

## 論文 格子ボルツマン法によるひび割れ・骨材を考慮した溶脱解析

人見 尚<sup>\*1</sup>・竹田 宣典<sup>\*2</sup>・入矢 桂史郎<sup>\*3</sup>・吉野 正人<sup>\*4</sup>

**要旨**：コンクリート中に含まれる骨材やひび割れを考慮して、解析法に格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann method : LBM) を用い、カルシウム溶脱解析を実施した。その結果、LBM を用いてひび割れや骨材を考慮した溶脱の予測が可能であることを示し、これらはカルシウムの溶脱の進行に影響を及ぼす結果が得られた。また骨材の配置によって発生するカルシウムイオンの移行経路の屈曲や骨材周囲の遷移帯が、溶脱現象に影響を及ぼすことが判った。

**キーワード**：溶脱, 骨材, ひび割れ, カルシウムイオン, 格子ボルツマン法

### 1. はじめに

コンクリートの劣化現象は、コンクリートに内在する物質からのもしくは外来のイオンのコンクリート中の化学作用と拡散に起因する場合が多いと考えられている。特にコンクリート中のカルシウムの溶脱は、コンクリートを構成するセメントペースト部分からのカルシウム成分の溶出と散逸により、セメントペースト組織がポーラスになる現象を指し、極めて遅い速度ながら結果としてコンクリートの強度低下を招く場合がある。溶脱現象には数百年以上の予測が求められることもあり、長期に及ぶコンクリートの溶脱範囲の把握には解析的な手法が有効と考えられ、これまでに様々な提案<sup>1)</sup>がなされている。本研究では、溶脱によるカルシウムの細孔溶液中の飽和濃度と拡散係数の変化に基づいた溶脱モデル<sup>2)</sup>に、骨材やひび割れなどの不均質媒体を扱うことのできる格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method : LBM) なる解析法を用いたコンクリート溶脱シミュレーションを行った<sup>3)</sup>。本法では、X線CTによる細骨材周囲の観察で確認された遷移帯や骨材やひび割れを入れた場合の解析を実施した。

### 2. 解析モデル

#### 2.1 解析対象

解析対象は、W/C が 0.4, 砂セメント比が 1.5 の普通ポルトランドセメントを用いたモルタルとした。なお、混和剤は用いていない。

#### 2.2 溶脱モデル

溶脱モデル<sup>1)</sup>は、セメントペーストから溶解したカルシウムの拡散は、式(1)に示す拡散方程式を中心に構成される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} - UC \right) + R \quad (1)$$

C がカルシウム濃度, t は時間, x は座標, D はカルシウムの拡散係数, U はコンクリート組織内の媒質すなわち水分の流れ, R はセメント組織からの溶出による非線形項を表す。

拡散係数は、式(2)に示す Ca(OH)<sub>2</sub> (以下, CH と略記)の量に依存する関数で与えられている。

$$D = D_0 + (D_1 - D_0) \cdot (1 - CH_x / CH_i)^2 \quad (2)$$

なお CSH の溶解では拡散係数の変化は生じないと仮定している。

セメントからの溶解は、図1に示すように、まず CH が溶解し、次いでカルシウムシリケート化合物 (以下, CSH と略記)が溶解すると仮定

\*1 (株)大林組 技術研究所土木材料研究室 LCC グループ副主査 博士 (工学) (正会員)

\*2 (株)大林組 技術研究所土木材料研究室 LCC グループグループ長 博士 (工学) (正会員)

\*3 (株)大林組 技術研究所土木材料研究室室長 博士 (工学) (正会員)

\*4 信州大学 工学部機械システム工学科助教授 博士 (工学) (非会員)

