数理解析研究所講究録
1024巻 1998年 40-47

Constructing a non-degenerate commuting square from equivalent systems of bimodules

佐藤 信哉 (Nobuya SATO) *
東大数理 学振 PD

今回の講演では，2つの Jones index 有限かつ finite depth な subfactor が有限次元 non-degenerate commuting square から得られるための必要十分条件は，元の2つの subfactor が opposite equivalent であるという結果について説明したいと思う．

§1 Commuting square と V. F. R. Jones の問題

今回の講演の内容は，V. Jones が 1995年の Aarhus における研究集会で出した問題のいわば逆問題である．このため，Jones の問題とは何であったかというところから説明しよう．

V. F. R. Jones の問題（1995年6月, デンマーク）

$R_{i,j}$ $(i,j = 0,1)$ を有限次元 von Neumann algebras とし，これらが次のように non-degenerate commuting square を成しているとする．

$$\begin{array}{ccc} R_{00} & \overset{A}{\subset} & R_{01} \\ {\scriptstyle D}\cap & & \cap{\scriptstyle B} \\ R_{10} & \underset{C}{\subset} & R_{11} \end{array}$$

ただし，A,B,C,Dは既約な inclusion matrices であるとする．（すなわち，inclusion に現れるグラフが連結であるとする.）これらに，basic construction を繰り返すことにより，次の有限次元 von Neumann algebra の2重増大列とその極限の AFD II_1 factor の列を得る．

$$\begin{array}{ccccccccc} R_{00} & \subset & R_{01} & \subset & R_{02} & \cdots & \subset \overline{\cup_{n=0}^{\infty} R_{0n}}^{\text{weak}} & = N \\ \cap & & \cap & & \cap & & \cap & \\ R_{10} & \subset & R_{11} & \subset & R_{12} & \cdots & \subset \overline{\cup_{n=0}^{\infty} R_{1n}}^{\text{weak}} & = M \\ \cap & & \cap & & \cap & & \cap & \\ R_{20} & \subset & R_{21} & \subset & R_{22} & \cdots & \subset \overline{\cup_{n=0}^{\infty} R_{2n}}^{\text{weak}} & = M_1 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \\ P = \overline{\cup_{n=0}^{\infty} R_{n0}}^{\text{weak}} & \subset & Q = \overline{\cup_{n=0}^{\infty} R_{n1}}^{\text{weak}} & \subset & Q_1 = \overline{\cup_{n=0}^{\infty} R_{n2}}^{\text{weak}} & \cdots & & \end{array}$$

（ここで，$N \subset M \subset M_1 \cdots$および $P \subset Q \subset Q_1 \cdots$ は AFD II_1 factors であることが inclusion matrices の既約性と Perron-Frobenius の定理からわかる．）

Jones が出した問題とは，上のようにして作られた二つの subfactor $N \subset M$と $P \subset Q$ の間の関係を求めよ，特に，一方が finite depth であれば, もう一方もそうか，というものであった．

*e-mail address: nobuya@ms.u-tokyo.ac.jp

私は，この問題を paragroup 理論を使って解決した．すなわち，paragroup 理論の flatness に関する定理を証明することにより，定理の系として次の結果が得られた．

Jones の問題の解答 ([S1], Corollary 2.2) $N \subset M$が finite depth となるのは $P \subset Q$ が finite depth のときに限る．

これは，Jones が出した 2 番目の問題の解答を与える．

より強い結果も得られている．それを述べるために，subfactor の global index の定義が必要である．上で考えた 2 つの subfactor の間には, もはや Jones index についての関係は望めない事はすぐに分かるが，それに代わる関係として global index がある．

定義 (global index) II_1 subfactor $N \subset M$に対して，global index $[[M:N]]$ を次の式で定義する．

$$[[M:N]] = \sum_{{}_N X_N:\text{irreducible}} (\dim_N X)(\dim X_N)$$

ここで，${}_N X_N$は subfactor $N \subset M$から得られる既約 N-N bimodule である．

次の定理は Jones のはじめの問題の解答を与える．

定理 ([S1], Corollary 2.5) $[[M:N]] = [[Q:P]]$.

