炭素材料のなかのナノカーボン

稲垣道夫*

(平成14年7月12日受理, 平成14年7月17日採択)

Nanocarbons in Carbon Materials

Michio Inagaki*

Development of carbon materials was divided into three periods ; down to 1960 classic carbons were mostly studied and produced, in 1960-1985 various new carbon materials were developed and from 1985 to now fullerenes and carbon nanotubes attracted attentions. Features of each period were discussed. Different classifications of carbon materials, such as graphitizing and non-graphitizing carbons, classic and new carbons, etc., were also summarized. Based on these discussions, it was proposed that a novel classification of carbon materials, that is, nanocarbons, has to consist of not only nano-sized materials, such as fullerenes and carbon nanotubes, but also nano-structured materials, such as well-controlled porous carbons and boron-doped carbons.

KEYWORDS : *Classic carbons, New carbons, Nano-sized, Nano-structured*

1. はじめに

1985年11月に炭素原子60個からなるクラスターの生成とその構造が報告されて以来, 炭素材料の動きはまことに目まぐるしく, いろいろな意味で時代が変わったといっても過言ではない。炭素材料にとっての変革期は, それ以前にも何回かあったであろう。ガラス状カーボン, 熱分解炭素そして炭素繊維 (PAN系) の開発がなされた1960年代始めが, それに当たると考えられる。そこで, ここでは1960年以前を第I期, 1960年から1985年までを第II期, そして1985年以降を第III期と呼ぶこととした。Table 1にそれぞれの期間に開発された炭素材料とその期間の特記すべき事項を簡潔にまとめた。

この分類によれば, 現在は第III期にあって最も変動の激しい時期に感じられる。炭素材料の新しい, そして目覚ましい展開を我々は身をもって感じている。このような動きの中で, “ナノカーボン” という言葉が生まれ, 使われるようになった。しかし, その“ナノカーボン”が, どのような炭素材料を指しているのか, 明確な定義がなされて使われているわけではない。

この言葉は, 信州大学の遠藤守信教授が, 日本学術振興会の未来開拓学術研究事業に「先進エネルギーデバイス用ナノカーボンの基礎科学と応用」を申請したときに始まったとの説がある。このプロジェクトは1999年に採択され, 現在進行していることから, ナノカーボンという言葉も認知されたと受け止められている。そして, 2001年11月には, 長野市でInter-

Table 1 Carbon periods.

Period	Years	Carbon materials developed	Remarks
I	~ 1960	Artificial graphite blocks Activated carbons Carbon blacks	Mass production Sale in either tons or kilograms
II	1960 ~ 1985	Various carbon fibers Glass-like carbons Pyrolytic carbons High density isotropic graphites Intercalation compounds Various composites (CFRP, CFRC, etc.)	Introduction of various techniques for the production of carbon materials (e.g., CVD, composite with other materials, etc) Developments of new applications Sale mostly in grams
III	1985 ~	Fullerenes Carbon nanotubes	Nano-sized Sale in milligrams

* Corresponding Author, E-mail: ina@ac.aitech.ac.jp
愛知工業大学 : 〒470-0392 豊田市八草町八千草1247
Aichi Institute of Technology : Yakusa, Toyota 470-0392, Japan

national Symposium on Nanocarbonsが開催され、世界各国から400名以上の参加者が集まった。この国際会議は、ナノカーボンに対する世界の研究者の関心がいかに高いかを示したとも言える。この国際会議の最後のパネルディスカッションにおいて、筆者が“ナノカーボン”の定義を提案したが、十分考えて提案したものでもなく、その説明も適切であったとはいえなかったにもかかわらず、たくさんの方々からコメントをいただいた。特に、Journal CARBONのChief Editorsの1人であるProf. L. A. Radovicからは、種々の議論とアドバイスをいただき、現在その議論をまとめて、同誌にLetter-to-the-Editorとして投稿し、印刷中である。

