数理解析研究所講究録
424巻 1981年 1-12

アダマール行列と有限群

イリノイ大 シカゴサークル 伊藤 昇

アダマール行列 n 次の正方行列 H は，その行ベクトル $\alpha_1, \cdots \alpha_n$ が（1）$(\alpha_i, \alpha_j) = 0$, $i \neq j$, （2）$\alpha_i = (\pm 1, \cdots \pm 1)$ を満足するときアダマール行列と呼ばれる。その存在，構成，分類問題を考察したい。アダマール（1893）は，$n > 2$ のとき n は4の倍数であることを示したが，この逆がアダマールの予想で，今も未解決のままである。$\{-1, 1\}$ 行列 H について（1），（2）は $HH^t = nI$ と等価，したがって $HH^t = H^tH$ であり上の行ベクトルによる定義は列ベクトルによってもよい。n 次のアダマール行列 H, K について，K が H に等価とは，K が H から（イ）行，列の置換，（ロ）行，列に -1 をかける，ことにより得られることで，これは等価関係である。$C(n)$ で n 次アダマール行列の等価類数を示す。また $K = H$ のときの（イ），（ロ）が H の自己同型，その全体が H の自己同型

群 $G=G(H)$ である。n 次アダマール行列 H には行（又は列）毎に（アダマール）3-$(n, \frac{n}{2}, \frac{n}{4}-1)$ デザイン，またその各3-デザインには列（又は行）毎に（アダマール，対称）2-$(n-1, \frac{n}{2}-1, \frac{n}{4}-1)$ デザインが相伴する。これらのデザイン，それらの自己同型群と，H，G とを結び付けて考察するには H をデザイン化することが便利である。

行列デザイン $M(H)$　列点，行ブロック方式をとる。i 列に2点 i, i^* を用意する。行ベクトル α_j をつぎのようにブロックとする：α_j の i-座標が $+1$ が -1 かにしたがい $i \in \alpha_j$ か $i^* \in \alpha_j$ とする。また $-\alpha_j = \alpha_j^*$ とおき，これもブロックとする。$M(H)$ の点集合 $P(H) = \{1, \cdots n, 1^*, \cdots n^*\}$，ブロック集合 $B(H) = \{\alpha_1, \cdots \alpha_n, \alpha_1^*, \cdots \alpha_n^*\}$ である。$\{i, i^*\}$ を含むブロックは存在しないが，それらを除外すると任意3点を含む $\frac{n}{4}$ 個のブロックがあり，$M(H)$ は概3-デザインといえよう。また $G=G(H)$ の元 σ は，$P(H)$ 上の置換で，$B(H)$ を不変にし，さらに $i\sigma = j$ ならば $i^*\sigma = j^*$（ただし $i^{**} = i$ のようにする）を満足するものとする。

3-デザイン $H(\alpha_j)$　$H(\alpha_j)$ の点集合は α_j，ブロックは $\alpha_j \cap \alpha_k$，$\alpha_j \cap \alpha_k^*$，$k \neq j$，$1 \leq k \leq n$ である。これが3-$(n, \frac{n}{2}, \frac{n}{4}-1)$ デザインであること，

$H(\alpha_j)$ が与えられると H が構成されることは見易い．したがってアダマール予想は任意の4の倍数 n について 3-$(n, \frac{n}{2}, \frac{n}{4}-1)$ デザインが存在すると述べられる．

2-デザイン $H(\alpha_j, i)$, $i \in \alpha_j$ $H(\alpha_j, i)$ の点集合は $\alpha_j - \{i\}$，ブロックは $\alpha_j \cap \alpha_\beta - \{i\}$, $i \in \alpha_\beta$, $\beta \neq j$, $1 \leq \beta \leq n$ である．これが対称2-$(n-1, \frac{n}{2}-1, \frac{n}{4}-1)$ デザインであること，$H(\alpha_j, i)$ が与えられると $H(\alpha_j)$ が構成されることは見易い．したがってアダマール予想は任意の4の倍数 n について 対称2-$(n-1, \frac{n}{2}-1, \frac{n}{4}-1)$ デザインが存在すると述べられる．

