数理解析研究所講究録
686巻 1989年 162-174

完全2組グラフのS_k因子分解

近畿大理工　潮 和彦 (Kazuhiko Ushio)

1. はじめに

S_kをk点を結ぶスターとする。成分がすべてS_kであるような全域部分グラフをS_k因子(S_k-Factor)とよぶ。完全2組グラフ$K_{m,n}$を，互いに線を共有しないように，S_k因子の和に分解するS_k因子分解の問題を考える。($k \geqq 3$)
S_k因子分解を巡回的に構成するときbaseとなるS_k因子をBase Factorとよぶ。Base Factorを用いたS_k因子分解について述べる。

2. $K_{m,n}$のS_k因子分解

$K_{m,n}$の2組の点集合をV_1, V_2 ($|V_1|=m, |V_2|=n$)とする。$K_{m,n}$のS_k因子分解において，S_k因子の数をr，1つのS_k因子に含まれるS_k成分の数をt，分解によって得られるS_k成分の総数をbとする。1つのS_k因子に含まれるt個のS_k成分のうち，中心点がV_1にあるS_k成分の数をt_1，中心点がV_2にあるS_k成分の数をt_2とする。分解によって得られたb個のS_k成分のうち，V_1の点uが中心点となるS_k成分の数をr_1，V_2の点vが中心点と

なるS_k成分の数をr_2とする。

<u>定理1</u>　$K_{m,n}$がS_k因子分解可能

$$\Longrightarrow \begin{cases} b=\frac{mn}{k-1},\ t=\frac{m+n}{k},\ r=\frac{kmn}{(k-1)(m+n)},\ t_1=\frac{(k-1)n-m}{k(k-2)}, \\ t_2=\frac{(k-1)m-n}{k(k-2)},\ r_1=\frac{\{(k-1)n-m\}n}{(k-1)(k-2)(m+n)},\ r_2=\frac{\{(k-1)m-n\}m}{(k-1)(k-2)(m+n)}, \\ m\leqq(k-1)n,\ n\leqq(k-1)m \end{cases}$$

このとき，$m=t_1+(k-1)t_2$，$n=(k-1)t_1+t_2$ が成り立つ。r_1, r_2は点u, vにdependしない。

<u>定理2</u>　$K_{n,n}$がS_k因子分解可能

$$\Longrightarrow n\equiv 0\ (\mathrm{mod}\ 2k(k-1))\ (k:\mathrm{odd}),\ n\equiv 0\ (\mathrm{mod}\ k(k-1))\ (k:\mathrm{even})$$

<u>定理3</u>　$K_{m,n}$がS_3因子分解可能

$$\Longleftrightarrow b=\frac{mn}{2},\ t=\frac{m+n}{3},\ r=\frac{3mn}{2(m+n)},\ m\leqq 2n,\ n\leqq 2m$$

<u>定理4</u>（拡張定理）　$K_{m,n}$がS_k因子分解可能

$$\Longrightarrow K_{am,an}\text{は}S_k\text{因子分解可能}$$

このため，kを固定したとき，比較的小さなm, nに対して，定理1の必要条件の十分性を調べたらよい。一般性を失うことなく$m\leqq n$と仮定して，$m\leqq n\leqq(k-1)m$の場合を調べる。

<u>定理5</u>　$m=n=2k(k-1)\Longrightarrow K_{m,n}$は$S_k$因子分解可能

<u>定理6</u>　$k:\mathrm{odd}$のとき，$K_{n,n}$がS_k因子分解可能

$$\Longleftrightarrow n\equiv 0\ (\mathrm{mod}\ 2k(k-1))$$

<u>定理7</u>　$n=(k-1)m\Longrightarrow K_{m,n}$は$S_k$因子分解可能

3. S_k因子分解の巡回的構成とBase Factor

$m \leqq n < (k-1)m$ とする。このとき，$m = t_1 + (k-1)t_2$, $n = (k-1)t_1 + t_2$ において，$t_1, t_2 \neq 0$ である。S_k因子分解を巡回的に構成するとき，Base FactorとなるS_k因子は次のBase条件をみたす。

> Base条件： $m = r_m \times m_0$, $n = r_n \times n_0$, $r = r_m \times r_n$,
> $t_1 = \alpha \times m_0$, $t_2 = \beta \times n_0$

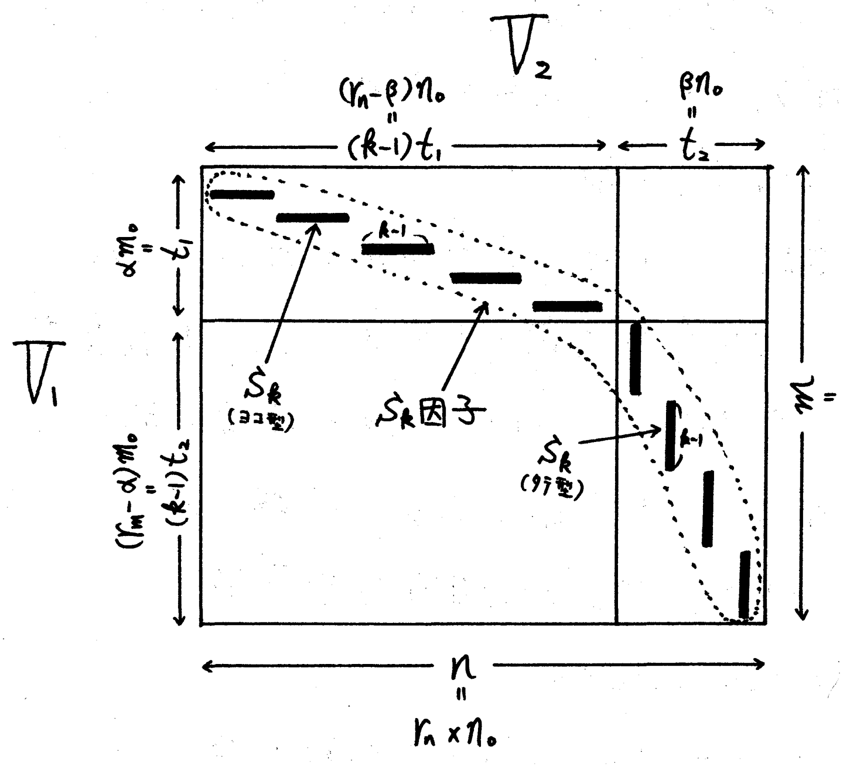
Base条件のもとで

$$m_0 n_0 = (k-1)t_1 + (k-1)t_2 = |E(S_k因子)|$$

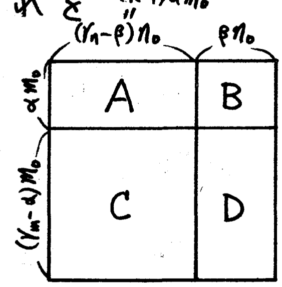
$$(k-1)t_1 = \{m_0 - (k-1)\beta\}n_0 = (r_n - \beta)n_0 \quad \therefore\ r_n - \beta = m_0 - (k-1)\beta$$

