

「弦から一般相対性理論」50年目の再訪

米谷 民明

(東京大学名誉教授)

私が弦理論と一般相対性理論による重力理論との関係を指摘した論文 [1][2] を仕上げたのは、今から 50 年も前の 1973 年初夏から初秋にかけてでした。私は北海道大学大学院博士課程 3 年目の学生で、't Hooft によるゲージ理論の繰り込み可能性の確立から 1~2 年、同年春には D. Gross 等による漸近自由性の発見があり、それに基づく QCD の最終形の提案 (Gell-Mann 等) がなされる少し前でした。そんな昔のことですから、記憶は次第に化石化しつつあるような気がします。その頃のことや経緯についてはこれまで様々な機会に断片的に記してきました。それらとは別に一応まとめたものとして、文献 [3] と、弦理論の歴史を私自身の体験に基づいて描いた日本語の本 [4] (特に第 3 章) があります。興味があれば是非そちらに目を通していただければ幸いです。私自身としてはそれらに書くべきことはほとんど書き尽くしたという感がありますので、今となってはまた改めて同じようなものを繰り返し書くのには少なからず抵抗があります。そこで、本誌編集委員会からの“素粒子メダルの仕事に関連するエッセイ”をという要請に応じて、少しでも新味があるようにと、口頭だけで出版物としてはどこにも出ていない 8 年前の国際会議 (Strings 2015, ICTS-TIFR, Bengaluru, India, June 22- June 26, 2015) の晩餐会でのスピーチのために用意した英語草稿を (ごくマイナーな修正を除き) そのまま用い、それに新たに文献リストと注を末尾に加え、背景、関連する仕事、その後の展開等を説明する形式にさせていただきました。無味乾燥なものにならないよう、私の仕事に関係して出会った人々とのエピソード (そして最後には「補足」という形で弦理論の未来への私の期待) にも、できるだけこれまでの繰り返しにはならない範囲で異なる角度から触れました。ところが、一旦書きだしますと、まるで化石が溶け出したかのように関連する思い出が連なって湧き出て来ますので、当初の自分の心算よりかなり長いものになってしまいました。

なお、上のスピーチそのものは、アインシュタインが重力場の方程式に最終的に到達した 1915 年（11 月 25 日）から 100 年目という節目の年であるのに合わせて、弦理論と一般相対性理論との関係を最も初期の段階で論じた研究者による回顧的スピーチを、会議の晩餐会における余興（After Dinner Session）として会議組織委員会の主催者が計画したものです（Chair : Michael B. Green, Speaker : Tamiaki Yoneya, John H. Schwarz）。あえて原文の英語のままにするのは本誌記事としてちょっと異例かも知れませんが、そうした方がその場の雰囲気や少し読者の皆さんに伝えられるのではないかと考えたからです。注と合わせて特に研究者を目指す若い学生さんたちにとって刺激になり弦理論に興味を持っていただけるとするならば、私にとってそれに勝る喜びはありません。

個人的な話が多くて恐縮ですが、このスピーチに関連して思い出すのは結構反響があったということです。私のスピーチの後すぐに司会の Green が Schwarz の話が始まる前にプライベートに「すごく興味深い話だった」と言ってくれましたし、また、session 後直ちに E. Witten が私のところにきて「この仕事するときどこにいたんですか」との質問がありました。スピーチの中で私が北大大学院にいたということは冒頭からすぐ後のところで一言触れてはいたのですが、多分、彼は私とその当時、東京や京都のような日本のセンターにいたのではないことに関心があり、それを確かめたかったのかも知れません。^{*}その後、会議中も休憩時の立ち話や昼食時に「面白い話でよかった」と言ってくれた出席者が他にも数人おり、まことに拙いスピーチではありましたが、それなりに興味を持っていただけたということで安堵しました。

^{*}E. Witten はこの 1 年前に京都賞を受賞しており、受賞記念講演 [5] では私の仕事にも一言だけ触れていた。また、15 年前の Strings 2000 会議（Michigan Univ.）では彼の父親（Louis Witten, 1922 年生まれ）ともパーティで話したことがあったが、私の仕事のことをよく知っていて「息子とも話したことがある」との由だった。

L. Witten についてはご存知ない方も多いと思うので少し補足しておく。彼は古くからの一般相対性理論の専門家であり、私が New York 滞在中の 1977 年に出版され、これは面白そうな内容だと思い迷わず購入していた“Asymptotic structure of space-time”（Plenum Press, N. Y.）という Symposium Proceeding の編集者として以前から名前を記憶していた。この本には一般相対論の数学的側面に関する大家達（Geroch, Parker, Newman, Plebanski,...）による review に加え、半年前に発表されたばかりの P. van Nieuwenhuizen の超重力理論の review も掲載されており、当時もその後も大変参考になった。また、彼は DeWitt 夫妻（Bryce + Cecil）がその 20 年前に主催し、歴史的に一般相対性理論の意義を物理諸分野に浸透させるのに重要な役割を果たした国際会議“The role of gravitation in physics”（Chapel Hill, Univ. of North Carolina, 1957）に、Feynman, Wheeler 等と共に参加している（日本からは内山龍雄先生が出席）。

(Speech at the Strings 2015 conference, After Dinner Session, June 24, 2015)

General Relativity from Strings

Tamiaki Yoneya
University of Tokyo

It is a great pleasure for me to be here, attending this wonderful meeting. I would like to thank the organizers for warm hospitality, and for a kind arrangement of this after-dinner session.

The organizers asked me to give some historical reminiscences related to my old works on the connection of string theory with gravity. So let me talk about how I happened to come to this work, as faithfully as I can remember now. Although I am not sure whether such a personal history of myself interests you, I hope that it at least would help to convey to you the now forgotten atmosphere at the genesis of string theory in the early 70s.

I became a graduate student in 1969 at Hokkaido University, Japan. That was just the year when the string theory was born. I vividly remember big excitement, when I was first exposed to a very short but quite a stimulating paper by Susskind [6] on the string interpretation of the Veneziano formula [7]. I was struck by the simplicity of the idea, giving a direct physical meaning on what was originally a mere mathematical expression, something like the Planck formula, for the S-matrix elements of meson scatterings. And then I encountered a beautiful and more comprehensive paper by Nambu [8], and my interest in this subject was further strengthened. I chose, as the subject of my master thesis, the dual resonance model or the dual model, which

is the way the present string theory was called at that time. In my first work on this subject [9], I have studied formal symmetry structure of the general n -point Reggeon vertices, which were generalizations of the Veneziano formula to those with external lines corresponding to arbitrary stringy excited states. The word ‘Reggeon’ was the way we called such general states (of an open string) at that time. This experience was useful for me for developing my understanding on the essence of the channel duality.

From the first encounter with the dual string model, a basic question on the relation between the dual model and ordinary quantum field theory was increasingly occupying my mind. Remember that the Veneziano formula originally emerged without any connection with field theory. There were two particular problems which I was concerning with. One was whether and how the channel duality could be compatible with the ordinary Feynman rules of field theories. Another was the meaning of the existence of massless spinning states. With respect to this second question, I expected that the dual model corresponding to open strings should be regarded as an intrinsic extension of local gauge field theories. From this viewpoint, I first tried to clarify the role of massless spin-one state in the model, by studying whether the interaction vertices of those states can be regarded as minimal interaction, just as we have in local gauge field theories which are governed by gauge principles. My thinking was that, if the interactions of these massless spinning states had non-minimal structure, the connection of the dual model with gauge principle would not perhaps be of such fundamental significance. I could confirm [10] that in all cases of open-string models which had world-sheet conformal invari-

ance, the corresponding vertices could indeed be derived as minimal interactions with an appropriate generalized local gauge transformation of string wave function, or string fields, in an exact sense without making any low-energy approximation. Thus I was convinced that the dual open-string models must indeed be regarded intrinsically as an extension of gauge field theories. Needless to say, all these sound trivial from our present standpoint. But, I would like to stress that, as far as I knew at that time around the middle of 1971, no one had ever formulated explicitly such a viewpoint, and when I first submitted a paper on this to a journal, it was rejected. After a few months of this experience, I came to know through a letter I received from Masatsugu Minami (who was at the Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University) that a similar viewpoint had recently been discussed independently by Neveu and Scherk [11], in a different way using a low-energy approximation, namely, the zero-slope limit. I was shocked by this, and I resubmitted the paper to a different journal, PTP.

By this time, I hit an idea of extending my viewpoint to closed strings. I thought, the closed-string model, which was called the Virasoro-Shapiro model at that time, should similarly be regarded as an extension of general relativity. However, in those days, the atmosphere of particle-physics community was almost totally against general relativity. I myself felt that such a connection would be a rather strange and bizarre thing. Although, as an undergraduate student, I had been quite enthusiastic about general relativity, I myself became prejudiced against gravity, after starting researches in particle physics. During that period, current algebra and S-matrix were the

major stream at least in my environment at that time, so that the classical geometric theory such as general relativity seemed to be useless.

