

エンド

alg-d

http://alg-d.com/math/kan_extension/

2019年2月24日

C, D を圏, $F, G: C \rightarrow D$ を関手とする. 自然変換 $\theta: F \Rightarrow G$ とは, 次の図式を可換にする射の族 $\{\theta_a: Fa \rightarrow Ga\}_{a \in C}$ であった.

$$\begin{array}{ccccc}
 a & & Fa & \xrightarrow{\theta_a} & Ga \\
 \downarrow f & & \downarrow Ff & & \downarrow Gf \\
 b & & Fb & \xrightarrow{\theta_b} & Gb
 \end{array}$$

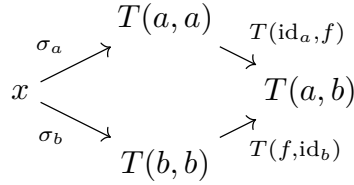
$1 = \{*\}$ を一元集合とすれば, 射の族 $\theta = \{\theta_a: Fa \rightarrow Ga\}_{a \in C}$ を与えることと, 写像の族 $\sigma = \{\sigma_a: 1 \rightarrow \text{Hom}_D(Fa, Ga)\}_{a \in C}$ を与えることは同じことである. θ が自然変換であるための条件を σ に翻訳すれば, 自然変換とは任意の $f: a \rightarrow b$ に対して図式

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \text{Hom}_D(Fa, Ga) & & \\
 & \nearrow \sigma_a & & \searrow Gf \circ - & \\
 1 & & & & \text{Hom}_D(Fa, Gb) \\
 & \searrow \sigma_b & & \nearrow - \circ Ff & \\
 & & \text{Hom}_D(Fb, Gb) & &
 \end{array}$$

を可換にする σ のことだと言える.

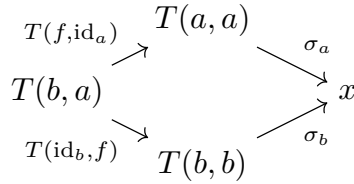
定義. C, D を圏, $T: C^{\text{op}} \times C \rightarrow D$ を関手とする. $x \in D$ から T への wedge とは, D の射の族 $\sigma = \{\sigma_a: x \rightarrow T(a, a)\}_{a \in C}$ であって, C の任意の射 $f: a \rightarrow b$ に対して次の図

式が可換となるものである.



σ が x から T への wedge であることを記号で $\sigma: x \twoheadrightarrow T$ と書くことにする.

定義. C, D を圏, $T: C^{\text{op}} \times C \rightarrow D$ を関手とする. T から $x \in D$ への cowedge とは, D の射の族 $\sigma = \{\sigma_a: T(a, a) \rightarrow x\}_{a \in C}$ であって, C の任意の射 $f: a \rightarrow b$ に対して次の図式が可換となるものである.

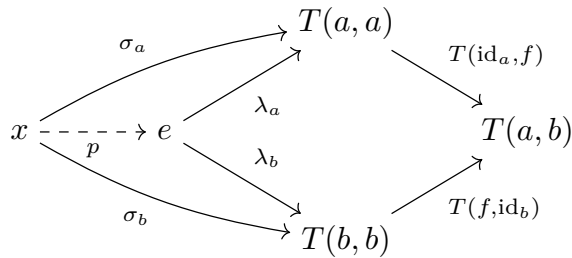


σ が T から x への cowedge であることを記号で $T \twoheadrightarrow x$ と書くことにする.

例 1. $1 \in \mathbf{Set}$ から $\text{Hom}_D(F-, G-)$ への wedge が自然変換 $F \Rightarrow G$ である. □

定義. C, D を圏, $T: C^{\text{op}} \times C \rightarrow D$ を関手とする. T のエンドとは組 (e, λ) で以下を満たすものである.

- (1) $e \in D$ は対象である.
- (2) $\lambda: e \twoheadrightarrow T$ は wedge である.
- (3) $\sigma: x \twoheadrightarrow T$ を wedge とするとき, 射 $p: x \rightarrow e$ が一意に存在して, $a \in C$ に対して $\lambda_a \circ p = \sigma_a$ となる.



このとき e を $\int_{a \in C} T(a, a)$ で表す.

双対的にコエンド $\int^{a \in C} T(a, a)$ も定義される.