本稿では、炭素材料を、その開発の過程で、どのように分類し、考えてきたかを、私なりに振り返り、ナノカーボンという分類が行われる現在に至った経過を考察する。そして、ナノカーボンという言葉を使う正当性と問題点を整理してみたい。なお、本文中での炭素材料の名称は開発された当時のものではなく、現在の名称を使用した。例えば、開発当時は熱分解黒鉛(Pyrolytic graphite)と呼ばれていたものは、その後の研究から黒鉛構造が生成している訳ではないことが明らかになり、熱分解炭素(Pyrolytic carbon)と呼ばれている。

2. 炭素材料第I期

第I期は、西暦前から1960年代までの長期間にわたっている。この期間中にも多くのエポックがあり、時代を画するよう

な出来事があったに違いない。例えば、天然黒鉛を使って鉛筆がイギリスで開発されたとき(1575年)には、その簡便さは画期的と思われたに違いない。天然黒鉛がダイヤモンドと同じ炭素原子からできていることがわかったとき(1772年)は、きっと多くの人が真っ黒な黒鉛やコークスと透明で貴重なダイヤモンドが同じ元素からできているとは信じられなかったであろう。石炭タールからコークスの製造が可能となったとき(18世紀初頭)、そしてそのコークスを使って人造黒鉛電極が製造されるようになったとき(19世紀初頭)は、それぞれがその時代の新しい局面を切り拓いたという意味において、人々の注目を惹いたと考えられる。黒鉛電極はその後の鉄の時代ともいわれる19世紀の土台骨であったとも言えよう。

この第I期で開発された炭素材料は、人造黒鉛電極で代表される人造黒鉛類、カーボンブラック類そして木質原料などから作られた活性炭類である。この3種の炭素材料は現在でも重要な工業材料であり、大量に生産されている。この3種の炭素材料を筆者は、次の第II期で開発され“ニューカーボン”と呼ばれるものと対比する意味で、“クラシックカーボン”と呼ぶことを提案したい。「クラシック」とは決して古いことを意味する言葉ではなく、むしろ最高級あるいは代表的であることを意味する言葉である。ニューカーボン材料との対比のみでなく、現在も大量に生産され、広い範囲で使われ、依然として炭素材料を代表するものであることをも表している。そして、人造黒鉛、カーボンブラックそして活性炭の生成が基本的

Table 2 Controlling factors for the production of various carbon materials and the key points for their nanostructure.

State during carbonization	Controlling factors for production	Carbon materials	Key points for nanostructure
Carbon Precursor	in gas phase	high concentration of precursor deposition on a substrate	<i>Carbon blacks</i> <i>Pyrolytic carbons</i> Preferred orientation
		with a catalyser	<i>Vapor-grown carbon fibers</i> Annual-ring texture
		Carbon vapors	<i>Carbon nanofilaments (nanofibers)</i> Platelet, herring bone and tube
		organic vapor with catalyser	<i>Fullerens</i> Sizes and multi-walled
	in liquid phase		<i>Carbon nanotubes</i> Single wall and multi-walled
			Arm-chair, chiral and zig-zag types
			<i>Diamond-like carbon</i> $sp^3 + sp^2$
	in solid phase	under shear stress	<i>Cokes</i> Preferred orientation
		spinning	<i>Needle-like cokes</i>
		rapid carbonization and activation	<i>Pitch-based carbon fibers</i> Preferred orientation Isotropic- and mesophase-pitch-based
		organic fibers and carbonization	<i>Activated carbons</i> Pore structure
		slow carbonization	<i>Porous carbons</i> Micro- and meso-pores
		high molecular orientation	<i>Molecular sieve carbon</i> Nanotexture PAN-based and phenol-based Isotropic texture
			<i>Carbon fibers</i> Highly oriented texture
			<i>Glass-like carbons</i>
			<i>Highly-oriented graphite</i>