So I decided to put aside the problem of connecting closed strings to general relativity, as a possible future work. And I turned my mind to the first question of reconciling the channel duality with Feynman rules. Minami's letter was useful for me also in that he mentioned Noboru Nakanishi's work [12]. Nakanishi, who was also at RIMS, studied a systematic method of decomposing integration regions of n -point dual tree amplitudes, in such a way that each decomposed region involves only pole singularities corresponding to the usual Feynman diagrams. I tried to re-formulate his rule of decomposition such that the factorization property of the amplitudes became manifest simultaneously: Then it would be possible to extend his rules to general loop amplitudes. I partially succeeded in this program [13], on the basis of my previous work on general Reggeon vertices. For example, this resolved the problem of an infinite multiple counting which had been a difficulty in the ordinary way of constructing non-planar loop amplitudes of open strings known at that time. I then expected that the whole rule could be recast as a quantum field theory of strings. I tried it very hard, but unfortunately could not manage it in any satisfiable and publishable way. As everyone knows, this program of constructing a covariant string-field theory was beautifully achieved after 13 years by Witten [14] in 1985.

Actually, the failure of constructing string field theory allowed me to return my mind again to the possible connection of dual models to general relativity. I remember, that was about the beginning of 1973. Around this time, many people, especially who are phenomenologically-

oriented, were departing from the dual string model. This was just the period when the gauge field theories were about to resurge as the fundamental theory of strong interactions, as well as of electro-weak interactions. But I felt that the dual string models must contain something deeper as a theoretical framework which was perhaps beyond the field theory, and that had not yet been fully clarified. I started thinking that as the Yang-Mills theory had turned out to be useful, general relativity might also become important even for particle physics, someday in some unexpected way. Also, independently of the interpretation within hadronic physics, possible connection of dual strings to gravity by itself would be very suggestive of a unification of quantum theory and general relativity.

To demonstrate the connection, the first thing to do was to exhibit a concrete correspondence of physical amplitudes in the zero-slope limit, and also to make the comparison of interaction vertices with finite α' . Another thing which I strongly wished to clarify was to establish some definite correspondence principle between the two structures. I expected that there must be some characteristic property, in analogy with the correspondence, for example, between commutation relations and Poisson brackets which played so important role in creating quantum mechanics. Although I am not completely successful, especially, in the latter program of the possible correspondence principle, I decided to publish my modest results. First paper was a brief letter [1] which was submitted in July, 1973, and then the full paper in October [2]. The title of the full paper was “*Connection of dual models to Electrodynamics and Gravidynamics*”. The reason I added the word ‘electrodynamics’ was to discuss the similarity and contrast

between the two cases of open and closed strings in a simplest possible setting, on the basis of my previous works on the case of open strings. In regard to the possible correspondence principle, I could only emphasize that the non-linear geometric structure of general relativity was replaced by (and encoded into) the non-locality or extendedness of strings [15]. That was discussed in my full paper by comparing the structures of both sides at the level of generating functionals for a general class of tree amplitudes. This interpretation of stringy extendedness actually constituted one of the motivations behind my later proposal of the space-time uncertainty relation [16][17], which I was going to publish first in 1987 in a volume commemorating the 60th birthday of Professor Kazuhiko Nishijima. In the meanwhile, I received a preprint by Scherk and Schwarz [18]. Their impressive works stimulated me to continue my thinking further. In fact, after my initial papers, I published two follow-up papers [19] in the mid 70s, discussing the geometrical properties of the couplings of graviton state to fermionic strings, extending the methods I had developed in the case of gauge-string connection.

I remember that, at the time of the first publication of my results, I was, however, not completely sure about my standpoint in interpreting the connection between dual models and gravity. There was a different and competing viewpoint, existing actually from the early 70s, on the relationship between dual strings and field theory, namely, the possibility of strings emerging as a non-perturbative object from local gauge field theories. Among such possibilities are the so-called fishnet interpretation, which was later going to be delineated by 't Hooft's large N limit [20], and also the idea of relativistic vortices, as

proposed by Sakita-Virasoro [21] in the first case, and in both cases by Nielsen-Olesen [22][23]. I was asking myself rather perplexingly, “If such a view were correct, would it imply that general relativity could be contained in gauge theory without gravity?”. I had not been able to resolve this puzzle for many years. Of course, the holographic interpretation, being developed in recent years, is certainly providing us an entirely new perspective for this question. These were how I came to my early works on the connection of strings to gravity, and also some of my related thoughts during this period.

Finally, as an aside, I would like to remind you that this year is, not only 100 years of General Relativity, but also 150 years from Maxwell’s monumental work with the title, “*A dynamical theory of the electromagnetic fields*”, which was published in 1865 [24]. This work can be regarded as the start of gauge field theory, in a sense that Maxwell reformulated systematically and rightly his electromagnetic field theory in terms of the vector potential, by extending various previous results given by himself and other workers, most notably, Michel Faraday. Interestingly, in the same paper, he also briefly pointed out a fundamental difficulty in extending his formulation further to gravity. In this sense, he can also be regarded as an initiator of our unification program.

To conclude: I am now convinced that the unification of gauge theory and general relativity as open and closed strings must be, at least in a broad sense, the truth of Nature. Nature must not fail to utilize such a simple and beautiful way of unifying fundamental interactions.

Thank you for your attention !

文献と注

- [1] T. Yoneya, Quantum gravity and the zero slope limit of the generalized Virasoro model, *Lett. Nuovo Cim.* **8** (1973), 951–955.
- [2] T. Yoneya, Connection of dual models to electrodynamics and gravodynamics, *Prog. Theor. Phys.* **51** (1974), 1907–1920.

後の項目 [12] [13] に関連して直接交渉があった中西襄先生の他に、この仕事に最初に注目してくれたのは大阪大学の内山龍雄先生をはじめとする私より 2~3 世代上の先生方だった（本稿では 1 世代 = 10 ± 2 年と定義する）。プレプリントを出した翌年の 1974 年の初め頃に京大基研で開催された「重力と一般相対性理論」の研究会に呼ばれた。また、1975 年 1 月に数理研で開催される予定の国際会議で話すようにと、組織委員長の荒木不二洋先生から直接電話で依頼されて恐縮した。

T. Yoneya, Dual string models and quantum gravity, in *International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics* (ed. H. Araki, Springer, 1975), 180–183.

この talk では主に項目 [19] の最初の論文に基づいて論じた。だが、反応は今ひとつで、質問が少ない。特にそれから数ヶ月後の春の学会特別講演（『Dual model と場の理論』、当時座長だった益川敏英先生に 2009 年頃にお会いした機会にお尋ねしたところ、記憶されていなかった）では、質問やコメントが皆無で、無視されたような気がして落胆したことを記憶している。自分としてはごく自然な流れで行なった研究だったが、今とは違い、重力とは縁遠く一般相対性理論への関心が薄い当時の素粒子論研究者の大多数には変なことをやっていると思われるようなようだ。その辺のことも考慮し、重力の普遍性と閉じた弦の相互作用の普遍性とのアナロジーを強調し、技術的な側面は出来るだけ省いて非専門家向けの一般的な話をしたつもりだった。私の未熟さもあり、そうした意図も聴衆の多くには伝わらなかったのだろう（この特別講演については [4] で詳しく触れた）。

アメリカ New York では崎田文二先生、吉川圭二先生が注目してくださり、1976 年から 2 年間の City College 研究員としての滞在となった。この 2 年間は研究面でも人生経験の意味でも貴重な、いわば、“Sturm und Drang”

の遍歴時代となった。項目 [19] と [20] で詳しく触れる。なお、注全体にわたり、日本人で私より年上の方々は「先生」と敬称させていただく。

- [3] T. Yoneya, Gravity from strings, in *The birth of string theory*, eds A. Cappeli et al., (Cambridge Univ. Press, 2012), 459–473; preliminary version は arXiv から (<https://arxiv.org/abs/0901.0079>) からダウンロードできる。
- [4] 米谷民明, 「究極理論への道 – 力・時空・物質の起源を求めて」, 岩波書店, 2021 年 10 月 (第 3 章『統一量子重力理論への道』)。
- [5] E. Witten, 京都賞受賞記念講演, “Adventures in physics and math”, 2014 年。
- [6] L. Susskind, Harmonic-oscillator analogy for the Veneziano model, *Phys. Rev. Lett.* **23**(1969), 545–547.
- [7] G. Veneziano, Construction of a crossing - symmetric, Regge-behaved amplitude for linearly rising trajectories, *Nuovo Cim.* **A57**(1968), 190–197.
- [8] Y. Nambu, Quark model and the factorization of the Veneziano amplitude, in *Proceedings of the International Conference on Symmetries and Quark Models, Wayne State University, June 18–20, 1969*, ed. R. Chand (Gordon and Breach, New York, 1970), 269–277.
- [9] T. Yoneya, General Reggeon vertex in dual theory, *Prog. Theor. Phys.* **46**(1971), 1192–1206.
- 私の最初の full paper. 最初に引用してくれた C. Montonen とは 30 年後に印象的な出会いがあったが, [4] に書いたのだからここでは繰り返さない。
- [10] T. Yoneya, Note on the local gauge principle in conformal dual models, *Prog. Theor. Phys.* **48**(1972), 616–624.
- 部分的に重なる仕事が P. Ramond によってもなされていたことを彼から好意的な手紙をもらって知った。これも [4] に書いた。
- [11] A. Neveu and J. Scherk, Connection between Yang-Mills fields and dual models, *Nucl. Phys.* **B36**(1972), 155–161.