自己同型群間の関係 $H(\alpha_j)$, $H(\alpha_j, i)$ の自己同型群を $G(\alpha_j)$, $G(\alpha_j, i)$ とおく．これらに $*$-コピーを付加し，次数 $2n$ の置換群とみると，つぎの命題が成立する．

命題 (1) $G(\alpha_j)$ は α_j の G における安定部分群である．$G(\alpha_j, i)$ は i の $G(\alpha_j)$ における安定部分群である．(2) G の $B(H)$ 上での可移域と $H(\alpha_j)$ の同型類とは自然に対応する．$G(\alpha_j)$ の α_j 上での可移域と $H(\alpha_j, i)$ の同型類とは自然に対応する．

注意 (1) 証明は定義，構成から直ちにわかると言って

よいと思う．(ロ) Norman [11] が n がいくらでも大きくて $G(\alpha_j) = 1$ という例を作っている．そこでは n 個の $H(\alpha_j, c)$ がすべて非同型であるので注目に値しよう．(ハ) 有限群を応用しながら，アダマール予想に挑戦しようとするならば，2-，3-デザインでなく，行列（デザイン）自体を考察すべきであることが暗示される．

群型のアダマール行列と平方剰余型のアダマール行列　アダマール行列は沢山に存在するが，つぎの2つが代表的である．

1° 基本アーベル2群の指標行列は，指標の直交関係によりアダマール行列である．これが群型のアダマール行列 $H_g(n)$ であり，シルヴェスター（1867）にまで辿れる．次数 n は2のべき，$n = 2^m$ である．行 i が $j = (1, \cdots, i)$ 列 i が j^t のようにしておき，$H_g(n)(\alpha(1), 1)$ をつくると，この2デザインは GF(2) 上の射影幾何で，超平面をブロックにしたものである．このように $H_g(n)$ はゆたかな構造を持っている．$H_g(n)$ の自己同型群 $G_g(n)$ は Kantor [10] により決定されているが，木村-伊藤はつぎのように見る．GF(2) 上 $m+1$ 次元のベクトル空間を V，$(e_0, \cdots, e_m)$ を V の基とする．点の集合を V，ブロックを e_0 を含まない超平面 M とその剰余類 $M + e_0$（ここで M は動く）と

すると，これが $M(H_g(n))$ と同型であることは見易い．したがって位数 2^{m+1} の基本アーベル2群である平行移動群が点上可移に働く．零ベクトルの安定部分群は e_0 も固定し，線型変換群 $\begin{pmatrix} 1 & x \\ 0 & GL(m,2) \end{pmatrix}$，$x$ 任意，と同型である．$G_g(n)$ は $H_g(n)$ の行，列上それぞれに2重可移に働らき，またそれぞれに正則可移正規部分群を含む．

2° q を $q \equiv 3 \pmod 4$ なる素数べき，χ を $GF(q)$ の平方指標，すなわち $R = (GF(q)^\times)^2$ とするとき，$\chi(a) = 1$, $a \in R$; -1, $0 \neq a \notin R$; 0, $a = 0$ である．(a, b) 成分が $\chi(b-a)$ である次数 q の行列を C，C を $S = \begin{pmatrix} 0 & j \\ -j^t & C \end{pmatrix}$ と拡大し，$H(q) = -I + S$ とおくと，χ の簡明な性質から，アダマール行列が得られる．これが平方剰余型のアダマール行列 $H(q)$ である．$H(q)$ が雑誌に最初に登場したのはペイリー（1933）である．$q \equiv 3 \pmod 4$ から，S は歪対称行列で，そのような形のアダマール行列は歪アダマール行列と呼ばれる．$H(q)$ はその代表的なものである．行1を $(-1, 1, \cdots, 1)$，列1を $-j^t$ のようにして，$H(q)$ $(\chi(1), 1)$ を作ると，このデザインは，点を $GF(q)$，ブロックを $R+a$, $a \in GF(q)$

