解 説

スマートコンポジット—I. ——スマートコンポジット概説——

福 田 武 人*

1. は じ め に

スマート (smart) 化あるいはインテリジェント (intelligent) 化という言葉は、繊維強化複合材料 (以下コンポジットと呼ぶ) の研究・開発に携わるわれわれの間で、今日では、ある程度定着し始めていると思われるが、現実にはようやく「真のスマート化とは何か?」という問い直しがなされている、いわば第2ステージに入った時期と言うべきであろう。筆者が、コンポジットのスマート化の研究に取り組み始めたきっかけは、B. Hofer が1987年の「Composites」Vol. 18, No. 4に書いた論文「Fibre Optic Damage Detection in Composite Structures」¹⁾を読んだことにある。この論文には、図1に示す光ファイバによる損傷検出の原理がまず説明してあった。成形時に埋め込まれた光ファイバが破断することによる光の導通の有無でコンポジットの損傷を判定するというまさに画期的な手法で、極めて分かり易く、簡便であった。これこそ、コンポジットの面白い損傷検出方法と思い、研究室でも実際に試すことが出来ると考えたが、今後この研究を発展させ実用化を目指していくためには産業界の人たちと研究を進めていくのが必須ではないかと判断し、石川島播磨重工業(株)の犬竹紀弘氏に協力を御願いし、共同研究を始め今日に至っている。この間同社の若い研究者、北出真太郎氏とともにFRP特有の層間にはく離やトランスバースクラックなどの検出への光ファイバの応用に関する研究を進めてきた^{2,3)}。しかし、正直なところ、当初は、この分野が今日あるようにこれほどまでに進展し、また間口が広く、かつ奥深いものとは想像もしていなかった。事実、現在、わが国でも欧米型のスマート材料/構造システムの研究開発に対する関心が高まりつつあり、通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度のもと平成7年度

から先導研究「知的構造システムの研究開発」が始まっている。

さて、この度、日本複合材料学会誌編集委員長の谷本敏夫湘南工科大学教授より立案及び執筆の依頼があったので、解説「スマートコンポジット」を6回連続で掲載する計画を立て、その初回を担当することになった。そこで、本稿では、まず、スマートコンポジットのコンセプトを説明し、どのような目的で現在どのような方向でどこまで研究開発がなされているのか、また真のスマート化とはについて記述することにしたい。このあと、第2回：スマートコンポジットの最近の研究動向(高橋淳)、第3回：スマート化のためのセンサ材料・技術(1)センサ技術全般(武田展雄)、(2)ヘルスマニタリング(北出真太郎)、第4回：スマート化のためのアクチュエータ材料・技術(1)圧電素子(谷本敏夫)、(2)形状記憶合金(古屋泰文)、(3)ER流体(福田武人)、第5回：スマートコンポジット応用技術(1)航空・宇宙関連(山口泰弘)、第6回：スマートコンポジット応用技術(2)土木・建築関連(杉田 稔)(いずれも仮題、執筆者敬称略)の順に執筆される予定である。

2. スマートコンポジットの定義

2.1 スマートとインテリジェント

スマート, smart は英語の辞書によると、利口な、機転がきくなどの意味があり、米国やヨーロッパではこの言葉の方がよく使われているようだ。一方、日本を中心として10年以上前から、インテリジェントマテリアル (intelligent materials) のプロジェクト研究(後述する)が精力的になされている。このプロジェクトのリーダーでもある(株)イオン工学研究所所長の高木俊宜先生は、intelligent と smart の違いは、アプローチの相違によるもので、前者が材料の原点に立った基礎的なアプローチによるのに対して (いわば, scientific), 後者は工学的、実用的な面がある (technological) と述べ

* Takehito FUKUDA: 大阪市立大学工学部 (558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

図1 光ファイバによる損傷検出の原理

ている⁴⁾。因みに、adaptiveという言葉も航空・宇宙構造物の状態や形状の制御の分野では使われている(functional)⁵⁾。いずれにしても、材料/構造の知能化を図ることにほかならない。参考までに、この分野で現在いずれも米国のジャーナルとして、*Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (Chief-in-Editor: C.A. Rogers; 1990年より Technomic 社出版) と *Smart Materials & Structures* (Editors-in-Chief: R.O. Claus, G.G. Knowles, V.K. Varadan; 1992年より IOP 社出版) が刊行されている。

