

Modular geometry of conformal field theory,
KP equations and 2D gravity

東北大・理 清水勇二

(超)弦理論 (super-string theory), 特に共形場理論 (conformal field theory, 以下略して CFT) は, 数学にもいろいろ面白い素材, 問題を提供して来た。この一年半ほどの間に, 2次元量子重力に関連して新しい発見がなされている。2次元重力は, 従来の弦理論の模型とは異なり, 非摂動論的な取り扱いが可能な model である。それが数学的に何を意味するかはこれからの問題であるが, いろいろな進展が最近あるようである。

この小論においては, 2次元重力の model の紹介を試みる。matrix model 自体, 歴史的にかなり昔に源があり, それを十分消化していない点等をお詫びしておく。なお, これは数理解研での研究集会の際, 話そうとした内容のまとめであるので, 最初の CFT に関する Review もつけ加わっている。

§ 1 共形場理論(CFT) : A review

1.1 CFTは共形不変な2次元の場の理論を指す。CFTに数学者に納得のいく定義を与えるのは難しいことであるが、現在多数の人が合意すると思われるCFTの“定義”を以下与えてみようと思う。

2次元の(局所)共形変換の全体は無次元の群を成す。座標 (x, y) に対し, $z = x + iy$, $\bar{z} = x - iy$ ($i = \sqrt{-1}$)とおいた時の

$$z \mapsto f(z), \bar{z} \mapsto g(\bar{z}) \quad (f, g \text{ は } z=0, \bar{z}=0 \text{ で正則, } f(0)=g(0)=0)$$

の全体 $\text{Aut}_{\text{CAlg}}(\mathbb{C}\{z\}) \times \text{Aut}_{\text{CAlg}}(\mathbb{C}\{\bar{z}\})$ がその群である。以下, CFTの代数的扱いのみを問題とするので, 形式的カテゴリーで話を進める。 $(\mathbb{C}\{z\})$ を $\mathbb{C}[[z]]$ で置き換える。) 正則, 反正則の別は, 物理学者の言う左巻き, 右巻きに対応する。超弦理論で一番期待される heterotic string 等の model では, 正則(及, 反正則)の片方のみを扱う chiral な理論を通常考えて, 最後に両者を組合せる。そこで, 以下正則な部分のみ扱う。

さて, CFTでは上記の(chiralな)群 $\text{Aut}_{\text{CAlg}}(\mathbb{C}[[z]])$ より大きな対称性を考える。即ち, Lie環 $\text{Lie Aut}_{\text{CAlg}} \mathbb{C}[[z]] = \mathbb{C}[[z]] z \frac{d}{dz}$ を部分 Lie環として含む

$$\mathbb{C}\langle z \rangle \frac{d}{dz} \quad \text{or} \quad \mathbb{C}[z, z^{-1}] \frac{d}{dz} \quad (\mathbb{C}\langle z \rangle := \mathbb{C}[[z]][z^{-1}])$$

なる無限次元 Lie環を考える。これらは定数倍を除き唯一つの1次元中心拡大をもつ:

$$\hat{\mathcal{L}} = \mathbb{C}(\mathbb{Z}) \frac{d}{dz} \oplus \mathbb{C} \cdot c \quad \text{or} \quad \mathcal{L} = \mathbb{C}[\mathbb{Z}, z^{-1}] \frac{d}{dz} \oplus \mathbb{C} \cdot c \quad (\text{"Virasoro代数"})$$

$L_n = -z^{n+1} \frac{d}{dz}$ ($n \in \mathbb{Z}$) と c が通常文献で見られる $\mathcal{L}$ の基底を与える。 $\mathcal{L}$ の表現を考えた時、中心の元 c の固有値を central charge, L_0 の固有値を conformal anomaly という。

1.2 一つの CFT の定義としては次が考えられる:

“CFT の一つの model とは, Virasoro 代数 $\mathcal{L}$ を含む chiral algebra と呼ばれる (結合的) 代数の (無限個 及 至有限個の) 表現の族のこと。”

ここで言う表現とは, Virasoro 代数 又は affine Lie 環の highest weight 表現を念頭に置いて考えている。highest weight vector が真空 (vacuum) 又は primary field に対応する。

以上が, Belavin-Polyakov-Zamolodchikov 1984 の定式化である。

彼らは, $0 \leq c < 1$ なる central charge をもつ Virasoro 代数の minimal 表現を特に調べ, その場合の多点相関関数の満たす微分方程式を導出した。

又, Virasoro 代数の highest weight 表現の分類が特に重要なこととは言うまでもない。(contravariant form が正定値になるという意味で) unitary な表現の分類は, Friedan-Qiu-Shenker 1985, Goddard-Kent-Olive 1985 により完成された。

CFT はもともと弦理論の中心的なものが一つの側面であって, その観点からすると上の BPZ の結果は, 相関関数を loop のない (=genus 0) の場合に考えたものに相当する。任意個数の loop (RPS.

