

インフラアセット評価に資する i-NDT (先端的非破壊手法)

塩谷 智基

インフラ先端技術共同研究講座 特定教授
京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻

インフラシステムマネジメント研究拠点ユニット 副ユニット長
京都大学学際融合教育研究推進センター



- Research topics: NDT & Evaluation for civil materials/ structures
 - ✓ Acoustic Emission, Ultrasonic Testing, Impact-Echo Testing, Tomography, Optical Fiber Sensing
- Working in ゼネコンgeneral contractors' institute from 1989 to 2007. Since Oct 2007, Assoc Prof of 工学研究科 GSE, Kyoto Univ. Since 2010 also appointed as Assoc Prof of 経営管理大学院 GSM, Kyoto Univ. From July 2014, Professor of ITIL laboratory of GSE, Kyoto Univ.
- Invited Researcher in 物質材料研究機構 National Institute of Materials Science (NIMS) from 2014
- Vice director 副ユニット長 of Infra-system Management Research Unit, from Nov. 2014

- 2001-2002: Senior Research Fellow, Microlab, Delft University of Technology (The Netherlands)
- Present roles on Int'l societies:
 - ✓ **Chair of Award Committee (Past Chair)**, Acoustic Emission Working Group, USA
 - ✓ **Secretary**, RILEM, International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (Bagneux, France) , TC-MCM (On-site measurement of concrete and masonry structures by visualized NDT)
 - ✓ **Editorial Board**, Journal of Acoustic Emission, CA, USA
 - ✓ **Convenor**, WG4, SC9, ISO TC-135

フロー

- 我国インフラを取巻く現状
- 研究室の紹介, メンテナンス哲学
- 弾性波法 (AE, UT) とトモグラフィ
- 光ファイバセンシング
- 損傷, 劣化とは
- その他

選択肢の提示 2008/11/7日本経済新聞

インフラ設備の寿命プロセス
 国土交通省は、インフラ設備の寿命を延ばすために、劣化診断技術の普及を推進する。劣化診断技術は、構造物の劣化状況を把握し、適切なメンテナンスを行うための重要な技術である。国土交通省は、劣化診断技術の普及を促進するために、劣化診断技術の普及を推進する。劣化診断技術は、構造物の劣化状況を把握し、適切なメンテナンスを行うための重要な技術である。国土交通省は、劣化診断技術の普及を促進するために、劣化診断技術の普及を推進する。

少子時代のインフラ

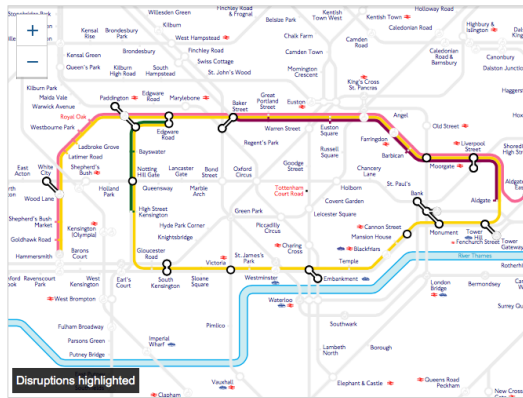
事故と生活水準低下の不安

外に出かけた際に、鉄道の運行の遅れや欠乗の被害を不都合を感じた人も多い。日本では、鉄道は公共交通機関の中心であり、遅れや欠乗は大きな不便をもたらす。国土交通省は、鉄道の運行を安定させるために、劣化診断技術の普及を推進する。劣化診断技術は、構造物の劣化状況を把握し、適切なメンテナンスを行うための重要な技術である。国土交通省は、劣化診断技術の普及を促進するために、劣化診断技術の普及を推進する。

担っても現在のサービス水準を維持するが、それをロスに転じない代わりにサービス水準が下がっても得ないと言える。こうして運賃を日本人が抑えていることを認識する必要が求められる。

07:21 AM April 13, 2015

Lines	Stations
Circle	No service
Circle Line: No service while we fix a signal failure at Edgware Road.	
Replan your journey	
Close status	
District	Part suspended
Hammersmith & City	Part suspended Severe delays
Metropolitan	Severe delays
Bakerloo	Good service
Central	Good service
DLR	Good service

