

平成 21 年 5 月 31 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19700216

研究課題名 (和文) 全ての物理現象のシミュレーションを目指した挑戦的研究

研究課題名 (英文) Challenging Research for the Simulation of all Physics Phenomenon

研究代表者

山下 和也 (YAMASHITA KAZUYA)

富山大学・大学院理工学研究部 (工学)・助手

研究者番号：30436802

研究成果の概要：雪の結晶はどれをとっても美しい形をしているが、その形は千差万別で、全く同じ形のもの存在しないといわれている。Packard が定義した六角格子上の 2 次元セルオートマトンを拡張し、六方晶上の 3 次元セルオートマトンを新たに定義した。このモデルを用いて、従来のモデルでは生成できなかった角柱、針といった立体的な構造を持つ雪の結晶の類似パターンの生成を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	0	2,600,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	210,000	3,510,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：複雑系、セルオートマトン

1. 研究開始当初の背景

2002 年 5 月、天才科学者 S. Wolfram は著書「A New Kind of Science」(約 1200 頁、厚さ 6cm) を出版し、世界の注目を集めた。この著書で述べられている Wolfram の理論は、「自然界で複雑と見える現象はすべて、単純な法則に基づく計算の繰り返しによって成り立っている。」というものであり、物理学や生物学、工学から経済学に至るまで、あらゆる分野でその基本原理の再検討をせまるものである。

Wolfram の理論の基礎をなすものがセルオートマトンであり、言い換えれば、「自然

界で複雑と見える現象はすべて、セルオートマトンでシミュレーション可能である。」ということになる。

Wolfram の理論が正しいかどうかの評価はこれからの研究を待たなければならない。しかし、これまでセルオートマトンを用いて雪の結晶成長のシミュレーションを行ってきた経験から、Wolfram の理論がある意味で正しいと考えている。確かに、セルオートマトンを用いて複雑に見える物理現象でもシミュレートできるが、ここで重要になるのは、セルオートマトンの遷移関数と物理法則との関連である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、雪の結晶成長シミュレーションにおけるセルオートマトンの遷移関数の物理的な意味を解明することにある。さらに、セルオートマトンを用いてあらゆる物理現象のシミュレーションが可能かどうかを検討する。もし、雪の結晶成長シミュレーションにおける遷移関数の物理的な意味を解明することができれば、Wolfram の理論の正しさを証明する1つの突破口となりうると考えられる。また、他のシミュレーションにおいても有用であり、様々な分野の一見複雑に見える現象のメカニズムの解明に繋がる。

3. 研究の方法

(1) 雪の結晶

雪の結晶の形は千差万別であるが、一定の環境で成長する結晶の形は図のように大きく6種類に分類されている。上段左から、角板、角柱、針、下段左から、樹枝状六花、広幅六花、扇状六花と呼ばれている。角板、樹枝状六花、広幅六花、扇状六花の4種類は平面的な結晶であるのに対し、角柱、針の2種類は立体的な結晶である。



図 1. 雪の結晶の例 (上段左から順に、角板、角柱、針、下段左から順に、樹枝状六花、広幅六花、扇状六花)

(2) セルオートマトン

セルオートマトンは、規則的な格子上にセルと呼ばれる同一の有限オートマトンを配置したものである。各セルは近傍と呼ばれる複数のセルの状態を入力とし、その入力から遷移関数によって決まる次の状態へと遷移する。この状態遷移は全セルが同期して並列に行なわれる。

(3) Packard のモデル

通常、2次元セルオートマトンといえば正方格子上的セルオートマトンが一般的であるが、Packard は、水の結晶(氷)が六方晶系に属すること、及び表面張力の異方性が六方対称性を持つことから、雪の結晶が六方対称性を持つようになることが知られていることを考慮して、六角格子上的2次元セルオートマトンを新しく定義した。

六角格子上的2次元セルオートマトンにおけ

るセルの近傍は7近傍である。例えば図2に示したセル C_{i_0} の近傍は、自分自身 C_{i_0} と自分の周りの6つのセル $C_{i_1}, C_{i_2}, \dots, C_{i_6}$ を含めた7つである。したがって、セル C_{i_0} の時刻 $t+1$ での状態 $s_{i_0}^{t+1}$ は、セル C_{i_0} の近傍の各セル $C_{i_0}, C_{i_1}, \dots, C_{i_6}$ の時刻 t での状態 $s_{i_0}^t, s_{i_1}^t, \dots, s_{i_6}^t$ から遷移関数 δ によって(1)式のように決められる。

