

コンクリートの中性化進行の可視化 —材料システムの耐久性の“見える化”の一環として—

福 島 敏 夫*

1. はじめに

コンクリートの中性化は、強アルカリ性に基づく内部鉄筋に対する防食機能の低下現象として、一般大気環境下での鉄筋コンクリート（RC）部材の耐久性に重要な影響を持ち、それに伴う内部鉄筋の腐食とともに、鉄筋コンクリート造建造物の物理的寿命の設定の基礎となっている^{1),2)}。それゆえ、中性化の進行の合理的予測・評価法は、古くて新しい研究テーマでもある。昨今、環境／景観と経済、安全性／長寿命性の鼎立を考えた持続可能な環境調和型・資源循環型社会の確立が叫ばれる中で、地球環境問題（温暖化、オゾン層破壊、野生生物の激減など）、資源・エネルギー問題、廃棄物問題（廃棄物は、固体のものばかりでなく、液体、気体のものもある）などの重要問題への対処方法のひとつとして、改めて、鉄筋コンクリート建造物の長寿命化の要請が高まっている。そのために、原点に戻って、コンクリートの中性化機構についての深い理解が必要であると考えられる。中性化進行予測に関する研究は、数多く実施されており、現在一般的に用いられている中性化進行予測手法として放物線則（ \sqrt{t} 則）が挙げられるが^{3),4)}、これに適合しない事例も報告されている。

他方、最近、諸分野で、材料の劣化がどのように起こるのか、目に“見える化”する動きが盛んになってきた（マテリアライフ学会、材料科学会等）。

人間には、視覚、聴覚、嗅覚、触覚、味覚の五感があるが、視覚が一番情報の授受能力が優れているために、分かりやすいという事情による。コンクリートの中性化は、表面仕上材の影響、内部鉄筋の腐食進行とも密接に関連するので、最終的には、材料システムの耐久性の“見える化”の方で考える必要があると考えられる。

今回は、諸々の視点から、コンクリートの中性化進行の可視化に焦点を絞って論じてみたい。

2. コンクリートの中性化進行の可視化の歴史的展開（プレ可視化の流れ）

中性化の可視化の先駆的表現（中性化深さおよび換算

二酸化炭素濃度等の経時変化のグラフ化）が、これまで、多くの研究者によってなされてきた。コンクリートの中性化進行は、従来、もっぱら、中性化深さの経過時間との関係を表現する放物線則（ \sqrt{t} 則）、修正放物線則、冪乗則（ t^n 則）などの数式的表現で論じられてきた。けれども、目に見えるような可視化の概念は少なかったように考えられる。その中でも、いくつかのグラフ表現の可視化の先駆的な研究例が見られる⁵⁾。また、新しい息吹で、ばらつきを考慮した精度良い形にしたグラフ化の例もある⁶⁾。

3. コンクリートの中性化進行の可視化に向けての新しい流れ（画像による可視化）

可視化は、画像による方法が優れていると考えられる。このため、これ以降、筆者が行った二酸化炭素の多方向拡散過程によるコンクリートの中性化進行の可視化の方法論と結果を概略したい（この内容は、出願中の特許等に含まれる⁷⁾⁻⁹⁾）。

3.1 擬1次炭酸化反応を伴う1次元一方向の二酸化炭素の拡散の非定常速度論解析と可視化

(1) 非定常速度論解析

可視化を行う前提となるのは、水酸化カルシウム（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）との擬1次炭酸化反応（ R_A ）を伴う二酸化炭素（ CO_2 ）のコンクリート表面から内層部への非定常拡散の偏微分方程式と炭酸化反応で生じる炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）の生成反応（ R_P ）の速度方程式である。

1) 炭酸化反応は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と CO_2 の2次反応になるが、コンクリートの炭酸化フロント近傍では CO_2 濃度に比して、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の濃度が圧倒的に大きく、事実上、 CO_2 濃度に関する擬1次反応と見なしてよいものとする。

$$R_A = -R_p = -k_2 C_A C_B = -k_2 C_A C_{B0} = -k_1' C_A \quad (1)$$

ここで、 C_A ：コンクリート中の CO_2 濃度、 C_B ：コンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度、 C_{B0} ：コンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の初濃度、 k_2 ：2次反応速度定数、 k_1' ：擬1次反応速度定数