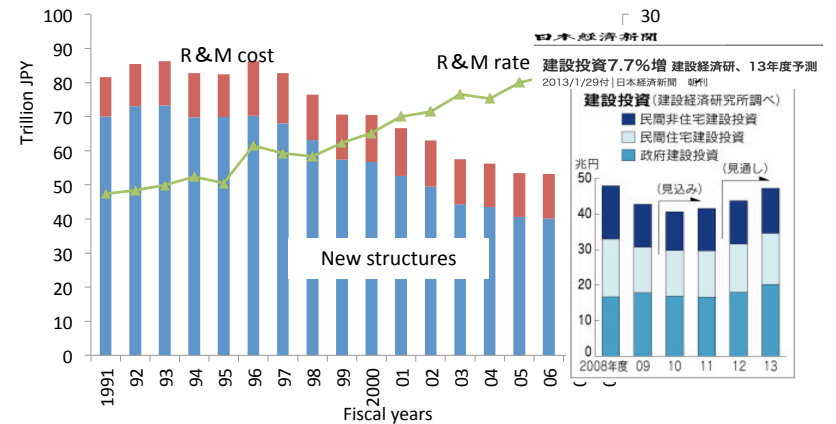


2014全体のGDP成長率
(3/18/2015 JETRO) **2.6%**

年次GDP成長率	実質	-0.0%
2014暦年(前年比)	名目	1.6%

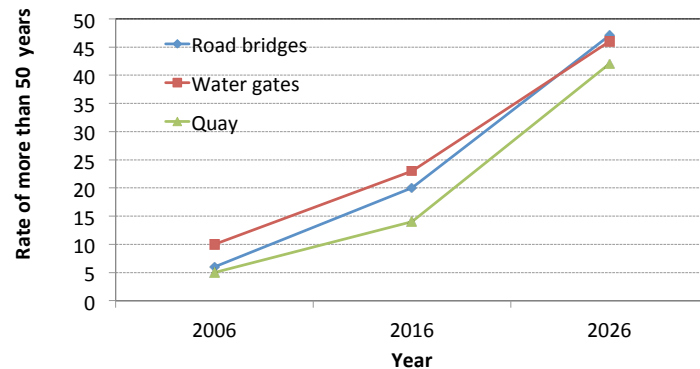
<http://www.cao.gov.jp/index.html>

日本の建設投資



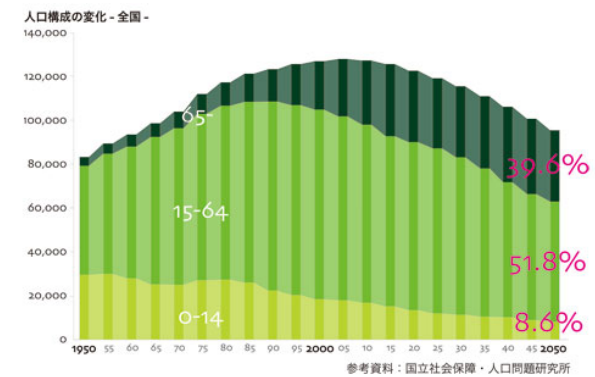
UK 43%, France 46%, Germany 53%, Italy 56%, Ave of Eastern Europe 43%

More than 50 years old JP infrastructure

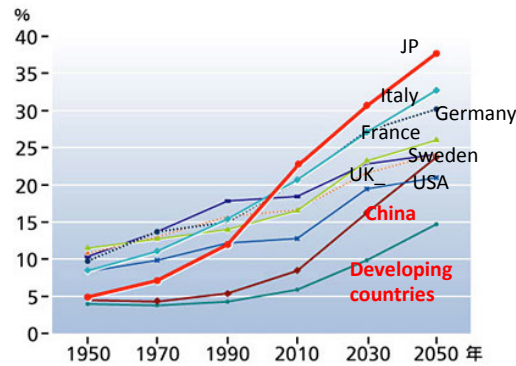


Population structure in Japan

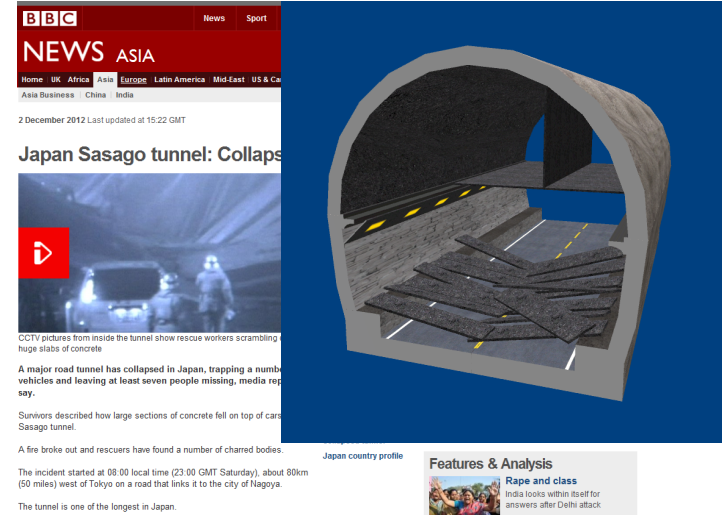
Ref. National Institute of Population and Social Security Research



Ageing prospect world wide based on the statistics in 2006



<http://www.bbc.co.uk/news/world-asia-20571218>



AM08:05JST, Dec 2, 2012

2013年2月15日 日刊工業



2013年2月5日 日経

老朽インフラ官民で監視

無人技術を実証実験

導入を検討する主なインフラ監視の技術

- 光ファイバーセンサー
- 壁に張ったファイバー内の光の変化でゆがみを検知
- 地震計
- リアルタイムに揺れを計測
- 超音波診断
- モノが壊れる際に生じる波動を検出
- カメラ・画像処理
- 動画や静止画から劣化の兆候を探る

