

Science & Technology Trends 科学技術動向

11
2008
No.92



レポート

p2.8 新しい情報ネットワーク基盤の商用化と
研究開発の動向

p3.20 真のバルクGaN単結晶の必要性と研究開発動向

トピックス

ライフサイエンス分野

p4 米国NIHの革新的でハイリスクな
生物医学研究への支援

ナノテク・材料分野

p6 赤外線エネルギーを吸収する
ナノアンテナ電磁波集電装置

情報通信分野

p5 装着型自立支援ロボットの量産開始

社会基盤分野

p7 電化促進における震災時安全対策

2008
No.92

11

Science&Technology Trends

科学技術動向

今月も「科学技術動向」をお届けします。

科学技術動向研究センターは、約 2000 名の産官学から成る科学技術人材のネットワークを持ち、科学技術政策において重要な情報あるいは意見の収集を行い、また科学技術予測に関する活動も続けております。

月刊「科学技術動向」は、科学技術動向研究センターの情報発信手段の一つとして、2001 年 4 月以来、毎月、編集・発行を行っています。意識レベルの高い科学技術関係者の方々、すなわち、科学技術全般に関して広く興味を示し、また科学技術政策にも関心をお持ちの方々に読んでいただけるものを目指しております。「トピックス」では最近の科学技術および政策から注目される話題をとりあげ、また、「レポート」では各国の動向や今後の方向性などを加えてさらに詳しく論じています。これらは、科学技術動向研究センターの多くの分野のスタッフが学際的な討議を重ねた上で執筆しています。「レポート」については、季刊の英語版の形で海外への情報発信も行っています。

今後とも、科学技術動向研究センターの活動に有効なご意見を読者の皆様からお寄せいただけることを期待しております。

文部科学省科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター センター長
奥和田 久美

このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします。

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「科学技術動向・月報一覧」でご覧いただけます。

文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

【連絡先】 〒100-0013

東京都千代田区霞が関 3-2-2 中央合同庁舎第 7 号館東館 16 F

【電話】 03-3581-0605 【FAX】 03-3503-3996

【URL】 <http://www.nistep.go.jp>

【E-mail】 stfc@nistep.go.jp

新しい情報ネットワーク基盤の商用化と研究開発の動向

電話は19世紀後半に発明され、「回線交換方式」と呼ばれる技術を基にして電話網を構成することで、重要な社会基盤としての役割を演じてきた。一方、テレビなどの放送網は、約100年前の無線通信の発明に端を発し、映像伝送の技術を核として今日に至っている。電話網の「回線交換方式」に対し1960年代初頭に「パケット交換」と呼ばれる方式が発明されインターネットが誕生した。この方式は、本来文字などのデータ通信を実現する目的で開発されたが、インターネットの発達に伴い、多様な通信を提供できるようになっている。特に、電話網が担ってきた音声通話とテレビ放送が担ってきた映像伝送という機能が、このパケット交換方式の上で実施できるようになったことから、電気通信に対する市場のニーズは通話からデータへと大きく変化し、本来電話のために整備されてきた社会基盤である電話網は大きな変貌を遂げつつある。

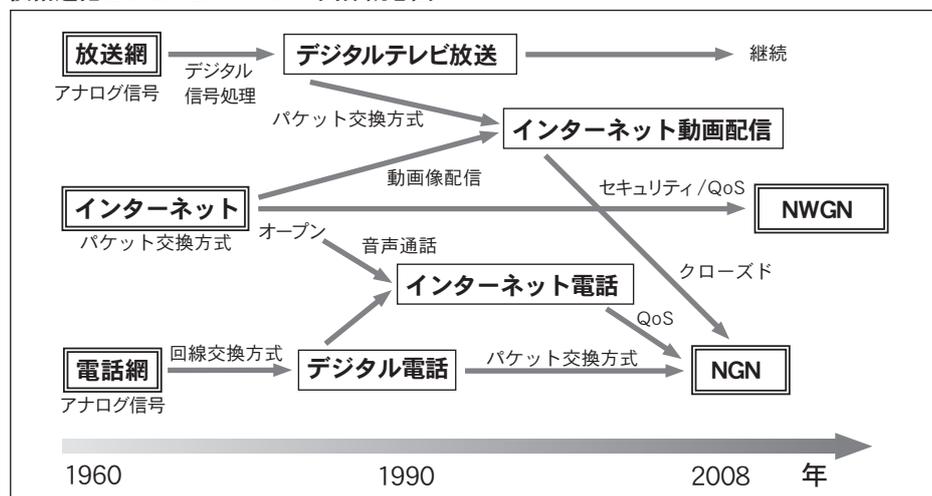
先進国の通信事業者および情報通信政策の担当者は、衰退しつつある音声通話の市場に代わり、情報通信基盤を「NGN」(Next Generation Network、次世代ネットワーク)に関心を持っている。これは、IP(Internet Protocol、インターネットプロトコル)と呼ばれる技術によって通信網を統一的に運用するというネットワークである。IPとは、インターネットのパケット交換方式における核となる技術である。先進国各国は、NGNに関する数多くの実験的運用を実施しており、日本でも2008年3月から世界に先駆けて商用サービスを開始している。

一方、これまで放送網や通信網が経てきた発展の経緯に捕らわれず、社会インフラとしてあるべきネットワークを検討する新世代ネットワークの研究が進んでいる。これをNGNと区別するために「NWGN」(New Generation Network、新世代ネットワーク)と呼んでいる。NWGNでは、ネットワークインフラをより長期的な観点で捉え、IPの発展形を検討の中心に据えつつ、ユビキタスネットワーク環境で想定される少量かつ高頻度の通信需要などへの対応も検討している。

本稿では、まず世界的な標準化の動向を踏まえ、各国のNGNに関する取り組みを述べる。つぎに、より長期的な展望に立って進められているNWGNのアーキテクチャに関する研究プロジェクトの概要を、米国・欧州・日本に関して紹介している。

今後の情報ネットワークのあり方を議論するために必要なことは、エンジニアのエキスパートの見識を問うことばかりでなく、広く他のエキスパートの知見を取り入れることである。ネットワークが他分野の研究開発に及ぼす影響の検討や幅広い分野のイノベーションを生み出す豊かな土壌となりうるような工夫が求められる。

技術進化とNGNとNWGNの関係概念図



科学技術動向研究センターにて作成

真のバルク GaN 単結晶の必要性と研究開発動向

窒化ガリウム (GaN) 系半導体は、現在、発光ダイオードやレーザダイオードなどとして実用に供されており、我々の日常生活に密接に関わっている。発光ダイオードとしては、携帯電話を始め液晶ディスプレイのバックライトなどに、またレーザダイオードとしては、ブルーレイディスク用光源としてハイビジョン映像の録画再生に用いられている。今後の GaN 系デバイスの高性能化により、一般照明用途やインバーターなどのトランジスタ用途などへも応用展開され、大きな省エネルギーにつながるなどの試算もある。

GaN 系半導体の結晶は、基板としてサファイアや炭化ケイ素 (SiC) の異種材料を用いて、その上に結晶成長させることにより得られている。しかし、結晶成長させる材料と基板材料が異なることから結晶欠陥が多数発生し、出力や寿命などのデバイス性能に悪影響を与えている。さらにこの異種材料の基板と成長した GaN の結晶面方位の関係から、自発分極が発生して、発光効率向上の阻害要因となっている。

今後、大きな性能向上を図るうえでは、これまでの異種基板を用いた結晶成長技術では限界がある。限界を超えるためには、結晶欠陥が少なく任意の結晶面を切り出すことが可能な「真のバルク GaN 単結晶」が切望されているが、結晶成長技術が確立していない。主導権争いにおいて残り少ない基板材料であるとも言える GaN の結晶成長技術において、日本が研究開発の主導権を握れるかどうかは、今後、GaN 系半導体デバイス技術全体に対して重要な意味をもつと考えられる。

GaN におけるヘテロエピタキシャルとホモエピタキシャルの結晶成長

	ヘテロエピタキシャル			ホモエピタキシャル
	タイプA	タイプB	タイプC	タイプD
	<p>転位 GaN系薄膜 基板 (サファイア, SiCなど)</p>	<p>転位 GaN系厚膜 基板 (サファイア, GaAsなど) マスク (SiO₂など)</p>	<p>転位 GaN系厚膜基板 剥離または研磨 基板 (サファイア, GaAsなど)</p>	<p>有極性面 (0001) 無極性面 (1100) 任意の面を切出して基板に使用 GaN系薄膜 GaN基板</p>
長短所	<ul style="list-style-type: none"> ・大面積～インチクラス ・結晶欠陥(転位): $\sim 10^9 \text{cm}^{-2}$ ・有極性: C(0001)面による自発分極 	<ul style="list-style-type: none"> ・大面積～インチクラス ・結晶欠陥(転位): $\sim 10^7 \text{cm}^{-2}$ ・有極性: C(0001)面による自発分極 	<ul style="list-style-type: none"> ・大面積～インチクラス ・結晶欠陥(転位): $\sim 10^5 \text{cm}^{-2}$ ・有極性: C(0001)面による自発分極 ・高コスト 	<ul style="list-style-type: none"> ・高品質 ・任意極性面 ・結晶サイズ: mmオーダー
アプリケーション	近紫外～緑色LED 白色LED(擬似白色)	青紫色LD(低パワー)	青紫～青色LD	未実現

科学技術動向研究センターにて作成

米国における最大の医学・生物学研究の支援機関であり、生物医学系国立研究所でもある NIH は、2008年9月9日、研究者主導による大胆で創造性に富む研究育成のためのグラント、T-R01(Transformativ R01)の新設を発表した。従来からある研究グラントでは、ハイリスクで革新的な研究が申請されにくい可能性があるため、申請書様式の変更や新しいピアレビュープロセスを試行する。今後5年間で2.5億USドル以上を出資する予定である。ハイリスクで革新的な研究への支援は米国 NSF でも検討されているが、今回、NIH から先に具体的なグラントが発表されたことになる。

トピックス / 米国 NIH の革新的でハイリスクな生物医学研究への支援

米国の医学および生物学研究の最大の支援機関であり、同時に最大の生物医学系国立研究所でもある NIH は、研究者主導による大胆で創造性に富む研究を育成するために、T-R01 (Transformativ R01) という研究グラントを新設することを、2008年9月9日に発表した。予算規模は今後5年間に2.5億USドル以上と予定されている。

米国 NIH には、従来から R01 という研究者主導の研究を支援する研究グラントがあったが、R01 グラントの仕組みやピアレビューによる評価では、多くのハイリスクで革新的な研究の申請書が提出されない可能性があるとして、このたび T-R01 が新設された。

T-R01 では、以下の3点が従来の R01 と異なる。

① T-R01 で募集されるのは、生物医学や行動科学の広い範囲において大きなインパクトをもつ可能性がある革新的・ハイリスク・オリジナルな研究であり、従来研究とは全く異なる研究であり、新しいパラダイムを生み出さうとする研究である。研究で明らかにしようとする目的は、従来の R01 では複数設定されていたが、T-R01 では原則1つとされている。

② T-R01 申請書の研究計画の項目に8ページの制限を設けた。制限範囲内で、研究の革新性・新規性・研究により生じるとされるインパクトおよび T-R01 への適合性を示す必要がある。従来の R01 の申請書では25ページまで記載可能であり、研究の背景・詳細な研究方法・予備実験の結果などが記載されていた。

③ T-R01 申請書の採択において、従来の NIH のピアレビュープロセスとは異なる新しいプロセスを試行する。NIH 研究グラントの内の70%のピアレビューを運営している NIH Center for Scientific Review によって、従来とは異なるプロセスで施行される予定

である。

この T-R01 の研究グラントは、生物学・行動学・臨床・社会学・物理学・化学・コンピュータサイエンス・工学・数理科学などを含む NIH のミッションに対応する全ての研究分野の研究者からの応募が期待されている。若手に限らず、どのレベルの研究者でも応募可能であり、個人でもチームでも申請できる。NIH の規約に照らして問題がなければ、外国人研究者や海外研究機関からの応募も可能である。研究テーマの例としては、NIH の戦略プランニングプロセスを通じて抽出された特に必要だと考えられる研究領域から、次のようなものが示されている。行動の変化の科学・タンパクの捕捉・ミトコンドリアにおける機能的な変異・複雑な三次元の細胞モデル・急性の疼痛から慢性疼痛への変移・ファーマコゲノミクス。

T-R01 は、2008年12月29日から2009年1月29日まで募集が行われ、採択の決定は2009年9月末の予定である。研究期間は5年間で、1年間最大2500万ドルまで出資される。採択予定件数は60件とされている。採択決定時には、採択されたテーマとともに、新しいピアレビュープロセスについても明らかにされるものと考えられる。

ハイリスクで革新的な研究への支援については、米国 NSF で「トランスフォーマティブ・リサーチ (TR)」と名付けられ、2004年から委員会が設けられて先行的に検討されてきた。現在、NSF でも EAGER (EARly-concept Grants for Exploratory Research) というグラントを設けることが検討されているが、今回、NIH から先に具体的なグラントが発表されたことになる。

参 考

- 1) NIH Announces New Transformativ R01 Funding Program, NIH News (September 9, 2008)
- 2) Transformativ R01 Program : <http://nihroadmap.nih.gov/T-R01/>
- 3) NIH Center for Scientific Review : <http://cms.csr.nih.gov/>
- 4) "Enhancing Support of Transformativ Research at the National Science Foundation" : http://www.nsf.gov/nsb/documents/2007/tr_report.pdf

2008年10月7日、サイバーダイン株式会社は自立支援用のロボットスーツ (ROBOT SUIT®) を量産し、大和ハウス工業株式会社を通じて介護・福祉施設向けにリース販売を開始すると発表した。同社は、筑波大学大学院の山海嘉之教授らの研究成果である自立支援ロボットの開発と量産を目的にした大学発ベンチャー企業である。年間500台規模での世界初の自立支援ロボットの量産となる。今回販売されるのは下半身用の「HAL™」で、両足用と片足用との2種類がある。人間の脳が筋骨格系を動かそうとする時に流れる微弱な生体電位信号に応じて関節部のモータにトルクを与え、装着者の動作支援を行う。

トピックス 2 装着型自立支援ロボットの量産開始

サイバーダイン株式会社¹⁾ (CEO: 山海嘉之筑波大学大学院教授)は、2008年10月7日に、自立支援用のロボットスーツ (ROBOT SUIT®) 「HAL™」を量産し、大和ハウス工業株式会社を通じて²⁾ 介護・福祉施設向けにリース販売を開始すると発表した。サイバーダイン株式会社は、山海嘉之教授らの研究成果である装着型自立支援ロボットの開発と量産を目的に2004年6月に設立された大学発ベンチャー企業である。生産設備や試験・訓練室を含む研究開発センターがこの度竣工し、年間500台規模でロボットスーツ (ROBOT SUIT®) の生産を開始する。これは、世界初の装着型自立支援ロボットの量産となる。

全身に装着するタイプも開発されているが、今回リース販売されるのは下半身用のもので (図表参照)、両足用と片足用との2種類がある。重量は、両足用が10kg、片足用が6kgで、これにバッテリー重量の1kgが加わる。リチウムポリマーのバッテリーを用い、60分の充電で60～90分の稼働が可能である。サイズは、身長に合わせて1.5cm単位で微調整ができる。

販売対象は介護・福祉施設のみで、個人への販売は予定していない。リース期間は5年間で、保守メンテナンス料や訓練費用を含めて、両足用が月額22万円、片足用が月額15万円となる。また、採寸や身体機能のチェックを行い、ある程度のカスタマイズをする必要があるため、ホームページ¹⁾での個別相談にも応じている。

このロボットスーツ (ROBOT SUIT®) は、人間の脳が筋骨格系を動かそうとする時に流れる微弱な生体電位信号を皮膚表面に貼った電極パッドで検出し、増幅後にコントロールボックス内のコンピューターで信号を解析し、その信号に応じて関節部のモータにトルクを与えて、装着者の動作支援を行う。筋肉や骨の動きを利用しているのではなく、脳からの伝達信号を検出しているため、

