした。

ガイドラインは基本設計、実施設計、コメントリーからなりますけれども、環境問題を陽の形で土木設計の中に入れた、世界で初めてのものではないかと言われております。この委員会が終わりますして、受け皿委員会として、土木学会の構造工学委員会の下に、低環境負荷土木構造物の新技術に関する課題検討委員会というのがありまして、私が委員長をしていますけれども、今日の講師の佐野さんにも入っていただいて、いろいろ検討しています。

今日は時間がありませんので、現在の委員会活動の話ではなくて、ガイドラインそのものの方の話をしていただきます（スライド5）。ガイドラインの目的自体は、所定の設計目的をより高い水準で達成し、与えられた環境に対して負荷がより少なくなる設計案を評価・選択するというものです。従来の設計は標準要求性能として安全性や、経済性など、いろいろありますけれども、それに環境要求性能を同等に考慮してみようという試みです。それから単に構造設計の立場からではなく、基本設計でどういうタイプの構造物を作るかというようなときに、意思決定者、これは事業者でしょうけれども、合意形成に参加する市民、それから技術者の間の関係を明確にしています。それからライフサイクルを対象にしていくという特徴をガイドラインに持っています。

絵で描くとこのような感じ（スライド6）で、従来の設計、性能と、それから環境目的の環境要求性能をはかりにかけて、同等に考えていくわけです。実際に標準要求性能としては、経済性、安全性、使用性、施工性、いろいろ考えられますけれども、そういうものを細分化して全部書き出しています（スライド7）。

環境要求性能としては、景観性だとか、地球環境負荷低減性、地域環境負荷低減性という、大きく分けて、それぞれまた細かいものを、通常の標準要求性能と同じように、いろいろ書きだしています（スライド8）。

## 環境負荷低減型土木構造設計ガイドライン



委員長  
田辺 忠明教授  
2002年3月出版  
土木学会

ガイドライン  
基本設計  
実施設計  
コメントリー

平成11年7月～平成13年3月

国際博覧会協会から土木学会への研究委託

受け皿委員会（更新、改訂の作業）：

土木学会構造工学委員会の低環境負荷土木構造物の  
新技術開発に関する課題検討小委員会  
（委員長：伊藤義人）

### スライド4 環境負荷低減型土木構造設計ガイドライン

#### ガイドラインの目的

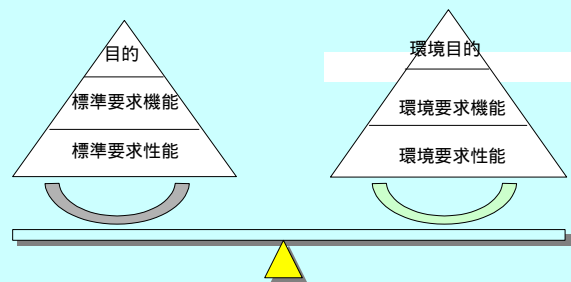
所定の設計目的をより高い水準で達成し  
与えられた環境に対して負荷がより少ない  
設計案を評価・選択すること

#### ガイドラインの特徴

1. 標準要求性能・環境要求性能を同等に考慮している
  2. 意思決定者・合意形成参加者・技術者間の  
コミュニケーションを円滑化する  
透明性と説明性の高い、意思決定プロセスの提案
  3. ライフサイクルを対象としている
- 評価項目に対する効果的な重み付け、代替案の選択