総合科学技術会議 「府省横断型の新プログラムの創設」 500億円、5テーマ、次世代インフラが最優先課題

国交省

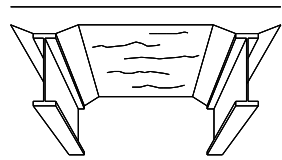
インフラ先端研獲得国家プロジェクト



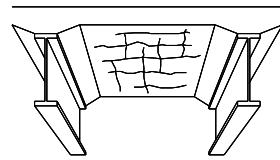
関連プロジェクト概要

- COI (Center of Innovation) 9年
 - 革新材料 (炭素繊維) による次世代インフラシステムの構築
 - 京大がマクロレベルの信頼性評価技術を主導し、物質・材料研究機構、土木研究所と連携して、先端的マクロ解析および計測分析技術を用いた革新材料の信頼性評価及び寿命推定、次世代インフラ構造部材への実装に向けた実環境試験に基づく維持管理技術の確立を推進する。
- SIP (Strategic Innovation Program) 5年
 - インフラ構造材料研究拠点の構築による構造物の劣化機構の解明と効率的維持管理技術の開発
 - NIMS、京大、東大、東工大、土木研究所などを中心に鉄筋コンクリート構造物の損傷劣化機構の解明と補修材料の開発、道路橋床版の維持管理効率化および、これらを合理的に評価できる先端非破壊評価技術の開発などを実施する。
- NEDOプロジェクト 5年
 - インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト
 - 京大、東芝、東大 (情報理工学研究所) を実施機関としたピエゾ抵抗広帯域AEセンサを内蔵する自立電源ワイヤレスセンサ、橋梁など社会インフラへの実装を目指す次世代MEMSセンサ

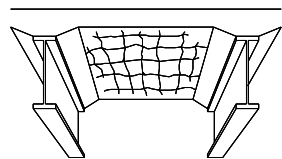
道路RC床版の疲労破壊過程



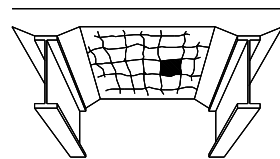
(a) Cracks in transversal direction



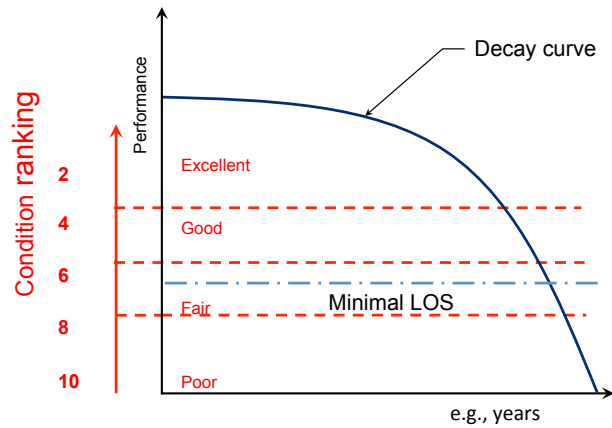
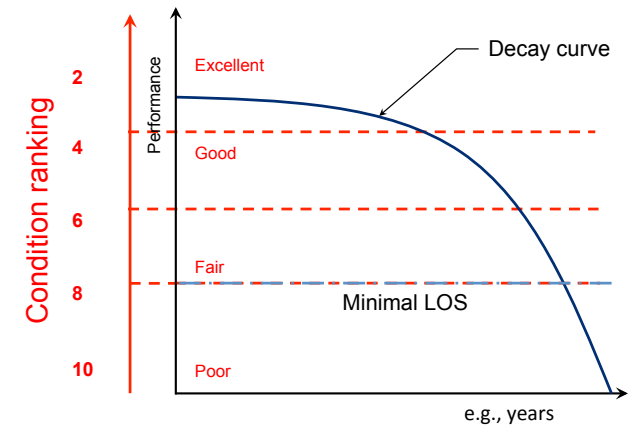
(b) Cracks in longitudinal direction



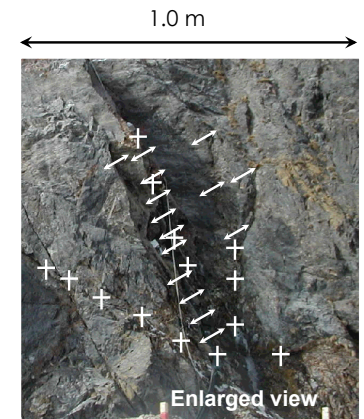
(c) Evolution of cell-like cracks and round off of crack angles