- [12] N. Nakanishi, Crossing-symmetric decomposition of the n -point Veneziano formula into tree-graph integrals. 2. Koba-Nielsen representation, *Prog. Theor. Phys.* **45J**(1971), 919–926 and references therein.

中西先生自身が詳しい回想録『数理解析物理学研究回顧（場の量子論研究）』（数理解析研究所講究録 2006, 1524:71-150）に「この研究をやっていた当時、あまり計算がきれいにいくので、すっかり夢中になっていたのを記憶する」（第 12 節, p. 29）と書いておられるように、この結果は数学的に大変エレガントなものであり、当時私は魅了された。

- [13] T. Yoneya, Feynman-like rules for the dual-resonance model on the basis of the Nakanishi decomposition, *Prog. Theor. Phys.* **48**(1972), 2044–2065.

ここで“partially”という理由の一つは、ループ振幅の特異点のうち、いわゆる Pomeron (= closed string) に対応する特異点を分離できる形式にはなっていない点である（論文の中でも脚注でコメントしてある）。この問題（open-closed string duality）は実は現在の string field theory でも、私が知る限り、満足のゆく定式化ができていないわけではない。これは OSFT の立場から holography を明確な仕方で定式化する問題と深く関係し得る。

2 年後、この論文の方法を拡張して開弦理論と Yang-Mills 理論の対応を、S 行列より踏み込んで off-shell の Feynman rule のレベルで詳細に調べた。

T. Yoneya, Gauge freedom in dual Feynman-like rules and its relation to the massless Yang-Mills field theory, *Prog. Theor. Phys.* **52**(1974), 1355–1368.

どちらの論文も、[12] と私の修士時代の仕事 [9] を合体させた（直感的な world-sheet 描像とは非常に異なる）弦の物理的描像に関して明確さを欠いた形式で書かれていることもあり、ほとんど知られていない。何れにしても共変的弦場理論が定式化される 10 年以上前の当時の発展段階では時期尚早な議論であったことも否めない。

- [14] E. Witten, Non-commutative geometry and string field theory, *Nucl. Phys.* **B268**(1986), 253–294.

- [15] この性質は一般相対性理論の一般座標変換に関するゲージ不変性が、弦の世界面を支配する対称性としての共形対称性によって保証される全く新たな機構によって置き換えられていることを意味する。80 年代半ばの

進展によって、この機構は一般の背景場中での共形不変性を非線形シグマ模型として扱い、 α' 展開（ゼロスロープ極限）摂動論に基づく繰り込み群による定式化に一般化された。これに関する代表的な仕事としては C. G. Callan, D. Friedan, E. J. Martinec and M. J. Perry, *Strings in background fields*, *Nucl. Phys.***B262**(1985), 593–609.

が挙げられる。平坦な背景場で弦の広がり自動的にゼロスロープ極限で重力子とその仲間の非線形相互作用を生じるのに対して、この繰り込み群のアプローチでは一般の背景場が非線形な（拡張された）Einstein 方程式を満たさなければならないという条件が得られる。両者を合わせると、背景時空と弦の自己相互作用が同じ作用原理で支配されているのであるから、弦理論が本来は背景独立な理論であることを強く示唆する。実際、弦理論の共形対称性により成り立つ [演算子/状態] 対応のため、弦のスペクトル自体が背景を無限小変形する自由度とも見做せる。

しかし、明白に背景独立な満足な弦理論の定式化は、現在でも知られていない。私自身は一つの可能性として、相互作用項だけからなる作用原理の運動方程式の解として世界面の BRST チャージを導出する形式で、背景独立性を実現しようとする考え方を 1986 年 4 月に富山で開催された国際会議の review talk で示唆した（同様なシナリオは独立に D. Friedan や E. Witten によっても指摘されていたことが後で分かった）。

T. Yoneya, *Approaches to string field theory*, in *Seventh workshop on grand unification /ICOBAN'86*, ed. J. Arafune (World Scientific, 1987), 508–532.

このときは随分と反響があり、講演に続いて活発に質問があった。会議後すぐにサンタバーバラと京都のグループで取り上げられ具体化の試みがなされたが、その後目立った発展は、残念ながらほとんどないようだ。

G. T. Horowitz, J. Lykken, R. Rohm and A. Strominger, *Purely cubic action for string field theory*, *Phys. Rev. Lett.* **57**(1986), 283–286.

H. Hata, K. Itoh, T. Kugo, H. Kunitomo and K. Ogawa, *Pregeometrical field theory: creation of space-time and motion*, *Phys. Lett.***B175**(1986), 138–144.

- [16] T. Yoneya, *Duality and indeterminacy principle in string theory*, *Wandering in the field*, Festschrift for Prof. Kazuhiko Nishijima on the occasion of his sixtieth birthday (World Scientific, Singapore, 1987), 419–428.

これについては、1987年の西宮湯川シンポジウムの招待講演でも論じた。

T. Yoneya, String theory and quantum gravity, in *Quantum String Theory*, Proceedings of the second Yukawa memorial symposium, Nishinomiya, Japan, October 23-24, 1987 (Springer, 1988), 23–31.

このアイデア（以下 STUP と略）には [15] で触れた富山の会議の少し後頃に思いついていたのだが、時間とか空間に関する不確定性を正確に定義するのが難しく、すぐ論文にする気にはならなかった。翌年たまたま折よく依頼された西島先生の還暦記念の本への寄稿の機会を利用して試論的に書いてみたのであった。後になって同じ頃に関係したアイデア（‘minimal distance’）が、D. Gross や G. Veneziano 等により独立に議論されていたことを知った。次項 [17] のプレプリントを出したところ、Veneziano から批判的なコメントがあり、私が直ちに反論を送るというやり取りが数ヶ月続いた。その後、彼とは何度か顔を合わせる機会があったのだが、この問題について彼と直接議論した記憶はない。何れにしても、彼とのやり取りは自分の考えをさらに明確にするのに役立った。一方、Gross の反応は少し違っていた。彼は当時 Princeton Univ. にいて、しばしば崎田先生の学生の博士論文審査のために City College に来ることがあったり、また彼のセミナーの際の討論等を通じて N. Y. 時代から知己であった。91 年の崎田先生の還暦を記念する City College でのシンポジウムの際に彼と立ち話をする機会があった。この問題も話題になり、彼は私の考え方もそれなりに理解してくれたという印象が残っている。

関連する思い出に触れよう。西宮シンポジウムの少し前だったか、原子核研究所でのセミナーの中で背景独立性の問題と関連して STUP にも触れたところ、当時所長だった Y^2 （山口嘉夫）先生から「湯川さんみたいなことを言うんじゃない！」と頭ごなしに怒鳴られてしまった。私は直ちに「そういうものではありません。最後まで話を聞いてからまた議論してください」と制して話を続けた。私としては弦理論の非局所性の本質的特徴をできるだけ単純な仕方で定性的に捉えることを意図して提案したのだが、そんな皮相的理解しかされないとするなら心外であった。それは時間方向と空間方向で UV と IR が対応するダイナミックな関係を意味をしており、もちろん、従来の非局所場理論の枠内では捉えられない新たな性質である。 Y^2 先生は辛辣で勇ましいことで有名な方であった。国内の

国際会議等で私が話をするときには、ほとんどいつも一番前の正面の席に座っておられ、たいてい棘があるような質問やコメントをされた（富山の会議、西宮湯川記念シンポジウムも例外ではない）。だが、たとえ少々の外れなところがあっても、そのように歯に衣を着せない率直な批判をしてくれる人は他にいなかったから、私にとって得難い貴重な存在であった。実は私が北大院生時代に先生が集中講義に来られたとき、ちょっとしたハッピーニングがあり、その頃から先生とは不思議な因縁が出来ていたような気がする。私の CERN 滞在中に住宅担当係の方とアパートの手続きのことで話をしていたとき、私が東大から来たこと知り「Prof. 山口はお元気ですか」と聞かれた。きっと CERN でも先生は武勇伝を残していたのだろう。先生の定年退職後も数年間は国際会議や研究会で会っていたが、その後顔を合わす機会がない期間が大分続いてから、岡山に開設された光量子研究所の開所式に招かれた折、しばらく振りでお会いしたのが最後になった。「ちょっと病気をしちゃってね」と弱々しい表情でおっしゃられたのが、20年近く経た今でも私の脳裏に焼きついている。

- [17] T. Yoneya, On the interpretation of minimal length in string theories, *Mod. Phys. Lett. A4* (1989), 1587–1595.