2.2 スマート化のコンセプト

材料/構造のスマート化とは、生物が有している自己増殖性、自己修復性、自己診断性、自己学習性、あるいは環境適合性などを、材料/構造(ホスト)に取り入れることと言われている²⁾。すなわち、これまでの材料/構造の研究・開発が物性/機能を主体になされてきたのに加えて、情報と制御の概念を導入し融合したいわば材料システムと捉える新しい研究が今まさに展開し始めた

図2 材料と情報・制御の融合

図3 スマートコンポジットのコンセプト

といえる(図2参照)。したがって、ホスト材料/構造をコンポジットとして、スマートコンポジットを構築するのに必要なものは、図3に示すように、第一の要素に、環境を検出するセンサ(光ファイバ、piezoelectric素子など)、第二の要素に、変化に適応するためのアクチュエータ(piezoelectric素子、形状記憶合金、ER流体など)そして、もっとも重要な要素はこれらを制御し、最適な応答を考える第三の要素、すなわち、プロセッサ(マイクロコンピュータ)である。これらの3要素は、人間では、それぞれ五感、種々の筋肉そして脳に対応する。

2.3 スマートコンポジットとは

コンポジットはいわばかしこい材料と言える。すなわち、比強度、比剛性、耐食性に優れている上に、減衰性などの機能がすぐれている。そして、最も特徴的な性質は、強度や弾性率の異方性を積極的に利用して、使用目的に合わせて設計し得る点である(例えば、空力弾性テラリングや負のポアソン比)。このようにもともと賢いコンポジットをよりスマートにする研究が、今、米国、日本、ヨーロッパを中心にして盛んであるスマートコンポジット、smart composites and structuresの研究である。ここで言うところのスマートコンポジットとは、狭義の意味ではセンサ、アクチュエータ機能を有するコンポジット構造体を指しており、広義の意味ではスマート構造そのものを指すとも解釈される。現在のところ、ホスト構造にセンサ/アクチュエータ/制御器を一体

融合化した知的構造システムを実現するためにキーとなる材料/構造として、設計できる唯一の材料として開発、発展してきたコンポジットシステムへの期待は大きいものがある⁶⁾。

スマート化の対象は、コンポジットのみならず、他のセラミック系や金属系材料、そして宇宙・航空や土木・建築構造やシステムであるが、コンポジットが素材から構造体への一体成形過程に特徴があること、また宇宙・航空構造への利用に利点が多いことなどの理由から最も関心が集められている。特に光ファイバセンサなどのセンサ材料やセラミックピエゾ素子、形状記憶合金、ER流体などのアクチュエータ材料を埋め込む、貼り付けるあるいは封入するなどして一体化したスマートコンポジットの構築に関する研究が盛んである。しかしながら、この一体化技術、さらには制御技術などの導入には種々の課題を抱えている⁷⁾。

2.4 日本型と欧米型の研究

スマート構造の要素技術となるインテリジェント材料(前述)という概念は、日本が独自に生み出した(科学技術庁、航空・電子技術審議会諮問第13号に対する答申；主査高木俊宜：1989年)もので、材料自身にセンサ機能、アクチュエータ機能および制御機能を盛り込もうとするもので、原子・分子レベルでの微構造制御による知的材料の創製に関する基礎的研究に重点が置かれている。これに対して欧米のスマート化の研究開発は、材料自身よりも材料/構造(材料：要素技術レベル、構造：システムレベル)として捉えられており、研究開発にはプラクティカルな目標設定がなされていることを特徴としている⁸⁾。

3. センシングとアクチュエーション⁹⁾

前述したようにスマート化のためにはセンシングとア

クチュエーションが重要になる。これらの詳しい解説は、次回以降の解説でなされるのでここでは簡単に述べることにしたい。

3.1 センサ候補材料

表1にひずみ測定のためのセンサ候補材料を示している。これらのセンサは異なった特徴を持っている。例えば、セラミックピエゾ素子やひずみゲージセンサは、局所的な変形情報を提供するが、光ファイバやSMAセンサは構造内の2つの離れた領域の間の変形場の全体あるいは平均的な大きな変形を測定できる。したがって、スマート構造を構築するときには、各候補材料の特徴を注意深く評価しなければならない。

