

20世紀に名を残すガラス技術と21世紀の展望（座談会）

京都大学名誉教授*1
(株)旭硝子総研*2
(株)日本板硝子材料工学助成会*3
長岡技術科学大学*4

作花 済夫*1・近藤 敬*2・小泉 健*3・小松 高行*4(司会)

Glass Technology Leaving a Name in the 20th Century and a View of the 21st Century

Sumio Sakka*1, Kei Kondo*2, Ken Koizumi*3, Takayuki Komatsu*4

**1Professor Emeritus of Kyoto University*

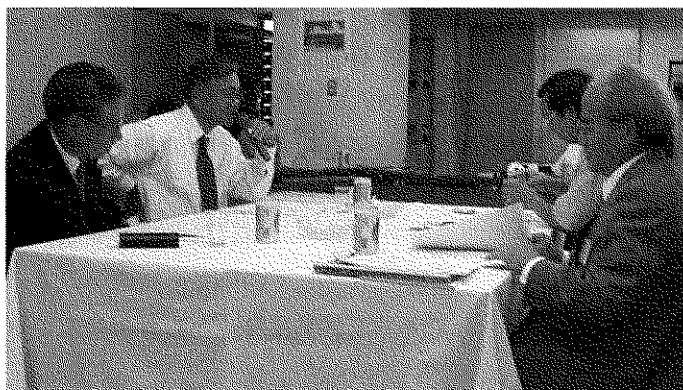
**2Asahi Glass Reserch Institute Inc.*

**3Nippon Sheet Glass Foundation for Materials Science and Engineering*

**4Nagaoka University of Technology*

小松：本日はお忙しい中、機関誌ニューガラスの企画、「二十世紀に名を残すガラス技術と二十一世紀の展望」と題します座談会に御出席いただきましてありがとうございます。本

日の進行役はニューガラスの編集委員長をしております小松が担当させていただきます。よろしく願いいたします。本日の座談会にはガラス産業界、および学界から著名な三名



座談会風景（左側から小泉健先生、近藤敬先生、作花済夫先生）
司会・小松高行（右側から2人目）

*4〒940-2188 新潟県長岡市上宮岡 1603-1

TEL 0258-47-9313

FAX 0258-47-9300

E-mail: Komatsu@chem.nagaokaut.ac.jp

の先生方へ出席していただいております。まず、最初に、各先生方から自己紹介をお願いしたいと思います。

近藤：私は、1961年に京都大学工学部工業化学科を卒業し、旭硝子に入社致しました。配属されたのは関西の尼崎工場で板ガラスの製造に従事しました。11年ほど工場製造をやり、その後本社の生産管理部門に移りました。それから1986年に事業部の研究開発部門に、1988年にニューガラス開発研究所長、ニューガラス開発研究所長、その後1993年から96年まで開発本部中央研究所長、1997年に旭硝子から旭硝子総研に移りまして、現在に至っております。

対外的には1992年、日本硝子製品工業会小川専務理事、東工大山根、川副両教授と語らってガラスプロセス研究会を立ち上げ、ニューガラスフォーラム2期4年の運営委員長と日本セラミックス協会通算9年の理事、常任理事を歴任、現在日本セラミックス協会ガラス部会長を務めています。

小泉：私は1959年大阪大学の理学部物理学科を卒業し、日本板硝子に入社しました。1965年に光通信用低損失ファイバーの研究をテーマにし、日本電気との共同研究で1968年に集束性光伝送体セルフロックを開発しました。その後、初めの10年はセルフロックファイバーの開発を担当し、シリカファイバーと激しい開発競争を行いました。10年経ったところに、シリカファイバーに完全にリードされ、方向転換してマイクロレンズの生産技術開発と市場開発をしました。当時、ベル研究所がレンズを用いたレーザーモジュール、光スイッチ、波長多重装置などの光通信用デバイスの開発を熱心に進めていたので日米間を往復し、その応用開発をサポートしてNJ州にセルフロックレンズの加工会社を1980年に作りました。1987年から筑

波研究所長を勤め、並行して、東京本社で全社の研究技術開発の企画調整を行いました。1994年に取締役を退任し、現在は日本板硝子材料工学助成会を運営しています。社外では、1989年から4年間ICGの技術統合委員を務め、その中でTC-20「オプトエレクトロニクスガラス」分科会を発足させ、1998年から今年までの2年間は、日本セラミックス協会の副会長を務めました。

