

頂点作用素代数入門とコード頂点作用素代数の表現

宮本雅彦 (筑波大学数学系)

1 序文

頂点作用素代数 (略して VOA) の概念は 10 年ほど前に ムーンシャイン加群の Frenkel, Lepowsky, Meurman による構成 [FLM] と Borchers [B] による考察から出発しました。頂点作用素代数は本質的には 2 次元共形場理論のカイラル代数となります。これは Belavin, Polyakov, と Zamolodchikov の 1984 年の有名な論文以来、物理学者によって精力的に研究されている 2 次元量子場理論のカイラル部分の厳密な数学定義となっています。しかし、この概念自体は 現実の世界に近いだけに、以前から知られていたものでした。もっとも重要な先駆的な仕事は Wightman の公理 (Wightman axioms) と Wilson の作用積展開 (operator product expansion) でしょう。最初の Borchers の公理は非常に複雑なものでしたが、5 年ほど前に、Li によって Wightman の公理が頂点代数にとって本質的な公理であることが示されました。

ところが、頂点作用素代数の出発点は、このような数理物理学ではなく、有限群からなのです。これが、頂点作用素代数を最高に神秘的、かつ魅力的にしている理由だと思います。頂点作用素代数は無限のものと有限のものを結び付ける働きをしています。

最も興味ある頂点作用素代数の例はムーンシャイン加群

$$V^h = \sum_{i=0}^{\infty} V_i^h$$

で、この構成は 3 人の本 [FLM] の中で扱われています。これは自己同型群が散在型有限単純群のうち最大のモンスター単純群であるという事実で、有限単純群と結びついています。私もそこに引かれて研究しているわけですが、通常の有限次元の代数を研究している立場の方は、頂点作用素代数と有限のものとは遠い関係のように思われているのではと感じます。これから述べる話の目的は、ムーンシャイン VOA を始め、ラティス型の VOA を含む多くの頂点作用素代数が、あたかも有限次代数の表現として研究することができる事を示すのが狙いです。

一方、最も簡単な例は有理型頂点作用素代数の極小系列の最初のもの $L(\frac{1}{2}, 0)$ です。これは中心電荷 $\frac{1}{2}$ の有理型共形元一つによって生成されており、2 次元イジング模型として知られています。ここで、頂点作用素代数が有理型であるという意味は、既約加群の同型類が有限個しかなく、任意の加群が既約加群の直和となることです。

例えば、イジング模型 $L(\frac{1}{2}, 0)$ は丁度 3 個の既約加群 $L(\frac{1}{2}, 0)$, $L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ と $L(\frac{1}{2}, \frac{1}{16})$ を持ちます。ここで、最初の成分は中心電荷を表し、2 番目の成分は最小の次数を表します。しかも、この共形場理論は古くから研究されており、テンソル積に対応すると考えられる フュージョン規則は可換で、

- (1) $L(\frac{1}{2}, 0)$ は単位元,
- (2) $L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \times L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) = L(\frac{1}{2}, 0)$,
- (3) $L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \times L(\frac{1}{2}, \frac{1}{16}) = L(\frac{1}{2}, \frac{1}{16})$,
- (4) $L(\frac{1}{2}, \frac{1}{16}) \times L(\frac{1}{2}, \frac{1}{16}) = L(\frac{1}{2}, 0) + L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$.

となっていることが分かっています。[DMZ]

上のフュージョン規則を良く見ると、この中に2つの2元モード $\{0, 1\}$ があることに気づきます。

$$\bar{h}: \begin{cases} L(\frac{1}{2}, 0), L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) & \rightarrow 0 \\ L(\frac{1}{2}, \frac{1}{16}) & \rightarrow 1 \end{cases} \quad \tilde{h}: \begin{cases} L(\frac{1}{2}, 0) & \rightarrow 0 \\ L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) & \rightarrow 1 \end{cases}$$

ムーンシャイン頂点作用素代数を始め、多くの頂点作用素代数の内部に、イジング模型を見つけることができます。特に、ムーンシャイン頂点作用素代数や、ラティスから構成した頂点作用素代数の場合には、幾つものイジング模型やイジング模型のテンソル積が見つかります。それゆえ、ここでは、互いに直交した中心電荷 $\frac{1}{2}$ の有理型共形元の集合 $\{e^1, \dots, e^n\}$ でその和 $\sum_{i=1}^n e^i$ が丁度頂点作用素代数のヴィラソロ元 w となっているような場合を考えます。この様な頂点作用素代数の重要な例はムーンシャイン加群 V^h や24次元のニイマイヤ格子から構成された頂点作用素代数であり、この場合はヴィラソロ元は48個の互いに直交した中心電荷 $\frac{1}{2}$ の共形元の和となっています。この様な場合、各共形元 e^i は $L(\frac{1}{2}, 0)$ と同型な部分頂点作用素代数 $\langle e^i \rangle$ を構成し、それら全体はテンソル代数

$$T \cong \otimes_{i=1}^n L(\frac{1}{2}, 0)$$

と同型の部分頂点作用素代数を構成します。この場合、 T と V は同じヴィラソロ元を持っています。 T -加群の構造は簡単で、既約 T -加群 W は各既約 $\langle e^i \rangle$ -加群のテンソル積、即ち、 $W = \otimes L(\frac{1}{2}, h^i)$ と成り、最小の次数の列 $(h^i : i = 1, \dots, n)$ が決まります。それゆえ、一般の T -加群に対して、 (h^i) の集合を $lwr(T, W)$ で表します。

このイジング模型に関して、著者は、頂点作用素代数 V が有理型のイジング模型を含むと（それゆえ、中心電荷 $\frac{1}{2}$ の有理共形元 e を含むと）位数が高々2の自己同型 τ_e が定義出来る事を示しました [M1]。自己同型は次のように定義されます。

$$\tau_e : \begin{cases} 1 & L(\frac{1}{2}, 0)\text{-部分加群 } U \cong L(\frac{1}{2}, 0) \text{ 又は } L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \text{ 上で} \\ -1 & L(\frac{1}{2}, 0)\text{-部分加群 } U \cong L(\frac{1}{2}, \frac{1}{16}) \text{ 上で.} \end{cases}$$