2) 平均をとれば、拡散係数 $D_A(x, t)$ は、一定と見なし、有効拡散係数 D_A として設定できる。

したがって、擬1次炭酸化反応を伴う CO_2 の1次元

* ふくしま・としお／福島建築環境材料研究所2 主宰、元北九州市立大学 教授（正会員）

一方向拡散の場合の2階偏微分方程式と CaCO_3 の生成反応 R_p の速度方程式は、次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} C_A(x, t) = D_A \frac{\partial^2}{\partial x^2} C_A(x, t) - k_1' C_A(x, t) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} C_p(x, t) = k_1' C_A(x, t) \quad (3)$$

ただし、ここで、 x : コンクリートの表面からの距離、 t : 経過時間、 $C_A(x, t)$: コンクリート中の CO_2 の濃度関数、 $C_p(x, t)$: コンクリート中の CaCO_3 の濃度関数、 D_A : コンクリート中の CO_2 の有効拡散係数

式(2)の2階偏微分方程式は、半無限固体近似で、以下の初期条件と境界条件のもとで、ラプラス変換法を用いると、式(7)のような指数関数と余誤差関数による解析解が得られる。

【初期条件】

$$t \leq 0, 0 \leq x < \infty : C_A(x, t) = 0 \quad (4)$$

【境界条件】

$$\text{[I] } t > 0, x = 0 : C_A(x, t) = C_{A0} \quad (5)$$

$$\text{[II] } t > 0, x = +\infty : C_A = 0 \quad (6)$$

$$C_A(x, t) = C_{A0} \frac{1}{2} \left\{ \exp \left[-\sqrt{\frac{k_1'}{D_A}} x \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{D_A t}} - \sqrt{k_1' t} \right] + \exp \left[+\sqrt{\frac{k_1'}{D_A}} x \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{D_A t}} + \sqrt{k_1' t} \right] \right\} \quad (7)$$

この式で、コンクリート表面からの距離をパラメータとして、その時間変化を表したものと、浜田則との比較により、

$$C_A(x, t) = 0.1 C_{A0} \quad (8)$$

のときの x が中性化深さ X に対応することが、明らかとなった¹²⁾。

また、各種のコンクリートにおいて、 CO_2 の拡散係数は、水-セメントと指数関数の関係がある^{13), 14)}。

他方、式(3)からは、 CaCO_3 の濃度分布について、次の積分方程式の解析解が得られる。

$$C_p(x, t) = k_1' C_{A0} \int_0^t C_A(x, \tau) d\tau \quad (9)$$

(2) 可視化の結果

式(7)、(9)を使い、数学演算ソフト Mathematica¹⁵⁾ を利用して、 CO_2 および CaCO_3 の濃度がコンクリート内層部に拡がってゆく経時変化の状況をグラフ化した例が、図-1 および図-2 である(拡散係数 D_A は、普通ポルトランドセメントコンクリートの水セメント比60%に対応する数値として $3.1536 \text{ mm}^2/\text{year}$ を用い、疑1次反応速度定数 k_1' は、 0.01 year^{-1} を用いた)。図-1で、黒、紫、茶、緑、橙、青、マゼンダ、シアン、赤の各色で識別されている曲線群は、10年、20年、30年、40年、50年、60年、70年、80年、90年の経過時間に対応する CO_2 の換算濃度関数 ($C_A(x, t)/C_{A0}$) を表す(横軸は、コンクリート表面からの距離 (x (cm)))。また、図-2で

も同様で、黒、紫、茶、緑、橙、青、マゼンダ、シアン、赤の各色で識別されている曲線群は、10年、20年、30年、40年、50年、60年、70年、80年、90年の経過時間に対応する CaCO_3 の換算濃度関数 ($C_p(x, t)/C_{A0}$) を表す(横軸は、コンクリート表面からの距離 (x (cm)))。

3.2 擬1次炭酸化反応を伴う1次元二方向の二酸化炭素の拡散の非定常速度論解析と可視化

(1) 数学的解析

一辺2aの正四角形状無限柱のコンクリート構造物を考え、他の二端面が絶縁されて、相対する2つの面から、 CO_2 がコンクリート構造物の内部に拡散する二方向拡散によるコンクリートの中性化を解析する方法である。