### スライド5 ガイドラインの目的と特徴

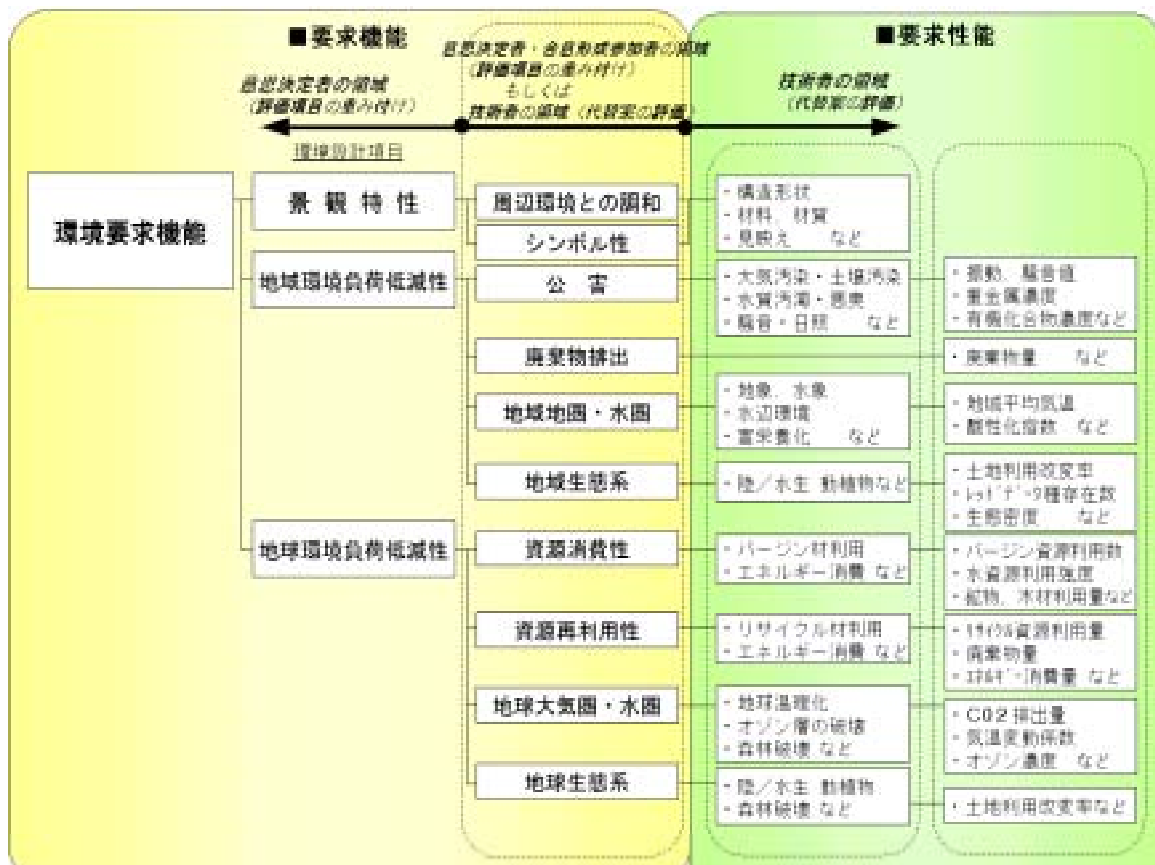
#### 標準要求機能・環境要求機能



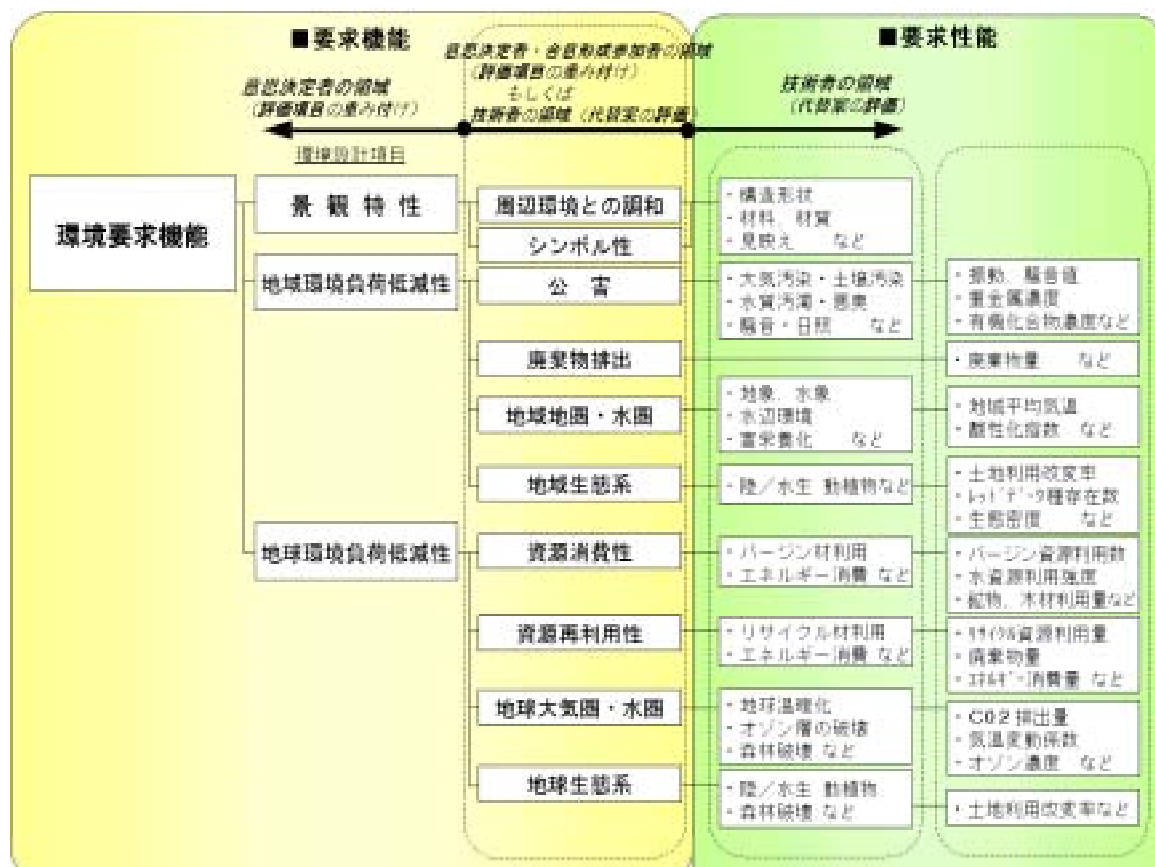
### スライド6 標準要求性能と環境要求性能

従来の設計、性能と、それから環境目的の環境要求性能をはかりにかけて、同等に考えていくわけです。実際に標準要求性能としては、経済性、安全性、使用性、施工性、いろいろ考えられますけれども、そういうものを細分化して全部書き出しています（スライド7）。

環境要求性能としては、景観性だとか、地球環境負荷低減性、地域環境負荷低減性という、大きく分けて、それぞれまた細かいものを、通常の標準要求性能と同じように、いろいろ書きだしています（スライド8）。