互いに直交している共形元がある場合には、互いに可換となるので、基本2群 $P = \langle \tau_{e_i} \mid i = 1, \dots, n \rangle$ を生成します。この P による固定空間 V^P がここで扱うコード頂点作用素代数となっているのです。さらに、 P の各線形表現 χ に対して、その固有空間

$$V_\chi = \{v \in V \mid gv = \chi(g)v \ \forall g \in P\}$$

は自明でない既約 V^P -加群となることが知られています。それゆえ、このコード頂点作用素代数の表現を決定する事は、その様な頂点作用素代数の研究の為に重要なわけです。

これを2元コードで表示すると、我々の自己同型の定義から、 χ に対してまず、2元ワード (\bar{h}^i) が

$$\chi : \tau_{e_i} \rightarrow (-1)^{\bar{h}^i} \quad (\bar{h}^i = 0, 1)$$

で定義できます。上の V_χ は T -部分加群 $W = \otimes L(\frac{1}{2}, h^i)$ で、 (h^i) における $\frac{1}{16}$ の位置が $\bar{h}^i = 1$ となる位置と一致しているようなもの全体で生成されていることが分かります。

2 頂点作用素代数

2.1 頂点作用素代数の性質

まず、頂点作用素代数の説明を始めましょう。

定義 1 V をベクトル空間とし、次の記号を使う。

$$R[[z, z^{-1}]] = \{\sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n z^{-n-1} : a_n \in R\},$$

$$R\{z, z^{-1}\} = \{\sum_{n \in \mathbb{C}} a_n z^{-n-1} : a_n \in R\}.$$

V の“弱頂点作用素” (または量子作用素) とは形式的べき級数

$v(z) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} v_n z^{-n-1} \in (\text{End} V)[[z, z^{-1}]]$ であって、任意の $u \in V$ に対して、十分大きな数 $N(u) \gg 0$ を取ると、 $n > N(u)$ に対して、 $v_n u = 0$ となるものです。この条件があると、 $Y(v, z)u$ は実際には有限和となり、 $Y(v, z)$ は形式的には無限和ですが、 V への作用として色々な積が定義できることとなります。

まず、数理論理で重要な正規積の一般形を導入しましょう。

定義 2 V をベクトル空間とし、 $u(z), v(z)$ を 2 つの弱頂点作用素とします。任意の整数 n に対して、 n -正規積を

$$u(z)_n v(z) = \text{Res}_{z_1} ((z_1 - z)^n u(z_1) v(z) - (-z + z_1)^n v(z) u(z_1)).$$

で定義すると、これも又弱頂点作用素となります。ここで、2 項係数 $\binom{n}{i}$ 、2 項展開 $(z-w)$ 、留数 $\text{Res}_z f(z)$ は形式的に

$$\binom{n}{i} = \frac{n(n-1)\cdots(n-i+1)}{i(i-1)\cdots 1},$$

$$(z_1 + z)^n = \sum_{i=0}^{\infty} \binom{n}{i} z_1^{n-i} z^i,$$

$$\text{Res}_{z_1} (\sum a_n z_1^{-n-1}) = a_0.$$

と定義します。我々の記号では、一般に $(z_1 + z)^n \neq (z + z_1)^n$ となることに注意してください。

頂点作用素代数を構成しようとするときに、最も基本的な結果は次の Dong の補題です。

補題 2.1 (Dong) *Let $u(z), v(z), w(z)$ を V の弱頂点作用素とする。もし、 $u(z), v(z), w(z)$ の 3 つが互いに局所可換とすると、任意の整数 n に対して $u(z)_n v(z)$ も $w(z)$ と局所可換である。また、微分 $\frac{d}{dz} u(z)$ も $v(z)$ と局所可換である。ここで、 $u(z)$ と $v(z)$ が“局所可換”とは、*

$$(z_1 - z_2)^N u(z_1) v(z_2) = (z_1 - z_2)^N v(z_2) u(z_1)$$

が十分大きな整数 N に対して成り立つ事をいいます。

頂点作用素代数、その加群と intertwining 作用素の定義の概略を述べておきましょう。

定義 3 “頂点作用素代数”(vertex operator algebra) とは \mathbb{Z} -次数付きベクトル空間 $V = \sum_{n \in \mathbb{Z}} V_n$ で、各ホモジニアス空間 V_n は有限次元を持ち、十分小さな n に対しては $V_n = 0$ となるようなもので、各元 $v \in V$ に対して、線形に“頂点作用素”(vertex operator) と呼ばれる $\text{End}(V)$ の元を係数に持つような形式的べき級数

$$Y(v, z) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} v_n z^{-n-1} \in \text{End}(V)[[z, z^{-1}]]$$

が与えられており、次の条件を満たしているものである。

(1) 真空と呼ばれる特別な元 $1 \in V_0$ があって、

$$(1.1) Y(1, z) = 1_V$$

$$(1.2) v_{-1} 1 = v \text{ 且つ } v_n 1 = 0 \forall n \geq 0.$$

- (2) ヴィラソロ元と呼ばれる特別な元 $w \in V_2$ があって、
 (2.1) $\{L(n) := w_{n+1}\}$ はヴィラソロ代数の生成系の関係式

$$[L(m), L(n)] = (m-n)L(m+n) + \delta_{m+n,0} \frac{m^3 - m}{12} c,$$

を満たしている。ここで定数 $c \in C$ は頂点作用素代数のランク (又は、中心電荷) と呼ばれる。

- (2.2) $L(-1)$ は微分作用素となる。:

$$[L(-1), Y(v, z)] = \frac{d}{dz} Y(v, z)$$

(2.3) $L(0)$ は V 上で整数固有値のみをもち、 V はその固有空間の直和に分解する。この分解が最初の次数を与えている。

$$L(0)|_{V_n} = n1_{V_n}$$

- (3) 任意の頂点作用素は互いに (自分も込めて) "局所可換" が成り立つ。即ち、

$$(z-w)^N Y(v, z) Y(u, w) = (z-w)^N Y(u, w) Y(v, z)$$

が十分大きな自然数 N に対して成り立つ。

定義 4 "頂点作用素超代数" とは、頂点作用素代数の拡張であり、定義の概略を述べると、まず、フォック空間は $Z/2Z$ -次数付きの空間 $V^0 + V^1$ であって、 V^0 は頂点作用素代数、 V^1 はその加群であり、 V^1 に対しては $L(0)$ の固有値に $\frac{1}{2} + Z$ まで認める。また、 $v \in V^1$ に対しても頂点作用素を定義し、これは $z^{\frac{1}{2}+Z}$ のべきまでも認める。更に、局所可換の性質が "局所超可換" : $v \in V^i, u \in V^j$ とすると、

