

PARTITION CALCULUS in $\omega^* = \beta\omega \setminus \omega$

防衛大 加藤昭男 (AKIO KATO)

いわゆる set の partition calculus は広く研究されて
いるが、この partition と topological space について考
えた "topological partition calculus" が最近話題になっ
ている。特に W. Weiss (Toronto 大学, カナダ), Mal'ychin
(ソ連) の研究が著しい。この稿では Stone-Ćech の
remainder $\omega^* = \beta\omega \setminus \omega$ (ω は自然数全体) の最も簡単な
partition について調べる。この研究は W. W. Comfort
(Wesleyan 大学, USA) と S. Shelah (イスラエル) と組むとの
共同研究による結果である。

$$[X]^k = \{x \subseteq X : |x| = k\}$$

Topological spaces X, Y 及び cardinals k, λ に対し、 \mathbb{N} の
表現 $X \rightarrow (Y)_\lambda^k$ は次の意味とする:

$[X]^k$ を λ 個に任意に分割 $[X]^k = \bigcup_{i < \lambda} P_i$ したとき、
或る $i < \lambda$ と、 Y の homeomorphic copy $Y' \subseteq X$ とが見つ
かり、 $[Y']^k \subseteq P_i$ となる。

我々が取扱うのは $k=1, \lambda=2$ の簡単な場合であり、このとき $X \rightarrow (Y)_2^1$ は次の意味となる:

"Topological space X を任意に 2 つに分けた $X = P_0 \cup P_1$ とし、topological space Y は P_0 か P_1 のいずれかの中へ homeomorphic に embed される。"

ここで注意したいのは、分割 $X = P_0 \cup P_1$ は全く任意な単なる set としての分割であって、 P_0, P_1 が Borel set である必要はないとかの付加条件は全く付いていないということである。それにもかわらず P_0 か P_1 かのどちらかが topological space Y の copy を含まなければならぬ、ということである。この "set theory" と "topology" とがうまくかさんでいる点が興味を引くのである。まず次の明らかなことが基礎的な事実を確認しておく:

$X \rightarrow (Y)_2^1$ のとき、 $X \subset X', Y' \subset Y$ ならば
 $X' \rightarrow (Y')_2^1$ である。

(一般に $X \subset X'$ は X が X' の中に homeomorphic に embed されることを表わして置く。) 具体例を挙げよう。

Real line \mathbb{R} の中の subset S で、 S も $\mathbb{R} \setminus S$ も Cantor set C を全く含まないものがある、というのは Bernstein のよく知られた結果であるが、これは $\mathbb{R} \rightarrow (C)_2^1$ と表わされる。一方、有理数の空間 \mathbb{Q} に対しては $\mathbb{Q} \rightarrow (\mathbb{Q})_2^1$

が成立することは見易い。 ω_1 に通常の interval topology を考えた場合、stationary & co-stationary set の存在は、 $\omega_1 \rightarrow (\omega_1)_2^1$ と表わされる。同じく未解決問題として $X \rightarrow (C)_2^1$ (C は Cantor set) となる regular space X が存在するか? という問題がある。GCH のもとでは存在しないことがわかっている。これを参照せよ。

*W. Weiss "Partitioning topological spaces" In: The Math. of Ramsey Theory (Ed: Nešetřil & Rödl) Springer-Verlag (1990)

*W. Weiss, "Weiss's Questions" In: Open Problems in Topology (Ed: van Mill & Reed) pp.77-84 North-Holland (1990)

*V. Mal'akhin "Results on Consistency in Topology" Trans. Moscow Math. Soc. (1987) pp.145-171 (Труды Москов. Матем. Общ. Том 49: 1986)

我々の relation $\omega^* \rightarrow (Y)_2^1$ について調べる。

§1 では $|Y| = 2^c$ のとき否定的であることを示し、§2 では単純な P -space については肯定的であることを示し、§3 では、

$Y = \omega \cup \{p\} \subseteq \beta\omega$ ($p \in \omega^*$ は任意) について否定的であることを示す。この最後の結果から ω の infinite, countably compact space Y について否定的であることがわかる。§1 は Comfort の結果、§2 は私の結果、§3 は Shelah による。

Shelah の note はたった 2 ページの書きなぐりであり、これを解釈するのにかなりの時間がかかってしまった。

§1. Failure for large spaces.

1.1 Lemma. $Y \subseteq \omega^*$ の \approx collection $\{A \subseteq \omega^* : A \approx Y\}$ の cardinality は 2^c である。 (\approx は "homeomorphic" の意.)