スライド7 標準要求性能の一覧



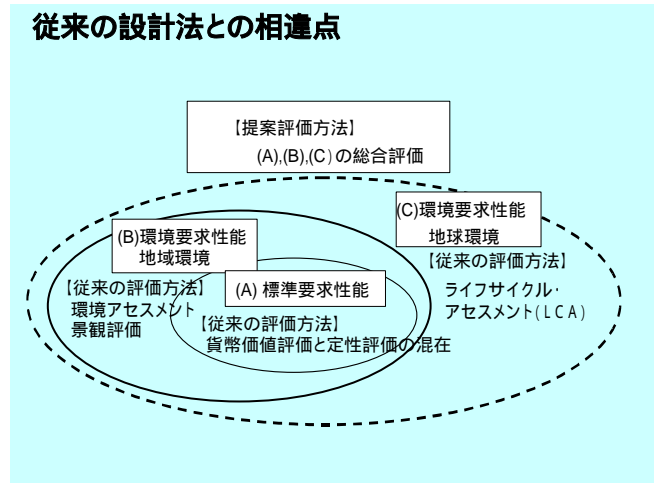
スライド8 環境要求性能の一覧

その中の1つがCO<sub>2</sub>の排出量でもあるということです。従来の設計法との相違点を示すとこのようになります(スライド9)。従来の設計法は、このAの標準要求性能を考えているのだということに対して、環境要求性能の内、地域環境の要求性能を考えるとBになって、実際に今回はさらに地球環境も考えて、このようなCのライフサイクルアセスメントをしようという評価です。

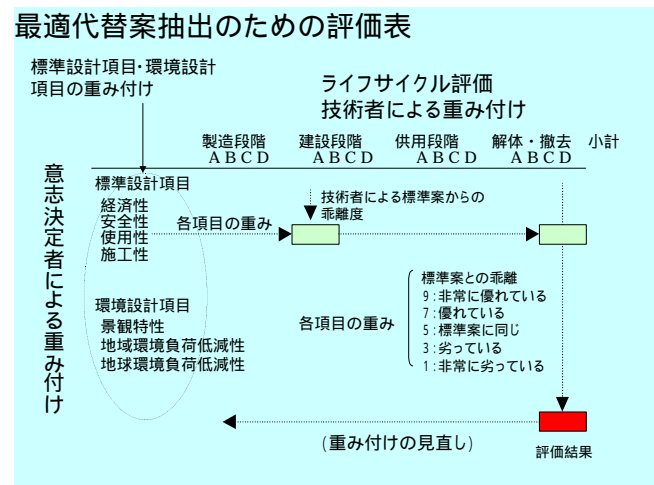
実際に最適の代替案抽出のための評価手法についても、一試案を示しています(スライド10)。いわゆるライフサイクルということで、横軸に製造段階、建設、供用、それから解体・撤去までを考えるとこのわけです。それぞれの段階にA,B,Cあるのは、設計代替案です。縦軸に標準要求性能の項目と、環境要求性能の項目を考えて、全部こういう形で、各項目の重みを考えています。そして、最終的に総合的な評価結果を出しています。

ただし、この重みの決め方に問題がありますので、いろいろなもの提案されているのですが、この例の中では、アンケートをやって、AHPでやるような方法を提案しています。実際にガイドラインのコミュニケーションとして、意志決定者、いわゆる事業者と、合意形成参加者として、市民、あるいはNPO、NGOのようなものを考えて、それらと技術者の関係を、明確に定義して関係づけています(スライド11)。

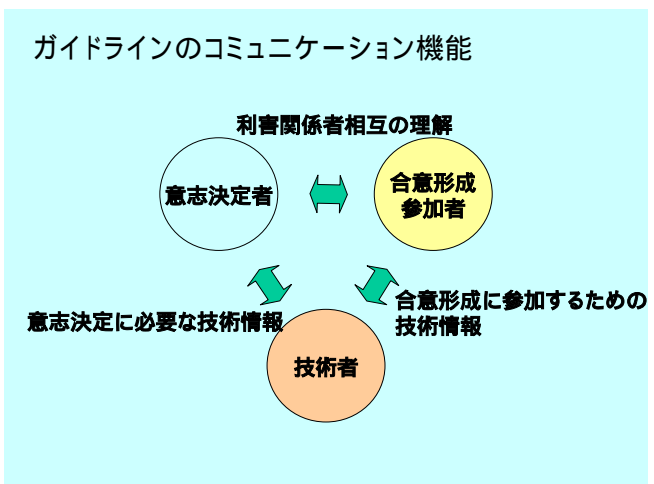
結局、環境負荷低減性を考慮した最適設計案の選択というのは、従来の経済性と機能性、安全性といってもいいのですが、そういうものに対して、環境負荷低減性を、もう1つの座標軸として考えてやって、従来やっていた、この2軸の中の最適設計ではなく、3軸を考えて最適を考えます。そうすると、こういう曲面ができますけれども、その中の最適の解を出すのが、今回の設計法です(スライド12)。



スライド9 従来の設計法との相違点



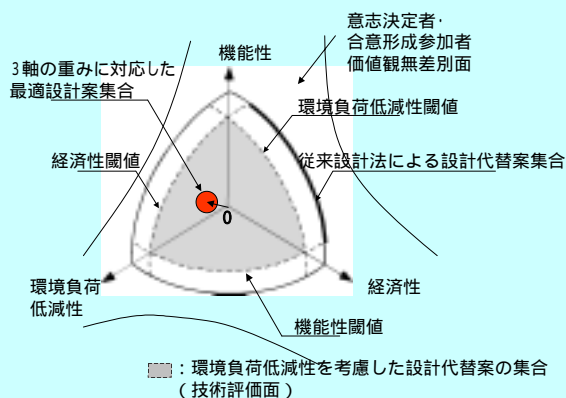
スライド10 最適代替案抽出のための評価表



スライド11 コミュニケーション機能

具体的にガイドラインの中では、例えば橋梁を例にして(スライド13)、実際に鋼とコンクリートと木材で、現在の委員会では石材のものもやっているのですが、そういうもので実際に代替案作りをしています。これは先ほど示しました評価シートです(スライド14, 15)。ここにありますそれぞれのもののウエイト、これが非常に問題になるのですが、ここではアンケートで決めた値です。ですからこれは設置場所だとか、目的によってかなり変わると思います。これはそれぞれの代替案で、鋼、コンクリート、木材で、それぞれどういう評価になるかということを示しています(スライド16)。定量的に表わせるものは、定量的に、定量的でないものは、こういう指標で表して、最終的には全部点数化します。