3.2 アクチュエータ候補材料

アクチュエータ材料は、スマートコンポジットのいくつかの重要な基本要素の一つである。これらのアクチュエータ材料は、構造物のグローバルな機械的性質を動的に調整するため、あるいは構造物の形状を環境に調和させて設計するために用いられる。このようなアクチュエータ材料の候補とその特徴を表2にまとめてある。

3.3 センサリアクチュエータ (sensoriactuator)

表3に示されるいくつかの材料やデバイスは、アクチュエータあるいはセンサとして使用されるが、使用方法を工夫することによって、材料の双方向性を利用して稼動中にセンサあるいはアクチュエータとして、もしくは両方に同一材料を用いること(センサリアクチュエータ)によって、コンパクトなスマート材料やスマート構造への応用が可能になる。今後は、コントローラ・チップを組み込み、コントローラ機能をも有する完全なスマートコンポジットを創製する研究が行われるようになるであろう¹⁰⁾。

3.4 ハイブリッドスマート化

材料/構造のスマート化の共通概念は一体化と多機能

表1 ひずみセンサ候補材料

特 性	センサ材料			
	干渉型光ファイバ	TiNi 形状記憶合金	ピエゾセラミックス	ひずみゲージ
価格	普通	低	普通	低
技術完成度	良	良	良	良
ネットワーク化	可能	可能	可能	可能
埋め込み性	優	優	優	良
線形性	良	良	良	良
応答周波数 (Hz)	1-10000	1-10000	1-20000	1-500000
ひずみ感度 (10^{-6})	0.11/fiber	0.1-1.0	0.001-0.01	2
最大ひずみ (10^{-6})	3000	5000	550	10000
最高温度 (°C)	300	300	200	300

表2 アクチュエータ候補材料

特 性	アクチュエータ材料				
	電歪材料	ER 流体	磁歪材料	TiNi 形状記憶合金	piezoセラミックス
価格	普通	普通	普通	低	普通
技術完成度	可	可	可	良	良
ネットワーク化	可能	可能	可能	可能	可能
埋め込み性	良	可	良	優	優
線形性	可	可	良	良	良
応答周波数 (Hz)	1-20000	1-12000	1-20000	0-5	1-20000
最大ひずみ (10^{-6})	200	—	200	5000	200
最高温度 (°C)	300	300	400	300	300

表3 センサ/アクチュエータ候補材料

材料の種類	アクチュエータ	センサ
音響デバイス		○
キャパシティブデバイス		○
ER 流体	○	
電歪材料	○	
光ファイバデバイス		○
磁歪材料	○	○
圧電材料	○	○
形状記憶合金	○	○
ひずみゲージ		○
X線デバイス		○

化にある。これらの実現にはハイブリッドスマート化が有効と思われる。これは複数のアクチュエータを用いてそれぞれの特徴を有効に活用しようとするものである。たとえば、コンポジット構造の振動制御にアクチュエータとしてpiezo素子とER流体とをハイブリッドにして一体化を図る¹¹⁾。これは、低周波領域において効果の大きいER流体と高周波領域に効果を発揮するpiezo素子の特性を引き出しこの結果、コンパクトでかつ広い範囲の高性能な仕様を満足させるスマートコンポジットを実現できる。

4. スマート化のテーマ

材料/構造のスマート化のテーマは、多岐に亘るためすべてを記述することはできないので、直近の第1回スマート材料及び構造に関する日米ワークショップ(First US-JAPAN Workshop on Smart Materials and Structures; 1995年12月4日, 5日, 於ワシントン大学)よりピックアップしてみる。本国際ワークショップは、米国側NSFと日本側新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の共催のもとに計画され、前述の先導研究の一環として開催された。目的は、新機能性材料の創

製・合目的改質技術、知的構造体成形化技術および知的構造システム・融合化技術等の知的構造システム関連分野における研究開発課題の明確化さらに国際研究協力の可能性を模索することである。発表内容をテーマ別に筆者なりに分類してみると、総論、センシング・ヘルスモニタリング、アクチュエータ材料、振動・騒音・形状の制御、各種材料特性などになる。とくに、センシング・ヘルスモニタリングと振動・騒音・形状の制御関連は材料/構造のスマート化の大きな柱と今では考えられている。そこで以下にこの2つのテーマについて若干述べる。