$$(z-w)^N Y(v, z) Y(u, w) = (-1)^{ij} (z-w)^N Y(u, w) Y(v, z)$$

が十分大きな N に対して成り立つとしたものです。

注釈 1 頂点作用素代数の重要な性質を 3 つあげておきましょう。

最初の一つは、結合性

$$Y(v_n u, z) = Y(v, z)_n Y(u, z).$$

です。右辺は以前に定義した正規積です。これにより、頂点作用素は生成系に対して定義すると、全体の頂点作用素が定義出来ることが分かります。

2 番目の性質は *skew-symmetry* :

$$Y(u, z)v = e^{zL(-1)} Y(v, -z)u.$$

です。これにより、 v の u への作用が決まると、 u の v への作用素が決まります。

最後の性質は不変内積 $(,)$ の存在です。ここで、内積が不変と言う意味は、ヴィラソロ代数の原始元 v (即ち、 $L(0)v = kv$ で $L(r)v = 0 \forall r > 0$) に対して、

$$(v_m u, w) = (u, v_{2k-m-2} w)$$

$$(L(n)u, w) = (u, L(-n)w)$$

が成り立つことです。これは 剰余空間 $V_0/L(1)V_1$ の各元に対応して存在することが知られています。

定義 5 頂点作用素代数 $(V, Y, 1, w)$ の "加群" とは、 C -次数付きベクトル空間

$$M = \bigoplus_{n \in C} M_n$$

で、各ホモジニアス空間 M_n は有限次元であり、任意の $r \in C$ に対して、十分小さな整数 n を取ると、 $M_{r+n} = 0$ となる条件を満たしている。また、 V の各元 v に対して、加群の頂点作用素と呼ばれる $End(M)$ の元を係数とする形式的べき級数

$$Y^M(v, z) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} v_n^M z^{-n-1} \in (End(M))[[z, z^{-1}]]$$

が線形に対応していて、以下の条件を満たすものである。

(1) $Y^M(1, z) = 1_M$.

(2) $Y^M(w, z) = \sum L^M(n) z^{-n-2}$ の係数 $L^M(n)$ は:

(2.1) 同じ中心電荷を持つヴィラソロ代数の生成系,

(2.2) $L^M(-1)$ は微分:

$$[L^M(-1), Y^M(v, z)] = Y^M(L(-1)v, z) = \frac{d}{dz} Y^M(v, z),$$

(2.3) $L^M(0)_{M_n} = n 1_{M_n}$

などの同じ性質を満たす。

(3) 局所可換性

(4) 結合性:

$$Y(u_n v, z) = Y^M(u, z)_n Y^M(v, z).$$

最後の結合性は頂点作用素代数の場合には、他の条件から出てきます。特にすべての元は真空から頂点作用素によって生成されるので、頂点作用全体がきまると、元との対応が決まります。加群の場合には、この条件がないので、結合性が必要となります。

2.2 Intertwining 作用素

定義 6 $(V, Y, 1, w)$ を頂点作用素代数とし、 (W^1, Y^1) 、 (W^2, Y^2) 、 (W^3, Y^3) を3つの V -加群とする。タイプ $\begin{pmatrix} W^1 \\ W^2 & W^3 \end{pmatrix}$ の *intertwining* 作用素とは線形写像

$$\begin{aligned} I(*, z) : W^2 &\rightarrow (Hom(W^3, W^1))\{z\} \\ u &\rightarrow I(u, z) = \sum_{n \in \mathbb{Q}} u_n z^{-n-1} \end{aligned}$$

で次の条件を満たすものです。

(1) 微分: $I(L^1(-1)u, z) = \frac{d}{dz} I(u, z)$.

(2) 局所可換性: for $v \in V, u \in W^2$,

$$(z - z_1)^N \{Y^1(v, z)I(u, z_1) - I(u, z_1)Y^3(v, z)\} = 0$$

(3) 結合性: $I(v_n^1 u, z) = Y(v, z)_n I(u, z)$,

ここで、*Intertwining* 作用素に対する正規積 $Y(v, z)_n I(u, z)$ は

$$Res_{z_1} \{(z_1 - z)^n Y^1(v, z_1)I(u, z) - (-z + z_1)^n I(u, z)Y^3(v, z_1)\}$$

で与えます。

定義 7 $I_V \begin{pmatrix} W^1 \\ W^2 & W^3 \end{pmatrix}$ でタイプ $\begin{pmatrix} W^1 \\ W^2 & W^3 \end{pmatrix}$ の *intertwining* 作用素全体の集合を表す。これはベクトル空間であり、その次元を $N_{W^2, W^3}^{W^1}$ で表す。この次元を表示するために、フュージョン規則と呼ばれる次の表示を使う。

$$W^2 \times W^3 = \sum_W N_{W^2, W^3}^W W,$$

ここで、 W は V のすべての既約加群を動きます。

2.3 頂点作用素 (超) 代数のテンソル積

$(V^1, Y^1, 1^1, w^1)$ と $(V^2, Y^2, 1^2, w^2)$ を頂点作用素代数とする。 $v^1 \otimes v^2 \in V^1 \otimes V^2$ に対して、 $v^1 \otimes v^2$ の弱頂点作用素を

$$(Y^1 \otimes Y^2)(v^1 \otimes v^2, z) = Y^1(v^1, z) \otimes Y^2(v^2, z) \in \text{End}(V^1 \otimes V^2)[[z, z^{-1}]]$$

と定義し、線形に全体に拡張すると、

$$(V^1 \otimes V^2, Y^1 \otimes Y^2, 1^1 \otimes 1^2, w^1 \otimes 1^2 + 1^1 \otimes w^2) \quad (3.16)$$

は頂点作用素代数となります。これを頂点作用素代数のテンソル積と呼ぶことにします。既約 $V^1 \otimes V^2$ -加群はそれぞれの既約加群のテンソル積となります [DMZ]。

