

球の充填問題について

京都大学数理解析研究所／一松 信

1. 球の充填問題とは、 n 次元空間中に同じ大きさの超球をできるだけ密に詰込む方法や、その個数を求める問題である。これは未解決の難問である。

$n=1, 2$ のときは自明だが、 $n=3$ は 300年前にNewtonとGregory とが大論争した「13球の問題」である。これはその 200年後にようやく解決された。 $n \geq 4$ の場合で解決されているのは僅かに $n=8$ (E8格子) と 24 (Leech格子) だけである。

私がこれに興味を持ったのは、正則格子による多重積分のためだったが、最近固有ベクトルの反復計算での初期ベクトルに利用できないかと考えている。但しこれは単なる幾何の問題でなく、整数論・二次形式・テータ関数・符号理論など、数学の諸分野と深く関連し、個々の次元数 n による個性が強い。一般論だけでは済まない点が興味を引くのだが、逆に実用上不便な点でもある。

2. 本来の充填問題は、空間の広い領域に同じ大きさの超球をできるだけ多く詰込む問題である。その双対として被覆問題もある。しかしここでは接触数 (contact number; kissing number) 問題に限定する。

それは一球の周りに接しうる同じ大きさの超球の最大個数を求める問題である。

24次元までで現在わかっている最大個数は、順次下の通りである。この内下線は真の最大と証明されたもの、* は格子状でない並べ方によるものである。

2 6 12 24 40⁽³⁾ 72 126 240 306* 500⁽¹⁰⁾ 582 840* 1130* 1582 2564⁽¹⁵⁾
4320 5346 7398 10668 17400⁽²⁰⁾ 27720 49836 93150 196560

それより上では 32, 48次元でかなり大きい値がわかっている。しかし $n=32$ は 1980年以後 2度も記録が更新されており、まだ究極の最大数には程遠いらしい。

E8格子までは19世紀に知られていた。それ以上では第1層が空になり、格子状の充填では十分に詰込めない。
(9~11次元で)

12次元のCoxeter-Todd格子、16 (一般に 2の累乗) 次元の Barnes-Wall格子も昔から専門家には知られていたらしいが、公表されたのは近年である。

3. 前項の説明に若干補足をする。

まず Conway らの本から取った、現在まで既知の最も密な例を挙げる。 最良なことが証明されているのは、表の内枠で囲った部分だけに過ぎない。

DIMENSION	1	2	3	4	5	6	7	8	12	16	24
DENSEST PACKING	Z	A ₂	A ₃	D ₄	D ₅	E ₆	E ₇	E ₈	K ₁₂	Δ ₁₆	Δ ₂₄
HIGHEST KISSING NUMBER	Z	A ₂	A ₃	D ₄	D ₅	E ₆	E ₇	E ₈	K ₁₂	Δ ₁₆	Δ ₂₄
	2	6	12	24	40	72	126	240	756	4320	196560
THINNEST COVERING	Z	A ₂	A ₃	A ₄ *	A ₅ *	A ₆ *	A ₇ *	A ₈ *	A ₁₂ *	A ₁₆ *	Δ ₂₄
BEST QUANTIZER	Z	A ₂	A ₃ *	D ₄	D ₅ *	E ₆ *	E ₇ *	E ₈	K ₁₂	Δ ₁₆	Δ ₂₄

第1層が空といったのは、整数のノルムが1の点が無くなり、ノルムが2の点在最も内側にくる（従って実質的に第1層）というつもりだった。 24次元を越えると第2層も空になるというのも、同じくノルムが3の点在最も内側になるという意味である。

格子の名前の内、 A_n, D_n, E_n はいずれも単純 Lie 環のルート系として得られる場合に、E. Cartan による Lie 環の分類の対応する記号を転用したものである。

4. ここで一寸した「散歩」を試みる。

4次元の D4 格子は、4次元の体心立方格子である。 すなわち成分がすべて整数か、またはすべてが 整数+1/2 である点全体からなる。 これは Hurwitz の 4元整数であるし、また正24胞体による充填形でもある。 一点を固定したとき、そこからのノルム（距離の2乗）が n である点の個数は、 n の奇数の約数全体の和の24倍に等しい。 したがって N が十分大きいとき、ノルムが N 以下の格子点の総数はほぼ

$$24 \times [\sigma_0(N) + \sigma_0(N/2) + \sigma_0(N/3) + \dots] = (24/4) N^2 [1^2 + 1/2^2 + 1/3^2 + \dots]$$