弦の世界面を特徴づける共形不変量としての極値的距離 (extremal distance) の概念に一種の conjugation に基づく双対的性質があり、STUP を関係つけられることが分かり、やっと論文にする気持ちになって書いた。私の N.Y. 時代に何気なく入った書店の書棚で偶然見つけ、これは役立ちそうだと直感し購入していた本 (L. Ahlfors, “Conformal invariants – Topics in geometric function theory”, 1973) を見直してヒントが得られたのであった。最初 PRL に投稿したのだが、(察するに Veneziano がレフェリーだったようで) 何度かやり取りした後も掲載されず、出版に1年程かかった。7~8年後、私が主張していた立場が弦の散乱に加えて D-ブレーン散乱の特徴的なスケールの定性的理解にも適用できることを次の論文で指摘してから、M. Li and T. Yoneya, Point D-brane dynamics and space-time uncertainty relation, *Phys. Rev. Lett.* 78 (1997), 1219–1222.

やっとある程度広く認知されるようになったようだ。例えば、明らかにこの考え方を取り入れた記述が Polchinski の教科書 (1998年) にある (Volume 2, p. 161)。彼は 1993年の Santa Barbara ITP の workshop “Nonperturbative

string theory”に私が半年間滞在したときからの知己であったが、この問題に関しては直接議論したことはなかった。彼が興味を示しているということは、M. Li から聞いていた。Li とは他にも STUP の M 理論への拡張が動機付けになった仕事として以下の論文がある（プレプリント hep-th/9906248, これも正式出版に 2 年かかったことになる）。

H. Awata, M. Li, D. Minic and T. Yoneya, On the quantization of Nambu brackets, *JHEP*(2001)12, 013.

この論文を書いていたとき、私以外の若手 3 人はたまたまシカゴ EFI に滞在（Li はポストドク）していて、南部陽一郎先生も関心を持たれ、それを通じて私の STUP のアイデアにも興味を持たれたようであった。それから数年後、一度だけ先生との会話の中で話題に上がったことがあった。なお、論文タイトルにある ‘Nambu bracket’ には馴染みがない読者が多いかも知れないので、私が書いたレビューを挙げておく（実は、私の放送大学定年退職（2015 年）後のいくつかの仕事は、上の論文でやり残していた問題が動機になっている。下記の 2 番目の論文参照）。

米谷民明, 南部力学と南部ブラケット, 日本物理学会誌 72(2017), 231–235 ; T. Yoneya, Canonical Nambu mechanics: Relevance to string/M theory and approaches to quantization, *PTEP*12(2021)12C101.

私の理解では、Gross や Veneziano 等の ‘minimal distance’ の考えだけでは D-brane の場合には有効ではない。そのことも含め、STUP に関しては歴史的な展開も含めて包括的に論じた論文として

T. Yoneya, String theory and space-time uncertainty principle, *Prog. Theor. Phys.* **103** (2000), 1081–1125,

また、[4] の第 4 章でもかなり詳しく触れた。よりコンパクトなものとして、Strings 2000（Michigan Univ.）での talk に基づく次の論文がある。

T. Yoneya, Space-time uncertainty and noncommutativity in string theory, *Int. J. Mod. Phys. A* 16(2001), 305–315.

また、この仕事を中心に回想を記したエッセイとして以下がある。

T. Yoneya, The short-distance space-time structure of string theory : Personal recollections, in *Looking beyond the frontiers of science – dedicated to the*

80th birthday of K. K. Phua, (eds. L. Brink et al, World Scientific, Singapore, 2022), 313–327.

- [18] J. Scherk and J. H. Schwarz, Dual models for nonhadrons, *Nucl. Phys.* **B81**(1974), 118–144; Dual models and the geometry of space-time, *Phys. Lett.* **B52** (1974), 347–350; Dual field theory of quarks and gluons, *Phys. Lett.* **B57**(1975), 463–466.

私の仕事を巡ってあるやりとりが吉川圭二先生と Schwarz の間であったことを、帰国したばかりの吉川先生に初めてお会いしたときに聞いた。最初の論文で私の [1] を引用せざるを得なかったのは、その効果だったのかも知れない。70年代後半の私の N.Y., City College 時代には西海岸のカルテクにいた Schwarz (1941 年生まれ) とは直接交流する機会がなかったのだが、前項目でも触れた 93 年の Santa Barbara ITP workshop で数ヶ月居室をシェアしたのがきっかけになり、親しく付き合うようになった。当時、私は低次元ブラックホールの行列模型による非摂動的定式化を求めて Jevicki と共同研究をしていたが、Schwarz から、自分の学生でこの問題に興味を持ち私に相談したいという学生がいるとのことで会うように頼まれたことがあった。そのとき、自分がいては学生が話しにくいだろうと、私と学生と二人きりで議論できるように Schwarz が配慮してくれた。彼は豪放な笑い方に特徴がある極めて明るい性格の人であると同時に、そういう細かい気配りをする人でもある。

- [19] T. Yoneya, Interacting fermionic and pomeron strings: Gravitational interaction of the Ramond fermion, *Nuovo Cim.* **A27**(1975), 440–457; Geometry, gravity and dual strings, *Prog. Theor. Phys.* **56**(1976), 1310–1317.

このうち前者では Ramond のフェルミオン開弦と closed string の重力子状態との結合を local Lorentz 変換を [10] の方法を拡張して定式化し、後者は dilaton 状態と B 場への拡張とその幾何学的解釈を論じた。関連して、グラスマン座標を用いて Neveu-Schwarz 弦の明白に超共形共変的な超場演算子形式 (つまり, 2DsuperCFT の演算子形式) を定式化した以下の論文がある (この仕事については [4] でもある程度詳しく触れている)。

T. Yoneya, Grassmann algebraic approach to the Neveu-Schwarz model and representation of supermöbius algebra, *Prog. Theor. Phys.* **54**(1975), 526–541.

これは通常のボソン振幅の場合に Fubini-Veneziano が 1970 年に与えた Koba-Nielsen 振幅の演算子表示を, Neveu-Schwarz 模型に拡張したもので, このコンテキストで超場を導入したのはこれが最初である (1 年程後に L. Brink 等が, 私の仕事を知らずにこれと近い論文を書いている).

spinning string の相互作用を論じた私のこれら一連の仕事は, いずれも, 弦理論における時空超対称性を発見した有名な GSO 論文

F. Gliozzi, J. Scherk and D. Olive, Supergravity and the spinor dual model, *Phys. Lett.* **65b**(1976), 282.

の以前に行ったものである ([1][2]に加えて超重力と関係し得る [19]の最初の論文が引用されている). 私がこれらの問題について考察していた頃は, まだ超重力理論は存在してなかった. 後者と GSO 論文について最初に知ったのは, 1976 年の 9 月に New York, City College に到着した後のことだ. 時空超対称性に関する Wess-Zumino の論文は 1974 年に出ていたのだから, 当然, こういう着眼点もあったんだ, いいところをやられたなど感心すると同時に, 私自身, もっと粘り強く弦理論と重力の関係を追求してもよかったかなと反省した.

それから大分後になってからのことだが, Schwarz と GSO 論文について話題になったとき, 彼は「これは本来自分がやるべきことであった」と, 幾分悔しそうな表情も交えて述懐したのが印象に残っている. 彼は当初は dual pion 模型と呼ばれていた NS 模型の創始者として複雑な思いを持っていたであろう. 70 年代後半からの 8~9 年は (私自身も含め) ほとんどの研究者が弦理論への興味を失い離れて行った中, 彼は, 多分, この思いをバネにして弦理論と超重力理論との関係について深く追求を続け, 84 年の (M. Green と共著の) ブレークスルーに繋がったのだろう.

ただ, 私にとって疑問だったのは, GSO 論文ではいわゆる GSO 射影で時空超対称性には不要な余計な状態を落としたが, (タキオンとしての 'pion' を含む) 余計な状態の意味が何かであった. 90 年代の発展により, それが不安定ブレーンの存在により超対称性が自発的に破れる場合と解釈でき, 余計な状態を含めたとき時空超対称性が non-linear realization として隠れた仕方で存在しているとの理解が出来ることが分かり, 個人的には疑問が一応解決した.