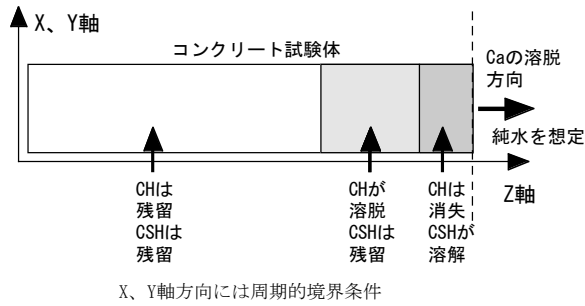


図-1 カルシウム溶解模式図

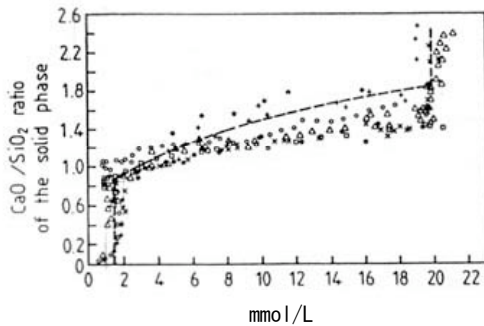


図-2 Ca/Si 比と飽和濃度の関係<sup>1)</sup>

した。Ca の溶解量は、局所的な細孔溶液の濃度と飽和濃度との差で与えられる。細孔溶液の飽和濃度は、図-2 に示す Berner<sup>4)</sup> のまとめたカルシウム-シリカ比 (以下、Ca/Si 比と略記) とカルシウムの飽和濃度の関係によるものとし、この関係をフィッティングした式(3)を用いている。

$$C_0 = \begin{cases} 20 & 1.8 \leq C/S \\ 30.3C/S - 28.2 & 2 \leq C/S < 1.8 \\ 2 & C/S < 2 \end{cases} \quad [\text{mol}/\text{m}^3] \quad (3)$$

モルタル中の細孔溶液の流れは、移流の解析から求めたものを用いており、骨材の混入による複雑な流れを考慮している。実際の解析には、後述する格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method : LBM)を用いて、拡散方程式とナビエ=ストークス方程式と等価な支配方程式でコンクリート中の細孔溶液の移流とカルシウムの拡散の連成で溶脱現象を求めた。