Proof. 上の collection を A と記す。 ω^* の中には pairwise disjoint な copies of ω^* を 2^c 個とれるから $|A| \geq 2^c$ である。
一方、 Y の density $\leq Y$ の weight $\leq \omega^*$ の weight $= c$ であるから Y から ω^* の中への continuous maps の個数は $\leq |\omega^*|^c = (2^c)^c = 2^c$ である。 $\therefore |A| \leq 2^c$. ☺

証明の終りは、"smile" で示す方の \approx relax して下す。
この 1.1 により、Bernstein set の構成と全く同じ手法により次の定理が得られる。

1.2 Theorem. \forall space Y , $|Y| = 2^c$ に対す。 $\omega^* \not\rightarrow (Y)_2^1$.

Proof. $|Y| = 2^c$ とする。 ω^* がある $Y \subseteq \omega^*$ としよ。
 ω^* の partition $\omega^* = P_0 \cup P_1$ 2, 2 の P_i は copy of Y を含むものを作る。 1.1 により $\{A \subseteq \omega^* : A \approx Y\} = \{A_\xi : \xi < 2^c\}$ とわかる。 $|A_\xi| = 2^c$ である。 "Disjoint Refinement Lemma" (cf. Comfort-Negrepontis "The theory of ultrafilters" Springer (1974) p.146) により、 disjoint collection $\{B_\xi : \xi < 2^c\}$ 2,

$B_\xi \subseteq A_\xi$, $|B_\xi| = 2^c$ なるものをとれる。各 B_ξ から 1 点 x_ξ をとれ。 $P_0 = \{x_\xi : \xi < 2^c\}$, $P_1 = \omega^* \setminus P_0$ と定めれば、求める partition $\omega^* = P_0 \cup P_1$ が得られる。 😊

§2. Affirmative for Simple P-spaces.

G_δ -subset が、常に open になるような space は P-space と呼ばれる。 (X, τ) が topology τ をもつ space であるとき、その中の G_δ -subsets 全体を改めて open base と考へれば、新しい topological space が得られる。この P-space を $(X, P\tau)$ または単に PX と表わす。 $Y \subseteq X$ なるものは $PY \subseteq PX$ であるから、次は明らか。

2.1 Lemma. $X \rightarrow (Y)_2^1$ なるものは $PX \rightarrow (PY)_2^1$. 😊

この lemma は van Douwen による。証明は J. van Mill "An introduction to $\mathfrak{p}\omega$ " in the Handbook of Set-theoretic Topology (1984) の 558-559 ページを見よ。これは純粋に ZFC の結果である！

2.2 Lemma. Weight $\leq c$ の $\mathfrak{p}\omega$ の P-space は ω^* の中に embed できる。 😊

この 2.2 は、"P-space Y に対しては、 $Y \subseteq \omega^*$ と $Y \subseteq \{0,1\}^c$ とは equivalent である" と言い表わしてもよい。我々の partition calculus に関するのは、P-space を

問題にする限り, ω^* の役割は $\{0,1\}^c$ と同じであることが言える。すなわち,

2.3 Theorem. 任意の P -space Y に対し, $\omega^* \rightarrow (Y)_2^1$ は $\{0,1\}^c \rightarrow (Y)_2^1$ と同等である。

Proof. $\omega^* \subseteq \{0,1\}^c$ であるから, 前者が成立すれば後者が成立することは明らかである。そこで, いま, 後者の成立を仮定せよ。2.1 により $P(\{0,1\}^c) \rightarrow (Y)_2^1$. $P(\{0,1\}^c)$ は weight c の P -space であるから, 2.2 により embeddable into ω^* . 中々に, $\omega^* \rightarrow (Y)_2^1$ を得る。☺

κ を infinite cardinal とする。Set $\kappa+1 = \kappa \cup \{\kappa\}$ 上に次のような topology を考えた space を P_κ と表わす: subset κ は discrete & open であり, point κ の周りの nbd base は $\kappa+1$ 上の interval topology を考えたときのものである。cof(κ) $> \omega$ のとき, P_κ は (non-discrete な) P -space である。次の lemma は, 簡単であるが essential である。

2.4 Lemma. 任意の infinite card. κ に対し, $P_\kappa \times P_\kappa \rightarrow (P_\kappa)_2^1$ が成立する。

Proof. $P_k \times P_k = X_0 \cup X_1$ を任意の partition とする。

一般性を失うことなく、点 $(k, k) \in P_k \times P_k$ は X_0 に属するとしよ。 $S_\xi = \{\xi\} \times (P_k \setminus \xi)$, $\xi < k$, とおくと、 $S_\xi \approx P_k$.