$$(k-1)t_2 = \{n_0 - (k-1)\alpha\}m_0 = (r_m - \alpha)m_0 \quad \therefore\ r_m - \alpha = n_0 - (k-1)\alpha$$

が成り立つ。これから，$m_0 > (k-1)\beta$, $n_0 > (k-1)\alpha$ が得られる。

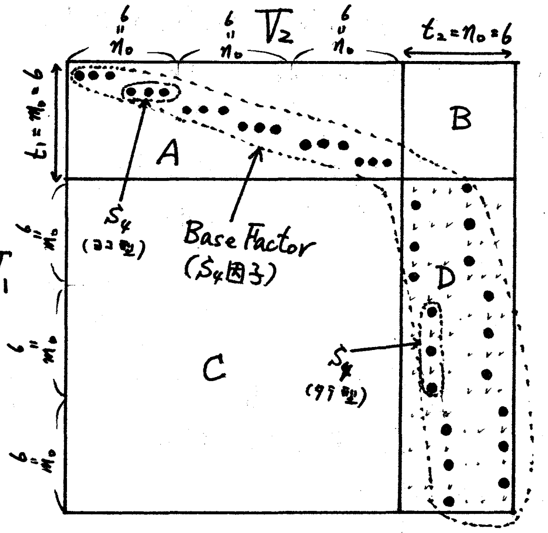


これを



とおく。

Base Factor の例 ($k=4, m=24, n=24, t_1=m_0=6, t_2=n_0=6, \alpha=\beta=1$)

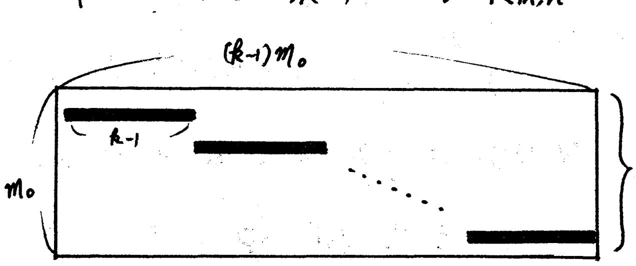


このBase Factor(S_4因子)を右へ $n_0=6$ ずつ,下へ $m_0=6$ ずつ巡回的にシフトさせれば, $4\times4=16$ 個の S_4因子が得られ,それらの和が $K_{24,24}$ の S_4因子分解を与える。

この例から分るように,領域Aではヨコ型 S_k(中心点が V_1 にある S_k)を t_1 個とり,領域Dではタテ型 S_k(中心点が V_2 にある S_k)を t_2 個とってできる S_k因子を上手に選び,この S_k因子を右へ n_0 ずつ,下へ m_0 ずつ巡回的にシフトさせ, $v_m\times v_n$ 個の S_k因子が,領域A,B,C,Dを過不足なくカバーするならば,もとの S_k因子はBase Factorであり,得られた $v_m\times v_n$ 個の S_k因子の和が $K_{m,n}$ の S_k因子分解を与える。この事は,定理1の必要条件をみたすパラメータ m, n, k がBase条件をもみたすとき,常に成り立つ。以下にそれを示す。