例 2. C, D を圏, $F, G: C \rightarrow D$ を関手とする. $\int_{a \in C} \text{Hom}_D(Fa, Ga) = \text{Hom}_{D^C}(F, G)$ である. (つまり, 射 $Fa \rightarrow Ga$ を積み重ねると自然変換 $F \Rightarrow G$ になるということであり, まさしく積分であろう.)

証明. $\lambda_a: \text{Hom}(F, G) \rightarrow \text{Hom}(Fa, Ga)$ を $\lambda_a(\alpha) := \alpha_a$ で定めれば, λ は wedge である.

$\sigma: x \rightarrow \text{Hom}_D(F-, G-)$ を任意に取る. $a \in C$ に対して $\sigma_a: x \rightarrow \text{Hom}(Fa, Ga)$ だから, $u \in x$ に対して $\sigma_a(u) \in \text{Hom}(Fa, Ga)$ である. これにより自然変換 $\sigma_-(u): F \Rightarrow G$ が定まるから, 写像 $p: x \rightarrow \text{Hom}(F, G)$ が $p(u) := \sigma_-(u)$ により得られる. このとき $\lambda_a \circ p = \sigma_a$ である. 明らかにこのような p は一意に定まるから, $\int_{a \in C} \text{Hom}_D(F-, G-) = \text{Hom}_{D^C}(F, G)$ が分かった. \square

3 変数の関手 $T: C^{\text{op}} \times C \times X \rightarrow D$ を考える. $x \in X$ を固定すれば 2 変数の関手 $T(-, -, x): C^{\text{op}} \times C \rightarrow D$ が得られるから, エンド $\int_a T(a, a, x)$ を考えることができる. 任意の $x \in X$ に対してこのエンド $\int_a T(a, a, x)$ が存在したとすれば, 対応 $X \ni x \mapsto \int_a T(a, a, x) \in D$ を考えることができる.

命題 3. C, D, X を圏, $T: C^{\text{op}} \times C \times X \rightarrow D$ を関手とする. 任意の $x \in X$ に対して エンド $\langle \int_a T(a, a, x), \lambda^x \rangle$ が存在すると仮定する. C の射 $f: a \rightarrow b$ と $x \in X$ に対して $\alpha_x^f := T(\text{id}_a, f, \text{id}_x) \circ \lambda^x$ とおく.

$$\begin{array}{ccc}
 & \lambda_a^x \nearrow T(a, a, x) & \searrow T(\text{id}_a, f, \text{id}_x) \\
 \int_a T(a, a, x) & \overset{\alpha_x^f}{\dashrightarrow} & T(a, b, x) \\
 & \searrow T(b, b, x) & \nearrow T(f, \text{id}_b, \text{id}_x) \\
 & \lambda_b^x &
 \end{array}$$

このとき関手 $F: X \rightarrow D$ が一意に存在して, 以下を満たす.

- (1) $x \in X$ に対して $F(x) = \int_{a \in C} T(a, a, x)$.
- (2) $f: a \rightarrow b$ に対して, $\alpha_x^f: Fx \rightarrow T(a, b, x)$ が自然変換 $F \Rightarrow T(a, b, -)$ を定める.

証明. X の射 $k: x \rightarrow z$ を考える. まず $f: a \rightarrow b$ に対して

$$\begin{array}{ccc} \int_a T(a, a, x) & \xrightarrow{\lambda_a^x} & T(a, a, x) \\ \lambda_b^x \downarrow & & \downarrow T(\text{id}_a, f, \text{id}_x) \\ T(b, b, x) & \xrightarrow{T(f, \text{id}_b, \text{id}_x)} & T(a, b, x) \end{array} \quad \begin{array}{ccc} \int_a T(a, a, z) & \xrightarrow{\lambda_a^z} & T(a, a, z) \\ \lambda_b^z \downarrow & & \downarrow T(\text{id}_a, f, \text{id}_z) \\ T(b, b, z) & \xrightarrow{T(f, \text{id}_b, \text{id}_z)} & T(a, b, z) \end{array}$$

は可換である. また, k と T から D の射

$$T(\text{id}_a, \text{id}_a, k): T(a, a, x) \rightarrow T(a, a, z)$$

等が得られるから, 先の図式と組み合わせて次の実線による図式が得られる.

$$\begin{array}{ccccc} & & \int_a T(a, a, z) & \xrightarrow{\lambda_a^z} & T(a, a, z) \\ & & \downarrow & \nearrow & \downarrow T(\text{id}_a, f, \text{id}_z) \\ \int_a T(a, a, x) & \xrightarrow{Fk} & T(a, a, x) & & T(a, a, z) \\ \lambda_b^x \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ & & T(b, b, z) & \xrightarrow{\quad} & T(a, b, z) \\ & \nearrow & \downarrow & \nearrow & \downarrow \\ T(b, b, x) & \xrightarrow{T(f, \text{id}_b, \text{id}_x)} & T(a, b, x) & & T(a, b, z) \\ & & \downarrow & \nearrow & \downarrow T(\text{id}_a, \text{id}_b, k) \end{array}$$

これの実線部分は全て可換であるから, エンド $\int_a T(a, a, z)$ の普遍性により点線の射 $Fk: \int_a T(a, a, x) \rightarrow \int_a T(a, a, z)$ が得られる. このとき明らかに F は関手である. また明らかに $\alpha^f: F \Rightarrow T(a, b, -)$ は自然変換である. エンドの普遍性から, このような F は明らかに一意である. \square

4変数の関手 $T: C^{\text{op}} \times C \times X^{\text{op}} \times X \rightarrow D$ を考える. C に関してエンドを取ることで関手 $\int_{a \in C} T(a, a, -, -): X^{\text{op}} \times X \rightarrow D$ が得られるから, このエンド

$$\int_{x \in X} \int_{a \in C} T(a, a, x, x)$$

を考察することができる. 一方, 同型 $C^{\text{op}} \times C \times X^{\text{op}} \times X \cong (C \times X)^{\text{op}} \times (C \times X)$ により $T: (C \times X)^{\text{op}} \times (C \times X) \rightarrow D$ とみなせば, エンド

$$\int_{\langle a, x \rangle \in C \times X} T(a, a, x, x)$$

も考察することができる.

定理 4 (Fubini の定理). $T: C^{\text{op}} \times C \times X^{\text{op}} \times X \rightarrow D$ を関手として, 任意の $x, z \in X$ に対してエンド $\int_{a \in C} T(a, a, x, z)$ が存在すると仮定する. このとき

$$\int_{\langle a, x \rangle \in C \times X} T(a, a, x, x) \cong \int_{x \in X} \int_{a \in C} T(a, a, x, x).$$

但しこの式は, 片方が存在するならばもう片方も存在して同型となることを表す.

証明. 命題 3 で示したように, X の任意の射 $x \rightarrow z$ に対して次が可換である,

$$\begin{array}{ccc} \int_a T(a, a, x, x) & \longrightarrow & \int_a T(a, a, x, z) \\ \downarrow & & \downarrow \\ T(a, b, x, x) & \longrightarrow & T(a, b, x, z) \end{array} \quad \begin{array}{ccc} \int_a T(a, a, z, z) & \longrightarrow & \int_a T(a, a, x, z) \\ \downarrow & & \downarrow \\ T(a, b, z, z) & \longrightarrow & T(a, b, x, z) \end{array}$$

また C の射 $a \rightarrow b$ に対して次が可換である.

$$\begin{array}{ccc} & \int_a T(a, a, x, x) & \\ & \swarrow \quad \downarrow & \\ T(a, a, x, x) & \longrightarrow & T(a, b, x, x) \end{array} \quad \begin{array}{ccc} & \int_a T(a, a, x, x) & \\ & \swarrow \quad \downarrow & \\ T(b, b, x, x) & \longrightarrow & T(a, b, x, x) \end{array}$$

これらを組み合わせて, 次の可換図式を得る.

$$\begin{array}{ccccc} & & & & T(b, b, z, z) \\ & & & \nearrow & \downarrow \\ & & \int_a T(a, a, z, z) & & \\ & & \downarrow & \searrow & \\ & & & & T(a, b, z, z) \\ & & & & \downarrow \\ \int_a T(a, a, x, x) & \longrightarrow & \int_a T(a, a, x, z) & & \\ \swarrow & & \searrow & & \\ T(a, a, x, x) & \longrightarrow & T(a, b, x, x) & \longrightarrow & T(a, b, x, z) \end{array}$$

よって x に関する wedge $d \rightrightarrows \int_a T(a, a, x, x)$ が与えられた時, $\langle a, x \rangle$ に関する wedge $d \rightrightarrows T(a, a, x, x)$ が得られる.

逆に $\langle a, x \rangle$ に関する wedge $d \rightrightarrows T(a, a, x, x)$ が与えられたとする. このとき $x \in X$ を固定すれば $a, b \in C$ に関する wedge $d \rightrightarrows T(a, b, x, x)$ が得られる. 従ってエンドの普遍

性により次の点線の射が得られる。

$$\begin{array}{ccccc}
 d & \xrightarrow{\quad\quad\quad} & T(b, b, z, z) & & \\
 \downarrow & \dashrightarrow & \int_a T(a, a, z, z) & \searrow & \downarrow \\
 & & & & T(a, b, z, z) \\
 & & \int_a T(a, a, x, x) & \longrightarrow & \int_a T(a, a, x, z) \\
 & \swarrow & & \searrow & \downarrow \\
 T(a, a, x, x) & \longrightarrow & T(a, b, x, x) & \longrightarrow & T(a, b, x, z)
 \end{array}$$

これにより x に関する wedge $d \dashrightarrow \int_a T(a, a, x, x)$ が得られる。

以上の対応により

$$\int_{\langle a, x \rangle \in C \times X} T(a, a, x, x) \cong \int_{x \in X} \int_{a \in C} T(a, a, x, x).$$

が得られることが分かる。 □

特に、各エンドが存在するという仮定の下で、積分の順序交換

$$\int_{x \in X} \int_{a \in C} T(a, a, x, x) \cong \int_{a \in C} \int_{x \in X} T(a, a, x, x)$$

が成り立つ。

エンドの定義から分かるように、エンドは以下のように極限で書くことが出来る。二つの直積

$$d := \prod_{c \in \text{Ob}(C)} T(a, a), \quad d' := \prod_{f \in \text{Mor}(C)} T(\text{dom}(f), \text{cod}(f))$$

を考え、

$$T(\text{id}, f): T(\text{dom}(f), \text{dom}(f)) \rightarrow T(\text{dom}(f), \text{cod}(f))$$

により得られる射を $s: d \rightarrow d'$,

$$T(f, \text{id}): T(\text{cod}(f), \text{cod}(f)) \rightarrow T(\text{dom}(f), \text{cod}(f))$$

により得られる射を $t: d \rightarrow d'$ とする。このときエンド $\int_a T(a, a)$ は $s, t: d \rightarrow d'$ の equalizer である。故に

定理 5. C が小圏で, D が完備ならば, $T: C^{\text{op}} \times C \rightarrow D$ のエンド $\int_a T(a, a) \in D$ が存在する. \square

定理 6. 連続な関手はエンドと交換する. 即ち, $F: D \rightarrow X$ を連続関手で, $T: C^{\text{op}} \times C \rightarrow D$ のエンド $\int_a T(a, a)$ が存在するとすれば $F(\int_a T(a, a)) \cong \int_a F(T(a, a))$. \square

系 7. $\text{Hom}_D(d, \int_c T(c, c)) \cong \int_c \text{Hom}_D(d, T(c, c))$ \square

D^{op} で考えれば $\text{Hom}_D(\int^c T(c, c), d) \cong \int^c \text{Hom}_D(T(c, c), d)$ も分かる.

エンドは極限で書けたが, 逆に極限はエンドで書くことが出来る. $F: J \rightarrow C$ を関手としたとき, $F(j, k) := F(k)$ とすることで F を $F: J^{\text{op}} \times J \rightarrow C$ とみなすことができる. (即ち, 射影 $\pi_2: J^{\text{op}} \times J \rightarrow J$ との合成 $F \circ \pi_2$ を考えるのである.) このとき自然変換 $\theta: \Delta a \Rightarrow F$ は可換図式

$$\begin{array}{ccc}
 & F(j) & \\
 \theta_j \nearrow & & \searrow F(\text{id}, f) = Ff \\
 a & & F(k) \\
 \theta_k \searrow & & \nearrow F(f, \text{id}) = \text{id} \\
 & F(k) &
 \end{array}$$

を与える. よって $\int_{j \in J} F(j) = \lim F$ である.