任意の genus) も考えに入れて CFT の場の相関関数を考える為の枠組は, Friedan-Shenker 1986 によって与えられた。これが本小論の表題にある modular geometry である。

1.3 Modular geometry of CFT

Polyakov 1981 以来, (超)弦理論の経路積分をコンパクト Riemann 面の moduli 空間上の積分として解釈する方法により, 弦模型の確率振幅乃至相関関数は moduli 空間上の“関数”として扱えるべきである。

Friedan-Shenker 1986 は次のように提唱した:

chiral CFT の多点相関関数 ϕ は moduli 空間 (又はその変種 (variant)) 上の hermitian vector bundle の section であって, (twisted) integrable connection ∇ に関し horizontal であり (ie. $\nabla\phi=0$), 次の factorization property を満たす。

N 個の (primary) fields $\Phi_1, \dots, \Phi_N$ が与えられた時その N 点相関関数の g loops の成分は, genus g の Riemann 面 C 及び C 上の N 点 $P_1, \dots, P_N$ に対して, $\phi = \langle \Phi_1(P_1) \dots \Phi_N(P_N) \rangle_{g,C}$ と定まる。 N 点付きコンパクト Riemann 面の moduli 空間を $M_{g,N} := \{(C, P_1, \dots, P_N)\}$ とするとき, $\phi: (C, P_1, \dots, P_N) \mapsto \langle \Phi_1(P_1) \dots \Phi_N(P_N) \rangle_{g,C}$ は $M_{g,N}$ 上の section であり, その自然なコンパクト化, 即ち, N 点付き安定代数曲線/ $\mathbb{C}$ の moduli 空間 $\overline{M}_{g,N}$ の境界 $\overline{M}_{g,N} - M_{g,N}$ まで延長できて, より genus の低い場の多点相関関数で表わることができる。 (“factorization property”)

更に, 恒等作用素に対応する "trivial" 表現を挿入しても相関関数が不変であるという "真空の伝播" の原理が成立つべきである。

1.4 Modular geometry の例

1.3 の意味での modular geometry が詳細に展開されているのは, Tsuchiya-Ueno-Yamada 1989 だけである。TUY は任意の affine Lie 環に対応する Wess-Zumino model を扱っている。Feigin は Virasoro 代数の minimal 表現について同様の結果を announce している。Hitchin も WZ model の場合を扱おうとしているらしいが, 完成しているかどうか著書は知らない。

- WZ model (TUY 1989)

この model は, (有限次元) 単純 Lie 環 $\mathfrak{g}$ と "level" と呼ばれる自然数 l を与えると定まる。

$$\hat{\mathfrak{g}} = \mathfrak{g} \otimes \mathbb{C}((t)) \oplus \mathbb{C} \cdot K$$

$$\hat{\mathfrak{g}}_N = \bigoplus_{j=1}^N \mathfrak{g} \otimes \mathbb{C}((\xi_j)) \oplus \mathbb{C} \cdot K$$

を $\mathfrak{g}$ の affine 化とする。 $\hat{\mathfrak{g}}$ の level l の integrable 表現は, l -restricted dominant integral weights と一対一に対応する。

L_{λ_i} を weight λ_i ($1 \leq i \leq N$) に対応する integrable 表現とする。

この時, $L_{\vec{\lambda}} := L_{\lambda_1} \otimes \cdots \otimes L_{\lambda_N}$ ($\vec{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_N)$) は自然に $\hat{\mathfrak{g}}_N$ の表現となる。又, $\mathcal{X} = (C; P_1, \dots, P_N; \eta_1, \dots, \eta_N)$ を N 点 $P_1, \dots, P_N$ と各 P_i での 1-form η_i 付きの stable curve C とする。

TUY では, λ と x に対して有限次元 $\mathbb{C}$ -vector space $V_\lambda(x)$ 及びその dual $V_\lambda^\dagger(x)$ が構成された。 x に関して $V_\lambda(x)$ は正則に依存し, $\overline{\mathcal{M}}_{g,N}^{(1)} := \{x \text{ の全体} \}$ 上の vector bundle V_λ が得られる。(正確には $\overline{\mathcal{M}}_{g,N}^{(1)}$ を algebraic stack として扱う。解析的には stable curve の local universal family に対して考察することと同値。)

V_λ 上には, Ward-Takahashi identity を利用して (twisted) integrable connection が定義できて, V_λ は locally free となる。

実は V_λ を構成する為には, $\overline{\mathcal{M}}_{g,N}^{(1)}$ 上の無限次元 fiber space $\overline{\mathcal{M}}_{g,N}^{(\infty)}$ なる空間から出発する必要がある。 $\overline{\mathcal{M}}_{g,N}^{(\infty)}$ 上では,

$$V_\lambda(x) := L_\lambda / \hat{g}(x) L_\lambda, \quad \hat{g}(x) := \text{Im}(g \otimes H^0(\mathbb{C} - \{P_1, \dots, P_N\}, 0) \hookrightarrow \hat{g}_N)$$
 と定義し, $\overline{\mathcal{M}}_{g,N}^{(1)} \curvearrowright$ descend する。

この V_λ 上の connection は, $g=0$ の時は有明な Knizhnik-Zamolodchikov 方程式になる。 $g=1$ の場合, 0 点関数 (= 分配関数) を $\overline{\mathcal{M}}_1$ の境界 $\overline{\mathcal{M}}_1 - \mathcal{M}_1 = \mathcal{M}_{0,3} = \{pt\}$ で見ることによって, その空間の basis として, (level 2 の) integrable 表現の指標全体がとれることが分る。(これは factorization property より従う。) $\mathfrak{g} = \mathfrak{sl}(2, \mathbb{C})$ の場合は, Eguchi-Ooguri の結果を cover する。

1.5 その他, その後の展開について

(1) Virasoro 代数の $c=1, \hbar=0$ の Fock 表現に付随した free fermion field の CFT を, modular geometry として扱う話は, 物理側では Ishibashi-Matsuo-Ooguri 1987, Verlinde-Verlinde 1987, Alvarez-Gaumé-Gomez-Reina