テンソル積の加群の間のフュージョン規則を調べてみましょう。

定理 2.1 V と W を有理型頂点作用素代数とする。 V^1, V^2, V^3 を既約 V -加群、 W^1, W^2, W^3 を既約 W -加群とし、 $N_{V^1, V^2}^{V^3} \leq 1$ と仮定する。この時、

$$I_V \begin{pmatrix} V^3 \\ V^1 & V^2 \end{pmatrix} \otimes I_W \begin{pmatrix} W^3 \\ W^1 & W^2 \end{pmatrix} = I_{V \otimes W} \begin{pmatrix} V^3 \otimes W^3 \\ V^1 \otimes W^1 & V^2 \otimes W^2 \end{pmatrix}$$

が成り立つ。

[証明] 証明は [M1] の Proposition 4.4 とほとんど同じ論法を使う。 ■

上の定理の系として、次の結果が得られる。

系 2.1 V^1 と V^2 を有理型の頂点作用素とする。この時、 $V^1 \otimes V^2$ も有理型である。

[証明] $V = V^1 \otimes V^2$ とおき、正しくないと仮定しましょう。 (W, Y^W) を直既約 V -加群とする。 V は高々有限個の既約加群を持つので、 W は既約 V -部分加群 $W^0 = U^1 \otimes U^2$ を持ちます。 $V^i \times U^i \cong U^i$ なので、 W のすべての既約因子は W^0 に同型です。故に、 W は部分加群の列 $0 \subseteq W^0 \subseteq \dots \subseteq W^k = W$ で $W^i/W^{i-1} \cong W^0$ となるものを持ちます。特に、 $W^i = W^{i-1} \oplus X^i$ はベクトル空間としては分解します。 π を射影 $\pi^i: W^i \rightarrow X^i$ で $\pi(W^{i-1}) = 0$ とする。この時、 $v^1 \in V^1, v^2 \in V^2$ に対して、 X^i に制限し、 π^j の像を取ると、

$$\pi^j Y(v^1 \otimes v^2, z): X^i \rightarrow X^j \in \text{Home}(X^i, X^j) U^j[[z, z^{-1}]].$$

が出てきます。加群の頂点作用素の性質から、上はタイプ $\begin{pmatrix} U^1 \otimes U^2 \\ V^1 \otimes V^2 & U^1 \otimes U^2 \end{pmatrix}$ の *intertwining* 作用素となっていることが分かります。加群なので、 $V^1 \times W^0 = W^0$ 且つ $V^2 \times U^0 = U^0$ は当然であり、先の

定理から、 $\dim I \begin{pmatrix} U^1 \otimes U^2 \\ V^1 \otimes V^2 & U^1 \otimes U^2 \end{pmatrix} = 1$ が出てきます。 $I(*, z) \in I \begin{pmatrix} U^1 \otimes U^2 \\ V^1 \otimes V^2 & U^1 \otimes U^2 \end{pmatrix}$ をゼロでない intertwining 作用素で、 $I(1, z) = 1_{U^1 \otimes U^2}$ となるものを固定しておきます。この時、ベクトル空間として、 $W = \otimes_{i=0}^k X^i$ なので、ある $(k+1) \times (k+1)$ -matrix A を使って

$$Y(v, z) = A \otimes I(v, z),$$

と表示出来ます。 $Y(1, z) = 1_W$ より、 A は単位行列であり、それゆえ、 W は既約 $V^1 \otimes V^2$ -加群の直和となっている事が分かります。 ■

2.4 1次元ラティス頂点作用素超代数の研究

$L = \mathbb{Z}x$ を一次元ラティスで $\langle x, x \rangle = 1$ とする。これから、本 [FLM] にあるラティス頂点作用素代数の構成に従って、頂点作用素代数を構成してみましょう。 $H = \mathbb{C}x$ を不変内積 \langle, \rangle を持つ可換リ一代数と考え、そのアフィンリー代数

$$\hat{H} = H[t, t^{-1}] + \mathbb{C}k$$

$$[h \otimes t^n, h' \otimes t^m] = \delta_{m+n, 0} n \langle h, h' \rangle k, \quad [\hat{H}, k] = 0$$

を構成して、その正の部分 $H[t]$ の対称テンソル代数 $M(1)$ を考える。この時、 $V_L = \oplus_{a \in L} M(1)e^a$ をフォック空間とし、頂点作用素を以下の様に定義する。

$$Y(e^a, z) = \exp \left(\sum_{n \in \mathbb{Z}_+} \frac{a(-n)}{n} z^n \right) \exp \left(\sum_{n \in \mathbb{Z}_+} \frac{a(n)}{-n} z^{-n} \right) e^a z^a. \quad (2.1)$$

$$Y(a(-1)e^0, z) = \sum a(n) z^{-n-1}.$$

ここで、 $a \in H$ に対する $a(n)$ は at^n の作用を表しています。他の元は正規積を使って定義する。直接の計算より、

補題 2.2 十分大きな N に対して、

$$\begin{aligned} [\sum a(n)x^{-n-1}, Y(e^b, z)] &= 0 & \forall a, b \in L, \\ (x-z)^N [Y(e^a, x), Y(e^b, z)] &= 0 & \text{for } \langle a, b \rangle \equiv 2 \pmod{2}, \\ (x-z)^N \{Y(e^a, x)Y(e^b, z) + Y(e^b, z)Y(e^a, x)\} &= 0 & \text{for } \langle a, b \rangle \equiv 1 \pmod{2}, \end{aligned}$$

が成り立ちます。この関係は先に述べた超局所可換性と同じです。

この中に次の2つの直交する共形元が見つかります。 [M2]

$$\begin{aligned} w^1 &= \frac{1}{4}x(-1)^2 1 + \frac{1}{4}(e^{2x} + e^{-2x}) \quad \text{and} \\ w^2 &= \frac{1}{4}x(-1)^2 1 - \frac{1}{4}(e^{2x} + e^{-2x}) \end{aligned}$$