定義. C を圏として, $a \in C$ と $x \in \mathbf{Set}$ を取る.

- (1) x から $\text{Hom}_C(a, -)$ への普遍射を $x \rightarrow \text{Hom}_C(a, c)$ とするとき, c を copower object (もしくは tensor object) といい $x \odot a$ で表す.
- (2) x から $\text{Hom}_C(-, a)$ への普遍射を $x \rightarrow \text{Hom}_C(c, a)$ とするとき, c を power object (もしくは cotensor object) といい $x \pitchfork a$ で表す.

普遍射の性質により

$$\text{Hom}_C(x \odot a, b) \cong \text{Hom}_{\mathbf{Set}}(x, \text{Hom}_C(a, b))$$

$$\text{Hom}_C(b, x \pitchfork a) \cong \text{Hom}_{\mathbf{Set}}(x, \text{Hom}_C(b, a))$$

である. また各対象 $a \in C$, $x \in \mathbf{Set}$ に対して $x \odot a$, $x \pitchfork a$ が存在すれば, これらは関

手 $\odot: \mathbf{Set} \times C \rightarrow C$, $\pitchfork: \mathbf{Set}^{\text{op}} \times C \rightarrow C$ を定め, 随伴

$$\begin{aligned} - \odot a \dashv \text{Hom}_C(a, -): \mathbf{Set} &\rightarrow C \\ - \pitchfork a \dashv \text{Hom}_C(-, a): \mathbf{Set}^{\text{op}} &\rightarrow C \end{aligned}$$

が成り立つ. (「随伴関手」の PDF を参照.)

例 8. $C = \mathbf{Set}$ の場合, $- \times a \dashv \text{Hom}(a, -): \mathbf{Set} \rightarrow \mathbf{Set}$ だから $x \odot a \cong x \times a$ である. また $\text{Hom}(-, a) \dashv \text{Hom}(-, a): \mathbf{Set} \rightarrow \mathbf{Set}^{\text{op}}$ だから (「Kan 拡張」の PDF を参照) $x \pitchfork a = \text{Hom}_{\mathbf{Set}}(x, a) = a^x$ である. \square

定理 9. C, D, U を圏, $F: C \rightarrow D$, $E: C \rightarrow U$ を関手とし, 各 $c, c' \in C$, $d \in D$ に対して copower $\text{Hom}_D(Fc, d) \odot E c'$ が存在するとする. 更に各 $d \in D$ に対してコエンド $\int^{c \in C} \text{Hom}_D(Fc, d) \odot E c$ が存在するとする. このとき Kan 拡張 $F^\dagger E$ が存在する.

証明. $L := \int^{c \in C} \text{Hom}_D(Fc, -) \odot E c$ と置く. $S: D \rightarrow U$ に対して自然に

$$\begin{aligned} \text{Hom}_{U^D}(L, S) &\cong \int_{d \in D} \text{Hom}_U(Ld, Sd) \\ &= \int_{d \in D} \text{Hom}_U\left(\int^{c \in C} \text{Hom}_D(Fc, d) \odot E c, Sd\right) \\ &\cong \int_{d \in D} \int_{c \in C} \text{Hom}_U(\text{Hom}_D(Fc, d) \odot E c, Sd) \\ &\cong \int_{d \in D} \int_{c \in C} \text{Hom}_{\mathbf{Set}}(\text{Hom}_D(Fc, d), \text{Hom}_U(Ec, Sd)) \\ &\cong \int_{c \in C} \int_{d \in D} \text{Hom}_{\mathbf{Set}}(\text{Hom}_D(Fc, d), \text{Hom}_U(Ec, Sd)) \\ &\cong \int_{c \in C} \text{Hom}_{\mathbf{Set}^D}(\text{Hom}_D(Fc, -), \text{Hom}_U(Ec, S-)) \\ &\cong \int_{c \in C} \text{Hom}_U(Ec, SFc) \\ &\cong \text{Hom}_{U^C}(E, SF) \end{aligned}$$

であるから $L \cong F^\dagger E$ である. \square

双対的に, $F^\ddagger E \cong \int_{c \in C} \text{Hom}_D(-, Fc) \pitchfork E c$ である.