筋肉が動きだすより一瞬早くロボットを動かすことができ、自分で筋肉を動かせない人もサポートすることができる。このような随意的制御機構に加え、人の基本動作をパターン化し、そのパターンに合わせて自らが制御する自立的な制御機能も持っており、これらの組み合わせで安定なパワーアシストを実現している。

装着時に受ける違和感を最小限におさえるためには、人間の行動様式などの知識も重要となる。したがって、行動科学、脳神経科学、生理学、心理学など様々な分野が複合した包括的な学問体系が必要であり、山海嘉之教授は、このような領域を「サイバニクス」と名付けている。

なお、山海嘉之教授は、科学技術政策研究所が毎年選定している「ナイスステップな研究者」として2007年に紹介されている³⁾。

リース販売される両足用のロボットスーツ (ROBOT SUIT®) 「HAL™」



出典：©Prof. Sankai CYBERDYNE Inc. / University of Tsukuba

参 考

- 1) サイバーダイン株式会社ホームページ：<http://www.cyberdyne.jp/index.html>
- 2) 大和ハウス工業株式会社ニュースリリース：<http://www.daiwahouse.co.jp/release/20081006220554.html>
- 3) 科学技術政策研究所プレス発表：<http://www.nistep.go.jp/notice/nt071226.pdf>

米国エネルギー省・アイダホ国立研究所の研究者らは、ナノアンテナに関する計算機モデルを用いて、金・マンガン・銅などの様々な材料の赤外線波長領域のエネルギー吸収挙動をシミュレーションし、試作したナノアンテナ配列電磁波集電装置で、実際に80%という高いエネルギー吸収率を確認した。試作装置では、柔らかい材料表面に形成されたシリコン基板のナノアンテナ配列が、赤外線により毎秒数兆回振動する交流電流が発生する原理を応用して太陽光の赤外線エネルギーを収集する。今後、テラヘルツ領域の交流を直流に変換する超高周波整流器などの研究開発を行なう必要があるが、このようなナノアンテナ配列電磁波集電装置により、太陽電池より安価で高効率な太陽光エネルギー吸収システムを形成できる可能性がある。

トピックス 3 赤外線エネルギーを吸収するナノアンテナ電磁波集電装置

米国エネルギー省・アイダホ国立研究所の研究者らは、ナノアンテナに関する計算機モデルを用いて、金・マンガン・銅などの様々な材料の赤外線波長領域のエネルギー吸収挙動をシミュレーションし、試作したナノアンテナで実際に高いエネルギー吸収率を確認した。マイクロ波のような低い周波数領域の電磁波エネルギーを集めるアンテナはこれまでも開発されているが、赤外線波長領域 (THz 波) では検討されていなかった。

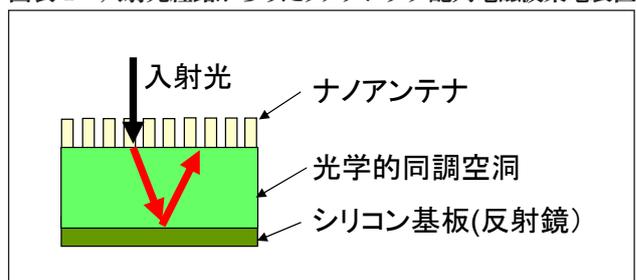
研究チームでは、計算機シミュレーションの結果、ナノアンテナが、その材料の種類と寸法形状次第で、赤外線波長領域のエネルギーの90%を捕獲する可能性を見出していた。このほど、試作したナノアンテナ配列電磁波集電装置 (図表 1) を用いた実験で、赤外線波長領域のエネルギーの80%以上を吸収できるという結果を得た (図表 2)。ナノアンテナは、特定の波長を捕獲するように、その形状と寸法を調整できるため、太陽光スペクトルのように幅広い波長域でもエネルギーを捕獲できる可能性がある。

研究チームは、既存の半導体製造プロセスを応用して、ナノアンテナ・パターンを有するシリコンウェハを製作した。アンテナ配列は、柔らかいポリエチレンシートの上に浮き彫り加工されている。アンテナ部分は金でできており、厚さが約1000原子層のナノワイヤーが正方形のスパイラル構造にパターン加工されている。スパイラル構造の一辺は約5 μm で、直径20cmの領域に約100億個のアンテナが形成されている。赤外線により、各アンテナが毎秒数兆回振動し、交流電流が発生する。

今後、この吸収エネルギーを電気エネルギーとして取り出すために、直流に変換する特別な整流器などの研究開発が必要となる。通常の整流器では、このような高い周波数を取り扱うことはできないうえ、整流器の寸法を現在の商用装置の約1000分の1以下にする必要がある。これらの課題を克服できれば、このナノアンテナ配

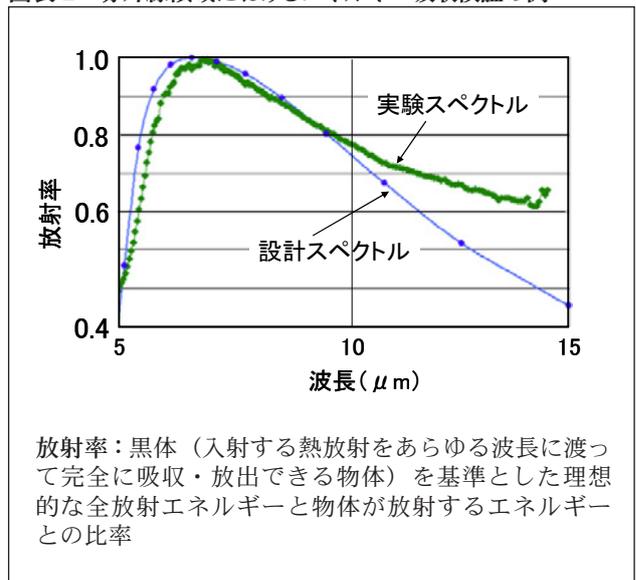
列電磁波集電装置は、太陽電池より安価で、より高効率な太陽光エネルギー吸収システムとなる可能性を有する。地球上の多くの物体は、日中に太陽からエネルギーを吸収し、夜間に熱を赤外線として連続的に放射している。また、産業界のすべてのプロセスは排熱として大量の赤外線を発生させている。これらは豊富なエネルギー源とも言えるが、現状ではこれらは使用されていない。

図表 1 入射光経路からみたナノアンテナ配列電磁波集電装置



参考文献を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表 2 赤外線領域におけるエネルギー吸収検証の例



放射率：黒体（入射する熱放射をあらゆる波長に渡って完全に吸収・放出できる物体）を基準とした理想的な全放射エネルギーと物体が放射するエネルギーとの比率

参考文献を基に科学技術動向研究センターにて作成

参 考

- 1) D. K. Kotter, et al., Progs. of the 2nd Intl. Conference on Energy Sustainability ASME, ES2008-54016

高齢化社会が進み、省エネ電化機器が普及していく中で、震災発生・停電復旧時の電気器具安全対策技術の開発が必要になってくる。2008年10月、東京電力(株)とアドソル日進(株)は共同で、地震発生時に自動的に電気器具への通電を止める電源遮断システムを開発した。今回開発されたシステムは、地震発生・停電復旧時に火災発生のリスクを伴う器具のみの通電を遮断するもので、価格も廉価であるため、普及させやすい。通電再開には利用開始スイッチを入れる必要があることから、停電復旧時の二次的発火発生も防止できる。このような技術を普及させるために、高齢者世帯などへの助成措置、火災発生リスクのある電気器具本体への機能の内蔵、緊急地震速報との連携といった施策の検討が必要である。

トピックス 4 電化促進における震災時安全対策

我が国では今後、高齢化社会が進み、日常生活での利便性・安全性の観点から、電化が進展していくものと考えられる。また、温室効果ガス排出量を大幅に削減するためには、電気利用機器の導入・利用による電化の促進が極めて重要な手段になるとの提言もある¹⁾。

電化推進のためには、家庭などで使用される電気器具、それ自体の安全性を高めることが重要である。さらに、地震など災害発生時は勿論、停電復旧時の安全対策技術を開発することが、必要になってくる。例えば、2007年に東京都が策定した地域防災計画²⁾では、震災時の火災による死亡者数を半減することが減災目標として掲げられている。対策の中で、地震発生時や停電復旧時の電気器具からの出火防止も挙げられ、必要な装置の開発が求められていた。すでに、地震発生時に通電を遮断するブレーカは開発されているが高価であり、さらに照明や医療機器など必要とされる機器への通電も遮断されることなどの課題があるため、現状では十分に普及していない。

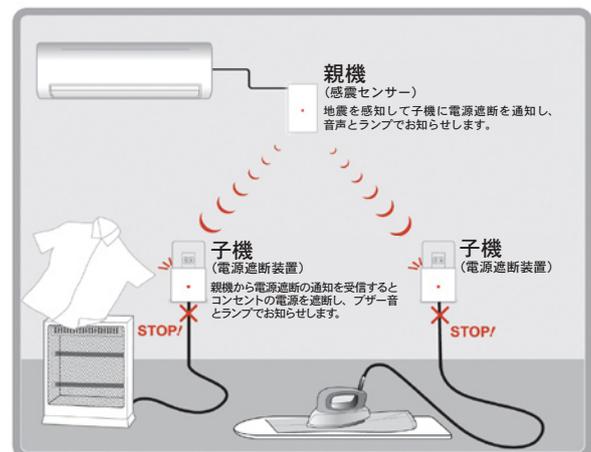
2008年10月8日、東京電力(株)と、無線システムメーカーであるアドソル日進(株)は、地震発生時に自動的に電気器具への通電を止める電源遮断システムを共同で開発したと発表した³⁾。

今回開発されたシステムは、震度5強程度の揺れを感知すると、電源から電気器具への通電を自動的に遮断するもので、価格も廉価であり、普及しやすいと考えられる。通電再開には、子機の利用開始スイッチを入れる必要があることから、停電復旧時の二次的発火発生も防止できる。具体的には、揺れ

を感知すると停止信号を無線で発信し、内蔵照明を点灯する親機と、無線信号を受信して、ブザー音とともにコンセントからの通電を遮断する子機から成る。地震発生時や停電復旧時に火災発生のリスクを伴う電気器具、例えば、電気ストーブやヒータ類、アイロンなどを、子機を経由してコンセントに差し込めばよく、特別な工事などは不要である。また、遮断対象は、子機を差し込んだコンセントからの通電のみで、震災時でも必要な機器の使用に支障をきたすことはない(図表)。

この安全対策技術を普及させるために、特に高齢者世帯などへの助成措置、さらに将来的には、火災発生リスクのある電気器具本体への子機機能の内蔵、緊急地震速報との連携といった施策の検討が必要である。

電源遮断システム概念図



出典：参考文献³⁾

参 考

- 1) 電中研ニュース、No.450 (2008年10月) : <http://criepi.denken.or.jp/research/news/pdf/den450.pdf>
- 2) 東京都地域防災計画 : <http://www.bousai.metro.tokyo.jp/japanese/tmg/plan-sinsai.html>
- 3) 東京電力プレスリリース : <http://www.tepco.co.jp/cc/press/08100802-j.html>

新しい情報ネットワーク基盤の 商用化と研究開発の動向

藤井 章博
客員研究官

山田 肇
客員研究官

1 はじめに

1-1

通信基盤のインターネット プロトコルへの統合という潮流

電話は19世紀後半に発明され、「回線交換方式」と呼ばれる技術を基にして電話網を構成することで、重要な社会基盤としての役割を演じてきた。一方、テレビなどの放送網は、約100年前の無線通信の発明に端を発し、映像伝送の技術を核として今日に至っている。電話網の「回線交換方式」に対し1960年代初頭に「パケット交換」と呼ばれる方式が発明されインターネットが誕生した。この技術は、本来文字などのデータ通信を実現する目的で開発されたもので、情報をパケットと呼ばれる細かい単位に分割し、それぞれにあて先アドレスを付与して伝送する方式である。このようにすることで、通信網を柔軟かつ効率的に利用することができる。

インターネット関連技術の発達に伴い、このパケット交換方式で、音声や高精細な映像を含む多様な通信サービスを提供できるようになっている。しかし、電話網による音声通話とインターネットによ

る「データ通信」、それからテレビ放送が担ってきた「映像伝送」という機能は、これまで、まったく異なるインフラによって提供されてきた。さらに、電話網には、有線の固定電話と無線の携帯電話が存在する。すなわち、現在の情報ネットワークという社会基盤は、一つに統合された社会基盤ではなく、それぞれ異なる設計思想と技術体系に基づいて発展してきた寄り合い所帯であると言える。

インターネットで利用されているパケット交換方式を用いることで、異なる生い立ちからなる通信基盤を統合的に運用しようという議論がなされている。上述した4種類の通信形態をまとめると次のようになる。

- (1) 電子メールやWeb情報の伝送などのデータ通信。(インターネット上でパケット交換方式により提供されている。)
- (2) 固定電話網による通話。(現在、大部分は従来の回線交換技術に基づいて運用されている。一部「インターネット電話」としてパケット交換網でも実現している。)
- (3) 放送網による映像や音声の配信。(基本的には放送網のイン

フラによって提供されており、一部の映像配信などが新しいサービスとしてインターネット上で提供されつつある。

- (4) 携帯電話網による移動体通信。(音声は電話網の技術による。また、電子メールやウェブ閲覧などはパケット交換の技術を利用している。)

このようにタイプの異なる通信を実現するために、パケット交換を利用して統合的に通信基盤を運用しようとしているのが「NGN (Next Generation Network、次世代ネットワーク)」である。

本来電話のために整備されてきた社会基盤である電話網は、大きな変貌を遂げつつある。インターネットにおけるパケット交換方式の核となるのは、「IP (Internet Protocol、インターネットプロトコル)」と呼ばれる方式である。IPは、インターネットにおけるパケットの構造やネットワーク上の住所にあたるアドレスを規定したりするなど、インターネットのパケット通信における基本的な要素技術である。すなわちIPによるネットワークの統合的な運用がNGNの本質である。

固定電話網や移動体通信網とい

う既存の通信基盤をパケット交換方式であるIPに統合することによって、映像配信を含む多様な通信サービス機能を統一的に提供できるようになる。これによって、今までに無い新たなサービスが登場する可能性をも広げることにつながる。また、通信網がIPに統合されることで、音声通話サービスを提供するための設備の維持管理コストが削減できると言われている。

そこで、先進国の通信事業者および情報通信政策の担当者は、衰退しつつある音声通話の市場に代わり、通信基盤をIPで統一的に運用する「NGN」に関心を持っている。先進国各国は、NGNに関する数多くの実験的運用を実施しており、日本でも2008年3月から世界に先駆けて商用サービスを開始している。「NGN」という用語は、一部の通信事業者が自己の新サービスの宣伝文句にも利用しており、特定のサービスパッケージのような印象を受ける。しかし、伝送路設備を提供しない事業者にとっても、通信網のIP化は避けて通れない潮流であり、様々な対応が始まっている^{9, 10)}。

1-2

NGN サービスの開始

2008年3月、日本は世界に先駆けて、このNGNの商用サービスを開始している。関連するビジネスの動向を主導しているのは、日本では日本電信電話株式会社(以下「NTT」)、英国においてはブリティッシュ・テレコム社(British Telecom, 以下「BT」)などの大規模通信事業者である。

商用のNGNサービスの一例として、例えばNTTは、企業や家庭で光ファイバーの導入を前提として、図表1に示すようなサービ

図表1 NGN サービスの一例 (NTT)

サービス分類	具体的なサービス内容	
	品質	
光ブロードバンドサービス	帯域保障および ベストエフォート	戸建向け(100Mbps) 集合住宅向け(100Mbps) 事業所向け(1Gbps)
IP 電話	帯域保障	ひかり電話 テレビ電話
VPN (仮想私設網)	帯域保障	(将来提供予定)
	ベストエフォート	VPN
コンテンツ配信むけサービス	帯域保障	ユニキャスト マルチキャスト
	ベストエフォート	ユニキャスト マルチキャスト
イーサネットサービス	ベストエフォート	イーサネット