従って、もし "或る $\xi < k$ に対し $S_\xi \subseteq X_1$ " と仮定するならば、

$P_k \not\subseteq X_1$ である。 そうでない場合は、各 $\xi < k$ に対し、 $S_\xi \cap X_0$

は non-empty であり、こゝから 1 点 P_ξ をとれる。 このとき

subset $\{P_\xi : \xi < k\} \cup \{(k, k)\}$ は P_k に homeo. な subspace in X_0

であるから $P_k \subseteq X_0$. ☺

$\omega_1 \leq k \leq \mathfrak{c}$ & $\text{cof}(k) > \omega$ のとき、 $P_k \times P_k$ は weight $\leq \mathfrak{c}$ の P -space であるから、2.2 と 2.4 とから次を得る。

2.5 Theorem. $\omega_1 \leq k \leq \mathfrak{c}$, $\text{cof}(k) > \omega$ なるすべての card.

k に対し、 $\omega^* \rightarrow (P_k)_2^1$ が成立する。 ☺

ω^* の中には cardinal $2^{\mathfrak{c}}$ の P -space も存在するから、

1.2 によつて、relation $\omega^* \rightarrow (Y)_2^1$ がすべての P -space $Y \subseteq \omega^*$

にのみ成立するわけではない。 具体例として $Y = P(\omega^*)$

又は $P(\{0,1\}^{\mathfrak{c}})$ がある。 C_k を discrete space k の one-point

compactification とする時、2.4 と同様に $C_k \times C_k \rightarrow (C_k)_2^1$ が

成立する。従って、これとは $\{0,1\}^k \rightarrow (C_k)_2^1$ for every k である。

§3. Failure for $\omega \cup \{p\}$.

$p \in \omega^*$ を任意の point とし、以下 完全に fix する。
 Subspace $\omega \cup \{p\} \subseteq \beta\omega$ を考へるとき、 $\omega^* \rightarrow (\omega \cup \{p\})_2^1$
 とする = とを示す。この § の結果は、次の Shelah の note
 の "解説" による。

* * * SHELAH'S NOTE * * * * *

Now we can pin down the problem of $\omega^* \rightarrow (\omega \cup \{p\})_2^1$.

Call $X \subseteq \omega^*$ p -closed* if:

(a) if $\lim_p \langle q_n : n \in \omega \rangle \in X$, then $\{n \in \omega : q_n \in X\} \in P$;

equivalently:

(a)* if $r \in X$, $p \leq_{RF} r$, then $\langle \exists q_n \in X : n \in \omega \rangle, \lim_p \langle q_n : n \in \omega \rangle = r$.

We try to choose by induction on $i < 2^c$, X_i, h_i such that

(a) X_i, h_i increasing, continuous

(b) X_i is p -closed*

(c) $h_i : X_i \rightarrow \{\text{green, red}\}$ with no monochromatic copy
 of $\omega \cup \{p\}$.

Let $\langle^* \rangle$ be the well-ordering of ω^* of order type 2^c . For $i=0$,

let $X_0 = \emptyset$. For i limit, take union. For $i=j+1$ choose

$s_i \in \omega^* \setminus X_j$ $\langle^* \rangle$ -minimal.

Subcase (a): X_j is not p -closed in the old sense.

$$X_i \stackrel{\Delta}{=} X_j \cup \{v : v = \lim_p \langle g_\ell : \ell \in \omega \rangle, g_\ell \in X_j\}$$

$$h_i \stackrel{\Delta}{=} h_j \cup \{(v, 1 - \lim_p \langle h_j(g_\ell) : \ell \in \omega \rangle) : v \in X_i \setminus X_j\}$$

By the uniqueness claims h_i is O.K.

Subcase (b): X_j is p -closed in the old sense.

We choose by induction on $n \in \omega$ for every $\eta \in {}^n \omega$:

$g_\eta \in \omega^*$ & A_η such that

$$\left\{ \begin{array}{l} g_{\langle i \rangle} = s_i, \quad A_\eta \in g_\eta, \quad A_{\eta \hat{\langle i \rangle}} \subseteq A_\eta \\ \langle A_{\eta \hat{\langle i \rangle}} : i \in \omega \rangle \text{ are pairwise disjoint.} \\ \lim_p \langle g_{\eta \hat{\langle i \rangle}} : i \in \omega \rangle = g_\eta \end{array} \right.$$

No problems to do this — the A_η witness $\eta \neq \nu \Rightarrow g_\eta \neq g_\nu$.

Now give color to g_η according to $\text{length}(\eta)$ even or odd.