にそれぞれ液相、気相そして固相で起こっている。したがって、3つの炭素材料の生成プロセスを代表する炭素材料とも言えよう (Table 2参照)。

これら3種のクラシックカーボン材料の生産は、もっぱら大量生産の実現や製品の大型化に努力が集中していたように思われる。また、生産量や販売量が大きな単位、すなわちトンやキログラムで示されることが多かった。当時の「重厚長大」の思想を反映していたとも言えよう。

3. 炭素材料第II期

この時期は、炭素材料の製造に新しい手法が取り入れられるとともに、ほかの材料との組み合わせ(複合化)によって、クラシックカーボンとは違った性質や外見をもった炭素材料が開発されたことであろう。この第II期は前述のように、ポリアクリロニトリル系炭素繊維、熱分解炭素およびガラス状炭素の開発によって始まった²⁾。

ポリアクリロニトリル繊維を酸化することによって不融化石、その後炭素化することによって炭素繊維が開発された。炭素繊維の細い束で自動車をつり上げることによって、その強さを強調した写真が頻繁に示された。炭素材料製造に酸素の存在はタブーと考えられていたそれまでの常識を覆したこと、炭素繊維の柔軟さと強さは、クラシックカーボンとはかけ離れたものと思われた。このPAN系炭素繊維の開発直前に、レーヨンを原料とした炭素繊維(レーヨン系炭素繊維)も開発されたが、炭素繊維としての性質の優秀さからPAN系炭素繊維の工業化が急速に進んだ。

ほぼ同時期に、熱分解炭素がいわゆる化学蒸着法(CVD法)によって作られた。これは炭素網面が高度に配向しており、強い異方性をもっていることが特徴であった。薄い熱分解炭素の板を下からバーナーで熱すると、板を挟んで直上にある鉛の兵隊は溶けないのに、離れた位置にある板の端に立っている鉛の兵隊が溶けているデモンストレーションが印象的であった。その後の研究は、その製造条件を選択することによって、高い異方性をもつものから異方性のないものまで、その構造を制御できることが明らかとなった。そして、その製造技術は、原子炉燃料の炭素被覆に利用されるとともに、心臓弁などの生体用炭素材料の開発につながられた。

これに対して、ガスをまったく通さない炭素材料、ガラス状炭素の開発も我々を驚かせた。密度が低いにもかかわらずガス不透過性であり、しかも、方向によって性質がほとんど変わらない等方性であることも、炭素材料の構造の基本をなす結晶子が本質的に異方性をもつことから見て、驚きであった。それは、機械的には脆く、その破面は鋭いエッジがたっており、シリカなどを主成分とする無機ガラスの破面と同様な貝殻状の模様を示すことから、この名前が付けられたことを聞き、透明ではないのにガラス状と呼ぶことを納得したことを記憶している。

これら3種の炭素材料は、第I期でのクラシックカーボンからは考えられない構造や性質をもっており、炭素材料としての新しい時代の開始にふさわしいものであった。そして、その後ぞくぞくと新しい炭素材料が開発された。

1964年に我が国で初めて炭素材料に関する国際会議(International Symposium on Carbon, Tokyo)が開催された³⁾。その折りに、溶融ピッチ中に球状の異方性体が生成していることが、カラームービーで示され、大きな衝撃を感じた。そのとき運悪く東京が停電で、冷房のまったく効かない蒸し暑い会場で汗を流しながら、真っ暗にしてムービーを見たことも、より記憶を鮮やかにしている。この液晶の1種としてのメソフェーズの研究は、ニードルコークスの開発につながり、製鋼炉の超高電力操業を支えた。また、球状のメソフェーズを単離したメソカーボン・マイクロビーズの開発・利用につながった。さらに、メソフェーズを主成分とするピッチを紡糸、炭素化することによる炭素繊維(メソフェーズピッチ系炭素繊維)の開発は、炭素繊維の弾性率の向上に寄与するものとして大きな期待を集めた。メソフェーズピッチ系炭素繊維の開発には、等方性のピッチを原料とする炭素繊維の製造技術の開発も重要な役割を担った。