参考文献⁹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

スを開始している。利用者からみると、これらの商用サービスは、広帯域であるという利点があり、高精細な映像情報の伝送が可能となる。さらに、映像情報においては、通信の「品質保証」が重要である。これは、一定時間内に利用できるパケットの量を保障する「帯域保障」という機能を提供できるか否かに依存する。

インターネットは、本来の設計思想に基づく基本的な構造が、「ベストエフォート」(最大努力に基づく非保障型)と呼ばれるネットワークであり、利用できる通信帯域の保障は本来苦手としてきた。例えば、テレビ放送のような映像情報をインターネットを通じて配信する場合、この帯域保障がなされないと、連続して一定量の情報を送信できない場合も出てくる。そうになると、本来は高品質であるべきテレビ映像が乱れ、コマ落ちするといった問題が起きる。こうした現象は、映像情報を質の悪いインターネット上のアクセスにより閲覧する際に経験することである。

帯域保障を実現することは、2011年に導入されようとしている放送のデジタル化との関連において重要視すべき点である。放送コンテンツをデジタル化したスト

リーミング(情報配信)はすでに実現されているが、さらに帯域保障を実現できれば、インターネットというインフラが、放送網の役割を代替できる可能性を意味する。ただし、テレビ番組などを扱う放送事業者の側からみれば、既得権を失うことにつながりかねないため慎重な対応にならざるを得ないのが現状である。実際には、今後しばらくの間、通信網という社会基盤は、これまで放送網が担ってきた役割と補完関係を保ちつつ発展すると考えられる。現在、日本を始めとし各国で、通信事業者や放送事業者、さらにはコンテンツ制作の側に位置する事業者が、このように新たに生まれつつあるアプリケーション分野でビジネス上の覇権を取るべく競合している。

1-3

通信基盤のさらなる発展を目指して

より長期的な視点から、新しいネットワーク構成を研究・開発していこうという動きも近年活発になっている。すなわち、すでに商用的に提供されるNGNよりさらに未来

に目を向け、通信網という社会基盤のありかたを根本から議論することが始まっている。こうした新しいネットワークを、NGNと区別するために「NWGN (New Generation Network、新世代ネットワーク)」と呼ぶ。NWGNは、基本的にはIPを中心に検討されているが、必ずしもIPにとらわれないまったく新しい通信基盤の構想である。

NWGNの検討は各国の情報通信技術における研究開発の最重要課題の一つとなっている。米国のGENI(Global Environment for Network Innovations)や欧州の「Euro-NGI」などがその例であり、本稿で後述する。日本は、総務省と(独)情報通信研究機構(以下「NiCT」)が実施している「新世代ネットワークアーキテクチャ設計プロジェクト(通称「AKARIプロジェクト」)がそれにあたる¹⁶⁾。

NGNやNWGNのような新しい情報ネットワークに関する研究開発においては、前述したように本来異なる発達を遂げてきた通信網とその上で提供される多様なサービスを統合的に支援できるインフ

ラを構築することが課題となる。図表2にこのサービスの統一の過程の概観を示す。

図表2には、放送網・インターネット・電話網がNGNとNWGNに至る関係を概念的に表している。放送網や電話網とインターネットとの関係で節目となる要素として重要なものが2つ挙げられる。インターネット電話(VoIP: Voice over Internet Protocol)とインターネット上での動画配信である。それぞれ、インターネット上に、従来の電話網の機能と放送網の機能を導入するものである。現在「NGNサービス」と銘打って導入されようとしている機能は、既存の通信事業者によって推進される見込みである。すなわち、電話・データ通信・放送の三重奏はNGNの枠組みの中でQoS(Quality of Service、サービス品質)の保証やセキュリティ機能の強化をIPの世界に導入することによって進展する。

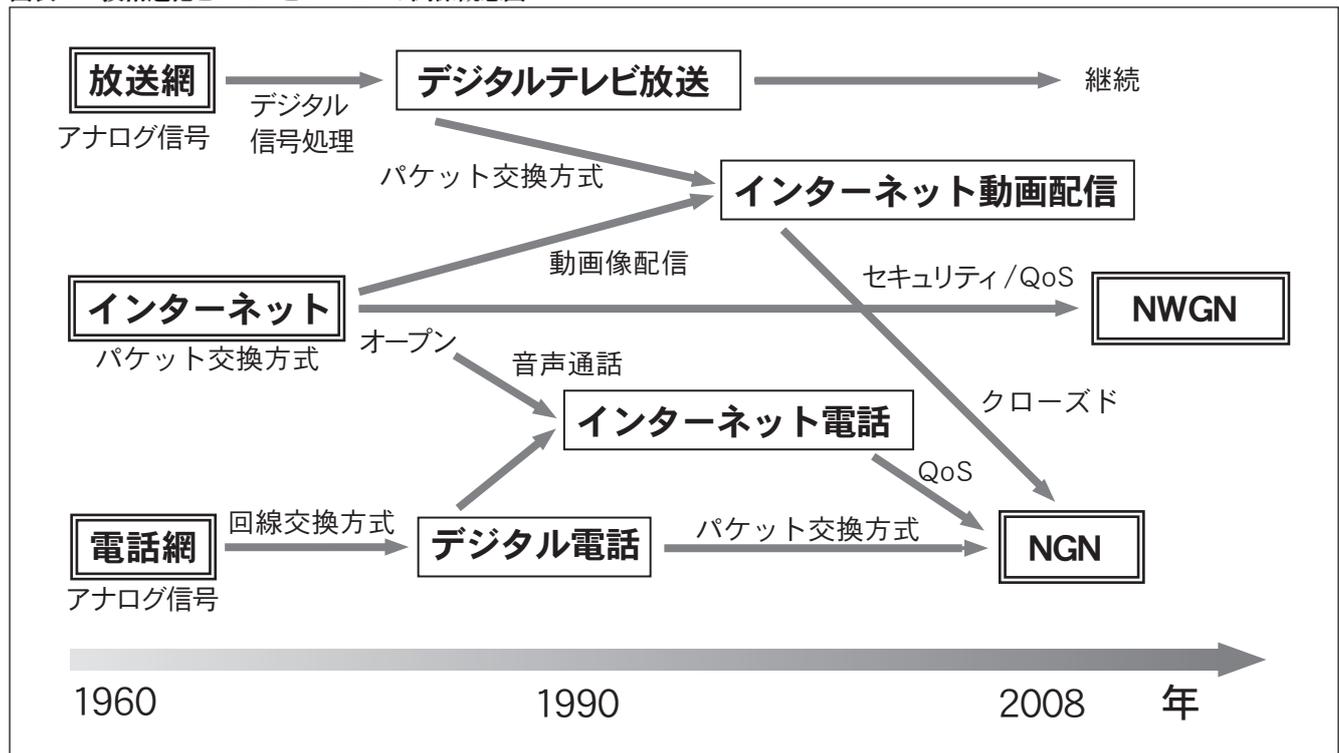
このようなNGNの実用化と並行して、今後は、NWGNの研究が進むであろう。NWGNでは、ネットワークインフラをより長期的な観点

で捉え、IPをさらに進化させることなどを検討の中心としながら、ユビキタスネットワーク環境が実現する場合に想定される少量の情報で頻度の大きな通信などへの対応なども視野に入れて検討している。

パケット交換方式を取るインターネットは、誰でも通信網に参加できるという、いわゆる「オープン」なネットワークとして発達してきた。一方、電話網は国策企業によって「クローズド」な環境で発達してきたと言える。NGNは、特定の通信事業者が提供するクローズドなサービスと言える。一方、NWGNでは、インターネットが本来持っており、これまでの発展の原動力となってきたオープンな環境を活用しようとしている。

次章以下では、IP技術を核として通信インフラに本質的な変化をもたらしつつある技術の潮流について述べる。2章でITU-Tを中心に各国の通信ベンダーが参画して進められている商用のNGNについて概説し、3章でより長期的な展望を持って進められているNWGNの研究開発について述べる。

図表2 技術進化とNGNとNWGNの関係概念図



科学技術動向研究センターにて作成

2 商用 NGN の動向

2-1

通信に対するニーズの変化と通信事業者の対応

通信に対する先進諸国の市場のニーズは 1990 年代後半から大きく変化し始めた。通話からデータへというのが大きな変化である。総務省の情報通信統計データベースによれば、固定系、移動系(携帯電話)・IP 電話のすべての合計で、通話回数・通話時間共に減少の傾向が顕著である。2000 年度には総通話回数が 1448 億回、総通話時間が 70.3 億時間であったものが、2005 年度には 1211 億回、43.6 億時間になり、それぞれ 16% と 38% の減少である。この結果、「金のなる木」だったはずの通話(電話サービス)は、通信事業者にとって重荷となり始めている。

同データベースによると、この一方で、ブロードバンド契約者によるトラフィック総量の推計値は、2004 年 9 月には 269 ギガビット/秒であったものが、2008 年 5 月には 880 ギガビット/秒と 3 倍以上の伸びを見せている。ブロードバンド・インターネットを用いたテキスト・画像・音楽・映像などの配信サービスも急激に成長している。IP を利用して音声信号を送信する VoIP (Voice over Internet Protocol) と呼ばれる技術も登場し、音声通話もインターネット上で送受信できるようになった。この結果、電話とインターネットを分けて提供する必然性は薄れてきた。さらに、NGN の枠組みで構想されている帯域保障の機能が VoIP に付加されれば、料金に応じて会話の音質や遅延時間の有無を制御することが可能となる。

通信に関する新たな市場ニーズ

の台頭に呼応して、国内の通信事業者の事業戦略にも変化が出てきた。電話サービスのためのネットワークについては、必要最低限の維持・管理を行うのにとどめ、設備更新といった投資を控えるようになった。それを反映して、交換機の市場規模が急激に減少している。情報通信ネットワーク産業協会の調べによれば、交換機の国内生産総額は 2007 年には 1427 億円で、2005 年の 2009 億円から二年間で 29% も減少した。しかし減少したとはいえ、音声通話には依然として大きなニーズが存在する。そこで VoIP を利用して通話もインターネット上で行うようにして、電話とインターネットのネットワークを統合しようという考えが生まれてきた。それが NGN であった。

2-2

NGN の起源

1990 年代後半に、先進諸国の多くの通信事業者は NGN の可能性に気付き研究を始めた。この NGN を実際に利用しようと積極的に動き出したのは、第三代携帯電話の標準化を進めたグループであった。そこではまず、移動体通信における IP の導入の可能性の検討、特に、利用者の移動に伴うアドレスの運用方法などについての検討がなされた¹⁾。こうした検討作業は、新しい移動体通信の規格として結実していくことになる。第三代携帯電話の国際標準は 2000 年代に入ってからすぐに利用可能になった。しかし、第三代の世界普及は遅れており、第二代の携帯電話のほうが世界的に広まり続けている。GSM Association がま

とめた 2008 年 9 月 22 日付の速報値によると、携帯電話の利用者は世界中に 38 億 406 万人で、そのうち、古い第二代 GSM (Global System for Mobile) の利用者が 30 億 5913 万人と 8 割を占め、しかもその利用者はこの一年半で 8 億人以上も増加している。

特にアジア・南アメリカ・アフリカ・東ヨーロッパで利用者を増やしている。これらの地域には固定電話が少なく、そこに初めての通信手段を敷設しようとするとき、電話線を引くよりもコストが安い。これが、GSM が選択され急増している原因である。

第二代は、第三代と比べると投資額が三分の一で済む。第三代移動通信を普及させるには、この差を縮める必要がある。このための切り札の一つとして提案されたのが、コア・ネットワークをインターネット技術で組み立てて投資額を節約する、という考え方であった。インターネット用の通信機器は、比較的安価に供給できるため、音声の移動体通信にもこれを利用しようとするものである。このことをネットワークのオール IP 化と呼ぶ。このような取り組みが活発化した経緯から IMS (IP Multimedia Subsystem, IP マルチメディア・サブシステム) という国際標準が策定された。これが NGN の起源といえよう。

IMS では、音声を含めたマルチメディアセッションの制御プロトコルとして IP を利用する SIP (Session Initiation Protocol) が採用された。ウェブサイトを開覧するような場合には、URL (Uniform Resource Locator) という半角 30 文字程度のリクエストを送ると、大量のテキストや画像などが返信されてくる。これに

対して通話の場合には、通話元と通話先は、送信するデータ量という観点で対等な関係になる。そのように対等な関係を持つ二者の間でのデータの送受信をスムーズに行うために開発されたプロトコルがSIPである。こうした技術によって携帯電話においても通信網のIP化に向かっている。

2-3

NGNの国際標準化

NGNを実現するための通信規格等は、国際標準化機関であるITU-Tを中心に、各国の通信事業者が参画し、これらのサービスを提供するために商用的な観点で検討されている。図表3はこの規格においてNGNに求められている主要な特徴的機能である。

第三世代携帯電話の標準化を主導してきた機関であるETSI (European Telecommunications Standards Institute)は、移動通信系でのオールIP化を、固定網にも拡張しようと動き出した。それがTISPAN (Telecommunications and Internet converged Services and Protocols for Advanced Networking)という通信規格に関する勧告である。

TISPANに関わる標準化活動で成果を挙げ始めたETSIは、その成果をITU-T (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector)に持ち込み、NGNとして国際標準化に乗り出した。2004年10月に開催されたITU-Tの総会では、NGNの標準化が最重要課題として位置づけられ、その後の国際的な議論の起点となった。

最初のITU-T勧告は「General overview of NGN」と題し、通称「Y.2001」と呼ばれている。2004

図表3 NGNの主な特徴

	特徴
1	IPによるオール・パケット型のネットワーク
2	ブロードバンドの能力、多様なラストワンマイル技術のサポート
3	トランスポート（伝達網）とサービスの分離
4	制御機能とサービスを完全に分離
5	音声を始め、映像やデータなどの多様なマルチメディア・サービスを、積み木のように提供
6	同一のサービスは、ネットワークにどうつないでも、いつでも同一のサービスと感じられるようにする仕組み
7	ネットワークの品質やユーザーの持つ端末機器に応じて、エンド・ツー・エンドでサービス品質（QoS）を保証
8	加入者を特定して、IPアドレスや、IP網でのルーティングを与える仕組み
9	既存ネットワークとの相互運用性を確保
10	多様なサービスプロバイダーに対して制約のない自在なアクセスが可能
11	ユビキタスなアクセスなど、高度なモビリティを実現
12	固定網と移動網に対応して、シームレスな通信を提供
13	緊急時の対応、プライバシーやセキュリティの確保といった、規制などへの準拠

ITU-Tの勧告などを基に科学技術動向研究センターにて作成

年12月に発行されたこの勧告ではNGNの枠組みやアーキテクチャ・モデルが定義されている。この勧告によると、NGNは次のように定義されている。

「NGNとは、電気通信サービスを提供することを目的として、広帯域でしかもQoS(サービス品質)の制御が可能な、いろいろなトランスポート技術を活用したパケット・ベースのネットワークである。NGNは、サービス関連の機能がトランスポート関連の技術と独立しているが、お互いに連携してサービスの提供がなされるネットワークである。またNGNでは、利用者はいろいろなサービスプロバイダーを選択することができ、自由にアクセスできるようになる。さらに、汎用的なモビリティをサポートするため、ユーザーに対して一貫性のある、ユビキタスなサービスを提供することができる。」

この定義は、やや抽象的である。IPへの統合がNGNの本質であることには変わらないが、このITU-Tの「定義」は、各国の通信事業者の置かれている異なる状況を配慮し、含みをもたせてあるといえる。

2-4

NGNに関わる実験の状況

NGNについて先進各国では数多くの試験的な運用が実施されてきた。この状況は多くの資料に取りまとめられているが、OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development)が整理したものを図表4として掲載する¹⁾。NGN実験を実施している国は、オーストリア・カナダ・フィンランド・フランス・ドイツ・イタリア・日本・韓国・ポーランド・英国・米国と分散している。これに象徴されるようにNGNはすでに先進国共通の話題になっており、日本が特に先行しているわけではない。また図表4からは、通信機器メーカーがパートナーとして協力している姿も読み取れる。