作花：1953年に京都大学工学部工業化学科を卒業しましたが、その一年前から始めた卒業研究で当時ケイ酸塩工業といていた講座を選びました。そこで卒業研究としてほうろうの研究を行い、それがガラスとの出会いでした。卒業と同時に京都大学化学研究所の助手になり、ガラスの研究を始めました。最初の3年間は私一人でガラスファイバーの強度の研究を行いました。田代先生が3年後帰国されてから、ガラスに外部の場を与えたらどうなるかという考えを基に結晶化ガラス（温度場の影響）、放射線損傷（放射線場の効果）、高圧力（機械的圧力場の影響）の研究を行いました。1972年に三重大学へ移り、これが一つの転機になりました。ガラスの構造と物性、その相関関係の研究のほかにゾルゲル法の研究を開始しました。1983年に京都大学の化学研究所に戻り、ガラス構造の研究を本格的に進めることにしました。X線回折、中性子線回折、スペクトロスコーピーとしてはラマン、NMR、赤外吸収を使って、できるだけ新しいガラスを取り上げて構造の研究をしました。また、イオン交換、量子化学のガラス構造への応用、非線形光学ガラスについての研究も行いました。1994年に停年退官をし、現在福井工大に在職中です。

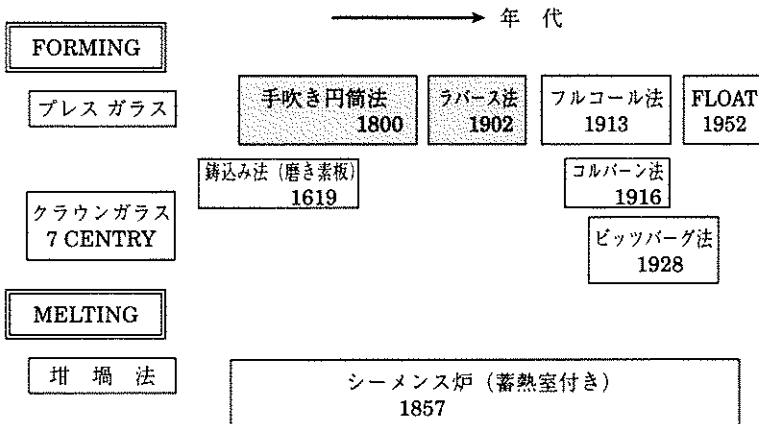
小松：どうもありがとうございました。それでは具体的に今日の話題に入って行きたいと思えます。機関誌ニューガラスでは、二十世紀

最後の2000年にあたり、「二十世紀に名を残すガラス技術」という特集記事企画いたしました。フロート法、光ファイバ、結晶化ガラスという3つの画期的な発明を取り上げました。これらの技術につきましても、各先生方もそれぞれの立場から随分係わりをもってこられたと思いますが、各先生方の経験や視点から、これらの技術についてご意見をいただきたいと思っています。近藤先生からフロート法についてお願いします。

近藤：手許に窓ガラス製法の変遷についての簡単なポンチ絵があります。ガラスは紀元前からあったわけですが、この2000年くらいの間板ガラスを作る製法どのように展開されてきたかという絵です。これは何を意味するかと言うと、この100年間に板ガラスを直接、平板で作る方法が開発された。それまでの何千年は、丸いガラスを切り開くとか、あるいは押し広げるとかという製法です。なんでそういうことになるかと言うと、直接板ガラスを作り出そうとすると製造するときに破損する。それは真ん中の部分と端の方にどうしても温度差が出来て製造工程でかならずと云っていいほど割れる。割れないためにどうしたかと言うと、シリンダーである。これはエッ

ジがないわけであるから、どこが真ん中か端かわからない。それを切り開いたら板になる。そういう製法ですとやってきた。1910年代になってようやく板ガラスを直接引き出す連続方式ができた。この100年間にはじめて従来に比べて生産性が100倍を超える規模で直接板ガラスが製造できるようになったのはエポックメイキングです。又、今世紀の半ばのフロート法というのがフルコール法、ピッツバーグ法、コルバーン法に比べて更にダントツに優位性のある製法であったということです。なぜフロート法がダントツかと言うと、セントラルガラスの黒川さんが機関誌に書いておられるように、製法がシンプルであるということ、重力に逆らわないということ、それと量産型の製法であって、それまで1窯当たりせいぜい300トン/日くらいのもので、いきなり1000トンになった。したがって、量が増えた、光学歪みが少ない、人手がかからない、ということとで、世界中の板ガラスの製法が一気にフロート法に代ってしまったわけです。