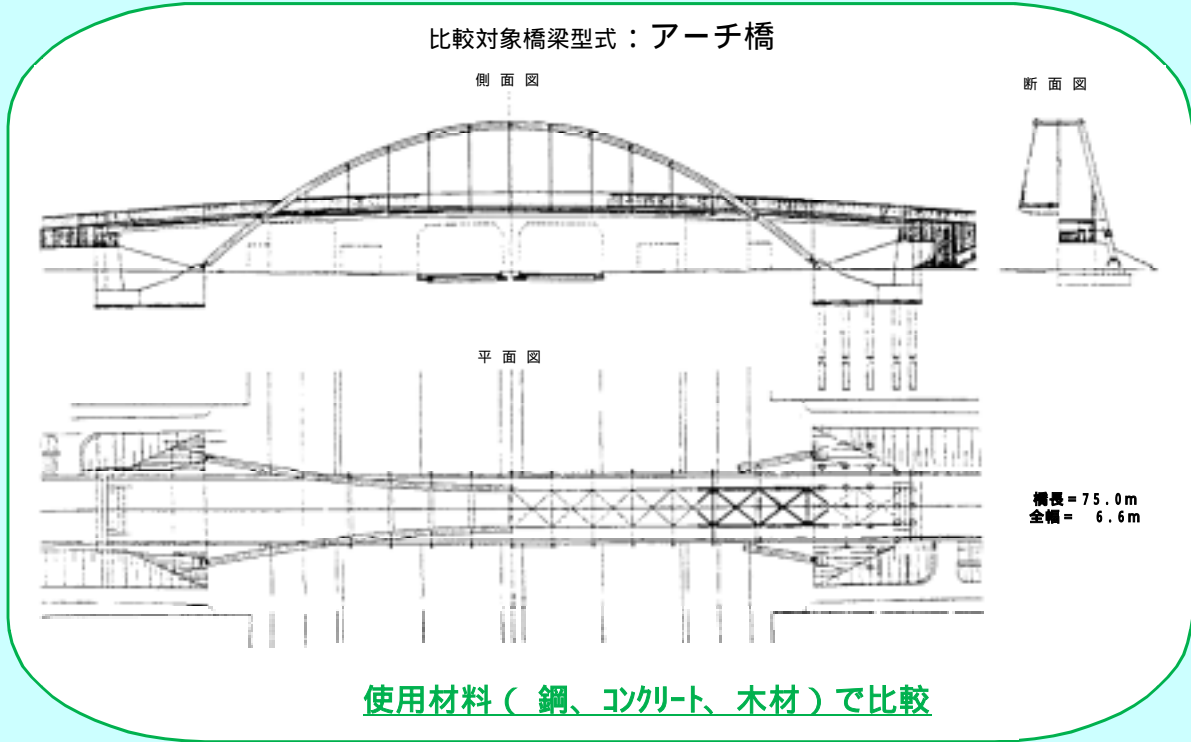
### 環境負荷低減性を考慮した最適設計案の選択



スライド 12 環境負荷低減性を考慮した最適設計案の選択

## 評価の事例

～ 橋梁を例としたガイドライン評価手法の適用事例 ～



スライド 13 評価の橋梁の事例

# 評価シート

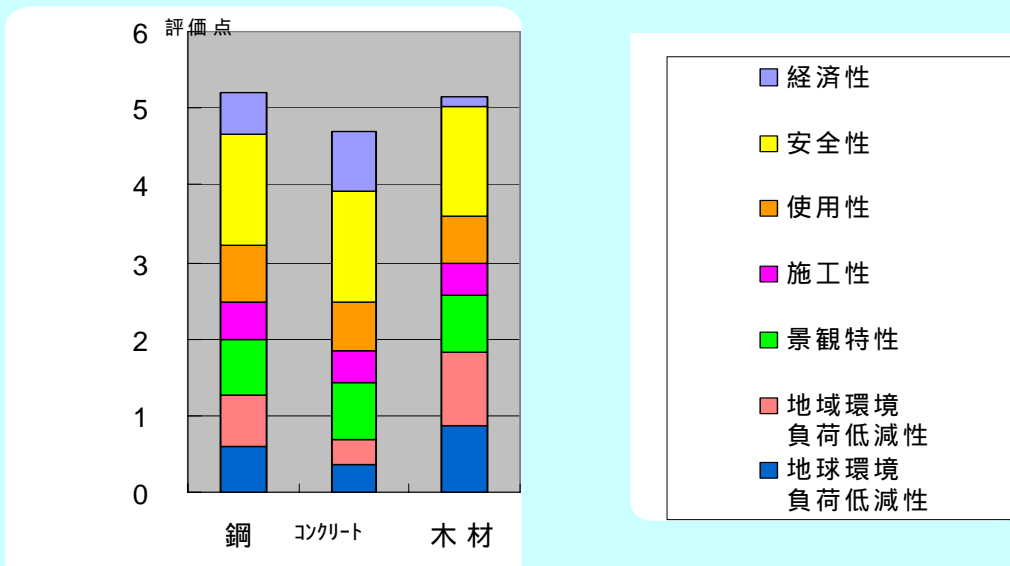
評価方法 (選んで打ては○、打ては○、標準的は○、打ては○、選んで打ては○)

