

日独技術予測調査(ミニ・デルファイ)について

(NISTEP Report No.42)

技術予測調査研究チーム 佐藤、田口、桑原

1. 本調査研究の背景

科学技術庁では、1971年から長期的視点に立って我が国の科学技術の発展の方向を探るため5年毎に技術予測調査(デルファイ調査)を実施している。近年、ヨーロッパを中心にこうした技術予測に対する関心が高まり、ドイツにおいては、日本との協力プロジェクトとしてドイツ連邦研究技術省(BMFT)が日本の第5回技術予測調査と同内容の調査を実施し、その結果を1993年8月に公表した。日独両国の調査結果の比較分析(NISTEP REPORT No.33 1994年4月)の結果、技術の実現時期については、国による差はかなり小さく、一方で、どのような技術を重視するか等の点については、大きな差が認められるケースもあることが明らかになった。また、フランスも同様の調査を実施し、その分析結果はまもなく公表される予定である。技術予測調査を国際的に実施し、将来ビジョンを国際的に共有していくための手法の確立に向けて、試験的な調査を実施するという観点から、今回日独が協力して、課題の作成段階から共同で取り組む世界初の国際的な技術予測調査(ミニ・デルファイ調査)に着手した。

2. 調査の方法と特徴

(1) 調査対象分野及び調査課題数

表1の技術領域について、日独が協力して課題を作成した。具体的には、日独の委員会が自国の提案を作成し、それを交換し調整した上で、最終的な課題を決定した。今回の調査における日本提案課題とドイツ提案課題の割合は大体半々になっている。

また、第1回調査票を日独の回答者に送る際に、その調査票に載せた数十の技術課題以外に調査すべき技術、問題の解決策等がある場合に、回答者に提案するよう依頼した。この結果、第1回調査の課題数120に対し、第2回調査の課題は132に増加した。

表1 ミニ・デルファイの調査分野及び調査課題数

1. 材料・プロセス
太陽電池(18課題)、 超電導(12課題)
2. 情報・エレクトロニクス
人工知能(14課題)、 ナノテクノロジーとマイクロマシン(21課題)
3. ライフサイエンス
がん(17課題)、 脳機能(18課題)
4. 環境
ごみ処理技術とリサイクル(17課題)、 地球規模の気象変動(15課題)

(2) 調査手法、調査項目

調査手法はデルファイ法(アンケート調査を2回実施。2回目については1回目の集計結果を回答者に提示し、これによって回答者は全体の意見の傾向を見ながら課題を再評価出来、意見が収れんされる。)である。アンケート回答者は、両国ともに産学官の専門家であり、合計で日本405人、ドイツ459人である。

調査項目としては、実現時期の他に、科学技術、経済、環境、途上国、及び社会の5つの軸のそれぞれについて重要度の評価を依頼した。

また、「課題実現に関する必要条件」として、科学技術上の問題解決、将来の市場における需要の増大及び将来の市場における価格競争力の向上の3つについて、課題実現にあたっての必要性の度合を聞いている。(ドイツの質問票では、これら3つの見通しの程度を聞いている。)

調査で取り上げた技術を巡る現状(「課題実現に関する要因の評価」)について、産業界の取り組み、公的な規制、公共の助成、国際共同開発の実施、社会一般の理解、研究開発資金・設備等の整備、人材の確保及び育成、ベンチャーキャピタル等の技術革新環境の整備、現在の研究開発水準の9つの項目についての現状評価を聞いた。

さらに、回答者のコメントのフィードバックを行った。即ち、第1回アンケート調査でそれぞれの技術課題について寄せられた代表的な意見を第2回調査票に記載した。この記載された意見に対するコメントも更に第2回調査で寄せられた。