小松：光ファイバについて小泉先生からお願いします。



板ガラス製造法の変遷

小泉：光ファイバの開発の歴史とCVD製法は、東工大の柴田先生がニューガラスフォーラムの機関誌に大変分かりやすくお書きになっているので、私は柴田先生をご存知でないであろう時代の話、どうして低損失シリカファイバに収斂して言ったかという話を先ず申し上げます。レーザーが登場した1960年代は、光通信がレーザーの非常に重要な応用分野であり、光通信の研究は非常に盛んであった。光学繊維は1960年の始めに工業的に作れるようになっており、光学繊維での情報伝送が試みられていたが、伝送できる長さは10 m位、つまり光学繊維の損失は1000 dB/kmくらいであった。そう言うことで光通信用伝送路で一番ランクの低い候補が光ファイバで、一番有望だと言われていたのは、焦点距離の長い大口径のレンズを100 mおきに並べるビーム導波管。それから2番目がガスレンズであった。内径1 cmくらいのパイプの中にガスを詰めて周囲を加熱すると、パイプ周辺の屈折率が下がって、光が集束される、それがガスレンズである。それらが有望な候補であった。ベル研が非常に熱心にそれらを開発していた。そのときイギリスにいたKaoさんがアメリカと違う発想をする。Kaoさんは20 cmと5 cm長さの2本のガラスの損失差を精密に測る分光損失測定装置を作って市販のガラスの損失を調べていった。そうすると、合成石英ガラスの中に1 km当たり4~5 dB/kmのものがあるということを見出した。もうひとつ彼のすばらしいところは、これで20 dB/kmの光ファイバができれば、非常に良い通信システムになるという予言をしたことである。それが1965年。1968年の11月に私どもはセルフフォックファイバを発表した。屈折率が大幅に変わる様なイオン交換法を考え、その手法で長さが1 mのファイバを作った。He-Neの基本モードがきれいに伝送されるとか、輪切りにすると非常に短焦点のマイクロ

レンズになるということを実証したので、発表したときは大変な反響であった。ただし、損失は200 dB/kmであった。2年後の1970年の9月に、コーニングがロンドンで開催されたIEEの学会で、シングルモードシリカファイバの伝送特性を発表した。その中に、部分的には20 dB/kmのところがあると報告した。恐らく、長さは10 mか20 mだったと思うが、これは通信に係わる人にとっては、システムを構成するひとつのメルクマールの損失値が部分的ではあれ、できたということになるので、通信業界に大変な反響が起こった。それで光ファイバ通信の研究が一斉に始まった。1970年は記念すべき年で、日本の林さんがベル研で「半導体レーザーが室温連続発振に成功した」と発表した。それで、半導体レーザーと低損失ファイバの芽が揃って出たということで、この組み合わせが本命になった。

シリカファイバの優位性を明らかになったのは1974年に京都で開催されたICGの国際会議。これは非常に重要な会議になったのだが、ベル研がMCVD法で1 dB/kmのマルチモードファイバの発表をした。このときベル研は、MCVD法の装置をスライドで見せてしまった。それで会場は大変にどよめいて、「これで作り方は分かった」と言うことになった。その後、すぐに追試が世界中で始まり、それからは日本が低損失化をリードしていった。1976年にはNTTと藤倉が長波長帯で0.48 dB/kmを出し、CVD法の優位性が明らかになった。私どもは多成分系ガラスで汗と涙の低損失化をやっていたが、その目で見ると、CVD法のいいところは、原料精製工程が製造工程に内蔵されていることだと思う。最後はファイバは理論限界値の0.2 dB/kmを下回るころまで行ったが、とどめを刺す低損失化というのは、ppbレベルの低いOH基レベルにできたことである。1979年にMCVD法で0.2 dB、1980年には

VAD法で0.2 dBを達成した。ところでシリカファイバーで広帯域化をするのは大変難しかった。屈折率分布を形成することは非常に難しかったと推測する。私どものセルフフォックファイバーは二重つぼ法で1970年代に連続製造しており、大変もてた。世界の初期のシステム実証試験は、ほとんどセルフフォックファイバーを使って行った。200 MHzkmという広帯域性を確保してやった。最初の商用システムはDisney Worldに日本電気がビスタテレフォンという電話会社から受注した。1978年だったと思うが、これにも私どものファイバーが使われた。ところがその後、シングルモードファイバーの製造技術が完成した。シングルモードファイバーの製造は難しいが、製造技術が一旦完成してしまうと、帯域はおのずと取れてしまう。そのころようやく、損失値もマルチモードファイバーで出ている超低損失値がシングルモードでも出るようになった。そう言うこともあって、1980年代に入ると光通信システムはシングルモードシリカファイバーに移行していった。

ファイバーの歴史に、EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) もぜひ加えたいと考えている。これは、1980年代の中ごろにサザンプトン大学で開発されている。これが今日のDWDM方式を可能にした。Fiber Amp.を作りたい、というのは光通信システムの最初からの夢であり、セルフフォックファイバーでも試作したことがある。ガラスレーザーに必要な利得を得ようとするときは、当時、リン酸塩ガラスを使うのが常識であった。シリカ系ガラスはフォノンエネルギーが大きく、濃度消光が起きてしまって数%の活性イオンを入れることが不可能と考えられていた。ところがサザンプトンのペインさんらはErの濃度を1%以下にして濃度消光を抑え、利得が低くなる分はファイバーの長さで稼いだ。数十mのファイバーで利得を得た。損失が増