T. Yoneya, Spontaneous broken space-time supersymmetry in open string theory without GSO projection, *Nucl. Phys.***B576**(2000)219–240; T. Hara and T. Yoneya, Nonlinear supersymmetry without the GSO projection and unstable D9-brane, *Nucl. Phys.***B602**(2001),499-513.

その意味では弦の世界面上の超共形対称性 (Neveu-Schwarz, Ramond, Jervais-Sakita, ...) こそが、実は一般座標ゲージ対称性を含む時空超対称性を支えるより深い対称性であると言える。これは2001年にカルテクのセミナーに呼ばれて話したときにも強調したのだが、Schwarz (おそらくこれらの論文のレフェリーは彼だったのだろう、気に入ってくれたようで非常に positive なコメントをもらっていた) は嬉しそうな表情で聞いていた。また、このときはたまたま E. Witten 夫妻がカルテクに滞在中であった。Nappi (妻) が興味を持ったらしく、セミナーの後すぐ夫妻で私のところにきて短時間議論した。

話が前後するが、GSO 論文が出る少し前頃から私の興味は [20] の 't Hooft 論文の影響もあり、次第にゲージ理論の非摂動的構造、特にクォーク閉じ込め問題、のほうに移っていた。私自身にとってはこれも自然な流れであった。短い期間のうちにたくさんすることに手を出してすぎて熟成が足りなかったことは、その後の反省材料となったが、私としては研究の幅や視野を広げることがそれなりにできたし、結果的に他の研究者に引き継がれ後の発展に繋がった部分もある。そして、当然、閉じ込め問題はカラー電場の弦、あるいはカラー磁場の渦糸などの有効自由度としての役割を通して間接的に弦理論と深い関係にある。実際、弦理論の90年代後半からの再復活はまさにこうした関係に関する理解が深まり、重力とも関係する新たな段階に至るものであったわけだから、この‘寄り道’は、当時は深い雲に覆われて視界外だったが、今から見れば『弦から重力』の問題へと、15年以上を経て再び繋がる道であったことになる。

その経過についてももう少し記してみよう。New York で最初に書いた論文は、ゲージ場のインスタントン解を例として非摂動的配位の空間無限遠での振る舞いに対応する力学変数の重要性を論じたものになった。より詳しくは関連するエピソードも含め [4] に書いたが、ここでも簡単に触れる。

S. Wadia and T. Yoneya, The surface variables in the vacuum structure of Yang-Mills Theory, *Phys. Lett.***66B**(1977), 341–345.

実はこの論文の本来の主眼は、重力のハミルトン形式に関して Regge-Teitelboim (1974 年) が指摘していた表面項の重要性と同様なことをゲージ理論で示すことにあったのだが、byproduct として、後に Gribov ambiguity として広く知られるようになった非摂動的なゲージ場の配位におけるゲージ固定条件に伴って起こる非一意性についても実質的に指摘してあった。これは Gribov 自身の論文のプレプリントより 1 年近く前に投稿しているが、私たちの論文はほとんど忘れられていた。ただ、Gribov ambiguity は連続理論での非摂動的なゲージ場の配位の特徴の一つとは言えるが、それだけで直ちに閉じ込めなどの説明になるわけではない。

この仕事の次に取り掛かったのは、このような非摂動的な配位での量子揺らぎの特徴を共形異常 (conformal anomaly) に基づいて経路積分により一般的に定式化し、インスタントンの力学に応用する問題であった。

T. Yoneya, Conformal anomaly and the interaction of instantons, *Phys. Lett.* 71B(1977), 407–411.

このアイデアはインスタントン周りの揺らぎを 1 ループ近似で直接計算した 't Hooft の 76 年の仕事に触発されて思い至ったものである。私が知る限り、この論文は量子異常を経路積分で直接導いた最初の例であった。カイラル (ABJ) 異常についても同様に適用すれば、Atiyah-Singer の指数定理の積分表示が得られることを一言簡単にコメントしてある (Pauli-Villars 正則化法を用いていて、量子異常は積分測度からではなく regulator fields の作用積分からの寄与となる方式で扱っているため、最後の結果は同じだが、後に広く用いられるようになった藤川和男先生が提唱された方法 (1979 年) とは一見異なる。だが、古典作用以外の regulator 部分を測度の定義と解釈すれば結局同じで、正則化の仕方の違いに過ぎないと言える。経路積分を直接用いているわけではないが、Pauli-Villars 正則化によるカイラル異常の導出は、80 年代に入って Jackiw 他によって詳細に調べられている)。今から思うと、これは切り離して別の独立な論文にしてきちっとした形で詳細を論じておいた方がよかった。当時は閉じ込め問題が私の目標であった。共形異常はスケールの生成という意味でそれと深い関係にあるのに比較すると、カイラル異常の方は数学的には面白いが、dynamics にとっての重要性は小さいと考え、その気にならず怠ってしまった。また、2 次元非線形シグマ模型に適用するとより効果的な結果が得られるともコメントしてあるが、これに

ついても、じきに他に集中したい問題 ([20] で触れる) に頭が占められてしまい、途中で棚上げにしてしまった。共形異常の応用に関しては私の仕事を受けて、2次元 \mathbb{CP}^{n-1} 模型のインスタントン気体の場合について、1~2年後、ドイツ (B. Berg-M. Lüscher) とロシア (L. Frolov-A. Schwarz) のグループによって詳細に調べられ拡張された。

この仕事に関連してもう一つ悔やまれるのは、このとき、どうして私は共形異常の議論の弦理論への応用・拡張に思い至らなかったのかということだ。2次元非線形シグマ模型 (\mathbb{CP}^1 模型) での計算もある程度やっており、また、超重力理論への応用については、共形異常が打ち消す条件を調べた片手間のような小さな論文を一つその後すぐ書いていたにも拘らずにである (この論文の主要結果は、翌年の Christensen-Duff の包括的な仕事で確かめられ、拡張された)。

T. Yoneya, Background metric in supergravity theories, *Phys. Rev.D*17(1978),2567–2572

[10] から始まって [1][2] を経て [19] に至ったように、つい数年前、N.Y. に来る前までは世界面の共形不変性にあれほど拘って仕事をしていたのに、N.Y. に来てからは急速に発展する渦中の大波に投げ込まれたせいか、ゲージ理論の非摂動的性質に魅了され、弦理論のことはすっかり忘れてしまっていた。弦理論への応用は81年の Polyakov の有名な仕事 (conformal anomaly に関しては A. Schwarz の包括的な CMP 論文だけを引用している) まで待たなければならなかった。

先に「熟成が足りなかった」と書いた理由は以上のようなことである。この頃の私には、色々な芽があったのに十分に発展させずに、ただ一途に閉じ込め問題の手がかりを求め、次々とテーマを巡る遍歴者のようなところがあった。もちろん、閉じ込め問題は純理論的には今でも証明されていない難問であるから、当時の段階でいくら集中しようが良い結果に至ることは覚束ないことではあった。その意味では致し方がない面もあった。崎田先生とはよく二人だけで先生の馴染みの寿司屋に出かけた。一度、「もう論文はこれ以上しばらく書かなくてよいから、本当に何をすべきかをじっくり考えてはどうか」とお小言を頂いた。私にとって貴重な得難い助言であった。

この機会を利用し、N.Y.時代（1976–1978）における印象的な出会いについて記しておきたい。少し長くなるが、ご容赦いただきたい（長年の友人 S. Wadia と A. Jevicki とのことは [4] で触れたのでここでは省く）。まず、一人は R. Jackiw である。私は 1977 年夏の Banff Summer Institute に参加したが、そのときの講師の一人が彼であった。彼は年齢は私より 8 歳上だったが、どういうわけか（私の質問や、彼の講義内容と関係する私のインスタントン関係の論文を気に入ってくれていたためか、あるいは彼がレフェリーだったのかも知れない）気が合い、講義が終わった後に、ビールを飲みながら話そうと宿舎の彼の部屋に呼ばれて、一緒に School に参加していた S. Wadia も交えて深夜まで話しこんだことがあった。少年時代に母国ポーランドから家族と共にアメリカに移住した頃の思い出をしんみりと語っていたのが印象に残っている。82 年に内山先生が奈良で主催し私も組織委員の一人として加わった国際会議 “Gauge theory and gravitation” に彼が来日した際に再会したが、それから大分後になって、私が何度かセミナーや、Jevicki (Brown Univ.), W. Taylor (MIT) 等と立ち上げた学振の日米共同研究プロジェクト等で MIT に滞在したときも、一度、仕上げたばかりの論文を私の部屋に持参して「君がやっていることも少し関係あるから読んでみてくれ」と言ったりなどで、昔のことが思い出された。彼は気が難しそうでとっつきにくい人と思われているようだが、私はそうは思わない。少し前に亡くなったというニュースを聞き、悲しい思いをした。