§2　3 次元 TQFT から subfactor の equivalence へ

上の定理は，2 つの subfactor と 3 次元の topological quantum field theory (3 次元 TQFT) の間に関係を与える．これについて説明しよう．

3 次元 TQFT とは，3 次元向き付け可能な閉多様体に対して有限次元 Hilbert 空間を対応させる，いくつかの公理を満たす functor である．この定義は，物理の意味での位相的場の量子論に端を発するが，Atiyah により数学的に公理化され，Turaev-Viro によって公理を満たす，3 次元多様体の 3 角形分割による，TQFT が数学的に厳密に構成された．さて，この Turaev-Viro 型の 3 次元 TQFT は，有限 index，finite depth の II_1 subfactor から構成できることが Ocneanu によって知られている．このために必要なデータが quantum $6j$-symbol である．

Subfactor から得られる 3 次元 TQFT を 3 次元球面に対して適用した場合に，得られる値は，global index の逆数であることが知られている．(一般に，境界のない 3 次元多様体に対する 3 次元 TQFT は，複素数値であることが公理として要求される．) これより，有限次元 non-degenerate commuting square から得られる縦，横 2 つのの subfactor は，3 次元球面に対しては，同じ TQFT を持つことになる．一方で，canonical commuting square から得られる縦，横 2 つの subfactor に 3 次元 TQFT を適用すると，それらは互いに複素共役の関係にある．これらをもとにして，次の定理が成り立つことがわかる．

定理 ([S2], Theorem 2.4) $N \subset M$から得られる TQFT と $P \subset Q$ から得られるそれは複素共役である．

この関係をある種の共役関係と思って，有限次元 non-degenerate commuting square から得られる縦，横 2 つの subfactor を特徴づけたい，というのがこの講演の主題である．そこで，2 つの有限 index，finite depth な subfactor が opposite equivalent であるということ

を3次元TQFTが互いに複素共役である，と定義したいところだが，これではうまく行かない．このため，次のような定義をするのが良いことがわかる．

定義 ([S3], Definition 2.3)　$A \subset B$, $C \subset D$を有限index，finite depthなII_1 subfactorとする．$A \subset B$と$C \subset D$がequivalentであるとは，B-C bimoduleがあって，$A \subset B$から得られるB-B bimodule, $C \subset D$から得られるC-C bimodule，およびB-C, C-B bimoduleの4種のbimoduleがfinite systemをなすこと，と定義する．

ここで，4種のbimoduleがfinite systemをなすとは，relative tensor product，contragradient, irreducible decompositionについて閉じていて，既約bimoduleの同値類が有限個である，ということである．

定義 ([S3], Definition 2.4)　$A \subset B$, $C \subset D$を有限index，finite depthなII_1 subfactorとする．$A \subset B$と$C \subset D$がopposite equivalentであるとは，$A \subset B$と$C^{\mathrm{opp}} \subset D^{\mathrm{opp}}$がequivalentである，と定義する．

これらの定義の背景には次の事実がある．

$N \subset M$をAFD II_1 factorのinclusionで，index有限，finite depthであると仮定する．このとき，3次元TQFTを得るが，その際にfusion algebraとして，N-N bimoduleのみからなるもの，M-M bimoduleのみからなるもののそれぞれから得られるTQFTは，同じものである．上に述べたequivalent subfactorの概念は，AFD II_1 subfactor $A \subset B$と$C \subset D$が同値であれば，B-B, B-C, C-B, C-Cの4種のbimoduleをもつparagroupがあるということであるから，これから，$A \subset B$から構成される3次元TQFTと$C \subset D$から構成されるそれは，同じものであることが分かる．同様に，AFD II_1 subfactor $A \subset B$と$C \subset D$がopposite equivalentであれば，3次元TQFTは互いに複素共役である．(一般に，AFD II_1 subfactor $A \subset B$から得られる3次元TQFTと，$A^{\mathrm{opp}} \subset B^{\mathrm{opp}}$から得られるそれは，複素共役である.)