4.1 ヘルスモニタリングの概念

T.G. Gerardiによると、航空機のヘルスモニタリングに関する研究は、1988年4月28日に起こったアロハ航空のBoeing737の事故をきっかけに、急速に進展したという。すなわち、航空機構造の健全性を評価するために新しいかつ画期的なアイデアを取り入れる必要があることが指摘された。この場合の有望なアプローチの方法は、センサを用いたヘルスモニタリングという概念の導入である。この考えは、画期的なセンサの活用、AI(人工知能)の導入ならびにリアルタイムで連続的な航空機構造の健全性の評価をするための最先端の解析技術を駆使することにより裏付けられるものである。図4はこの分野の紹介に頻繁に引用されるGerardiが示した有名な未来のスマート航空機である¹²⁾。つまり、航空機に人間と同じような神経と知能を持たせたいみを感じるようにさせようというわけである。このヘルスモニタリングの概念は、航空機に限らず原子炉や宇宙構造物、さらには、ダムや橋などの土木構造物などいわゆる極限環境下におかれた機械や構造物に共通した必須の機能といえる。換言すれば、莫大な労力とコストをかけて定期的に保守検査が必要な大型構造物こそ、スマート化により大きなメリットが得られるといえる¹³⁾。

図 4 スマート航空機

表 4 センサ材料・アクチュエータ材料とコンポジットの成形温度

先端コンポジット	成形温度 (°C)	センサ材料・アクチュエータ材料		
		光ファイバ	piezoceramics	形状記憶合金
グラファイト/エポキシ	120- 180	○	○	○
グラファイト/ポリイミド	290- 340	○	○	○
グラファイト/PEEK	320- 430		○	○
金属マトリックス複合材料	540-1100			○

4.2 振動制御

スマート化に関連した開発技術の中では最も進展しているのは構造物のアクティブ振動制御である。テーマとしては、振動制御（疲労の低減）等構造の適応性向上による長寿命化、荷重位置の最適化（安定性）、表面形状の制御（流体力学的流れ）、振動制御（騒音低減）等による構造・運動性能の向上、エネルギー消費の高効率化である¹⁴⁾。将来の大型宇宙構造物の設計では、展開と収納機構、形状可変などの機能だけでなく、さらに固有振動数、剛性、減衰などの構造特性の制御、構造物としての対応力、適応性（adaptability）を高めることが期待されている¹⁵⁾。

5. スマート化のいくつかの課題

センサ材料とアクチュエータ材料を埋め込むというような型のコンポジットのスマート化の研究が始まって約10年経過した今日、真のスマート化とは何か？が問われている。ここでは、この点を念頭にまず、ホスト材料とセンサ材料・アクチュエータ材料との熱処理の問題、また異なる発想のスマート構造そして真のスマート化を実現するためにクリアしなければならない課題を述べる。

5.1 センサ材料・アクチュエータ材料とコンポジットの成形温度¹⁶⁾

スマート構造の設計者は、使用するアクチュエータとセンサの成形熱処理パラメータを評価しなければならない。すなわち、コンポジットのマトリックスが、熱硬化性プラスチック、熱可塑性プラスチックあるいは金属であるのかによって成形における基準パラメータはおのずから異なるからである。表4は、代表的な先端コンポジットの成形温度を整理したもので、光ファイバ、piezoceramicsおよび形状記憶合金が永久に損傷を受けないで耐え得る熱環境と対比して示している。熱硬化性複合材料は、スマート構造への応用に際して現時点で最も大きい自由度をスマート構造設計者に与える。何故なら、120°Cから180°Cの間の低硬化温度と0.3 MPa～1.4 MPaという低成形圧力で成形できるからである。普通に入手できるアクチュエータとセンサの大部分は、此の種の構造には容易に埋め込まれる。ただし、piezoceramics高分子フィルムは、熱的には約80°C以下に限定されるから使用できない。また、室温で硬化するある種のエポキシ樹脂も不可である。また、Graphite/PEEKへの光ファイバの埋め込みもまた不可であるが、piezoceramicsや形状記憶合金なら可能である。Graphite/Alへ

