数理解析研究所講究録
575巻 1985年 147-155

Tangle と 2-variable polynomial

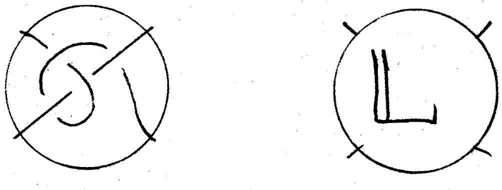
北大・理 児玉 宏児 (Kodama Kouzi)

向きづけられたlinkのpolynomialに対応するTangleのpolynomialを定義しTangleの操作についての性質とlinkのpolynomialとの関係を見る。また、Linkをcode付のgraphに対応させた時のpolynomialの性質も見る。

§0. まずは準備から……

Def. Tangle：disk上のproperな2本のarcsと0本以上のloopsによるdiagram。arcsの端点は、右上、右下、左上、左下に出るようにする。一般のTangleを示す時にはTangleの置き方を示すために文字"L"を書く。

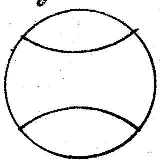
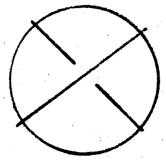
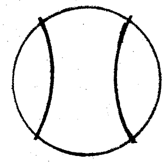
例.



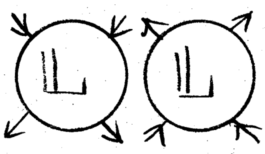
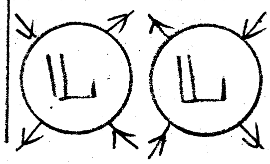
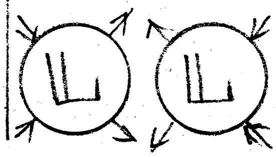
こんな具合い

境界を止めたまま内部のisotopyで移り合うものは同じTangleと見なすことにする。

Def. tangle e_0, e_1, e_∞ を次の様に定める

e_0:  e_1:  e_∞: 

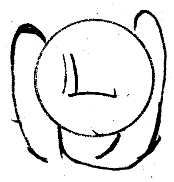
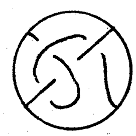
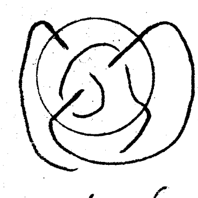
Tangleの各arcsとloopsに向きを入れて考える。この時、Tangleの4つの端点での向きの入り方は次の3つのtype。

orientation type	⊕ type	⊜ type	⊕ type
Tangle			

各orientation typeのtangleの集合を$\mathcal{T}_{\pm}$, $\mathcal{T}_{=}$, $\mathcal{T}_{\mp}$と書く。特に問題がなければori. typeは明示せず単に$\mathcal{T}$と書く。

Def. $D : \mathcal{T} \to \{\text{link diagram}\}$ が diagram construction

(山) の部分が空白になっているlink diagramに与えられたtangleをはめ込んでdiagramを完成させる。

例: D:  とすると D() = 

☆ $\Lambda = \mathbb{Z}\langle x, y, z\rangle$ 変数x, y, zのLaurent polynomial環

Def. oriented linkのpolynomial

link Lのpolynomial $Q_L \in \Lambda$ をdiagramの交点の近くでの変形に関して次の様にする。

$$x Q_{L_+} - y Q_{L_-} = z Q_{L_s}$$

L_+ :  L_- :  L_s : 

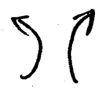
また、k-component trivial link に関しては

$$Q_L = \left(\frac{x-y}{z}\right)^{k-1}$$

§1. Tangle の polynomial　—— 本題に入ります ——

Def.　oriented tangle T に対し $P(T)$ ($\in \Lambda\times\Lambda\times\Lambda$ 多項式の三つ組) を交点の近くでの変形に対して次の様にとる。

$$x P(T_+) - y P(T_-) = z P(T_s)$$

T_+ :  T_- :  T_s : 