もう一人、私と同年生まれの E. Weinberg。詳しくは内容を記憶していないが、彼とは一度私がコロンビア大学に出かけて行って長時間議論したことがあった。実を言うと崎田先生が当時 PR に投稿された彼の論文のレフェリーだったのだが、手に負えないということで私が下請けを頼まれてしまった。いっそのこと彼と直接議論するのが手っ取り早いとのことで、崎田先生が彼に電話をかけ、1対1で議論することになった。こんなことは今では考えられないが、当時はおおらかな時代であった。そこで意気投合するほどに互いに理解でき満足して別れたのが、愉快的な好ましい記憶として残っている。その6~7年後、CERN 滞在中に私が1週間訪問したコペンハーゲン NBI で偶然顔を合わせ旧交を温めることができたが、驚いたことに、それからさらに35年近く後に沖縄で開催された Strings 2018 に彼が出席していて思いがけなくまた再会し、懐かしく昔のことを話し合った。「驚いた」のは、彼の仕事は弦理論との関係は薄く、それまで私

が出席した String conference には一度も参加していたことがなかったからである。彼は KIAS の客員メンバーを務めているようだから、旅行のついででの機会だったのかも知れない。

最後に M. Kaku のこと。彼も私と同年生まれの日系 3 世である。Kaku-Kikkawa の論文などで名前はよく知っていたが、City College で同僚になるとは予想していなかった。彼と最初に会ったとき、機関銃のような勢いで電動タイプライターを打っていたのが第 1 印象となった。その頃の彼は車の運転をしなかったのだから、崎田先生の家でのパーティーに呼ばれたときなど、私が自分の車を運転して一緒に出かけたことが数回ある。彼との話で印象が残っているのは、彼が非常な物知りであること、そして、日系人として強制収容所にいた戦時中の家族の苦労話や、彼が当時住み活動していた N.Y., lower Manhattan 地区の Chinatown の reform 運動についてだった。収容所で生まれた兄とは異なり、戦後に生まれた彼は、言葉の苦労をさせないようにと、最初から完全に英語だけで育てられたため、自分は日本語が話せないとのことであった。ちょっと困るのは、彼が私の名を引用するときは何故かいつも 'Yonea' と綴り、y を落とすことである。吉川先生が亡くなられてから、Physics Today 紙に彼が投稿した追悼文にもこのミスがある。彼から内容をチェックしてもらいたいと原稿を送ってきたので 'Yoneya' と訂正して送り返した。だが、掲載文では依然として y が抜けたままであった。

話を戻そう。量子重力の基本理論としての弦理論そのものの研究に戻ったのは N.Y. から帰国後、北大から東大に異動 (1980 年) し数年後の 1 年間の CERN 滞在 (1983~1984) から帰ってから、Green-Schwarz の量子異常の新たな打ち消し機構の発見をきっかけに起こった爆発的な弦理論の復活に触発されてのことだった。閉じ込め問題の追及は CERN に行く前にきっぱり諦め、CERN 滞在中は充電期間だと割り切って量子重力の基礎をできるだけ根本から見直そうという意図で昔の文献を再検討しながら考察を進めていた (その中身については [4] に記したのでここでは触れない)。滞在中、Alvarez-Gaumé のセミナーで E. Witten と共著の重力量子異常の打ち消しの話があった。IIB 型弦理論の有効性を指し示す彼らの包括的な議論に大いに感心し、ここからの発展もあり得ると予感したが、こんなに早くそこに繋がるとは予想外であった。

その後の弦理論の発展で特に感慨深いのは、なんと言っても 90 年代後半の Polchinski による D ブレーンの発見、そして特に 97-98 年にかけての Maldacena の論文がきっかけになった AdS/CFT 対応である。私が最初に重力と弦の関係を指摘した頃の弦理論はハドロンの弦であったので、「ゲージ理論から重力が出てくるのか？」ということで、その解釈にかなり苦しんだ（「二律背反」問題として [4] で詳しく述べた）。しかし、この対応関係を通じ、相互作用の統一のための弦とハドロンの弦が、あたかも‘回り舞台’が 360 度回転して最初のシーンに戻ったかのように結びつくことになり、私が 25 年前に幸運にも最初に行き当たった“弦と重力の関係”の真の意味は、結局、こういうことであったかという思いを持てたのである（私自身のその後の関係する仕事も含め [4]（第 4 章）で詳しく触れた）。

- [20] G. 't Hooft, A planar diagram theory for strong interactions, *Nucl. Phys.* **B72**(1974), 461–473.

私がこの仕事を知ったのは、[1][2] の論文を書いたから 1 年近く経てからだったと記憶している。なんと素晴らしくエレガントな仕事だろうと本当に感心した。そして、数年後、N.Y., City College 滞在中に出会った

- G. 't Hooft, On the phase transition towards permanent quark confinement, *Nucl. Phys.* **B138**(1978), 1–25.

はさらに増して実に魅惑的な論文であった。これに大きく影響を受け、その数ヶ月後、私は't Hooft の議論を格子ゲージ理論で定式化し、その双対性と $Z(N)$ (center) vortex の凝縮による閉じ込め機構を論じた。

- T. Yoneya, $Z(N)$ topological excitations in Yang-Mills theories : duality and confinement, *Nucl. Phys.* **B144**(1978), 198–218.

このとき、初めて Ising Model についての Onsager 解、Kramers-Wannier 双対変換などの原論文を詳しく読んだが、その素晴らしさには魅了された。南部先生が 1950 年代最初の頃やはりそれらの影響で論文を書いておられる（本誌 2023 年、8 月号「南部陽一郎ノーベル賞講演」の筆者が担当した日本語訳と解題を参照）のも、然もありませんと思った。この論文で議論した vortex の凝縮機構では、vortex がその長さに比例したエントロピーを持つことを用いている。これはゴム弾性の統計力学とのアナロジーがあ

ることから、南部先生が強く興味を持たれたようだった。これに関連しては [4] に詳しく書いたのだからここでは繰り返さない。

ところで、't Hooft 論文と近い内容で格子ゲージ理論の立場で独立になされた仕事として、

E. Fradkin and L. Susskind, Order and disorder in gauge systems and magnets, *Phys. Rev.D***17** (1978),2637–2658.

があるのだが、私は当時知らなかった。内容的に私の上の 1978 年論文と $N = 2$ の場合に重なるところがある。また、私の論文から 1 ヶ月遅れて M. Green も一般の N を扱っていて、私のと部分的に近いところがある論文を書いている。これについては [4] で触れた。Green は Fradkin-Susskind 論文を引用しているので知っていて書いたわけだ。私の論文のプレプリントが出てから半年以上して NP に掲載される頃だったか、Susskind から手紙付きで論文別刷を受け取り初めて知った。80 年代になって物理学会から格子ゲージ理論の論文選集（「新編物理学選集 80」, 日本物理学会, 1983 年）を編集するように依頼されたが、その中にこの論文を収録した。70 年代後半から親しくおつきあいしていた共同編集者の岩崎洋一先生（実は City College における私の前任者）は、私の 1978 年論文の方を選びたいと言われたのだが、教育的見地からは議論の焦点が絞られていて分かりやすい Fradkin-Susskind の方が論文選集により相応しいと考え私は固辞した。

ここまで書いたついでに Susskind（1940 年生まれ）との思い出を、少し [4] と重なるところがあるが記しておきたい。私の City College 時代、彼は City College から地下鉄で数駅のところにあった Yeshiva Univ. に在籍していて、City College（彼自身 N.Y. 出身で学部での母校）の物理学科コロキウムにはよく出向いて来ていたので顔は何度か見かけていたが、個人的に議論したことはなかった。私の東大赴任後、Stanford Univ. に移っていた彼が来日した機会にセミナーに招待したのがきっかけになり、交流が始まった。そのとき投稿したばかりの論文

T. Yoneya, Space-time local symmetry of string field theory, *Phys. Rev. Lett.***55**(1985),1828–1830

を読んでもらったところ、彼もこれとほとんど同じようなことを考えていたとのことだった。これは実はすでに 10 年前の私の論文（[19] の 2 番

目の PTP 論文) で示唆していたことを具体化し、背景時空の無限小変形を引き起こすような string field の変換を light-cone SFT の枠内で論じたものだ。背景独立性に関するささやかな仕事ではあるが、このような議論をした最初で、[15] で触れた富山会議での私の talk の背景になった。さらに次の論文で dilaton 弦場の無限小変形による結合定数の変化を扱った。

T. Yoneya, String-coupling constant and dilaton vacuum expectation value in string field theory, *Phys. Lett.* B197(1987),76–80.