1987, AlvarezGaumé-Bost-Moore-Nelson-Vafa 1987, Witten 1988, etc によって,
 数学側では, Kawamoto-Namikawa-Tsuchiya-Yamada 1988, Arbarello-DeConcini-
 Kac-Procesi 1988 によって扱われた。これらの仕事は, Fock表現
 を boson 表示を用いて, KP 方程式系の関数と結びつけるもの
 である。これらの基礎には, Beilinson-Manin-Schectman, Kontsevich 等の
 idea がある。(cf. [5])

(2) factorization property により, CFT の相関関数の計算は原理的に
 すべて genus 0 の話に帰着できる筈だが, それを実際に genus 0
 から組立ててみる試みが, Moore-Seiberg 1989 である。彼らが
 polynomial equation と呼ぶ関係式は, quantum Yang-Baxter equation の話
 に関連して出てくる quasi-tensor category の条件と見なせる (beading
 行列, fusing 行列等の間の) 五角形や六角形の関係式である。

(3) その後の重要な topics は, KZ 方程式の解の積分表示の仕事,
 BRST charge の導入と quantum Hamiltonian reduction である。cf.

Felder 1989, Bernard-Felder 1989, Bershadsky-Ooguri 1989, Feigin-Frenkel
 1989, 1990, Date-Jimbo-Matsuo-Miwa 1990, Matsuo 1990, Kuroki 1990 etc.

§ 2 2D gravity: Matrix model

2.0 2次元重力が広く注目を集めるようになったのは、1989年秋以降のことである。ほぼ同時に Brézin-Kazakov, Douglas-Shenker, Gross-Migdal の3つのグループが one-matrix model の分配関数を計算し、KdV 方程式を満たすことを示したのが契機であった。彼らの結果は n -matrix model に拡張されている。その後、Witten は topological QFT の立場から matrix model の結果を解釈しようと試み、その比較を基に 1-matrix model の分配関数と(複素)代数曲線の moduli 空間の交点数とが関係している、と予想した。1-matrix model と topological gravity (pure gravity) との同値性は物理的には(?) 示されているようであるが、厳密な数学的証明は今のところないようである。 n -matrix model と matter field に couple した topological gravity の場合にも予想は立てられており、この場合は更に、 W_n -algebra が関与する。

以下では Gross-Migdal 1990, Witten 1990 に従って、§2 で "matrix model" を、§3 で "topological gravity"、特に moduli 空間の交叉理論に関連した Witten の予想を紹介する。

2.1 ^(one-) matrix model とは何かは、2.3 以後で説明するとして、最初の one-matrix model による主要結果を紹介しておこう。

one-matrix model (の double scaling limit 後) の分配関数 $Z(x)$ は、変数 x ("宇宙定数") の関数で、string equation という微分方程式により

決まる。

$$F := -\log Z \quad (\text{"free energy"})$$

$$u(x) := -\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)^2 F(x) = \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)^2 \log Z(x) \quad (\text{"specific heat"})$$

とおく。 u は puncture operator の 2 点関数 $\langle PP \rangle$ と同定される。

(cf. 3.)

one-matrix model の critical index γ_0 が $-\frac{1}{k}$ ($k \in \mathbb{Z}_{>0}$) なる値をとる時, この model は gravity に $(p, q) = (2, 2k-1)$ の Virasoro 代数の minimal 表現 $((2, 2k-1)\text{-minimal model と}いう)$ が couple したものと考えられていて, k 番目の critical point では string equation は

$$c_k R_k[u] = x \quad (c_k = (-1)^{k+1} 2 \Gamma(\frac{1}{2}) \Gamma(k+1) / \Gamma(k+\frac{1}{2}))$$

となる。 $R_k[u] = R_k(u, u', u'', \dots)$ は Gel'fand-Dikii の変数 u に関する微分多項式であり, KdV hierarchy に現われる。 $R_k[u]$ は次の recursion relation で定まる:

$$\frac{\partial}{\partial x} R_{k+1}[u] = \frac{1}{4} R_k''' - u R_k' - \frac{1}{2} u' R_k$$

$$R_0 = 1, \quad R_1 = -\frac{1}{4} u, \quad R_2 = \frac{1}{16} (3u^2 - u''), \quad \dots$$

異なる multi-critical point を結びつけることが, scaling operators σ_n (又 u に対応する coupling constant t_n) ($n \geq 1$) を導入することにより, 可能となる。 σ_n を挿入することが, n 番目の KdV flow を引き起こす: $\tilde{R}_k[u] = c_k R_k[u]$ とおいて,

$$\langle \sigma_n PP \rangle = \frac{\partial u}{\partial t_n} = \frac{\partial}{\partial x} \tilde{R}_{n+1}[u] \quad (n\text{-th KdV equation})$$

そして一般の string equation は,

$$u = x + \sum_{n=1}^{\infty} n t_n \tilde{R}_n[u]$$

となる。

2.2 上で見た通り, one-matrix model は KdV hierarchy と大いに関係がある。実は。

$$Z(t_0, t_1, t_2, \dots) = \tau(t_0, t_1, \dots)^2 \quad (t_0 = x)$$

とおくと, τ は KdV hierarchy の τ 関数となる, 即ち, $u = 2(\frac{\partial}{\partial x})^2 \log \tau$ が 2.1 の KdV flow の方程式 $\frac{\partial u}{\partial t_n} = \frac{\partial}{\partial x} \tilde{R}_{n+1}[u]$ を満たす。