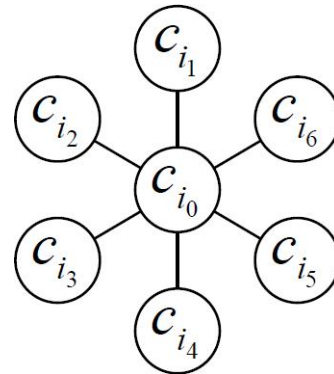


図 2. 六角格子上的2次元セルオートマトンにおけるセル C_{i_0} の近傍

$$s_{i_0}^{t+1} = \delta(s_{i_0}^t, s_{i_1}^t, \Lambda, s_{i_6}^t) \quad (1)$$

Packard は、2状態の外総和型のセルオートマトンを用いて、角板と呼ばれる雪の結晶の類似パターンの生成に成功した。しかし、Packard のモデルでは32通りの遷移関数が考えられるが、角板以外の結晶の類似パターンは生成できなかった。

(4) 轡田のモデル

轡田等は、Packard のモデルを拡張し、Packard のモデルではできなかった樹枝状六花、広幅六花、扇状六花等の類似パターンを生成した。

轡田のモデルで拡張した点は次の2点である。1つは、各セルの状態を、水蒸気に対応する状態‘0’、水蒸気と氷の中間に対応する状態‘1’、氷に対応する状態‘2’の3状態に拡張した点である。もう1つは、外総和性を放棄した点である。すなわち、轡田のモデルでは、セル C_{i_0} の次の時刻での状態が、周囲のセルの位置も考慮して決定される。

ただし、セル C_{i_0} の状態が‘2’のときは、次の時刻での状態も‘2’である。すなわち、一旦氷になったセルは氷であり続ける。

轡田のモデルでシミュレーションを行った結果を図3に示す。上段は実際の雪の結晶であり、左から、樹枝状六花、広幅六花、扇状六花に分類される結晶である。下段はシミュレーション結果でそれぞれの結晶に対応する類似パターンである。

セルオートマトンの遷移関数と物理法則

の関係を考えるとき、より自然界に近いモデルの構築が必要であると考えられる。しかし、響田のモデルでは角柱、針といった立体的な構造を持つ結晶の類似パターンは生成することができない。

そこで、響田のモデルを3次元セルオートマトンに拡張し、より実際の雪の結晶の構造に近いモデルの構築を行う。そして、響田のモデルでは生成できなかった角柱、針に分類される立体的な構造を持つ結晶の類似パターンの生成を試みる。

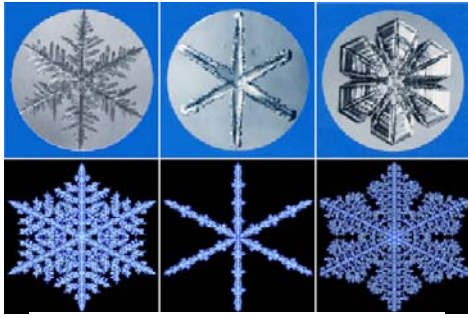


図 3. 雪の結晶とシミュレーション結果

4. 研究成果

(1) 六方晶格子上的3次元セルオートマトン
水の結晶(氷)の結晶格子が図4に示すような六方晶系に属することを考慮して六方晶格子上的3次元セルオートマトンを新たに定義する。

六方晶格子上的3次元セルオートマトンは六方晶格子の格子点上にセルを配置する。つまり、図4の黒丸で示してある点がセルであり、 xy 平面上に六角格子を構成し、この六角格子が z 軸方向に重なることによって六方晶格子を構成する。

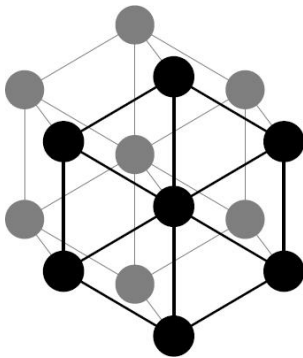


図 4. 六方晶の結晶構造

このとき、セルの近傍は9近傍である。例えば図5に示したセル C_{i_0} の近傍は、自分自身 C_{i_0} と xy 平面上の回りの6つのセル $C_{i_1}, C_{i_2}, \dots, C_{i_6}$ と z 軸方向にずれた2つのセル C_{i_7}, C_{i_8} を含めた9つである。

したがって、セル C_{i_0} の時刻 $t+1$ での状態 $s_{i_0}^{t+1}$ は、セル C_{i_0} の近傍の各セル $C_{i_0}, C_{i_1}, \dots,$

C_{i_8} の時刻 t での状態 $s_{i_0}^t, s_{i_1}^t, \dots, s_{i_8}^t$ から遷移関数 δ' によって(2)式のように決められる。

また、状態数は響田のモデルと同様に3状態をもつ。

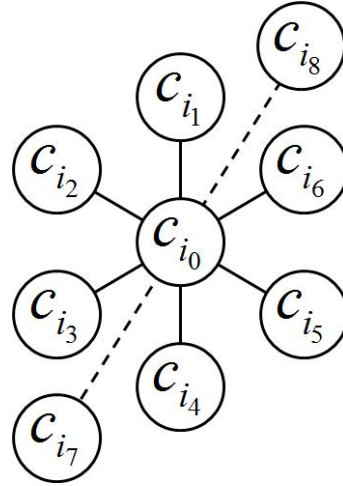


図 5. 六方晶格子上の3次元セルオートマトンにおけるセル C_{i_0} の近傍

$$s_{i_0}^{t+1} = \delta'(s_{i_0}^t, s_{i_1}^t, \Lambda, s_{i_8}^t) \quad (2)$$

(2) 類似パターン生成

図6、図7に提案モデルによって生成された類似パターンの例を示す。それぞれ、左に示したのは実際の雪の結晶であり、右に示したのは生成された類似パターンである。いずれも、最初特定の1つのセルだけが状態‘2’で、残りすべてのセルが状態‘0’である初期様相(水蒸気の中に氷の粒が1つだけ存在する様相)からスタートしている。

また下に示したのは、遷移関数のうち、状態‘0’が状態‘1’または状態‘2’に、状態‘1’が状態‘2’に成長するルールである。明記されていない残りのルールは、全て状態が変化しないルールである。ここでは簡単のため $\delta(s_{i_0}^t, s_{i_1}^t, \dots, s_{i_8}^t) = s_{i_0}^{t+1}$ であることを、単に $s_{i_0}^t, s_{i_1}^t, \dots, s_{i_8}^t, s_{i_0}^{t+1}$ と記述している。

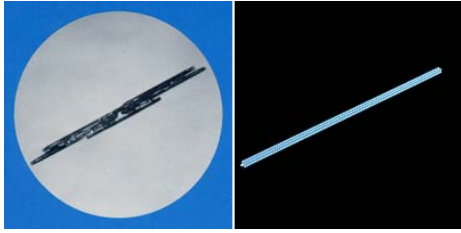
図6は針、図7は角柱に分類される雪の結晶の例である。それぞれ、よく似たパターンが得られた。

響田のモデルではシミュレートできなかった角板、針といった立体的な構造を持つ結晶の類似パターンを生成することができた。今後、他のモデルの遷移規則と比較することで遷移関数の物理的な意味を解明することができると考えられる。

雪の結晶成長といった一見複雑に見える物理現象も、セルオートマトンを用いれば簡単なルールの繰り返しによってシミュレートできることがわかる。

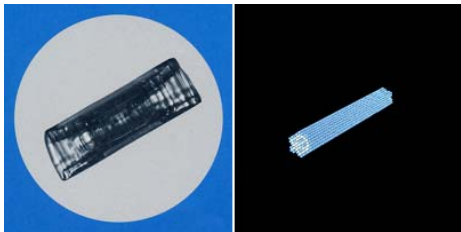
現在、立体的な構造をもつ結晶の類似パタ

ーン生成に留まっているが、今後、雪の結晶成長シミュレーションにおける3次元セルオートマトンの遷移関数の物理的な意味を解明することで、Wolframの理論の正しさを証明する1つの突破口となりうると考えられる。



000000002,1	000000210,1
000000020,1	100000002,2
000000200,1	100000020,2
000000201,1	

図 6. 提案モデルによる類似パターンの例 1



000000002,1	001102100,1
000000102,1	100000201,2
000000200,1	100000202,2
000000201,1	100000211,2
000000202,1	100011102,2
000000211,1	100012100,2
000002200,1	100012102,2
000011200,1	100112102,2
000012200,1	100121102,2
000012201,1	101122102,2
000012202,1	101122111,2
000021100,1	101221102,2
000022100,1	101221111,2
000022101,1	101222102,2
000022102,1	101222111,2
000122100,1	101222112,2
000122101,1	101222122,2
000222200,1	111111102,2
000222201,1	111222202,2
000222202,1	111222211,2
001101200,1	111222222,2

図 7. 提案モデルによる類似パターンの例 2

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

- ① Li Fang-jia, Gao Shang-ce, Tang Zheng, Ishii Masahiro, Yamashita Kazuya, "3D similar pattern generation of snow crystals with cellular automata," Journal of Shandong University, 2009/2/16, Shandong China.

6. 研究組織

(1)研究代表者

山下 和也 (YAMASHITA KAZUYA)
富山大学・理工学研究部 (工学)・助手
研究者番号 : 30436802