

数独の3次元空間への拡張

静岡理科大学情報学部 足立智子

Tomoko Adachi

Shizuoka Inst. of Sci. and Tech.

概要 数独は、平面上の大きさ 9×9 の方陣に, $1, 2, \dots, 9$ の数字を決められたルールにしたがって配置していく論理パズルである. 本稿では, 数独を, 立方体の側面に貼り付ける形式で, 3次元空間に拡張する方法を述べる.

1. はじめに

n を正の整数とする. 位数 n のラテン方陣 (Latin square) とは, 大きさ $n \times n$ の正方格子 (方陣) に n 種類の文字 (シンボル) を入れ, どの縦の列, 横の行にもすべてのシンボルがちょうど1個ずつ出現するように配置したものである. ラテン方陣については様々な研究がなされており, 文献 [5, 6] に詳しい.

位数 n^2 の数独解 (Sudoku solution) とは, 大きさ $n^2 \times n^2$ の方陣に $1, 2, \dots, n^2$ の数字 (シンボル) を入れ, どの縦の列, 横の行にもすべてのシンボルがちょうど1回ずつ出現し (すなわち, 位数 n^2 のラテン方陣であり), 大きさ $n \times n$ の n^2 個の小方陣 (ブロック) に全てのシンボルがちょうど1回ずつ出現するように配置したものである. $n = 3$ の場合は, 通常の数独パズルの解 (完成形) である. 位数 n^2 の数独解において, 同じ行にある n 個のブロックの集合を band と呼び, 同じ列にある n 個のブロックの集合を stack と呼ぶ. 数独解についても多くの研究がなされており, 文献 [4, 8, 9] 等がある.

数独解は次の特徴を持つ. 数独解の数字 (シンボル) を置換した方陣もまた数独解となる. このとき, この2つの数独解は本質的に同じであり, 「同値である」という. band (または stack) を入れ替えた方陣もまた数独解となり, もとの数独解と同値であるといえる. 同じ band にある2つの行 (または同じ stack にある2つの列) を入れ替えた方陣もまた数独解と

なり, もとの数独解と同値であるといえる. 数独解を同値な数独解に移すような数字 (シンボル) の置換や band (または stack) の置換を, 数独解の集合 X 上の作用素という.

数独解から, 配置された一部の数字 (シンボル) が見えないように消し, 空白のセルを配置したものが, 数独パズルの問題に当たる方陣である. この空白セルを持つ数独を, 数独パズルと呼ぶ. 本稿では, 数独パズルと数独解を区別する必要がある場合には, 数独と呼ぶことにする. 区別する必要がある際には, 数独パズル, 数独解と明記する.

数独パズルは, 2次元平面上で考えられてきた. 数独パズルを3次元空間に拡張したものとして, [3] の Dion Church パズルがある. Church(2005) [3] や Lambert and Whitlock (2010) [7] は, 大きさ $9 \times 9 \times 9$ の立方体の側面に数独の数字を配置している. これらに対し, [1] では立方体の内部の小立方体に数字を配置している.

本稿では, 立方体の大きさが $n^2 \times n^2 \times n^2$ の場合に, Dion Church パズルや Lambert and Whitlock の手法のように立方体の側面に数独を貼り付ける形式で, 数独を3次元空間に拡張する方法を述べる.

2. 3面モデルの3次元数独

n を2以上の整数とする. 3面モデルの3次元数独は, 大きさ $n^2 \times n^2 \times n^2$ の立方体の隣接する3面に, -この3つの面は展開図のL字型に配置されるように選んで-, 位数 n^2 の数独を貼り付ける形式で, 数独の3次元空間への拡張を実現する.

3面モデルの3次元数独パズルは, 2005年に Church [3] によって提案され, Dion Church パズルとして知られている. オリジナルの Dion Church パズルの展開図は, 図 2.1 になる. Dion Church パズルは, 大きさ $9 \times 9 \times 9$ の立方体の隣接する3面に, 2次元平面の数独パズルを3つ配置し, なおかつ, 隣接する3辺には同じ数字を配置したものである.

展開図を組み立てた立方体を, 記載された数字が読み取れるように2次元平面に図示すると, 展開図 2.1 のようにL字型に配置した隣接する3面の数字を表示することができる. 展開図 2.1 において背景色がついた6つの行または列は, 組み立てた立方体における3本の辺に隣接するセルが並ぶ行または列である.