PAN系およびピッチ系炭素繊維が有機前駆体の紡糸、不融化石、炭素化を経て作られるのに対して、化学蒸着法と微粒子鉄触媒を組み合わせることによる炭素繊維の製造技術も開発され、気相成長炭素繊維と名付けられた。有機前駆体を用いた炭素繊維が無限に長い繊維を製造できるのに対して、気相成長炭素繊維は短繊維しかできない。しかし、気相成長炭素繊維はその断面で年輪状組織をもつとともに繊維軸に沿って高い配向度をもつこと、そのために高温処理によって黒鉛構造が発達し得ることが特徴となっている。この繊維の開発初期にすでに、触媒微粒子を先端にもった細い中空のチューブがいったん生成し、その表面に熱分解によって炭素が蒸着していることが明らかにされていた⁴⁾。その中空チューブこそが、現在カーボンナノチューブと呼ばれているものであった。

クラシックカーボンの1つである人造黒鉛の製造技術、すなわちフィラーコークスをバインダーピッチで成形、炭素化、黒鉛化する技術を改良し、高密度・等方性黒鉛材料が開発された。その要点は、フィラーコークスに微粒子を用い、液体を媒体とする静水圧プレス成形することであり、高温でのハロゲンガスによる高純度化処理技術の確立とあいまって、原子炉用黒鉛材料としての要件を満足し得るようになった。この高密度・等方性炭素材料は、放電加工用電極、半導体製造用治具などの多くの用途をもたらした。

また、炭素材料とほかの材料との複合化による新材料の開発も多く、成果を収めた。炭素繊維をフィラーとした炭素繊維強化複合材は、樹脂をマトリックスとすることによって、航空・宇宙用からラケット、釣り竿などのスポーツ用品にまで広く使われるようになった。さらに、セメントとの複合材も

大きな成功を取めた。現在、炭素繊維束およびそのプラスチックとの複合材が、コンクリート橋脚や煙突の補強に、頻繁に使われている。黒鉛層間に AsF_5 などをインターカレーションさせることによって、金属銅よりも高い電気伝導度が得られるとの報告は急速に世界に広まり、黒鉛層間化合物研究のブームを惹き起こした。これは実用化に結びつかなかったが、現在ではリチウムのインターカレーション・デインターカレーションを電極反応として利用した、リチウムイオン二次電池が広く使われている。

これらの材料は、クラシックカーボンとは大きく異なっており、広くニューカーボンと呼ばれた。我が国でも、ニューカーボン研究会(後にニューカーボンフォーラム)を発足させ、炭素を製造している企業のみでなく、それを利用している企業も一緒になって、研究、討論する機運が生まれた。

また、これらのニューカーボンの多くはグラム単位で製造、取り引きされるもので、第I期でのトンあるいはキログラム単位で製造、取り引きしていたクラシックカーボンとは、意識の上でも変革が必要であった。そのことはまた、第I期での大量生産を目指す技術開発から、第II期での高品質、高付加価値の炭素材料を開発、製造するための技術開発への変換が必要とされるようになった。

以前の「重厚長大」の思想に対して、「軽薄短小」の思想を反映していたとも言える。

4. 炭素材料第III期

1985年のバックミンスターフラーレン C_{60} の発見は、炭素材料の構造に革命をもたらしたといっても過言ではない。それ以前にすでに、炭素-炭素結合の3種の混成軌道、すなわち sp^3 、 sp^2 そして sp 混成軌道に対応して、ダイヤモンド、グラファイトそしてカルビンが存在していることが指摘され、 sp^2 混成軌道では炭素原子が六角網平面を形成するしかあり得ないと考えられていた。しかし、フラーレンの発見は、 sp^2 混成軌道によって五員環が生成し、六員環と共存し球殻状のクラスターを作ること示した。そして、そのクラスターは分子として挙動することは、それまでの炭素材料を含めた無機化合物の常識(すなわち、分子は存在しない)をまったく覆すこととなった。フラーレンは C_{60} にとどまらず C_{70} から C_{240} 、 C_{540} と巨大なものも存在し得ること、そして炭素層が幾重にもなったマルチフラーレンも存在することが明らかとなった。その後の全世界的な研究の広がり、多くの成果を取めたが、他方ではそれまで作られてきたカーボンブラック粒子と同じではないと思われるものまでフラーレンと呼んで発表する論文も見受けられた。