である。 但し $\sigma_0(N)$ は N までの奇数の和を表し、それはほぼ $(N/2)^2$ に等しい。

他方このときの各格子点の勢力域 (Voronoi 集合; その点が最も近い格子点であるような空間の点の全体) は正24胞体であり、その体積は1である。 ゆえにこ

の $\frac{1}{2}$ 倍がほぼ半径 $\sqrt{N}$ の超球の体積 $\pi^2 N^2/2$ に等しい。厳密には上と下とから不等式で評価し、 N^2 で割って $N \rightarrow \infty$ とするのだが、そうすればこれから

$$1^2 + 1/2^2 + 1/3^2 + \dots = \pi^2/6$$

をうる。

同様に 8 次元の E8 格子 は、成分がすべて整数かまたは整数 + $\frac{1}{2}$ の点で、成分の代数和が偶数である点全体からなる。これは変換して Cayley 整数全体で表すこともできる。前の形では、ノルムはすべて偶数 $2n$ であり、それが $2n$ である点の個数は n の約数の 3 乗の和 $\sigma_3(n)$ の 240 倍に等しい。そして勢力域の体積は 1 である。このことから、前と同様に

$$240 \times [\Sigma_3(N) + \Sigma_3(N/2) + \Sigma_3(N/3) + \dots] = (240/4) N^4 [1^4 + 1/2^4 + 1/3^4 + \dots]$$

に 1 を掛けた値が、ほぼ半径 $\sqrt{2N}$ の超球の体積 $\pi^4 N \cdot 16/4!$ に等しい。但し $\Sigma_3(N)$ は N までの整数の 3 乗の和を示す。 N^4 で割って $N \rightarrow \infty$ とすれば、次の級数の和をうる。

$$1^4 + 1/2^4 + 1/3^4 + \dots = \pi^4/90.$$

同様の操作が次に述べる 24 次元の Leech 格子にも適用できる。この場合には、次節に述べる通り正しくは Ramanujan 関数の補正が入るのだが、それは主要項に対して十分に小さく $N \rightarrow \infty$ のとき 0 に近づくので、ノルムが n の点の個数は、ほぼ n の約数全体の 11 乗の和の $65520/691$ 倍である。そして基本的な勢力域の体積は、 $1/2 \uparrow 12$ である。ゆえに同様の関係式を作り N^{12} で割って $N \rightarrow \infty$ とすれば、

$$1^{12} + 1/2^{12} + 1/3^{12} + \dots = 691 \times (2 \uparrow 12) \pi^{12} / 12! \times 65520 = 691 \pi^{12} / 638512875$$

をうる。 ($691/2730 = B_{12}$)

もちろんこれらの公式を求めるためだけには、格子点の個数や基本勢力域の体積など、様々な量を計算しなければならないので、これは牛刀のそしりをまぬかれない。

さらにノルムが n の格子点の個数が、 n の簡単な整数論的関数で表されるのは、いまの所上の例だけである。したがってこのような方法で、例えば (3) を表すうまい公式が求められるものなのかどうか (質問があったが)、私にはわからない。

最後に Leech 格子の作り方を述べる。

5. 24次元の Leech格子 (J. Leech; 1964) は、現在まで知られているそれ以下の次元の最密格子をすべて含む。これ以上の次元では第2層が空になり、25, 26次元の格子ははなはだ複雑である。

Leech 格子の作り方。まず次のようにして、二進 Goray コード (有限個の例外的な完備コードの一つ) を作る。24ビット、距離8. $a^{(n)} = (a_0, \dots, a_{23})$
 a_0 は偶パリティ。 $a_{12}, \dots, a_{23}$ は $n=0 \sim 4095$ を二進数で表したビットパターン。
 $n \geq 2048$ に対しては、 $4095-n$ に対するコードの全ビット反転。 $a^{(0)}$ は全部0。
 $a^{(1)}$ の $a_1, \dots, a_{11}$ は順次 1 0 1 1 1 0 0 0 1 0 1 (これは11に対する1~11の平方剰余指数)。以下 $n=2^q$ ($1 \leq q \leq 10$) に対する $a_1, \dots, a_{11}$ は、順次これを左に巡回シフトしたもの。 $1 \leq n \leq 2047$ に対する $a^{(n)}$ は n を二進表示して1のあるビットに対応する 2^q に当る基本コード全部の二進和をとる。

Leech格子: 1. すべての座標が 整数 + $\frac{1}{4}$ であり、成分の代数和が奇数である点、及び Gorayコードの各々に対して1のあるビットの符号を反転した点全体。
 2. Gorayコードの各々に対し、0のある位置は整数、1のある位置は $\frac{1}{2}$ の奇数倍とし、成分全体の和が偶数になる点全体。

原点からのノルム (距離の二乗) は2以上の正の整数であり、ノルムが n の点の個数は65520 (多くは196560) の倍数である。正確にいうと、 n の約数の11乗の和を $\sigma_{11}(n)$ 、Ramanujan関数を $\tau(n)$ とすると、

$$[\sigma_{11}(n) - \tau(n)] \cdot 65520/691$$

である。691は第12 Bernoulli数の分子! 上式は常に整数。

6. 数値解析から離れるが、このあたりから我々が知らなかった「数学の秘境」が開けてくるらしい。

[参] • J.H. Conway-N.J.A. Sloane 編: Sphere Packing, Lattices and Groups, Springer-Verlag (Grundlehren Nr. 290), 1988.

• 森口・宇田川・一松: 岩波数学公式 II, (級数の和) 初版1958; 新版1986.