項目	項目名	重み	評価基準	新築段階			改修段階			使用段階			解体・廃止段階			合計								
				選	打て	打	選	打て	打	選	打て	打	選	打て	打	選	打て	打						
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					
建築設計段階による評価	経済性	0.08	竣工費	0.08														0.08	0.08	0.11				
	安全性	0.08	利用者の安全性	0.08															0.08	0.08	0.08			
			近接者の迷惑防止	0.08																0.08	0.08	0.08		
			防火・防犯・防音	0.08																0.08	0.08	0.08		
	使用性	0.12	耐久性	0.08																0.08	0.08	0.08		
			快適性	0.08																0.08	0.08	0.08		
維持管理の容易性			0.08																0.08	0.08	0.08			
施工性	0.02	工事期間の短縮性	0.02																0.02	0.02	0.02			
		工事の安全性	0.02																0.02	0.02	0.02			
		周辺環境への配慮	0.02																0.02	0.02	0.02			
環境設計段階による評価	環境負荷低減性	0.14	リサイクル性	0.04																0.04	0.04	0.04		
			高気密	0.04																	0.04	0.04	0.04	
	地域環境負荷低減性	0.12	騒音防壁	0.04																	0.04	0.04	0.04	
			敷地排水	0.04																	0.04	0.04	0.04	
			敷地排水	0.04																	0.04	0.04	0.04	
			近隣歩行者	0.04																	0.04	0.04	0.04	
	地球環境負荷低減性	0.12	近隣歩行者	0.04																		0.04	0.04	0.04
			近隣歩行者	0.04																		0.04	0.04	0.04
			地球環境負荷低減性	0.04																		0.04	0.04	0.04
			地球環境負荷低減性	0.04																		0.04	0.04	0.04

総合評価点: 5.21 4.70 5.14

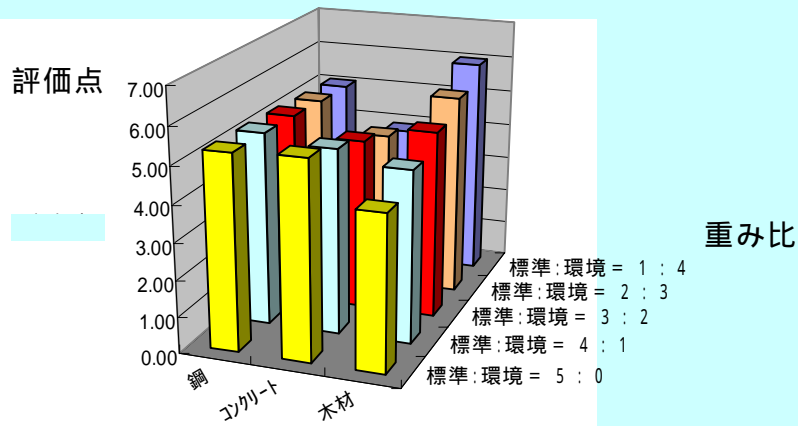
スライド 14 評価シート

# 評価シートによる評価結果



スライド 15 評価シートによる評価結果

## 重みを変化させた場合の評価結果



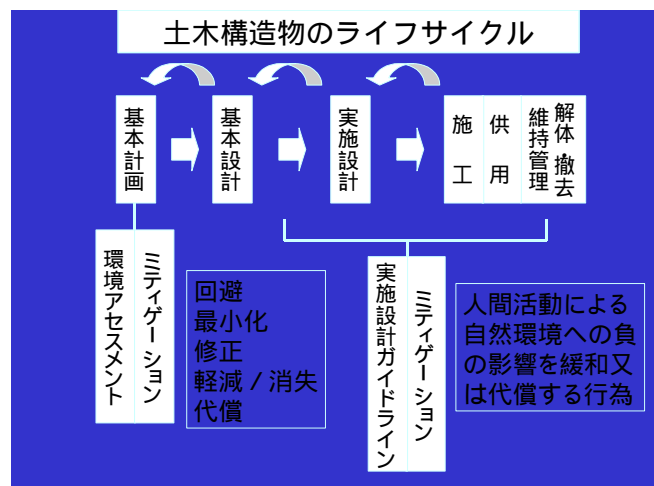
	鋼	コンクリート	木材
□ 標準:環境 = 1 : 4	5.06	3.91	6.02
■ 標準:環境 = 2 : 3	5.12	4.30	5.55
■ 標準:環境 = 3 : 2	5.21	4.70	5.14
□ 標準:環境 = 4 : 1	5.27	5.05	4.71
□ 標準:環境 = 5 : 0	5.31	5.39	4.24

スライド 16 重みを変化させた場合の評価結果

これは1例で、評価点数のうえでは鋼が非常に高くなっていますけれども、これはいろいろなウエイトだとか、あるいは評価手法によって違ってきます。それぞれの中のウエイトは、結果が出てくると全部またフィードバックして、コンサルティングの形で、どのウエイトでどうなったかというのが分かりますので、さらにウエイトを決め直すというようなことも、中では議論しています。