最初に述べたように、これらはイジング模型をそれぞれ生成し、その加群は3つしかないので、ウェイト空間の次元を計算することで、 V_L が $\langle w^1 \rangle \otimes \langle w^2 \rangle$ -加群として、 $(L(\frac{1}{2}, 0) \oplus L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})) \otimes (L(\frac{1}{2}, 0) \oplus L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}))$ に同型であることが分かります。ここで、 $\langle w^i \rangle$ は w^i によって生成される部分代数を表します。 θ で L 上で -1 の作用から誘導された V_L の自己同型とする。この固定空間 $(V_L)^\theta$ をとると、これも w^1 と w^2 を含む頂点作用素超代数となっています。 $\langle w^1 \rangle \otimes \langle w^2 \rangle$ -加群としての分解は次数空間の次元から、

$$(V_L)^\theta \cong \left(L\left(\frac{1}{2}, 0\right) \otimes L\left(\frac{1}{2}, 0\right) \right) \oplus \left(L\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \otimes L\left(\frac{1}{2}, 0\right) \right) \quad (4.8)$$

となります。さらに、部分空間 $M = \{v \in (V_L)^\theta \mid w^2_1 v = 0, w^2_0 v = 0\}$ をとると、これはヴィラソロ元 w^1 を持つ頂点作用素超代数であり、 $\langle w^1 \rangle$ -加群として、 $L(\frac{1}{2}, 0) \oplus L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ と同型です。それゆえ、以下の定理を証明しました。[M2]

定理 2.2 (M, Y, w^1, e^0) は単純頂点作用素超代数で、偶部分 $M_0 \cong L(\frac{1}{2}, 0)$ と奇部分 $M_1 \cong L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ を持つ。これの中心電荷は $\frac{1}{2}$ であり、正值（実数体上で構成すると）不変内積を持つ。ここで、頂点作用素はすべて V_L のものを M に制限して考えている。

記号を簡単にするために、 M_1 の最小次数の元

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}}(e^x + e^{-x}) \in M_1 \quad (2.2)$$

を固定しておきます。直接の計算で、

$$q_{-2}q = 2w^1, \quad q_{-1}q = 0, \quad q_0q = 1.$$

となることが分かります。

容易に V_{Za} の中で次の対応が成り立っていることが分かります。:

$$\begin{aligned} x(-1)e^0 &\in L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \otimes L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}), \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(e^x + e^{-x}) &\in L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \otimes L(\frac{1}{2}, 0), \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(e^x - e^{-x}) &\in L(\frac{1}{2}, 0) \otimes L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}). \end{aligned}$$

さらに、 $\frac{1}{2}(e^x + e^{-1})_{-1}(e^x - e^{-1}) = x(-1)e^0$ も成り立ちます。

同様の方法で、 V_{2Zx} -加群 $W = V_{Zx/2}$ とその加群頂点作用素 Y^W を定義出来ます。同様に (2.1) によって形式的べき級数 $I^W(v, z) \in \text{End}(W)[[z^{1/2}, z^{-1/2}]]$ を $v \in V_{Zx}$ に対して定義でき、明らかに $v \in V_{2Zx}$ に対しては、 $I^W(v, z) = Y^W(v, z)$ です。それゆえ、 $I^W(q, z) = \sum q_n z^{-n-1}$ は $u \in V_{2Zx}$ に対しては $Y^W(u, z)$ と局所可換性が成り立ちます。即ち、 $I^W(*, z)$ はタイプ $\begin{pmatrix} W \\ M & W \end{pmatrix}$ の intertwining 作用素となっています。 V_{2Zx} -加群 $V_{Zx/2}$ は既約 V_{2Zx} -加群の直和

$$V_{Zx/2} = V_{Zx} \oplus V_{2Zx+x/2} \oplus V_{2Zx-x/2}$$

に分解し、 q_n は $\{V_{2Zx+x/2}, V_{2Zx-x/2}\}$ の2つを交換しています。次数空間の次元を直接計算して、 $V_{2Zx+x/2}$ と $V_{2Zx-x/2}$ は両方とも $\langle w^1 \rangle \otimes \langle w^2 \rangle$ -加群として、 $L(\frac{1}{2}, \frac{1}{16}) \otimes L(\frac{1}{2}, \frac{1}{16})$ に同型であることが分かります。 $V_{2Zx+x/2}$ と $V_{2Zx-x/2}$ の最小次数の元 $e^{\frac{1}{2}x}$ と $e^{-\frac{1}{2}x}$ を固定して考えます。 $M_1 \cong L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ の元 v に制限して、固有値 $\frac{1}{16}$ を持つ w^2 の固有空間を考えると、 $I^W(v, z)$ から、次の3つの intertwining 作用素が定義できます。

$$\begin{aligned} I^{\frac{1}{2}, 0}(*, z) &\in I \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 0 \end{pmatrix}, \\ I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{2}}(*, z) &\in I \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}, \\ I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{16}}(*, z) &\in I \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{16} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

$M_0 \cong L(\frac{1}{2}, 0)$ に制限することで、さらに、次の intertwining 作用素を得る事もできます。

$$\begin{aligned}
I^{0,0}(*, z) &\in I \begin{pmatrix} 0 & \\ & 0 \end{pmatrix}, \\
I^{0, \frac{1}{2}}(*, z) &\in I \begin{pmatrix} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{16} \end{pmatrix} \text{ and} \\
I^{0, \frac{1}{16}}(*, z) &\in I \begin{pmatrix} & \frac{1}{16} \\ 0 & \frac{1}{16} \end{pmatrix},
\end{aligned}$$

これらは、実際 $\langle w^1 \rangle$ の加群頂点作用素となっています。

これらを使うと、一次元ラティスの頂点作用素代数で定義した (加群) 頂点作用素

$$Y(u \otimes v, z) \in \text{End}(V_{(\frac{1}{2}+Z)x})\{z, z^{-1}\}$$

は

$$\begin{aligned}
Y(u \otimes v, z) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \otimes I^{0, \frac{1}{16}}(u, z) \otimes I^{0, \frac{1}{16}}(v, z) && \text{for } u \otimes v \in L(\frac{1}{2}, 0) \otimes L(\frac{1}{2}, 0), \\
Y(u \otimes v, z) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \otimes I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{16}}(u, z) \otimes I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{16}}(v, z) && \text{for } u \otimes v \in L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \otimes L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}), \\
Y(u \otimes v, z) &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \otimes I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{16}}(u, z) \otimes I^{0, \frac{1}{16}}(v, z) && \text{for } u \otimes v \in L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \otimes L(\frac{1}{2}, 0), \\
Y(u \otimes v, z) &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \otimes I^{0, \frac{1}{16}}(u, z) \otimes I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{16}}(v, z) && \text{for } u \otimes v \in L(\frac{1}{2}, 0) \otimes L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}).
\end{aligned}$$

