

成分が RDS である一般アダマール行列の構成

熊本大学・教育学部 平峰 豊 (Yutaka Hiramine)
Faculty of Education, Kumamoto University

1 Introduction

群 G の元を成分とする行列を用いて一般アダマール行列が定義されて, それにより symmetric transversal design が得られる ([1]). これに対して 変形一般アダマール行列は群環の元を成分として行列が定義されて, それを用いることにより 非対称な場合を含めて transversal design が得られる ([4]).

ここでは, さらに少し異なる視点から一般アダマール行列を一般化して変形一般アダマール行列の構成に利用することを考える. すなわち, 一般アダマール行列では与えられた群 U の元を成分としてもつ行列 $[d_{ij}]$ が任意の異なる 2 行 i, j に対して $(*) \sum_t d_{it} d_{jt}^{-1} = \lambda U$ を満たすように定められているが, この研究では少しゆるやかにして, d_{ij} を U を正規部分群として持つ群 G の元でよいとしてその代わり $(*)$ が U の剰余類の和集合であることを条件として課す (ただし, 群環 $\mathbb{Z}[G]$ の元に対して $(\sum_{g \in G} a_g g)^{(-1)} = \sum_{g \in G} a_g g^{-1}$). これにより変形一般アダマール行列の新しい構成方法が与えられる (Theorem 4.1, Theorem 4.7).

2 変形一般アダマール行列

最初に [4] の結果のうち後半で用いるものについてまとめる.

$\text{GH}(s, u, \lambda)$ の定義

Definition 2.1. G を位数 su の群とする. G の s -部分集合 D_{ij} ($1 \leq i, j \leq t, st = u\lambda$) に対して, 次の行列

$$[D_{ij}] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1t} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2t} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ D_{t1} & D_{t2} & \cdots & D_{tt} \end{bmatrix}$$

が G の位数 u の部分群 $U_1, \dots, U_t$ に関する G 上の変形一般アダマール行列 (a $\text{GH}(s, u, \lambda)$ matrix over G relative to $U_1, \dots, U_t$, $k := u\lambda = st$) であると

は次の条件をみたすことを言う.

$$\sum_{1 \leq j \leq t} D_{ij} D_{\ell j}^{(-1)} = \begin{cases} k + \lambda(G - U_i) & i = \ell \text{ のとき,} \\ \lambda G & i \neq \ell \text{ のとき.} \end{cases} \quad (1)$$

GH(s, u, λ) による $\mathbb{P}$ と $\mathbb{B}$ の定義

群環 $\mathbb{Z}[G]$ に成分をもつ t 次正方行列の全体を $M_t(\mathbb{Z}[G])$ で表す.

GH(s, u, λ)-行列 $[D_{ij}] \in M_t(\mathbb{Z}[G])$ relative to $U_1, \dots, U_t$ ($t = u\lambda/s$) に対して点集合 $\mathbb{P}$ とブロック集合 $\mathbb{B}$ を次で定める.

$$\mathbb{P} = \{1, 2, \dots, t\} \times G, \quad (2)$$

$$\mathbb{B} = \{B_{jh} : 1 \leq j \leq t, h \in G\}, \quad (3)$$

ここで

$$B_{jh} = \bigcup_{1 \leq i \leq t} (i, D_{ij}h)$$

G の元 x の点 $(i, g) \in \mathbb{P}$ への作用を $(i, g)x = (i, gx)$ で定義するとき, 次が成り立つ.

Result 2.2. ([4]) 位数 su の群 G に対して $[D_{ij}] \in M_t(\mathbb{Z}[G])$ を位数 u の部分群 $U_1, \dots, U_t$ ($t = u\lambda/s$) に関する GH(s, u, λ)-行列とする. $\mathbb{P}$ と $\mathbb{B}$ を (2)(3) により定めるとき次が成り立つ.

(i) $(\mathbb{P}, \mathbb{B})$ は $\text{TD}_\lambda(k, u)$ ($k = u\lambda$) である.