* * * * *

この note の中で馬鹿(じみ)にこの概念は“ p -closed*” であるか? ところが実は、 ω^* に非常に finer な topology を入れた時の open set の概念と同じになるのである。

以下、 X は、常に ω^* の subset を表わすとする。 X の中の countable, discrete subsets 全体を $\mathbb{D}(X)$ と表わす。“countable” は、いつも countably infinite の量とする。各 $A \in \mathbb{D}(X)$ に対し、 p -orbit w.r.t. A を $A[p]$ と記す。すなわち、

$$A[p] \triangleq \{ \beta f(p) \mid f: \omega \approx A \} \subseteq A^* \subseteq \omega^*$$

\supseteq " $\beta f: \beta \omega \approx \mathcal{C}A$ は f の Stone extension " である。 $\mathbb{R}P^5$ $A[p]$ は A の p -limits 全体である。 " $x \in A[p]$ " と同値な条件を列挙する:

$$x \in A[p] \stackrel{\text{def.}}{\iff} \exists f: \omega \approx A \quad \beta f(p) = x$$

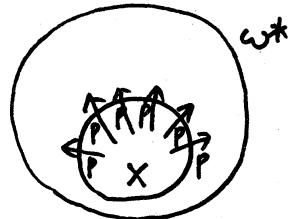
$$\iff \exists f: \omega \subseteq A \quad \beta f(p) = x$$

$$\iff \exists f: \omega \rightarrow A, \quad f \text{ is 1-1 on some } C \in p \text{ \& } \beta f(p) = x.$$

X と X の中の discrete sets の p -limits 全体とを合わせたものを X^p と記す:

$$X^p \triangleq X \cup \cup \{ A[p] : A \in \mathcal{D}(X) \}.$$

$X^p = X$, すなわち, $\forall A \in \mathcal{D}(X) \quad A[p] \subseteq X$ の時.



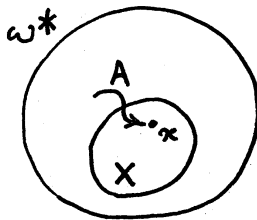
X は p -closed と呼ばれる。(これは " p -compact" と同じである)

すなわち: X は $\forall f: \omega \rightarrow X \quad \beta f(p) \in X$ のとき p -compact と呼ばれる。) 次の条件が成立するとき X を p -open と呼ぶ:

$$\forall x \in X, \forall A \in \mathcal{D}(\omega^*) \quad (x \in A[p] \rightarrow x \in (A \cap X)[p]).$$

\supseteq " 一般に, subset $C \subseteq \omega^*$ が finite の時は, $C[p] = \emptyset$ と約束する。

この p -open なる概念は Shelah's note の " p -closed*" に対応するものがある。



3.1 Lemma. $A \in \mathcal{D}(\omega^*)$, $B \subseteq A$ のとき, $A[p] \cap B^* = B[p]$.
 従って, $A = B \cup C$ ならば, $A[p] = B[p] \cup C[p]$ である。

Proof. $A[p] \cap B^* \subseteq B[p]$ を示せばよい。 $x \in A[p] \cap B^*$
 とすると, $\exists f: \omega \approx A$, $\{f(p) = x \text{ \& } f^{-1}(B) \in p\}$ である。
 $g: \omega \rightarrow B$ と $g = f$ on $f^{-1}(B)$ なる任意の function とすれば
 は, g は 1-1 on $f^{-1}(B) \in p$, かつ $\{g(p) = x\}$ であるから
 $x \in B[p]$. ☺

3.2 Cor. $X = X_0 \cup X_1$ ならば, $X^p = X_0^p \cup X_1^p$.

Proof. 3.1 を用い $A \in \mathcal{D}(X)$ に対して
 $A[p] = (A \cap X_0)[p] \cup (A \cap X_1)[p]$ とするから。 ☺

次の lemma は, "p-open" なる命名を正当化する。

3.3 Lemma. X は p-open $\iff \omega^* \setminus X$ は p-closed.

Proof. $X : \text{p-open} \iff \forall A \in \mathcal{D}(\omega^*) \quad A[p] \cap X \subseteq (A \cap X)[p]$.
 \iff 3.1 を用い $A[p] = (A \cap X)[p] \cup (A \setminus X)[p]$ であることに
 注意すれば, $\iff \forall A \in \mathcal{D}(\omega^*) \quad (A \setminus X)[p] \cap X = \emptyset$
 $\iff \forall B \in \mathcal{D}(\omega^* \setminus X) \quad B[p] \cap X = \emptyset$, i.e. $B[p] \subseteq \omega^* \setminus X$.
 $\iff \omega^* \setminus X : \text{p-closed}$. ☺

次の fact は, Frölik によるもの。通常 "no type produces itself" と表現される。証明は Katětov "A theorem on mappings" Comment Math. Univ. Carolinae 8 (1967) 431-433 又は, Walker の本 "The Stone-Čech compactifications" Springer (1974) p.152 を見よ。