3. 全体的傾向

(1) 重要度

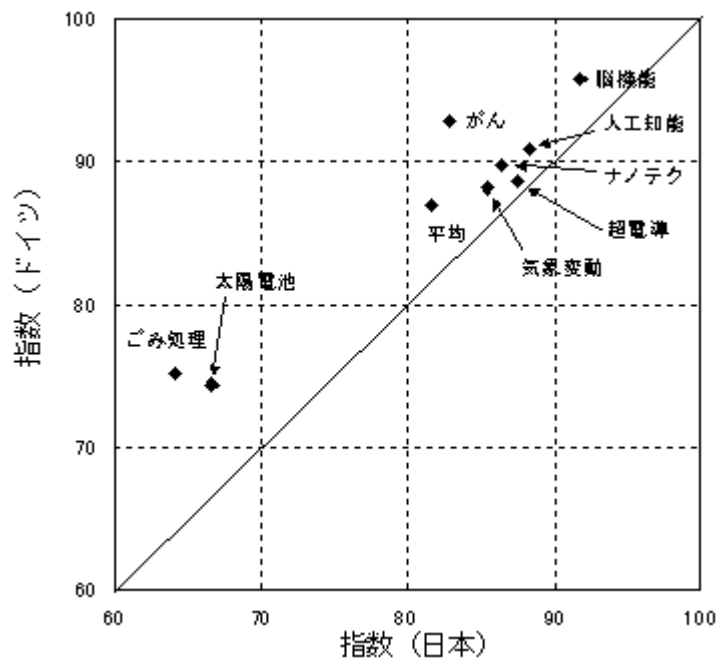


図1 科学技術の発展のため

科学技術の発展のため

科学技術の広い分野の発展に寄与すると評価された値(指数:最大100、最小0)の平均は、全課題で日本81、ドイツ87であり、日独とも今回の重要度の5つの設問項目の中で最も重要と考えている。

サブエリア毎に見ていくと、「脳機能」を日独ともに最も高く評価している。「人工知能」、「がん」及び「気象変動」について日独とも比較的高く評価し、逆に、「太陽電池」及び「ごみ処理」に対する評価は日独ともに平均よりかなり低い。

経済の発展のため

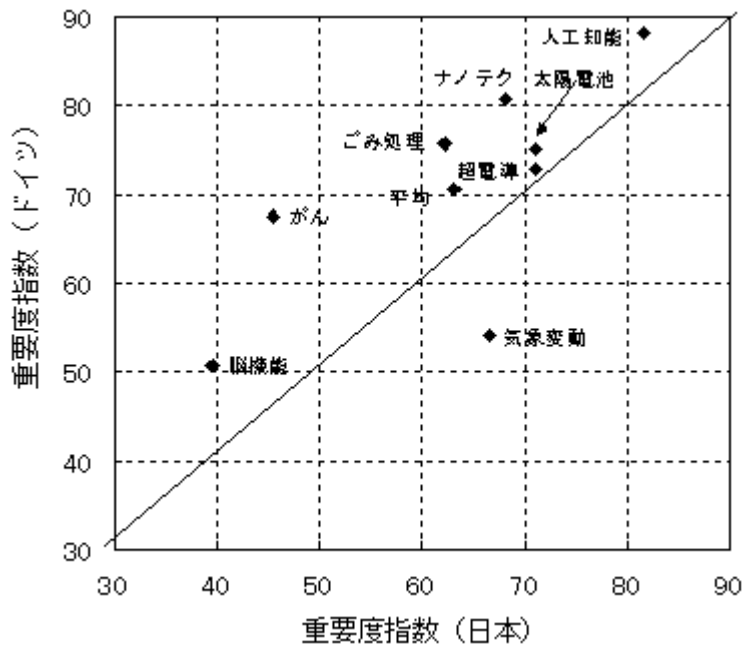


図2 経済の発展のため

全課題での平均は、日本63、ドイツ71とドイツの方が高くなっている。サブエリア毎に見ていくと、経済発展への寄与が最も高く期待されているのは、両国ともに「人工知能」である。その他は、「ナノテク」、「太陽電池」、「超電導」が比較的高く、「脳機能」は両国とも低い評価となっている。また、「がん」及び「気象変動」については、両国の評価の差が大きくなった(図 2)。

「人工知能」の中で、経済的重要性が特に高いとされている課題としては、「212:データベースの指定なしに世界中からデータや知識を数分以内に検索するシステムの普及」や「213:在宅のまま必要な図書や文献資料にアクセスできる電子図書館の普及」というような情報利用環境の高度化の課題、あるいは「203:人工知能の大規模ソフトウェア開発等への実用化」や「205:仕様から実用的なプログラムを合成する自動プログラム合成方法の実用化」のようなソフトウェア関連の課題が挙げられる。