あるいは今言いましたように、標準要求性能と環境要求性能の重みを、1対4だとか、2対3だとか、だんだん変えていったときに、どういものが選ばれるかというのを、チャートにしてやるとこのようになります。ですから従来のような標準要求性能を5にして、環境要求性能をゼロにしてやると、こういう形になります。

基本設計もそうなのですが、道路構造のライフサイクルを考えたときに、基本設計から、実施設計になったときに、いろいろなとこ



スライド 17 土木構造物のライフサイクル

## ミティゲーションの実例 その1

### 調整池の水辺ビオトープ



スライド 18 ミティゲーションの実例



ろでミチゲーション,いわゆる緩和手法が必要です(スライド17)。回避,最小化,修正,軽減,消失,代償がありますけれども,人間活動による自然環境への負の影響を緩和するという,こういうミチゲーションの手法も使う必要があるだろうということが,実設計ガイドラインの中で詳しく述べられています。

具体的に,例えばミチゲーションの例によく出てきますけれども,これは貯水池の例ですけれども,境界を垂直にして,すぐに深くするのではなくて,だんだん深くなるような形にすることによって,生物多様性が確保されるということです(スライド18)。

これもミチゲーションの例ですが(スライド19),宅地開発をして,中に道路を造ったのですけれども,中にリスが生活しているということで,えさ場に行けなくなるということで,これはリスのための橋です。写真の中でリスがちゃんと通っていますが,これはカメラをつけて,実際に1日に何回通っているかというのを観測した例です。このようにミチゲーションというような技術もきちんと使ってやる必要があります。

2つ目の話は,名古屋大学のこの種の問題の研究事例と,それから構造工学研究者と技術者の役割についてごく簡単に述べたいと思います(スライド20)。

最初に先ほど出てきました,環境要求性能と,標準要求性能を2次元のグラフにしたものです(スライド21)。標準要求性能は,コストとか安全性を考える上で使用し,環境要求性能は地球,地域環境,あるいは景観等を考えればいいのですけれども,これは縦軸,横軸両方とも大きくなる方がよくなるというふうに見てください。通常はパレートオプティマムと言いますが,何らかの形でこういう最適な曲線

## ミチゲーションの実例 その2

リスの橋の利用状況

リス専用吊り橋を1~4頭のリスがほぼ毎日利用している。  
宅地供用開始後,リスのロードキルは発生していない。



リスが吊り橋を渡っている様子

スライド19 ミチゲーションの実例  
(リス用の吊り橋)

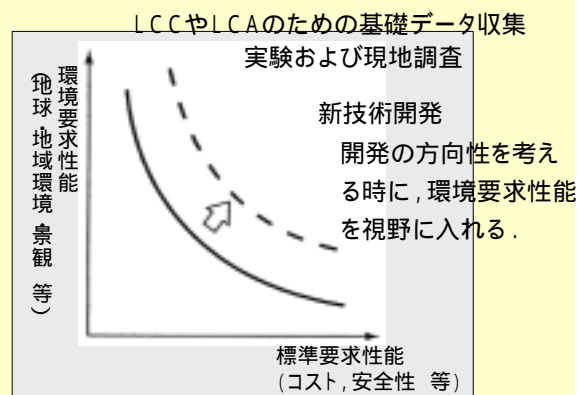
## 研究事例と今後の構造研究者の役割

名古屋大学での研究事例

構造工学研究者と技術者の役割

スライド20 研究事例と今後の構造研究者の役割

新技術開発によるパレートオプティマムのシフト  
(構造工学の技術者,研究者の役割)



スライド21 パレートオプティマムのシフト

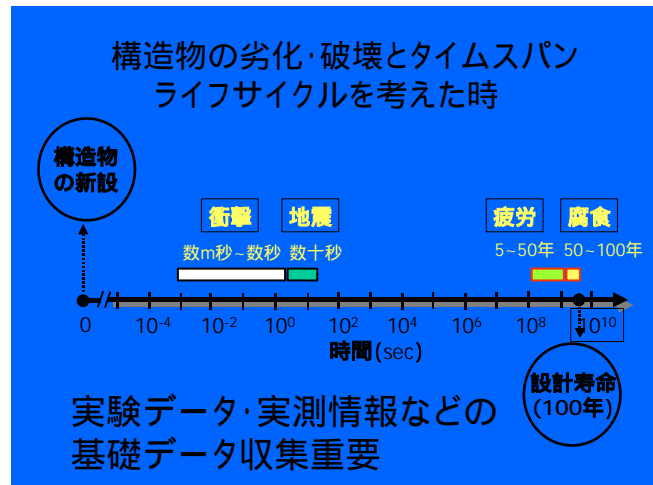
になっていきます。あるところで環境要求性能を満足しようと思うと、そのときのコストはどれくらいになるのかというが出てきます。計画系の人たちは、これで一体どこで最適水準を設定するのだということをよく議論するわけですが、我々構造技術者は、このパレートオプティマムの両軸とも良くなるような、曲線をシフトするような技術開発の方向を視野に入れて研究開発をする必要があるのではないかと思います。

いわゆる標準要求性能だけ、コストと安全性だけがよくなるような方向だけではなくて、環境要求性能に対してもよくなることを目指すべきです。標準要求性能が良くなっても、環境要求性能が悪くなるような研究開発をすべきではないだろうと思います。