とする同型の平方剰余型デザインになる．$H(3)$，$H(7)$はそれぞれ$H_g(4)$，$H_g(8)$と等価であるので，ここでは$q>7$とする．$H(q)$の自己同型群$G(q)$はHall [3] Kantor [10]により決定されている．$H(11)$はもっとも著名なものであり，Hallは$G(11)$がマテュー群M_{12}の表現群であることを示している．$q\geq 19$のとき$G(q)$が$SL^*(2,q)$（$SL(2,q)$に体同型を付加したもの）を含むことはHallによるが，それと一致することはKantorにより示された．Kantorの証明はかなり難解なので，簡明化が望まれる．$G(q)$は$H(q)$上の行，列上それぞれに2重可移に働らくが，正則可移正規部分群は含まない．

<u>列上2重可移な自己同型群を持つアダマール行列</u>　アダマール行列を考察するのに，群論的に強い条件を付しても，群を具体的に与えないかぎり，それが困難であることは多くの組合せ構造について共通である現象のひとつである．ところで2重可移群の分類は，とくに正則可移正規部分群を含まないものは，最近完成したことにまっているので，したがって上のようなアダマール行列を分類することも可能になる．

<u>命題</u>（Ito [6]，Ito-Leon [8]）．列上2重可移，かつ正則可移正規部分群を含まない自己同型群を持つアダマール行列は平方剰余型（$q>7$）か，$n=36$でつぎのよう

に構成される。2デザインを与える。GF(2)上6次元のベクトル空間をV, $e_1, \cdots, e_6$を標準基とし, またV上の2次形式 $X_1X_4 + X_2X_5 + X_3X_6$ を考察する。このとき35個の特異ベクトルがあるが, それが点の集合Pを作る。またブロックのひとつは $e_1, e_4, e_1+e_2, e_1+e_3, e_1+e_5, e_1+e_6, e_1+e_2+e_3, e_1+e_2+e_6, e_1+e_3+e_5, e_1+e_5+e_6, e_1+e_2+e_4+e_5, e_1+e_3+e_4+e_6, e_1+e_2+e_3+e_4+e_5, e_1+e_2+e_3+e_4+e_6, e_1+e_2+e_3+e_5+e_6, e_1+e_2+e_4+e_5+e_6, e_1+e_3+e_4+e_5+e_6$ であり, これに第一直交群 $O^+(6,2)$ を作用させるとすべてのブロックが得られる。対応する行列の自己同型群は $Sp(6,2)$ と位数2の巡回群との直積である。

正則可移正規部分群があるときは, Hering [5] の努力にもかかわらず2重可移群の分類は完全でないので, そのようなアダマール行列の分類もまた不完全である。

命題 (Ito-Kimura [7]) 列上2重可移, かつ正則可移正規部分群を含む自己同型群を持つアダマール行列についてはつぎのことが成立する。次数nは2のべき, $n = 2^m$ であるが, mが奇数ならば群型, またmが偶数でも列上3重可移ならば群型である。さらに $n = 16$ のときは群型である

問題　列上ランク3の自己同型群を持つアダマール行列を考究せよ.

次数nの任意のアダマール行列について$\zeta=\prod_{i=1}^{n}(i,i^*)$は自己同型群の中心に入る. $G=\langle\zeta\rangle$であるようなアダマール行列の例は今のところ知られていない. 先にあげたNormanの例では自己同型群の位数は4で整除される.

$C(n)$について　n次のアダマール行列全体に等価群が働いていて, その可移域の個数が$C(n)$である. $n=1, 2, 4, 8, 12$のときは$C(n)=1$, $C(16)=5$, $C(20)=3$はHallによって計算されている[2, 4]. これらの各アダマール行列は行(列)上可移な自己同型群を持っている.

命題 (Ito-Leon-Longyear [9])　$C(24)=59$

注意 (i) 3-(24, 12, 5)デザインの同型類の個数は129である. (ii) 自己同型群で区別できないのは2つだけでH, H^tの形にまっている. (iii) 自己同型群の最小のものは位数8である.