(ii) $G \leq \text{Aut}((\mathbb{P}, \mathbb{B}))$ で, G は $\mathbb{P}$ と $\mathbb{B}$ 上に半正則に作用して任意の点軌道は s 個の点クラス和集合である.

このことから, $GH(s, u, \lambda)$ を構成することにより transversal design が得られることが分かる. この研究では新しい $GH(s, u, \lambda)$ の構成法を述べる. $GH(s, u, \lambda)$ から得られる transversal design は必ずしも symmetric ではない. 次はその判定基準を与える.

STD に対応する GH(s, u, λ)-行列の判定法

Result 2.3. ([4]) su の群 H に対して $[D_{ij}] \in M_t(\mathbb{Z}[H])$ を位数 u の部分群 $U_1, \dots, U_t$ ($t = u\lambda/s$) に関する GH(s, u, λ)-行列とする. このとき $[D_{ij}]$ に対応する $\text{TD}_\lambda(k, u)$ が symmetric であるための必要十分条件は

$$[D_{ij}^{(-1)}]^T = \begin{bmatrix} D_{11}^{(-1)} & D_{21}^{(-1)} & \dots & D_{t1}^{(-1)} \\ D_{12}^{(-1)} & D_{22}^{(-1)} & \dots & D_{t2}^{(-1)} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ D_{1t}^{(-1)} & D_{2t}^{(-1)} & \dots & D_{tt}^{(-1)} \end{bmatrix}$$

が H の適当な部分群 $V_1, \dots, V_t$ に関する GH(s, u, λ)-行列となることである.

次はアーベル群の指標に関するよく知られた結果である。

Result 2.4. ([7]) G がアーベル群で $f \in \mathbb{Z}[G]$ とする. G の単位指標 χ_0 とは異なるすべての指標 $\chi \in G^*$ に対して $\chi(z) = 0$ ならば $f = \lambda G$ ($\exists \lambda \in \mathbb{Z}$) である.

次は Result 2.4 の一般化である.

Lemma 2.5. U がアーベル群 G の部分群で, $z \in \mathbb{Z}[G]$ とする. $\chi|_U \neq \chi_0$ である任意の指標 $\chi \in G^*$ ($\chi \neq \chi_0$) に対して常に $\chi(z) = 0$ であれば, $f \in \mathbb{Z}[G]$ が存在して $z = Uf$ と表される.

(証明) 仮定より $\chi(z(U-u)) = 0$ ($\forall \chi \in G^*, \chi \neq \chi_0$). Result 2.4 を適用して $z(U-u) = sG$ となる整数 s が存在する. 両辺に単位指標を作用させて $s = 0$ が分かる. これより $zU = uz$. ここで G/U の完全代表系を $\{g_1, \dots, g_m\}$ ($m = [G:U]$) とおくと, $z = g_1w_1 + g_2w_2 + \dots + g_mw_m$ ($\exists w_1, \dots, w_m \in \mathbb{Z}[U]$) とおけるから $(g_1w_1 + g_2w_2 + \dots + g_mw_m)U = u(g_1w_1 + g_2w_2 + \dots + g_mw_m)$. 従って

$$g_1\chi_0(w_1)U + \dots + g_m\chi_0(w_m)U = g_1uw_1 + \dots + g_muw_m \quad (4)$$

(4) の $g_1, \dots, g_m$ の係数を比較して,

$$\chi_0(w_i)U = uw_i, \quad (1 \leq i \leq m) \quad (5)$$

ここで $U = \{x_1, \dots, x_u\}$ とおけば $w_i = a_{i1}x_1 + \dots + a_{iu}x_u$ ($\exists a_1, \dots, a_u \in \mathbb{Z}$) の形に表されるので, (5) に代入して $x_1, \dots, x_u$ の係数を比較すれば次を得る.

$$(a_{i1} + \dots + a_{iu}) \sum_{1 \leq j \leq u} x_j = \sum_{1 \leq j \leq u} a_{ij}ux_j$$

これより $a_{i1} + \dots + a_{iu} = a_{i1}u = \dots = a_{iu}u$. よって $a_{i1} = \dots = a_{iu}$ がわかるので $w_i = s_iU$ ($\exists s_i \in \mathbb{Z}$). 以上より Lemma が成り立つ.