また、e_0, e_1, e_∞ の各 tangle に対して、

$$P(e_0) = (1,0,0),\quad P(e_1) = (0,1,0),\quad P(e_\infty) = (0,0,1)$$

☆ $P(T)$ の成分を先頭から $P_0(T)$, $P_1(T)$, $P_\infty(T)$ と書く。

Prop. 1

(i) $P(T)$ は well defined

(ii) T の ori. type

$$\pm \Rightarrow P_0(T) = 0$$

$$= \Rightarrow P_1(T) = 0$$

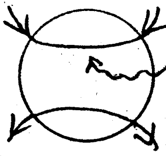
$$\mp \Rightarrow P_\infty(T) = 0$$

(iii) D: diagram construction

$$Q_{D(T)} = P_0(T)\, Q_{D(e_0)} + P_1(T)\, Q_{D(e_1)} + P_\infty(T)\, Q_{D(e_\infty)}$$

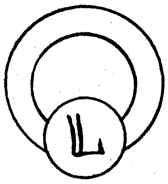
注、(i) $e_0(\pm)$, $e_1(=)$, $e_\infty(\mp)$ は実際にはない。(iii)の $QD(e_0(\pm))$, $QD(e_1(=))$, $QD(e_\infty(\mp))$ は形式的に書いてある。

例, e_0, $(\pm)$ type

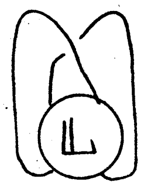


向きのつけようがない

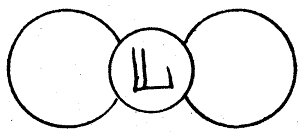
☆ D_0:



D_1:



D_∞:



$\delta : \dfrac{x-y}{z}$ とすると

	T の ori. type
$QD_0(T) = \delta P_0(T) + P_1(T) + P_\infty(T)$	$(=)$ or $(\mp)$
$QD_1(T) = P_0(T) + \delta P_1(T) + P_\infty(T)$	$(\pm)$ or $(\mp)$
$QD_\infty(T) = P_0(T) + P_1(T) + \delta P_\infty(T)$	$(\pm)$ or $(=)$

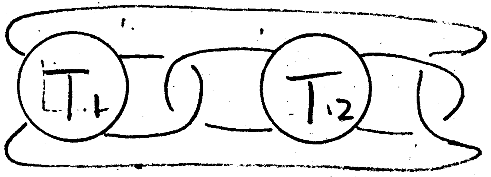
上の三つの式は $P_0(T), P_1(T), P_\infty(T)$ に関して独立になっている。Tangle の Polynomial として P_0, P_1, P_∞ の三つ組の代わりに QD_0, QD_1, QD_∞ の三つ組を用いても良いことが分かる。上式はこの変換式と見なせる。 (O.K?)

Prop. 2 $D : \underbrace{\mathcal{T} \times \cdots \times \mathcal{T}}_{n\text{個}} \longrightarrow$ link diagram とすると

$$QD(T_1, \cdots T_n) = \sum_{t_1, \cdots, t_n = 0, 1, \infty} P_{t_1}(T_1) \cdots P_{t_n}(T_n)\, QD(e_{t_1}, \cdots, e_{t_n})$$

例, $n=2$

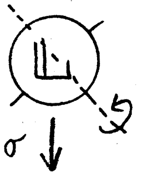
$D(T_1, T_2) =$



各々の tangle に関して Prop. 1 (iii) に従って書き下せば良い。

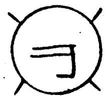
Def. tangle の operation を定義する。

(1) σ：左上と右下を結ぶ対角線を軸にπ回転

$T =$ 

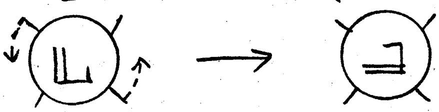
(disk上に"山"が書かれていると思って。)

(σを作用させると…)

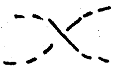
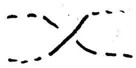
$T\sigma =$ 

(←こうなってしまう。)