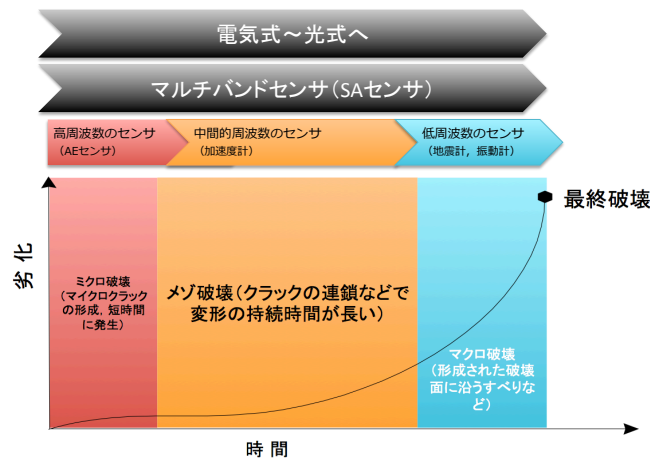
(d) Collapse of a part of concrete deck



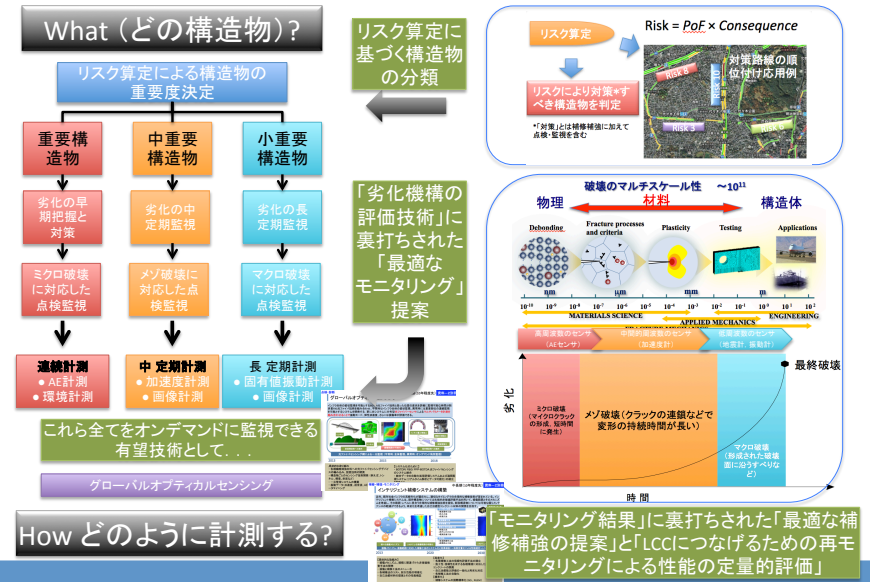
変形を時間とともにとらえる 動的変形挙動



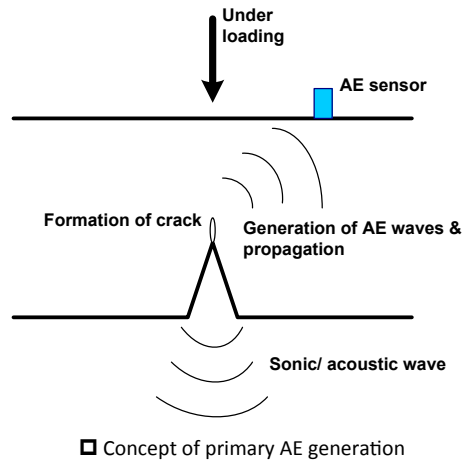
- 巨視的破壊（左）と微視的破壊（右）では得られる弾性波が異なる、つまり、いずれの破壊を計測目的とするか



点検調査の What, How

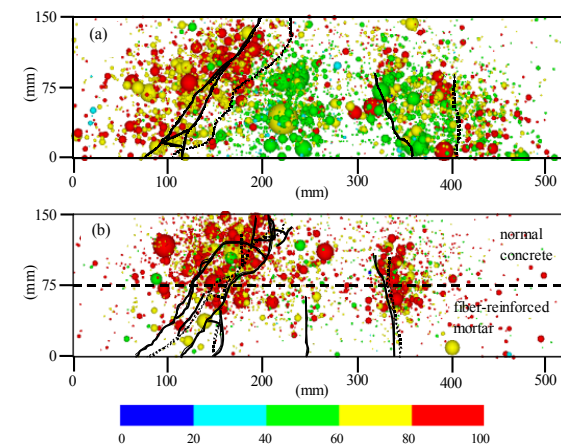


Acoustic Emission



AE計測・評価例

いつ, どこで, どのような破壊が発生したのか



コンクリート梁の4点曲げ試験 (a: 通常コンクリート, b: 複合コンクリート)

アコースティック・エミッション

クラックの発生 e.g., 引張, せん断, 混合型
クラックの連結, 成長

一次AE

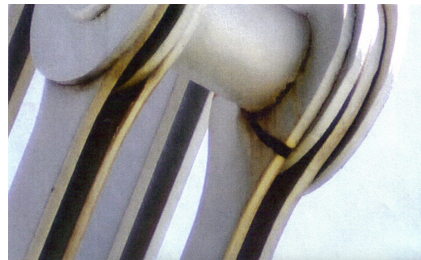
既存クラックの可逆的挙動 e.g., せん断型

漏えい(リーク)

二次AE



測定費用: USD 3.4 mil
対象: 384 Fracture critical eye-bars
センサ数: 640 sensors



Photos: CA-DOT, PAC

一次AEの計測事例

Application of Acoustic Emission for Structure Diagnosis



Largest AE monitoring project underway

SF-Oakland Bay Bridge: An eye-bar cracked

To monitor 384 critical eye-bars for fatigue cracking

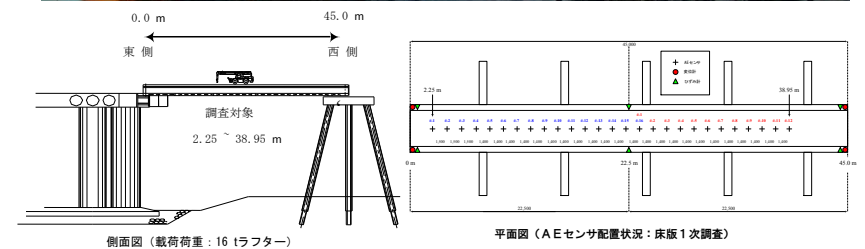
Using 640 sensors; Remotely from 30 miles away

PAC report: T. Tamuras et al. (to be presented at TRB 2012)

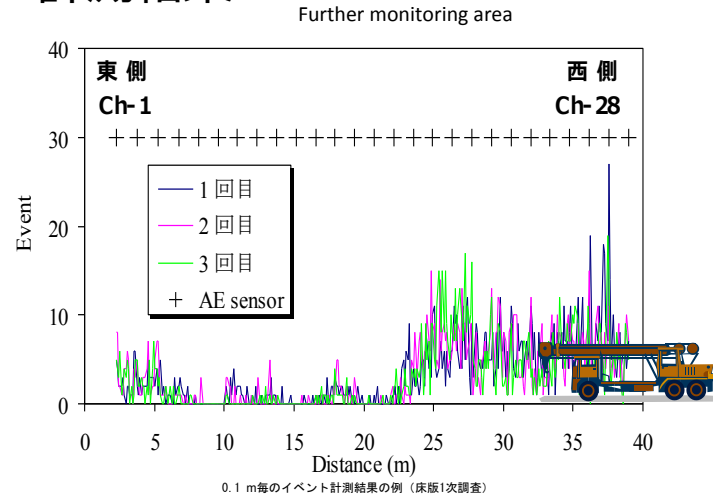
二次AEの計測事例



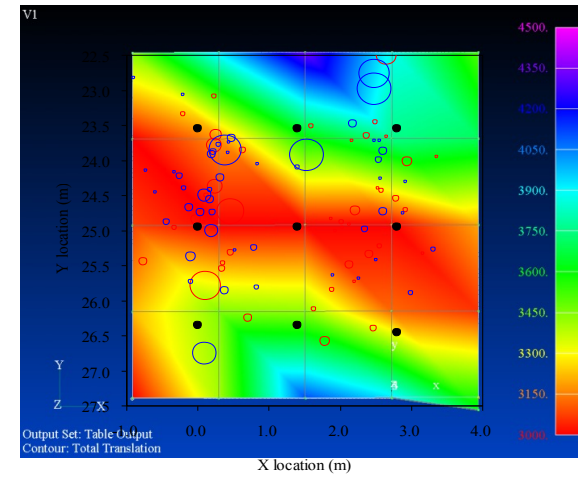
■ 目視, 一部コア採取により損傷が確認されなかった橋梁, 国の重要施設への架橋となることから初期損傷が判断できる可能性があるAE計測を採用



計測結果

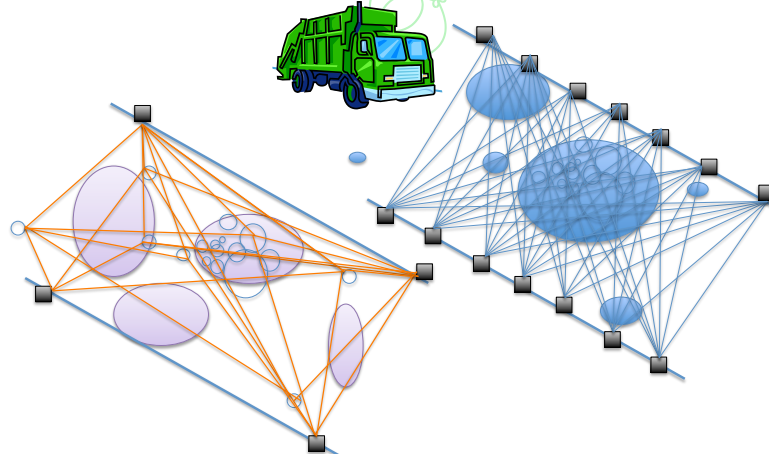


AE震源と超音波表面トモグラフィ



AE トモグラフィ

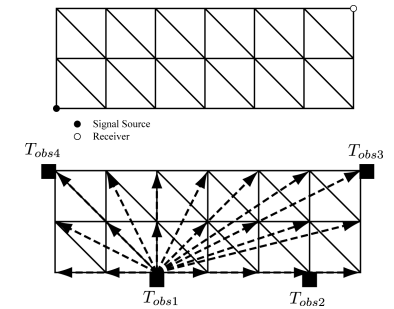
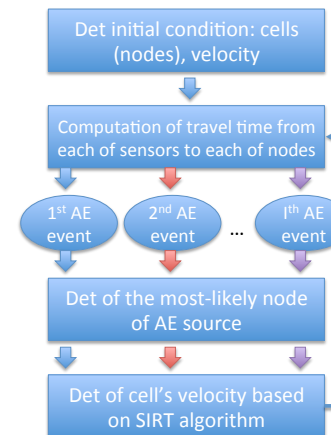
土木構造物の損傷から生じる
AE波を利用した損傷可視化トモグラフィ



AE法と弾性波トモグラフィを組み合わせることの原位置有用性は自明。別々に実施することで試験が長時間、高コスト → 一般化が容易ではない
■ 2つの弾性波法 (AEおよび、弾性波トモグラフィ) を同時に実施できるAEトモグラフィ法を提案

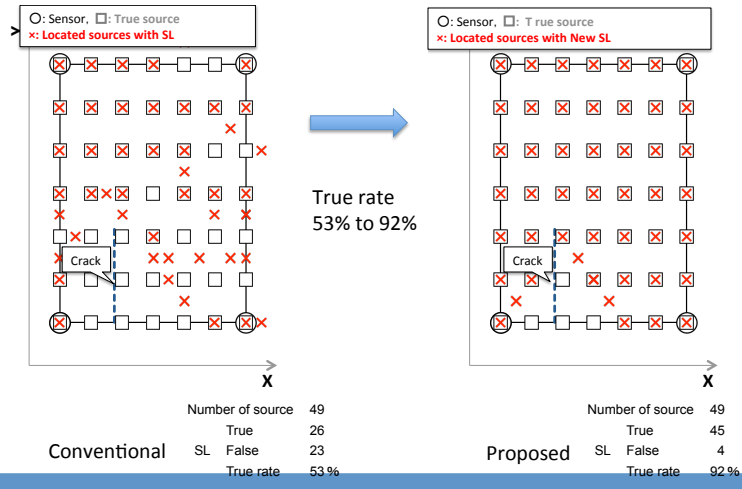
Brief procedure of 2D AE Tomography

Kobayashi, Y. and T. Shiotani (2012), *Seismic Tomography with Estimation of Source Location for Concrete Structures*, **Structural Faults and Repair 2012**, Edinburgh.