3 Cosets N/U に関する一般アダマール行列

この節では Definition 2.1 とは別の視点から一般アダマール行列の拡張を行って, 次の節でそれを変形一般アダマール行列の構成に利用する.

Definition 3.1. N を群, U をその正規部分群として $N/U = \{U_1(=U), U_2, \dots, U_m\}$ (剰余類分解) とおく. このとき, n 次正方行列 $H = [h_{ij}]$ が N/U に関する一般アダマール行列 $\text{GH}(u, \lambda)$ ($\text{GH}(u, \lambda)$ -matrix with respect to N/U) であると $n = u\lambda$ で,

- (i) $h_{ij} \in N$ ($1 \leq i, j \leq n$) 及び

(ii) 任意の i, j, t ($1 \leq i \neq j \leq n$, $1 \leq t \leq m$) に対して $\lambda_{ijt} \geq 0$ が存在して

$$\sum_{1 \leq t \leq m} h_{it} h_{jt}^{-1} = \lambda_{ij1} U_1 + \cdots + \lambda_{ijm} U_m$$

つまり

$$H(H^{(-1)})^T = \begin{bmatrix} n & Uz_{12} & \cdots & Uz_{1n} \\ Uz_{21} & n & & \\ \vdots & & \cdots & \\ Uz_{n1} & \cdots & & n \end{bmatrix}$$

ここで $z_{ij} \in \mathbb{Z}[N]$ かつ z_{ij} の係数はすべて 0 以上で N の単位指標 χ_0 に対して $\chi_0(z_{ij}) = \lambda$

をみたすことをいう。

Remark 3.2. (1) 群 U 上の通常の $\text{GH}(u, \lambda)$ -行列は U/U に関する $\text{GH}(u, \lambda)$ -行列と見ることができる。

(2) $u\lambda = (\lambda_{ij1} + \cdots + \lambda_{ijm})|U|$ ($\forall i, j$) により, すべての i, j ($i \neq j$) について次がみたされていなければならない。

$$\lambda = \lambda_{ij1} + \cdots + \lambda_{ijm}$$

Example 3.3. $N = \langle a \rangle \simeq \mathbb{Z}_4$, $U = \langle a^2 \rangle \simeq \mathbb{Z}_2$, $U_1 = U, U_2 = Ua$ とする。 N の元を成分とする次の 4 次正方行列 $M = [d_{ij}]$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & a^2 & a^2 \\ 1 & a^2 & a & a^3 \\ 1 & a^2 & a^3 & a \end{bmatrix}$$

は任意の i, j ($i \neq j$) に対して $\sum_{1 \leq t \leq 4} d_{it} d_{jt}^{-1}$ が $cU_1 + dU_2$ ($c, d \geq 0$) の形であることが確かめられるので, $\text{GH}(2, 2)$ -行列 w.r.t N/U である。

Example 3.4. $N = \langle a \rangle \simeq \mathbb{Z}_9$, $U = \langle a^3 \rangle \simeq \mathbb{Z}_3$ とすると $N/U = \{U(= \{1, a^3, a^6\}), Ua(= \{a, a^4, a^7\}), Ua^2(= \{a^2, a^5, a^8\})\}$ (剰余類分解) である。このとき,