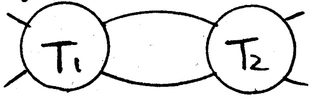
(2) τ：平面上でπ回転

$T =$  $= T\tau$

(3) ！：紙面に関するreflection

$T =$  各交点で $\longrightarrow$  $= T!$

(4) ＋：2つのtangleを横に並べてつなぐ

$T_1 + T_2 =$ 

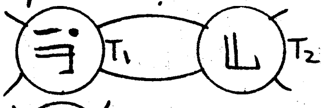
注) ① σ, τ は2面体群D_4を生成する

② ！とD_4の元の作用は可換になっている。

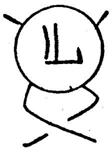
i.e. $x \in D_4$. $(Tx)! = (T!)x$

③ ！とD_4の元の作用を＋に優先させることにする

④ Conwayのoperationとの対応は次の様になる.

$(T_1, T_2) =$  $= T_1\sigma! + T_2$

$T_+ =$  $= (T\sigma + e_1!)\sigma$

$T_- =$  $= (T\sigma + e_1)\sigma$

これらの操作の結果ともとのtangleとの対応からpolynomialを評価する。

Prop.3　T, T_1, T_2 : tangle

① $x \in D_4$

$$P(Tx) = \sum_{t=0,1,\infty} P_t(T)\, P(e_t x)$$

② $$P(T!) = \sum_{t=0,1,\infty} P_t(T)(y, x, -z)\, P(e_t !)$$

③ $$P(T_1 + T_2) = \sum_{t_1, t_2 = 0,1,\infty} P_{t_1}(T_1)\, P_{t_2}(T_2)\, P(e_{t_1} + e_{t_2})$$

$\sigma\tau$ は水平軸中心の π 回転、$\tau\sigma$ は垂直軸中心の π 回転、τ^2 は紙面上の π 回転。これらを e_0, e_1, 及び e_∞ に作用させても同じtangle（arcに入る向きが逆になる程度）となるので

Prop.4　T, T_1, T_2 ; tangle

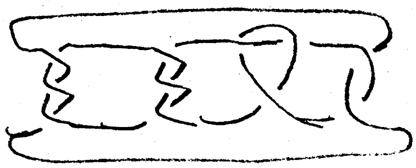
(1) $P(T) = P(T\sigma\tau) = P(T\tau\sigma) = P(T\tau^2)$

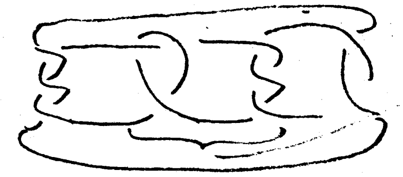
$P(T_1 + T_2) = P(T_2 + T_1)$

(2) (1)を用いると

$QD(T) = QD(T\sigma\tau) = QD(T\tau\sigma) = QD(T\tau^2)$

例. 11-151と11-152は同じpolynomialを持つ

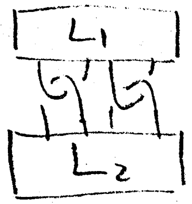
11-151 

11-152 　ここが入れかわっている

例 $L = L_1 \cup L_2$: link

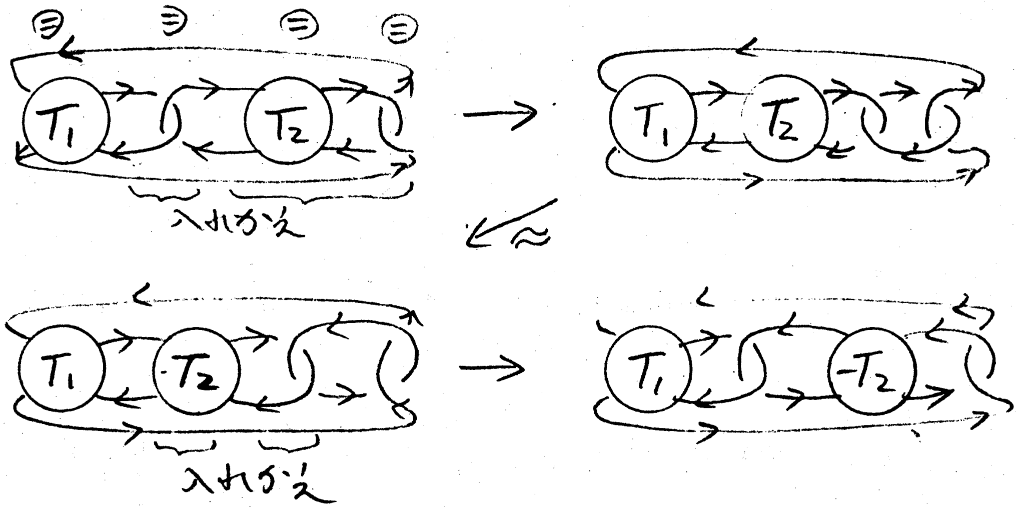
(1) $lk(L_1, L_2) = 0$ かつ (2)

$\Rightarrow Q_{L_1 \cup L_2} = Q_{L_1 \cup -L_2}$



こんな具合いに2ヶ所で引っ掛かっていると…

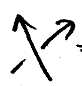
i.e. 一方のorientationを逆にしてもpolynomialは不変



§2. Link の graph (graphとの対応についても少々)

Def. oriented link diagram の graph

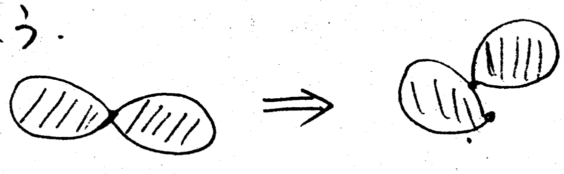
link diagram L が分ける S^2 の領域を2色にぬり分け、一方の色の領域について、各領域にgraphの頂点、領域をつなぐdiagramの交点には辺を対応させる。各辺には次の様にしてsignとcodeをつける。

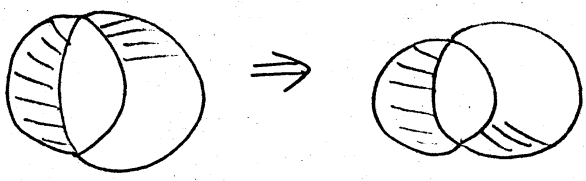
sign :  $\Rightarrow +1$  $\Rightarrow -1$

code :  or  $\Rightarrow a$  or  $\Rightarrow b$

Def. 2-isomorphic

次の操作を有限回行なって移り合う２つの graph を 2-isomorphic と云う.

(1)  連結度１の部分をつけかえる

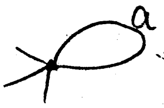
(2)  連結度２の部分をつけかえる

Prop. 5

(1) $G\ (\subset S^2)$ signed coded graph が link の graph

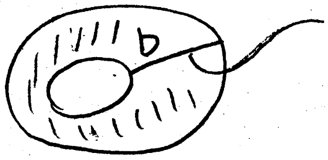
$\Leftrightarrow$

(a) 各 vertex のまわりで a の code の edge は偶数個



self loop は２個と見る

(b) $S^2 - G$ の各領域から見て b の code の edge は偶数個

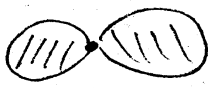


この様な所は２個と見る

(2) この時. link diagram と graph は link の ori. reversing と graph の dual (sign はそのまま code は a, b と交換) を除いて一意的に対応がつけられる

(2) は link と graph の対応から明らか. (1) は graph の各辺での link との対応が全体として矛盾しないことを見れば OK.

この対応で link の polynomial は signed coded graph $G\ (\subset S^2)$ の polynomial と見なせる (もちろん G が link と対応する時なり)

また link diagram の Reidemeister moves に対応しての
graph の変化では当然 polynomial は不変となる。
ところで、Th.4.(2) の意味をこの graph 上で考えると、
$G \subset S^2$ の embedding の差と 2-iso の差は connected
sum された link の diagram の作り方 ( の所) の差
又は Th.4.2 に示される tangle の回転 ( の所)
と対応がつく。graph の embedding を
変えても、2-iso だけ変化させても link に対応し、しかも、
polynomial は不変なことが分かる。