Lemma 1 $\alpha=\beta=1$ のBase条件 $\Longrightarrow K_{m,n} \xrightarrow{F} S_k$

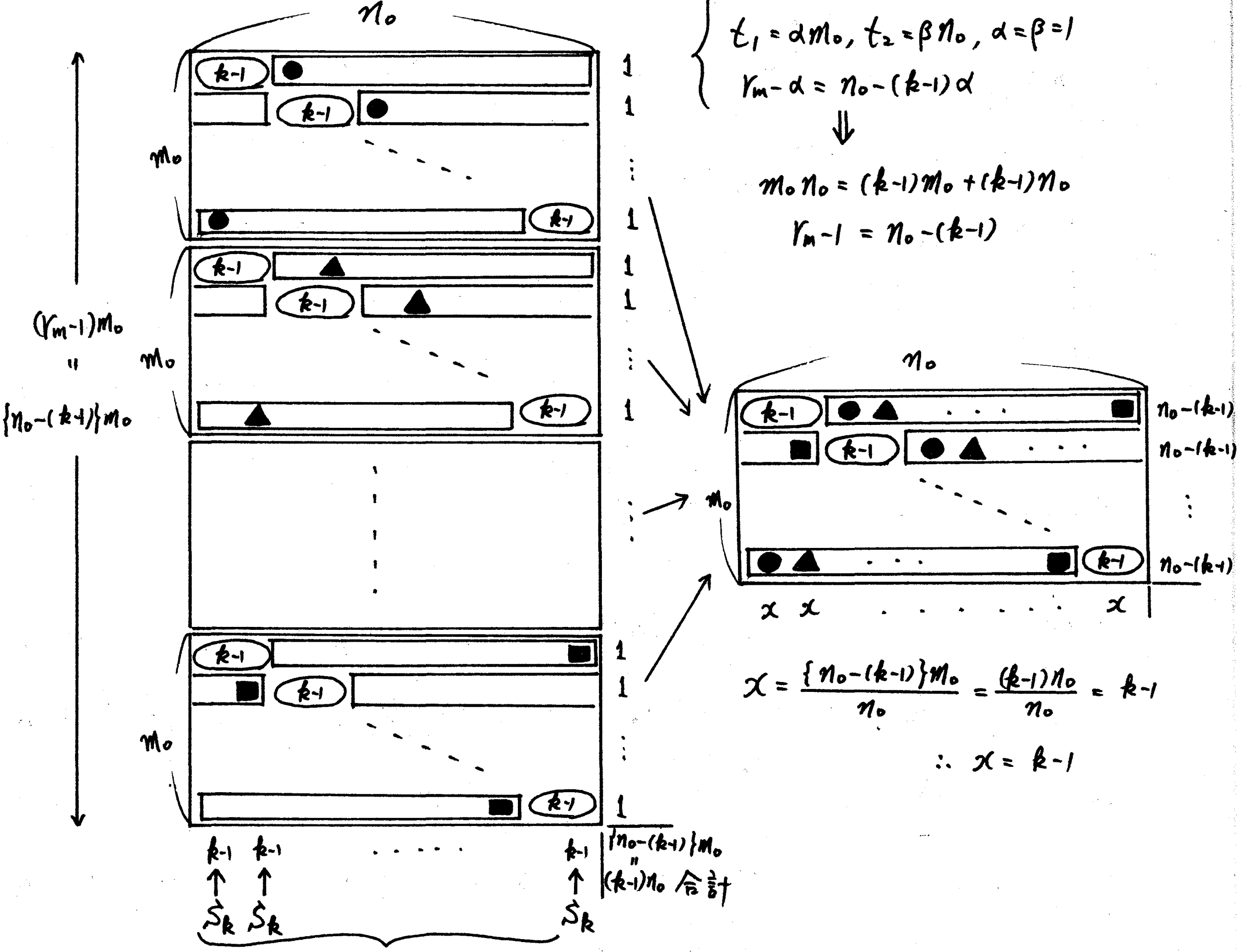
⊙領域A



ヨコ型 S_k を m_0 個とる。

領域D

$$\begin{cases} m_0 n_0 = (k-1)t_1 + (k-1)t_2 \\ t_1 = \alpha m_0,\ t_2 = \beta n_0,\ \alpha = \beta = 1 \\ \gamma_m - \alpha = n_0 - (k-1)\alpha \end{cases}$$
$$\Downarrow$$
$$m_0 n_0 = (k-1)m_0 + (k-1)n_0$$
$$\gamma_m - 1 = n_0 - (k-1)$$



$$x = \frac{\{n_0-(k-1)\}m_0}{n_0} = \frac{(k-1)n_0}{n_0} = k-1$$
$$\therefore\ x = k-1$$

タテ型 S_k を n_0 個とる。

この様に領域Aでヨコ型 S_k を m_0 個，領域Dでタテ型 S_k を n_0 個とれば Base Factor となる。

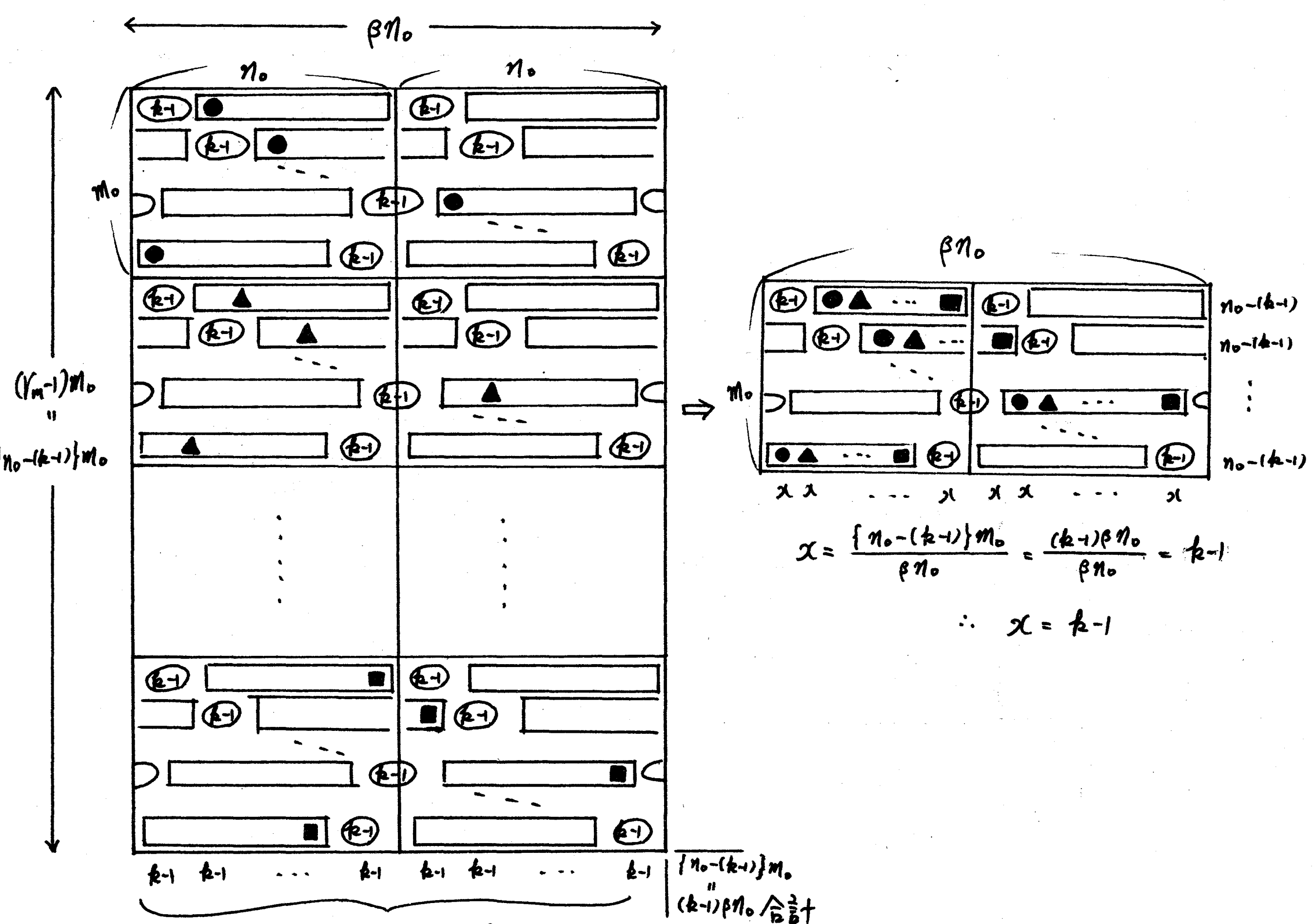
<u>Lemma2</u>　$\alpha = 1, \beta > 1$ の Base 条件, m_0 は β の倍数 $\Longrightarrow K_{m,n} \xrightarrow{F} S_k$