NGN実験は二種類に分けられる。第一は通信ネットワーク自体を構築する実験で、サービス品質について検証するなどというのもこの分類に入る。他方はNGNでのサービスについての実験で、フィンランドのエリザコミュニケーション社、韓国のKT社、米国のクエスト社などが後者に取り組んでいることがわかる。

2-5

欧米における NGN の導入状況

英国では、2001年に国内の通信基盤に関するビジョンである「UK Online: the broadband future」が公表された²⁾。2004年9月にはブレア首相(当時)が「2008年までに希望する全ての家庭にブロードバンドを提供する」と表明した。欧州諸国の中では比較的ブロードバンド化に力を入れていると言える。通信事業者としてBTが電話網の完全IP化を表明するとともに、ブロードバンド化に注力している。BTは、今までサービスごとに個別にネットワークを構築してきた。その数は16にも達する。将来的には、これをブロードバンドのIP網に統一する予定である。同社が構築する次世代ネットワークは21CNと呼ばれている³⁾。投資総額は100億

図表4 各国における NGN 関連の実験状況

通信事業者 (国名)	実施した実験の状況	パートナー企業
テレコム オーストリー (オーストリア)	2年間にわたる準備実験	
ベルカナダ (カナダ)	「イノベーションセンター」をはじめとする研究開発センターの運営	ノーテル
テリアソネラ (フィンランド)	NGNとプラットフォームを開発済み	テルラボ
エリザ コミュニケーションズ (フィンランド)	NGNのアーキテクチャとプロトコルの研究 NGNと新しい通信サービス研究開発プロジェクトの開始	
フランステレコム (フランス)	NGN実験の推進	
	通信品質(QoS)のモニタリングシステムの開発	
	固定と移動を相互運用するNGNアーキテクチャの開発	シーメンス
	NGNアーキテクチャの開発済み	アルカテル
ドイツテレコム (ドイツ)	パイロットプロジェクトの構築	アルカテル、シーメンス
テレコムイタリア (イタリア)	テレコムイタリア研究所の開設	
NTT (日本)	レゾナントコミュニケーションネットワーク (RENA)を中心とした研究開発プログラムの推進	
KT (韓国)	NGNテストベッドの構築	ルーセント
	ソフトスイッチ開発プロジェクトの発足	LG
	アプリケーションサービスを試験するプラットフォームの開始	インテル・코리아
ポーランド通信 (ポーランド)	NGN研究開発プロジェクトの開始	フランステレコム
BT (英国)	技術とセールスの対応関係の確立	シスコ
クエスト (米国)	ブロードバンドビジネスとしてのマルチメディアサービスの開発	シスコ

参考文献¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表5 KPNにおけるオールIP化の目標と達成状況

All-IP update

Good progress on objectives of March 2005 strategy

	Objectives March '05	Achievements
Attack	<ul style="list-style-type: none"> Drive new revenue streams 	<ul style="list-style-type: none"> 517k VoIP customers, over 2.0 mn broadband customers 265k DVB-T customers, IPTV capability in place Business VoIP and VoIP Connect launched Applications in narrowcasting, healthcare and security Intended merger with iBasis ADSL coverage 99%, ADSL2+ coverage 57% and VDSL pilots
Defend	<ul style="list-style-type: none"> Maintain leading share in traditional markets Leverage scale advantage through wholesale markets 	<ul style="list-style-type: none"> Successful CPS winback, market share traditional up to 67% Simplified pricing schemes traditional consumer voice New business pricing schemes, stabilizing voice market share Wholesale ADSL launched
Exploit	<ul style="list-style-type: none"> Achieve structurally lower cost base Fixed-Mobile integration 	<ul style="list-style-type: none"> FTE reduction and savings on track to meet overall objectives IT organization centralized, partly outsourced Implementation of Ethernet backbone and platforms for VoIP, IPTV and business applications Directional support from OPTA for All-IP New organizational structure with enhanced customer focus

34p

出典：参考文献^{4,5)}(2006年度末の業績発表資料による)

ポンド(2兆5千億円程度)であるという。この21CN計画に基づいて、南ウェールズ地方からネットワークのIP化が開始された。BTの計画では、2007年から2011年の4年間にわたって、毎週11万5千の利用者を切り替えていく。5500の加入者線交換機は100のメトロノードに接続され、さらにそれが14箇所コア・ネットワークに結ばれるようになっている。

同様の動きはフランスやドイツ、イタリアにもあるが、特にオランダの動きはNGNとはどうあるべきかを考える上で象徴的である。次に、比較的先進的なオランダの状況について図表5をもとに述べる。同国の通信事業者KPN社では、すでにネットワークのオールIP化が開始されている。この計画には、道路に置かれたキャビネットと呼ばれる接続点までを光ファイバーで接続することも含まれ、キャビネットの総数は28000で、投資総額は9億ユーロである。NGN化によってもたらされる運用経費の節減は総額で8.5億ユーロと計算されており、投資効果としてつじつまが合う金額である。また、2007年からKPNは、新規の顧客に対してできる限り光ファイバー接続を提供するという方針をとっている²⁾。NGNの実現には新たな設備投資が必要である。その増分は、長期的には運用経費の節減として回収できる。このようなロジックに立ってKPNはNGN化を進めている。

米国の動きは欧州に比較すると総じて遅い。しかし、いくつかの通信事業者はブロードバンドを通じてテレビ放送を提供するIPTVのサービスに乗り出している。ケーブルテレビよりも多数のチャンネル、デジタル録画機能、ウェブ経由でのデジタル録画の制御などが「売り」になっている。

映像配信と言ったサービスまで提供するか、それともNGNと言

う通信環境を提供するにとどめるか、と言ったビジネスモデルについては、各国の通信事業者で対応が分かれている。現在は利用者の反応を見ながら最適なビジネスモデルを作り出していくという模索の時期にある。

2-6

アジアにおけるNGNの導入状況

アジアで最も熱心にNGNに取り組んでいる国は韓国である。韓国ではNGNは、BcN (Broadband convergence Network、ネットワークのブロードバンド化)と呼ばれている。ブロードバンドインフラ整備に関する政策として、2004年に「u-Korea 推進戦略」が公表され、通信・放送・インターネットの間でシームレスなインフラとして広域統合網BcNを構築し、2010年までに2000万人の加入者への接続を可能にするという目標が掲げられた。

このu-Korea 推進戦略に描かれた計画は挑戦的である。ADSLの1000倍の速度(10メガビット/秒を10ギガビット/秒にする)が目標とされ、光ファイバーによってそれを実現しようとしている。このように韓国がNGNに力を入れるのは、最先端のインターネット技術を一早く手に入れることによって、情報通信の世界市場で優位に立とうという思惑からである。韓国では、NGN関連技術の市場規模は世界全体で1800億ドル/年にいたると試算されている。すなわちネットワーク関連市場全体の5割を越すまでに成長すると想定している。

また、韓国はITU-TにおけるNGNの標準化に対して数多くの寄書を出している。筆者の一人が、Telecommunications Technology

Associationを2007年秋に訪問した際、関係者に直接聞いたところによると、次のような談話を得た。

「韓国政府は多くのプロジェクトに資金を出しているが、その成果評価の指標の一つが、どの程度国際標準化に貢献したか、である。この評価指標があるために、韓国の企業はITU-Tにたくさん寄書を出している。2005年には114件を提出して、そのうち102件が受け入れられた。2006年には150件の提出で、146件が受け入れられている。2007年にはさらに増えるはずである。」

すなわち、政府からの資金提供の成果として国際標準への貢献度を積極的に評価するということである。NGNの国際標準化では欧州が主導権を握っている状況にある。こうした状況を背景とすると、韓国の関係者からのこうした説明は興味深い。

次に、中国では固定通信事業者による総投資額は、2005年時点で年額254億ドルである。この投資によってNGNの整備が進められている。平行して移動通信網でもIP化が進展中である。中国でのビジネスに、外資の通信機器メーカーなどが積極的に乗り出している。また国際海底ケーブルの敷設に関しても外資との協力が進んでいる。

香港の標準化団体(Telecommunications Standards Advisory Committee)のコメントもNGNの推進に積極的である。「NGNは、従来の公共電話網と接続され、徐々に公共電話網の機能を代替する。長期的に見れば、従来の公共電話網は完全に消え去らなければならない」とのレポートを公表している⁶⁾。

シンガポールにおける移動系の次世代ネットワークは、Next Generation National Infocomm Infrastructure (Next Gen NII) と呼称される。シンガポール政府は、2006年に概念設計の提案募集を開

始した⁷⁾。Next Gen NIIは、当面100メガビット/秒、その先には1ギガビット/秒で利用者を接続するという挑戦的なものであった。この高速接続は、当然のことながら、高精細のテレビ放送などの映像通信をもサポートすることを想定したものである。投資総額は12億USドルと計算されている。

インド政府は2005年の段階でNGNの必要性に気づき、それを促

す政策を取り始めた。NGNは通信事業者だけでなく、消費者、特に過疎地の消費者に大きな影響を与えると政府は推測している。2006年には規制当局が、次のような点を強調したレポートを発表している⁸⁾。

「政府は、NGNでのサービス(音声、データ、映像)が全国規模で一つの免許で実施できるようにしたいと考えている。このことに合わせて、過疎地の中小通信事業者が、

その地域でのNGNサービスの免許を得ることができるようにする。相互接続やアンバンドリングの促進によって、全国規模と過疎地のサービスが両立するというのが、規制当局の考えである。」また「過疎地にNGNを普及させるため電波免許の条件を緩和する」との方針を打ち出した。

3 NWGN 研究の動向

3-1

NWGNの基本的な考え方

これまで述べたNGNの構想が既存の通信事業の発展の上に描かれているのに対して、今後各国が推進するNWGNの研究では、まったく新しいネットワークアーキテクチャを研究するとしている。これまで放送網や通信網が経てきた発展の経緯に捕らわれず、白紙からあるべきネットワークの理想を追い求める。その後で現在からの移行を考えるという立場をとっている¹⁶⁾。

新しいネットワークアーキテクチャを研究する上で最も重要な課題は、ネットワークのセキュリティである。現在のインターネットは、その本質的な設計思想においてセキュリティ上の脆弱性を内在している。このことは、ネットワークがオープンな状況で発展してきたことに起因する。NWGNでは、こうした脆弱性を極力排することで、安全・安心な社会基盤となる。このためには、ネットワーク上の住所に対応するアドレスに関する技術体系の見直しや通信主体が移動することに関するより進んだ対応などが必要となる。その際、ネッ

トワークの管理に関して、これまでのインターネットには無いクローズドな要素を入れなければならない。インターネットは、これまでオープンな環境で多岐にわたって発展したといえる。NWGNでは、これまで培われた多様なアプリケーションを包含でき、さらなる進歩にも柔軟に対応できなければならない。このような一見相反する要求に対応するネットワークでは、それを構成する各種基盤技術の選択が柔軟に行え、単純な構造の元で統合できるという特性を備える必要がある。以下では、こうしたNWGNの研究開発への取り組みの動向を述べる。

3-2

日本のAKARIプロジェクト

AKARI(Architecture Design project that illuminates the path to the New Generation Network)プロジェクトは、NiCTが2007年より実施している研究プロジェクトである¹⁶⁾。このプロジェクトの目的は、「2015年に新世代ネットワークを実現することを目指し、そのためのネットワークアーキテクチャを確立し、それに基づいたネッ

トワーク設計図を作成すること」である。以下AKARIプロジェクトの文書を参考にその設計思想の概要を述べる。

まずAKARIプロジェクトでは、ネットワークの設計にあたって、「現在のしがらみに捕われずに、白紙から理想を追い求める。」としている。これは、本稿の冒頭に述べた電話・データ通信・放送がこれまで経てきた歴史的発展の経緯に捕らわれず、社会インフラとしてあるべきネットワークのグランドデザインを検討する、ということである。図表6にAKARIプロジェクトが掲げる研究目標を列挙する。

これらの研究の目的は、「ネットワークアーキテクチャ」を設計することに帰着される。「アーキテクチャ」とは元来、建築学の用語であり「ネットワークの基本的な構造」というほどの意味である。AKARIでは、理想とするアーキテクチャは、次の三つの原則に基づいて構成されるべきであるとしている。

- (1) KISS (Keep It Simple, Stupid)
- (2) 持続的な進化可能原則
- (3) 現実結合原則

こうした考え方は、後述する海外のNWGN研究プロジェクトに

においても重視されており、同様の方向性のもとで研究が進められている。情報ネットワークの現状を前提とし、今後の発展を展望すれば、欠くべからざる要因と思われる。それぞれについて中身を説明する。

**(1) KISS 原則
(Keep It Simple, Stupid)**

“Keep It Simple, Stupid”とは、インターネット開発の黎明期にある開発プロジェクトのリーダーが部下に指示した言葉であると言われている。ネットワークを構成するルータなどの機器の仕様が複雑化すると、特定技術をもとにベンダーが市場を囲い込むということが生じかねない。この言葉の意味は技術仕様を極力簡潔に保つことで、ネットワーク環境の構築のために「オープンな参加」の可能性を保障するという考え方を表している。

多様性や拡張性、さらには信頼性を増すためにも、KISS 原則はネットワーク全体にすべてに通じる大原則でなければならない。ネットワークが提供する機能の高度化を狙えばアーキテクチャの複雑化を招きかねない。この原則は、安易な複雑化を戒めている。AKARI プロジェクトでは、この原則を堅持するために、「エンド・ツー・エンド」、「結晶合成」、「共通レイヤの原理」と呼ばれる研究開発上の原理的思考方を導入するとされている。

(2) 持続的な進化可能原則

インターネットが商用に利用されるようになった 1990 年代前半以降に登場したアプリケーションの多様性の豊かさを振り返ると、この原則の重要性はよく理解できる。例えば携帯電話での Web ページの閲覧などは、携帯電話が登場した当初は想定されていなかったアプリケーションである。

AKARI プロジェクトの文書によると「新世代ネットワークアーキテ

図表 6 AKARI プロジェクトの研究目標

- (1)ペタビット級バックボーン、10G FTTH、e-Science
- (2)1000 億デバイス、M2M、100 万放送局
- (3)競争原理とユーザ指向
- (4)頼れる(医療、交通、緊急)、99.99%(フォーナイン)
- (5)安全—安心(プライバシー、金融、食品追跡、災害)
- (6)豊かな社会、障害者、高齢化社会、ロングテール
- (7)地球環境・人間社会モニタリング
- (8)通信放送融合、Web2.0
- (9)経済的インセンティブ(ビジネス・コストモデル)
- (10)エコロジー、持続社会
- (11)人類の可能性、ユニバーサルコミュニケーション

参考文献¹⁶⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

クチャでは、ネットワークが進化し発展するために必要な持続可能なネットワークを設計することが必要となろう。ネットワークはシンプルな構造にし、エンドノードやエッジノードにおいてサービスの多様性を確保することが重要である。」とされている。また、「これまでのインターネットにおいてもこの原則が保たれてきた。アドレスの体系を共有しつつ、その一部分である自らが構築するネットワークは独自に運営できたことが多様な発展を生み出す柔軟な環境を提供してきたと言える。新しいネットワーク環境においても斬新なアプリケーションの開発が促されるような拡張性のあるアーキテクチャであるべきだ。」とも書かれている。

AKARI プロジェクトでは、「自己組織型ネットワークの設計」、「ロバストな大規模ネットワークの構築」、「トポロジが変動するネットワークのための制御」「スケーラブルな分散型制御」「オープン性」といった観点からこの原則に則った開発を進めるとされている。