ここで，equivalent subfactorの例を挙げよう．

例 1　RをAFD II_1 factor, Gを有限群，Hをその部分群でrelatively simpleであるとする．αをR上のGのouter actionとする．このとき，$R \subset R \times_\alpha G$は，$R \times_\alpha H \subset R \times_\alpha G$とequivalentである．なぜなら，$R \subset R \times_\alpha G$から得られる$R \times_\alpha G$-$R \times_\alpha G$ bimoduleのsystemと$R \times_\alpha H \subset R \times_\alpha G$から得られるそれとはOcneanuのMackey machineからequivalentであることがわかるからである．

例 2　より一般には，次の状況で成り立つ．$N \subset M$をAFD II_1 factorのinclusionでindex有限，finite depthとする．さらに，Pをそのintermediate subfactorとする．このとき，$P \subset M$から得られるM-M bimoduleのなすfusion rule algebraは，$N \subset M$から得られるそれのsubalgebraであるので，一般にglobal indexについて，不等式$[[M : P]] \leq [[M : N]]$が成り立つ．ここで，global indexについて，等式$[[M : P]] = [[M : N]]$が成り立つときは，両者のfusion rule algebraが一致することがわかる．これより，このglobal indexの等号下では，$N \subset M$と$P \subset M$がequivalentであることが従う．

例 3　$N \subset M$をAFD II_1 factorのinclusionでindex有限，finite depthさらに，fusion graphが連結であるとする．これのasymptotic inclusion $M \vee (M' \cap M_\infty) \subset M_\infty$を考えると，

これは subfactor $N\otimes N\subset M\otimes M$と equivalent である．これは，asymptotic inclusion の $M\vee(M'\cap M_\infty)$-$M\vee(M'\cap M_\infty)$ bimodule の system と $N\otimes N\subset M\otimes M$の $M\otimes M$-$M\otimes M$ bimodule のそれが equivalent であることから従う．

次に，opposite equivalent という概念は，有限次元 non-degenerate commuting square に自然に付随する概念であることについて説明しよう．そのためには，paragroup 理論の言葉を必要とする．

§1 の有限次元 non-degenerate commuting square に対応して，paragroup 理論における biunitary connection を得る．すなわち，4 つのグラフとその上の複素数値関数 (biunitary connection という) を得る．Biunitary connection は commuting square における正規直交基底の取り替えを与える unitary で，basic construction と compatible なものである．これに string algebra construction を施して，有限次元 von Neumann algebra の 2 重増大列とその極限の AFD II_1 factor の列を得る..

$$\begin{array}{ccccccc}
A_{0,0} & \subset & A_{0,1} & \subset & A_{0,2} & \cdots \subset & A_{0,\infty}=M_0\\
\cap & & \cap & & \cap & & \cap\\
A_{1,0} & \subset & A_{1,1} & \subset & A_{1,2} & \cdots \subset & A_{1,\infty}=M_1\\
\cap & & \cap & & \cap & & \cap\\
A_{2,0} & \subset & A_{2,1} & \subset & A_{2,2} & \cdots \subset & A_{2,\infty}=M_2\\
\vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots\\
\cap & & \cap & & \cap & & \\
Q_0=A_{\infty,0} & \subset & Q_1=A_{\infty,1} & \subset & Q_2=A_{\infty,2} & \cdots &
\end{array}$$

ここで，$M_0\subset M_1$か $Q_0\subset Q_1$の一方が finite depth であると仮定しよう．([S1, Corollary 2.2] によって，もう一方も自動的に finite depth である．) Ocneanu の compactness argument [O2, II.6] によって, $M_0\subset M_1$の "flat part"(=higher relative commutants) $M_0{}'\cap M_k$はおのおのの kに対して，$A_{k,0}$に含まれる．$M_0{}'\cap M_k$ を B_k，$\vee_{k=0}^{\infty}M_0{}'\cap M_k$を B_∞と表そう．包含関係は次のようになっている．

$$\begin{array}{ccccccccccc}
B_0 & \subset & A_{0,0} & \subset & A_{0,1} & \subset & A_{0,2} & \cdots & \subset & M_0\\
\cap & & \cap & & \cap & & \cap & & & \cap\\
B_1 & \subset & A_{1,0} & \subset & A_{1,1} & \subset & A_{1,2} & \cdots & \subset & M_1\\
\cap & & \cap & & \cap & & \cap & & & \cap\\
B_3 & \subset & A_{2,0} & \subset & A_{2,1} & \subset & A_{2,2} & \cdots & \subset & M_2\\
\vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & & \vdots\\
\cap & & \cap & & \cap & & \cap & & & \\
B_\infty & \subset & Q_0 & \subset & Q_1 & \subset & Q_2 & \cdots & &
\end{array}$$