$\because$ 領域Aは Lemma1 と同じくヨコ型 S_k を m_0 個とる。

$$\left.\begin{aligned} & m_0 n_0 = (k-1)t_1 + (k-1)t_2 \\ & t_1 = \alpha m_0,\ t_2 = \beta n_0,\ \alpha = 1,\ \beta > 1 \\ & \gamma_m - \alpha = n_0 - (k-1)\alpha \end{aligned}\right\} \text{より} \quad \begin{aligned} & m_0 n_0 = (k-1)m_0 + (k-1)\beta n_0 \\ & \gamma_m - 1 = n_0 - (k-1) \end{aligned}$$

m_0 は β の倍数より，$(k-1)m_0$ は βn_0 の倍数となる。

領域Dでタテ型 S_k を次のような βn_0 個とる。



$$x=\frac{\{n_0-(k-1)\}m_0}{\beta n_0}=\frac{(k-1)\beta n_0}{\beta n_0}=k-1$$

$$\therefore\ x=k-1$$

タテ型 S_k を βn_0 個とる.

Lemma 3　$\beta=1,\ \alpha>1$ の Base 条件, n_0 は α の倍数 $\Longrightarrow K_{m,n}\xrightarrow{F}S_k$

∵ Lemma 2 で m と n を入れ替えればよい。

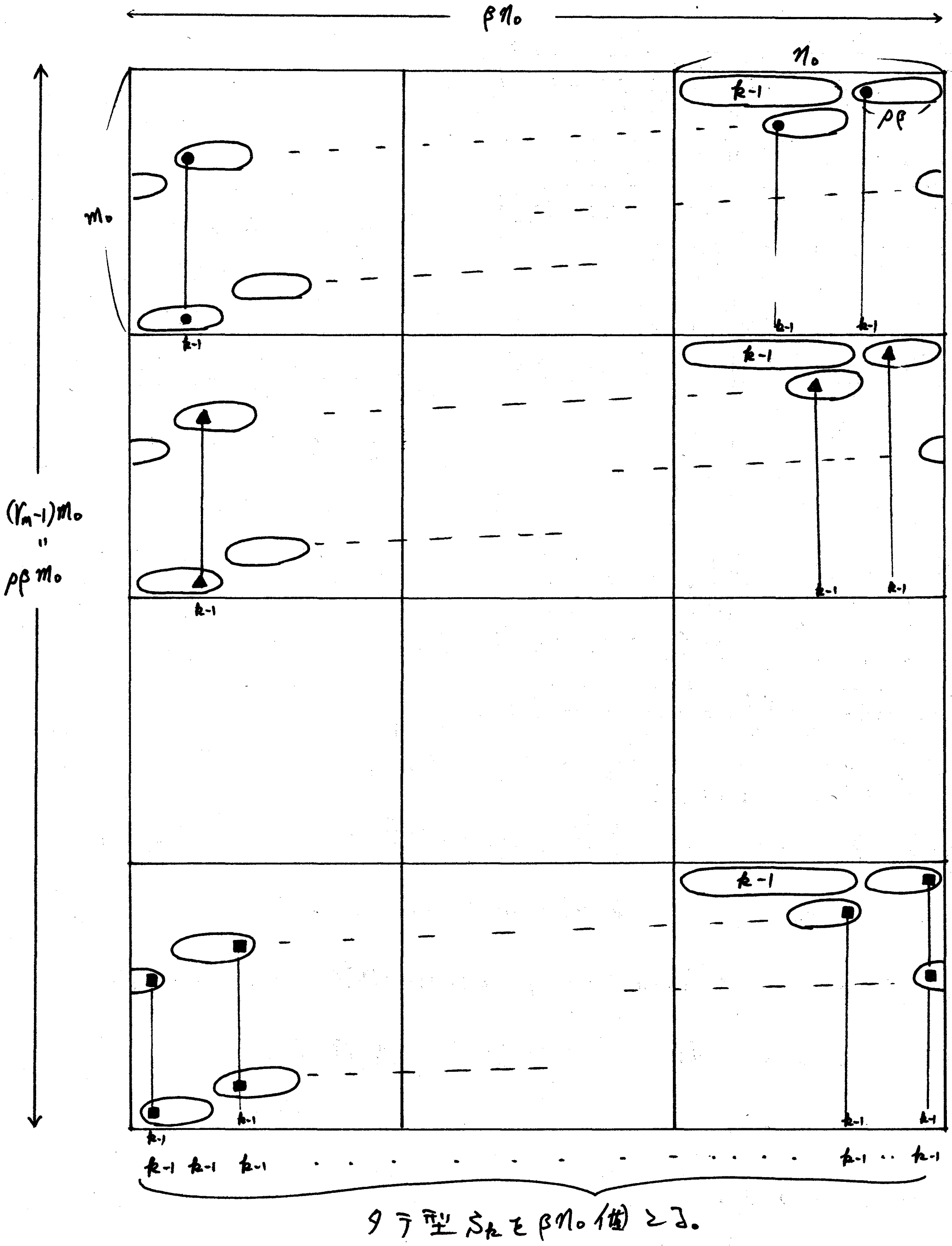
Lemma 4　$\alpha=1,\ \beta>1$ の Base 条件, $n_0-(k-1)$ は β の倍数 $\Longrightarrow K_{m,n}\xrightarrow{F}S_k$

∵ 領域A は Lemma 1 と同じくヨコ型 S_k を m_0 個とる。

$n_0-(k-1)=\rho\beta$ とおく。

$$\left.\begin{array}{l} m_0n_0=(k-1)t_1+(k-1)t_2 \\ t_1=\alpha m_0,\ t_2=\beta n_0,\ \alpha=1,\ \beta>1 \\ \gamma_m-\alpha=n_0-(k-1)\alpha \end{array}\right\}\text{より}\quad \begin{array}{l} \rho\beta\times m_0=(k-1)\times\beta n_0 \\ \gamma_m-1=\rho\beta \end{array}$$