(3) 現実結合原則

現在のインターネットにおける技術的課題の多くは、ネットワークアドレス空間上に存在する「エンティティ (通信者)」と現実社

会のそれと乖離してしまうことによって生じると言える。端的な事例は、不正な電子メールの送信元を偽造することができ、犯人を特定しにくくなっているということである。また、アドレスの運用管理の観点から、近い将来に利用が拡大すると考えられるセンサーネットワークの構築において、物理アドレッシングと論理アドレッシングの分離が必要になる。特定の場所で大量のアドレスが利用され、利用期間が短期であるような場合が想定される。このとき、多数の通信デバイスの認証やトレーサビリティの要求を満たす必要がある。そこで、「物理アドレッシングと論理アドレッシングの分離」、「双方向認証の実現」、「追跡可能性の付与」が重要な研究課題であるとされている。

3-3

米国の GENI プロジェクト

GENI(Global Environment for Network Innovations)は、米国 NSF(National Science Foundation)が研究資金を出資し、次世代ネットワークとその応用について大規模な研究を実施するプロジェクト

である¹⁴⁾。2007年秋からの5年間で4億ドル規模の研究資金を次世代情報ネットワークの研究に投資する。

約1年半にわたる実施計画に関する議論を集約し、2007年4月25日付で「研究計画」「システム要求要件」「機能設計」「実装計画」などからなる「プロジェクト実行プラン」が公開され、同年9月には5年間の研究プロジェクトが開始された。GENIでは、センサー、光エレクトロニクス、システムオンチップ、大規模高速演算、大規模データベース、新アルゴリズム等の研究・開発を通じて情報ネットワークの将来像を既存のインターネットの枠組みに捉われないうで研究する。また、GENIの物理層は、無線網等を含む多様なネットワーク機器から構成される。一方、アプリケーションではソフトウェアの管理機構のもとでネットワークを利用する実験が相互運用できるようにする。これを可能とするために、実験や研究開発を行うサブプロジェクトに関して、次の四つのキーワードが重要である。

①サブプロジェクトのコンポーネントは、いかなるネットワーク環境にも対応できるよう「プログラム可能」であること。②複数のコン

ポーネントを実装する「仮想化」ができること。これにより広範囲で連続性のある運用を想定した実験が可能となる。③末端の端末やユーザーが「シームレス」に実験に参加できること。実運用段階の実装を実現することで、漸進的な改善が可能となる。④コンポーネントは「モジュラー型」の構造を持ち、新しい技術の追加削除を柔軟に行えること。これはダイナミックな運用に耐えるためである。

GENIプロジェクト立案の中心的な役割を演じたのは、NSFにおけるCISE(Computer & Information Science and Engineering)と呼ばれる部局であった。ここは、計算機科学、通信工学、情報科学、情報工学の振興を目的としている。CISEのもとで、情報ネットワークと分散システムの学者らがワークショップを重ねて議論を行ってきた。

3-4

欧州のEuro-NGI プロジェクト

欧州では、科学技術基本計画にあたるFP6(6th Framework Programme)の主要プロジェクトの一つとして、Euro-NGI

(Next Generation Internet)と呼ばれるプロジェクトが、2003年より実施され、後継のFP7の枠内でもEuro-FGI(Future Generation Internet)という名前で継続して実施されている¹⁵⁾。

このプロジェクトには、欧州の主要研究機関が国を超えて参画している。Euro-NGIの計画書によると、図表7に掲げる10の目標設定のもとで実施されている。

研究プロジェクトのマネージメントの観点から、欧州の最大の課題は、領域内の研究活動を無駄なく総合的に展開し、研究成果の集約を図ることである。このために「仮想的な研究センター(Virtual Center of Excellence)」を構築し、そこに各地の研究で得られた知識の集約を図ろうとしている。そのために遠隔地域間の会議システムやWebを介した専門家向けのチャットルームの開設などを駆使して効果的な研究者のネットワーク形成と知識の共有化を図っている。もちろん実際に会う交流の重要性が忘れられているわけではなく、博士課程の学生指導を異なる研究機関に所属する教授が指導するなど、大学院レベルの研究において相互交流が実行されている。

図表7 Euro-NGI計画書による目標設定

- 1) 欧州で進行中の研究から得られる知見の蓄積を統合的に管理・推進する。
- 2) 参加各国の協調のもとで強力に研究を推進する。
- 3) 研究手法や実験のためのプラットフォーム、ツールなどを共有する。
- 4) 研究会の頻繁な開催。
- 5) 知識マネージメント等を導入し、研究者間の情報交換を支援する。
- 6) 博士課程学生と研究者の流動性の確保。
- 7) 欧州共通の大学院の設置。
- 8) サマースクールを通じた若手研究者の育成と情報交換。
- 9) 優れた研究成果の公開と情報発信。
- 10) 産業界との協力体制の強化。

参考文献¹⁵⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

4 むすび

次世代のネットワークの研究開発に関する課題を検討するために、もう一度、図表6に挙げた日本のAKARIプロジェクトの研究目標をみてみると、純粋に技術的な研究目標と考えられるものはせいぜい(1)と(2)であり、大半は制度上の改革や市場における競合によって洗練されることが想定されるような中身である。

本稿では、通信分野の次の技術進化を牽引するのは、技術の観点からは、ネットワークのIP化である点を述べてきた。しかし、IP化へのもっとも強いニーズを持っているのは、インフラへの投資を最適化したいと考える通信事業者である。利用者にとっては、広帯域化や帯域保障などが宣伝されているが、一般ユーザーにとってはIP化へ移行することの利点が分りにくいというのが実際のところである。

図表6中の非技術要因によって左右される目標((3)～(11))は、現実社会でのアプリケーションに強く関係がある。これらの研究目標を達成するためには政策上の意思決定やビジネスとしての市場性の検討などのアプローチが不可欠と思われる。

例えば、(8)の「通信放送融合」と言う問題を取り上げて見れば、帯域保障された通信サービスが適正な価格で提供されれば、インターネットが現在のテレビの機能を代替できるばかりではなく、新たなサービスやビジネスが成立する可能性がある。通信放送融合は、技術的な課題というよりは政策課題である。

インターネットと言う社会基盤はすでに多くのグローバル企業を生み出してきた。今後、帯域保障やユビキタスという視点が加わることで使用者の利便性が増すだけでなく、現時点では想像し得ない新た

な産業を生み出す可能性もある。

今後の情報ネットワークのあり方を議論するために必要なことは、エンジニアのエキスパートの知見を問うばかりでなく、広く他分野の専門化の見識を求めることが必要である。多くの分野におけるイノベーションは、ネットワークという社会基盤抜きには考えられない。そこで、NWGNが他分野の研究開発に及ぼす影響の検討や、幅広い分野のイノベーションを生み出す基盤の役割を担うための方策を議論することが求められる。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、品川萬里科学技術政策研究所科学技術動向研究センター客員研究官には、貴重なご討論と関連資料の提供をいただきました。ここに記して感謝の意を表したいと存じます。

参考文献

- 1) Working Party on Telecommunication and Information Services Policies, "Next Generation Network Development in OECD Countries," OECD (2005) : <http://www.oecd.org/dataoecd/58/11/34696726.pdf>
- 2) UK Cabinet Office, "UK Online: the broadband future," : http://www.connectingsw.net/uploads/ukonline_1.pdf
- 3) "What is 21CN?," : <http://www.btplc.com/21CN/Whatis21CN/index.htm>
- 4) KPN, "4th Quarter Results, 2006," : http://www.kpn.com/upload/1863237_9475_1170923304042-KPNQ406a.pdf
- 5) KPN, "Annual Report 2006," : http://www.kpn.com/upload/1786687_9475_1173767749534-KPN_Annual_Report_and_Form_20-F_2006.pdf
- 6) Telecommunications Standards Advisory Committee, "Overview of Next Generation Network," : <http://www.ofta.gov.hk/en/ad-comm/tsac/ts-paper/ts2005p13.pdf>
- 7) Computer World, "Next Gen NII," : <http://www.computerworld.com.my/ShowPage.aspx?pagetype=2&articleid=3614&pubid=3&issueid=86>
- 8) Telecom Regulatory Authority of India. : <http://www.trai.gov.in/>
- 9) 「NGN」の五里霧中、週刊ダイヤモンド(2008年3月1日)
- 10) NTT技術ジャーナル : <http://www.ngs-forum.jp/library/journal.html>
- 11) 清貞智会、山田肇「移動通信システムの研究開発動向」科学技術動向、No.1、2001年4月号
- 12) 小笠原敦「ブロードバンド時代の次世代コンテンツ配信技術」科学技術動向、No.31、2003年10月号
- 13) 藤井章博「インターネットルータの技術動向—次世代通信インフラの整備に向けて—」科学技術動向、No.33、2003年12月号

- 14) GENI(Global Environment Network Innovations) ウェブサイト：<http://www.geni.net/>
 - 15) Euro-NGI ウェブサイト：<http://www.eurongi.org/>
 - 16) AKARI プロジェクトウェブサイト：<http://akari-project.nict.go.jp/>
-

執筆者



藤井 章博

客員研究官

法政大学 理工学部 応用情報工学科 准教授



工学博士。分散コンピューティングと通信プロトコルの研究に従事した後、電子商取引システムの構築プロジェクトを実施。現在、情報通信技術のイノベーションが経営や政策に与える影響に興味を持つ。



山田 肇

客員研究官

東洋大学 経済学部 社会経済システム学科 教授



慶應大学大学院工学研究科修士課程修了。同大学より工学博士号。マサチューセッツ工科大学より技術経営修士号。NTTにて研究直接業務を推進後、研究戦略立案などのマネジメント業務に従事。2002年より東洋大学経済学部教授。

真のバルク GaN 単結晶の 必要性と研究開発動向

皿山 正二
客員研究官

1 はじめに

現在、シリコン(Si)半導体デバイスは、パーソナルコンピュータ(PC)・テレビ(TV)・携帯電話などの各種家電製品や自動車などの民生品を始め、電車・工場制御機器などの産業分野まで、幅広くほとんど全ての電子機器に搭載されている。Si半導体はMOS型トランジスタやバイポーラトランジスタなどとして、主にメモリやCPU(中央演算処理装置)などの電子デバイスとして用いられている。

一方、ガリウムヒ素(GaAs)^{注1)}やインジウムリン(InP)^{注1)}に代表される化合物半導体は直接遷移型であることから発光デバイスに適しており、半導体レーザー(LD: Laser Diode)や発光ダイオード(LED: Light Emitting Diode)などの光デバイスに応用されている。LDは光通信やCD(コンパクトディスク)・DVDなどの光ディスクに、またLEDは近赤外波長域での家電製品などのリモコンや表示用赤色LEDなどの身近な製品に使われて

いる。化合物半導体の別の特徴として、高キャリア移動度や低リーク電流・低容量があり、高周波トランジスタとしても携帯電話や衛星放送受信機などにも広く応用されている。また、炭化ケイ素(SiC)などは高出力デバイスにも応用されている。

化合物半導体のなかでも、窒化ガリウム(GaN)を中心とするGaN系半導体^{注2)}材料は直接遷移型のワイドバンドギャップ半導体であることから、SiやGaAsなどの半導体材料では実現できない紫外～青色～緑色の発光デバイスや高速大電流トランジスタに適した半導体である。SiやGaAsなどの半導体は1940年代から1970年代にかけて盛んに研究開発がなされて実用化に結びついた経緯があるのに対し、GaN系半導体は結晶成長の困難さから研究開発に長い時間を要し、なかなか実用化されなかった。GaN系半導体は1993年に初めて青色LED(pn接合型)が商品化さ

れ、その後、白色LEDや青紫LDなどが実用化された。現在、白色LEDは携帯電話を始め種々の液晶ディスプレイのバックライトや懐中電灯・自動車のヘッドライトとして実用化されており、今後は市場の大きな一般照明などにも展開されようとしている。また、紫外～青色LEDは光触媒用光源として脱臭装置などに、青色～緑色LEDは交通用信号機や各種インジケータなどに用いられている。LDとしては青紫色LDがブルーレイディスク用光源として実用化されており、ハイビジョン映像の録画再生に用いられている。また、電子デバイスとしては、将来の携帯電話基地局用の高速高出力トランジスタやハイブリッドカーのインバーター用スイッチングデバイスなどで実用化を目指した開発が活発に行われている。このようにGaN系半導体デバイスは、我々の日常生活に必要な不可欠なデバイスとなってきた。

注1：本稿では、GaAs系とは、GaAsとAlAsの混晶半導体であるAlGaAs、あるいはInGaAsなどを含む。また、InP系も同様に混晶半導体を含む。

注2：GaNは、Ⅲ族窒化物半導体のひとつ。本稿では、AlNやInNのⅢ族窒化物半導体およびそれらの混晶半導体も含めてGaN系半導体と表現し、これらの材料を用いたデバイスをGaN系半導体デバイスと表現している。

(独)科学技術振興機構が作成した「電子情報通信分野 科学技術・研究開発の国際比較 2008 年版」¹⁾によると、日本の GaN 系半導体デバイスは、海外に比較して研究・技術・産業のいずれも、“非常に進展”あるいは“進んでいる”と評価されている。しかし、近年のトレンドとしては“現状維持”であり、海外のうちでも特に中国・韓国・台湾は“上昇傾向”とされており、これらの国の追い上げにあっている。

基板材料としては、Si 半導体および GaAs・InP などの化合物半導体に関しては、日本がトップシェアを握っており、国際競争力を有している。しかし、SiC のみは米国が主導権を握っている。一方、本稿で詳しく述べるように、GaN については基板材料の製造技術が確立していない。半導体基板材料において、その製造技術が確立していない残り少ない材料である GaN の結晶成長技術で主導権を握ることは、今後の

GaN 系半導体デバイス技術全体に対して重要な意味をもつと考えられる。本稿では、GaN 系半導体デバイスにおいて GaN の「真のバルク単結晶」を研究開発する必要性と、その研究開発の現状および課題を述べる。本稿でいう「真のバルク単結晶」とは、Si・GaAs・InP ではすでに得られているような、結晶欠陥(転位)が少なく、任意の結晶面を切り出すことが可能なバルク結晶を意味する。

2 GaN 系半導体におけるヘテロエピタキシャル技術の限界とバルク結晶の必要性

2-1

GaN 系半導体の適応領域

GaN 系半導体材料の研究開発の歴史は古く、GaAs など他の化合物半導体と同様に、1960 年代から気相成長法による結晶成長の研究開発が行われた。そして、同分野における科学的ブレークスルーの二大トピックスと言える 1986 年の低温バッファ層²⁾による結晶性の向上と 1989 年の p 型伝導の発見³⁾とを経て、1993 年の青色発光ダイオードの上市に至った。2つの科学

的ブレークスルーは、いずれも名古屋大学(当時)の赤崎勇教授らによって成された成果である。その後、気相成長法による結晶成長技術開発が大きく進み、LED や LD を中心に実用化され、現在は我々の日常生活に密接に関わっている。GaN 系半導体と他の半導体との物性比較と、その物性を活かしたデバイスについて図表 1 に示す。

発光デバイスとしては、直接遷移型であることとバンドギャップが広いことから、紫外～可視域の発光デバイスが実現している。GaN、AlN、InN の混晶を組み合わせることで、紫外から赤外域の

発光デバイスが実現される可能性もある。これを具体的に図示すると図表 2 のようになる。GaN 系半導体の発光デバイスとしてのポテンシャルは、紫外域の 200nm から光ファイバーで用いられる 1500nm 近くまでの波長域となる。このうち、現在、研究開発レベルの発光デバイスとして、LED で 210 ~ 550nm、LD で 342 ~ 488nm の波長域がそれぞれ実現されている。市販されているものでは、LED で 365 ~ 520nm、LD で 400 ~ 450nm の波長域である。しかし、残りの波長領域はポテンシャルはあるものの実用的には未