### 2.3 骨材のモデル化の方法

コンクリート組織には、骨材が存在することでカルシウムの拡散は、複雑な移行経路をとる

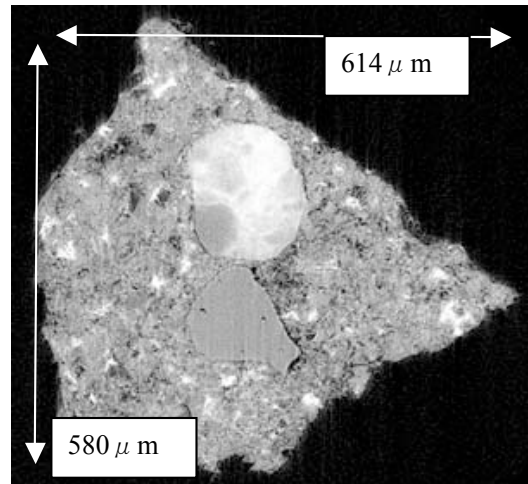


図-3 溶脱モルタルの X 線 CT 断面

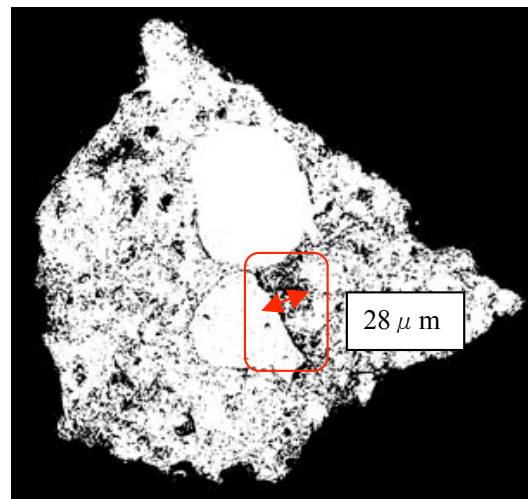


図-4 2 値化した X 線 CT 断面

ものと考えられる。さらに骨材の周囲には遷移帯が形成されている。遷移帯は数十ミクロン程度の幅の粗な領域と考えられる。骨材の影響を評価するために、骨材の影響を評価するために、本報告ではモルタル組織に骨材を導入した例について考察を加えた。骨材の障害物の形状は最も単純な球とした。また、遷移帯でのカルシウムの拡散係数は、他の組織より大きいと考えられるために、骨材の周囲の格子点は、モルタルの領域に比べ拡散係数を 10 倍の大きさに仮定した。

遷移帯の幅は、細骨材の例であるが、X 線 CT で得られるモルタル組織の断面図も参考にした。SPring-8 による高分解能 X 線 CT で撮影した、

溶脱後のモルタル断面を図-3に示す。W/Cは0.4である。輝度分布にしきい値を設定し、材料と空隙を分けた同断面図の2値化の結果を図-4に示す。それぞれ空隙を黒、材料部分を白色で表示している。溶脱前から細骨材周囲に約 $28\mu\text{m}$ の幅で粗な領域が存在する。このため、遷移帯の幅は骨材周囲の第一近接格子のみとした。

## 2.4 ひび割れのモデル化

本報告では、まず単純な形状での影響を評価するために、溶脱方向に平行な直線形状で、 $0.2\text{mm}$ 幅のひび割れを導入した。一般に形状が直線状で幅の大きいものほど、溶脱を促進する影響が大きいと考えられる。

## 3. 格子ボルツマン法による解析

格子ボルツマン法(LBM)は、空間を格子点に分割し、格子点上の量で諸現象を表す解析法である。LBMは、隣接する格子点の間での物理量のやり取りで現象を記述し、計算量は有限要素法に比べ少なく、全体の接点の接続に関する情報は必要ないため複雑境界が計算領域に存在しても解析上の変更は少ないという大きな利点がある。LBMでは流体や拡散体の濃度をスカラー量ではなく、方向や大きさ(速度)に応じてスペクトル分解し、それぞれの量を表す分布関数の支配方程式で現象を記述する。

本報告における骨材は、モルタル中の障害物として扱い、骨材内部に拡散や流れは生じないとした。このため、拡散や流れを求めるための骨材からの格子点からの寄与は、骨材に接する格子点のCa濃度から外挿することとし、その方法として稲室らの濃度一定境界<sup>5)</sup>条件を課している。この条件は、障害物に属する格子点からの寄与をそれ以外の格子点から外挿する方法である。この条件では、骨材に接する格子点のカルシウム濃度勾配が保存されることになる。

本解析において、コンクリートが外部水に接する場合は、前述の濃度一定境界に端部から外部水へのカルシウム流出の条件を補正したもの

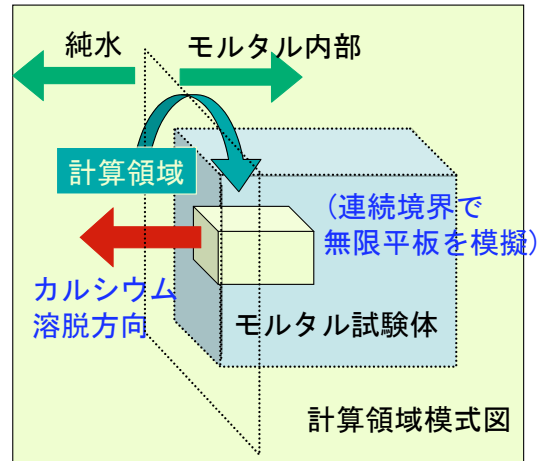


図-5 溶脱解析概念図

表-1 解析に用いた諸量

諸量	
単位容積質量	$2.16 [\text{g}/\text{cm}^3]$
含水率	$12.7 [\%]$
$\text{Ca}^{2+}$ 濃度	$20 [\text{mmol}/\text{l}]$
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度	$1.88 [\text{mol}/\text{l}]$
CSH濃度	$2.95 [\text{mol}/\text{l}]$
CSHの分子量	212
拡散係数(健全部)	$1.0 \times 10^{-12} [\text{m}^2/\text{s}]$
拡散係数(溶脱部)	$1.7 \times 10^{-10} [\text{m}^2/\text{s}]$
透過速度	$1.0 \times 10^{-7} [\text{m}/\text{s}]$