[S2, Theorem 2.4] の証明の中で，$B_\infty\subset Q_1$ から得られる B_∞-B_∞ bimodule の system と $M_0\subset M_1$から得られる M_0-M_0 bimodules の system は複素共役であることを示した．このことは， subfactor $B_\infty\subset Q_1$ は $M_0\subset M_1$に opposite equivalent であることを示している．それゆえ，$[[Q_1:B_\infty]]=[[Q_1:Q_0]]$ であるので，上の例 2 により，$Q_0\subset Q_1$ は $M_0\subset M_1$ に opposite equivalent である．

§3 Commuting square の構成

以下，$A \subset B$ と $C \subset D$ は，equivalent な AFD II_1 subfactor とする．再構成定理を述べるために，次の commuting square を考えよう．ここで，D-C bimodule g は $C \subset D$ から自然に得られる C-D paragroup の generator ${}_D D_C$ であり，A-B bimodule h は $A \subset B$ から自然に得られる A-B paragroup の generator ${}_A B_B$，C-A bimodule X は互いに非同値な既約 C-A bimodule の直和である．

$$\begin{array}{ccc}
\mathrm{End}(g(\bar{g}g)^{n-1} \otimes_C X_A \otimes (h\bar{h})^{n-1}h) & \subset & \mathrm{End}(g(\bar{g}g)^{n-1} \otimes_C X_A \otimes (h\bar{h})^{n}) \\
\cap & & \cap \\
\mathrm{End}((\bar{g}g)^{n} \otimes_C X_A \otimes (h\bar{h})^{n-1}h) & \subset & \mathrm{End}((\bar{g}g)^{n} \otimes_C X_A \otimes (h\bar{h})^{n})
\end{array}$$

これは，non-degenerate commuting square になっていることがわかる．したがって，これに対応した biunitary connection がある．String algebra construction によって，次の有限次元 von Neumann algebra の 2 重増大列とその極限の AFD II_1 factor の列を得る．この時，$A_{k,l} = \mathrm{End}(\underbrace{\cdots \otimes \bar{g} \otimes g}_{k\text{個}} \otimes {}_C *_A \otimes \underbrace{h \otimes \bar{h} \cdots}_{l\text{個}})$ となっていることは容易に分かる．ここで，${}_C *_A$ は既約な C-A bimodule ${}_C X_A$ である．

$$\begin{array}{ccccccccc}
A_{0,0}(=\mathrm{End}({}_C *_A)) & \subset & A_{0,1} & \subset & A_{0,2} & \subset & \cdots & \subset A_{0,\infty} = M_0 \\
\cap & & \cap & & \cap & & & \cap \\
A_{1,0} & \subset & A_{1,1} & \subset & A_{1,2} & \subset & \cdots & \subset A_{1,\infty} = M_1 \\
\cap & & \cap & & \cap & & & \cap \\
A_{2,0} & \subset & A_{2,1} & \subset & A_{2,2} & \subset & \cdots & \subset A_{2,\infty} = M_2 \\
\vdots & & \vdots & & \vdots & & & \vdots \\
\cap & & \cap & & \cap & & & \\
Q_0 = A_{\infty,0} & \subset & Q_1 = A_{\infty,1} & \subset & Q_2 = A_{\infty,2} & \subset & \cdots &
\end{array} \qquad (☆)$$

いよいよ再構成定理を述べることができる．

定理 ([S3], Theorem 3.3)　上の (☆) で，2 つの subfactor $M_0 \subset M_1$，$Q_0 \subset Q_1$ はそれぞれ，$C^{\mathrm{opp}} \subset D^{\mathrm{opp}}$ と $A \subset B$ に同型である．

証明の概略　記号の準備をしておく．$A \subset B$ と $C \subset D$ は equivalent であるとする．$\mathrm{End}(\underbrace{\cdots \otimes \bar{g} \otimes g}_{n\text{ 個}} \otimes {}_C *_C)$ および $\mathrm{End}(\underbrace{\cdots \otimes g \otimes \bar{g}}_{n\text{ 個}} \otimes {}_D *_D)$ をそれぞれ $C_{n,-1}$，$C_{n,-2}$ と $\mathrm{End}({}_A *_A \otimes \underbrace{h \otimes \bar{h} \cdots}_{n\text{ 個}})$ および $\mathrm{End}({}_B *_B \otimes \underbrace{\bar{h} \otimes h \cdots}_{n\text{ 個}})$ を それぞれ $B_{-1,n}$，$B_{-2,n}$ と表すことにする．このとき，$C_{n,-1} \subset A_{n,0}$，$C_{n,-2} \subset C_{n,-1}$，$B_{-1,n} \subset A_{0,n}$，$B_{-2,n} \subset B_{-1,n}$ がおのおのの n について成り立っていることがわかる．したがって，次の図のような包含関係になっていることになる．