この場合、基礎方程式と初期条件および境界条件は、次のようにまとめられる。

【基礎方程式】

$$\frac{\partial}{\partial t} C_A(x, t) = D_A \frac{\partial^2}{\partial x^2} C_A(x, t) - k_1' C_A(x, t) \quad (10)$$

【初期条件】

$$\text{[I] } t \leq 0, -a \leq x \leq a : C_A(x, t) = 0 \quad (11-a)$$

$$\text{[II] } t \leq 0, -\infty \leq x \leq -a, a \leq x \leq +\infty : C_A(x, t) = C_{A0} \quad (11-b)$$

【境界条件】

$$\text{[I] } t > 0, x = -a : C_A(x, t) = C_{A0} \quad (12-a)$$

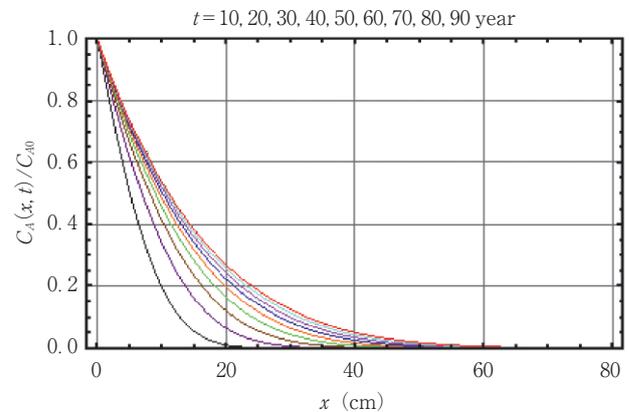


図-1 一方向拡散過程の二酸化炭素の濃度分布の経時変化の2次元表示

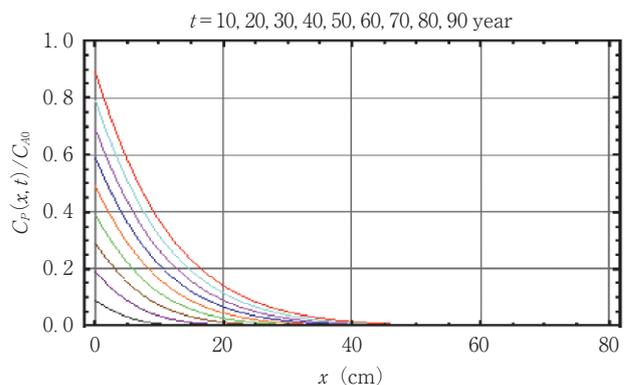


図-2 一方向拡散過程の炭酸カルシウムの濃度分布の経時変化の2次元表示

$$[II] \quad t > 0, \quad x = a : C_A(x, t) = C_{A0} \quad (12-b)$$

$$[III] \quad t > 0, \quad x = 0 : \frac{\partial}{\partial x} C_A(x, t) = 0 \quad (12-c)$$

ラプラス変換法により、次の数学的解析解が得られる。

$$C_A(x, t) = C_{A0} \left[\frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{k_1'}{D_A}} x\right)}{\cosh\left(\sqrt{\frac{k_1'}{D_A}} a\right)} + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \exp\left[-\left(\frac{D_A}{a^2} \left(\frac{(2n+1)\pi}{2}\right)^2 + k_1'\right)t\right] \frac{(2n+1)\pi D_A \cos\left(\frac{(2n+1)\pi x}{a}\right)}{\left(\frac{D_A}{a^2} \left(\frac{(2n+1)\pi}{2}\right)^2 + k_1'\right)a^2} \right] \quad (13)$$

(2) 可視化の手順と結果

可視化のために、数学的演算ソフトである Mathematica の数値解法である NDSolve を利用する。中性化の進行を、二次元および三次元で表示し、その状況を視覚で分かるようにするものである。そのとき、式 (10)~(12-c) を利用する。また次の式 (14), (15) が、NDSolve による数値解法の一例である。1次元一方向の場合と同様に、拡散係数 D_A は、普通ポルトランドセメントコンクリートの水セメント比 60% に対応する数値として $3.1536 \text{ mm}^2/\text{year}$ を用いた (ただし、可視化の便宜上拡散係数を 100 倍に設定した)。疑 1 次反応速度定数 k_1' は、 0.01 year^{-1} を用いた。式 (15) は、式 (12) に対応する NDSolve による 2 階偏微分方程式の表現である。式 (16) の 2 項が、二酸化炭素と接触する 2 端部での初期条件を与えている。また、3 つめの式が、境界条件の設定であり、その次が、関数 $u[t, x, y]$ の定義領域を定めている (ただし、 $(C_A(t, x, y)/C_{A0} \equiv u[t, x, y])$ 。