えるが、CVD法を使って低損失にした。逆転の発想である。これは非常にすばらしい発明であったと思う。興味深いのは、この開発が企業の通信やガラスの研究所からではなく大学から生まれたことである。ここに大学の存在感がある。大学には非常に長い期間の知識、情報、経験が蓄積されるので、一気に花が実を結んだ、と思っている。

小松：どうもありがとうございました。作花先生、結晶化ガラスについてお願いします。

作花：ガラスの中で結晶ができることは結晶化ガラスが作られるまでは失透といって絶対避けるべき問題とされていた。そこに結晶化ガラスができてきた。結晶化ガラスはよく知られているようにStookeyの発明です。Stookeyは、1950年頃から、コーニングで感光ガラスの研究をしていた。アルカリとしてリチウムを含む感光ガラスで研究を行っている時、電気炉の温度が800°Cぐらまで上がってしまったが、とり出して見ると、ガラスが軟化して丸みを帯びることがなく、加熱前の角はそのまま角ばっていた。このガラスはうっかり床に落としても割れなかった。ここがStookeyの偉いところだが、彼はこれを強い材料として使うことを考えた。この材料が感光結晶化ガラスである。この場合、ガラスに紫外線を照射すると銀の潜像ができ、温度を450°Cぐらまで上げると銀の粒子ができる。さらに、510°Cまで加熱すると銀の粒子が核となってリチウムメタシリケートが結晶としてでてくる。800°Cまで加熱するとリチウムのダイシリケートに変わり、強い結晶化ガラスになる。その後、マグネシウムアルミノシリケートの結晶化ガラスを作ろうと試みられた。これは紫外線をあてても銀コロイドを入れても結晶化しない。そこで、結晶化させる材料をいろいろさがした結果酸化チタンが結晶化を強く促進する成分であることを

発見した。

最初に作られた製品はミサイル弾頭の円錐型のコーンであった。コーニングでは引き続いて酸化リチウム、酸化アルミニウムとシリカに酸化チタンを加えて結晶化ガラスを作り、それが非常に低膨張であり、かなり強いということで台所用品、台所の加熱板、直火にかけられる鍋、をつくることにし、コーニングウエアということで、透明なものと同じになった陶磁器のように見えるものと両方作り製品として売り出した。これは非常に良く売れたと思う。このリチウムアルミノシリケートの結晶化ガラスは成功し、非常に有名になったので、プラスチックの強化に使うなどの試みも行われた。他にぱっとした結晶化ガラスがしばらくなかったせいもあり、結晶化ガラスというのはLAS（リチウム・アルミノ・シリケート）しかないかといわれるほど成功した。その後、台所用品以外にショットが Zerodur という室温付近から 500°C くらいまで熱膨張係数がゼロだというガラスを作って、天体望遠鏡の反射鏡レンズなどの非常に大きなものが Zerodur で作られている。実際に結晶化ガラスの開発を行ったのはコーニングの George Beall という人が率いるチームであるが、彼はアメリカの化学会からガラスの結晶化、結晶化ガラスということで最近表彰をされている。

LAS 以外の結晶化ガラスで、実用になっている大きなものに 2 種類ある。1 つは建築材料で日本電気硝子の製品でネオパリエと呼ばれる壁材である。もう 1 つは生体材料である。1970 年前後にフロリダ大学の Hench が歴史上初めて骨とくっつくガラスを作った。これはガラスで初めてというのはなく、初めて骨とくっつく材料であったので画期的な出来事であった。これは、カルシウム、リン、ナトリウムを含んだシリケートガラスであるが、ガラスのままでは強度がちょっと弱いということで実用にされたのは耳小骨とい

う耳の中の三半器官のところにある小さな骨だった。それを、小久保先生が結晶化ガラスにして強いものにし、人工骨として成功した。組成は $\text{MgO-CaO-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2\text{-CaF}_2$ というのでフッ素アパタイトがガラスの中に析出している結晶化ガラスで、人間の骨と直接固い結合を作る材料である。

さて、新しい結晶化ガラスには透明結晶化ガラスがある。結晶が 90% であろうと透明なものは透明であって、LAS でも透明なものはある。食器になっている LAS の場合少し白くもっているものがあるがもっと透明なものがだんだん作られるようになった。そうするとフォトリソ用に使おうという機運がでてきて、光情報処理用の結晶化ガラスが作られるようになった。コーニングの Tick らはアルミノシリケート・ガラスの中に 15 nm のフッ化ランタンを析出させたが、そのフッ化物の結晶の中に Er を入れておくと、まわりがフッ化物なので効率の良いレーザーとなり、1.55 μ の光の増幅に使えるはずである。小松先生は酸化カリと酸化ニオブと酸化テルルのガラスを結晶化させておられるが、そうすると少しひずんだ面心立方の結晶がでて二次非線形効果がでてくる。このように透明結晶化ガラスでフォトリソ材料に使えるものが現在研究されて将来に引き継がれるだろうと思う。それ以外にもいろいろあって、結晶化すると弾性率が高くなるからハードディスクとして使える。また、結晶化ガラスをノートパソコンの基板に使おうとかいう試みがある。あるいは、多結晶の結晶化ガラスを作って触媒担体に使おうという試みもある。

簡単に言うと耐熱性、低膨張、高強度の結晶化ガラスが天体望遠鏡のレンズだとか、電熱調理器加熱版だとか、耐熱性食器だとか、人工骨材料、歯の歯根、歯冠に使われている。今後は光用の透明結晶化ガラスがでてくるのではないかという状態だと思う。

小松：どうもありがとうございました。この3つの技術は現在でも重要な技術であることには違いありません。さらになにか付け加えたいことがありましたらお願いします。

近藤：結晶化ガラスというのはあくまで、結晶ではなくて、結晶を含んだガラスですね。だからガラスが含まれていることにすごく値打ちがある領域がある。いま作花先生がおっしゃったネオパリエという建築材料は後曲げができる。薄い平板をつくって、後から曲げられる。だから、地下鉄駅の柱まわりなどによく使われている。あれを天然石から削り出せば非常に高いものにつく。そういう面でガラスが含まれていることを上手く利用して、しかも強度も保証される。そこに特徴があり、結晶化ガラスというのはそういう点も非常によい性質を持っているといえる。

小松：フロート法に対して何かコメントがありましたら。

小泉：日本は非常に早くから技術導入をした。そのあと、15 mm以上の厚いガラスと1 mm以下の薄いガラスを作る技術は、日本が率先して開発した。それが現在の液晶用ガラス基板の製造に使われている。このように日本は技術の改善に非常に貢献した。

小松：先ほど取り上げた3つの画期的な技術以外にも社会にインパクトを与えたガラス技術、貢献した技術があると思います。各先生方の視点から、記憶にとどめるべき、またこれからも重要であろうガラス技術について紹介していただきたい。

小泉：ガラス産業の20世紀という切り口で見ると、20世紀の始めは板ガラス、容器ガラス、繊維ガラスの大量工業生産方式が誕生したガラスの産業革命であった。20世紀

の前半は自動車と建築が大変普及した。その過程で板ガラスの量産ができる大企業が世界に誕生した。20世紀の後半しばらくたってからは、特殊ガラスの時代、エレクトロニクス用途のガラスの時代になった。CRTが大産業になった。液晶用薄板ガラス基板、半導体用フォトマスクガラス、回路基板用繊維ガラス、そう言ったエレクトロニクス用ガラスが大量に使われるようになった。その関連のガラスの世界は、用途に合わせてガラスの組成、製法の改善が積み上げられ、精密研磨や製膜に代表される付加価値をつける技術が非常に進歩した。もうひとつは（我田引水ではあるが）光通信用ファイバーの研究から生まれたもの、派生したものである、マイクロレンズ、ファイバーカップラ、ファイアアンプ、ファイバグレーティング、非球面レンズ、光フィルタ（現在150層くらい精密に積層できる）、光導波回路、平板型マイクロレンズ、これらを一くりにマイクロオプティクスガラスとか、微小光学ガラスと称している。これらもまた、用途に合わせた組成開発、加工技術開発が行われている。この分野のガラスは、DWDMがこれから発展して行くので、更に高度化して事業規模も拡大して行くと思う。情報通信用マイクロオプティクスガラスとエレクトロニクス用ガラスが、これからのガラス産業を牽引して行くと思う。

近藤：いま小泉さんから話のあったエレクトロニクス用途は、21世紀に向かって、隆盛で、かつ非常に重要な製品になっていくと思う。しかし、今世紀と言うことでは、いわゆる重厚長大型のガラスで日本として非常に頑張っているのはブラウン管用ガラスである。これはコーニング社が開発した技術であるが、20世紀の後半の四分の一世紀では、日本が世界に対してリーダーシップを発揮してやってきたガラスである。この特徴は、宇宙産業のような巨大技術とまではいえないまでも、ブラウン管はパネル、ファンネル、チューブ

の3つの部品からなっていて、それぞれ組成も違う。それを一体化するため、溶解し、成形し、研磨をするがすべての部品がスペックを満足しなくてははいけない。全部できてはじめて完成品になる。どこか一つでも欠けるとお話にならないほど歩留まりが落ちてしまうことになるので、いろいろなプロセスを含みながらその総合として大きなマーケットに対応しているというブラウン管の生産技術は、今世紀、社会にインパクトを与えたものとして忘れてはならない技術であると思う。

小松：作花先生、ガラスのサイエンスの立場からお願いします。

作花：20世紀の話としては、酸化物ガラスにも新しい組成のガラスができたが、酸化物以外の新しい無機ガラスが作られたということをお忘れてはいけないと思う。そのガラスは場合によっては、工業化できるということも重要な点だ。まず1つはカルコゲンガラスである。これは、1960年代に当時ソ連のコロミエツという人によって最初に作られた。日本では南先生などが研究をされている。電子伝導性や光伝導性が注目された。2番目は重金属フッ化物ガラスが作られたことだ。これは1970年代、フランスのリュカというプロフェッサーのところにプーランという人が作った。イオン性の大きいガラスでシリカより光散乱が少ないので、一時はシリカの代わりに光通信に使おうという考えで研究されたこともある。現在でもフッ化物の中にErを入れると、うまくはたらくと言われている。3番目は金属合金のガラスができたことだ。これも1970年代につくられたのだが、最初はテープ状でしかできなかったが、現在はバルクのものも作られている。

この3つの新しい非酸化物ガラスは酸化物ガラスと同様、ガラス転移点があり、ガラス転移温度付近で緩和する。緩和によって屈

折率、密度が変わり、金属ガラスでは磁性や電気伝導も変化する。この3つの新しいガラスはガラスの範囲を広げると共に私達の考え方も広げてくれたといえる。

小松：光ファイバー、結晶化ガラス、フロート法はいずれも外国で開発されたものである。日本で生まれた技術についてコメントをいただきたい。

小泉：光ファイバの関連で言いますと、改善して性能を高めてゆくことに関しては、日本は大きく貢献した。日本は低損失化をリードした。ファイバーアンプは日本から出したかった。これからではないか。これからは、京大の平尾先生のプロジェクトのような構造欠陥を積極的に利用して機能を持たせる方向ではないかと思う。

小松：その他にはいかがでしょうか。

近藤：フロート法をピルキントンが開発した経緯について話したい。1952年にアイデアが生まれて、売れるようになったのは1962年である。10年かかっている。10年と言う期間は長いか短いかということである。短いと言うことであれば、これを開発した人はピルキントン一族の人であるので研究開発の環境は恵まれていたと思う。だいたいガラスのプロセスなり大きな物品を開発しようと思うとあつというまに10年はすぎてしまう。そういう意味で新しいものがなかなか生まれにくいというのか、高温かつ粘度の高い物体で、欠点の目立ちやすいガラス製品をつくるのには時間がかかるものだということである。だから新しいものはなかなか生まれてこなかったということは言える。

小松：作花先生、ガラス構造についてはぜひぶん進歩してきたようで、また限界が見えてき

ているようにも思いますが、いかがでしょうか。

作花：ガラス構造というのは100年昔から研究されていて、きりのない問題かもしれない。実は私は、結晶化ガラスをとりあげた時にこんなに研究しやすいものはないと思った。ガラスにX線をあてるとぼやっとした回折帯がでてくる。ところが結晶化ガラスの場合はX線をあてると何の結晶が出てくるかがわかるので、これはいいなと思った記憶がある。それぐらいガラスは難しい。しかし、それでも構造と性能又は物性の間に何らかの関連があるというのは事実である。徐冷をする急冷をするというのは構造を変えていることになると思う。少しずつであるが構造解析は進歩している。産業界の人から見るとどうでも良いと見えるかもしれないが、組成を変えるにしても、構造がこう変わるだろうという予想ができれば、組成の変え方もあるだろう。その研究がだんだんと進んできたと思う。第一はX線回折の他に、中性子線回折ができるようになった。それから、NMRが使えるようになったのが大きい。NMRを使うとケイ素の周りに酸素を介して何個ケイ素があるのか、最大4つであるが、ケイ素が2つつながっているのか、それとも3つなのか、それとも全然ないのか、そういうことまでわかるようになった。それぐらい、今世紀の後半になってかなりわかるようになってきた。

小松：それでは近藤先生お願いします。

近藤：先ほど小松先生から日本では新しい物はないのかと問われ、「ない」とお答えしたが、これが活字になると何ともさびしいことになるので、一つ申し上げたい。それはガラスの溶解技術で、最近真空中で清澄しようと言う技術ができてきた。真空中でやるとガラスで

一番大きい欠点である泡が非常に抜けやすい。泡を抜くために高温でたくさんのエネルギーを使っているわけであるので、この技術を使えば低温でガラスが出来る。これは日本が率先してやった技術である。