と書けることがわかります。これらが、コード頂点作用素代数の表現の基本的な構成因子となります。

注釈 2 定義から、

(1) $I^{0,*}(*, z)$, $I^{\frac{1}{2}, 0}(*, z)$, $I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{2}}(*, z)$ における z のべきはすべて整数であり、 $I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{16}}(*, z)$ のべきは半整数 $\frac{1}{2} + Z$ です。

(2) $I^W(*, z)$ は微分を満たす。

(3) $I^W(*, z)$ は局所超可換を満たす：

$v \in M_i$ と $u \in M_j$ に対して、

$$I^W(v, z_1)I^W(u, z_2) \sim (-1)^{ij}I^W(u, z_2)I^W(v, z_1)$$

ここで $A(z_1, z_2) \sim B(z_1, z_2)$ は十分大きな整数 N に対して、

$$(z_1 - z_2)^N A(z_1, z_2) = (z_1 - z_2)^N B(z_1, z_2)$$

が成り立っている事を意味します。特に、 $I^{*, \frac{1}{16}}(*, z)$ は局所超可換

$v \in M_i$ と $u \in M_j$ に対して、

$$I^{i/2, \frac{1}{16}}(v, z_1)I^{j/2, \frac{1}{16}}(u, z_2) \sim (-1)^{ij}I^{j/2, \frac{1}{16}}(u, z_2)I^{i/2, \frac{1}{16}}(v, z_1)$$

を満足していることがわかります。

次に結合性を見てみよう。

注釈 3 明らかに、 $V_{2Zx} = \{L(\frac{1}{2}, 0) \otimes L(\frac{1}{2}, 0)\} \oplus \{L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \otimes L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})\}$ であり、これは頂点作用素代数です。そして、 $W = V_{\frac{1}{2}x+2Zx}$ は V_{2Zx} -加群です。 $L(\frac{1}{2}, 0) \otimes L(\frac{1}{2}, 0)$ -加群とみて、加群頂点作用素 Y^W は (2.9) によって、次の構造を持ちます。

$$(I \otimes I)(u \otimes v, z) = \begin{cases} I^{0, \frac{1}{16}}(u, z) \otimes I^{0, \frac{1}{16}}(v, z) & \text{for } u, v \in L(\frac{1}{2}, 0), \\ I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{16}}(u, z) \otimes I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{16}}(v, z) & \text{for } u, v \in L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}). \end{cases}$$

特に、 $I \otimes I$ は結合性と微分を満たす事がわかります。頂点作用素代数の構成から、 $Y(*, z)$ は

$$Y(x(n)v, z) = Y(x(-1)1, z)_n Y(v, z)$$

を満たしている事は知られており、 $x(-1)1 \in L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \otimes L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ の作用に対しては結合性が満たされます。さらに、正規積も結合性を満たしています。 $Y(*, z)$ は当然 $L(\frac{1}{2}, 0) \otimes L(\frac{1}{2}, 0)$ の作用と結合性をみたしているので、 $u^1 \otimes u^2 \in L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \otimes L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ と $u^3 \otimes v \in L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \otimes L(\frac{1}{2}, 0)$ に対して、 $V_{(\frac{1}{2}+z)x}$ の作用素を以下の様に計算できます。

$$\begin{aligned} & Y((u^1 \otimes u^2)_n(u^3 \otimes v), z) \\ &= Y(u^1 \otimes u^2, z)_n Y(u^3 \otimes v, z) \\ &= \text{Res}_x \{(x-z)^n Y(u^1 \otimes u^2, x) Y(u^3 \otimes v, z) - (-z+x)^n Y(u^3 \otimes v, z) Y(u^1 \otimes u^2, x)\} \\ &= \text{Res}_x \{(x-z)^n \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \otimes (I \otimes I)(u^1 \otimes u^2, x) \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \otimes (I \otimes I)(u^3 \otimes v, z) \\ &\quad - (-z+x)^n \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \otimes (I \otimes I)(u^3 \otimes v, z) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \otimes (I \otimes I)(u^1 \otimes u^2, x)\} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \text{Res}_x \{(x-z)^n \otimes I \otimes I(u^1 \otimes u^2, x) \otimes I \otimes I(u^3 \otimes v, z) \\ &\quad + (-z+x)^n \otimes I \otimes I(u^3 \otimes v, z) \otimes I \otimes I(u^1 \otimes u^2, x)\}. \end{aligned}$$

一方、 $(u^1 \otimes u^2)_n(u^3 \otimes v) \in L(\frac{1}{2}, 0) \otimes L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ なので、

$$\begin{aligned} & Y((u^1 \otimes u^2)_n(u^3 \otimes v), z) \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \otimes (I \otimes I)((u^1 \otimes u^2)_n(u^3 \otimes v), z) \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma \end{aligned}$$

$I^{*, \frac{1}{16}}(*, z)$ は $L(\frac{1}{2}, 0)$ の作用に対して結合性が成り立つので、 $u, v \in L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ に対して、

$$I^{0, \frac{1}{16}}(u_n v, z) = I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{16}}(u, z)_n I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{16}}(v, z)$$

です。ここで、 $I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{16}}(*, z)$ と $I^{\frac{1}{2}, \frac{1}{16}}(*, z)$ の正規積は

$$a(z)_n b(z) = \text{Res}_x \{(x-z)^n a(x) b(z) + (-z+x)^n b(z) a(x)\}$$

で定義されており、これを"超正規積"と呼び、その他も超をつけて呼ぶことにします。例えば、 $I^{h, \frac{1}{16}}(*, z)$ と $I^{k, \frac{1}{16}}(*, z)$ は"超結合性"

$$\begin{aligned} & I^{h+k, \frac{1}{16}}(u_n v, z) \\ &= \text{Res}_x \{(x-z)^n I^{h, \frac{1}{16}}(u, x) I^{k, \frac{1}{16}}(v, z) - (-1)^{|u||v|} (-z+x)^n I^{k, \frac{1}{16}}(v, z) I^{h, \frac{1}{16}}(u, x)\} \end{aligned}$$