アダマール予想はnが4で整除されるとき$C(n)>0$と述べられるが, $\lim_{n\to\infty}C(4n)=\infty$が成立して不思議でないように思われる. Gordon [1]は$\lim_{m\to\infty}C(2^m)=\infty$を証明

している．したがって等価概念を左くして"等価"類の個数を小さくすることが望ましい．Seberry, Wallis [12] は（イ），（ロ）に（ハ）ある行，列の整数倍を他の行，列に加える：を付加することを提案している．すなはちそつのアダマール行列は単因子系が等しいとき"等価"とされる．これを左等価と呼び，左等価類の個数を $E(n)$ で示そう．このとき $u=\frac{n}{4}$ が平方無縁ならば $E(n)=1$ が成立する．したがってこれでは左すぎるといえよう．しかしまが $E(n)$ を一般に計算することも大きな課題のひとつである．

Q型のアダマール行列 $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$ は次数2のアダマール行列であり，2つのアダマール行列のクロネッカー積はアダマール行列だから（アダマール1893），アダマール予想を考察するには，$n=4u$，u 奇数の場合に限ってよい．このとき，つぎの3元で生成される次数 $2u$ の正則可移群 Q_n をQ型と呼ぼう：$A=(1\cdots u)\cdots(3u+1\cdots 4u)(*)$，ここで $*$ はその前迄の $*$ コピーを付加することを示す，$B=(1,u+1,*)\cdots(u,2u,*)(2u+1,3u+1,*)\cdots(3u,4u,*)$，$C=(1,2u+1,*)(2,3u,*)\cdots(u,2u+2,*)(u+1,(3u+1)^*,*)(u+2,(4u)^*,*)\cdots(2u,(3u$

+2)*, *) さらに Q_n を自己同型群の部分群として含む次数 n のアダマール行列を Q 型のアダマール行列と呼ぼう.

予想 任意の $n = 4u$, u 奇数について n 次の Q 型のアダマール行列が存在する.

注意 講演者はこの予想の下でアダマール予想の考察を進めている.

この予想の成立を支持するつぎのことが示される.

1° 平方剰余型のアダマール行列は, $\frac{n}{4}$ が奇数のとき, Q 型である(正確には Q 型に等価であるというべきであろう. 以下同じ).

2° 4つの対角巡回行列を用いて構成するウイリアムソン型のアダマール行列は Q 型である. したがってウイリアムソン型のアダマール行列は行, 列上可移な自己同型群を持つ.

注意 ウイリアムソン型のアダマール行列については山本, 山田, 沢出 [13] により研究が進められている.

最後に, 沢山に知られているアダマール行列の系列では, 自己同型群の決定を待っているものが多いことを指摘しておきたい.

文献

[1] B. Gordon, A note on inequivalent Hadamard

matrices, JRAM (ワルル) 268/269, (1974), 427-433

[2] M. Hall, Jr., Hadamard matrices of order 16, JPL Reseach Summary 36-10, 1 (1961), 21-26.

[3] 同, Note on the Mathieu group M_{12}, Arch Math. 13 (1962), 334-340.

[4] 同, Hadamard matrices of order 20, JPL Technical Report No. 32-761.

[5] C. Hering, Transitive linear groups and linear groups which contain irreducibe subgroups of prime order, GD2 (1974) 425-460.

[6] N. Ito, Hadamard matrices with "doubly transitive" automorphism groups, Arch. Math. 35 (1980), 100-111.

[7] N. Ito-H. Kimura, Studies on Hadamard matrices with "2-transitive" automorphism groups, (プリプリント有)

[8] N. Ito-J. Leon, An Hadamad matrix of order 36 (プリプリント有)

[9] N. Ito-J. Leon-J. Longyear, Classifica-

tion of 3-(24, 12, 5) designs and 24-dimensional Hadamard matrices, to appear in JCTA.

[10] W. Kantor, Automorphism groups of Hadamard matrices, JCTG (1969) 279-281.

[11] C. Norman, Hadamard designs with no non trivial automorphisms, GD 2 (1973) 201-204.

[12] W. D. Wallis - J. Seberry (Wallis), Equivalence of Hadamard matrices, Israel JM 7 (1969) 122-128.

[13] 本講究録404 およびそこにある文献.