$$\begin{array}{ccccccccccccccc}
 & & & & & & B_{-2,1} & \subset & B_{-2,2} & \subset & \cdots & \subset & N_{-2} \\
 & & & & & & \cap & & \cap & & & & \cap \\
 & & & & B_{-1,0} & \subset & B_{-1,1} & \subset & B_{-1,2} & \subset & \cdots & \subset & N_{-1} \\
 & & & & \cap & & \cap & & \cap & & & & \cap \\
 & & C_{0,-1} & \subset & A_{0,0} & \subset & A_{0,1} & \subset & A_{0,2} & \subset & \cdots & \subset & M_0 \\
 & & \cap & & \cap & & \cap & & \cap & & & & \cap \\
C_{1,-2} & \subset & C_{1,-1} & \subset & A_{1,0} & \subset & A_{1,1} & \subset & A_{1,2} & \subset & \cdots & \subset & M_1 \\
\cap & & \cap & & \cap & & \cap & & \cap & & & & \cap \\
C_{2,-2} & \subset & C_{2,-1} & \subset & A_{2,0} & \subset & A_{2,1} & \subset & A_{2,2} & \subset & \cdots & \subset & M_2 \\
\vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & & & \vdots \\
\cap & & \cap & & \cap & & \cap & & \cap & & & & \\
P_{-2} & \subset & P_{-1} & \subset & Q_0 & \subset & Q_1 & \subset & Q_2 & \subset & \cdots & &
\end{array}$$

まずはじめに，$M_0 \subset M_1$ が finite depth であることを示そう．このため，$N_{-1} \subset M_1$を構成する次の ladder を考えよう．

$$\begin{array}{ccccccccc}
B_{-1,0}(=\mathrm{End}({}_A*_A)) & \subset & B_{-1,1} & \subset & B_{-1,2} & \subset & \cdots & \subset & N_{-1} \\
\cap & & \cap & & \cap & & & & \cap \\
A_{1,0} & \subset & A_{1,1} & \subset & A_{1,2} & \subset & \cdots & \subset & M_1
\end{array}$$

この ladder は次の commuting square から構成される．

$$\begin{array}{ccc}
B_{-1,2n} & \subset & B_{-1,2n+1} \\
\cap & & \cap \\
A_{1,2n} & \subset & A_{1,2n+1}
\end{array} \qquad (\bigstar)$$

この commuting square に対応する biunitary connection は${}_A*_A$-flat であるので，これより，$N_{-1} \subset M_1$ の principal graph は $B_{-1,2n} \subset A_{1,2n}$の n が十分大きいところでの Bratteli diagram である．これは finite graph であるので，$N_{-1} \subset M_1$が finite depth とわかる．よって，AFD II_1 factor M_0は $N_{-1} \subset M_1$の intermediate subfactor なので，D. Bisch の定理 [B, Theorem 2.6] により，$M_0 \subset M_1$ も finite depth である．

S. Popa の index 有限な strongly amenable subfactor の分類定理 [P, Theorem 2] により，定理の主張を証明するには，証明の冒頭の包含関係の図において，$C_{n,-2} = M_1{}' \cap M_n$, $C_{n,-1} = M_0{}' \cap M_n$, $B_{-2,n} = Q_1{}' \cap Q_n$, $B_{-1,n} = Q_0{}' \cap Q_n$, を示せばよい．対称性により，片方について議論すれば十分であるので，$M_0 \subset M_1$の方を示すことにする．

まず，おのおのの $n \geq 1$ について，$C_{n,-2} \subset M_1' \cap M_n$が成り立つことが Ocneanu の compactness argument [O2, II.6] よりわかる．ここで，$N_{-1} \subset M_1$より得られる M_1-M_1 bimodule の system は，$C \subset D$から得られる D-D bimodule のそれと同一視できるので，$C_{n,-2}$の直和因子に対応するこの inclusion の Perron-Frobenius 固有ベクトルと $M_1{}' \cap M_n$ のそれは正の定数倍 β (= Perron-Frobenius 固有値) の違いしかない．したがって，$\beta = 1$