を $u \in L(\frac{1}{2}, h), v \in L(\frac{1}{2}, k)$ で $h, k = 0, \frac{1}{2}$ となるものに対して満足します。ここでもし $v \in L(\frac{1}{2}, 0)$ なら $|v|=0$ であり、 $v \in L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ なら、 $|v|=1$ です。

3 コード頂点作用素代数 M_D と M_D -加群

3.1 コード頂点作用素代数

著者は [M2] の中で 任意の偶線形 2元コード D に対して、イジング模型を使って頂点作用素代数を構成できることを示しました。構成はここでは略しますが、必要な性質をいくつか述べておきましょう。 M_D は

内部に $T = \otimes_{i=1}^n L(\frac{1}{2}, 0)$ を含んでおり、 T -加群とみて、 M_D は $L(\frac{1}{2}, \frac{1}{16})$ を一つも含んでいないものです。また、

$$W \text{ が } M_D \text{ の 既約 } T\text{-部分加群} \Leftrightarrow 2lwr(T, W) \in D$$

です。ここで、 $2lwr(T, W)$ の意味は $(h_i) = lwr(T, W)$ と置くと、 $h_i = 0, \frac{1}{2}$ の場合だけここでは扱っているの、記号を乱用して、 $2(h_i) = (2h_i)$ をバイナリーワードと見えています。

実際には、これは必要十分条件であり、次の定理が成り立つことがわかります。

定理 3.1 V を単純な頂点作用素代数とし、和がヴィラソロ元となるような、互いに直交する有理型の中心電荷 $\frac{1}{2}$ の共形元 $\{e^1, \dots, e^n\}$ を含むとする。もし、 e^i から定義される自己同型 τ_{e^i} がすべて自明なら、 V はあるコード頂点作用素代数 M_D に同型である。

W を M_D -加群とする。この時、 T -加群とみて、既約 T -加群の和となるので、最小次数の列の集合 $lwr(T, W)$ が決まる。もし、 W が既約 M_D -加群とすると、イジング模型のフュージョン規則より、 $(h^i) \in lwr(T, W)$ における $h^i = \frac{1}{16}$ となる位置は (h^i) に依存しない。それゆえ、この位置を2元ワード $\tilde{h}(W)$ で表示し、 $\frac{1}{16}$ -位置ワードと呼ぶ。

3.2 分類

既約 M_D -加群 X を完全に決定しましょう。コード頂点作用素代数の加群に関してもっとも基本的な事は次の結果です。

補題 3.1 $\tilde{h}(X)$ は D と直交している。

$K = \{\alpha \in D \mid \alpha \subseteq \tilde{h}(X)\}$ とおき、 H を極大な自己直交部分コードとします。 K は偶コードなので、 $H^\perp \cap K \subseteq H$ です。 $\hat{K} = \{\pm e^k : k \in K\}$ で K の ± 1 による (可換基本2群としての) 中心拡大とする。この時、 $\{\pm e^\alpha : \alpha \in H\}$ は \hat{K} の極大なアーベル正規部分群です。 M_D -加群 X に対して、 X の既約 M_H -部分加群が X 上の M_D -加群としての構造を決定していることを示しましょう。

定理 3.2 (X, Y^X) を既約 M_D -加群とし、 $\{X^i : i = 1, \dots, k\}$ を既約 T -部分加群全体の集合とする。この時、既約 \hat{K} -加群 Q^i で $-e^0 \in \hat{K}$ は -1 と作用するものが存在して、 M_K -加群として、 $X \cong \oplus_{i=1}^k (Q^i \otimes X^i)$ となる。

[証明] U を X^1 と同型な T -加群全体で生成されたホモジニアス空間とし、 $U = \oplus_{i=1}^k U^i$ を既約 T -部分加群での直和分解とする。 $\alpha = (a^i) \in K$ に対して、 $q^\alpha = \otimes q^{a^i} \in M_K$ を次の様に定義する。

$$\begin{cases} a^i = 1 \text{ なら (2.2) の } q \text{ を使って } q^{a^i} = q \in L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \text{ とし、} \\ a^i = 0 \text{ なら } q^{a^i} \text{ は } L(\frac{1}{2}, 0) \text{ の真空とする。} \end{cases} \quad (3.1)$$

イジング模型のフュージョン規則より、 $\alpha \in K$ に対して、 $Y^X(q^\alpha \otimes e^\alpha, z)U \subset U[[z, z^{-1}]]$ が成り立ちます。 $L(\frac{1}{2}, 0)$ と $L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ は他の既約 $L(\frac{1}{2}, 0)$ -加群とのテンソル積が既約となるという性質を持つので、 $u^\alpha \otimes e^\alpha$ の頂点作用素 $Y^X(u^\alpha \otimes e^\alpha, z)|_U$ は $u^\alpha \otimes e^\alpha \in M_\alpha$ に対して、

$$A(e^\alpha) \otimes ((\otimes I)(u^\alpha, z)),$$

の表示を持つことが分かります。ここで、 $A(e^\alpha)$ は $k \times k$ -行列で $(\otimes I)(*, z)$ は intertwining 作用素のテンソル積です。 $Y^X(u^\alpha, z)$ は局所可換を満たし、 $(\otimes I)(u^\alpha, z)$ は局所超可換を満たすので、合わせて局所超可換

$$A(\alpha)A(\beta) = (-1)^{\langle \alpha, \beta \rangle} A(\beta)A(\alpha).$$

を得ます。しかも、 $Y^X(*, z)$ は結合性を満たし、 $(\otimes I)(u^\alpha, z)$ は超結合性を満たすので、結合性

$$A(e^\alpha)A(e^\beta) = A(e^\alpha e^\beta)$$

を得る事ができ、 A は中心拡大 \hat{K} の表現であることが分かります。さらに、 Q^1 が既約であることも容易に証明できます。 ■

同じ論法で、次の事が証明できます。

命題 3.1 M_D は有理型の頂点作用素代数である。

3.3 誘導加群と誘導頂点作用素代数

K を D の部分線形コードとし、 W を既約 M_K -加群とします。ここで、 W の $\frac{1}{16}$ の位置ワードが D と直交していると仮定します。この時、 M_D -既約加群で M_K -加群として、 W を含んでいるものを構成出来ることを示しましょう。