$$[h_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 & a^3 & a^4 & a^5 & a^6 & a^7 & a^8 \\ 1 & a^4 & a^8 & a^3 & a^7 & a^2 & a^6 & a & a^5 \\ 1 & a^7 & a^5 & a^3 & a & a^8 & a^6 & a^4 & a^2 \\ 1 & 1 & 1 & a^6 & a^6 & a^6 & a^3 & a^3 & a^3 \\ 1 & a^3 & a^6 & 1 & a^3 & a^6 & 1 & a^3 & a^6 \\ 1 & a^3 & a^6 & a^6 & 1 & a^3 & a^3 & a^6 & 1 \\ 1 & a^6 & a^3 & 1 & a^6 & a^3 & 1 & a^6 & a^3 \\ 1 & a^6 & a^3 & a^6 & a^3 & 1 & a^3 & 1 & a^6 \end{bmatrix}$$

は一般アダマール行列 $\text{GH}(3, 3)$ w.r.t N/U である.

Example 3.5. $N = \langle a \rangle \simeq \mathbb{Z}_6 \geq U = \langle a^2 \rangle \simeq \mathbb{Z}_3$ に対して

$N/U = \{U (= \{1, a^2, a^4\})\}$, $Ua (= \{a, a^3, a^5\})$ とおく.

このとき

$$[h_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & a & a^2 & a^4 & a^4 & a^5 & 1 & a^2 & a^2 & a^3 & a^4 \\ 1 & 1 & a^4 & a^2 & 1 & a^2 & a^4 & a^2 & 1 & a^4 & a^4 & a^2 \\ 1 & 1 & a^2 & a^4 & 1 & a^2 & a^2 & a^4 & a^4 & 1 & a^2 & a^4 \\ 1 & a^4 & a & 1 & a^2 & a^3 & a & a^2 & a^5 & a^3 & a^5 & a^4 \\ 1 & a^4 & a^3 & a^4 & a^2 & a^5 & a & 1 & a & a^5 & a^3 & a^2 \\ 1 & a^4 & a^3 & a^2 & a^2 & a & a^5 & a^4 & a^3 & a & a^5 & 1 \\ 1 & a^4 & a^5 & a^4 & 1 & a^4 & a^3 & a^2 & a^2 & a^2 & a & 1 \\ 1 & a^2 & a^5 & a^2 & a^2 & 1 & a^3 & 1 & a^4 & a^4 & a & a^4 \\ 1 & a^2 & a^3 & 1 & a^4 & a^4 & a^5 & a^2 & a^4 & 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a & a^4 & a^4 & 1 & a^3 & a^4 & 1 & a^2 & a^5 & a^2 \\ 1 & a^2 & a^5 & 1 & a^4 & a^2 & a & a^4 & a^2 & a^4 & a^3 & 1 \end{bmatrix}$$

は $\sum_{1 \leq t \leq 12} h_{it} h_{jt}^{-1} \in \{4U, 3U + Ua, 2U + 2Ua\}$ であることが確かめられて, $\text{GH}(3, 4)$ -行列 w.r.t. N/U である.

Kronecker 積の定義から次が容易に確かめられる.

Proposition 3.6. U を群 N の正規部分群として $H_i (i = 1, 2)$ が N/U に関する一般アダマール行列 $\text{GH}(u, \lambda_i)$ ならば $H_1 \otimes H_2$ も N/U に関する一般アダマール行列 $\text{GH}(u, \lambda_1 \lambda_2 u)$ である.

4 Cosets N/U に関する一般アダマール行列 と RDS

この節では N/U に関する一般アダマール行列と群 $G (\geq N)$ における半正則相対差集合 (semiregular RDS relative to U) を用いて変形一般アダマール行列が構成できることを示し, さらにその例を示す.