は形状記憶合金は可能である。

5.2 自己診断機能を有する CFGFRP 補強コンクリート

コンクリート構造物の耐久性向上と高い機能性をもたせることを目的として開発された高強度連続繊維である炭素繊維とガラス繊維とでハイブリッドされたコンクリート補強材が「構造材」と同時に優れた「賢材」の機能をもっていることである。すなわち、伸び限界の小さい炭素繊維が破断すると、剛性は小さいが伸び限界の大きいガラス繊維の材料特性に依存してガラス繊維の限界伸びにて破断する挙動を示す。このとき、あえてセンサを組み込まなく、手間暇をかけずに、電気を通す性質を持っている炭素繊維が破断するとその電気抵抗値を計測することによりもうそろそろ破断するという情報を得るといふインテリジェント機能が備わっている¹⁷⁾。真のスマート化とは何かを考えさせられる手法として注目されよう。

5.3 解決しなければならない重要な課題

前述の第1回スマート材料及び構造に関する日米ワークショップの最後に総合討論としてこれから解決しなければならない重要な課題がいくつか会場から提起されたのでこれからいくつかを箇条書きにする。

- (1) How to transfer technical invention from labs to industries
研究室から産業への移行の方法
- (2) Where should we invest a limited R & D money?
限られた研究開発経費をどこへ投資するのか?
- (3) What is the benefit of solid state actuators?
固体アクチュエータの有用なメリットは何か?
- (4) Where will we be after five years?
5年後、われわれはどこにいるのか?
- (5) Any smart materials available at high temperatures? (above 1000°C)
高温(1000°C以上)で使えるスマート材料は?
- (6) How to relate microstructural behavior to macroscopic behavior experimentally?
微視的挙動を実験的に巨視的挙動に関係付ける方法はあるか?
- (7) The most important factor is cost effective?
最も重要な因子はコスト効果? (民事はもちろん軍事関連においても)
- (8) Educate young researchers to create better ideas?
若い研究者にもっと創造力を持たせるよう教育する

には?

- (9) Why are smart materials and structures needed?
スマート材料・構造は何故必要か?
- (10) What is the benefit from smart materials/structures?
スマート材料・構造から得られる恩恵は何か?

6. おわりに

スマートコンポジットの研究が、花開き実を結ぶのは21世紀であろう。事実、M.V. Gandhi らは、著書“*Smart Materials and Structures*”¹⁸⁾の冒頭で、21世紀には“スマート材料”時代が到来すると预言している。理由は、人類の文明は、石器時代、青銅器時代、鉄器時代というふうに、その時代に発見されたり、発明されたりし、際立って利用された材料に大いに影響を受けている。プラスチックやコンポジットに代表される人類が作った“合成材料”は、まさに現代社会において、その役割を演じており、神経系、脳そして筋肉の働きを持たせた材料、スマート材料を創製するためのいくつかの複合した新しい技術開発を達成するに十分な先駆的役割をすでに果たしているからである。

最後に冒頭に書いたように、筆者は *Composites* (1987) の B. Hofer の論文に刺激されコンポジットのスマート化に取り組んだわけであるが、この文献は、京都工芸繊維大学の自念栄一教授がある研究会で紹介された際に初めて知った。また、前後して、同志社大学工学部の三木光範教授(当時大阪府立大学工学部)からは材料と情報・制御の概念の融合についての知識の提供と討論を折に触れしていただいた。両氏とのこのような出会いがなければ著者が、今日、コンポジットのスマート化に取り組んでいたかどうか分からない。この場をお借りして深く感謝の意を表したい。さらに、現在進行中の先導研究「知的構造システムの研究開発」を進めるにあたり日頃何かとご配慮いただいている(財)次世代金属・複合材料研究開発協会の坂本 昭総括部長に御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) B. Hofer: *Composites*, **18** (1987), 309-316.
- 2) 福田武人, 逢坂勝彦, 北出真太郎: 材料, **42** (1993), 54-59.
- 3) S. Kitade & T. Fukuda: Proc. of COMP '95 (1995), pp. 477-481.
- 4) 高木俊宜: 第20回FRPシンポジウム講演論文集