領域Dでタテ型 S_k を次のように βn_0 個とる。



<u>Lemma5</u> $\beta=1,\ \alpha>1$ のBase条件, $m_0-(k-1)$ は α の倍数 $\Longrightarrow K_{m,n} \xrightarrow{F} S_k$

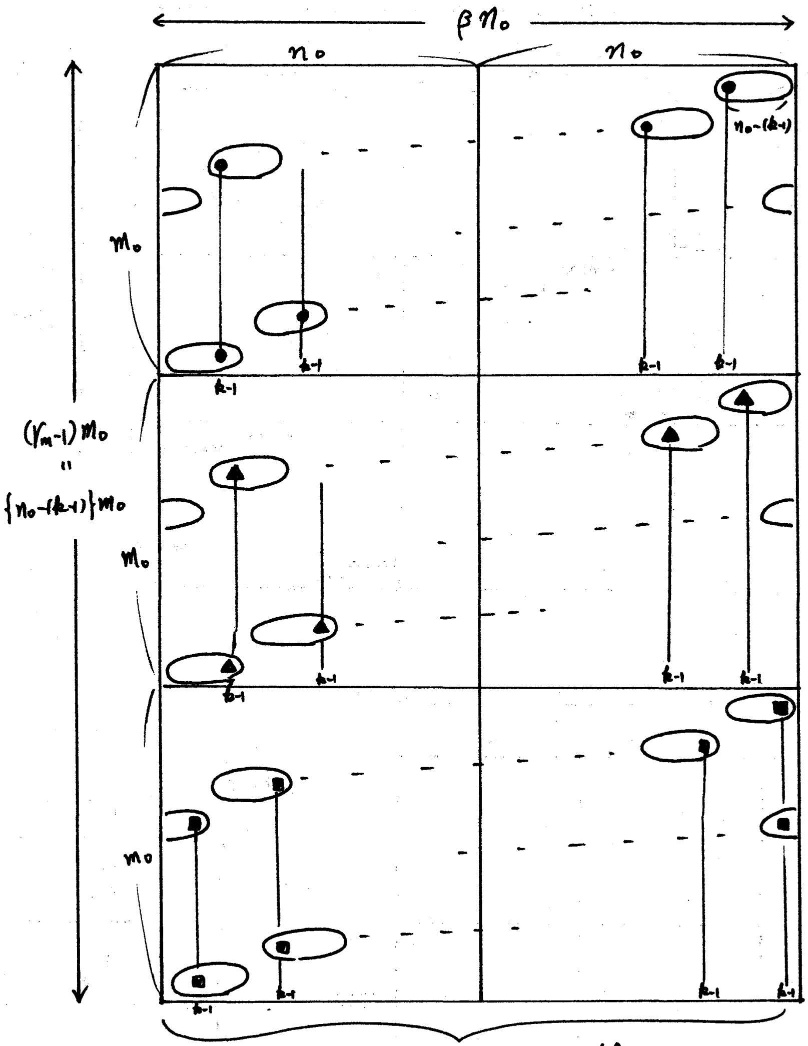
∵ Lemma4 で m と n を入れ替えればよい。

Lemma 6　$\alpha=1,\ \beta>1$ の Base 条件 $\Longrightarrow K_{m,n} \xrightarrow{F} S_k$

∵ 領域Aは Lemma 1 と同じくヨコ型 S_k を m_0 個とる。

$$\left.\begin{aligned} &m_0 n_0 = (k-1)t_1 + (k-1)t_2 \\ &t_1 = \alpha m_0,\ t_2 = \beta n_0,\ \alpha=1,\ \beta>1 \\ &r_m - \alpha = n_0 - (k-1)\alpha \end{aligned}\right\} \text{より} \qquad \begin{aligned} &m_0 n_0 = (k-1)m_0 + (k-1)\beta n_0 \\ &r_m - 1 = n_0 - (k-1) \\ &\therefore \{n_0 - (k-1)\} \times m_0 = (k-1) \times \beta n_0 \end{aligned}$$

領域D



タテ型 S_k を βn_0 個とる。

Lemma 7　$\beta=1,\ \alpha>1$ の Base 条件 $\Longrightarrow K_{m,n} \xrightarrow{F} S_k$

∵ Lemma 6 で m と n を入れ替えればよい。

<u>Lemma 8.1</u> $\alpha,\beta \geqq 2$ のBase条件，$r_n-\beta$はαの倍数，m_0はαの倍数，$\{n_0-(k-1)\alpha\}\times\frac{m_0}{\alpha}$は$\beta n_0$の倍数 $\Longrightarrow K_{m,n} \xrightarrow{F} S_k$

$\because$

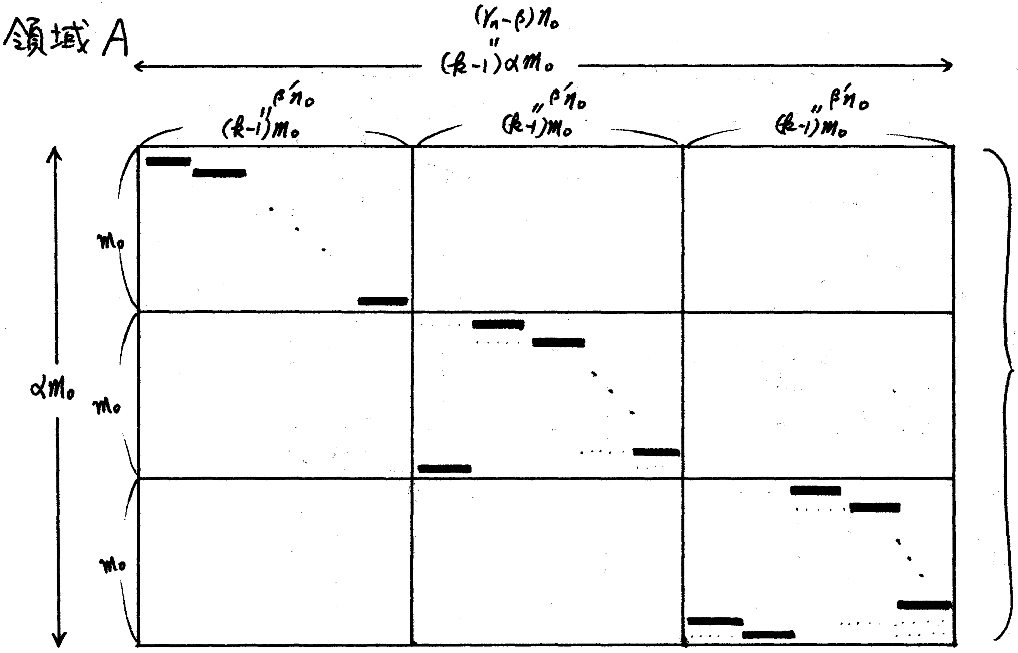
$$\left.\begin{aligned} m_0 n_0 &= (k-1)\alpha m_0 + (k-1)\beta n_0 \\ r_m-\alpha &= n_0-(k-1)\alpha \\ r_n-\beta &= m_0-(k-1)\beta \end{aligned}\right\} \text{より}$$