Theorem 4.1. G を位数 $u^2 \mu$ の群, U を G の位数 u の部分群で $N (\geq U)$ を $N_G(U)$ の部分群とする. $H = [h_{ij}]$ を N/U に関する $\text{GH}(u, \lambda)$ -行列で, $\mathcal{D} = (D_1, D_2, \dots, D_n)$ ($n = u\lambda$) を G の $(u\mu, u, u\mu, \mu)$ -RDSs relative to U の任意の n -tuple とする. このとき n 次正方行列

$$M_{H, \mathcal{D}} = \begin{bmatrix} h_{11}D_1 & h_{12}D_2 & \cdots & h_{1n}D_n \\ h_{21}D_1 & h_{22}D_2 & \cdots & h_{2n}D_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{n1}D_1 & h_{n2}D_2 & \cdots & h_{nn}D_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

は U に関する変形一般アダマール行列 $\text{GH}(u\mu, u, u\lambda\mu)$ である.

(証明) $N/U = \{U_1(=U), U_2, \dots, U_m\}$ (剰余類分解) とおくと, 仮定より任意の i, j ($i \neq j$) に対して $\lambda_{ijk} \geq 0$ ($1 \leq i, j \leq n, 1 \leq k \leq m$) があって次を満たす.

$$\sum_{1 \leq t \leq n} h_{it} h_{jt}^{-1} = \lambda_{ij1} U_1 + \lambda_{ij2} U_2 + \dots + \lambda_{ijm} U_m \quad (7)$$

$$n = (\lambda_{ij1} + \dots + \lambda_{ijm})u \quad (8)$$

また, $D_{ij} = d_{ij} D_j$ とおけば $M_{H, \mathcal{D}} = [D_{ij}]$.

$i \neq j$ のとき, (7), (8) と $N \supset U$ を用いれば,

$$\begin{aligned} \sum_{1 \leq t \leq n} D_{it} D_{jt}^{(-1)} &= \sum_{1 \leq t \leq n} h_{it} (u\mu + \mu(G - U)) h_{jt}^{-1} \\ \sum_{1 \leq t \leq n} h_{it} h_{jt}^{-1} (u\mu + \mu(G - U)) &= \sum_{1 \leq k \leq m} \lambda_{ijk} U_k (u\mu + \mu(G - U)) \\ &= u\mu \sum_{1 \leq k \leq m} \lambda_{ijk} U_k + \mu(\sum_{1 \leq k \leq m} \lambda_{ijk} |U_k|)G - \mu \sum_{1 \leq k \leq m} \lambda_{ijk} |U| U_k \\ &= \mu(\sum_{1 \leq k \leq m} \lambda_{ijk} u)G = \mu n G. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{一方 } i = j \text{ のとき, } \sum_{1 \leq t \leq n} D_{it} D_{it}^{(-1)} &= \sum_{1 \leq t \leq n} h_{it} (u\mu + \mu(G - U)) h_{it}^{-1} \\ &= (u\mu + \mu(G - U)) = nu\mu + n\mu(G - U). \end{aligned}$$

これより

$$\sum_{1 \leq t \leq n} D_{it} D_{jt}^{(-1)} = \begin{cases} nu\mu + n\mu(G - U) & i = j \text{ のとき,} \\ n\mu G & i \neq j \text{ のとき} \end{cases}$$

従って定理が成り立つ. $\square$

Corollary 4.2. G を位数 $u^2\mu$ の群, U を G の位数 u の正規部分群とする. $H = [h_{ij}]$ を G/U に関する $\text{GH}(u, \lambda)$ -行列で, $\mathcal{D} = (D_1, D_2, \dots, D_n)$ ($n = u\lambda$) を G の $(u\mu, u, u\mu, \mu)$ -RDSs relative to U の n -tuple とする. このとき (6) で定義される n 次正方行列は U に関する変形一般アダマール行列 $\text{GH}(u\mu, u, u\lambda\mu)$ である.

Example 4.3. $G = \langle a, b \rangle \simeq \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3$. $H = [h_{ij}]$ を $U = \langle a \rangle$ に成分を持つ次の $\text{GH}(3, 1)$ -行列とする.

$$H = \begin{bmatrix} a & 1 & 1 \\ 1 & a & 1 \\ 1 & 1 & a \end{bmatrix}$$

また, $D_t = \{a^i b^{i^2+t} : i \in \mathbb{Z}_3\}$ ($1 \leq t \leq 3$) とおくと D_t は G の $(3, 3, 3, 1)$ -

$$\text{RDS. 従って, } \mathcal{D} = (D_1, D_2, D_3) \text{ に対して } M_{H, \mathcal{D}} = \begin{bmatrix} aD_1 & D_2 & D_3 \\ D_1 & aD_2 & D_3 \\ D_1 & D_2 & aD_3 \end{bmatrix}$$

は Cor. 4.2 より $\text{GH}(3, 3, 3)$ -行列 relative to $\langle a \rangle$ である.

Example 4.4. $G = \langle r, s \rangle \times \langle t \rangle \simeq \text{Sym}(3) \times \mathbb{Z}_6$ ($r^2 = s^3 = t^6 = 1, [r, t] = [s, t] = 1, rsr = s^{-1}$) とする. [3] により

$$D = \{1, t, t^2, t^3, r, rt, s, r^2st^5, rst^4, r^2st, st^4, rst\}$$

は non-normal $(12, 3, 12, 4)$ -RDS in G relative to $U = \langle rt^2 \rangle$ の 1 つである。
 $\mathcal{D} = (D_1, \dots, D_{12})$ $(12, 3, 12, 4)$ -RDSs in G relative to U の任意の 12-tuple とする。さらに, $N = \langle rt^{-1} \rangle \simeq \mathbb{Z}_6 \supset U = \langle rt^2 \rangle \simeq \mathbb{Z}_3$ であるから, N は Example 3.5 における $\text{GH}(3, 4)$ -行列 w.r.t. N/U をもつ。これを $H = [h_{ij}]$ としておくと Theorem 4.1 より $M_{H, \mathcal{D}}$ は $\text{GH}(12, 3, 48)$ -行列 (relative to U) でありこれより $\text{TD}_{48}(144, 3)$ を得る。

Lemma 4.5. Theorem 4.1 において G がアーベル群のとき, $M_{H, \mathcal{D}}$ が定める $\text{TD}_{u\lambda\mu}(u^2\lambda\mu, u)$ が対称であるための必要十分条件は H^T が N/U に関する $\text{GH}(u, \lambda)$ -行列となることである。

(証明) Result 2.3 より任意の j, ℓ ($1 \leq j \neq \ell \leq n$) に対して

$$\sum_{1 \leq s \leq n} h_{sj} D_j (h_{s\ell} D_\ell)^{(-1)} = \mu n G$$

が成り立つことが必要十分である。このことから G の任意の指標 $\chi (\neq \chi_0)$ に対して $\chi(D_j) \overline{\chi(D_\ell)} \chi(\sum_{1 \leq s \leq n} h_{sj} h_{s\ell}^{-1}) = 0$ が成り立つことが必要十分条件である。一方, $i \in \{j, \ell\}$ に対して

$$|\chi(D_i)|^2 = \chi(D_i D_i^{(-1)}) = \chi(u\mu + \mu(G - U)) = u\mu - \mu\chi(U)$$

であるから, $\chi(\sum_{1 \leq s \leq n} h_{sj} h_{s\ell}^{-1}) = 0$ が $\chi|_U \neq \chi_0$ なる指標 χ について成り立つことが必要十分である。補題 2.5 よりこれは H^T が G/U に関する $\text{GH}(u, \lambda)$ -行列となることと同値である。従って命題が成り立つ。 $\square$