1991年のカーボンナノチューブの発見は、さらに炭素材料の常識を変えることとなった。六角網面は平面しか作り得ないと考えられてきたものが、直径約1nmという細さのチューブとなり得ることを示した。そして、そのチューブの軸に対

する六員環の相対的な向きによって、物性が金属的になったり半導体的になると予想され、興味深い物性が期待されている。また、単層ナノチューブから多層ナノチューブも存在し得る。

これらの炭素材料の発見とその物性面での魅力は、同時期に注目されていたナノテクノロジーに大きなインパクトを与え、現在ではナノテクノロジーを具現するための最も重要な材料の1つと考えられ、世界的な研究の広がりを見せている。

カーボンナノチューブに注目と期待が集まるとともに、それを大量に合成することを目的として、炭化水素ガス類の気相における熱分解など種々の手法が使われた。しかし、そこで合成されたものの多くは小さな網面がチューブ軸に平行に配向して蒸着した構造をもっており、前期(第II期)で開発された気相成長炭素繊維あるいは繊維状蒸着炭素(fibrous deposited carbons)と変わらないにもかかわらず、ナノチューブという言葉が使われた。それらのあるものは3000℃付近の高温への加熱処理によって平坦な網面となり、よりナノチューブに近いものとなるものもある。しかし、そのような構造変化はすでに気相成長炭素繊維においてよく知られていることである。

上記の気相熱分解によって生成する繊維状炭素材料は別の面からも注目を集め、多くの研究がなされた。そして、それらはナノファイバー(nanofibers)あるいはナノフィラメント(nanofilaments)と呼ばれた(筆者は後者の呼び方を提唱している⁵⁾)。これらのナノフィラメントが注目される契機を与えたのは、そのあるものが驚異的に大きな水素貯蔵能を示すとの報告がなされたことにある。残念ながら、その大きな貯蔵能はいまだにほかの研究グループによって検証されないままとなっている。

5. 炭素材料の分類

個々の炭素材料の命名にもそれぞれの経緯と理由が隠されている。例えば、前記のように透明でもないのになぜガラス状炭素と呼ばれたかなど。さらに、それら個々の炭素材料をまとめて、分類し、総称することも行われてきた。

炭素材料第I期に対象となった人造黒鉛では、黒鉛構造が発達し得るかどうか大きな問題であり、その高温での黒鉛化挙動を支配する因子は何であるかの研究、議論がなされた。その過程で、高温への加熱処理以前の炭素材料を、高温処理をすれば黒鉛構造が発達し得るかどうかを示すことは重要なことであり、易黒鉛化性炭素(graphitizing carbons, graphitizable carbons)および難黒鉛化性炭素(non-graphitizing carbons, non-graphitizable carbons)という分類が生まれた(この間の経緯については、文献⁵⁾を参照されたい)。

第II期にはいると、前述のように続々と新しい炭素材料が開発され、それらをニューカーボン(new carbons)と総称するようになった。しかし、そのニューカーボンが具体的にどこま

での炭素材料を含むのかも十分議論されないまま使われた。最近発刊された「カーボン用語辞典」には「ニューカーボン」という項目は収録されていない。ニューカーボンと総称される炭素材料では、ガラス状炭素で示されるように、必ずしも黒鉛構造の発達を必要としない用途をもつものも多いことから、第I期で使われた易黒鉛化性・難黒鉛化性という分類はあまり意味をもたなくなった。また、このニューカーボンとの対比として「クラシックカーボン」という言葉も必要となった。