図表 1 各種半導体材料の物性値と GaN 系半導体の特徴

半導体材料	Si	SiC (4H)	ダイヤモンド	GaAs	Ⅲ族窒化物(GaN系)半導体			特徴を活かしたデバイス
					GaN	AlN	InN	
遷移型	間接	間接	間接	直接	直接	直接	直接	 <ul style="list-style-type: none"> ・紫外～可視～赤外域の発光デバイス ・パワートランジスタ ・高周波トランジスタ
バンドギャップ (eV)	1.1	3.3	5.5	1.4	3.4	6.2	0.6~0.7	
電子移動度 (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	1500	1000	1800	8500	1200	-	4000	
絶縁破壊電界 (MV cm ⁻¹)	0.3	3.0	4.0	0.4	3.3	-	2.0	
飽和電子速度 (10 ⁷ cm s ⁻¹)	1.0	2.0	2.5	2.0	2.5	2.0	4.2	
熱伝導率 (W cm ⁻¹ K ⁻¹)	1.5	4.9	20.9	0.5	2.1	2.9	0.8	

参考文献³⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

踏領域であり、残りの波長域も利用するためには今後の技術革新が必要である。

一方、図表1によると GaN 系半導体は、その電子移動度・絶縁破壊電界・飽和電子速度・熱伝導率において優れており、高周波高出力トランジスタ用材料としても大きな可能性がある。図表3に各種半導体の電子デバイスとしての適応領域を示す。GaN 系半導体は他の半導体材料では実現できない高周波高出力領域でのポテンシャルをもつ。

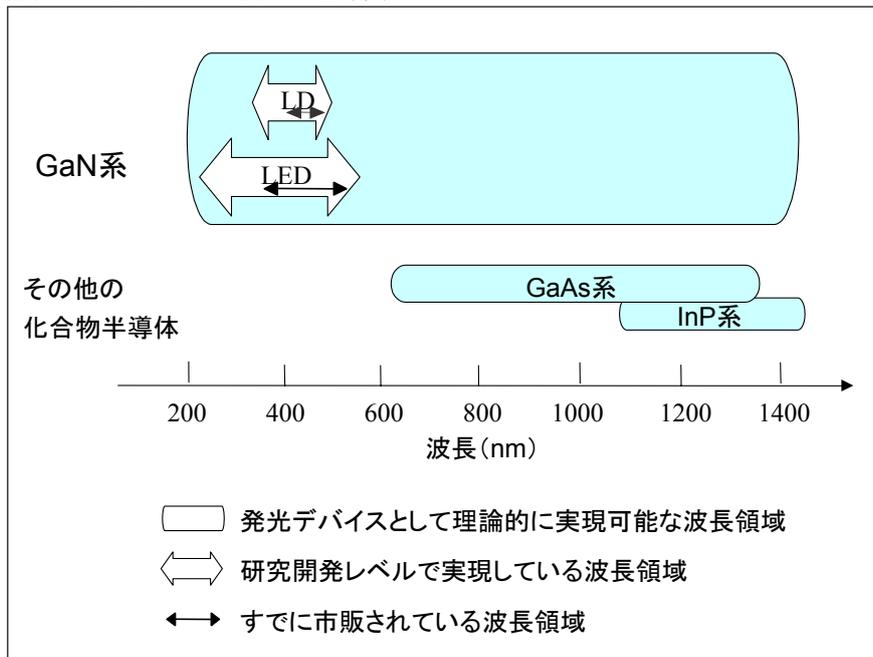
また、GaN 系半導体は、GaAs に含まれる As のような有害物質を含有しないため、環境親和性も高い。Ga と N は元素枯渇の懸念が無く、これも将来のデバイス材料として有望な点である。

2-2

ヘテロエピタキシャルの適応アプリケーションとその限界

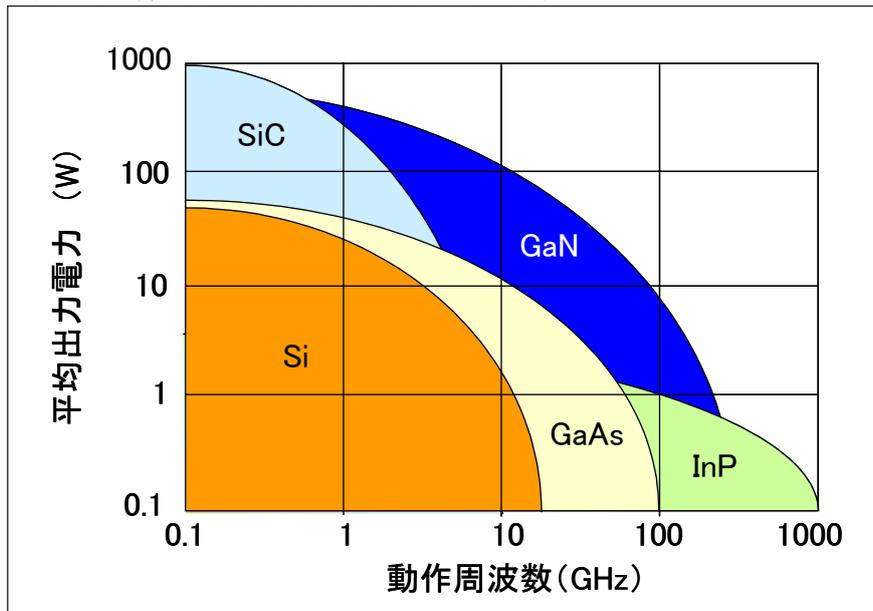
Si・SiC・GaAs・InP は、いずれもバルク結晶が存在し、結晶をエピタキシャル成長^{注3)}させる場合にはそれぞれ Si 基板・SiC 基板・GaAs 基板・InP 基板が用いられている。このように同材料の基板を用いた結晶成長を「ホモエピタキシャル成長」と言う。しかし、GaN 系半導体ではバルク結晶が得られていないために、デバイス作製のための結晶成長の際には異種材料の基板が用いられている。このことが、GaN 系半導体が優れたポテンシャルを発揮できない大きな壁となっている。現在、GaN 系半導体デバイスは、サファイア (Al₂O₃) や SiC の基板上に GaN 系半導体薄膜を結晶成長させることにより作製されている。このような異種(ヘテロ)材料の基板上にエピタキシャル成長させる結晶成長

図表2 発光デバイスとしての適用波長



科学技術動向研究センターにて作成

図表3 高周波・高出力電子デバイスとしての適応領域



科学技術動向研究センターにて作成

を、「ヘテロエピタキシャル成長」と呼んでいる。図表4に、GaN 系半導体結晶の形成方法における、各種のヘテロエピタキシャル成長とホモエピタキシャル成長の違いを示す。

ヘテロエピタキシャル成長した結晶には、結晶欠陥(転位)や有極性面の問題がある。まず、結晶成長する材料と基板材料が異なることから、熱膨張係数差と格子定数差により転位が多数発生し⁴⁾、出

力や寿命などのデバイス性能に悪影響を与える^{5) 6)}。また、異種基板との結晶面方位の関係から自発分極が発生し、発光効率向上の阻害要因になる。

注3：エピタキシャル (epitaxial) は、結晶軸が揃って上方向に結晶成長すること。epilは「その上」、taxy はギリシャ語の「整列した」という意味がある。エピタキシャルをエピ(epi)と略すこともある。

図表 4 GaN におけるエピタキシャル結晶成長とそのアプリケーション

	ヘテロエピタキシャル			ホモエピタキシャル
	タイプA	タイプB	タイプC	タイプD
	<p>転位 GaN系薄膜 基板 (サファイア, SiCなど)</p>	<p>転位 GaN系厚膜 基板 (サファイア, GaAsなど) マスク(SiO₂など)</p>	<p>転位 GaN系厚膜基板 剥離 または研磨 基板 (サファイア, GaAsなど)</p>	<p>有極性面(0001) 無極性面(1100) 任意の面を切出して 基板に使用 GaN系薄膜 GaN基板</p>
長短所	<ul style="list-style-type: none"> ・大面積～インチクラス ・結晶欠陥(転位): ～10^9cm^{-2} ・有極性:C(0001)面による自発分極 	<ul style="list-style-type: none"> ・大面積～インチクラス ・結晶欠陥(転位): ～10^7cm^{-2} ・有極性:C(0001)面による自発分極 	<ul style="list-style-type: none"> ・大面積～インチクラス ・結晶欠陥(転位): ～10^5cm^{-2} ・有極性:C(0001)面による自発分極 ・高コスト 	<ul style="list-style-type: none"> ・高品質 ・任意極性面 ・結晶サイズ:mmオーダー
アプリケーション	近紫外～緑色LED 白色LED(擬似白色)	青紫色LD(低パワー)	青紫～青色LD	未実現

科学技術動向研究センターにて作成

LEDに実用化されている GaN 結晶は、サファイア基板や SiC 基板上で、有機金属気相成長 (MOVPE: Metal Organic Vapor Phase Epitaxy) 法により、1000℃ 以上の温度で数 μm 膜厚の GaN 系薄膜を成長させたものである (図表 4 のタイプ A)。しかし、基板と GaN 系材料の格子定数差と熱膨張係数差により、 10^9cm^{-2} 以上の高密度の転位発生が避けられない。したがって、タイプ A の結晶では、紫外域への波長領域の拡大・高出力化・LD 化などの展開を図ることができなかった。そこで、ヘテロエピタキシャル成長による転位密度低減の研究開発が行われ、サファイア基板上に GaN 結晶を気相成長 VPE (Vapor Phase Epitaxy) 法により横方向選択成長 (ELO: Epitaxial Lateral Overgrowth) させて転位密度を 10^7cm^{-2} 台に低減させることができた⁷⁾ (図表 4 のタイプ B)。その後、このタイプ B を発展させて、GaAs 基板⁸⁾ や

サファイア基板上に数 $100\mu\text{m}$ の GaN 厚膜を結晶成長させた後に、GaN 結晶を基板剥離することにより、転位密度が 10^5cm^{-2} 前後の GaN 厚膜基板を得ることもできた^{8, 9)} (図表 4 のタイプ C)。このタイプ C では局所的に 10^5cm^{-2} 以下の転位密度を実現している成果もある¹⁰⁾。その低転位領域幅は $500\mu\text{m}$ 前後と限定されているが、それでもタイプ C を基板として用いてブルーレイディスク用の青紫色 (405nm) LD が実用化されている。この応用では、LD の活性層 (発光領域) が数 μm 幅と狭く、それをタイプ C 基板の低転位領域にアライメントさせることで LD が作製できるからである。しかし、LED やトランジスタのように mm オーダーのサイズを必要とする応用には不十分である。なお、VPE 法でのタイプ B とタイプ C は日本発の技術であり、現在、青紫色 LD 用基板としては日本企業がトップシェアを有している。

一方、基板との格子定数差の関係から、通常のヘテロエピタキシャル成長面は、結晶面方位が (0001) 面 (C 面) となる。この C 面は極性を有する結晶面であるために、自発分極が生じる。自発分極が生じると、デバイスに注入したキャリアが効率良く発光やトランジスタ動作に寄与しないという問題が生じる。このような観点から言えば、根本的にヘテロエピタキシャル成長の結晶には性能向上の限界がある。

日本の化合物半導体基板メーカーである住友電気工業(株)や日立電線(株)は、タイプ C の厚膜 GaN 基板を量産あるいはサンプル出荷している^{8, 9)}。このうち、住友電気工業(株)製の GaN 基板は青紫色 LD 用基板として実用化されている。GaAs 基板上にピットを作りながら転位を集約する方式により、数 $100\mu\text{m}$ 幅の低転位密度領域を作ることに成功しており¹⁰⁾、基板サイズも 2 インチを実現している。一方、日立電線(株)の方式では基

板剥離方法に特徴があり、サファイア基板上に GaN 薄膜を MOVPE 法により結晶成長させ、その上にチタン(Ti)薄膜を蒸着した後にさらに GaN 厚膜を数 100 μm 気相成長させる。そうすることで、Ti 膜の付近でボイドが発生し、取り出した際にこのボイド部分が熱剥離して、GaN 厚膜基板が形成できる。転位は平均的に 10⁶cm⁻² 前後であるが、この方式では基板サイズφ 3 インチのものが得られている。しかし、いずれにしても、得られた結晶の主面の面方位は C 面(0001)であるため極性があり、まだ結晶品質やコストについても課題が残る。特にコストについては、タイプ C は犠牲となる基板が必要なことから、φ 2 インチサイズ 1 枚で数 10 ~ 100 万円の高価格になる。

このように、現時点ではいずれの基板メーカーも実現性の高い気相成長法を用いているが、「真のバルク単結晶」を実現できているわけではない。前述したように、Si や GaAs は転位フリーの完全結晶が得られており、任意の面を切り出して基板として用いることができ

ることから、その上にホモエピタキシャル成長させて、種々の応用を実現できる。したがって将来的には GaN においても、転位フリーの「真のバルク単結晶^{注4)}」(図表 4 のタイプ D)の実現が待たれる。

2-3

「真のバルク単結晶」実現によるアプリケーションの拡張とその社会的インパクト

GaN 系半導体で「真のバルク単結晶」が実現することで、図表 5 に示すデバイス特性の向上とアプリケーションの拡がり期待できる。

GaN 系半導体で「真のバルク単結晶」が実現した場合、LED および LD のような発光デバイスにおいては、欠陥密度低減と無極性面の活用により、高出力化・高効率化・波長領域の拡大が期待できる。LED を用いた照明では、高効率化・高演色性による一般照明器具としての普及とともに、新規な特殊照

明の開拓も考えられる。現在、液晶ディスプレイのバックライトなど一部の照明用途に用いられている白色 LED が高効率化・低コスト化することで、白熱電球・蛍光灯・ハロゲンランプなどの一般照明や特殊照明が本格的に LED 照明に置き換わる可能性がある。LED 照明の普及による省エネルギー効果(年間電力削減効果)は約 20% にも達するとの試算もある^{注5)}。

LD としては、ブルーレイディスク用光源として青紫色(405nm)数 10 ~ 200mW 程度の光出力のものが市販されている。これは前述したように、タイプ C の有極性基板の局所的に転位密度が小さい領域に活性層をアライメントすることで、レーザ寿命を確保している。将来、タイプ D の基板が実現すれば、高品質で転位の分布やバラツキを考慮せずに LD 構造を製作することができるため、性能向上と低コスト化を両立させることができる。さらには、無極性面を用いることで長波長化も可能となり、緑色(> 500nm) LD 実現にも寄与できる。現在、緑色レー

図表 5 真のバルク単結晶(タイプ D) が実現することで拡がるアプリケーション

デバイス	特性向上	拡がるアプリケーション	社会的インパクト:省エネ効果 ()内はCO ₂ 削減量
LED	高出力化 波長領域の拡大 ・短波長化 ・長波長化	・照明(ポスト蛍光灯、ハロゲンなど一般照明~特殊照明)の高効率化、高演色性 ・光触媒 ・医療(殺菌)用途	LED照明による削減電力 ¹¹⁾ ・2020年:124億kWh/年(686万t/年) ・2030年:187億kWh/年(1039万t/年)
LD	同上	・光ディスク(次世代DVD)の高速書き込み ・レーザディスプレイ ⇒携帯プロジェクター レーザTV	レーザTVによる削減電力 ・2012年:145億kWh/年(802万t/年)
電子デバイス	横型トランジスタ(FET) ・大出力化(~100W) ・高周波化 縦型デバイス (IGBT、サイリスタなど) ・低抵抗化 ・ノーマリーオフ	・高速大出力トランジスタ⇒移動体通信の高速化、大容量化、基地局システムの小型化、低消費電力化 ・パワートランジスタ⇒インバータの高効率化による産業用機械、ハイブリッドカー、電気自動車の高効率化	GaNデバイスによる削減電力 ¹¹⁾ 携帯電話基地局送受信増幅器+汎用インバーター ・2020年:98億kWh/年(541万t/年) ・2030年:202億kWh/年(1121万t/年)

科学技術動向研究センターにて作成

ザは第二高調波(SHG: Second Harmonic Generation)を用いた波長変換デバイスが一般的であるが、小型化・低コスト化に課題が残っている。ここでも、GaN系デバイスで緑色LDが実現することで、携帯プロジェクターやレーザーTVなどの小型化・低コスト化が可能となる。また、現在TVの主力となりつつある液晶TVやプラズマTVでは大画面化が進展しており、それに伴い消費電力が増大している。低価格のレーザーTVが実現すれば、大画面化しても同サイズの液晶TVやプラズマTVに比較してエネルギー消費は1/2~1/3となり¹³⁾、大画面化と省エネルギー化の両立が可能とな