Example 4.6. $N = \langle a \rangle \simeq \mathbb{Z}_9 \supset U = \langle a^3 \rangle \simeq \mathbb{Z}_3$ で, $H = [h_{ij}]$ を例 3.4 の一般アダマール行列 $\text{GH}(3, 3)$ w.r.t. N/U とする。 $G = \langle a \rangle \times \langle b \rangle \simeq \mathbb{Z}_9 \times \mathbb{Z}_3$ には $(9, 3, 9, 3)$ -RDS relative to U が存在する ([6]) から重複を許してそれを 9 個選んで $\mathcal{D} = (D_1, \dots, D_9)$ とする。このとき Theorem 4.1 より $M_{H, \mathcal{D}}$ は G における変形一般アダマール行列 $\text{GH}(9, 3, 27)$ relative to U であるが, H^T も一般アダマール行列 $\text{GH}(3, 3)$ w.r.t. N/U であることがチェックできるので Lemma 4.5 より $M_{H, \mathcal{D}}$ から得られる $\text{TD}_{27}(81, 3)$ は symmetric である。

D が群 G における $(u\mu, u, u\mu, \mu)$ -RDS relative to U であれば定義より D は G における U の右代表系であるが一般には左代表系ではない。しかし D がもし左代表系でもあれば次が成り立つ。

Theorem 4.7. G を位数 $u^2\mu$ の群, U を G の位数 u の部分群, $N(\geq U)$ を $N_G(U)$ の部分群とする。また, $H = [h_{ij}]$ ($h_{ij} \in N$) を N/U に関する $\text{GH}(u, \lambda)$ -行列で $\mathcal{D} = (D_1, D_2, \dots, D_n)$ ($n = u\lambda$) を G の $(u\mu, u, u\mu, \mu)$ -RDSs relative to U の n -tuple で, $\mathcal{D}$ のうち少なくとも $n-1$ 個が G における U の

左代表系であるとする. このとき n 次正方行列

$$M'_{H,\mathcal{D}} = \begin{bmatrix} D_1 h_{11} & D_1 h_{12} & \cdots & D_1 h_{1n} \\ D_2 h_{21} & D_2 h_{22} & \cdots & D_2 h_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ D_n h_{n1} & D_n h_{n2} & \cdots & D_n h_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

は U に関する変形一般アダマール行列 $\text{GH}(u\mu, u, u\lambda\mu)$ relative to U である.

(証明) $N/U = U g_1 \cup \cdots \cup U g_m (g_1, \dots, g_m \in N)$ (剰余類分解) とおく. このとき, 仮定より

$$\sum_{1 \leq t \leq n} h_{it} h_{jt}^{-1} = \lambda_{ij1} U g_1 + \cdots + \lambda_{ijm} U g_m \quad (10)$$

$D_{ij} = D_i h_{ij}$ とおけば $M'_{H,\mathcal{D}} = [D_{ij}]$. このとき, (10) を用いて

$$\begin{aligned} \sum_{1 \leq t \leq n} D_{it} D_{jt}^{(-1)} &= \sum_{1 \leq t \leq n} D_i h_{it} h_{jt}^{-1} D_j^{(-1)} = D_i \left(\sum_{1 \leq t \leq n} h_{it} h_{jt}^{-1} \right) D_j^{(-1)} \\ &= \begin{cases} D_i (\lambda_{ij1} U g_1 + \cdots + \lambda_{ijm} U g_m) D_j^{(-1)} & (i \neq j \text{ のとき}) \\ n(u\mu + \mu(G - U)) & (i = j \text{ のとき}) \end{cases} \end{aligned}$$

$i \neq j$ のとき, 仮定より $D_i U = G$ または $U D_j^{(-1)} = G$ が成り立つことに注意すれば $\sum_{1 \leq t \leq n} D_{it} D_{jt}^{(-1)} = \lambda u \mu G$. 以上より

$$\sum_{1 \leq t \leq n} D_{it} D_{jt}^{(-1)} = \begin{cases} nu\mu + n\mu(G - U) & i = j \text{ のとき,} \\ n\mu G & i \neq j \text{ のとき} \end{cases}$$

従って定理が成り立つ. $\square$

Corollary 4.8. G を位数 $u^2\mu$ の群, U を G の位数 u の正規部分群とする. また, $H = [h_{ij}]$ を $\text{GH}(u, \lambda)$ -行列 w.r.t. G/U で $\mathcal{D} = (D_1, D_2, \dots, D_n)$ ($n = u\lambda$) を G の $(u\mu, u, u\mu, \mu)$ -RDSs relative to U の n -tuple であるとする. このとき (9) で定義される n 次正方行列は U に関する変形一般アダマール行列 $\text{GH}(u\mu, u, u\lambda\mu)$ である.

Example 4.9. 位数 $4n^2$ の形のアーベル群 L において多くの $(4n^2, 2n^2 - n, n^2 - n)$ -差集合 A が構成されていて ([5]) Mennon Hadamard difference set と呼ばれている. このとき $G = L\langle t \rangle$ を t が L を invert する群として定義する. [2] の Proposition 4.14 と同様にして $D = A + (L - A^{(-1)})t$ は G における $(4n^2, 2, 4n^2, 2n^2)$ -RDS relative to $U = \langle t \rangle$ となることが容易に証明できる. このうちで, spread 型の Mennon Hadamard difference set のように $A = A^{(-1)}$ を満たすものを考えて, さらに L は基本可換 2-群でないとする. $g \in L$ とすると Dg は G における $(4n^2, 2, 4n^2, 2n^2)$ -RDS relative to U であ

るが, $(Dg)^{(-1)}(Dg) = 4n^2 + 2n^2(G - \langle gt \rangle)$ になりたつので Dg は G における U の左代表系でない. また, $C_G(t)$ は $N = \langle t \rangle \times \langle s \rangle \simeq \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ なる群を含む. 4 次の $\text{GH}(2, 2)$ -行列 w.r.t N/U を $H = [h_{ij}]$ とする. 例えば次を選ぶ.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & t & s & st \\ 1 & 1 & t & t \\ 1 & t & st & s \end{bmatrix}$$

また, $\mathcal{D} = (D, D, D, Dg)$ とすると Theorem 4.7 より $M'_{H, \mathcal{D}}$ は $\text{GH}(4n^2, 2, 8n^2)$ -行列である.

Example 4.10. $F \simeq (GF(q), +)$ として $\begin{bmatrix} D_1 & D_2 \\ D_3 & D_4 \end{bmatrix}$ を $\text{GH}(q, 2)$ で各 $D_i (1 \leq i \leq 4)$ は $\text{GH}(q, 1)$ とする ([1] の Theorem 8.3.14 参照). このとき $N = F \times \langle a \rangle$ ($a^2 = 1$) とおけば $\begin{bmatrix} D_1 a & D_2 \\ D_3 & D_4 a \end{bmatrix}$ は $\text{GH}(q, 2)$ w.r.t. N/F である.

参考文献

- [1] T. Beth, D. Jungnickel and H. Lenz, "Design Theory" Volume I, Second Edition, Cambridge University Press, 1999.
- [2] A.D. Garciano, Y. Hiramane and T. Yokonuma, On Relative Difference Sets in Dihedral Groups, Designs, codes and Cryptography, Vol. 39, (2006) 51-63.
- [3] Y. Hiramane, On non-symmetric relative difference sets, Hokkaido Mathematical Journal, Vol. 37 (2008) 427-435.
- [4] Y. Hiramane, Modified generalized Hadamard matrices and constructions for transversal designs, to appear in Designs, Codes and Cryptography.
- [5] E. S. Lander, *Symmetric Designs : An Algebraic Approach*, Lecture Note Sries 74, Cambridge University Press, Cambridge.
- [6] S. L. Ma and A. Pott, Relative Difference Sets, Planar Functions, and Generalized Hadamard matrices, J. Algebra Vol. 175 (1995) 505-525.
- [7] B. Schmidt, *Characters and Cyclotomic Fields in Finite Geometry*, Lecture Notes in Mathematics 1797, Springer-Verlag, Berlin Heiderberg (2002)