第III期に出現したフラーレンあるいはカーボンナノチューブ類は、第II期で出現したニューカーボンよりもっと革新的であり、その意味で「ニュー」であった。したがって、これらの材料をニューカーボンの一員と考える立場と、入れない立場とに分かれた。この立場の違いは、研究者および技術者のバックグラウンドに依存しているように思える。すなわち、従来のクラシックカーボン、ニューカーボンを扱ってきた人々にとってはフラーレン、ナノチューブもニューカーボンの1つと考えることが多い。これに対して、フラーレンあるいはナノチューブを研究対象あるいは商品として扱っている人々の多くは、ニューカーボンと一線を画そうとする傾向がある。

このような状況の中で、「ナノカーボン」という呼び方が提案され、注目を集めることとなった。昨年末の長野での国際会議に400人を超す参加者があったことは、この言葉が多くの人々の共感を呼ぶ要素をもっていることにほかならない。しかし、その会議でも「ナノカーボン」が何を指しているかの共通の理解が得られたわけでもない。

筆者は、基本となっている炭素-炭素混成軌道 sp 、 sp^2 そして sp^3 をもとに炭素材料をカーボンファミリーとして総括し、それぞれの混成軌道をもつ炭素材料をファミリーメンバーとして捉えることを提唱している。 sp 混成軌道によるカルビン、 sp^2 軌道をもつグラファイトおよびフラーレン、そして sp^3 軌道によるダイヤモンドの4つをファミリーメンバーと考え、それぞれのメンバーがそれぞれ特徴的な多様性をもっているために、多種類の炭素材料が生成していると考えている。

一方、ニューカーボン発展の推移をもとに、フラーレンなどの出現と炭素材料に対する社会からの新しいニーズに応えることを念頭に、「カーボンアロイ」というまったく新しい概念が提唱された^{6),7)}。この言葉は、文部省(当時)の科学研究費・重点領域研究(当時)への申請に使われたこともあって、そのきちんとした定義がなされている。その定義に従えば、炭素原子を主体とするが、他成分と種々のスケールで物理的あるいは化学的相互作用をもって集合体を作っているものを積極的に炭素材料に包含しようとするものである。異種原子、イオンを静電相互作用で黒鉛層間に取り込んだインターカレーション化合物、炭素原子との置換によって生成するボロン固溶体、炭素繊維と同じ炭素の複合材(炭素-炭素複合材)はもちろん、気孔も1つの成分と考えて炭素とのアロイイングと考えるものである。

6. ナノカーボン

フラーレンおよびナノチューブを「ナノカーボン、nanocarbons」という分類に含めることに反対はないであろう。この場合の「ナノ」はサイズを表していることになる。ナノサイズであること(nano-sized)は、その炭素材料に新しい特徴さらには機能を与えることになる。例えば、フラーレン、ナノチューブに限らず、黒鉛をナノサイズにすることができれば、まったく新しい機能が期待できることが理論的に示され、それを実験的に実証しようとする試みが地道に続けられている⁸⁾。

しかし、炭素材料の用途の急速な広がり、そして大きな期待を考えると、サイズがナノであることだけで対応できるものではない。例えば、「ナノカーボン」という言葉が最初に登場したといわれる研究プロジェクト「先進エネルギーデバイス用ナノカーボンの基礎科学と応用」で対象とされる炭素材料はフラーレンやナノチューブのみではない。そこでは、ナノスケールでの構造制御が重要な問題である。例えば、エネルギー問題との関連で天然ガス(あるいはメタンガス)さらには水素ガスの貯蔵は重要な問題であり、そのために炭素材料が大きな役割を果たすことが期待されている。メタンガスの貯蔵に対しては、2nm以下のマイクロポアーが必要であり、そのような細孔を大量に炭素材料中に作り出すための多くの努力がなされている。それはとりもなおさず、ナノスケールでの構造が制御された(nano-structured)炭素材料の製造である。水素の貯蔵については、水素がどのようなサイトに貯蔵されるかで議論が分かれており明らかでないが、ナノサイズのサイトが必要であり、ナノスケールでの構造制御を必要としていることは間違いがない。