まず、中心拡大 \hat{K} はアーベル群と extra-special 2-群との中心積なので、すべての既約 \hat{K} -表現 ϕ で $\phi(-e^0) = -1$ となるのものは、極大アーベル正規部分群 \hat{H} の線形表現を誘導したものであることに注意してください。それゆえ、 M_H -加群を M_D -加群に誘導出来ることを示します。 W はその途中で出来ます。

$\beta \in D^\perp$ を一つ固定しておきます。これが $\frac{1}{16}$ -位置ワードに対応します。 $K = \{\alpha = (a^i) \in D \mid \alpha \subseteq \beta\}$ とおき、 H で K のある極大自己直交部分コードとします。 H の中心拡大 \hat{H} の線形既約指標を $\chi: \pm \hat{H} \rightarrow \pm 1$ で $\chi(-e^0) = -1$ となるものを選び、 F_χ で一次元 \hat{H} -加群で $p \in F_\chi, \alpha \in H$ に対して、 $e^\alpha p = \chi(e^\alpha)p$ となるものとし、適当な $h^i = 0, \frac{1}{2}, \frac{1}{16}$ で (h^i) の $\frac{1}{16}$ -位置ワードが β となるものとし、この時、 $U = \otimes L(\frac{1}{2}, h^i) \otimes F_\chi$ は T -加群です。 $(a^i) \in H$ とし、 U 上の $u^i \in M_{a^i}$ の加群頂点作用素 $Y^U((\otimes u^i) \otimes e^\alpha, z)$ を

$$(\otimes_{i=1}^n I^{a^i/2, h^i}(u^i, z)) \otimes \chi(e^\alpha)$$

によって定義し、 M_H に線形で拡張させます。

補題 3.2 $Y^U(v, z)$ は $v \in M_H$ に対して定義可能であり、微分、結合性、局所可換をみます。特に、 U は M_H -加群である。

上の M_H -加群を $U((h^i), \chi)$ で表します。

次に D を $\hat{h}(U)$ に直交していると仮定します。 $U((h^i), \chi)$ から M_D -加群

$$X = \text{Ind}_{M_H}^{M_D}(U((h^i), \chi))$$

を以下の様に誘導できます。

$\{\beta^1 = (b_1^i), \dots, \beta^s = (b_s^i)\}$ を H の D における代表系とします。このとき、 $\{e^{\beta^i} : i = 1, \dots, s\}$ は \hat{H} の \hat{D} における代表系です。

$$X = \oplus_{(\beta^i) \in D/H} \{U(h^i + \frac{\beta^i}{2}) \otimes (e^{\beta^i} \otimes_{\hat{H}} F_\chi)\},$$

とおきます。ここで $h^i + \frac{b^i}{2}$ はイジング模型のフュージョン規則に従います。容易に、 X は代表系の取り方に依存せず、 M_H -加群となることがわかります。

$\gamma \in D$ とする。 $q^\gamma \otimes e^\gamma$ に対する加群頂点作用素 $Y(q^\gamma \otimes e^\gamma, z)$ を最初の成分に対しては、 $(\otimes I)(q^\gamma, z)$ とし、2番目の成分に対しては e^γ で定義します。ここで、 $(\otimes I)(q^\gamma, z)$ は (3.1) を使います。この加群を $Ind_{M_H}^{M_D}(U)$ で表します。これが定義可能な加群であることの証明は略します。[M3] を参照してください。

命題 3.2 $Ind_{M_H}^{M_D}(U)$ は M_D -加群である。

$\gamma \in D - H$ に対しては q^γ が $\frac{1}{16}$ -位置ワード β を持つ既約 T -加群 U 上に正則 (固定点を持たない) に作用するので、

定理 3.3 X を既約 M_D -加群で $\frac{1}{16}$ -位置ワード β を持つものとする。この時、最小次数列 $h = (h^1, \dots, h^n)$ と H の線形指標 χ の組み $((h^i), \chi)$ があって、 $X = Ind_{M_H}^{M_D}(U((h^i), \chi))$ となる。

上の定理の系とし、次の結果を得ます。

定理 3.4 X を M_D -加群で、 $\frac{1}{16}$ -位置ワード \tilde{h} を持つものとし、 $K = \{\alpha \in D : \alpha \subseteq \tilde{h}\}$ とし、 H を極大の自己直交している K の部分コードとします。この時、 X の M_D -加群としての構造は M_H -既約部分加群によって一意的に決まる。

References

- [B] R.E. Borcherds, Vertex algebras, Kac-Moody algebras, and the Monster, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 83 (1986), 3068-3071.
- [DM] C. Dong, G. Mason, On quantum Galois theory, preprint.
- [DMZ] C. Dong, G. Mason and Y. Zhu, Discrete series of the Virasoro algebra and the moonshine module, Proc. Symp. Pure. Math., American Math. Soc. 56 II (1994), 295-316.
- [FHL] I. Frenkel, Y.-Z. Huang and J. Lepowsky, "On axiomatic approaches to vertex operator algebras and modules", Memoirs Amer. Math. Soc. 104, 1993.
- [FLM] I.B. Frenkel, J. Lepowsky, and A. Meurman, Vertex Operator Algebras and the Monster, Pure and Applied Math., Vol. 134, Academic Press, 1988.
- [FZ] I. Frenkel and Y. Zhu, Vertex operator algebras associated to representations of affine and Virasoro algebras, Duke Math. J. 66 (1992), 123-168.
- [L1] H.-S. Li, Local systems of vertex operators, vertex superalgebras and modules, J. Pure Appl. Alg., to appear.
- [M1] M. Miyamoto, Griess algebras and conformal vectors in vertex operator algebras, J. Algebra 179, (1996) 523-548.
- [M2] M. Miyamoto, Binary codes and vertex operator (super)algebras, J. algebra 181, (1996) 207-222.
- [M3] M. Miyamoto, Representation theory of Code VOA and construction of VOAs, preprint.