又, L_{-1} を次の微分作用素とすると, string equation は " $L_{-1}\tau = 0$ " という形になる: (但し, t_{i+1} を改めて t_i とおいた)。

$$L_{-1} := \sum_{m=1}^{\infty} m t_m \frac{\partial}{\partial t_{m-1}} + \frac{1}{2} t_0^2$$

より一般に,

$$L_0 := \sum_{m=0}^{\infty} m t_m \frac{\partial}{\partial t_m} + \frac{1}{4}$$

$$L_n := \sum_{m=0}^{\infty} m t_m \frac{\partial}{\partial t_{m+n}} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^n \frac{\partial^2}{\partial t_{m-1} \partial t_{n-m}}$$

とおくとき,

$$L_n \tau = 0 \quad (n \geq -1)$$

が成立つことが知られている。

2.3 (one-) 次に, matrix model とは何か, を説明する為に物理側での説明を Witten 1990, §4 に従って与えておく。(cf. [K])

物理側では次の一種の"経路積分"を求めることが問題となる。

$$F(g) = \int_{\text{Met}_g} (Dh) \exp \left(-\lambda_1 \int_{\Sigma} \sqrt{h} - \lambda_2 \int_{\Sigma} \sqrt{h} \frac{R}{2\pi} \right) \quad (\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{C})$$

ここで, Σ は種数 g の 2 次元 閉曲面, h は Σ 上の Riemann 計量, R は 曲率, $\sqrt{h} = \sqrt{\det(h)}$ である。残るは Dh だが, これは Σ 上の計量の空間上の“測度”を指す。この“積分”の意味付けの一方法として, 計量の代りに, Σ の 多角形への分割を考えようというのが, matrix model の元々の考えである。

Σ の 表面積 A が一定になる計量の全体 $\text{Met}_{g,A}$ を考えると,

$$F(g) = \int F(g, A) dA$$

$$\begin{aligned} F(g, A) &= \int_{\text{Met}_{g,A}} (Dh) \exp(-\lambda_1 A - \lambda_2 (2-2g)) \\ &= \text{Vol}(g, A) \cdot \exp(-\lambda_1 A - \lambda_2 (2-2g)) \end{aligned}$$

となり, $\text{Met}_{g,A}$ の“体積” $\text{Vol}(g, A)$ をどう求めるかが問題となる。さて, Σ の 四角形への分割が一つ与えられた時, すべての四角形が一定の面積 ϵ をもつと指定して, Σ の計量の discrete な近似を与えたと考えることができる。

$W(g, n)$ を n 個の四角形による Σ の分割の仕方の個数とする。

(2つの分割が同値なのは, それらの dual graph が同値な時である。)

すると, $A = n\epsilon$ ゆえ $\text{Vol}(g, A)$ の“近似” $\text{Vol}_\epsilon(g, A)$ として, $\frac{1}{\epsilon} W(g, n)$ とすることができて, $F(g)$ の近似 $F_\epsilon(g)$ は

$$\begin{aligned} F_\epsilon(g) &= \sum_{n=\frac{A}{\epsilon}} \text{Vol}_\epsilon(g, A) \exp(-\lambda_1 A - \lambda_2 (2-2g)) \\ &= \sum_n \frac{1}{\epsilon} W(g, n) \exp(-\lambda_1 \epsilon n - \lambda_2 (2-2g)) \end{aligned}$$

で与えられる。

この $W(g, n)$ を計算する方法として編み出されたのが,

t'Hooft による random matrix の方法である。それによると, 次の (formal) な関係式が成立つ。

$$Z(N, \lambda) := \int (dM) \exp \left(-\text{tr} \left[\frac{M^2}{2} - \frac{\lambda M^4}{4N} \right] \right)$$

$$F(N, \lambda) = \log Z(N, \lambda) = \sum_{g=0}^{\infty} N^{2-2g} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda^n W(g, n)$$

ここで, M は size $N \times N$ のエルミート行列の空間の元を走る。

近似のやり方には, 4角形のみならず, 2角形, 6角形等も混ぜて $W(g, n)$ の類似を考えることもできる。重要なことは, 多角形の総数を n とするとき, (generic には) $n \rightarrow \infty$ での振舞いは, 基本的には 4角形の場合と同値であり, という事実である。

m 角形には, $\text{tr} M^m / m N^{m/2-1}$ を対応させる規則で, 一般には

$$Z(\lambda_2, \lambda_4, \dots) = \int (dM) \exp \left(-\text{tr} \left\{ \lambda_2 \frac{M^2}{2} + \lambda_4 \frac{M^4}{4N} + \lambda_6 \frac{M^6}{6N^2} + \dots \right\} \right)$$

を考える。そこで, $V(s)$ を s の多項式として,

$$Z(\beta) = Z(\lambda, \beta) = \int (dM) \exp (-\beta \text{tr} V(M))$$

とおき, 以下この形の積分を調べる。(注: $V(s)$ が偶多項式であることは, 本質的には不要だが, 簡単のため仮定する) パラメータ β は λ を吸収してもよいが, 後で scaling limit をとる際に用いる為, 分離しておく。

2.4 $N \times N$ エルミート行列 M は, $U(N)$ の元で対角化して, dM に関する積分は本質的に M の固有値 $(s_1, \dots, s_N)$ に関する積分に帰着する:

$$dM = \text{const} \times dU \cdot ds_1 \cdots ds_N \cdot \prod_{i < j} (s_i - s_j)$$