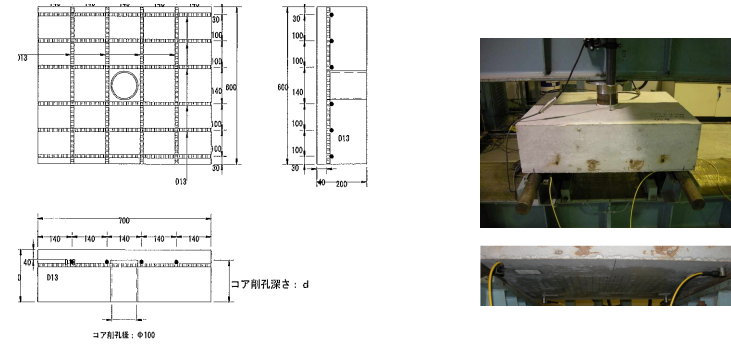


$$S_T = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (T_{ij} - \bar{T}_i)^2$$

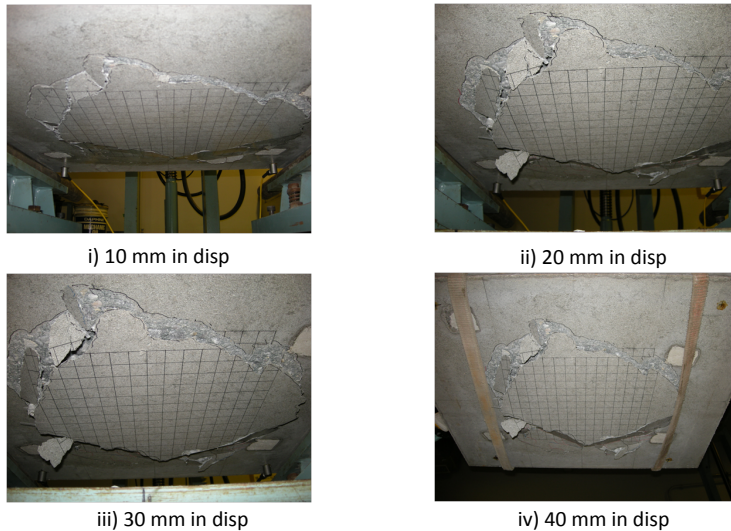
新AE震源探査プログラムの検証



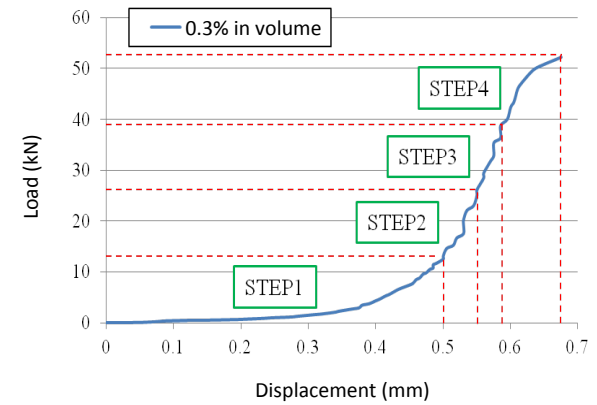
試験体, 繊維補強コンクリート



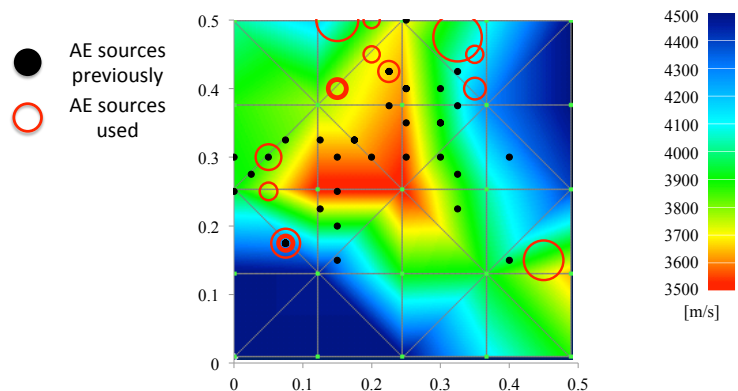
繊維混入率 0.3%



Load v.s. Displacement



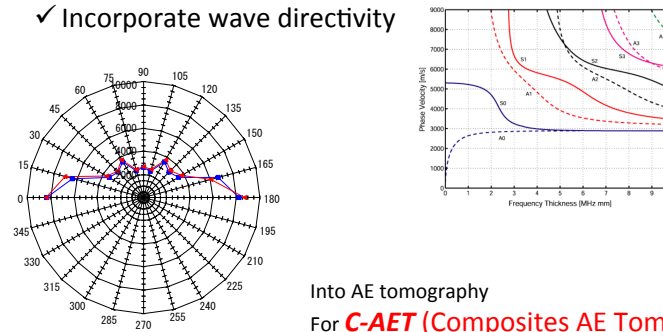
2D-AEトモグラフィ解析結果



Cutting edge 研究

To apply thin composites,

- ✓ Incorporate plate wave / Lamb wave dispersion
- ✓ Incorporate wave directivity



光ファイバセンシング

- インフラの長寿命化への対応
- 一本のファイバに複数のセンシングデバイス
 - ひずみ, 温度, 変位, 傾斜. . . .
- 高周波計測レベルまで



http://wallpaperswide.com/boeing_787_dreamliner-wallpapers.html



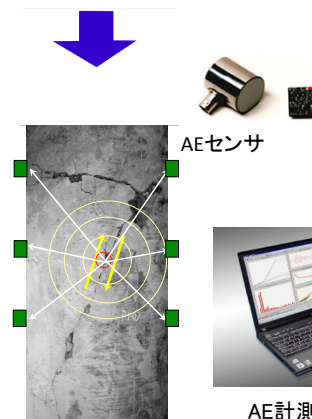
http://www.ecology-life.jp/news/toray_03.html



<http://www.modec.com/jp/business/skwid/index.html>

アコースティック・エミッション (AE)

微弱なき裂悲鳴計測



- 破壊情報
 - 場所
 - 地震源探査
 - 大きさ
 - マグニチュード
 - 形態
 - 引張, せん断, 混合

7.2 Recommendations

With the knowledge that **acoustic emission technology provides the most suitable and applicable monitoring capabilities for this project**, it is the recommendation of the authors that the Mistras Group be used as the commercial manufacturer of all acoustic emission devices required for this project. This recommendation is based upon the results of the EXCEL computer based program applied in Chapter 3 of this report, as well as the customer satisfaction surveys, both which are documented in Chapter 3.



Development of an Advanced Structural Monitoring System

Arturo Schultz, Principal Investigator
Department of Civil Engineering
University of Minnesota

November 2010

Research Project
Final Report #2010-39

Your Destination...Our Priority



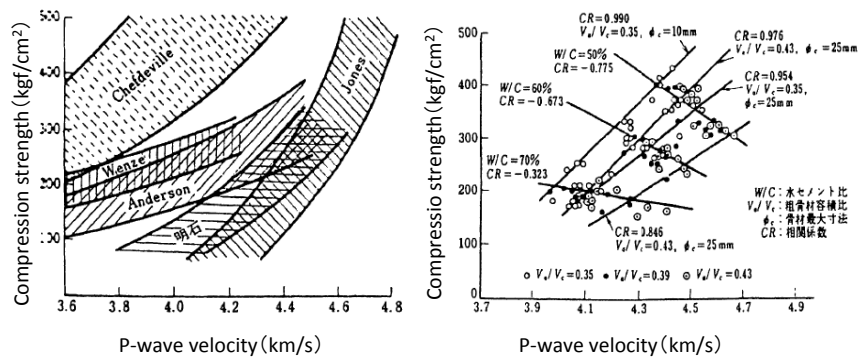
Minnesota
Department of
Transportation

**RESEARCH
SERVICES**

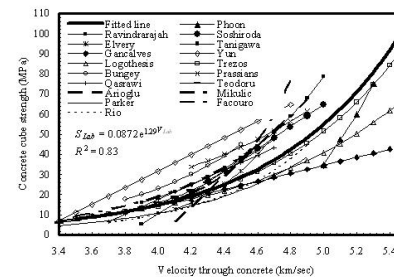
Office of
Policy Analysis,
Research &
Innovation

劣化/ 損傷 とは

弾性波速度と強度 _1



弾性波速度と強度 _2



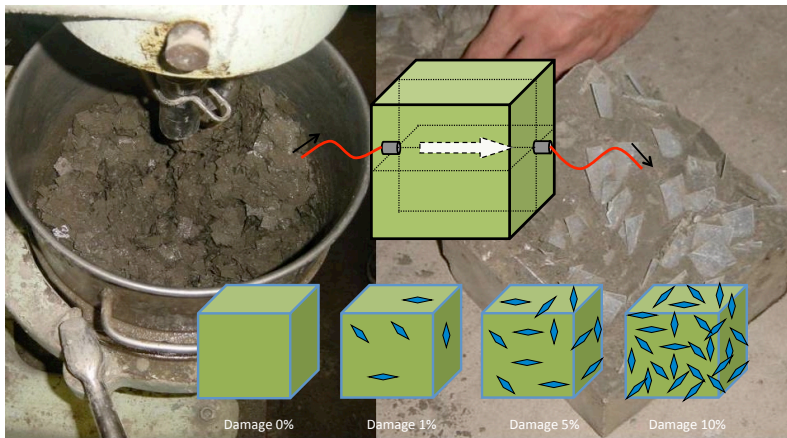
Whitehurst, 1966

Turgut, P.: Research into the correlation between concrete strength and UPV values, NDT.net, 12, No.12, 2004.