る。(下記コラム参照)

電子デバイスにおいて、現在はタイプAで横型デバイス^{注6)}であるHFET(Hetero-junction Field Effect Transistor)が作製されて、GHzまでの高周波デバイスとして携帯電話などの移動体通信基地局用として実用化されている。しかし今後、さらなる移動体通信速度の高速化・大容量化のために、大出力でミリ波帯(30~100GHz)に対応したトランジスタが必要となる。図表3に示したように材料物性からはGaNが最も適しているはずであり¹¹⁾、システムの小型化・低消費電力化につながる。一方、縦型デバイス^{注6)}は、Siデバイスのインバーターが産業用途や

ハイブリッドカーに用いられているが、これらも、将来はGaN系デバイスに置き換えることで、システムの高効率化が図れ、その結果、省エネルギーや自動車の燃費向上が実現すると考えられている。GaN系電子デバイスを携帯電話基地局の送信機用増幅器と産業用インバーターに応用した場合の省エネルギーによる削減電力量は、約100億kWh/年(2020年)と試算されている¹¹⁾。

以上のように、GaN系半導体は発光デバイスや電子デバイス(トランジスタ)として、省エネルギーや地球温室効果ガス排出削減に貢献する鍵となりうる材料である。

コラム「レーザーTVによる大画面化と省エネルギー化の両立」

現在市販されているTVはプラズマと液晶が一般的であり、大画面化が進んでいる。このうち、50インチ以上の大画面TVは2012年にはプラズマ約1,260万台、液晶約2,040万台との試算がある¹⁴⁾。50~55インチクラスのプラズマTVや液晶TVの消費電力は500W前後(パナソニック社TH-50PZ800:585W、ソニー社KDL-55XR1:480W)であり、平均的なTV視聴時間を1日当たり4時間¹⁵⁾とすると、50インチ以上のTVの年間総消費電力量は251億kWhとなる。これがレーザーTVのような200Wの低消費電力のTVに置き換えられた場合には、年間154億kWhの省エネルギーとなる。これは日本の一般家庭における年間消費電力量5,650kWh¹⁶⁾で換算すると約273万世帯分に相当する。また高演色性もレーザーTVの特徴である。

注4: GaNにおいてはタイプCをバルク結晶と呼んでいる場合もある。本稿では、転位フリーあるいはヘテロエピタキシャル技術では実現できない低転位密度($\leq 10^3\text{cm}^{-2}$)で、かつ、任意の結晶面を切り出すことができるバルク結晶を「真のバルク単結晶」と呼んでいる。

注5: 2030年に屋内照明のLED普及率が約30%となった場合に、省エネルギー効果(年間電力削減効果)としては、2005年の照明器具を使用した場合の約20%にあたる200億kWhを削減できるとの予測がある¹²⁾。

注6: トランジスタで言う横型と縦型は、それぞれキャリア(電子・正孔)が横方向・縦方向に移動して動作することを意味する。

3 真のバルク単結晶成長技術の現状と課題

3-1

真のバルク GaN 単結晶の技術動向

ここで述べる「真のバルク GaN 単結晶」とは、前述したように転位フリー、ないしはヘテロエピタキシャル技術では実現できない低転位密度($\leq 10^3\text{cm}^{-2}$)で、かつ任意

の結晶面を切り出すことができる GaN 系バルク結晶の基板材料を目指すものである。

「真のバルク GaN 単結晶」を目指すとは言っても、結晶成長の元と

なる種としては、やはり基板や種結晶を用いる場合が多い(後述の自発核成長の場合を除く)。結晶成長の元となる種として基板を使うか、種結晶を利用するかによって、方式としてはエピタキシャルバルク(エピバルクと略す)方式とバルク方式に大別される。それぞれの方式のうちに気相成長法と液相成長法がある。

これまでにバルク GaN 単結晶の成長方法として、気相・液相の両方の研究開発が行われてきたが、どちらの方法でも「真のバルク GaN 単結晶」は実現していない。研究開発の困難さは、GaN の窒素かい離圧が高いために¹⁷⁾、Si・GaAs・InP のように融液として存在し難いことに起因する。しかし、これを解決すべく、よりよい基板材料を目指して図表6のように国内外で活発に研究開発が行われている。

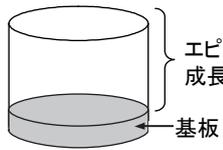
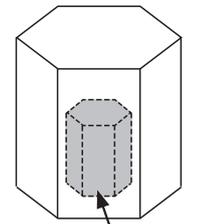
エピバルク方式の気相成長では、VPE 法が用いられている。こ

れはタイプCの基板の上に、塩化ガリウムガスとアンモニアガスから気相で結晶成長を行い、厚み方向に任意結晶面を切り出すことができる程度まで膜厚を増やすという方法である。この方法では、均一に高品質な結晶成長を行うことは難しく、厚み方向に□10mmの無極性面(m面)が得られたとの報告もあるが¹⁸⁾、高品質で大面積の基板は得られていない。元の基板がヘテロエピタキシャル技術で作製されていることから、転位密度も 10^5cm^{-2} 程度である。

エピバルク方式の液相成長としては、高压溶液法・安熱法(アモノサーマル法とも言われる)・フラックス法がある。高压溶液法は高温(1600℃)のGa融液中に超高压(1~2万気圧)の窒素を溶解させGaNを成長させる方法である¹⁹⁾、²⁰⁾。基板上に数100μmの厚みを成長させたとの報告²¹⁾があるが、厚さ方向に切り出せる程度の結晶サイズは実現していない。安熱法は超

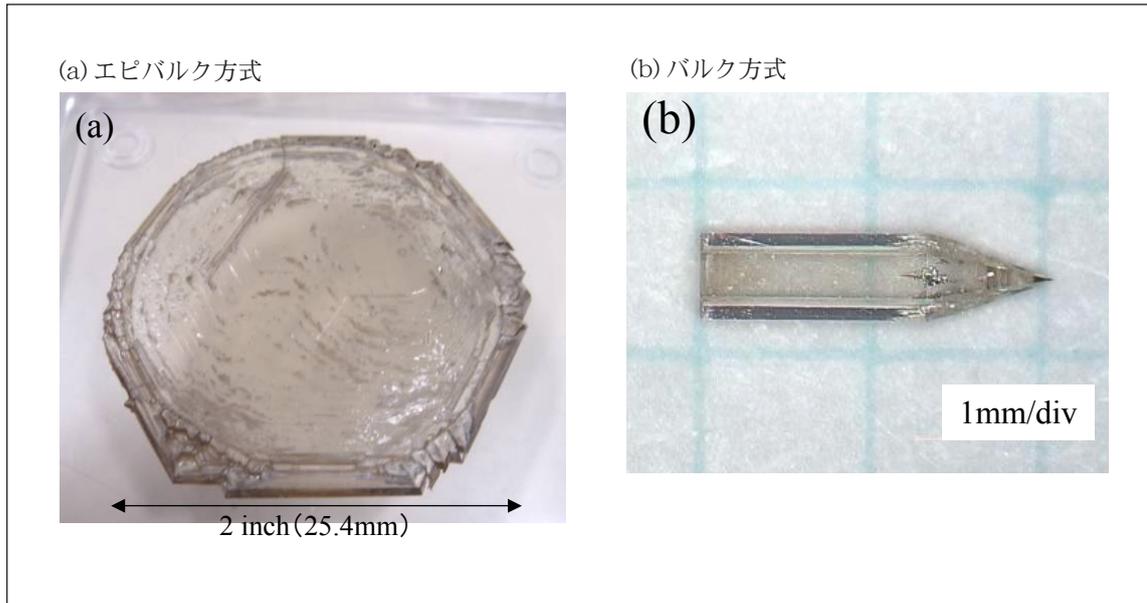
臨界から亜臨界のアンモニア(400~500℃、1000~4000気圧)中にGaN原料を溶解させて再結晶化させる方法である²²⁾。タイプCの基板の上に酸性鉍化剤を用いて数 $10\mu\text{m}^{23)}$ 、アルカリ性鉍化剤を用いて5mm程度の結晶を成長させたとの報告²⁴⁾がある。フラックス法はリチウム(Li)・カリウム(K)・ナトリウム(Na)などのアルカリ金属とGaからなる800℃前後の混合融液に数10気圧の窒素を溶解させてGaN結晶を成長させる方法であり²⁵⁾、²⁶⁾、主にNaを用いていることからNaフラックス法とも呼ばれる。フラックス法ではφ2インチの基板上でエピバルクを得ようとする研究開発が行われ²⁷⁾、3mm程度の厚さまで結晶成長させることができている。図表7(a)にエピバルク方式のNaフラックス法で実現したφ2インチサイズの結晶の例を示す。転位密度も 10^5cm^{-2} 程度と、他の方法に比較すれば結晶欠陥は少ない。これは厚膜エピ成長過程に

図表6 バルク GaN 基板の開発動向

方式	成長法		特徴	状況		
エピバルク方式 (基板としてタイプCを用いて厚膜成長させる) 	気相	VPE (Vapor Phase Epitaxy)	元となる基板はタイプC(サファイアやGaAsなどの基板上に気相により選択成長、厚膜化して転位密度 10^6cm^{-2} 台)であり、厚み方向に切り出すことで、□10mm程度のGaN基板が実現	タイプCの次世代DVD用GaN基板は日本企業がトップシェアであり、エピバルクは開発中		
	液相	溶液成長	高压溶液法	※1) 1~2万気圧、1600℃の高温高压下で金属Ga中に窒素を溶解させ、基板上にエピタキシャル成長。厚み方向には数100μm ¹⁸⁾	※2)ポーランドがオリジナルであり、現在でも最も進んでいる	
			安熱法	※3) 超臨界もしくは亜臨界のNH ₃ (400~500℃、数千気圧の温度圧力)にGaN原料を溶解、再結晶化させる。厚み方向には数10μm~数mm	米国ではアルカリ性鉍化剤、日本では酸性鉍化剤でそれぞれ研究	
			フラックス法	※4) NaやKなどのアルカリ金属とGaの金属融液に気相から窒素(圧力<100気圧)を溶解させ温度800℃前後でGaN結晶を成長させる。厚み方向は数mm	日本のオリジナルで最も進んでいる	
バルク方式 (下図の種結晶を用いる場合と、用いない自発核成長の場合がある。) 	気相	気相合成	1200℃以上の高温下で金属Gaの蒸気とNH ₃ 、N ₂ からGaNを成長させる。結晶サイズ>1mm	研究フェーズであり、近年は低調		
		昇華法	GaN粉末を1500℃前後で昇華させ、低温部の種結晶に結晶成長させる。結晶サイズ<1mm			
	液相	融液成長	融液成長	6万気圧、2200℃以上の高温高窒素圧力化で徐冷し、100μm程度のGaN結晶が成長	融液の存在を確認できた段階で、研究フェーズ	
			溶液成長	高压溶液法	※1)と同様の方法で基板を用いず自発核成長でmmオーダーの結晶が成長	※2)と同様
				安熱法	※3)と同様の方法で基板を用いず自発核成長、種結晶成長で、100μm~1インチのGaN結晶が成長	ポーランド企業が高品質1インチ結晶を実現
				フラックス法	※4)と同様の手法で基板を用いず自発核成長、種結晶成長で数mmのGaN結晶が成長	日本の大学、企業で研究開発が行われている

科学技術動向研究センターにて作成

図表 7 GaN 結晶の写真 (Na フラックス法)



出典：(a) 大阪大学森研究室、(b) (株)リコー

において、転位の横方向への曲がりや合体が起こっていることに因ると考えられている。

バルク方式にも気相成長と液相成長があり、気相成長には気相合成法・昇華法がある。気相合成法は 1200°C 以上の高温下で、Ga 蒸気とアンモニアや窒素ガスから GaN を直接合成する方法である²⁸⁾。昇華法は GaN 原料を昇華させ、低温領域の種結晶に成長させる方法であるが²⁹⁾、得られる結晶サイズは小さい。気相合成や昇華法は、その結晶成長の難しさから近年研究の進展という意味では低調である。

バルク方式の液相成長には融液成長と溶液成長がある。GaN は窒素のいかん離圧が高く、融液としては 6 万気圧、2200°C 以上の高温高窒素圧下でのみ融液として存在する

ことが確認されている³⁰⁾。これは実用的な温度圧力条件では無いため、研究開発は活発ではない。したがって、バルク方式の液相成長では主に溶液成長が研究開発されている。バルク方式の溶液成長にも高压溶液法・フラックス法・安熱法がある。3つの溶液成長は基本的にはエピバルクと同様であるが、自発核成長^{注7)}や種結晶成長から結晶成長させる点がエピバルクと異なる点である。図表 7 (b) は自発核成長による結晶の例である。高压溶液法では、自発核成長により mm オーダーの板状結晶(厚さ数 10 μm)が得られているだけで、実用化には至っていない。安熱法では、酸性鉍化剤を用いて自発核成長で数 100 μm の針状結晶が、またアルカリ性鉍化剤を用いて 1 インチのウェハ状結晶が

成長できている³¹⁾。フラックス法では自発核成長や種結晶成長により、mm オーダーの高品質の柱状結晶が成長しており²⁶⁾、るつぼサイズを大きくすることによる結晶サイズの拡大も確認されている。

いずれにせよ、バルク方式では結晶サイズが数 100 μm から数 mm と実用的な大きさが得られていない。転位は観察されず極めて高品質であるが、無極性面を得るために高品質を維持しつつ、六角柱状結晶の径方向と軸方向に結晶を切り出すことが可能な程度までの結晶サイズの拡大が必要である。

注7：種結晶や基板が無い状態から核発生し、結晶成長が起こること。

4 技術的課題解決に向けた各国の取り組み

4-1

日本で行われた産学官研究開発プロジェクト

(1) 高効率電光変換化合物半導体開発プロジェクト

高効率電光変換化合物半導体開発プロジェクト(通称「21世紀あかりプロジェクト」)は、1998～2003年度に(独)新エネルギー・産

業技術総合開発機構(NEDO)が支援して進められた³²⁾。このプロジェクトでは、照明用 LED 実現を目指し、高効率の近紫外 LED・蛍光体・基板用結晶成長技術などの研究開発が進められた。この中

で前述の高圧溶液法が山口大学や(株)ジャパンエナジーによって研究開発された。成果として、自発核成長により10mmサイズの板状結晶で転位密度は 10^3cm^{-2} 以下の高品質結晶が得られた。結晶の主面の面方位はC面(0001)であり、有極性面である。

しかし、結晶の厚さが数 $10\mu\text{m}$ であるため工業的にハンドリングすることが困難であり、また、設備的にも大型であったため、実用化するまでに至らなかった。

(2) 次世代照明をもたらす半導体基板結晶製造技術

科学技術振興調整費のマッチングファンドを活用して、2004～2006年度に、東北大学と三菱化学(株)が中心となり、エピバルク方式の安熱法を中心としたGa₂Nバルク結晶の研究開発が進められた²³⁾。本プロジェクトでは、 $\phi 2$ インチのタイプCのGa₂N結晶を基板として数 $10\mu\text{m}$ の膜厚のGa₂N結晶をエピタキシャル成長させることができた。成長速度は約 $1\mu\text{m/h}$ であった。

しかし、結晶の主面の面方位はC面(0001)であり、有極性面である。また、転位密度は基板($10^6\sim 8\text{cm}^{-2}$)と同等あるいはそれよりも増加しており、実用化には至っていない。これまでの安熱法では、エピバルク方式での真のバルク結晶の要件である、高品質(転位低減)と任意の結晶面を切り出すことができるサイズの両立は実現していない。