- (特別講演) (1991).
- 5) B.K. Wada, J.L. Fanson & E.F. Crawley: *J. Intel. Mater. Sys. & Struct.*, **1**, 2 (1990), 157-174.
 - 6) 平野一美: 財次世代金属・複合材料研究開発協会, スマートコンポジットに関する調査, NEDO 平成 6 年度調査報告書 NEDO-IT-93001 (1995), p. 10.
 - 7) 福田武人: 財次世代金属・複合材料研究開発協会, スマートコンポジットシステム講演論文集 (1994), pp. 65-72.
 - 8) 江川幸一: 機械の研究, **44** (1992), 793-799.
 - 9) M.V. Gandhi & B.S. Thompson: *Smart Materials and Structures*, Chapman & Hall, London (1992), pp. 73-83.
 - 10) 谷 順二: 財次世代金属・複合材料研究開発協会, スマートコンポジットに関する調査, NEDO 平成 6 年度調査報告書 NEDO-IT-93001 (1995), p. 75.
 - 11) T. Fukuda & N. Oshima: Abstracts of First US-JAPAN Workshop on Smart Materials and Structures (1995), pp. 86-87.
 - 12) T.G. Gerardi: *J. Intel. Mater. Sys. & Struct.*, **1**, July (1990), 375.
 - 13) 非破壊検査協会: 新版非破壊検査便覧 (1992), p. 626.
 - 14) 平野一美: 財次世代金属・複合材料研究開発協会, スマートコンポジットに関する調査, NEDO 平成 6 年度調査報告書 NEDO-IT-93001 (1995), p. 8.
 - 15) 松崎雄嗣: 財次世代金属・複合材料研究開発協会, スマートコンポジットに関する調査, NEDO 平成 6 年度調査報告書 NEDO-IT-93001 (1995), p. 15.
 - 16) M.V. Gandhi & B.S. Thompson: *Smart Materials and Structures*, Chapman & Hall, London (1992), p. 86.
 - 17) 柳田博明: 次世代素材「インテリジェントマテリアル」, 講談社, 東京 (1993), pp. 88-96.
 - 18) M.V. Gandhi & B.S. Thompson: *Smart Materials and Structures*, Chapman & Hall, London (1992), p. 1.

解 説

C/C 複合材料の最近の研究動向

香山 晃*, 芹澤 久**, 佐東 信司***

1. はじめに

炭素繊維によって強化された黒鉛基複合材料 (以下, C/C 複合材料と略記) はセラミックス基複合材料の代表的なものとして, 長い開発研究の歴史を有している。最近では, 高温環境下での優れた高比剛性・高比強度から航空・宇宙用材料として, また優れた低誘導放射化特性を併せ持つことから将来の核融合炉用材料として期待されている。特に前者においては宇宙往還機や超音速旅客機の高熱負荷耐性材料としての研究が盛んであり, 炭素繊維の特性改善や複合材料製造プロセスの高度化なども加わって材料開発における著しい進展が見られている。

それらの研究は, まず第一に, 黒鉛材料が有する高弾

性, 低熱膨張係数, 高熱伝導性を十分に発揮するような炭素繊維の開発, およびその炭素繊維の特性を生かした C/C 複合材料の開発である。そして第二に, 炭素繊維が持つ黒鉛材料のもう一つの特徴である大きな異方性を, C/C 複合材料において制御することである。航空・宇宙用材料としては高温時の耐酸化特性の向上が重要課題であり, この為の耐酸化性被覆の検討などが鋭意進められている。一方, 核融合炉材料としては耐高熱負荷特性や真空特性の向上等を目指した表面改質や表面被覆の検討なども進められている。

現在の C/C 複合材料の製造ではフェノール樹脂や液晶ピッチなどを焼成するプロセスが主流であり, 炭素繊維の製造においても溶融紡糸やそれに続く焼成処理等が用いられており, 炭素繊維の特性や C/C 複合材料の特性に及ぼす最終焼成温度 (Heat Treatment Temperature; 以下 HTT と略記) の影響が重要であることが知られている。ここでは, C/C 複合材料の機械的特性におよぼす HTT の影響について, 微細構造の変化との関係も含めた最近の研究動向についても概要を述べる。

* Akira KOHYAMA: 京都大学エネルギー理工学研究 所 (611 宇治市五ヶ庄)

** Hisashi SERIZAWA: 東京大学大学院工学系研究科大 学院生 (113 東京都文京区本郷 7-3-1)

*** Shinji SATO: 東京大学大学院工学系研究科 (113 東京都文京区本郷 7-3-1)