$\frac{r_n-\beta}{\alpha} = \beta'$ とおく

$$\beta' n_0 = \frac{r_n-\beta}{\alpha} n_0 = \frac{\{m_0-(k-1)\beta\} n_0}{\alpha} = \frac{(k-1)\alpha m_0}{\alpha} = (k-1)m_0$$

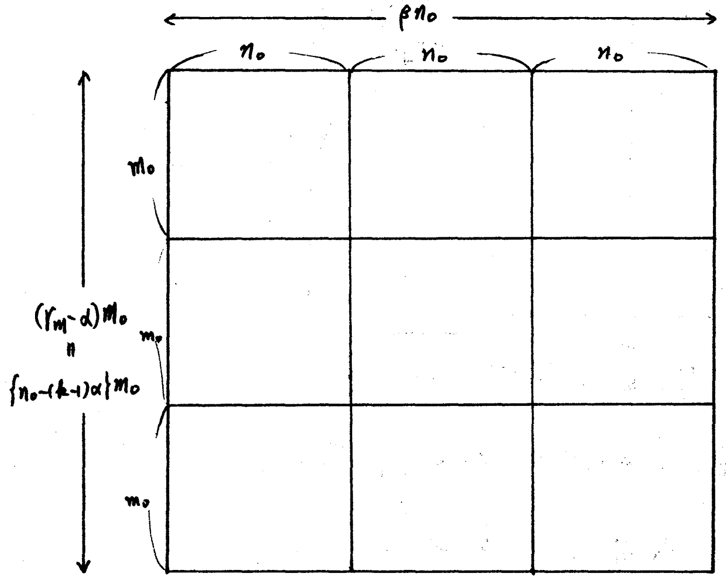
$$\therefore\ (k-1)m_0 = \beta' n_0$$

領域A

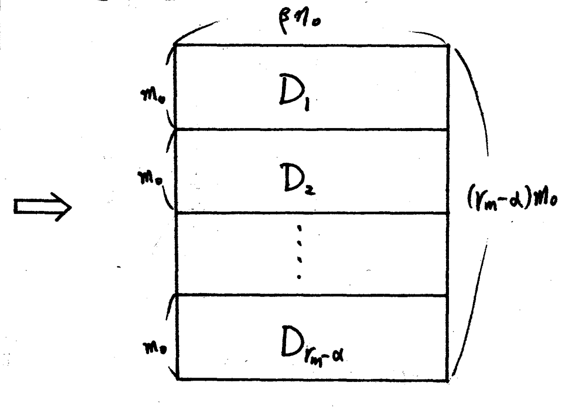


ヨコ型S_kをαm_0個とる。

領域D

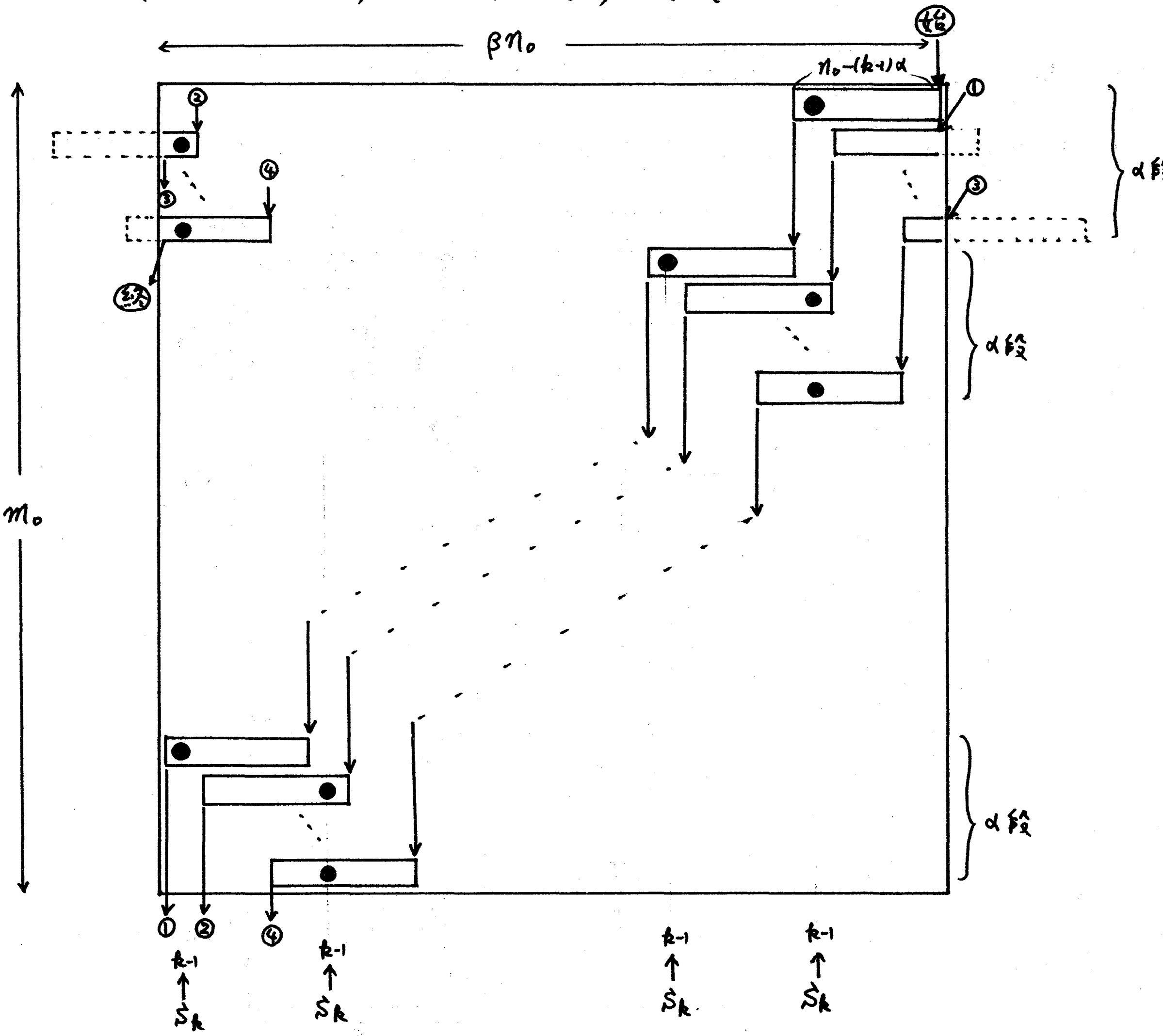


これを



とおく。

m_0はαの倍数，$\{n_0-(k-1)\alpha\}\times\frac{m_0}{\alpha}$は$\beta n_0$の倍数であるから，各領域$D_i$は$m_0$個の$1\times\{n_0-(k-1)\alpha\}$の小領域（これをボックスとよぶ）を図のように$\alpha$段下りに巡回的にもつ。このボックスはタテ型$S_k$がとられる領域である。例えば，領域$D_1$では：



$D_2, D_3, \cdots$では●の位置を1つずつ右へとる。Dでタテ型S_kがβn_0個とられる。

<u>Lemma 9.1</u> $\left.