小泉：High Alumino silicate glassもある。ソーダライムよりもっと高い歪点を持つガラスがフロート法で熔融成型されるようになったというのもやはり20世紀の記念すべき技術である。

作花：先ほど、小泉さんが言われたVAD法だが、これはこんなやり方で屈折率分布がつくのかと誰も思うのだが、こんなやり方でやった。というので声を大きくして…。

小泉：VAD法で屈折率分布ができたということはずごい。分布を持たせるのは難しかった。なぜ温度分布で屈折率分布が出るのか、ガラスのサイエンスは随分行われた。

作花：それから先ほど小泉さんのところで出たイオン交換のことも日本でやったんだといいたいです。

小松：最近の光関連産業、IT革命に代表される様に、ガラス産業界、学会も大きなうねりの波の中にいます。20世紀以上に21世紀はガラス技術や科学に対して新たな期待や技術戦略が求められています。座談会の締めくくりとして各先生方に21世紀のガラス技術に対する期待や展望を語っていただきたい。

作花：科学について述べたい。先ほども言ったが、ガラスの回折もスペクトロスコーピーもだんだんと非常に精密になってきている。それは非常に大きな収穫だと思う。21世紀にはもっともっと精密な解析ができるようになる

だろうし、できるようにしてほしい。というのは、ガラス転移点で構造変化が起こって密度を測れば変わる、屈折率も変化する。しかし、構造がどう変わるかということは今はわからない。その構造の変化を見つけるような分光学や回折学ができるのではないだろうかと思う。密度、屈折率、イオン伝導度、光散乱、全部変化するのに構造についてふれた論文はなく想像でしかものが言えない。ガラスの温度を上げた時に構造がどう変わるのかも今は言えない。それから例えば、光化学ホールバーニングという現象で不均一幅を測定すると、その中に1000個の均一幅が集まっていると言われているが、その1000個の1つ1つがどのように構造が違うのだろうか？つまりSmならSmの周囲の構造がどう違うのだろうか？そういうことを測定あるいは計算できるようになってほしいと思う。私はできるようになると思う。なぜなら、例えば、シリカガラスを緩和させて、赤外を測定すると1122.0 cm⁻¹のピークが1122.5 cm⁻¹に移る。1 cm⁻¹以下の話だが、それでも赤外分光計で検出できて意味があるというところまでいっている。これはアメリカの友沢先生の発表だが、もう少し頑張れば、0.01 cm⁻¹の区別もできるということになるのではないかと思う。次は大きなことだが、20世紀に発明されたNdのガラスレーザーによる商用核融合を21世紀に実現するようガラスを使用するレーザー核融合の研究を続けてほしいと思う。

近藤：先ほどビルキントンのフロート法を開発するのに10年ということをし上げた。21世紀には開発をもっと早めるためにコンピュータ・シミュレーションを活発に使いこなしていくことが非常に重要だと考えている。今まではガラス窯の中で起こっているいろいろな物理化学反応は、複雑すぎてシミュレーションが追いつかないというところがあっ

た。ガラスの焼解プロセスを簡素化し最近の発展したコンピュータサイエンスを使えばもっと簡単に極めてスピーディにやれる。それから製造プロセスの立場から21世紀がどうなるか考えると、ニューガラスもさる事ながら、コンベンショナルガラスの領域でも頑張っていかなければならない。先ほどブラウン管の例を言ったが、ブラウン管というのは20世紀最後の真空管を使った製品である。まだこんなものが残っているんだと驚きかもしれないが、しかし、コストパフォーマンスとか動画映像の鮮明性とかいう点から、ブラウン管の実力というのはなかなか大したものだ。これとか、先ほど言ったフロート技術の改良とか21世紀も引き続き力を入れていく必要がある。具体的にはガラスの製造技術というのはSimple is bestである。難しい領域があるとなかなか進歩しない。フロート法のいいところは、ただドラドラッとガラスを錫桶のなかへ流し込んで、少しだけぴゅっと持ち上げて引っ張ってだけでガラスが出来てしまう。ただ、フロート法もよく考えてみると、2つ致命的な欠陥がある。その2つをなくするともっとよい製法になっていくと若いエンジニア達が自信を持って云っている。それは何かというと一つは錫桶で、あれには平衡厚みというのがあって、だいたい然るべき温度でやっていると6ミリくらいになってしまう。薄い板を作るために桶の両端から水冷のローラーを入れて横に引っ張りながら、縦に引っ張っていく。横から入れる水冷ローラーがその周りを冷やしてしまうとか、そのパイプの周りから酸素が錫桶の中へ侵入するとか、それでフロート法特有の欠点が出てくる。そういうものをなくして、1ミリだろうが、15ミリだろうがそのロールなしにいろんな厚味の板が自由自在に引ける技術が大事だろう。もう一つは、桶に錫が入っているが、その桶から板を引っぱり出すにはちょっと数インチ持ち上げなければならない。その