実際に構造物の劣化だとか破壊のタイムスパンを考えて、ライフサイクルを考えると土木構造物は、今約100年の寿命（200年という人もいますけれども）を考えると、実際我々が扱う衝撃、地震みたいな話などをすると、数ミリ秒から数10秒、1分から2分ぐらいのものから、疲労の5年から50年、100年、あるいは腐食だとすると100年ぐらいのオーダーを考えなければいけません（スライド22）。

非常に瞬間的なものから長期のものをわかって考えなければいけないということで、結局よく考えてみると、実験データだとか実測情報という基礎データの収集が非常に重要なことが、ライフサイクルアナリシスをしてみると分かります。

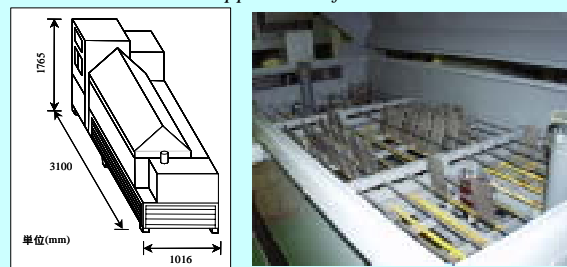
これは、名古屋大学の研究例です（スライド23）。こういう耐久性の実験なのですが、環境促進実験ということで非常に厳しい条件、塩水とか、酸性雨というものを、乾燥、湿潤等々を繰り返して実験をするのですが



スライド22 タイムスパンとライフサイクル

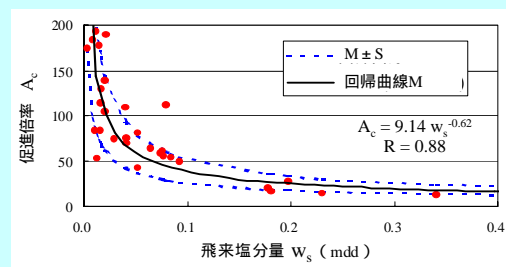
### 橋梁部材耐久性評価のための環境促進実験とLCA適用性に関する研究

*Accelerated exposure tests for durability of bridge members and its applications for LCA*



スライド23 環境促進実験装置

### 促進倍率と飛来塩分量の相関性



促進倍率と飛来塩分量の相関性は高く累乗関数 $A_c=9.14W_s^{-0.62}$ で近似可能

スライド24 促進倍率

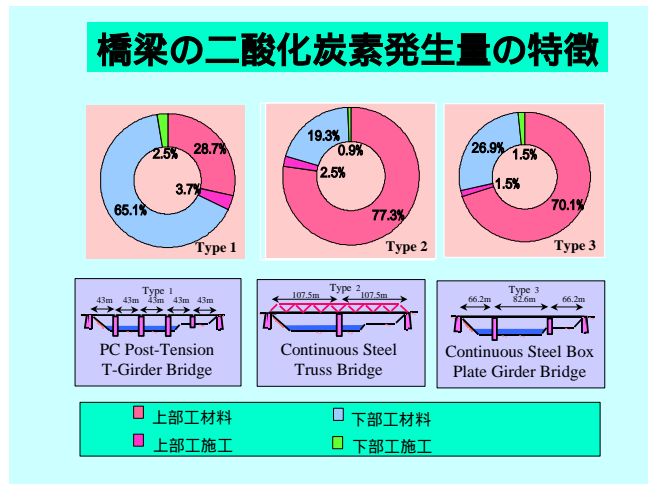
も、大学では従来あまりやらなかったのですけれども、こういうものもやらなければいけないだろうということでやっています。

これは1つの研究結果の例なのですが、先ほども出てきましたけれども、設置場所だとか、部位をきちんと考慮できるように、横軸に飛来塩分量を考慮して、縦軸に今の促進倍率を、環境促進実験と暴露実験との促進倍率をとってやって、関係を求めたのがこの例なのです(スライド24)。こういうことをやると、どこに橋梁が設置された場合にでも、どれくらい腐食が進むかというのが、定量的に求まるということなんです。

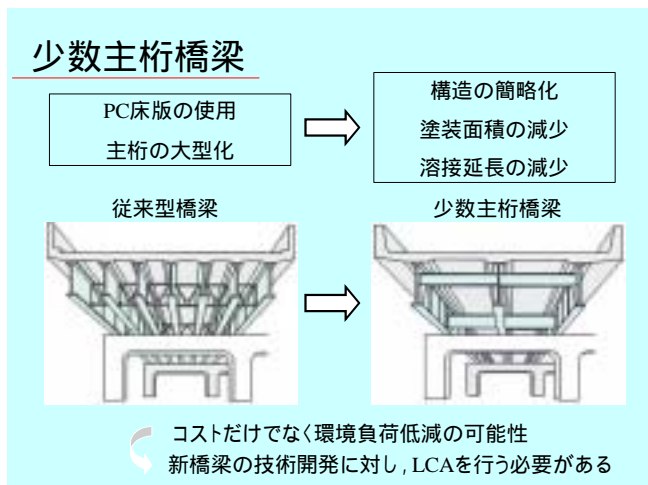
これは先ほどから出てきます橋梁の二酸化炭素の発生量の橋種別の特徴という形で、コンクリート橋と鋼橋、上部工と下部工、あるいは材料と施工に分けて検討した例です(スライド25)。

今新しい橋梁のタイプということで、少数主桁が非常にはやっていますけれども(スライド26)、これはもちろんコスト縮減が目標でしたけれども、少数主桁の場合にはCO<sub>2</sub>発生量に関しても有利になります。実際に廃棄物についても有利になります。そういう意味では、先ほどお話ししたような、標準要求性能も環境要求性能もよくなる例です。これは非常に幸運な例です(スライド27)。