黒鉛へのホウ素のドーピングが、リチウム二次電池の負極性能との関連のみでなく、種々の点で注目されている。ホウ素は黒鉛構造中に置換固溶し得る数少ない元素の1つであり、その電子物性に対する影響も興味深いものがあり、最近多くの研究がなされている。これもまた、黒鉛のナノ構造の制御にほかならない。

したがって、ここではナノスケールのサイズをもつ(nano-sized)炭素材料のみでなく、ナノ構造を制御された(nano-structured)炭素材料もあわせて、ナノカーボンと呼ぶことを提案したい。クラシックカーボン、ニューカーボンそしてナノカーボンに分類される代表的な炭素材料をTable 3にまとめた⁹⁾。

現在、炭素材料の中の細孔は、そのサイズそれぞれに用途があり、前述の水素、メタンガスなどに対するマイクロポアーから、ガソリン蒸気の収集のためのキャニスター用炭素材料のメソポアー、そして重油の収着・回収を受けつつ膨張黒鉛中のマクロポアーまで広い範囲に及んでおり、従来の活性炭(activated carbons)のもつイメージから離れて多孔質炭素材料(porous carbon materials, porous carbons)と呼ぶほうが適当であろう。

Table 3 Proposed scheme for classification of carbon materials.

そして、その細孔構造の制御も、活性炭での酸化反応を利用した賦活 (activation) から、ポリマーブレンド法さらにはテンプレート法と呼ばれる新しい方法が使われるようになっており、多孔質炭素のいくつかはそのナノ構造制御によって作られている。したがって、クラシックカーボンに分類される活性炭が、さらに発展してニューカーボンに分類される多孔質炭素となり、その中のあるものはナノカーボンに分類し得るものである。しかし、例えば膨張黒鉛のように主としてそのマクロポアーを利用して重油の収着を行う場合にはナノ構造を制御しているとは言えない。

7. おわりに

炭素材料の発展を3期に分けて考え、それぞれの期間で開発された炭素材料とそれら全体としての特徴を考えるとともに、それらの炭素材料がどのように分類し、どのように呼ばれてきたかをまとめてみた。これらの考察をもとに、ナノカーボンには、そのサイズがナノスケールであるもの (nano-sized) のみでなく、ナノスケールでの構造を制御されている (nano-

structured) 炭素材料も含めるべきであることを記した。

21世紀に我々人類が対面せざるを得ない環境そしてエネルギー問題の解決のために炭素材料は大きな役割が期待されている。その役割を果たすためには、ここで定義したナノカーボンが担うべき場面が多々生じるであろう。

文 献

- 1) M. Inagaki and L. R. Radovic, *Carbon* (in press).
- 2) M. Inagaki, "New Carbons -Control of Structure and Functions-," Elsevier (2000) p.229.
- 3) Extended Abstracts "Symposium on Carbon, Tokyo" (1964).
- 4) A. Oberlin, M. Endo and T. Koyama, *J. Cryst. Growth*, **32**, (1976) 335.
- 5) M. Inagaki, Ed. "Introduction · Carbon Families" Agune Syoufu Sha (2001) p.204 [in Japanese].
- 6) E. Yasuda, *TANSO* **1995** [No.170] 317 [in Japanese].
- 7) E. Yasuda and M. Inagaki, "Carbon Alloys -Space Control and Functional Development of Carbon Materials-," Elsevier (in press).
- 8) T. Enoki and B. L. V. Prasad, *TANSO* **2001** [No.198] 139 [in Japanese].