を示せばよい．このためには，global index の一致 $[[M_1 : N_{-1}]] = [[D : C]]$ を示すことに帰着することがわかる．上の (★) に対応する biunitary connection は$_A*_A$-flat であるので，$[[M_1 : N_{-1}]] = [[B : A]]$ がわかるが，$A \subset B$と $C \subset D$ が equivalent であるので，$[[B : A]] = [[D : C]]$ である．よって，$[[M_1 : N_{-1}]] = [[D : C]]$ が示せた．これにより，$C_{n,-1} = M_1' \cap M_n$ が示せた．$C_{n,-2} = M_0' \cap M_n$も同様の議論で示せる． □

上の定理と§2 の最後の考察により，次の結果を得た．

系 ([S3], Remark 3.4) $A \subset B$，$C \subset D$を index 有限，finite depth な AFD II_1 subfactor とする．$A \subset B$と $C \subset D$が opposite equivalent である必要十分条件は，$A \subset B$，$C \subset D$が有限次元 non-degenerate commuting square に basic construction を施して得られる subfactor であることである．

おわりに

上の主定理および例について，より詳しく知りたい方は，私の論文 [S3] をご覧ください．また，equivalent subfactor の概念の応用としては，河東氏による "quantum Galois correspondence" があります．詳しくは本講究録の河東氏の記事を参照してください．

この結果は日本学術振興会および文部省科学研究費補助金の援助の下に得られたものです．

参考文献

[E-K1] D. E. Evans & Y. Kawahigashi, From subfactors to 3-dimensional topological quantum field theories and back — A detailed account of Ocneanu's theory —, *Internat. J. Math.* **6** (1995), 537–558.

[E-K2] D. E. Evans & Y. Kawahigashi, On Ocneanu's theory of asymptotic inclusions for subfactors, topological quantum field theories and quantum doubles, *Internat. J. Math.* **6** (1995), 205–228.

[G-H-J] F. Goodman, P. de la Harpe, & V. F. R. Jones, "Coxeter graphs and towers of algebras", MSRI publications 14, Springer, (1989).

[J] V. F. R. Jones, Index for subfactors, *Invent. Math.* **72** (1983), 1–25.

[K] Y. Kawahigashi, On flatness of Ocneanu's connections on the Dynkin diagrams and classification of subfactors, *J. Funct. Anal.* **127** (1995), 63–107.

[O1] A. Ocneanu, Quantized group, string algebras and Galois theory for algebras, in "Operator algebras and applications, Vol. 2 (Warwick, 1987)," London Math. Soc. Lect. Note Series Vol. 136, Cambridge University Press, (1988), pp. 119–172.

[O2] A. Ocneanu, "Quantum symmetry, differential geometry of finite graphs and classification of subfactors", University of Tokyo Seminary Notes **45**, (Notes recorded by Y. Kawahigashi), (1991).

[O3] A. Ocneanu, An invariant coupling between 3-manifolds and subfactors, with connections to topological and conformal quantum field theory, preprint, (1991).

[O4] A. Ocneanu, Modular invariants, subfactors and quantum field theory, talk at Rome, July, 1996.

[O5] A. Ocneanu, The classification of connections and intermediate subfactors, talk at India, January, 1997.

[P] S. Popa, Classification of amenable subfactors of type II, *Acta Math.* **172** (1994), 163–255.

[S1] N. Sato, Two subfactors arising from a non-degenerate commuting square — An answer to a question raised by V. F. R. Jones —, to appear in *Pac. J. Math.*

[S2] N. Sato, Two subfactors arising from a non-degenerate commuting square II — Tensor categories and TQFT's —, *Internat. J. Math.*, **8** (1997), 407–420.

[S3] N. Sato, Constructing a non-degenerate commuting square from equivalent systems of bimodules, preprint (1997).

参考文献にある私の論文およびそれらに関する講演記録の dvi file を私のホームページから入手することが出来ます．URL は，下記の通りです．
`http://ms418ss5.ms.u-tokyo.ac.jp/~nobuya/`