\begin{array}{l}\alpha,\beta\geqq 2\text{のBase条件}, r_m-\alpha\text{は}\beta\text{の倍数}\\ n_0\text{は}\beta\text{の倍数}, \{m_0-(k-1)\beta\}\times\frac{n_0}{\beta}\text{は}\alpha m_0\text{の倍数}\end{array}\right\}\Longrightarrow K_{m,n}\xrightarrow{F}S_k$

Lemma 8.2　$\alpha, \beta \geqq 2$ の Base 条件, $r_n-\beta$ は α の倍数, m_0 は α の倍数, $\{n_0-(k-1)\alpha\}\times\frac{m_0}{\alpha}$ は βn_0 の倍数でない $\Bigg\} \Longrightarrow K_{m,n} \xrightarrow{F} S_k$

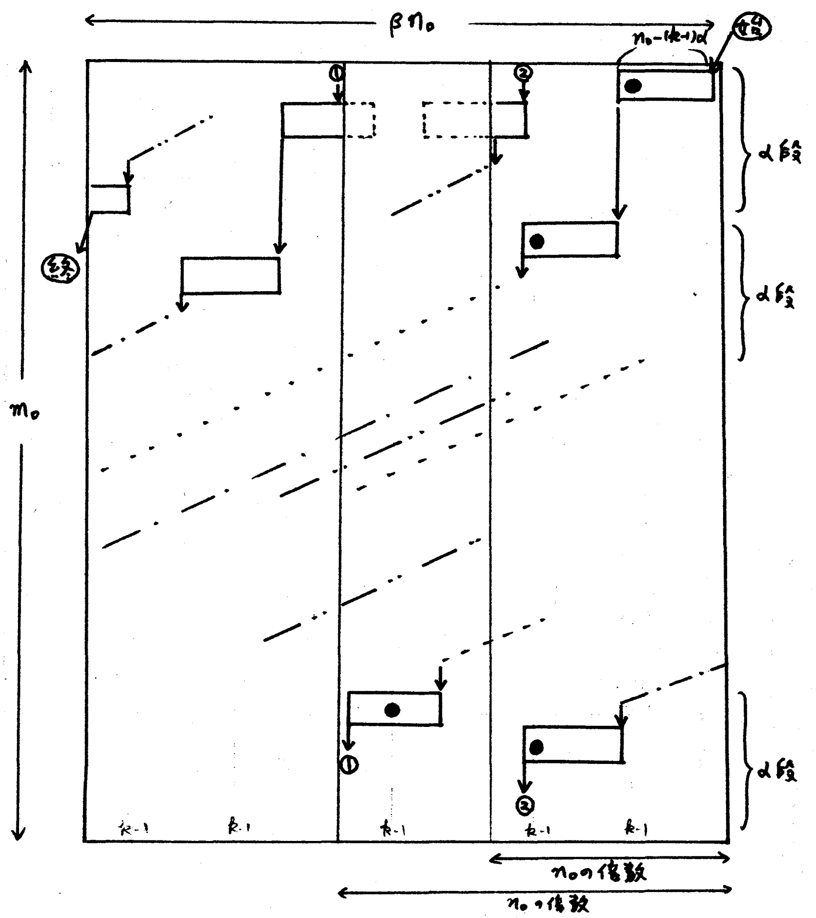
∵ 領域Aは Lemma 8.1 と同じくヨコ型 S_k を αm_0 個とる。

$\frac{r_n-\beta}{\alpha} = \frac{m_0-(k-1)\beta}{\alpha} = \frac{m_0}{\alpha} - \frac{(k-1)\beta}{\alpha}$　∴ $\frac{(k-1)\beta}{\alpha}$: integer

$\{n_0-(k-1)\alpha\}\times\frac{m_0}{\alpha} = \frac{(k-1)\beta n_0}{\alpha} = \frac{(k-1)\beta}{\alpha}\times n_0$　∴ $\{n_0-(k-1)\alpha\}\times\frac{m_0}{\alpha}$ は n_0 の倍数

各 D_i は m_0 個のボックスを α 段下りた巡回的にもつ。例えば,

D_1 では：



$D_2, D_3, \cdots$ では●の位置を1つずつ右へとる。Dでタテ型 S_k が βn_0 個とられる。

Lemma 9.2　$\alpha, \beta \geqq 2$ の Base 条件, $r_m-\alpha$ は β の倍数, n_0 は β の倍数, $\{m_0-(k-1)\beta\}\times\frac{n_0}{\beta}$ は αm_0 の倍数でない $\Bigg\} \Longrightarrow K_{m,n} \xrightarrow{F} S_k$

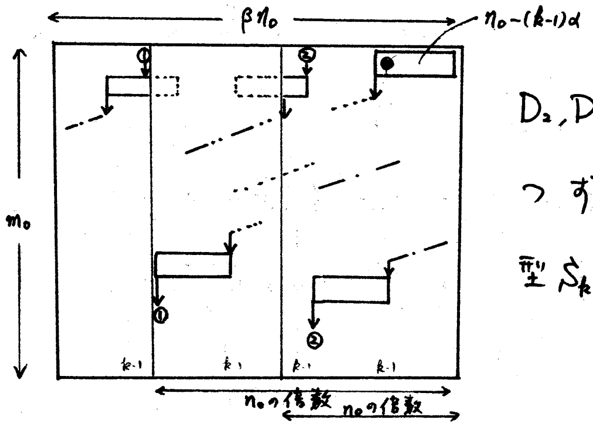
<u>Lemma 8.3</u>　$\left.\begin{array}{l}\alpha,\beta\geqq 2 \text{ のBase条件, } r_n-\beta \text{ は } \alpha \text{ の倍数} \\ m_0 \text{ は } \alpha \text{ の倍数でない}\end{array}\right\}\Longrightarrow K_{m,n}\xrightarrow{F}S_k$

∵ 領域Aは Lemma 8.1 と同じくヨコ型 S_k を αm_0 個とる。

$(m_0,\alpha)=d$, $m_0=dm_0'$, $\alpha=d\alpha'$, $(m_0',\alpha')=1$ とおく。$\frac{r_n-\beta}{\alpha}=\beta'$ とおく。

$r_n-\beta=m_0-(k-1)\beta$ より, $m_0-(k-1)\beta=\alpha\beta'$　$(k-1)\beta=m_0-\alpha\beta'$ ∴ $\frac{(k-1)\beta}{d}=\frac{m_0-\alpha\beta'}{d}=m_0'-\alpha'\beta'$

このとき, $\{n_0-(k-1)\alpha\}\times m_0'=\frac{\{n_0-(k-1)\alpha\}m_0}{d}=\frac{(k-1)\beta n_0}{d}=\frac{(k-1)\beta}{d}\times n_0$ ∴ $\{n_0-(k-1)\alpha\}\times m_0'$ は n_0 の倍数である。各 D_i で, 才1段から出発して m_0' 個のボックスを α 段下りに巡回的にとる。次に, 才2段の続きのボックスから出発して m_0' 個のボックスを α 段下りに巡回的にとる。… 終りに, 才 d 段の続きのボックスから出発して m_0' 個のボックスを α 段下りに巡回的にとる。このとき D_i では, m_0 個のボックスが各段1個ずつとられる。例えば, D_1 では:



$D_2, D_3, \cdots$ では ● の位置を1つずつ右へとる。D でタテ型 S_k が βn_0 個とられる。

<u>Lemma 9.3</u>　$\left.\begin{array}{l}\alpha,\beta\geqq 2 \text{ のBase条件, } r_m-\alpha \text{ は } \beta \text{ の倍数} \\ n_0 \text{ は } \beta \text{ の倍数でない}\end{array}\right\}\Longrightarrow K_{m,n}\xrightarrow{F}S_k$

<u>Lemma 8</u> $\alpha, \beta \geqq 2$ のBase条件, $r_n - \beta$ は α の倍数 $\Longrightarrow K_{m,n} \xrightarrow{F} S_k$

∵ Lemma 8.1−8.3 より成立。

<u>Lemma 9</u> $\alpha, \beta \geqq 2$ のBase条件, $r_m - \alpha$ は β の倍数 $\Longrightarrow K_{m,n} \xrightarrow{F} S_k$

∵ Lemma 9.1−9.3 より成立。

<u>Lemma 10</u> $\alpha, \beta \geqq 2$ のBase条件, $r_n - \beta$ は α の倍数でない, $r_m - \alpha$ は β の倍数でない $\Longrightarrow K_{m,n} \xrightarrow{F} S_k$

∵ $(n_0, \alpha) = d_1,\ n_0 = d_1 n_0',\ \alpha = d_1 \alpha',\ (n_0', \alpha') = 1$, $(m_0, \beta) = d_2,\ m_0 = d_2 m_0',\ \beta = d_2 \beta',\ (m_0', \beta') = 1$ とおく。

$r_m - \alpha = n_0 - (k-1)\alpha$, $r_n - \beta = m_0 - (k-1)\beta$ より, r_m は d_1 の倍数, r_n は d_2 の倍数。$r_m = d_1 r_m'$, $r_n = d_2 r_n'$ とおく。$m' = r_m' \times m_0'$, $n' = r_n' \times n_0'$ とおけば, $m = d_1 d_2 \times m'$, $n = d_1 d_2 \times n'$ となる。m', n' は定理1の必要条件およびBase条件をみたす。また, $r_n' - \beta'$ は α' の倍数, $r_m' - \alpha'$ は β' の倍数がいえるので, Lemma 1−9 より $K_{m',n'} \xrightarrow{F} S_k$。拡張定理より $K_{d_1 d_2 m', d_1 d_2 n'} \xrightarrow{F} S_k$ $\therefore K_{m,n} \longrightarrow S_k$.

<u>定理8</u> 定理1の必要条件をみたすパラメータ m, n, k がBase条件をみたすとき, $K_{m,n}$ は S_k 因子分解可能。

参考文献

[1] H. Enomoto, T. Miyamoto and K. Ushio, C_k-factorization of complete bipartite graphs, Graphs and Combinatorics 4 (1988) 111−113.

[2] K. Ushio, P_3-factorization of complete bipartite graphs, Discrete Math. 72 (1988) 361−366.