私が知る限り、これも SFT における ‘soft-dilaton theorem’ に関する最初の仕事で、後に複数のグループ (MIT および京都グループ) により共変的 SFT へ拡張された。

それからかなり後になるが、彼の招待で Stanford Univ. に 1ヶ月ほど滞在した (1999 年春) ことがあった。彼と最初に顔を合わすなり、開口一番、「弦が重力を含むことを式無しに説明するにはどうするのが一番良いだろうか」と聞かれた。[2] で触れた昔の学会特別講演で強調したことを思い出し、たとえば、万有引力の普遍性と closed string の相互作用の普遍性のアナロジーから入るとどうだろうかと言ってみたと記憶している。もちろん、これももっと説明が必要だが、図だけでもある程度は説明可能で、私は一般向けの科学雑誌の記事で弦と重力の関係に触れるときは、よくそういうやり方をしていた。また、具体的にどういう問題だったか記憶していないが、何か超対称性に関連することで彼から質問があり議論が始まった。[19] で触れた超場形式の論文で私が昔論じたことと関係していたため、黒板にグラスマン変数を書いて説明し出すと、彼は自分はグラスマン変数が出て来ると頭が混乱して何も考えられなくなってしまおうと言って、ちょっと引くような感じになった。確かに彼の仕事は常に明確な物理的イメージに基づいていて形式的な議論は極力避けていることはよく分かっていた。そこにこそ私は [6] で最初に影響を受けた学生時代から強く惹かれ尊敬していたのだが、これにはちょっと驚くと同時に、しばしば形式論に頼ってしまいがちな私にとっての反省材料になった。

もう一つ、滞在中、研究室の若い人たちとともに彼と夕食を共にしたときのことが忘れられない記憶として残っている。私と向かい合った彼が、

Tamiaki, “Old soldiers never die, they just fade away.” Do you know about this phrase?

と、なんと、米軍のマッカーサー元帥の退任演説（1951年）における有名な言葉を突然引用した。私は「もちろんよく知っている」と答えたが、彼がどういうつもりでこれを持ち出したのか、彼はこれ以上は語らず、私も問わなかった。もしかして上で触れた私との議論と関係しているのか、今でも測りかねる謎になっている。「老兵」でなくとも、何らかの形で生が突然絶たれない限り、時間の流れに縛り付けられた私たちの誰にも“fade away”する最終期が、遅かれ早かれ、いずれは訪れるのは必定だ。このとき彼自身は還暦に近い年齢で、まだ風の冷たい季節なのにずっと半ズボンで通すなど私が舌を捲かざるを得ないほど元気であった。そんな彼でも老いの不安を感じていたのであろうか。彼はまるで正に還暦で再誕生したかのように、80歳を優に超える今でも驚異的な勢いで最近流行のテーマで論文を書き続けている。そんな理論物理学者がかっていただけるか。

本筋に戻ろう。上の私の1978年論文のフォローアップとしてモノポール凝縮機構と関連してSU(N)/Z(N)型の模型を論じた次の論文がある。

T. Yoneya, Monopole condensation and quark confinement in a weak coupling SU(N) lattice gauge model, *Nucl. Phys.***B153**(1979), 431–444.

2-form のZ(N)ゲージ場の自由度を陽に導入してZ(N)群を取り出す仕方には今から見てもある程度意味があるかも知れない。実はこれには‘frustration’があるスピン系の統計力学がヒントになっていた。私が東大に異動してすぐ、物性理論の鈴木増雄先生の研究室のセミナーに呼ばれて話したことがあった。また、関連する博士論文の審査を頼まれたこともある。

関連する私の仕事にもう一つ触れておきたい。’t Hooft の1974年論文では大N極限のゲージ理論をある種の弦理論として解釈する可能性についてもlight-cone gaugeのHamilton形式で議論していた。これはスピーチでも触れたように、[21][22]で論じられた‘fishnet diagrams’による弦の解釈をより系統的に定式化しようとするものであった。私はこれとWilsonの格子ゲージ理論の論文（同じく1974年に出版）に触発され、少し後になるが、統計力学でスピン系を平均場の理論に書き換えるのにしばしば用いられる方法を拡張し、通常のWilson作用のlattice Yang-Mills理論を、そ

れと原理的には任意の N で同等であることが明白な仕方では、一種の string field theory に変換可能であることを示した。

T. Yoneya, A path-functional field theory of lattice gauge models and the large- N limit, *Nucl. Phys.* **B183**(1981), 471–496.

‘string field’ の性格がスピン系の場合の平均場に相当していて fundamental string でもないし、また Wilson loop operator と異なるため、‘path-functional field’ という新しい言い方をしてみた。上の 79 年論文でも 2-form ゲージ場の形式で導入していた、現在では ‘1-form symmetry’ と呼ばれる string field のトポロジカルな $Z(N)$ 対称性に基づき、ゲージ場の相についての議論を与えた。当時、この仕事は全く注目を浴びなかったが、最近、実質的に同様な議論が McGreevy 等によりなされている。この論文ではこうした対称性の考察に加え、さらに大 N 極限での性質を論じた。ゲージ理論の大 N 極限は弦理論の D ブレーンとの関係を通じ 90 年代に holographic principle に繋がった。現在の観点から見ると、私が導入した ‘path-functional field’ は、バルクの fundamental string field を境界に投影して得られる影のような自由度と見做すべきものという意味で、私の ‘寄り道’ も時空を超えた高所から見れば『弦から重力』に繋がっていた。

- [21] B. Sakita and M. A. Virasoro, Dynamical model of dual amplitudes, *Phys. Rev. Lett.* **24**(1970), 1146–1149.
- [22] H. B. Nielsen and P. Olesen, A parton view on dual amplitudes, *Phys. Lett.* **B32** (1970), 203–206.
- [23] H. B. Nielsen and P. Olesen, Vortex line models for dual strings, *Nucl. Phys.* **B61**(1973), 45–61.
- [24] Maxwell は、ここに紹介した 1865 年論文の中の *Note on the Attraction of Gravitation* と題された小節で、重力場の力線に関する考察の結果として

The assumption, therefore, that gravitation arises from the action of the surrounding medium in the way pointed out, leads to the conclusion ... (中略) ... that the presence of the dense bodies influences the medium so as to diminish this energy wherever there is a resultant attraction. As I am unable to understand in what way a medium

can possess such properties, I cannot go any further in this direction in searching for the cause of gravitation.

と論じ、重力を電磁場と同様な意味での力学的場によって理解する際の難しさを指摘した。それからちょうど 50 年後に一般相対性理論が解決を与えたわけだ。等価原理により重力エネルギーは局所的には常に消去できることに現れているように、一般相対性理論では局所的なエネルギー密度の概念は成立しないから、Maxwell が直面した困難は全く別の観点から考えなければならない。ここではこれ以上この問題に踏み込むことは出来ないが、一般相対性理論におけるエネルギーの問題に関しては、長い論争の歴史がある。

ところで、本スピーチの最後に触れたように、Maxwell, Einstein に加えて 1000 年前のアラビアの自然科学者 Ibn al-Haitham (Huygens, Newton 等から始まる近代的な光の理論に繋がる先駆的業績で知られる) の業績を称え、国連は 2015 年を国際光年と定め、世界中でそれに因んだ催しが行われた。日本物理学会でも一般向けの科学セミナーをこのテーマで開催した。そこで私が行なった講演『光と場：マックスウェルから弦理論まで』は、ある意味で本スピーチの最終部を敷衍したようなものなので、参考のため表紙と最後の 2 ページ分を抜粋して添付しておく。

添付ファイルへの補足：未来への希望

「量子」重力に関する最近の議論の大半は（量子場の entanglement の問題に動機づけられた議論も含め）基本的に半古典近似に基づいている。もちろん、あらゆるレベルで理解を深めることは重要であることはいうまでもない。だが、局所場近似が有効な低エネルギーに止まっているのは、量子重力にとって最も本質的な UV 領域の問題とどう繋がるかが不明である。弦理論は UV 領域の困難を解決して全ての相互作用の統一を成し遂げるほぼ唯一の可能性であることについては、ほとんどの研究者が同意するだろう。しかし、弦の非局所性の性格の本当の理解がまだまだ不十分だと私は考えている。また、非摂動的な意味での定義が不明で、ファイル最後のページの 4 番目の項目のような概念的な問題は未だ手つかずである。特に弦の非局所性に関する非摂動的な定式化には、例えば、[19] で触れた私と Wadia との論文で議論したようなゲージ場の場合と通じるような開弦場の無限遠での性質を適切に捉えることが、holography の定

式化と関係して重要になる可能性があるとは私は予想している。つまり、開弦のループとしての閉弦がバルクの重力を記述するが、それと境界付近で開弦が与えるゲージ場の力学とが対応する。これを満足の行く仕方で捉えるには、完全に量子化された開弦の力学だけから全体を整合的に閉じた形で定式化する必要がある。もちろん、数学的定式化が出来ただけでは不十分で、それに伴う概念的な基礎が確立して初めて本物の理論になる。そして、その結果として様々な概念的課題自体の意味と位置づけも当然変遷してゆく。100~200年のスパンで電気と磁気の統一理論の歴史とのアナロジーで比喩的に言うなら、弦理論は未だ Faraday と Maxwell の間の中間的な状況にあるという見方もできそうだ。

最後のページに出てくる「電磁運動量」とは、現在の言葉ではベクトルポテンシャルのことである。これは Faraday が電気と磁気の背後にあるべきより根源的な物理的自由度（直観的イメージとしては、一種の渦で、その時間変化が電場を、空間変化（回転）が磁場を与える）として“electro-ionic state”（電気活性状態）となすけていたものを数学的に具現化したものだ。Maxwell の 1865 年論文はこれに基づいて電場と磁場を統一し、その力学を具体的に定式化した。最後の項目で、弦を「電磁運動量」に擬えたのは、言うまでもなく前のページでまとめてあるように、量子化された弦から自然に重力と電磁力が得られるためである。このアナロジーからすると、まさに電磁運動量がゲージ場として定式化されたのに相当して、上で述べたような弦の本来の意味が明らかにされ、ゲージ理論と一般相対性理論の真の統一として、新たな非摂動的な弦理論の展開がそう遠くない将来どこかの段階でなされるだろうと考えるのは自然である。そのための種や鍵はおそらく予想外で意外な、もしかすると、ごく手近なところに隠れているのかも知れない。多くの人が弦理論を忘れかけている今こそ、そうした進展に向けての好機と捉えてみてはどうだろうか。

歴史に関連して私が好きな言葉の一つに、あるフランス人女流作家が残した「過去は想像力により捉えなおすなら、息吹が戻り活力になる」（英訳からの拙訳）というのがある。これは知的探求に向かう情熱や構想は想像力によって高められ、同じ想像力がその歴史や道筋を鑑賞し刺激を得るにも役立つという相乗の意味で、科学的精神にも適用できると思う。また、実際的にも量子力学への飛躍におけるド・ブロイ、ハイゼンベルク、シュレーディンガー、ディラック

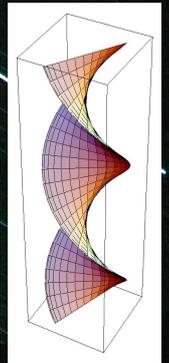
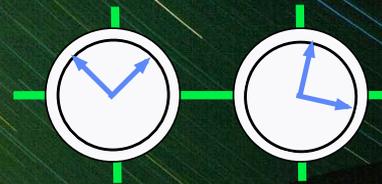
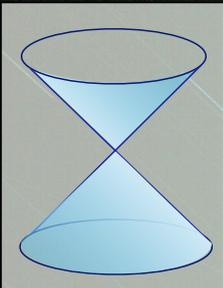
ク等の例が示しているように、過去とのアナロジーが新たな方向への研究の動機付けとして役立つことはよくある。これは個人の理解や考え方の成長と進展そのものも、その本質上（生物学的にも、昔からよく言われるように、個体発生は系統発生を繰り返す）、歴史的な発展と並行するところがあることから論理的にも不思議ではなく、むしろ当然と言えるのではなかろうか。

日本物理学会 2015 年度科学セミナー 2015/8/20
東大駒場キャンパス

米谷 民明 Tamiaki Yoneya

光と場：マックスウェルから弦理論まで

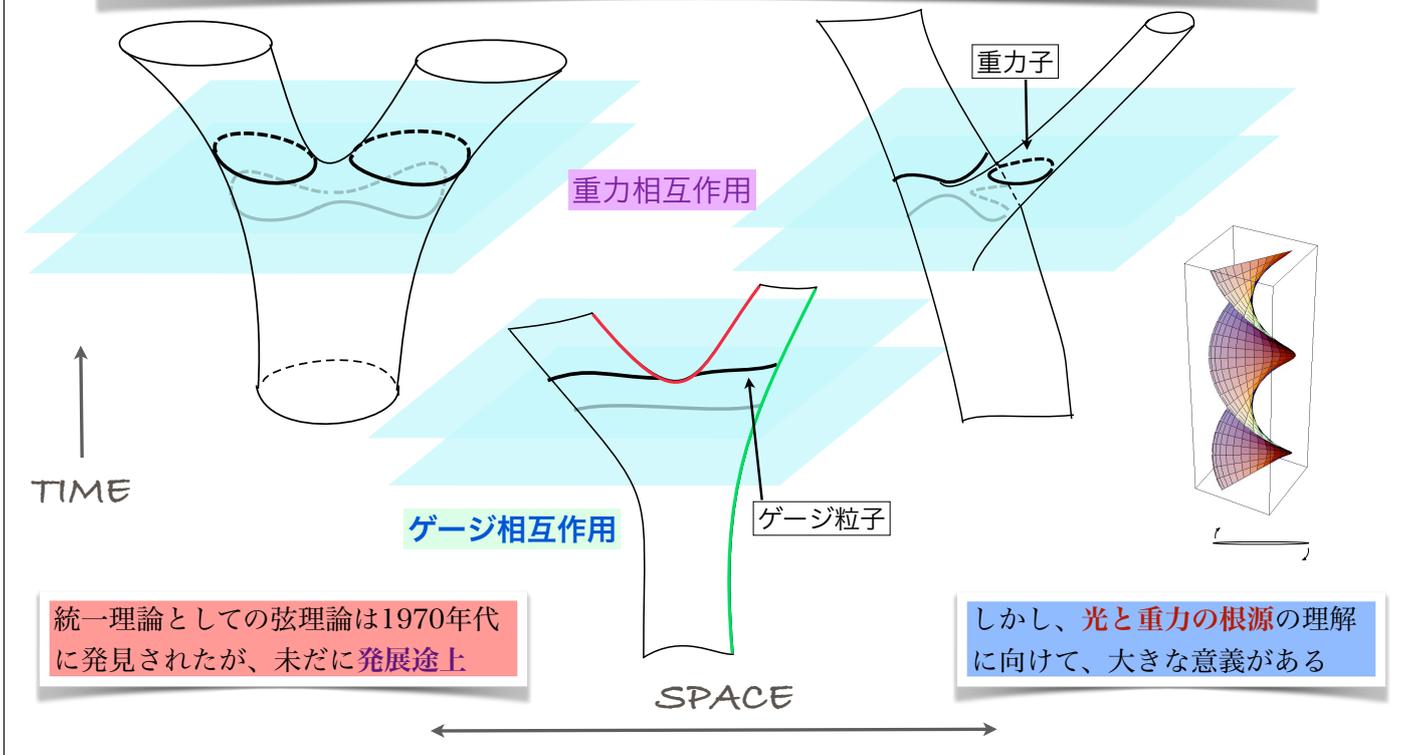
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$



- マックスウェルは何を成し遂げたか
- 光とは何か：相対論と量子力学による深まり
- 光と力はどう関係しているか：ゲージ理論
- 光と重力の根源を探る：弦理論の可能性

© Tamiaki Yoneya

(超)弦理論は統一の方向に関して全く新たな可能性を示す
弦の量子力学から一般相対性理論とゲージ理論が融合されて自然に生成される！



おわりに：まとめと補足、そして展望

- マックスウェル理論の形成：具体的な物理的イメージ or アナロジー（力線，渦）が重要な役割を果たした **電磁運動量（=電気と磁気の統一）**：電磁的「渦」の物理的自由度
- 「**電磁運動量**」のゲージ場としての真の意義：（特殊）**相対論的量子力学=場の量子論**により、初めて明らかになった。だが、それには **1世紀にも渡る時**を要した
- アインシュタインの一般相対性理論：基本相互作用を**局所的対称性の原理**に基づき定式化する道を切り開いた。古典場理論としての**ゲージ理論の最初の出発点**は、この方法のさらなる拡張を試みた数学者ワイルの仕事にある
- ゲージ理論は量子場の理論と自然に調和できるが、一般相対性理論は量子力学の構造と基本的に調和し難い構造を有する（**局所時空対称性 vs. 量子力学の状態概念の非局所性**）
- 弦理論：一般相対性理論とゲージ理論を（**量子力学の立場から**）自然に**統一する方向**を指し示す。電磁力と重力の統一に関する弦の役割には、比喩的には電気と磁気における電磁運動量と似た意味がある。その真の意味の解明には時間がかかるだろう：**今世紀の課題**