3.4 Fact. Embedding $\beta\omega \subseteq \omega^*$ は, fixed points をもたない。

この事実を別の言葉で表わせば次のようになる。

3.5 Lemma. $A, B \in \mathcal{D}(\omega^*)$ の時, $A \subseteq B^* \rightarrow A[p] \cap B[p] = \emptyset$.

Proof. $\in \mathcal{C}$. $x \in A[p] \cap B[p]$ とすると,

$B \stackrel{\exists f}{\approx} \omega \stackrel{\exists g}{\approx} A$, $\beta f(x) = p$, $\beta g(p) = x$. よって, $h = g \circ f: B \approx A$

とかけば, $\beta h: \beta B \approx \beta A \subseteq B^*$, $\beta h(x) = x$. $\forall x \in \mathcal{C}$.

embedding $\beta B \subseteq B^*$ が, fixed pt を持つことになる。

3.4 に矛盾する。☺

3.5 は 次のように拡張できるか? この 3.6 が Shelah's note における "the uniqueness claim" と見られる。

3.6 Lemma. $\forall A, \forall B \in \mathcal{D}(\omega^*)$ $\kappa \neq \mathcal{C}$,

$$A[p] \cap B[p] = (A \cap B)[p].$$

Proof. $A[p] \cap B[p] \subseteq (A \cap B)[p]$ を示せばよい。

$A = (A \cap B) \cup (A \cap B^*) \cup (A \setminus \mathcal{C}B)$ であるから、 $A[p]$ は、次の disjoint union の形に可分する：

$$A[p] = (A \cap B)[p] \cup (A \cap B^*)[p] \cup (A \setminus \mathcal{C}B)[p].$$

3.5 より $(A \cap B^*)[p] \cap B[p] = \emptyset$ であるから、

$$A[p] \cap B[p] \subseteq (A \cap B)[p] \cup (A \setminus \mathcal{C}B)[p].$$

A, B の symmetry より、全く同様にして

$$A[p] \cap B[p] \subseteq (A \cap B)[p] \cup (B \setminus \mathcal{C}A)[p].$$
 かわかる。

$(A \setminus \mathcal{C}B) \cup (B \setminus \mathcal{C}A)$ は countable, discrete subset in ω^* であるから、 $\in \mathcal{C} \mathcal{C} \mathcal{C} \mathcal{C}$ C^* -embedded in ω^* であり、 $\tau < \kappa$

$$(A \setminus \mathcal{C}B)^* \cap (B \setminus \mathcal{C}A)^* = \emptyset. \quad \therefore (A \setminus \mathcal{C}B)[p] \cap (B \setminus \mathcal{C}A)[p] = \emptyset.$$

ゆえに、 $A[p] \cap B[p] \subseteq (A \cap B)[p]$ かわかる。 😊

3.7 Lemma. $\forall x \in X^p \setminus X, \forall A \in \mathcal{D}(\omega^*)$ より $\exists C$

$x \in A[p]$ ならば $x \in (A \cap X)[p]$ である。

Proof. $x \in X^p \setminus X, A \in \mathcal{D}(\omega^*), x \in A[p]$ とせよ。

$x \in X^p \setminus X$ であるから $x \in B[p]$ for some $B \in \mathcal{D}(X)$. よって 3.6

より $x \in (A \cap B)[p]$. $A \cap B \subseteq A \cap X$ であるから $x \in (A \cap X)[p]$.

😊

この lemma から 次を得る。

3.8 Cor. $X : p\text{-open} \rightarrow X^p : p\text{-open}$. ☺

一般に $X \rightarrow (Y)_2^1$ は、次のような function g の存在を主張している :

$$g : X \rightarrow 2 = \{0, 1\} \text{ s.t. } \forall h : Y \hookrightarrow X \quad g \circ h : Y \rightarrow 2 \text{ onto.}$$

いま、0 を白色、1 を赤色と考へれば g は X の各点を色分けしてあり、 X の中にあるどんな copy of Y も 2 色にぬすれている、と解釈できる。我々の目標は、色分け関数 $g : \omega^* \rightarrow 2$ 2、 ω^* の中のどんな copy of $\omega \cup \{p\}$ も 2 色にぬすれているものを構成することである。まず最初に、coloring function が与えられた場合、それを extend する方法を考へる。

3.9 Lemma. $X : p\text{-open}$ とする。Coloring function

$g : X \rightarrow 2$ は、 X の中のどの copy of $\omega \cup \{p\}$ も 2 色に色分けしているとする。この時、 g を extend する coloring function $\hat{g} : X^p \rightarrow 2$ 2、 X^p の中のどの copy of $\omega \cup \{p\}$ も 2 色に色分けするものが存在する。

Proof. $X_0 = g^{-1}(0)$, $X_1 = g^{-1}(1)$ とおく。

$$X = X_0 \cup X_1, \quad X_0 \cap X_1 = \emptyset.$$

3.2 によつて $X^p = X_0^p \cup X_1^p$. 3.6 によつて

$$(X_0^p \setminus X) \cap (X_1^p \setminus X) \subseteq (X_0 \cap X_1)^p = \emptyset.$$

(注意: $X_0^p \cap X_1^p \neq \emptyset$ or $X_0 \cap X_1^p \neq \emptyset$ とはなり得る.)

よつて, disjoint な分割

$$X^p = X \cup (X_0^p \setminus X) \cup (X_1^p \setminus X)$$

が得られる。Coloring function \tilde{g} on X^p

を次のように定める:

$$\tilde{g} = g \text{ on } X,$$

$$\tilde{g}(x) = 1 \text{ if } x \in X_0^p \setminus X, \quad \tilde{g}(x) = 0 \text{ if } x \in X_1^p \setminus X.$$

このとき, \tilde{g} が求めるものがあることを示す。 $A \cup \{x\}$ が任意の copy of $\omega \cup \{p\}$ in X^p であるとき。しかるは:

$x \in A[p]$, $A \in \mathcal{D}(\omega^*)$. 次の3つの cases が起り得る:

$$(1) x \in X \text{ or } (2) x \in X_0^p \setminus X \text{ or } (3) x \in X_1^p \setminus X.$$

Case (3) は, (2) と同様である。 (1), (2) の cases を考へなければよい。

Case (1): X は p -open であるから $x \in (A \cap X)[p]$. すなわち,

$(A \cap X) \cup \{x\}$ は copy of $\omega \cup \{p\}$ in X である。よつて, 既に g によつて $(A \cap X) \cup \{x\}$ は, 2色に色分けされてゐる。

Case (2): 3.7 によつて, $x \in (A \cap X_0)[p]$. 中々に, \tilde{g} は,

point x を color 1 に, $A \cap X_0$ を color 0 に, ぬり分けるから, もちろん $A \cup \{x\}$ は 2色にぬり分けられてゐる。



Subset $X \subseteq \omega^*$ に対し, X を含む最小の p -closed set を $p\text{-cl } X$ と表わし, $p\text{-closure of } X$ といい, Increasing sequence of sets X_α ($\alpha < \omega_1$) を,

$$X_0 = X$$

$$X_\alpha = \bigcup_{\beta < \alpha} X_\beta \quad \text{if } \alpha: \text{limit}, \quad X_\alpha = X_\beta^p \quad \text{if } \alpha = \beta + 1$$

と定めれば, $p\text{-cl } X = \bigcup_{\alpha < \omega_1} X_\alpha$ である。 p -open sets の union は 常に p -open であるから, 3.8 より次が言える。
 p -open & p -closed set を $p\text{-clopen}$ といふことにする。

3.10 Cor. $X : p\text{-open} \rightarrow p\text{-cl } X : p\text{-clopen}$. ☺

3.8 の御蔭で, 3.9 の操作を何回でも繰返せるから,

次の lemma を得る。

3.11 Lemma. $X : p\text{-open}$ である。 coloring function $g: X \rightarrow 2$

は, X の中の, ε の copy of $\omega \cup \{p\}$ を 2色に色分けしていうことができる。この時, g は, $p\text{-clopen set } p\text{-cl } X$ の上へ extend する。

その extension $\tilde{g}: p\text{-cl } X \rightarrow 2$ は, ε の copy of $\omega \cup \{p\}$ を $p\text{-cl } X$ の中の 2色に色分けする。 ☺

この lemma 3.11 は 強力な結果であるが、これを apply するためには 元の仮定を満たす p -open set がなければならぬ。(Empty set $X = \emptyset$ から始めると \emptyset は empty set p -cl $X = \emptyset$ に終わってしまう。☹) そのため、次の " p -satellite set" の概念が必要になってくる。

$Ac(p) \stackrel{\Delta}{=} \cup \{A[p] : A \in \mathcal{D}(\omega^*)\}$, $Inac(p) \stackrel{\Delta}{=} \omega^* \setminus Ac(p)$ とおく。 $x \in Ac(p)$ とするのは、 $x \in A[p]$ とする $A \in \mathcal{D}(\omega^*)$ が存在する時であるから。 $Ac(p)$ は、 x の外側 $\omega^* \setminus \{x\}$ から p により "accessible" であるような点 x の集まりである。従って、 $Inac(p)$ は、 p により "inaccessible" な点の集まりである。Fact 3.4 により、 $p \in Inac(p)$ である。また、明らかになる ω^* の weak p -points は、 $Inac(p)$ に属するから、

$$\omega^* = Ac(p) \cup Inac(p), \quad |Ac(p)| = |Inac(p)| = 2^c.$$

$x \in \omega^*$ とする。 x を含む subset in ω^* かな?

$$\{x_s : s \in T\} \text{ where } T \text{ is a subtree in } \omega^{\omega} = \bigcup_{n \in \omega} \omega^n$$

(ω^{ω} は inclusion \subseteq による tree ($\omega^{\omega}, \subseteq$) である)

の形に表わすか、次の4つの条件を満たす時、 p -satellite set of x といい、 $S(x, p)$ と記す:

- (1) $\langle \rangle \in T$ & $x_{\langle \rangle} = x$ ($\langle \rangle$ is empty seq. $\in \omega^{\omega}$)
- (2) \exists a system $\{U_s : s \in T\}$ of clopen sets in ω^{ω} such that
 $x_s \in U_s$ for every $s \in T$.
 $U_s \cap U_t = \emptyset$ if s is incomparable with t
 $U_s \supseteq U_t$ if $s \subseteq t$.
- (3) $x_s \in \text{Ac}(p)$ iff s is " $\{n \in \omega : s \hat{n} \in T\}$ is infinite
 " iff $x_s \in B_s[p]$
 where $B_s = \{x_{s \hat{n}} : s \hat{n} \in T\} \in \mathcal{D}(\omega^{\omega})$
- (4) $x_s \in \text{Inac}(p)$ iff s is " s is maximal node in T ."

明らかなに、 ω^{ω} の各点 x は、或る p -satellite set $S(x, p)$ を
 含まれる。また、 $x \in \text{Inac}(p)$ のときは、 $S(x, p) = \{x\}$
 である。 p -open sets の任意個の union は p -open である。
 p -open sets の有限個の intersection は p -open である。
 p -open sets 全体は、topology on ω^{ω} を定める。この new
 topology on ω^{ω} を τ_p と表わす。3.6 によれば p -satellite
 set は p -open である。また、 X : p -open であるとは、 $\forall x \in X$ を
 対し、 $x \in S(x, p) \subseteq X$ である p -satellite set をとれる。ゆえに、

3.12 Lemma. p -satellite sets 全体は、open base for τ_p である。
 かつ、 X : p -open $\leftrightarrow \forall x \in X \exists p$ -satellite $S(x, p) \subseteq X$.
 ☺

従って、 τ . p -open set は、 (ω^*, τ_p) における open set τ である。
 τ . p -closed set は、 (ω^*, τ_p) における closed set τ である。
 また、 p -closure $p\text{-cl } X$ は、 X を含む minimal な p -closed set τ であるから、 X の closure w.r.t. τ_p τ である。 ω^* の通常の topology を τ と表わせば、 τ_p は τ より (τ , τ) finer であり、従って、 τ_p は Hausdorff τ である。しかし、 $|S(x, p)| \leq \omega$ τ であり、 $|S(x, p)| = \omega$ のとき、 $|p\text{-cl } S(x, p)| = \mathfrak{c}$ τ であるから、 τ_p は T_3 τ ではない。3.10 を考慮すれば、結局、次のように言える：

(ω^*, τ_p) は、extremally disconnected, Hausdorff, non-regular space τ である。

τ . $S(x, p) = \{x_s : s \in T\}$ を任意の p -satellite τ とせよ。

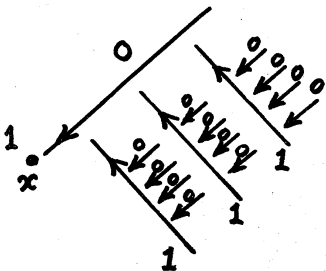
Function $g: S(x, p) \rightarrow 2$ τ

$$g(x_s) = \begin{cases} 1 & \text{if the length } |s| \text{ is even,} \\ 0 & \text{if } |s| \text{ is odd} \end{cases}$$

τ と定めれば、3.6 により、 $S(x, p)$

の中の任意の copy of $\omega \cup \{p\}$ は、

2色に塗り分けされることを示すことができる。



3.13 Lemma. 任意の p -satellite set $S(\kappa, p)$ 上には, coloring function $g: S(\kappa, p) \rightarrow 2$ 2. $S(\kappa, p)$ の中の ω の copy of $\omega \cup \{p\}$ も 2色に色分けするものが存在する。☺

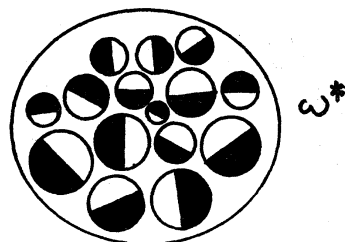
この 3.13 と, 3.11 とを組合せれば Main theorem が得られる。

3.14 Theorem. (Shelah) $\omega^* \not\rightarrow (\omega \cup \{p\})_2^1$.

Proof. New topological space (ω^*, τ_p) をおいて,
maximal disjoint collection $\{S_\alpha : \alpha < 2^c\}$ of p -satellite sets
をとる。この "maximality" から, $X \stackrel{\Delta}{=} \bigcup_{\alpha < 2^c} S_\alpha$ とおけば:
 $\omega^* = p\text{-cl } X$ となる。 $g_\alpha: S_\alpha \rightarrow 2$ を, 3.13 により保証
される coloring function とし, $g \stackrel{\Delta}{=} \bigcup_{\alpha < 2^c} g_\alpha: X \rightarrow 2$ と定
めれば, 各 S_α は p -open 2-あるから, この g は, 3.11 の
仮定を満たす。3.11 によりこの g を extend して

$$\hat{g}: \omega^* = p\text{-cl } X \rightarrow 2$$

を考へれば, これは, ω^* の中の, ω の copy of $\omega \cup \{p\}$ を 2色
に色分けし得る。☺



任意の infinite, countably compact subspace $C \subseteq \omega^*$ は,
copy of $\omega \cup \{p\}$ for some $p \in \omega^*$ を含むから.

3.15 Cor. 任意の infinite, countably compact space C に対し
 $\omega^* \rightarrow (C)_2^1$. ☺

C が compact の場合は, 3.15 は, 1.2 からの "帰結" がある
が, もちろん, ω^* の中には, countably compact space Z
cardinality \mathfrak{c} のものもたくさんある。たとえば, "どんな
subset $X \subseteq \omega^*$, $\omega \leq |X| \leq \mathfrak{c}$ に対しても, $C = p\text{-cl } X$
は, そのような例" がある。

§4. Open Questions

$\omega^* \rightarrow (Y)_2^1$ となる space Y を 完全 κ -characterize でき
れば" 申し分ないが, これは現在のところ 御先きの暗
☹ な夢" がある。 2.5, 2.2, 1.2 に鑑みて, 次の question が
生ずる。

4.1 Question. Weight of $Y \leq \mathfrak{c}$ & $|Y| \leq \mathfrak{c}$ なる任意の
 P -space Y に対し, $\omega^* \rightarrow (Y)_2^1$ が成立するか?

3.14 からは次の疑問がわく。

4.2 Question. 任意の non-discrete, countable space Y に対し ω^* $\rightarrow (Y)_2^1$ があるか?

一般に ω^* の中の countable, discrete subset は比較的扱い易いか。任意の countable subset となると、構造が非常に複雑なものがあるため扱いづらくなる。たとえば、 ω^* の中には、dense-in-itself な countable subset E_0 がある。

$$\forall A \in \mathcal{D}(\omega^*) \quad \forall x \in E_0 \quad (x \notin A \rightarrow x \notin \mathcal{C}A)$$

($\mathcal{C}A$ は closure in ω^*) なる性質をもつものが存在する。この E_0 の中の discrete subset は、 E_0 における τ は常に closed になるのがあるから、このように E_0 に対し τ は、3.14 は無力である。 E_0 の作り方は、J. van Mill "Sixteen topological types in $\{\omega \setminus \omega\}$ " Top. & Appl. 13 (1982) 43-57 の 3.3 (pp.53, 54) による: Cantor set C の absolute E を考え、 $\pi: E \rightarrow C$ を perfect, irreducible map とする。まず、 E を、 ω^* の中に C -OK set となるように embed する。しかるは、 $\omega^* \setminus E$ の中の任意の countable subset H に対し $E \cap \mathcal{C}H = \emptyset$ がある。 C は、1-st countable, 0-dimensional であるから、上の van Mill の論文の方法で、各 $t \in C$ に対し、点 $x_t \in \pi^{-1}(t)$ がある。

$$\forall A \in \mathcal{D}(E \setminus \{x_t\}) \quad x_t \notin \mathcal{C}A$$

なる性質をもつものを選ぶ。 C は separable だから

$\exists C_0$: countable, dense in C .

$E_0 \triangleq \{x_t : t \in C_0\}$ と定めれば, π が irreducible だから

だから E_0 は dense in E である。 明らか。 E_0 の各点

x は, その外側 $\omega^* \setminus \{x\}$ にある countable discrete subset によって

は近づけない。 😊