「隣接する3辺には同じ数字を配置する」という条件を, Lambert and Whitlock [7] は「辺のセルが合う (the edge cells match)」と表現してい

れる。存在した場合の同値な条件やその作用素についての結果は, [2] がある。

Dion Church パズルのように辺のセルが合う場合の3面モデルの3次元数独パズルを解く時間については, 大きさ $9 \times 9 \times 9$ の場合および大きさ $16 \times 16 \times 16$ の場合についてシミュレーションした結果が [7] にある。

3. 6面モデルの3次元数独

次に, 6面モデルとして, 大きさ $n^2 \times n^2 \times n^2$ の立方体の全ての面である6面に, 位数 n^2 の数独を貼り付ける形式で, 数独の3次元空間への拡張を実現する。

6面モデルにおいても, 3面モデルと同様に, 「辺のセルが合う場合」と「辺のセルが合わない場合」が考えられる。

				4 1 3 2					4 1 2 3				
				3 2 1 4					3 2 1 4				
				2 3 4 1					1 4 3 2				
				1 4 2 3					2 3 4 1				
1 2 3 4	2 3 4 1	4 2 1 3	4 1 2 3	4 1 4 2	1 3 4 2	3 2 4 1	4 1 3 2	4 1 3 2	4 1 3 2	4 1 3 2	4 1 3 2	4 1 3 2	4 1 3 2
3 4 1 2	4 1 2 3	1 3 4 2	1 2 3 4	2 1 3 4	2 3 1 4	2 3 1 4	2 3 1 4	2 3 1 4	2 3 1 4	2 3 1 4	2 3 1 4	2 3 1 4	2 3 1 4
4 1 2 3	1 2 3 4	2 1 3 4	2 1 3 4	2 1 3 4	2 1 3 4	2 1 3 4	2 1 3 4	2 1 3 4	2 1 3 4	2 1 3 4	2 1 3 4	2 1 3 4	2 1 3 4
2 3 4 1	3 4 1 2	3 4 1 2	3 4 1 2	3 4 1 2	3 4 1 2	3 4 1 2	3 4 1 2	3 4 1 2	3 4 1 2	3 4 1 2	3 4 1 2	3 4 1 2	3 4 1 2
				2 1 3 4					3 4 1 2				
				3 4 1 2					2 1 4 3				
				4 3 2 1					4 3 2 1				
				1 2 4 3					4 3 2 1				
				4 3 1 2					1 2 3 4				
				1 2 4 3					1 2 3 4				
				2 1 3 4					1 2 3 4				
				3 4 2 1					3 4 1 2				
				3 4 2 1					2 3 4 1				
				4 1 2 3					4 1 2 3				

図 3.1: $n^2 = 4$ の6面モデルの3次元数独解の展開図で辺のセルが合わない場合 (左図, [7], p.254), 辺のセルが合う場合 (右図, [7], p.255)

図 3.1 の左図と右図は, それぞれ, Lambert and Whitlock [7] が提示した大きさ $4 \times 4 \times 4$ の立方体での 6 面モデルの 3 次元数独解の「辺のセルが合わない場合」と「辺のセルが合う場合」である.

立方体には合計 12 本の辺があるが, この 12 本すべての辺に隣接するセルに配置される数字が同じになるように数独解を考えるのは煩雑である. そこで, Lambert and Whitlock [7] は, 6 面モデルの「辺のセルが合う場合」を, 3.1 右図のように, 縦長十字型展開図において平行な 8 つの行に当たる 4 本の辺のセルが合う場合と限定して, 調べている. それであっても, Lambert and Whitlock のシミュレーション手法では, 大きさ $9 \times 9 \times 9$ の 6 面モデルの 3 次元数独パズルが解けるかどうかまでは判定できたが, 6 面モデルの 3 次元数独パズルを解くには時間がかかり過ぎると記載されている ([7]).

参考文献

- [1] 足立智子 (2021); 高次元の数独解の構成, 日本応用数理学会 2021 年度年会講演予稿集, pp. 318–319.
- [2] 足立智子 (2022); 3 次元数独解の同値な条件と作用素, 日本応用数理学会 2022 年度年会講演予稿集, 印刷中.
- [3] D. Church (2005); 3D Sudoku, *The Daily Telegraph* (May 2005).
- [4] D. Keedwell (2010); Constructions of complete sets of orthogonal diagonal Sudoku squares, *Australasian Journal of Combinatorics*, Vol. 47, pp. 227–238.
- [5] D. Keedwell and J. Dénes (2015); *Latin Squares and their applications*, (second edition), North-Holland publications.
- [6] C. F. Laywine and G. L. Mullen (1998); *Discrete Mathematics Using Latin Squares*, John Wiley & Sons, INC.
- [7] T. A. Lambert and P. A. Whitlock (2010); Generalizing Sudoku to three dimensions, *Monte Carlo Methods Appl.*, Vol. 16, pp. 251–263.

- [8] J. Lorch (2009); Mutually orthogonal families of linear sudoku solutions, *Journal of the Australian Mathematical Society*, Vol. 87, pp. 409–420.
- [9] J. Lorch (2010); Orthogonal combings of linear sudoku solutions, *Australasian Journal of Combinatorics*, Vol. 47, pp. 247–264.