ためにそこでベンディングがかかり割れるとか、擦るとか、それを避けるために人を貼り付けなければいけないという制約がでてくる。そこで真っ直ぐ水平に引けるとかドローダウンとかそういうことが出来るように進歩しなければならない。

小泉：ガラスにかかわる人たちは、これまでにガラスがいかに世の中を変えてきたかに自信と誇りを持つべきである。ニューグラスフォーラム前会長の松村さんと意見が一致した話だが。17世紀のはじめに、ベニスのムラノ島のガラス技術からレンズが生まれ、そのレンズを使ってガリレオが30倍の天体望遠鏡を作り、コペルニクスの地動説を証明した。それによって中世の呪縛が解けた。その直後に、オランダで顕微鏡が発明された。最初はノミの観察、だんだん発達して細胞の構造が分かり、それで医学や自然科学が発達した。このようにガラスは世の中を大きく変えた。400年経った今、光ファイバーを使って同様なことが起こると思っている。光ファイバーネットワークができ、世界中の人たちが安いコストで相互にコミュニケーションできる時代がやってくる。そのネットワークコミュニケーションが個人ベースでやれるという社会では、今の想像をはるかに超えて政治や経済が変わって行く。今われわれはそのベース作りをしている。21世紀の始めの10年くらいはDWDMをキーワードに情報通信関連が伸びる。今、一本のファイバで100波伝送ができる。一本で1テラビットなので、放送用TVに換算すると1万チャンネル以上を送れる。100波伝送ができたから次は1.3~1.6 μ の波長帯をフルに使うって1000波伝送をしようと、業界では一斉に研究が始まった。その結果フォトニックネットワークが生れる。今は光-電気-光と幾度か変換しているがそれをまったくしないで光だけで行うことが始まる。光クロスコネクト、光スイッチな

ど必要なデバイスのキーはガラスである。現在の光導波路は、屈折率の固定的な分布を持たせて光を閉じこめているが、時間的に屈折率を変化させるガラスが要求されている。非線型光学効果を利用するなどいろいろ出てきているが、まだ、実用レベルではない。これができるれば、光ネットワークが発展する。早く出てきて欲しいと思っている。もうひとつは、近接場光学が非常にいいものであると思っている。フォトニッククリスタルを使うと、光が直角に曲げられる。閾値が非常に低いレーザー発振ができる。これらができる、ナノオプティクスになる。ぜひ生み出して行きたい。情報通信の次はバイオであろう。バイオ、光、ガラスの相性は非常に良いと考える。

小松：どうもありがとうございました。なにか付け加えることがありましたら、どうぞ。

作花：もう少し話を限って、先ほど小泉さんが言われた平尾先生の平尾プロジェクトのフェムト秒のパルスレーザーを使ったら面白いことができるということだが、ちょっと私から説明したい。ガラスは透明である。何に対して透明かという例えば600nmの光に対して透明である。だから、600nmの光をあてても何も起こらず、普通は通過する。ところがフェムト秒のパルスレーザーにするとパルスの瞬間は光は非常に強くなる。その1mmの光を1ミクロンにしぼったとすると、そのしぼった焦点のところはもう 10^6 倍強くなる。そこでは非常に光が強くなって、600nmの光子が2つ集まったもの、すなわち、300nmの紫外線になり、これは吸収される。そしていろいろな変化が起こる。つまり、ガラスの中の希望するところにいろいろな変化を起こすことができる。例えば、Erというのは3+の状態がガラス中に入っているが、その強い光が当たったところでは2+

となる。ほかにも、先ほどのフォトニッククリスタルを作ろうとした場合、屈折率の違うところを作っていく必要がある。これは屈折率の永久的な変化だが、それが起こる。それから、例えば、二次の非線形を示すバリウムボレート（BBO）の結晶を適当なガラスに光をあてたら析出させることができる。そうすると、非常に高密度の3次元に記録をさせる材料ができる。今後、本当に何が起きているか、あるいは、どのようにすればうまく希望の変化を起こさせることができるかというようなことが、研究の題目になってくる。そのあかつきは非常に面白いことができ

るだろうと思う。

小泉：ガラスの中に数千度を超える太陽が出来るのですね。非常に興味がある。あの研究はガラス材料では世界で最初の研究ですね。

小松：予定の時間が来ました。残念ですがこれで座談会を終わりたいと思います。21世紀は20世紀以上にガラス産業や科学に携わる全ての人たちにとって元気の出る世紀になることを願っています。各先生方、今日は大変ありがとうございました。