

「鉄と鋼」第100巻記念連動記事
エポックを作った人物紹介-1

鞭巖教授の高炉研究

Blast Furnace Research by Professor Iwao Muchi

八木順一郎
Jun-ichiro Yagi

東北大学
名誉教授

1 はじめに

高炉のみならず、製鉄プロセスに関する現代の研究法の確立過程を概観してみると、1960年代に名古屋大学工学部鉄鋼工学科において、鞭巖教授 (Fig.1) により始められた移動現象論に基づく高炉の解析、それに続く、一連の製鉄、製鋼プロセスの解析は、当時の鉄鋼製精錬プロセスの研究に新しい方法論を導入したものであり、更なる高度技術の開発に適用され、我が国の鉄鋼製錬技術の飛躍的な進歩に多大な貢献をなしたことが注目される。

鞭先生により製鉄プロセスの解析に導入された移動現象論的手法は化学工学の分野で発展した工学の一分野であるが、鞭先生は、従来から鉄鋼製精錬の研究者により蓄積されてきた冶金工学の知識を積極的にプロセス解析に組み込み、総合的に評価する方法として冶金反応工学を確立し、以後、この方法は製精錬プロセスの研究開発に広く利用され、研究そのものを劇的に変貌させたと言える。現在の段階で、振り返ってみると、鞭先生の先駆的研究は単にその研究成果にとどまらず、研究の手法の提示であり、この方法論の活用により膨大な研究成果が得られたことは製鉄に関する学術・技術の歴史に残る偉大な業績であると言える。

振り返ってみると、名古屋大学工学部には、当時金属学科の教授であった佐野幸吉先生のご努力により、1962年に6講座から成る鉄鋼工学科が創設され、そのうち、精錬物理化学 (坂尾教授)、溶融体精錬工学 (森教授)、特殊精錬工学 (鞭教授) の3講座が製精錬関係の講座として開設された。佐野先生は従来の冶金工学の範疇を超える基礎物理化学、反応速度論、プロセス・システム論を融合した“新しい製精錬工学”とも言えるものを描かれていたのではないかと推察される。

1960年代は日本の鉄鋼業が急激に進歩・拡大した時代 (Fig.2) であり、多くの新しい技術の開発が我が国で進められ、日本の製鉄技術が世界を牽引するまでに成長した時代で



Fig. 1. Professor Iwao Muchi

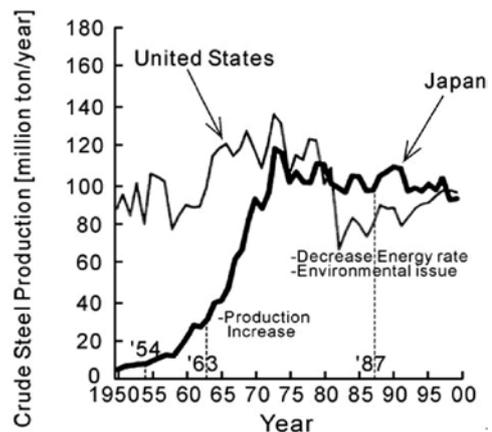


Fig. 2. Crude Steel Production in Japan and in USA from 1950 to 2000

もある。そのような時代背景の中で、鞭先生は1963年から87年にかけて、従来の冶金工学において最も欠けていたプロセスの特性評価に主眼を置いた研究を進め、学術面から日本の先進性を支えていたと言える。筆者は当時の鞭研究室で大学院の学生時代、5年間に亘り鞭先生の指導を受け、後に“鞭モデル”と呼ばれるようになった高炉の数学的モデルの開発に

参加した1人である。この経験が筆者自身の以後の研究の基礎になったことも含めて、鞭モデルの開発の時代的背景、その役割、以後の展開について私見を述べる。鞭先生の研究は工業プロセスとして多用されている固定層、移動層、流動層から製鉄プロセスまで多岐にわたり、特に、製鉄プロセス、製鋼プロセス、流動層のご研究などで顕著な成果を上げられているが、本稿においては製鉄プロセスの研究業績に限って記述させて頂いた。

2 鞭先生のご略歴

鞭巖先生は1924年(大正13年)10月24日京都府に生まれ、1948年4月東京帝国大学第一工学部石油工学科を卒業され、更に、1950年(昭和25年)3月東京大学大学院(2年)を修了されている。同年、11月東京大学工学部化学工学科助手に採用され、1954年5月名古屋工業大学助教授に任じられている。1961年11月工学博士の学位を取得され、1962年4月名古屋大学工学部化学工学科助教授に転任、翌年10月に名古屋大学工学部鉄鋼工学科教授に昇任されている。また、1983年には中国東北工学院(現東北大学)より名誉教授の称号を受けられている。名古屋大学在職中の1987年9月17日に肝癌のためご逝去された¹⁾。

大学教授には学生の教育による人材育成と研究成果による人類社会への貢献という2つの重要な職務があるが、鞭先生には、学部・大学院における学生に対する卓越した教育・研究指導により多くの有能な人材を輩出するとともに、学外においても、公共団体、学協会、産業界での活動を通して、社会の発展に多大な貢献をなされた。また、日中間の国交が1972年に回復され学術交流が開始されると、留学生が派遣されるようになり、その初期に多くの中国人留学生が鞭研から公表される研究成果に注目し、鞭先生の研究指導を受けることを望み、留学先として鞭研を選んだ。鞭先生はこれらの留学生を積極的に受け入れられたが、その中には、後に中国科学院化工冶金研究所(現:過程工程研究所)所長を務めた謝裕生教授、中国東北大学校長に任じられた赫冀成教授らも含まれていた。一方、研究業績については以下に紹介するが、単に技術の進歩に寄与するのみならず、鉄鋼製造プロセスの研究に革新的な手法を提示し、以後の研究法を一変させたことは特筆に値することである。

3 鞭先生の製鉄プロセスに関する研究概要

鞭先生は高炉を異相間の熱交換、化学反応を伴う向流移動層としてとらえ、従来の冶金工学で得られている知識の上

に、反応工学、伝熱工学、流体工学などの科学的な方法論を取り入れ、熱、物質、運動量の移動速度を考慮した数学的モデルの開発に成功し、当時はブラックボックスとされていた高炉内におけるプロセス変数の分布を推算すると同時に炉の生産性、エネルギー効率などを操業条件に対応して推算できるようにしている。この新しい科学的方法論を先生は冶金反応工学と名づけられている。

鞭先生が製鉄プロセスに関連して最初に開発された高炉の一次元数学的モデルは連立常微分方程式と総括熱物質収支で構成されており、炉内におけるプロセス変数の軸方向分布を推算するとともに高炉の生産性やエネルギー効率などの性能評価を可能にしたもので、「鞭モデル」と呼ばれ、その後の高炉モデルの開発の理論的基礎になるとともに、製鉄プロセスに関する新しい研究法を提示するものであり、以後、多くの製鉄プロセスの研究に応用されている。鞭研究室においては、まず、高炉内の主要な反応の速度論的定式化を行った後、一次元定常モデルによるプロセス変数の軸方向分布を求める静特性モデル、続いて、一次元非定常モデルによるプロセス変数の経時変化を求める動特性モデルの開発を行っている。更に、鉄鉱石とコークスの層状挿入を考慮し、装入物の半径方向分布とそれに基づくガス流れ分布の影響を評価できるモデルの開発を行っている。当時は電子計算機の演算速度が画期的に進歩した時代でもあり、その演算能力の進歩に対応して、高炉モデルも精緻化していった。これらの先駆的研究は現代の3次元非定常モデルを導き、高炉の操業改善に広く活用されている。鞭先生は、さらに、高速現象である焼結機の解析、高効率熱利用プロセスである熱風炉の解析なども幅広く進められ、製鉄プロセスの解明において、冶金反応工学が有効な方法論であることを示し、その普及に貢献されている。

4 鞭モデルの開発

1964年春、鞭先生は名古屋大学工学部鉄鋼工学科における研究活動を開始された。最初に選ばれたテーマは高炉であり、鞭先生の研究目標は高炉の反応プロセスとしての本質的な機能を解明できる方法を確認しようというもので、当時はブラックボックスと言われていたプロセスに鞭研究室の優れた解析力を応用して、温度、ガス濃度、鉄鉱石の還元率などプロセス変数の高炉内における分布を推算し、それらと生産性、エネルギー効率との関係を定量的に説明できるモデルを開発することであった。鞭研究室のスタートの時点では、反応工学の専門家であった森山昭先生(後に名工大教授)が助教授に、流動層の研究者であった間室規氏(後に一関高専教授)と数学が専門であった日比野康文氏(後に愛知学院大学

教授)が助手として着任されており、田村健二氏(後に八幡製鉄入社)と私は金属工学専攻の修士1年生、山田晴基氏(後に三菱油化入社)は化学工学専攻の修士1年生、森滋勝氏(後に名工大、名大奉職)と前川美之氏(後に三菱化成入社)は化学工学科4年生として5名の学生が鞭研究室で指導を受けることになった。鉄鋼工学科の第一期生が学部を卒業したのはその2年後である。したがって、上記の学生は他専攻、他学科に所属したままであった。指導する教官は化学工学系であり、指導を受ける学生も金属工学系と化学工学系の混成であり、化学工学的手法による製鉄高炉の解析に取り組むには好都合の環境であったと言える。

鞭研究室の高炉研究の開始時には、炉内におけるもっとも重要な現象は加熱と還元であり、これらに対応して、高炉内の温度分布を推定する数学的モデルの研究と炉内反応の反応速度の研究の2つのテーマが設定された。

数学的モデルの研究は有効熱伝導の概念を使って、シャフト部における温度分布を推算することから始められた。実炉の測定データに基づく解析の結果は半径方向に不均一な温度分布を示した。しかし、この時点では半径方向の不均一性に対して、原因を深く追求するには至らず、軸方向におけるプロセス変数の変化に着目し、一次元モデルの開発に邁進した。今考えてみると、高炉は半径方向の不均一性を巧みに利用した反応プロセスであり、これを無視した方向には進みにくいが、化学反応装置においては、通常、半径方向の不均一性を均一化するように求められていた。また、この当時、高炉の炉内計測による軸方向の温度やガス組成の分布が報告されており²⁾、炉内における装入物およびガスの軸方向における変化の過程が注目されていた。明確には言い切れないが、これらを考慮して、鞭先生が高炉の一次元モデルの開発に研究の方向を定められたように著者は記憶している。

一方、反応速度に関する研究は反応条件が大幅に変化するプロセス内で精度よく反応の進行度を推算できるようにするため、固気反応である鉄鉱石のCOガスによる還元反応にバルクガスの流れ、反応完結層内のガス拡散、化学反応を考慮した一界面未反応核モデルを適用した総括反応速度式の導出、Solution Loss 反応には物質移動の効果を考慮するため、Thiele数を用いた総括反応速度式の導出が行われた。高炉の一次元モデルに必要なその他の炉内反応の速度式についても、その後、順次導出されていった。鉄鉱石の還元反応速度に関する3界面未反応核モデルは後に新日鉄の原ら³⁾(1974年)によって開発され、以後、高炉のみならず鉄鉱石の還元を伴うプロセスのシミュレーションに多用されているが、この研究の主要な動機の一つに高炉のシミュレーションの高精度化が考えられていたことが推察される。

導出された、これらの反応速度式は一連の一次元常微分方

程式から成る高炉の数学的モデルに組み込まれ、更に、炉頂-羽口間の数値計算を行うために、羽口先理論燃焼温度や羽口レベルでのコークス温度の推算や操作変数とプロセスの性能評価を結び付ける総括熱物質収支が付帯されて、いわゆる鞭モデルが完成された。この鞭モデルは1965年秋に福岡で開催された日本金属学会秋季大会において、田村健二氏(当時修士2年)の講演により初めて公開され、1966年に最初の論文として日本金属学会誌⁴⁾に掲載された。その後、改良が加えられ、種々の操業解析も含めて日本鉄鋼協会の鉄と鋼⁵⁾、Trans. ISIJ^{6,7)}の両誌に掲載されている。

これらの研究には、当時の名古屋大学工学部の金属学科における教育には、まだ取り入れられていない方法論が多用されており、金属学科の学部教育を受けていた著者にはテーマ自体はなじみのあるものでしたが、全く新しい領域へ踏み込み、最初からやり直したような感覚であった。同級生で、著者と同様に修士論文のテーマとして鞭研の研究に参加した田村氏も同様に感じられていたと推察している。もちろん、鞭研内部におけるゼミ、研究指導はすべて研究内容に沿っていたので、かなり早い速度で進められた。当時は鞭研の初期で、学生数も少なく、鞭先生、森山先生から常に直接指導を受け、また、研究室内の化学工学系の学生との討議も、研究の推進に非常に役立ち、これらの総合的な効果が鞭モデル開発の重要な基盤になったと思われる。

5 鞭先生の高炉研究の背景および後続への効果

高炉は14世紀ころ、ドイツのライン川付近で発祥したと推定されている製鉄炉で、初期には燃料として木炭が用いられたが、1709年英国においてA.Darbyが石炭を用いることに成功し、現代高炉の原型が形成され、その後、種々の改良がなされ現在の高炉に至っており、通算すると600年以上の長い歴史を有する工業炉で、現代においては6000m³に迫る内容積(POSCOの光陽製鉄所第1高炉は2013年6月火入れ時に6000m³と報道されている)を持つ巨大な反応装置になっている。したがって、科学的研究に基づいて開発されたものではなく、長期に亘る経験の蓄積により造り出されたプロセスである。この高炉は其の名の通り100mを超える背の高い反応装置であるが、空塔であり、炉頂から鉱石とコークスが挿入され、炉下部から吹き込まれる熱風と向流接触させ、溶銑を製造するプロセスである。

20世紀になると、高炉の安定操業、生産性およびエネルギー効率改善のための炉内計測や熱量評価など科学的な研究がはじめられた。初期の測定値としてKinney(1929)⁸⁾により流速、温度、CO₂濃度分布などが報告されている。これ

らプロセス変数の分布は装入物の分布に強く影響されるが、この測定値はすでに強い半径方向分布を示していた。一方、Reihardt (1927)⁹⁾ は高炉を向流熱交換器として捉え、逐次的に生じる反応過程に対して反応温度と反応熱を明らかにすることにより、熱量と温度を座標として、必要熱量線(装入物)、供給熱量線(ガス)として表した。この熱量線図は高炉内には熱的ピンチポイントが存在することを示しており、この点により最小必要熱量が規定されることになる。この研究は高炉操業における一つの制限条件を示しており、軸方向における温度および熱容量の分布の重要性を示している。この方法に基づくより詳細な検討がRidgion (1962)¹⁰⁾、Wartmann (1963~4)¹¹⁾、によってなされている。1960年代になると、ドイツ、フランス、ロシアなどで、高炉の炉内計測や現象の定量的検討が進められ、炉内における装入物の加熱、還元に停滞が生じる熱的、化学的保存帯の存在が確認され、軸方向分布の重要性が強調されるようになっていった。Kitaev (1967)¹²⁾ は向流移動層の熱交換プロセスに基づき、高炉内において熱保存態を有する独特の温度分布を示している。Rist (1967)¹³⁾ はガスと鉄鉱石の酸化度を座標軸とした高炉の操作線による解析法を提案した。この方法は平衡論的見地から高炉の理想的な操業を解析するもので、操業予測が可能であり、高温送風や燃料吹き込みの効果予測に使用されてきた。現代においても、この方法は比較的簡単に利用しやすいと言う利点があり、操業予測などに使用されている。

これらの研究成果が普及すると、更に高度な解析のために、速度論を考慮した流動、伝熱、反応を総合的に取り込んだ解析が要求される。高炉に関する動力学的な解析はKoumpら (1964)¹⁴⁾ により最初になされているが、この報告は炉内解析に留まっており、性能評価には至っていない。鞭モデル^{6,7)} はこれらと同時代に、独立に開発されたもので、1966~70年にかけて発表された。このモデルにより、挿入原燃料の性状、送風量、送風温度、酸素富化率など操業条件の変化が炉内におけるプロセス変数の分布に及ぼす影響を通して、生産性、コークス比に及ぼす効果が推算されている。その後、鞭モデル(定常一次元モデル)を発展させた一次元非定常モデルによる吹き入れ、吹き下ろし操業の解析や操業変更によるプロセス変数の経時変化の推算などが行われた¹⁵⁻¹⁷⁾。この時点において、高炉は一面では不均一性を利用した反応装置であるためモデルの多次元化が重要なテーマとなった。特に、1970年代前半に行われた商業高炉の解体調査¹⁸⁾ は炉内における装入物の性状の軸方向における変化とともに半径方向の強い分布を捉えており、多次元解析の必要性を明確に示していた。理論的には、Radestock (1970)ら¹⁹⁾ が充填層中の通気抵抗を表わすErgunの実験式(一次元)²⁰⁾ の多次元形を提示したことが高炉モデルの多次元化を可能に

するきっかけになり、その後開発された多次元モデルにおいてもガスの流速分布の計算に利用されている。非定常化や次元の拡大はシミュレーションにおける演算負荷を急激に増大させたが、電算機の性能も当時急速に進歩しており、数値解析法の進歩と合わせて、高炉モデルの進歩を可能にしたと言える。一方、数学的モデルの信頼性は炉内現象をいかに忠実に考慮しているかにかかっており、モデルによる推算値を確認する必要がある。したがって、高炉モデルの出現は炉内現象をより正確に知るため、多次元的に調査する解体調査へ導く一つの契機を与えたともいえる。

連続体モデルである高炉の多次元定常および非定常モデルの開発、実操業への適用は主として日本において進められ、新日鉄(杉山ら)²¹⁾、住友金属(高谷ら)²²⁾、東北大(八木ら)²³⁾らの研究により、基本的な構成は完成されたと言える。これらのモデルはいずれも鞭モデルに基づいており、次元の拡張、並びに、反応、伝熱、相変化、流動などの表現に改良がなされたものであると言える。更に近年においてはProf. Yuら²⁴⁾による装入物の層状構造や融着帯の通気特性に改良を加えたシミュレーション、Prof. Castro²⁵⁾らによる木炭高炉や微粉木炭の吹き込み操業の解析などモデルの展開のみならず、新しい操業の評価などに活用されており、鞭モデルにより始められた高炉の解析は世界各国に普及していったといえる。連続体モデルは固体の降下運動を精密に表現できないと言う欠点があり、これを克服するために、近年、DEM(離散要素法)を導入する努力がなされており²⁶⁾近い将来、CFD(数値流体力学)モデルとの組み合わせにより、さらに進歩したモデルへの発展が期待されている。

以上のように高炉の数学的モデルはプロセスの高効率化のために有効な研究手段であるが、他方において、研究者自身はモデルを通じて、プロセス内における現象がどのように性能に影響しているのかを知ることができるので、研究テーマを明確にできるという特性も持っている。これは、数学的モデルの研究が研究者の育成にも有効であることを意味している。鞭先生は製鉄プロセスに関するご自身の研究成果を中心に「冶金反応工学」、関連する問題の解析法を示した「製錬化学工学演習」、並びに、学生への数学的方法の講義を中心にまとめられた「冶金実用数学」の3冊の著書を出版されており、いずれも学生にとっても、研究者にとっても有益な著作である。その神髄はプロセスを総合的に理解することにより、個々の現象の総合的な結びつきの結果として性能評価を行うことであり、そこから改善のための支配的要因を正確に認識し、プロセスの改善あるいは新しいプロセスの開発に結び付けることであることを教えている。

6 おわりに

1950年代後半から70年代の前半にかけて日本の鉄鋼業は高度成長を遂げ、生産における質・量ともに世界一の座に就いた。また、欧米の技術を取り入れた新鋭の製鉄所に、新しい独自技術の開発を積み重ね、世界一の技術力を持つまでに成長した。このような時代に鞭先生はご自身が提唱された冶金反応工学を駆使し、日本の製鉄技術の展開に学術的な面から計り知れないほどの貢献をなされた。

御在職中に早逝された鞭先生の残された業績をたたえ、後継者である浅井滋生先生(名古屋大学名誉教授)が主催され2001年6月にMaterial Processing Symposium (Muchi and Szekely Memorial Symposium)が開催された。これは浅井教授の若き日の留学先であったSzekely先生が鞭先生とほぼ同時代に同様の偉大な研究業績を残され、1995年に61歳で御他界されていたので、Szekely門下のJ.W.Evans(カリフォルニア大学教授)、H.Y.Sohn(ユタ大学教授)らを招き、Muchi門下の謝教授、赫教授らも参加して、当時の尖端的な研究と両先生の業績とのつながりなどについて議論がなされており、その内容はProceedings²⁷⁾にまとめられている。

本稿においては、鞭先生が行われた製鉄プロセス研究の最初の成果であり、後に鞭モデルと呼ばれた高炉の数学的モデルの開発を中心にして、その背景、以後の高炉研究に与えた影響について著者の私見を述べた。しかし、著者が鞭先生から直接指導を受けたのは初期の5年間に限られており、20数年に亘る鞭先生の幅広い製鉄プロセスの研究教育全般については著者が対応できる範囲を超えているので、本稿には含まれていないことを最後に付記する。

参考文献

- 1) 鞭先生を偲ぶ会：鞭巖先生追悼文集“鞭先生の思い出”，1988年9月10日。
- 2) K.Shurmann, W.Zischkat, P.Ischebeck and G.Heynert : Stahl und Eisen, 80 (1960) , 13, 854.
- 3) 原行明, 土屋勝, 近藤真一：鉄と鋼, 60 (1974) , 9, 1261.
- 4) 鞭巖, 森山昭, 田村健二, 八木順一郎：日本金属学会誌, 30 (1966) , 9, 826 ; 12, 1109 ; 12, 1115 ; 31 (1967) , 2, 97.
- 5) 八木順一郎, 佐々木恵一, 鞭巖：鉄と鋼, 54 (1968) , 9, 1019.
- 6) I.Muchi : Trans. ISIJ, 7 (1967) , 223.
- 7) J.Yagi and I.Muchi : Trans. ISIJ, 10 (1970) , 5, 392.
- 8) S.P.Kinney : Technical Paper, US Bureau of Mines, Nr. 442, 148.
- 9) P.Reichart : Arch. Eisenhüttenwes., 1 (1927) , 2, 77.
- 10) J.M.Ridgion : Journal of The Iron and Steel Institute, 200 (1962) , May, 389.
- 11) R.Wartmann : Arch. Eisenhüttenwes., Teil 1, 34 (1963) , 879 ; Teil 2, 35 (1964) , 15 ; Teil 3 159, and Teil 4, 173.
- 12) B.I.Kitaev, Yu.G.Yaroshenko and V.D.Suchkov : Heat Exchange in Shaft Furnace (Translated from Russian by M.M.Page and H.Simons) , ed. by P.A.Young, 1967, Pergamon Press, Oxford.
- 13) A.Rist and N.Meysson : Journal of Metals, 19 (1967) , April, 50.
- 14) V.Koump, R.H.Tien, R.G.Olsson and T.F.Perzak : Mathematical Simulation of the Blast Furnace in “Process Simulation and Control in Iron and Steelmaking”, ed. by J.M.Uys and H.L.Bishop, (1964) , 125, Gordon and Breach Science Publisher, London.
- 15) C.J.Fielden and B.I.Wood : Journal of The Iron and Steel Institute, 206 (1968) , July, 650.
- 16) 羽田野道春, 栗田興一, 山岡秀行, 横井毅：鉄と鋼, 68 (1982) , 15, 2369 ; 2377.
- 17) 田口整司, 久保秀穂, 樋谷暢男, 一藤和夫, 岡部侠児：鉄と鋼, 68 (1982) , 15, 2303.
- 18) K.Kanbara, T.Hagiwara, A.Shigemi, S.Kondo, Y.Kanayama, K.Wakabayashi and N.Hiramoto : Trans. ISIJ, 17 (1977) , 7, 371.
- 19) J.Radestock and R.Jeschar : Stahl und Eisen, 90 (1970) , 22, 1249.
- 20) S.Ergun : Chemical Process Engineering, 48 (1952) , 89.
- 21) 杉山喬, 林洋一, 須賀田正泰, 芝池秀治, 鈴木信邦：材料とプロセス, 1 (1988) , 22.
- 22) K.Takatani, T.Inada and Y.Ujisawa : ISIJ Int., 39 (1999) , 1, 15.
- 23) J.A.Castro, H.Nogami and J.Yagi : ISIJ Int., 42 (2002) , 1, 44.
- 24) X.F.Dong, A.B.Yu, S.J.Chew and P.Zulli : Metallurgical and Materials Transactions B, 41B (2010) , 2, 330.
- 25) J.A.Castro, A.J.Silva, Y.Sasaki and J.Yagi : ISIJ Int., 51 (2011) , 5, 748.
- 26) S.Ueda, S.Natsui, H.Nogami, J.Yagi and T.Ariyama : ISIJ Int., 50 (2010) , 7, 914.
- 27) Proceedings of Materials Processing Symposium edited by S.Asai, Nagoya Univ., June, (2001)

(2013年10月3日受付)