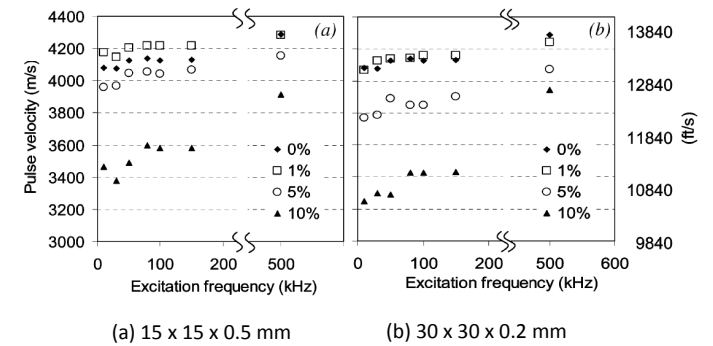
V _p (ft/sec)	V _p (m/sec)	Quality
> 15,000	> 4,570	Excellent
12,000–15,000	3,660–4,570	Fine
10,000–12,000	3,050–3,660	Acceptable
7,000–10,000	2,130–3,050	Un-acceptable
< 7,000	< 2,130	Poor

擬似損傷による検討

Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage, *Materials and Structures*, Vol.42: 377-384, 2009
 Tomographic reconstruction of concrete using attenuation of ultrasound, *NDT & E International*, Vol. 44, 206-215, 2011

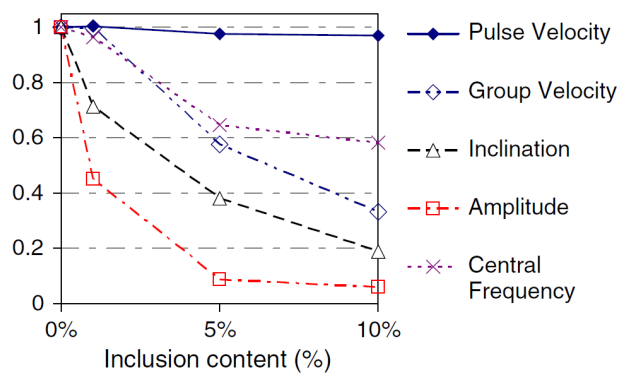


異なる形状の擬似損傷でのP波分散特性



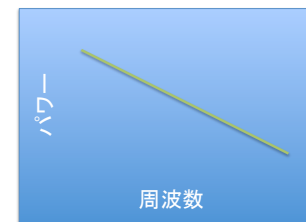
正規化した弾性波パラメータv.s. 擬似損傷率

Shiotani, T. & Aggelis D.G., *Materials and Structures*, Vol.42: 377-384, 2009

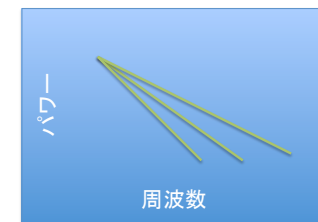


AE波伝達関数を用いた損傷指標

- 伝達関数によるインフラ構造物の損傷定量化

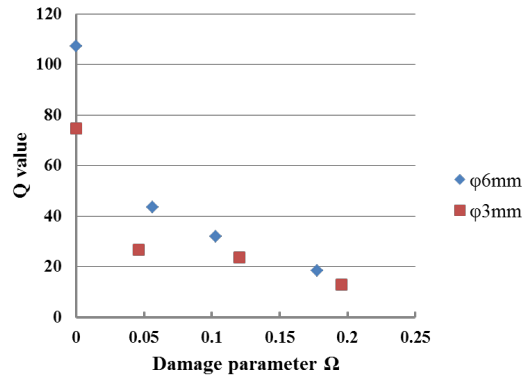


$$Power = f(freq)$$



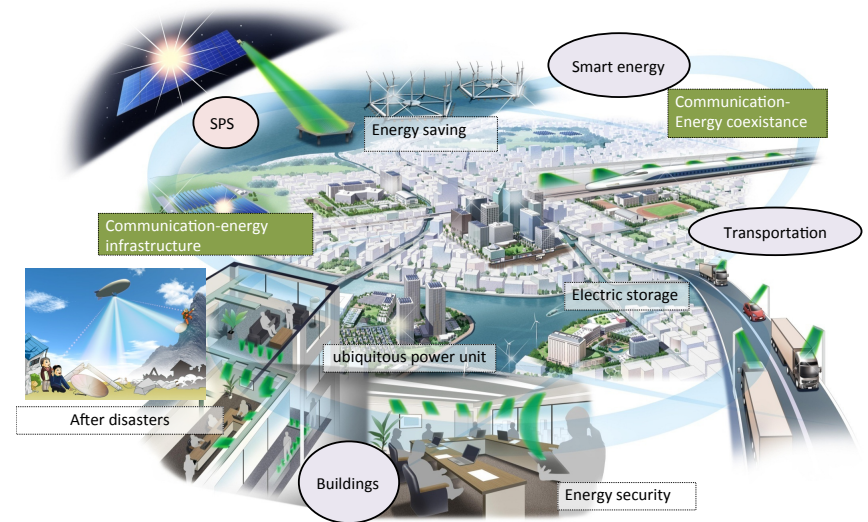
$$Power = f(freq, dist, property)$$

Q値と損傷パラメータ Ω



Shiotani et al., Structural Faults & Repair, London, 2014

空中給電の実用例



埋設型 MEMS trillion sensors driven by 空中空電システム



- ✓ New structures
- ✓ Sensor installation
- ✓ On-demand power transfer
- ✓ Excite and detect signals
- ✓ Long-term monitoring



Multicopter for power transfer and signal detection

ご清聴ありがとうございました

Contact to:

shiotani.tomoki.2v@kyoto-u.ac.jp