を用いている。外部水は計算領域の外側に定義し、計算領域の端部の格子点を外部水に接している水接部と設定する。骨材の場合と同様に、外部水の存在する分布関数を外挿し、そこから水接部のカルシウム濃度を求める。水接部では透過速度と呼ばれる一定速度濃度が外部水部分に流出すると定め、カルシウム濃度を減少させている。すなわち骨材と水接部では、濃度一定境界という解析上の設定はほぼ等しく、分布関数の外挿のあとで、濃度を保存するか、減ずるだけでそれぞれの境界条件に対応させている。

## 4. 溶脱解析

### 4.1 解析条件

解析に用いたコンクリートのモデルを図-5に示す。解析領域は無限長の平板を仮定してい

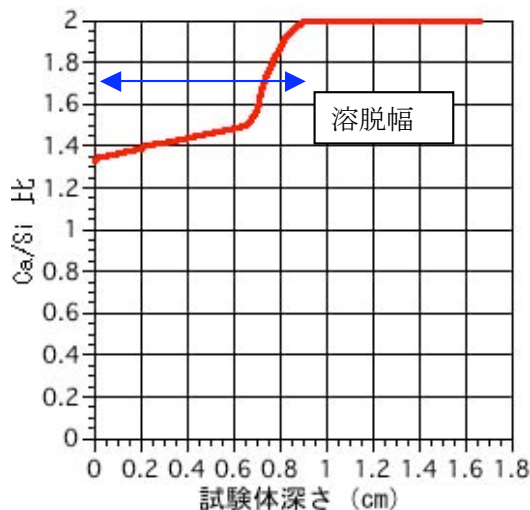


図-6 30年経過時のCa/Si比

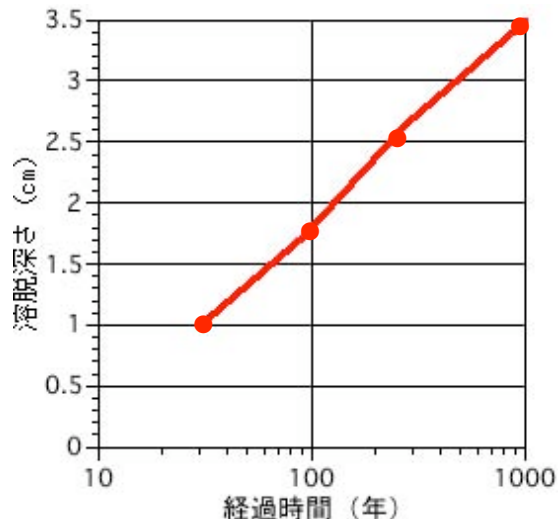


図-8 経過時間と溶脱深さ

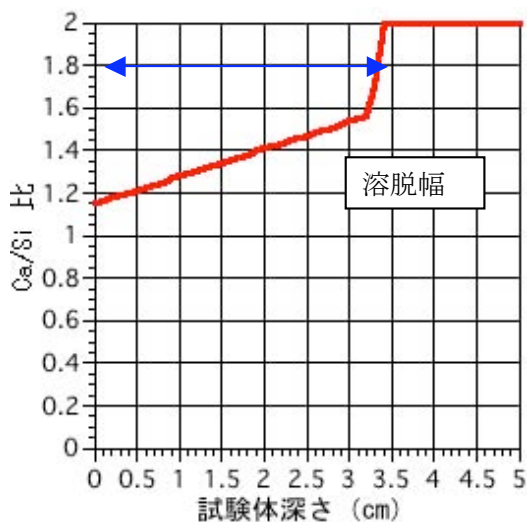


図-7 1000年経過時のCa/Si比

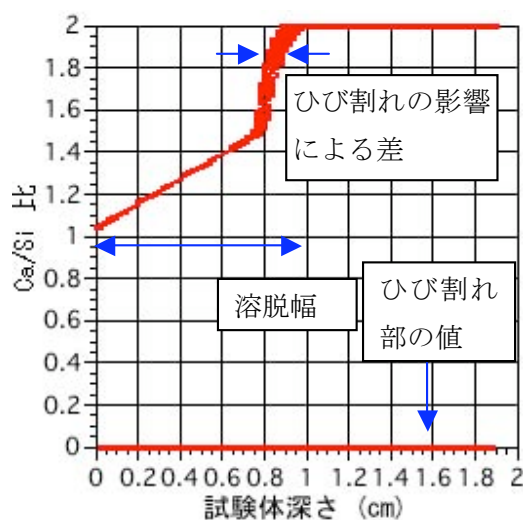


図-9 経過時間と溶脱深さ