(dU は $U(N)$ 上の Haar 測度。)

$\mathbb{R}$ 上の測度 $e^{-\beta V(s)} ds$ に関する直交多項式 $P_k(s)$ ($k=0, 1, 2, \dots$)

を用いると, 簡単な計算で

$$Z = \text{const.} \int_{-\infty}^{\infty} ds_1 \cdots ds_N \prod_{i < j} (s_i - s_j)^2 \prod_{i=1}^N e^{-\beta V(s_i)} \\ = \text{const.} \times N! h_0 \cdots h_{N-1}$$

となる。ここで, $\int ds e^{-\beta V(s)} P_k(s) P_l(s) = h_k \delta_{k,l}$ とおいた。又, $\{P_k(s)\}$

の間には recursion relation: $s P_n(s) = P_{n+1}(s) + S_n P_n(s) + R_n P_{n-1}(s)$,

$(S_n, R_n \in \mathbb{C})$ が成立ち, これより $h_{n+1} = R_{n+1} h_n$ が得られる。これから,

$h_0 \cdots h_{N-1} = h_0 \prod_{i=1}^{N-1} R_i$ ゆえ, R_i を求めることが目標となる。 R_n について

の方程式としては, 次の関係式が単純な計算で成立する。

$$\begin{cases} \int ds e^{-\beta V(s)} P_{n-1}(s) V'(s) P_n(s) = \frac{n}{\beta \sqrt{R_n}} \\ \int ds e^{-\beta V(s)} P_n(s) V'(s) P_n(s) = 0 \end{cases} \quad \left(P_k(s) = \frac{P_k(s)}{\sqrt{h_k}} \right)$$

これが以下で "string equation" を生み出す元となる。

2.5 Double scaling limit

2.4 の話はすべての N について成立つ。そこで $N \rightarrow \infty$ として生残るものを抽出したい。任意の多項式 $V(s)$ に対する $Z_N(\beta) = Z(\lambda, \beta)$ は, 2.3 で述べたように, $1/N$ について の展開をもつ:

$$\log Z_N(\beta) \sim \beta^{2(1-g)} \left(\frac{\beta}{N} - 1 \right)^{(2-\gamma_0)(1-g)} \quad (\gamma_0 = \text{critical index})$$

そこで, $[\beta^2 (\frac{\beta}{N} - 1)^{2-\gamma_0}]^{-1}$ (= string coupling constant) を固定したまま, $N \rightarrow \infty$, $\frac{\beta}{N} \rightarrow 1$ という limit がとれる。

まずは, $N \rightarrow \infty$ なる limit で考える。この時, $\frac{n}{\beta} \rightarrow \tau$ が連続変数となり, $\langle f, g \rangle = \int ds e^{-\beta V(s)} f(s) g(s)$ を内積とする 1 変数多項式の空間は, 多項式の掛算が作用素 と見なせる。又, この極限における $|n\rangle = P_n(s)$,

R_n を $|t\rangle, R(t)$ と記す。このとき, 2.4 の最後の式は,

$$\langle t | V'(2-\hat{H}) | t \rangle = \beta t, \quad \hat{H} = -\frac{1}{\beta^2} \left(\frac{d}{dt} \right)^2 + 1 - R(t)$$

と書き換えられる。ここで, $V'(2-\hat{H})$ は, $V'(s)$ の s に $2-\hat{H}$ を代入したもの。

2.6 k -th multicritical model の場合は potential $V(s)$ が次の形の

$$V(s) = B\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}-k\right) (2-s)^{k+\frac{1}{2}} + B\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}-k\right) (2+s)^{k+\frac{1}{2}}.$$

$$\text{又, 独立及び従属変数を変換する: } t = 1 - x\beta^{-\frac{2k}{2k+1}}, \quad R(t) = 1 - u(x)\beta^{-\frac{2}{2k+1}}.$$

すると, $R(t)$ についての上の関係式は, $u(x)$ についての次の方程式と

$$\text{なる: } x = -2\nu B\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}-\nu\right) \langle x | \left(-\left(\frac{d}{dx}\right)^2 + u(x)\right)^{\nu-\frac{1}{2}} | x \rangle$$

(ν を k で解析接続する) これを解くには, Gel'fand-Dikii の作用素の分数

$$\text{中の計算を用いる: } H = -\left(\frac{d}{dx}\right)^2 + u(x) \text{ に対し, 作用素 } (\xi + H)^{-1} \text{ の}$$

核関数 (= H の resolvent) を $R(x, x'; \xi)$ とするとき,

$$\langle x | H^{\nu-\frac{1}{2}} | x \rangle = \frac{1}{2\pi i} \oint R(x, x; \xi) \xi^{\nu-\frac{1}{2}} d\xi$$

この $R(x, x; \xi)$ と, 2.1 の $R_k[u]$ とは次の式で結びついている:

$$R(x, x; \xi) = \sum_{l=0}^{\infty} R_l[u] \xi^{-l-\frac{1}{2}}$$

最後に $\nu = k$ へと持っていくと, string equation $x = c_k R_k[u]$ が得ら

れる。 $k=2$ の場合,

$$x = u^2 - \frac{1}{3} u'' \quad \text{or} \quad u'' = 3(u^2 - x)$$

を得る。右の形は Painlevé I 型の方程式であり, これを基に specific

heat u の解析的性質が調べられる。

§ 3 2D gravity : topological gravity

3.0 Witten による topological quantum field theory (TQFT) の考え方を 2D gravity に応用することは、やはり Witten によって始められた。TQFT では、理論に付随する "instanton" の moduli 空間 $\mathcal{M}$ ^(次元 d の) が与えられる。場の作用素 $\mathcal{O}_i$ には $\mathcal{M}$ の (次元 d_i の) subvariety H_i が対応し、いわゆる selection rule $\sum_{i=1}^n d_i = d$ が満たされる時、 $\mathcal{O}_1, \dots, \mathcal{O}_n$ の相関関数は、

$$\langle \mathcal{O}_1 \cdots \mathcal{O}_n \rangle = \#(H_1 \cap \cdots \cap H_n)$$

($H_1, \dots, H_n$ の交点数) として "定義される" $\langle \mathcal{O}_1 \cdots \mathcal{O}_n \rangle$ は背景空間の点の位置が違って来ないところが、topological FT であるところの所以である。

又、実際にこのような理論の Lagrangian を構成するための手法を Witten は与えている。即ち、 $Q^2=0$ なる作用素 Q を導入して、 Q 不変な Lagrangian を構成せよ、という。

2D gravity の場合には、 $\mathcal{M}$ はコンパクト Riemann 面 Σ と Σ から固定した背景空間 N への正則写像 f との組 (Σ, f) の全体のなる moduli 空間である。特に one-matrix model (又は pure gravity) に対応する場合は、 $\mathcal{M}$ はコンパクト Riemann 面の moduli 空間となる。

pure gravity の場の作用素としては、(genus について安定化した) $\mathcal{M}$ の cohomology ring の元が対応し、相関関数の値は、(Riemann 面の) 標準束からつくられる交点数となる (解釈される)。

topological gravity と matrix model の同値性は、一応物理側

では示されたということになっているらしい。数学的には、後に紹介する Witten の予想が関係する。

ここでは触れることはできないが、最近注目を浴びているのが K. Li が始めた $N=2$ superconformal model を, minimal model と couple した topological gravity の model として考える, という話である。それは, singularity の unfolding の理論と密接に関係しているようである。

3.1 最初の topological な approach から分配関数の一つの定義の motivation を与えておく。

Lagrangian $\mathcal{L}_0$ と operators τ_n (2.1 の σ_n の $\frac{1}{n!}$ 倍を想定) が与えられた時, より一般の次の Lagrangian

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_0 - \sum_{i \geq 0} t_i \int_{\Sigma} \tau_i, \quad \left(\begin{array}{l} \Sigma: \text{genus } g \text{ の Riemann 面} \\ t_0, t_1, t_2, \dots; \text{coupling constants} \end{array} \right)$$

を考える。するとこの時の分配関数は,

$$F(t) = \sum_{g=0}^{\infty} F_g(t), \quad F_g(t) = \int_{\overline{M}_g} e^{-\mathcal{L}} = \int_{\overline{M}_g} e^{-\mathcal{L}_0} \cdot e^{\sum t_i \int_{\Sigma} \tau_i}$$

ここに, 形式的に $\exp\left(\sum_{i=0}^{\infty} t_i \int_{\Sigma} \tau_i\right) = \sum_{\{n_i\}} \prod_{i=0}^{\infty} \frac{t_i^{n_i}}{n_i!} \left(\int_{\Sigma} \tau_i\right)^{n_i}$ と展開して,

再び F_g の式に代入すると,

$$F_g(t) = \sum_{\{n_i\}} \int_{\overline{M}_g} e^{-\mathcal{L}_0} \prod_{i=0}^{\infty} \frac{t_i^{n_i}}{n_i!} \left(\int_{\Sigma} \tau_i\right)^{n_i} = \sum_{\{n_i\}} \frac{t_i^{n_i}}{n_i!} \int_{\overline{M}_{g,n}} e^{-\mathcal{L}_0} \tau_0^{n_0} \tau_1^{n_1} \dots$$

($n = \sum n_i$) となる。ここで $\overline{M}_{g,n}$ は n 点付き stable curve/ $\mathbb{C}$ の moduli 空間である ($\overline{M}_g = \overline{M}_{g,0}$)。従って, $F(t)$ は次で与えられる:

$$F(t) = \sum_{\{n_i\}} \prod_{i=0}^{\infty} \frac{t_i^{n_i}}{n_i!} \sum_{g=0}^{\infty} \langle \tau_0^{n_0} \tau_1^{n_1} \dots \rangle_g$$

和の内身の $\langle \tau_0^{n_0} \tau_1^{n_1} \dots \rangle_g$ は $3g-3 = \sum_i (i-1)n_i$ の時以外は 0 である。

次に $\langle \tau_0^{n_0} \tau_1^{n_1} \dots \rangle$ をどのように与えるか, を移そう。

3.2 $\overline{M}_{g,n}$ は, n 点付きの stable curve の moduli 空間 であって, universal family $\mathcal{Z}_{g,n} \xrightarrow{\pi} \overline{M}_{g,n}$ が存在する. $\overline{M}_{g,n} \ni C$ 上の fiber が curve C 自身 である ように なっている. π には, n 個の 自然な sections σ_i ($1 \leq i \leq n$) が 存在する. $K_{C/M}$ を relative dualizing sheaf $\omega_{\mathcal{Z}_{g,n}/\overline{M}_{g,n}}$ と する.

$$\mathcal{L}(i) := \sigma_i^* K_{C/M} \quad (\text{on } \overline{M}_{g,n})$$

は $\overline{M}_{g,n}$ 上の 可逆層 で 1^{st} Chern 類 $c_1(\mathcal{L}(i)) \in CH^1(\overline{M}_{g,n})_{\mathbb{Q}}$ を 定める. ここで CH^* は (余次元 k の cycle の) Chow 群 を 表わし, $(\cdot)_{\mathbb{Q}} = (\cdot) \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{Q}$ である.

この 時,

$$\langle \tau_{d_1} \tau_{d_2} \cdots \tau_{d_n} \rangle := \left\langle \bigcup_{i=1}^n c_1(\mathcal{L}(i))^{d_i}, \overline{M}_{g,n} \right\rangle$$

とおく. 右辺は (cup 積 を とった $CH^{\sum d_i}(\overline{M}_{g,n})_{\mathbb{Q}}$ の 元 を, fundamental class $\overline{M}_{g,n}$ で evaluate した もの であり, $\sum_{i=1}^n d_i = 3g-3+n$ 以外 は 0 である.

この 交点数 を 計算 する 為 に, $\overline{M}_{g,n}$ の 交叉理論 を 用いよう と すると, 次の Mumford, Morita により 考えられた class を 用いる ことになる: $n=1$ の 場合 の $\mathcal{L}(1)$ を $\mathcal{L}$ と 略記 して,

$$K_n := \pi_*(c_1(\mathcal{L})^{n+1}) \quad \text{on } \overline{M}_g \quad (n \geq 0), \quad K_{-1} := 0$$

とおく. すると, 次の ような recursive relation が 成立ち,

$$\langle \tau_d \rangle = \langle K_{d-1} \rangle, \quad \langle \tau_{d_1} \tau_{d_2} \rangle = \langle K_{d_1-1} K_{d_2-1} \rangle + \langle K_{d_1+d_2-2} \rangle$$

$$\langle \tau_{d_1} \tau_{d_2} \tau_{d_3} \rangle = \langle K_{d_1-1} K_{d_2-1} K_{d_3-1} \rangle + \langle K_{d_1+d_2-2} K_{d_3-1} \rangle$$

$$+ \langle K_{d_2+d_3-2} K_{d_1-1} \rangle + \langle K_{d_3+d_1-2} K_{d_2-1} \rangle + 2 \langle K_{d_1+d_2+d_3-3} \rangle$$

g が 小さい (i.e. 1, 2, 3) 時は, $CH^*(\overline{M}_g)_{\mathbb{Q}}$ の 構造 は 実際 に 計算 されて いて (Mumford, Faber), $\langle \tau_{d_1} \cdots \tau_{d_n} \rangle$ の 値 を 求める ことが できて, 後の

Wittenの予想を実際確認することができる。又、 $\overline{M}_g$ 及び M_g の Chow ring や cohomology ring の $g \rightarrow \infty$ での構造については、いろいろと知られていて、例えば大体 $CH^*(\overline{M}_g)_{\mathbb{Q}} \cong \mathbb{Q}[k_1, k_2, \dots]$ と予想されている。

一つ注意しておく、以上の話はすべて正当化できるが、その為には、algebraic stack の交叉理論が必要である。 $M_g, \overline{M}_g, Z_{g,n}$ 等すべて algebraic stacks であって、その構成はそれほど簡単ではない。必要な道具は、少なくとも $\mathbb{Q}$ 係数では、Gillet 1984, Vistoli 1989 によって整備されている。

3.3 Witten の予想

2D gravity に関する話題で特に面白いものの一つが次の予想である。まず、 $F(t)$ を 3.1 で与えた形式中級数とする。但し、係数には 3.2 で定義した交点数を用いる。

Conjecture (Witten 1990) $F(t)$ は次の2種類の方程式を満たす。

(KdV方程式) $U := \left(\frac{\partial}{\partial t_0}\right)^2 F$ とおくと、

$$\frac{\partial U}{\partial t_n} = \frac{\partial}{\partial t_0} R_{n+1}[U]$$

(string equation) $\frac{\partial F}{\partial t_0} = \frac{1}{2} t_0^2 + \sum_{i=0}^{\infty} t_{i+1} \frac{\partial F}{\partial t_i}$

ここでいくつか注意すべき事がある。

(1) R_n は本質的には、2.1 の Gel'fand-Dikii の微分多項式である。

正規化に若干くい違いがある: $R_1 = U$

$$n \geq 1, \quad \frac{\partial R_{n+1}}{\partial t_0} = \frac{1}{2n+1} \left(\frac{\partial U}{\partial t_0} R_n + 2U \frac{\partial R_n}{\partial t_0} + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial}{\partial t_0}\right)^3 R_n \right)$$

(2) string equation に $\frac{\partial}{\partial t_0}$ を施して, KdV 方程式を用いれば,

$$U = t_0 + \sum_{i=0}^{\infty} t_{i+1} R_{i+1}[U]$$

となる。従って, 変数 t_n は 2.1 とは定数倍だけずれている。ちなみに,

この形の式を string equation と呼ぶこともある。

(3) Conjecture ^{の2方程式} を満たす形式中級数は唯一であることが証明できる。

matrix model の free energy $F = -\log Z$ は (1), (2) で触れたものを除き) 上の 2 つの条件を満たすから, Conjecture が正しいければ, matrix model と pure gravity の分配関数は等しいこととなり, すべての相関関数は等しく, 2 つの理論は全く等価であることになる。

3.4 string equation を中級数の係数の間の関係式と思って書いてみると,

$$\langle \tau_0 \prod_{i=1}^n \tau_{d_i} \rangle = \sum_{j=1}^n \langle \prod_{i=1}^n \tau_{d_i - \delta_{i,j}} \rangle + \delta_{n,2} \delta_{d_1,0} \delta_{d_2,0}$$

となる。これは, 次の lemma より実際に証明できる:

lemma $\mathcal{L}_{(g)} = \pi^* \mathcal{L}_{(g')} \otimes \mathcal{O}(D_j)$

ここで, $\pi: \overline{\mathcal{M}}_{g,n+1} \rightarrow \overline{\mathcal{M}}_{g,n}$ は, $n+1$ 番目の点 x_{n+1} を忘れる morphism, D_j は, $\overline{\mathcal{M}}_{g,n+1}$ の境界の成分で, x_{n+1} と x_j が rational curve 上にあり, それが他の成分と node でつながっているところを表わす。

F の形式中級数としての定義から,

$$\langle \tau_{d_1} \cdots \tau_{d_n} \rangle = \prod_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial t_{d_i}} F(t) \Big|_{t=0}$$

である。従って, τ_d を挿入することは, $\frac{\partial}{\partial t_d}$ を施すことに対応する。これにより,

$$\langle \tau_{d_1} \cdots \tau_{d_n} \rangle = \prod_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial t_{d_i}} F(t) \text{ とおくと, } U = \left(\frac{\partial}{\partial t_0} \right)^2 F = \langle \tau_0^2 \rangle, \quad \frac{\partial U}{\partial t_n} = \langle \tau_n \tau_0^2 \rangle = \frac{\partial}{\partial t_0} \langle \tau_n \tau_0 \rangle$$

等が成立つから, KdV 方程式を $\{ \langle \tau_n \tau_0 \rangle \}_{n=0,1,2,\dots}$ の間の recursion relations

に書き直すことができる。

KdV 方程式自体は証明できていないが, string equation に類似の式が示せるとか, $g=0,1,2,3$ の時は, 確かめられる等, Conjecture を支持する結果はいろいろとある。

3.00 予定のページ数を既に超過しているので, この辺で終わることとする。

この記事の表題で, 1月の数理論研での研究集会で話をさせていただいた。CFTの基礎となる概念をざっと振り返り, 最近の2次元重力の話題を紹介し, 両者を結びつけるのが, KdV 乃至 KP 系の理論である, と話を進めたかったのだが, 2次元重力における KdV 方程式の登場の仕方を表面的に触れるのみで終わってしまった。大それた題をつけたと反省している。^{ここに}紹介したのは 1年ほど前までの展開である。その後, singularity の unfolding の話と結びつけた $N=2$ superconformal model の話, 重力の τ 関数を Grassmann 上で特徴づける話, 等々 いろいろと進展のあることが分った。ともかく, Witten の予想の代数幾何的に明瞭な解決を望んで, 筆を置くこととする。

References

- §1 - (関連する文献は膨大なのでここでは中心的なものを挙げるにとどめる。)

A.M. Polyakov 1981, Quantum geometry of bosonic strings, Nucl. Phys. B103, 207-

A.A. Belavin, A.M. Polyakov, A.B. Zamolodchikov 1984, Infinite conformal symmetry in two dimensional quantum field theory, Nucl. Phys. B241, 333-380

D. Friedan, S. Shenker 1986, Analytic geometry of 2D CFT, Nucl. Phys. B281 ('87) 509-

D. Friedan, Z. Qiu, S. Shenker, ¹⁹⁸⁵ Conformal invariance, unitarity and two dimensional critical exponents, MSRI Publ. 3 (1985) 419-449.

P. Goddard, A. Kent, D. Olive 1985, Virasoro algebra and coset space models, Phys. Lett. B 152 (1985) 88-92.

A. Tsuchiya, K. Ueno, Y. Yamada 1989, CFT on universal family of stable curves with gauge symmetries, Adv. Stud. in Pure Math. 19 (1989) 459-566.

G. Moore, N. Seiberg 1989, Classical and quantum CFT, Commun. Math. Phys. 123, 177-254.

1.5 (1) に關しては,

[K] 清水 勇二, Algebro-geometric aspects of CFT, 解析および代数多様体上の諸問題 (研究集会) 報告集, (1988年1月於郡立大)

1.5 (3) に關しては, 次の Introduction 参照

G. Kuroki 1990, Fock space representations of affine Lie algebras and integral representations in the Wess-Zumino-Witten models, preprint
- § 2 -

D. Gross, A. Migdal 1989, A non-perturbative treatment of 2 D quantum gravity, Nucl. Phys. B 340 (1990) 333-365.

M. Douglas, S. Shenker, Nucl. Phys. B 335 (1990) 635-654,

E. Brézin, V. Kazakov, Phys. Lett. B 236 (1990) 144-150.

[K] 川合 光, 魅力ある2次元重力 - 量子重力の最近の発展 - パリティ Vol. 6, No. 1 (1991)

- § 3 -

E. Witten 1990, 2 D gravity and intersection theory on moduli spaces, preprint

E. Witten, Nucl. Phys. B 340 (1990) 281-332.

R. Dijkgraaf, E. Witten, Nucl. Phys. B 342 (1990) 486-522

より最近のものは,

G. Moore, Geometry of the string equations, Commun. Math. Phys. 133 (1990) 261-309.

R. Dijkgraaf, H. Verlinde, E. Verlinde, Topological strings in $d < 1$, Nucl. Phys.

B 352 (1991) 59-86.