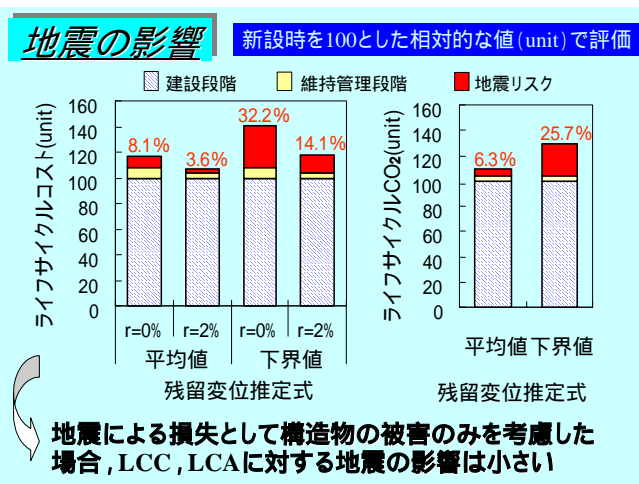
それから地震の場合のいわゆるリスクです(スライド28)。100年を考えたようなときに、これは橋脚を考えたときに、どれくらいライフサイクルの中で地震リスクとして考えなければいけないかというのを計算したものです。構造物だけを考えると、いろいろな条件があるのですが、いろいろな条件でやったときもコストの場合でも建設時コストの30%少し、CO<sub>2</sub>でも建設時CO<sub>2</sub>発生量の25%ぐ



スライド25 橋梁の二酸化炭素発生量の特徴



スライド26 少数主桁と従来の多主桁



スライド27 ライフサイクル環境負荷

らいしかなりません。

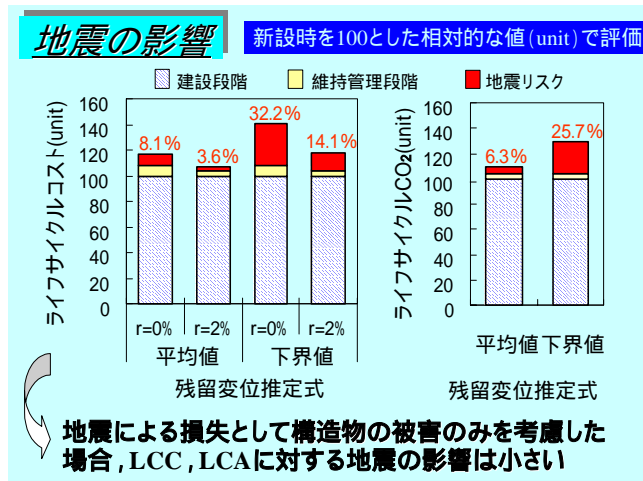
ただし、実際に橋梁が壊れて、車が通れなくなると、ユーザーの経済的な損失などを考えると、実はこれは100%を超えますので、そのようなことも考える必要があるだろうということです。ですから構造物だけを考えると地震リスクは非常に小さいですが、ライフサイクルでユーザーコストも考えると非常に大きくなります。

これは衝撃の例なのですが、いろいろなタイプの防護柵に対して、コストとCO<sub>2</sub>について、ライフサイクルを考えた場合、あるいはリサイクル材を用いた場合にどうなるかというのを研究したものです(スライド29)。

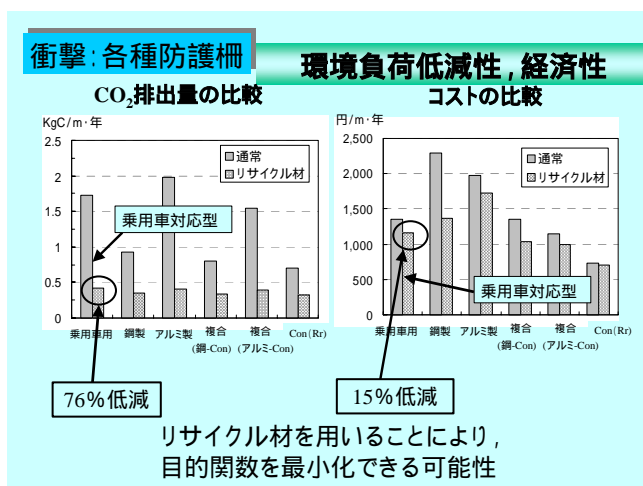
構造と環境ということですが、すべての研究者が環境問題を研究する必要は全然ないのですが、先ほどから申し上げていますように、研究の方向を考えるときに、最初にちょっと考えてほしいのです(スライド30)。特に合成構造などを考えるときに、取り壊したとか補修のときもきちんと考えておかないといけませんよということです。

一方、すべての構造技術者は何らかの形で環境に配慮する必要があるだろうと思います。

これは宣伝なのですが、今年度から、構造工学論文集に「構造と環境」という部門が新設され、9月が論文の締め切りですので、ぜひともご投稿ください。私が主査ですが、別に出したら全部通すようにはしませんけれども(笑)ぜひ。(拍手)



スライド 28 地震のライフサイクルリスク



スライド 29 防護柵のライフサイクルアナリシス

### 構造と環境

全ての研究者が対象とする必要はないが  
研究の方向を考えるときに考慮の対象に  
全ての構造技術者は何らかの配慮を

### 構造工学論文集

今年から: 「構造と環境」部門創設  
(主査: 伊藤義人)

スライド 30 「構造と環境」部門の創設