る。水平方向には、計算領域のコピーが接するように存在する周期的境界条件を課している。外部水に接する端部では、透過速度を与え<sup>5)</sup>、端部の溶液中のCaが外部に流出するような状況を与え、反対側の端部はすべての値を固定する境界条件を課した。解析に用いたモルタルの諸量を表-1に示す。コンクリート特有の値は配合より推定し、拡散係数や透過速度は斉藤らの結果<sup>2)</sup>によっている。解析は全て3次元で行った。時間刻みを $1 \times 10^4$ 秒に揃えた。メッシュ幅は0.2mmとした。

#### 4.2 モルタルの解析結果

骨材などを含まない条件の下での溶脱解析を行った。想定した期間は、30年、100年、300

年及び1000年の4種である。

図-6に30年経過時の水接面からの溶脱状況をモルタルに残留するCa/Si比で示す。溶脱範囲は、端部から10mm弱の結果となった。また図-7に1000年経過時のCa/Si比を示す。溶脱範囲は、3.4cm程度となった。その他、100年、300年の結果ではそれぞれ1.9cmおよび2.7cmとなった。これらをまとめ、図-8に経過時間と溶脱深さの関係を示す。横軸は対数にとった表示では、ほぼ線形の関係となっており、溶脱の進行は、時間の対数に比例し、時間経過に伴い遅くなる傾向にある。これは、図-2に見られるようにCa/Si比が低下するにつれてカルシウム濃度の飽和溶解度が低下するために、

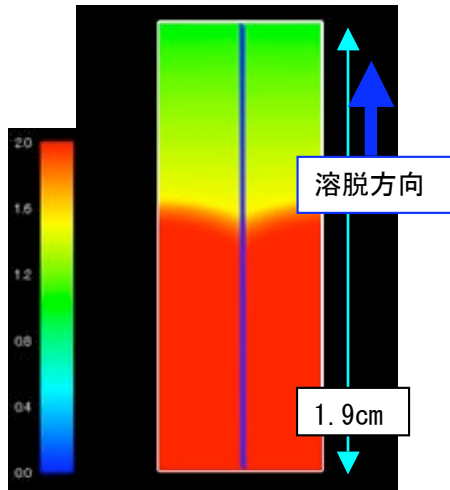


図-10 ひび割れの Ca/Si 比(30 年)

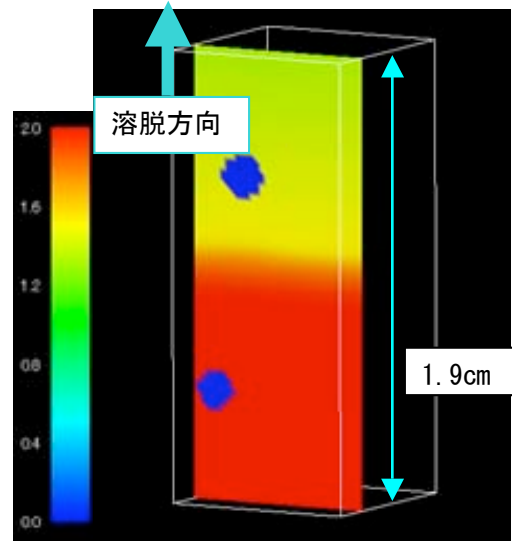


図-12 骨材導入時の Ca/Si 比(30 年)

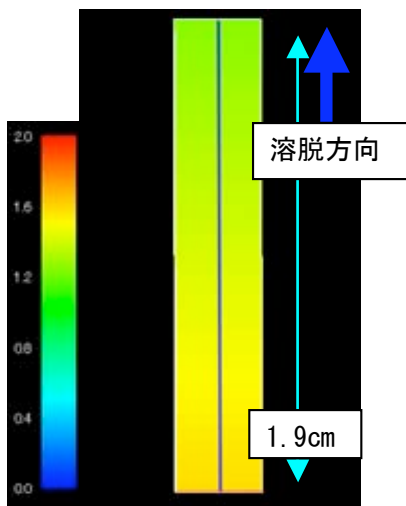


図-11 ひび割れの Ca/Si 比(100 年)

溶脱組織の細孔に存在できるカルシウム量が低く抑えられるためと考えられる。

### 4.3 ひび割れの影響

ひび割れが 0.2mm の幅のものを導入した場合の 30 年経過時のひび割れ部分以外の全格子点の解析結果を図-9 に、中心部を 2 次元表示したものを図-10 に示す。図-9 では、ひび割れの影響により、試験体深さ方向で約 0.75~1.0cm の範囲で溶脱状況に差が現れている。ひび割れの周囲は溶脱が進んでいることが見てとれる。ひび割れより遠い部分、具体的には 2.4mm 程度はなれた部分では、図-6 に示したひび割れ無しの状態の 9mm 弱の溶脱幅と同様の幅となり、ひび割れの影響は少ない結果となった。ひび割

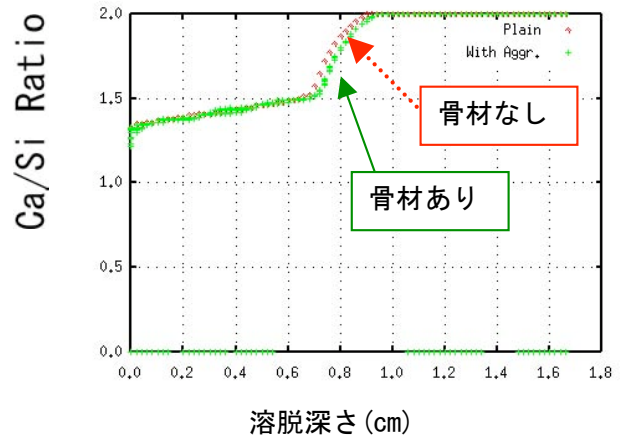


図-13 骨材導入時の Ca/Si 比

れの効果は、30 年程度の溶脱には現れるが、それよりも長期の結果では、ひび割れの影響は表れなかった。図-11 に 100 年経過時の Ca/Si 比の 2 次元図を示す。以下 2 次元図は全て水接部を上端に設定している。すでに、図-10 に見られるようなひび割れ周囲の溶脱の進行の様子は見られない。また、この解析は深さ方向の幅を 1.9cm にとったが、この結果でも溶脱幅はひび割れ無しの状態と変わらない結果となった。このことは、ひび割れ周囲からのカルシウム供給があるために、内部からひび割れを伝えるカルシウムの伝播が起っていないためと考えられる。

### 4.4 骨材の影響

骨材を模擬した径が 3mm の球状の障害物をモルタル内部に乱数を用いて配置した。細骨材

の導入に近い条件となった。

遷移帯の領域を、骨材の周囲 1 格子点分の 0.2mm とした。解析上は、遷移帯領域を他の領域での拡散係数が 10 倍の領域と仮定した。

図-12 に骨材を導入した場合の 30 年経過後の解析結果を示す。骨材の数が少ないためか、断面にあまり影響が表れていないようにみえる。骨材を入れない場合との比較を、Ca/Si 比を縦軸に、溶脱深さを横軸にとり、図-13 に示す。骨材が無い状態を赤で、骨材ありの状態を緑で示している。結果としては約 0.5mm 程度、骨材あり場合の方が、溶脱の進行が早いことが見てとれる。

さらに、300 年経過時の結果の一部を図-14 に示す。計算領域は深さ方向で 9.6cm をとったが、全体に溶脱が進んでいることが判る。溶脱による Ca/Si 比の分布は、溶脱面である端部に平行な分布を作らず、不均質な分布を形成する結果になった。

## 5. まとめ

骨材やひび割れを考慮したコンクリートについて LBM を用いて溶脱解析を実施した。結果を以下にまとめる。

- 1) 骨材やひび割れを考慮した溶脱解析が可能であること、これらの存在は溶脱の進行に影響を及ぼすことを示した。
- 2) ひび割れは、0.2mm 程度の幅では、30 年程度では若干の溶脱を促進する作用が見られるが、100 年といった程度では、ひび割れ無しの状態とあまり変わらない結果となった。
- 3) 骨材の導入は、遷移帯の幅を 0.2mm 程度とした場合に影響があることが示された。

今後の課題として以下のものが挙げられる。

- 1) モルタルの拡散係数の把握方法を確立。
- 2) 遷移帯形状の精密な把握とモデル化。
- 3) ひび割れ幅の溶脱解析に与える感度の検証。

本研究は、高輝度光科学研究センター

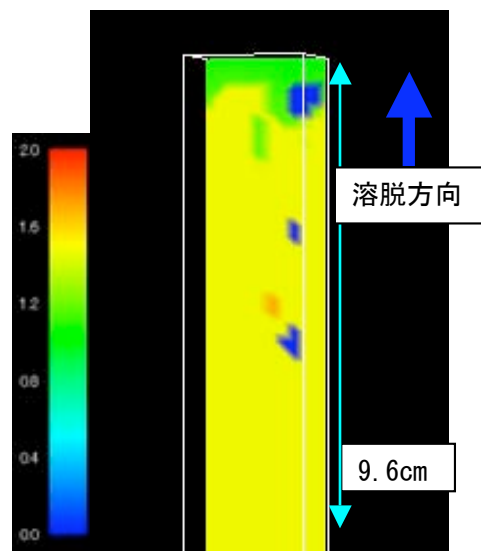


図-14 骨材導入時の Ca/Si 比(300 年)

SPring-8 のビームラインを用いた研究の成果です (課題番号 2005A0151-NIL2-np)。ここに銘記し、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 横関康祐, 渡邊賢三, 安田和弘, 坂田昇, 大即信明: 溶脱による劣化を対象とした地下構造物の 1,000 年耐久性設計, コンクリート技術シリーズ, Vol. 53, pp.199-206, 2003
- 2) 斉藤裕司, 辻幸和, 片岡浩人: セメント水和生成物の溶解に伴う変質予測のモデル化, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.1, pp.51-59, 2000.1
- 3) 人見尚, 竹田宣典, 入矢桂史郎: 格子ボルツマン法(LBM)を用いたコンクリートの溶脱解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.817-822, 2001
- 4) Berner, U.R.: Modelling Porewater Chemistry in Hydrated Portland Cement, Mat. Res. Soc. Symp. Proc, Vol.84, pp.319-330, 1987
- 5) Yoshino, M., Inamuro, T.: Lattice Boltzmann simulations for and heat/mass transfer problems in a three-dimensional porous structure, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol.43, pp.183-198, 2003