(3) 高効率UV発光素子用半導体開発

2004～2006年度のNEDOプロジェクトとして、高効率UV発光素子用半導体開発が進められ、大阪大学・豊田合成(株)・日本ガイシ(株)が、Naフラックス法によるエピバルク方式の研究開発を実施した³³⁾。その結果、 $\phi 2$ インチサイズで転位密度 10^5cm^{-2} が得

られた(図表7(a))。ここで用いられた基板も前述の(2)と同様に、 $\phi 2$ インチのVPE法で成長したGa₂N基板(タイプC)であり、その基板の上にNaフラックス法により3mmまでの膜厚でGa₂N結晶を成長させることができた。この方式では、得られた結晶の転位密度が 10^5cm^{-2} で、基板の転位密度(10^8cm^{-2})より低減している。これはフラックス法による結晶成長過程において、図表4タイプBのELOのような転位の曲げ・合体がマスク無しでも生じているためである。成長速度も $30\mu\text{m/h}$ 程度と溶液成長の中でも最も速い値が得られている。結晶の主面の面方位はC面(0001)であり、有極性面である。現在、大阪大学の研究者が中心となった合同会社フロンティアアライアンスから、この技術により作られたサンプル結晶が提供されている。さらに実用化を進めるためには、成長速度増大や長時間安定成長させることができる大規模装置の開発などが必要である。

4-2

その他の日本の研究開発動向

(4) 民間企業における研究開発

国内の民間企業では、(1)～(3)で言及した(株)ジャパンエナジー、三菱化学(株)、豊田合成(株)、日本ガイシ(株)の他、(株)リコーもNaフラックス法での研究開発を行っている²⁶⁾。(株)ジャパンエナジーと(株)リコーは、自発核成長により高品質(低転位密度)結晶を成長させることができ、特に、(株)リコーのNaフラックス法では無色透明の柱状結晶でm面(柱状の側面)が得られている(図表7(b))。しかし、いずれも結晶サイズはまだ不十分である。特に高圧溶液法

では結晶厚みが薄くデバイスを作製することができない。一方、Naフラックス法で得られている結晶もmmオーダーであり、デバイスを量産するにはさらなる結晶の拡大が望まれる。

4-3

海外の研究開発動向

(5) 米国のMURI(Multi University Research Initiative)プロジェクト

2001～2003年にノースカロライナ大学が中心となり、“Growth of Bulk Wide Bandgap Nitrides and Wafering”を目的としたプロジェクトが行われた。このプロジェクトではバルクGa₂N結晶成長として、気相合成法・安熱法・フラックス法がそれぞれ研究開発された。実用化に至ったという情報は得られていない。

(6) 米国のカリフォルニア大学サンタバーバラ校(UCSB)の研究

UCSBにあるSolid State Lighting and Display Center (SSLDC)において、安熱法により82日間で5mmサイズの結晶が得られた²⁴⁾。前述の(2)や(3)と同様に、タイプCのVPE Ga₂N基板を用いたエピバルク方式によるものである。結晶が着色していることとX線回折の結果から結晶品質は高くないと判断されるが、安熱法で初めてバルク体のものが得られたことは評価できる。この方式は鉍化剤と呼ばれる溶解度を高める材料にアルカリ性のものを使用している。アルカリ性鉍化剤を使うとGa₂Nは負の溶解度(温度が低いほど溶解度が高くなること)を示す。一方、日本の(2)の研究では酸性鉍化剤を使用しており、Ga₂Nは正の溶解度を示す。

(7) ポーランドの研究開発

高圧溶液法は、元々はポーランドの HPRC (High Pressure Research Center) にて開発された方式である。高品質な GaN 結晶が得られているが、サイズ・装置設備などの問題が

あり、実用化に至っていない。

また、安熱法については、ポーランドのアンモノ社が研究開発を行っており、2007 年にはアルカリ性鉍化剤を用いた安熱法により、φ1 インチの高品質結晶が得られた

との発表があった³¹⁾。ただし、成長速度・再現性・工業性などは不明である。安熱法は日米欧にてそれぞれ研究が行われているが、現在のところ、このポーランドの研究が最も進んでいると言える。

5 「真のバルク GaN 単結晶成長」のための研究開発の課題

「真のバルク GaN 単結晶成長」のための研究開発課題として、デバイスニーズから抽出される要件を主な結晶成長方式ごとにまとめたものが図表8である。主な要件とは、基板としてのサイズ $\geq \phi 2$ インチ、高品質(転位密度 $< 10^3 \text{cm}^{-2}$)、任意極性面(有極性でも無極性でも切り出すことが可能な面)である。

各機関の研究開発により、各方式の技術的メリットとデメリットが明らかになりつつある。気相成長(VPE)法は成長速度が速く(数 $100 \mu\text{m/h}$)、この技術に関しては、今後も民間主導で技術の改善がなされていくものと考えられる。これに対して液相成長(溶液成長)法は高品質な結晶が得られる見込みがあるが、成長速度が遅く(数 $\mu\text{m/h}$ ~数 $10 \mu\text{m/h}$)、装置

技術や結晶成長条件の確立にはまだブレークスルーと時間を要する。

「真のバルク GaN 単結晶」の実現には、まずは転位密度 $< 10^3 \text{cm}^{-2}$ の高品質の達成と、任意の結晶面を切り出すことができるかどうか最大の要件であり、これらを達成した上で、2 インチ以上のサイズを実現することが大きな目標となる。図表8をみると、品質と任意極性面の要件を満たすものあるいは満たす可能性があるものとしては、エピバルク方式ではフラックス法、バルク方式では安熱法とフラックス法である。このうち、エピバルク方式のフラックス法は、基板よりも低い転位密度で作製することが可能である点が他のエピバルクと異なる点であり、高品質化の見込みがある。ま

た、(3)で示したように産学官プロジェクトとして実施されており、すでにサンプル出荷も行っている段階にある。現在、さらなる転位密度の低減と任意極性面を維持した上でのサイズの大型化を目指し、研究開発が進められている。一方、バルク方式の安熱法とフラックス法は、どちらもこれまで産学官プロジェクトとしては実施されていない。安熱法は、海外、特にポーランドで高品質、大型化の研究が進展しており、知財も海外が主導している。これに対して、フラックス法は1997年に東北大学山根久典教授が見出した技術であり、現在でも日本で活発に研究開発が行われている。フラックス法の基本となる特許は、エピバルク方式とバルク方式とに共通で、

図表8 バルク GaN 単結晶成長方式のまとめ

方式		要件(実用のためのデバイス側からのニーズ)		
		サイズ $\geq \phi 2$ インチ	品質(転位密度) $< 10^3 \text{cm}^{-2}$	任意極性面
エピバルク	VPE	△(10mm角程度)	×(局所的には低欠陥密度化しているが、ヘテロエピタキシャルの限界)	○(断面方向に切り出すことでm面基板が得られているが、厚さが課題)
	高圧溶液法	×(厚さ~100 μm)	?(基板と同程度)	×(厚さが課題)
	安熱法	△(厚さ~5mm)	×(基板より多い $\geq 10^5 \text{cm}^{-2}$)	△(厚さが課題)
	フラックス法	△(厚さ~3mm)	△(~ 10^5cm^{-2} ;局所的には更に低い)	△(厚さが課題)
バルク	高圧溶液法	×(数10 μm 薄板状)	○	×(C面の有極性面が主面の成長)
	安熱法	△(アルカリ性鉍化剤でφ1インチを実現)	○	?(有極性C面でφ1インチが得られているが、厚さ不明)
	フラックス法	△(~数mm)	○	○

科学技術動向研究センターにて作成

日本企業が所有している。また辺特許についても日本の企業や大学が取得している。

よって日本は、当面、エピバルク方式・バルク方式のいずれにおいても、フラックス法による結晶成長方法を開発・活用することにより、実用的な「真のバルク GaN

単結晶」実現を目指すべきであると考えられる。

いずれにしても実用化のためには、最終的には結晶サイズの大型化が鍵である。高品質な結晶から出発してそれをデバイス作製のために必要となるφ2~4インチまで大型化するには、装置開発も

合わせて推進することも求められる。産学官連携での役割分担として、官のコーディネートのもとで、大学が結晶成長メカニズムの解明を行い、企業が結晶成長装置のデザインから結晶成長プロセス開発を行うという研究スタイルが望ましいと考えられる。

6 おわりに

GaN系半導体デバイスは、日本で過去2回の科学的ブレークスルーを成し遂げ、それが今日の実用化につながっており、日本発の半導体デバイスと言っても過言ではない。結晶成長の技術開発により、単に高機能をもつデバイスが実現するのみならず、省エネルギーを通じて地球温暖化防止にも大きく寄与することができる。

Si・GaAs・InPはいずれも高品質のバルク結晶が存在し、それを元に基板が作製され、その基板の上にデバイスを作製することができる。しかし、GaNは高品質のバルク結晶、すなわち、「真のバルク単結晶」が存在せず、そのためにGaNが本来有しているポテンシャルを十分に活かしきれていない。

GaNの結晶成長技術に関しては、気相成長(VPE)法は成長速度が最も速く、この技術開発に関しては、今後も民間主導で技術改善がなされていくものと考えられる。しかし、より高品質な「真のバルク単結晶」が得られるはずの液相成長法は基礎的な研究段階にあり、もう一段のブレークスルーと時間を要する。したがって、今後は、大学が結晶成長メカニズムの解明を行い、企業が結晶成長装置のデザインから結晶成長プロセス開発を行い、官がそれをコーディネートするような役割分担による産学官連携を組むことにより、「真のバルク GaN 単結晶」の研究開発を推進することが望まれる。我が国が他国に先駆けて早期

に「真のバルク GaN 単結晶」を実現することで、将来的にも GaN 系半導体デバイス分野で日本の国際競争力を維持発展させることができると思われる。

謝辞

GaN系デバイスのパイオニアであり、低温バッファ層・p型化のブレークスルー技術を研究開発された名城大学天野浩教授には、研究黎明期のお話を伺いました。大阪大学森勇介教授および(株)リコーからは GaN 結晶の写真提供を頂きました。(財)新機能素子協会と(財)金属系材料研究開発センターからは調査資料の説明を頂きました。御協力を頂いた皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 「電子情報通信分野 科学技術・研究開発の国際比較 2008年版」、(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター (2008年2月)
- 2) H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki and Y. Toyoda: App. Phys. Lett. 48, 353 (1986)
- 3) H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu and I. Akasaki: Jpn. J. App. Phys. 28, L2112 (1989)
- 4) S. D. Lester et al.: High dislocation densities in high efficiency GaN based light-emitting diodes, App. Phys Lett., 66, 1294 (1995)
- 5) 天野浩: 短波長可視・紫外発光デバイス開発と半導体ヘテロエピタキシー、応用物理、71、1329 (2002)
- 6) 竹谷元伸他: GaN系半導体レーザーにおける転位密度と信頼性の関係、秋季第63回応用物理学会関係連台講演会予稿集、27a-YH-11 (2002)
- 7) A. Usui et al.: Thick GaN Epitaxial Growth with Low Dislocation Density by Hydride Vapor Phase Epitaxy, Jpn. J. Appl. Phys., 36, L899 (1997)
- 8) K. Motoki et al: Preparation of Large Freestanding GaN Substrates by Hydride Vapor Phase Epitaxy Using GaAs as a Starting Substrate, Jpn. J. Appl. Phys., 40, L140 (2001)

- 9) Y. Ohshima et al.: Preparation of Freestanding GaN Wafers by Hydride Vapor Phase Epitaxy with Void-Assisted Separation, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42, L1 (2003)
- 10) 元木その他: Advanced-DEEP 法による低転位 GaN 結晶, 日本学術振興会第 161 委員会第 54 回研究会資料, 5 (2007)
- 11) 平成 18 年度窒化物系化合物半導体に係る技術戦略マップに関する報告書, (社)日本機械工業連合会, (財)金属系材料研究開発センター (2007)
- 12) 第 72 回総合科学技術会議 議事 3, 最近の科学技術の動向「最新発光ダイオードが照らす明るい未来」(2007 年 12 月); 平成 18 年度窒化物系化合物半導体に係る技術戦略マップ作成に関する調査報告書, (社)日本機械工業連合会・(財)金属系材料研究開発センター (2007 年 3 月)
- 13) *Laser Focus World Japan*, 2008. 8, P. 34
- 14) SID 2008, BC-4, iSuppli, The TV Market and its Impact on the Display Business (2008)
- 15) NHK 放送文化研究所, 2005 年国民生活時間調査報告書(2006 年 2 月)
- 16) (財)電力中央研究所, (改訂)「オール電化住宅は地球温暖化防止に寄与するのか?」への疑問: <http://criepi.denken.or.jp/pieceeco/data/071001.pdf>
- 17) J. Karpinski, J. Jun and S. Porowski: Equilibrium pressure of N₂ over GaN and high pressure solution growth of GaN, *J. Cryst. Growth*, 66, 1 (1984)
- 18) K. Fujito et al.: High-Quality Nonpolar m-Plane GaN Substrate Grown by HVPE, ICNS07 I1 (2007)
- 19) S. Porowski and I. Grzegory: Thermodynamical properties of III-V nitrides and crystal growth of GaN at high N₂ pressure, *J. Cryst. Growth*, 178, 174 (1997)
- 20) T. Inoue, Y. Seki, O. Oda: Growth of Bulk GaN Single Crystals by the Pressure-Controlled Solution Growth Method, The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, T-B-12, 341 (2000)
- 21) I. Grzegory et al.: Seeded growth of GaN at high N₂ pressure on (0001) polar surfaces of GaN single crystalline substrates, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 4, 535 (2001)
- 22) D. R. Ketchum and J. W. Kolis: Crystal growth of gallium nitride in supercritical ammonia, *J. Cryst. Growth*, 222, 431 (2001)
- 23) 「次世代照明をもたらす半導体基板結晶製造技術」報告書, 東北大学多元物質科学研究所, 三菱化学(2008 年 2 月)
- 24) T. Hashimoto et al.: Growth of Bulk GaN Crystals by the Basic Ammonothermal Method, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 46, L889 (2007)
- 25) H. Yamane et al.: Preparation of GaN Single Crystals Using a Na Flux, *Chem. Mater.*, 9, (1997), 413.
- 26) S. Sarayama and H. Iwata: High Quality Crystal Growth of Gallium Nitride by Flux Method, *Ricoh Technical Report*, 30, 9(2004)
- 27) F. Kawamura et al.: Growth of a Two-Inch GaN Single Crystal Substrate Using the Na Flux Method, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 45, L1136 (2006)
- 28) H. Shin et al.: Growth and decomposition of bulk GaN: role of the ammonia/nitrogen ratio, *J. Cryst. Growth*, 236, 529 (2002)
- 29) S. Kurai et al.: Homoepitaxial Growth of GaN on Thick GaN Substrates Prepared by Sublimation Method, *Proceedings of TWN' 95, Nagoya*, B-6 (1995)
- 30) W. Utumi et al.: Congruent melting of gallium nitride at 6 GPa and its application to single-crystal growth, *Nature Materials*, 2, 735 (2003)
- 31) R. Doradzinski et al.: Excellent crystallinity of truly bulk ammonothermal GaN, 5th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (2007)
- 32) 高効率電光変換化合物半導体開発(21 世紀のあかり計画)成果報告書, (財)金属系材料研究開発センター (2003 年 3 月)
- 33) 「高効率 UV 発光素子用半導体開発プロジェクト」報告書, (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 ナノテクノロジー・材料技術開発部(2008)

執筆者



皿山 正二

客員研究官

(株)リコー 研究開発本部 東北研究所

主幹研究員



(株)リコーにて GaAs、GaN などの化合物半導体材料・デバイスの研究開発に従事。新規材料・デバイス技術で環境技術貢献を目指している。MOT・技術戦略とその実践に興味を持つ。研究開発は楽しさとストレスの両立がキーと考え、努力している。

Science & Technology Trends

科学技術動向 11/2008



2008年11月号 第8巻第11号/毎月26日発行 通巻92号 ISSN 1349-3663



文部科学省 科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター