

第 67 回放射線科学研究会聴講記

標記研究会は平成30年10月26日（金）午後1時半から5時半まで住友クラブにおいて、千星 聡氏（東北大学）、大久保成彰氏（日本原子力研究開発機構）、小川理絵氏（島津製作所）及び土田昭司氏（関西大学）の4名の講師をお招きして開催した。座長は、前半2件を岩瀬彰宏ONSA専務理事が、後半2件を児玉靖司大阪府立大学教授が務めた。なお、講演会終了後、講師の先生方を囲んで技術交流会が行われた。

1. 照射によって改質した材料表面層の微細組織観察技術と観察例

東北大学 金属材料研究所 千星 聡

イオン照射やイオン注入、プラズマ照射などにより材料表面の硬度や電氣的・磁氣的特性、光学特性が変化する現象はよく知られているが、その本質を解るためには、材料の微細構造が照射によってどう変化したかを評価することが重要である。しかし、一般にイオンによる物性や微細構造変化は、材料表面の数 μm 程度にとどまるため、透過型電子顕微鏡(TEM)で微細組織を観察する場合、試料づくりや観察技術に工夫が必要である。本講演では、イオンミリング、イオンスライサー、集束イオンビーム(FIB)加工法を用いた照射試料表面の微細構造観察技術と、その応用例について講演いただいた。

講演では、まず講師の自己紹介の後、TEMの原理や特徴を、結像経路の作図などを用いてわかりやすく説明し、その後、TEM用薄膜試料の3種類の作成方法(イオンミリング、イオンスライサー、集束イオンビーム(FIB)加工)に関して、具体例を交えながら説明した。



図 1 講演中の千星講師。

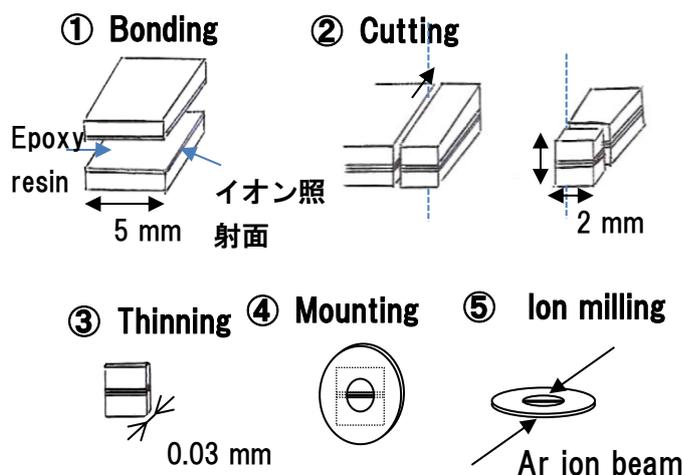


図 2 イオンミリングによる銀イオン注入シリカの TEM 試料作製。

イオンミリング法を用いた具体例として、透明酸化物(5x5x1mmのシリカガラス)中に380keV銀イオンを注入した時の銀原子の状態のTEM観察が紹介された。銀イオンは試料表面から100-200nmの表面付近にしか蓄積しないため、この表面部分を観測するために、図2に示すような試料づくりを行った。まず、2つの試料をイオン照射面同士、エポキシ樹脂で貼り合わせ、照射面に垂直にカットした後、機械的に薄くして、最後にアルゴンイオンビームによるミリングでTEM薄膜試料を作成する。

以上のプロセスで作成した試料(銀注入量は $7 \times 10^{16}/\text{cm}^2$)を用いて観察したTEM像を図3に示す。図中央の白い部分はエポキシ樹脂で、ここが試

料表面である。表面から200nm深さを中心に黒い球状の像が見えるが、これが銀のナノ粒子である。色々な銀注入量に対する光吸収スペクトルを図4に示す。注入量が大きくなると、個々のナノ粒子による表面プラズモン共鳴による吸収(400nm)に加えて高波長側に吸収が現れるが、これはTEM観察の結果、ナノ粒子同士が接近して相互作用することに基づくものであることがわかった。

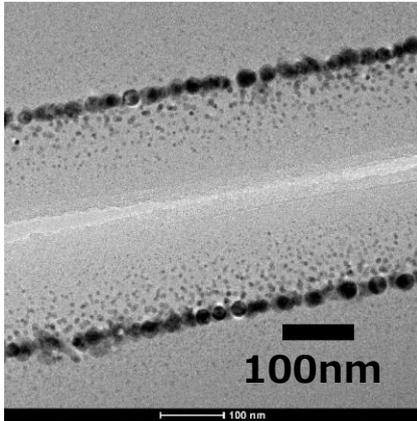


図3 イオンリング法で作成した銀イオン注入シリカの断面 TEM 像。

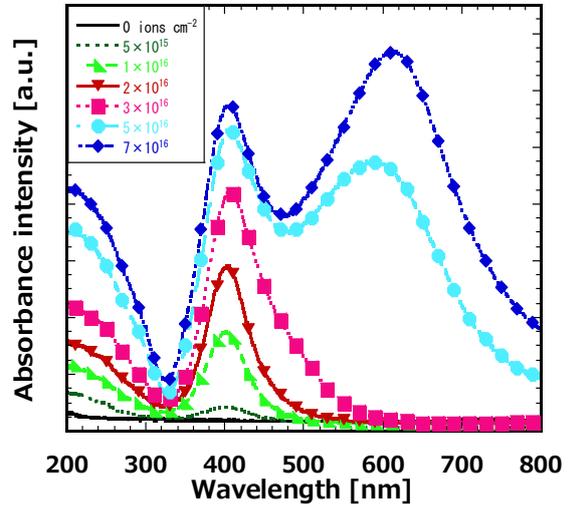


図4 銀イオン注入シリカの光吸収スペクトル。

次に、イオンスライサー法による陽極酸化被膜のTEM観察、FIB法による高速重イオン照射した高温超伝導体の非晶質トラック観察の紹介があったが、ここでは紙面の制限上、講演の最後に説明された、講師の主研究テーマの1つであるCuTi合金の高機能化におけるTEM観察について述べる。時効析出型のCuTiは、高強度、高導電率を有し、Beなどと異なり環境に優しい元素からなる合金であるので、接点用通電材料として汎用性がある。

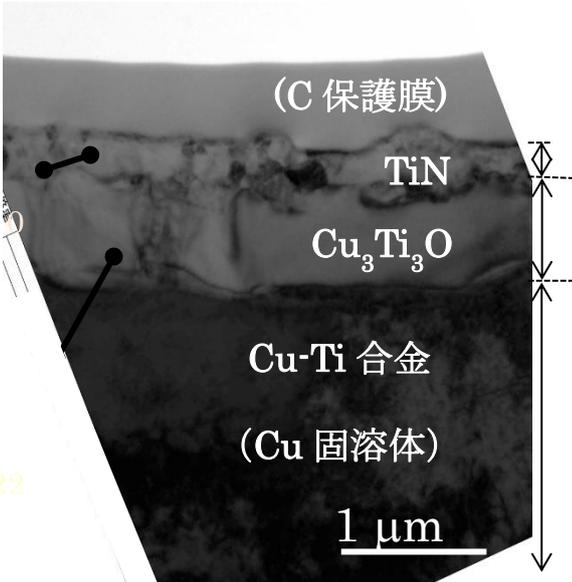


図5 プラズマ窒化したCuTi合金からFIB法で作成した薄膜試料における断面TEM像。

低圧窒素ガス雰囲気グロー放電によってイオン化した窒素を試料中に拡散させ、チタンの窒化物を表面に作成すること(プラズマ窒化)により、表面硬度、摩耗特性の向上を試みた。図5に、800℃で6時間プラズマ窒化したCuTi合金の表面をFIB法で切り出した試料に対するTEM像を示す。試料表面に窒化チタン層が明確に見える。この窒化層により、試料表面のビッカース硬さは処理前の5-6倍に向上し、摩耗特性も飛躍的に向上したことが示された。

本講演では、イオン照射やプラズマ処理によって試料のごく表面にあらわれる微細組織の変化が、いろいろな薄膜試料作成法を駆使することにより、非常に明瞭に観察できることが示された。イオン照射などを用いて高温超伝導体や鉄系超伝導体の改質を試みるグループとの共同研究も始まったと聞いている。照射による微細組織の観察と、種々の物性変化の結果が上手くかみ合っ、今後ますます、このような分野が発展することを願うものである。

(岩瀬彰宏 記)

2. ADS用材料に関する研究の現状

日本原子力研究開発機構 大久保成彰

原子力による発電は、今後とも一定の役割を担っていくべき技術であるが、大きな問題のひとつに、使用済み核燃料の最終処分がある。地中深くに埋設する、いわゆる地層処分が検討されているが、その放射能が天然ウランのレベルにまで低下するのに、直接処分では10万年、再処理をしたものでも5000年かかるとされており、この途方もない時間が、地層処分法が十分理解されない要因であることは間違いない。本講演では、放射性廃棄物に含まれる有用元素の分離や、加速器駆動核変換システム（ADS）を用いて長寿命核種を短寿命核種に変換する分離変換技術について説明頂き、続いて、ADS用材料の腐食や照射効果などに関する最近の研究成果を紹介いただいた。

まず初めに、ADS分離変換技術導入により、核廃棄物の地層処分に必要な面積や時間スケールがいかに減少するかというわかりやすい説明があった。それによると、使用済み核燃料を直接処分するのに必要な面積や時間に対し、ADS分離変換技術と長期貯蔵により面積は200分の1に、時間は1000分の1である300年程度にまで減少できる。300年という時間間隔は、



図1 講演中の大久保講師。

300年前に作られた建造物なども多く現存することを考えると、身近な時間スケールである。

次に分離変換技術に関する解説があった。従来の方法では、再処理でU、Ptを取り除いた高レベル廃棄物をすべてガラス固化体として地層処分する。これに対して、分離変換技術では、ガラス固化の前段階で、群分離プロセスによりマイナーアクチノイドMA (Np, Am, Cmなど)、希少金属として有効利用が期待される白金族元素 (Rh, Pd など)などに分離する。1000年後の放射能の大部分を占めるMAは、ADSにより核変換する。このように、分離変換技術は、放射性廃棄物を分別することで、地層処分の負担軽減化を担う技術であるといえる(図2参照)。

次に、MAなどの長寿命核種を短寿命核種に核変換するAccelerator Driven System (ADS)の説明があった。ADSとは、加速器により高エネルギーに加速した陽子ビームを各破砕ターゲット(鉛ビスマス)にあてて発生した高速中性子をMAなどに照射して未臨界状態での核分裂反応を利用して短寿命化するシステムである。原子炉によるシステムとは異なり、加速器を止めれば核反応

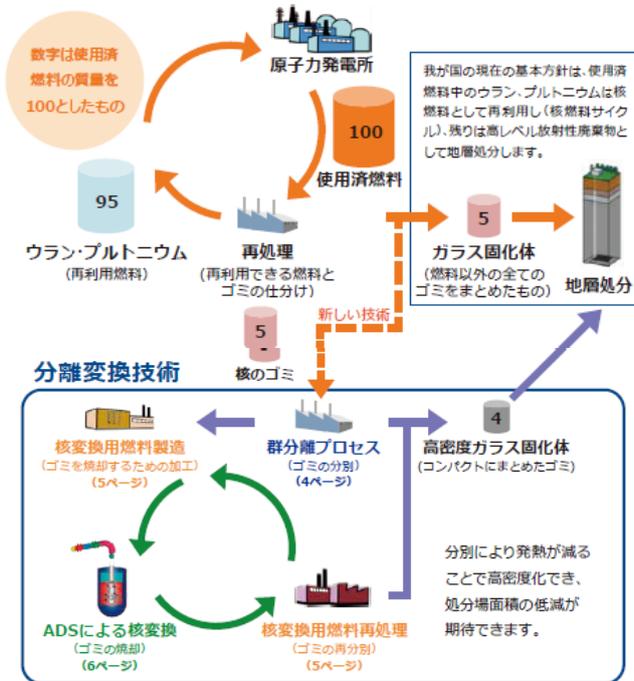


図2 分離変換技術の説明図

JAEAパンフレット「核のゴミを減らせ-加速器による放射性廃棄物の低減技術-」より抜粋。

は停止し、暴走する心配がないという利点を有する。

ADSの概要の説明の後、本講演の本題であるADS炉心部材料に関する腐食や照射効果に関する課題についての解説があった。図3に、ADS炉心部材料の課題についてまとめてある。まず大きな問題となるのがADSのターゲット(液体ビスマス・鉛共晶金属、LBE)中で使用される鉄鋼材料の腐食挙動である。腐食挙動は酸素濃度に大きく影響されるので、LBE中の酸素濃度を最適な範囲で制御する必要がある。鉄鋼材料に対する最適値

JAEA ADS炉心部材料への照射影響及び材料課題

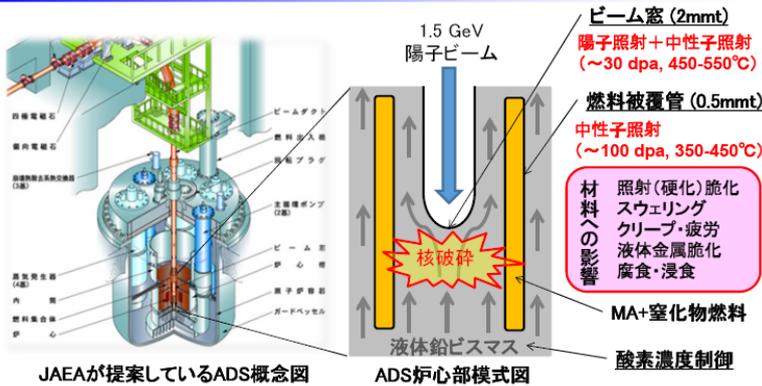


図3 ADS炉心材料に関する照射や腐食の影響。



図4 QST 高崎研 TIARA 加速器に設置されたトリプルビーム照射装置。

実験結果としては、水素やヘリウムガスが蓄積することによって、はじき出し損傷による体積膨張(スウェリング)が助長されることが示されている。またイオン照射後LBE中での腐食評価も可能である。これら模擬照射実験のデータは有用であるが、ADS実機材料の仕様を決めるには、やはりLBEの流れ場中での中性子照射実験が強く望まれることが強調されて講演を終えられた。

ADSによる分離変換技術は、原子力発電における大きな問題を解決する技術として開発が急がれる。今後の研究の展開に大いに期待したい。

(岩瀬彰宏 記)

3. X線回折によるワイドレンジ高速検出器を用いた高速残留応力測定

株式会社 島津製作所 分析計測事業部 小川理絵

一般的にX線回折装置では、 θ - 2θ の角度の関係を満たしながらスキャンを行い、1本のシンチレーションカウンターで回折パターンを取得している。シンチレーション検出器は1点1CHの素子である。これでは測定に時間が掛かる。講師らは、ライン状に1280CHの素子の半導体チャンネルからなるワイドレンジ高速検出器OneSightを用いることで、広い取り込み角度を生かして $10^\circ \sim 20^\circ$ （ゴニオメータ半径に依存）もの角度範囲のデータが一度に取り込める装置を開発した（XRD-6100/7000用）。図2はXRD-7000である。

OneSightが威力を発揮するのは、内部応力の測定である。内部応力は、試料面法線と回折格子面法線が作る角度 Ψ を変化させ、回折X線のピークの変化を求める。ピークと入射角との関係から内部応力を決定できる（ $2\theta \cdot \sin^2\Psi$ 法）。ゴニオメータをスキャンすることなく一度にピークの形状が測定できるので、 ψ 角度のみを変えて測定すればよく、短時間で結果が得られる。1本のピークに注目する測定においてはこのような「ワンショットモード」により測定の高速度をはかることができる。従来のシンチレーションカウンターを用いてスキャンする方法に比べて、測定時間は1/25に短縮できるそうである。このワンショット分析を生かした残留応力の高速測定について幾つかの例について紹介された。

最初の例は線径3.3mmのコイルばねの残留応力測定である。残留応力の値はばねの内側が -527 ± 15 (MPa)、外側が -599 ± 18 (MPa)であった。

ばねは金属を曲げただけでは内側は圧縮応力、外側を引張応力となるはずだが、応力値は内側も外側もほぼ同等の圧縮応力であったことは興味深い結果である。

二番目の例は、ベアリング構成部品の残留応力測定である。 -1000 MPa近くの圧縮応力が掛かっていることが分った。



図1 講演中の小川講師。

● XRD-7000

XRD-7000S/L
XRD-7000S/L OneSight



- 水平型ゴニオメータ
- ゴニオメータ半径可変 (200mm~275mm)
- 大型の試料ステージに対応 (350φまでの大型試料)
- 十分なX線出力 (2kW, 3kW)



図2 島津 X線回折装置 XRD-7000。

三番目の例は鉄板の被覆アーク溶接について、作業の初心者者と熟練者で、溶接部付近の残留応力の分布に違いがみられるかを調べたものである。積分時間は少し長めの60秒である。図5に初心者と熟練者の2枚の測定試料を示す。残留応力は、溶接軸に平行方向で測定した。位置は溶接軸から4.5cmの範囲で、7点から10点の測定を行った。初心者の溶接は区分Bにおいて残留応力が引張になっていることが分かる。これは非常に興味のある結果である。応力が引張では材料はその応力を緩和するために反応性が増す。例えば亀裂が入りやすくなり、また腐食なども起こり易くなる。原子炉の压力容器などの大型構造物の溶接部がこのような方法で全て測定できれば、安全性が増すことが期待される。

島津製作所は現在では計測装置の総合メーカーであるが、1896年にX線写真撮影に成功したことは良く知られている。これはレントゲン博士がエックス線を発見してから11ヵ月後のことである。その時点から現在まで、X線関連の開発が行われていることは素晴らしいことである。平成30年度の第一回見学会が島津所であった（詳しくはONSAニュース28-2参照）。見学会と今回の研究会に参加した方は、島津製作所の歴史と現在の活動状況を良く知ることができたと思う。なおワイドレンジ高速検出器OneSightが装備されているXRD-6100と7000の基本装備の価格は1300万円と1700万円とのものである。

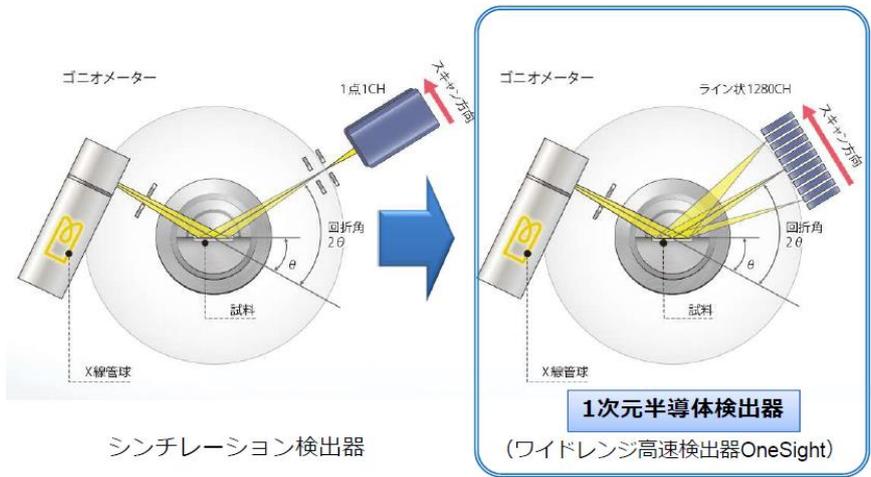


図3 従来のシンチレーション検出器と1次元半導体検出器の比較。

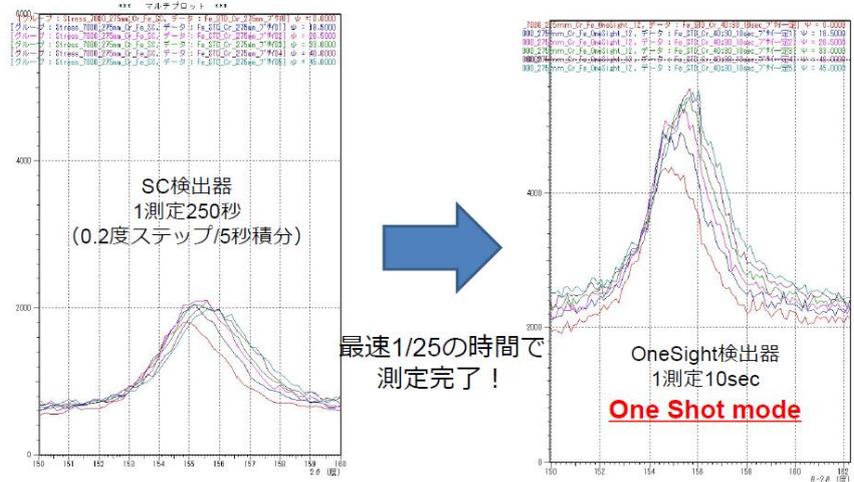


図4 従来のシンチレーション検出器と1次元半導体検出器の測定時間の比較。

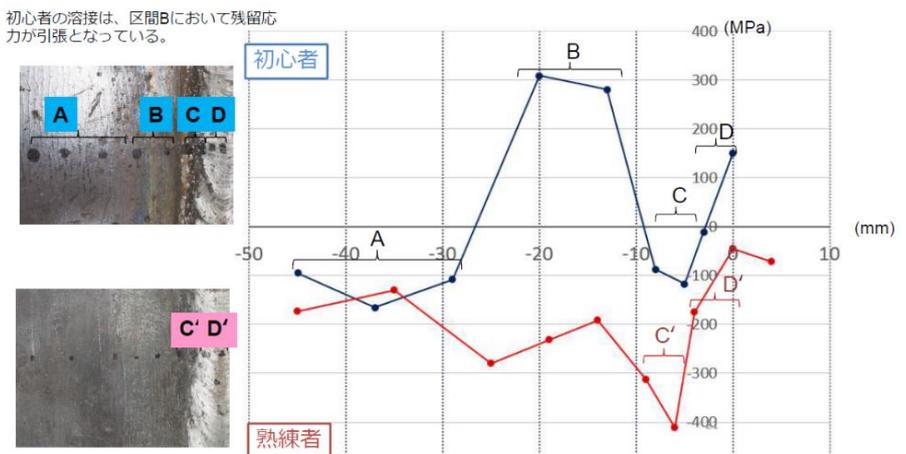


図5 鉄板のアーク溶接における初心者と熟練者の残留応力分布の違い。

島津製作所の歴史と現在の活動状況を良く知ることができたと思う。なおワイドレンジ高速検出器OneSightが装備されているXRD-6100と7000の基本装備の価格は1300万円と1700万円とのものである。（義家敏正 記）

4. リスクコミュニケーションを社会心理学から考える

関西大学 社会安全学部 土田昭司

講師の土田先生は、「リスクコミュニケーション」は、理系と文系では捉えられ方が異なると言われる。話は「安全」の定義から始められた。安全とは、「我慢できないリスクがないこと」と定義される。したがって、我慢できるかどうか「安全」の基準になり、完璧な安全などはなく、安全は程度の問題となる。そこで、安全と危険の境界をどこに置くかが問題となるが、それは文化や時代によって異なり、客観的な基準は存在しない。完璧な安全がない以上、リスク対応は、経済的制約や時間的制約など様々な制約のなかで、如何に安全を達成するかにかかってくる。それが、いわゆるALARA(As Low As Reasonably Achievable)基準であり、合理的に達成可能な範囲でリスクに対応することになる。結局、リスクコミュニケーションとは、社会として合理的に達成可能な範囲とはどれくらいかを定めるために話し合うことである。この「合理的に達成可能な範囲」は、最終的には人々の心理によって決定されることになる。様々なリスクを調整して全体として最適な安全を確保することをリスクガバナンスという。リスクガバナンスには、トップダウン型とボトムアップ型があり、この2つがぶつかり合えば軋轢が生まれることになるが、この両者がぶつかり合ったときには、民主主義社会ではボトムアップ型が勝つ仕組みになっている。理系の専門家はトップダウン型の考え方を取るのに対し、非専門家はボトムアップ型の考え方で対抗することになり、専門家はそこにストレスを感じるようになる。土田先生が、冒頭に理系と文系ではリスクコミュニケーションの捉え方が異なると言われたのは、ここから派生するものと考えられる。

以上の内容が、本日の講演の結論となるが、そこに至る詳細について紹介する。まず、人間の思考の基本形を理解しておくことは、リスクコミュニケーションにおいて重要である。その一つが、「限定された合理性」であり、我慢できる解が見つければ、もうそれでよいとする考え方である。最適解である必要はなく、満足解であればよいというのが、人間の基本的な思考パターンである。さらに、人間の思考の基本形による危険判断には、次に挙げるようなバイアスがある。それらは、例えば、①利益の大きさ、②恐ろしさ/かわいらしさ、③馴染みのなさ、④自発性、⑤コントロール感、⑥発生確率を無視した被害の大きさ、⑦遅発性、⑧人工物、⑨伝統的ではないもの、⑩不平等性などである。どれくらい我慢できるのかという程度は、結局、ここに掲げたバイアスの影響を受けることになる。さらに、進化論によれば、人間は危険に敏感な動物である。獲物を捕食する「強い動物」は、利益情報収集能力を進化させてきたのに対し、捕食される「弱い動物」は、危険情報収集能力を進化させてきた。この枠組みでは、人間は「弱い動物」として進化してきており、遺伝子が規定する人間の能力は弱い動物のままである。一方で、知的能力に基づけば、人間は地上最強の動物でもあり、その面においては利益を追求する。すなわち、人間は、本能的には利益よりも危険に敏感であり利益を無視してでも危険を探知することを惜しまないように進化してきたが、知性的には利益情報に敏感であるという二面性を持っている。さらに、人間は、現実を客観的にはなく主観的に認識する。すなわち、私達は自分にとって都合のよい情報に基づいて判断しており、都合の悪い情報は排除しているのである。



図1 講演中の土田講師。

さて、専門家と非専門家間のリスクコミュニケーションにおいて、「欠乏モデル」がかつて提唱された。これは、専門家が正しい知識を正しく提示することで、非専門家も専門家と同じリスク判断をするようになるという考え方である。しかし、今日では、この欠乏モデルに基づくリスクコミュニケーションでは合意に至ることはほとんど無いことが明らかにされている。特に、不確実な情報・知識や多義的な情報・知識は、非専門家を混乱させて不信をもたらす結果となる。このような状況において、最近着目されているのが、専門家と非専門家間の信頼形成である。この信頼形成を促進させる要因は、1) 相手の専門的能力の高さ、2) 相手の誠実さ、3) 相手との関わり合いの深さ、4) 相手と同じ価値観、5) 相手への愛などがあると指摘されている。すなわち、相手を愛することなしに、相手から信頼されることはないということになる。土田先生は、最初に「合理的で達成可能な範囲」とは、最終的には人々の心理によって決定されると言われたが、その心理がどのように形成されるのかが後半で様々な具体例とともに示された講演であった。最後に、お互いの信頼形成がリスクコミュニケーションの鍵になるという結論が大変印象に残った。

(児玉靖司 記)