$$\begin{aligned} \text{eqn} &= D[u[t, x, y], x, x] \\ &= \frac{1}{3.1536} D[u[t, x, y], t] + \frac{0.01}{3.1536} u[t, x, y] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} &\text{NDSolve}[\{\text{eqn}, u = \text{Exp}[-100,000(x+40)(40-x)], \\ &u[t, -40, y] = u[t, 40, y] = 1, \\ &u[t, x, y], \{x, -40, 40\}, \{y, -40, 40\}, \{t, 0.0001, 1\}\} \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、次の 2 点がポイントとなる。

1) 初期条件は、数学定式化の場合の (11-a), (11-b) の不連続な井戸型関数ではなくて、滑らかだが急激な減衰をする指数関数を設定する。

2) 可視化の便宜上、 x 軸だけでなく、 y 軸も加え、二次元関数 $(C_A(x, y, t))$ の形に修正する。

式 (14), (15) を解くと、関数 $u[t, x, y]$ は、具体的な数式では、明示されないが、その特性の詳細は、コン

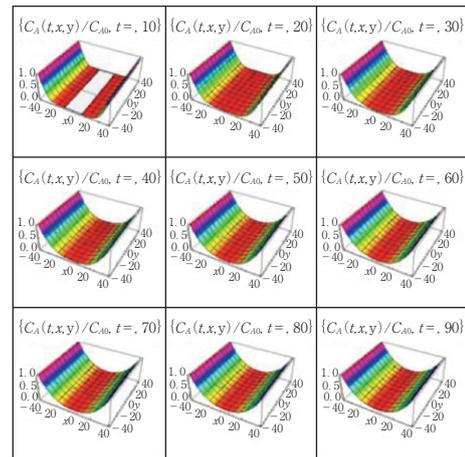


図-3 3D Plot による二方向拡散過程の濃度の経時変化の 3 次元表示

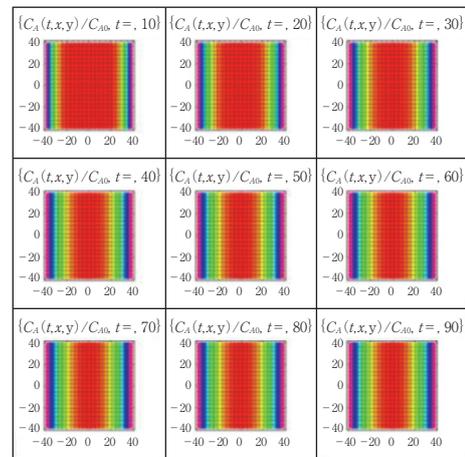


図-4 Density Plot による二方向拡散過程の濃度分布の経時変化

ピュータに内蔵された形になる。

$$\begin{aligned} &u[t, x, y] \rightarrow \\ &\text{InterpolatingFunction}[\{\{0,100\},\{-40,40\}, \\ &\{-40,40\}, "<>"\}[t,x,y]] \end{aligned} \quad (16)$$

3D Plot, Density Plot, Contour Plot, Show などに基づいて、中性化進行過程の三次元グラフィック表示および上から眺めた濃度分布表示および等高線表示による可視化を行う。図-3, 図-4 が可視化の例である。図-3 は、3D Plot による二方向拡散過程の濃度の経時変化の 3 次元表示を示すものである。紫、青、薄青、緑、黄色、橙、赤等による虹状の色分けは、それぞれ、換算濃度関数が、 $1.0 \sim 0.9$, $0.9 \sim 0.8$, $0.8 \sim 0.7$, $0.7 \sim 0.6$ などの濃度領域の識別である。また、右上~右左, 中央左~中央右, 左下~右下に示される 9 つの図は、それぞれ、10 年, 20 年, 30 年, 40 年, 50 年, 60 年, 70 年, 80 年, 90 年の経過時間に対応する CO_2 の換算濃度関数 $C_A(t, x, y)/C_{A0}$ を示すものである (真ん中の赤の領域が、濃度ゼロに対応する: ただし初期では、近似がうまくいかないせいか、白の領域も現れる)。二酸化炭素の換算濃度関数は、時間の経過とともに、 x 軸の両側から内層部に拡がってゆく状況が、反映されている。図-4 は、Density Plot による

二方向拡散過程の濃度分布の経時変化の2次元表示である。色分けは、図-3の場合と同じである。上から眺めた2次元濃度表示にしてみると、両側から中性化が徐々に進行する状況が視覚的によく分かる。

3.3 擬1次炭酸化反応を伴う2次元三方向および四方向の二酸化炭素の拡散の非定常速度論解析と可視化

屋外の打放しのRCの部位の状況に対応して、やはり一辺2aの正四角形状無限柱のコンクリート構造物を考え、水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)との擬1次炭酸化反応を伴う二酸化炭素(CO₂)の三方向および四方向の多方向非定常拡散過程の数学的定式化を行う(三方向拡散は、1端面がシールされ、3方向がCO₂と接する場合である。四方向拡散は、全ての4つの面からCO₂がコンクリート構造物の内部に拡散する場合である)。

(1) 数学的モデル化

①三方向拡散の場合

【基礎方程式】

$$\frac{\partial}{\partial t} C_A(x, y, t) = D_A \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} C_A(x, y, t) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} C_A(x, y, t) \right] - k_1' C_A(x, y, t) \quad (17)$$

【初期条件】

$$[I] \quad t \leq 0, \quad -a \leq x \leq a, \quad -a \leq y \leq a : C_A(x, y, t) = 0 \quad (18-a)$$

$$[II] \quad t \leq 0, \quad -\infty \leq x \leq -a, \quad a \leq x \leq +\infty, \\ a \leq y \leq +\infty : C_A(x, y, t) = C_{A0} \quad (18-b)$$

【境界条件】

$$[I] \quad t > 0, \quad x = -a : C_A(x, y, t) = C_{A0} \quad (19)$$

$$[II] \quad t > 0, \quad x = a : C_A(x, y, t) = C_{A0} \quad (20)$$

$$[III] \quad t > 0, \quad y = a : C_A(x, y, t) = C_{A0} \quad (21)$$

$$[IV] \quad t > 0, \quad x = 0 : \frac{\partial}{\partial x} C_A(x, y, t) = 0 \quad (22)$$

$$[V] \quad t > 0, \quad y = 0 : \frac{\partial}{\partial x} C_A(x, y, t) = 0 \quad (23)$$

②四方向拡散の場合

【基礎方程式】

$$\frac{\partial}{\partial t} C_A(x, y, t) = D_A \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} C_A(x, y, t) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} C_A(x, y, t) \right] - k_1' C_A(x, y, t) \quad (24)$$

【初期条件】

$$[I] \quad t \leq 0, \quad -a \leq x \leq a, \quad -a \leq y \leq a : C_A(x, y, t) = 0 \quad (25-a)$$

$$[II] \quad t \leq 0, \quad -\infty \leq x \leq -a, \quad a \leq x \leq +\infty, \\ -\infty \leq y \leq -a, \quad a \leq y \leq +\infty : C_A(x, y, t) = C_{A0} \quad (25-b)$$

【境界条件】

$$[I] \quad t > 0, \quad x = -a : C_A(x, y, t) = C_{A0} \quad (26)$$

$$[II] \quad t > 0, \quad x = a : C_A(x, y, t) = C_{A0} \quad (27)$$

$$[III] \quad t > 0, \quad y = a : C_A(x, y, t) = C_{A0} \quad (28)$$

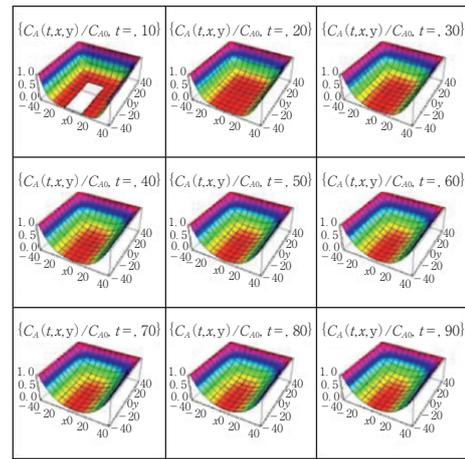


図-5 3D Plotによる三方向拡散の経時変化の3次元表示

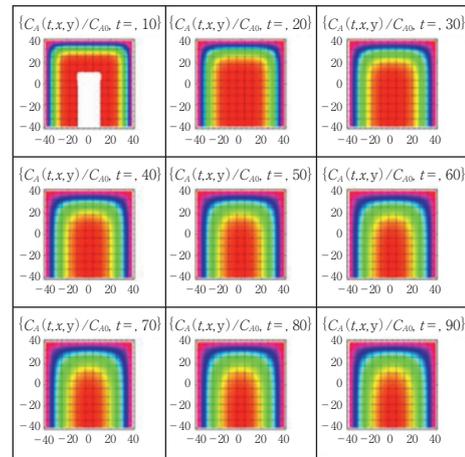


図-6 Density Plotによる三方向拡散過程の濃度分布の経時変化の2次元表示

$$[IV] \quad t > 0, \quad x = 0 : \frac{\partial}{\partial x} C_A(x, y, t) = 0 \quad (29)$$

$$[V] \quad t > 0, \quad y = 0 : \frac{\partial}{\partial x} C_A(x, y, t) = 0 \quad (30)$$

(2) 可視化

同様に、ND Solveで数値解を求め、3D Plot, Density Plot, Contour Plot, Showなどに基づいて、中性化進行過程の三次元グラフィック表示および上から眺めた濃度分布表示および高線表示による可視化を行う。図-5, 図-6が、三方向拡散の場合、図-7, 図-8が、四方向拡散の場合の可視化の例である。図-5は、3D Plotによる三方向拡散過程の濃度分布の経時変化の3次元表示である。図-6は、Density Plotによる三方向拡散過程の濃度分布の経時変化の2次元表示である。二酸化炭素の換算濃度関数が、経過年数とともに、x軸方向の両側およびy軸方向の片側から内層部に拡がってゆく状況が、反映されている。隅角部に、特徴的な濃度分布が反映されることが分かる。図-7は、3D Plotによる四方向拡散過程の濃度分布の経時変化の3次元表示である。隅角部に、特徴的な濃度分布が反映されることが、視覚的によく分かる。図-8は、四方向拡散をContour Plotのプログラ

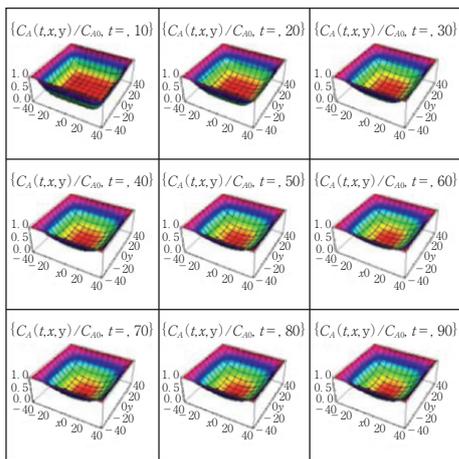


図-7 3D Plotによる四方向拡散過程の濃度分布の経時変化の3次元表示

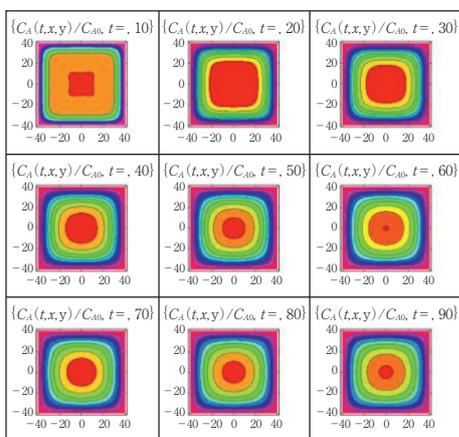


図-8 四方向拡散をContour Plotのプログラムを用いて経時変化を表示した2次元グラフ

ムを用いて経時変化を表示した2次元グラフ表示である。上から眺めた2次元密度表示にしてみると、四方向から中性化が徐々に進行する状況が視覚的によく分かる。また、隅角部に、特徴的な曲線的な濃度分布が反映されることが、視覚的によく分かる。

4. おわりに

コンクリートの中性化の進行について、過去の歴史的過程を踏襲しながら、その可視化の手順と結果について、分かりやすく説明した。二酸化炭素の多方向拡散過程によるコンクリートの中性化進行過程の可視化の一環として、擬1次炭酸化反応を伴う二酸化炭素の二、三、四方向拡散過程について、数学的モデル化と偏微分方程式の数値解を求めた。中性化進行状況を、経時変化の3次元グラフと、上から眺めたその濃度分布および等高線分布の経時変化の2次元グラフとして示した。三方向および四方向拡散では、隅角部に、特徴的な曲線的分布が表れ、多方向拡散による新しい状況を良く理解することができる。他方、未完成であるため、ここでは省いたが、無限円柱での円筒座標による擬1次炭酸化反応を伴う円周部

から中心部に向かう二酸化炭素の円筒型拡散についても、可視化を行っている。この可視化の方法は、経過時間に関する放物線則による検討とともに、中性化進行状況の理解の一助になると考えられる。

今後、次のような取組みが必要かと考えられる。

- 1) コンクリートの中性化に関しては、内部鉄筋の腐食進行、劣化も含めた仕上材の抑制効果、外断熱構法などにも関連する。そのため、材料システムの耐久性の“見える化”として、まとめられるべきかもしれないと考えられる。
- 2) 人間の五感には、視覚の情報授受が一般的に優れているとされる。このために、視覚化が一つの大きな流れとなっている。ただ、触覚や聴覚など他の感覚が優れた人々もいるかもしれない。その人々が、現象がわかるようにするためには、高機能センサーや立体化画像・機能性音声発信技術やソフトウェアの開発も、将来的には必要かもしれないと思われる。

難しいテーマでしたが、皆様の研究等に役立てれば幸いです。この執筆を引き受けさせていただきました。新しい研究の流れとして、将来役立つこと期待して、本稿を終えたいと思います。

参考文献

- 1) 岸谷幸一：鉄筋コンクリートの耐久性, p.165, 鹿島建設技術研究所出版部, 1963
- 2) 福島敏夫：鉄筋コンクリート造建築物の寿命—中性化と鉄筋腐食進行を基礎として—, 142p. 技報堂出版, 1990
- 3) 福島敏夫：環境調和型材料設計・生涯設計法—持続的發展可能な環境調和型建築・都市の構築の基礎として—, 日本建築学会総合論文誌第1号(地球環境建築のフロンティア), pp.74~80, 2003. 2
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5, 鉄筋コンクリート工事, 2009年改訂版
- 5) 日本建築学会：コンクリートの調査設計・調査管理・品質検査指針案・同解説, 1976
- 6) 和泉意登志・嵩 英雄・押田文夫・西原邦明：コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類, 調合, 養生条件の影響について, 第7回コンクリート工学年次講演論文集, pp.117~120, 1985
- 7) 榊田佳寛・棚野博之：コンクリートの中性化進行予測モデル, コンクリート工学論文集, 第2巻第1号, pp.125~134, 1991
- 8) 石田崇人・田坂誠一：フライアッシュコンクリートの中性化深さのバイズ推定—促進試験データを用いた高精度予測—日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 材料・施工, pp.425~426, 2014
- 9) 福島敏夫：二酸化炭素の多方向拡散過程によるコンクリートの中性化進行過程の可視化(その1)—二および三方向拡散—日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 材料・施工, pp.389~390, 2013
- 10) 福島敏夫：二酸化炭素の多方向拡散過程によるコンクリートの中性化進行過程の可視化(その2)—四方向拡散—日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 材料・施工, pp.409~410, 2014
- 11) 特許出願：二酸化炭素の多方向拡散過程によるコンクリートの中性化進行の数学的定式化と可視化(整理番号 FKS-001, 受付番号 51400220516, 出願通知番号 2014-17878)
- 12) Hamada, M.: Neutralization (Carbonation) of Concrete and Corrosion of Reinforcing Steel Proc. 5th Internatl. Sym. Chem. Cement, Tokyo, Japan, Vol.3, pp.349-369, 1968
- 13) 木許真悟・吉崎芳郎・長谷川拓也・福島敏夫：15年間屋外暴露されていた打放し鉄筋コンクリート外壁モデル化試験体の耐久性調査, コンクリート工学年次論文集, 第25巻, No.1, pp.755~760, 2003
- 14) 福島敏夫・吉崎芳郎・高橋幸一：ステップ応答による促進中性化試験の諸条件の考察, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.962~966, 1998
- 15) 数学演算ソフト Mathematica Ver.8 ウルフラム・リサーチ, 2010