(2) 現状評価の日独比較

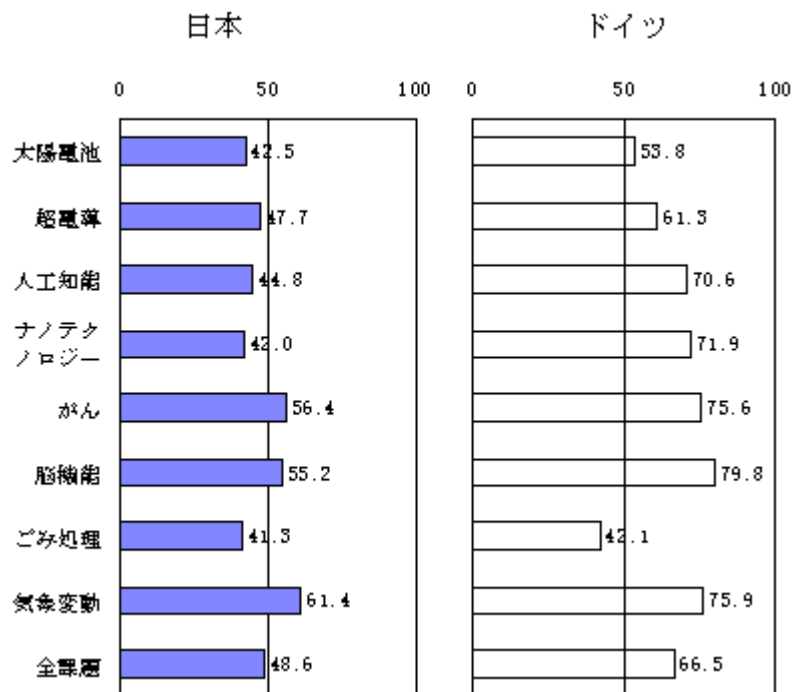
ここでは、「国際共同開発の実施」と「研究開発資金」について紹介する。

(国際共同開発の実施)

「国際共同開発の実施」指数の全課題での平均は、日本49、独67(全員が現状が良いと考える場合100、悪いと考える場合0)であり、日独で比較的大きかった。ドイツでは「ごみ処理」以外全て50を越えており、「脳機能」、「がん」、「気象変動」のような比較的基础的なサブエリアではかなり活発に国際協力が行われている。日独で差が大きかったのは、「人工知能」、「ナノテク」といった情報・エレクトロニクス分野である(図 3)。

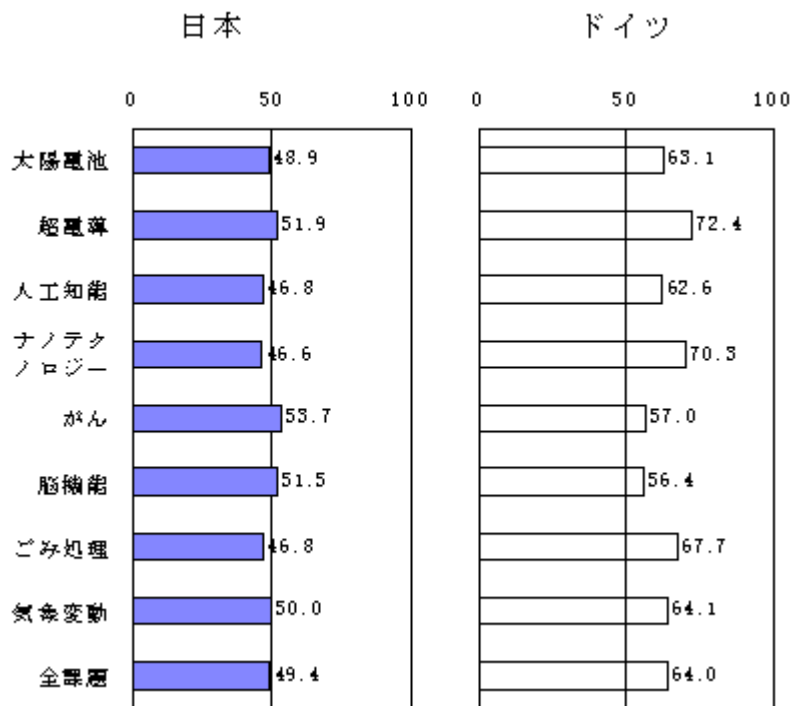
各課題毎について見ると、日独ともに国際協力が十分に実施されていると評価された課題は、「308:ゲノム研究のがんの診断・予防・治療の新しい戦略開発のための応用」、「319:海馬長期増強と長期抑圧の分子機構の全貌の解明」、「331:【追加課題】がんの転移のメカニズムの分子レベルでの解明」等のライフサイエンス分野である。また、日本の指数の高いベスト10の中で5課題は「気象変動」であるのに対して、ドイツのベスト10の中では「がん」が5課題、「脳機能」が4課題とライフサイエンス分野課題が上位を占めている。

図3 各サブエリア毎の日独比較(国際共同開発の実施)



(研究開発資金、設備等の整備)
「研究開発資金、設備等の整備」指数の全課題での平均は、日本49、独64であり、日本では現状が中程度と評価されているのに比べ、ドイツでは現状がやや良いという結果になった。サブエリア別では、「がん」及び「脳機能」以外で、日独の差が大きくなっている(図4)。次に各課題毎について見ると、日本で現状が良いと評価された課題は少ないのに対し、ドイツでは比較的現状が良いと評価された課題が多かった。日本の指数の最も高い課題は「102: 効率20%の大面积薄膜太陽電池の実用化」の65であり、ほとんどの課題において現状が可もなし不可もなしーやや不満という結果になった。逆にドイツでは指数が70以上の課題が3割近くあり、ドイツの回答者が現状にかなり満足している。また、両国のベスト10を見ると、日本は6課題がライフサイエンス分野、ドイツは6課題が材料分野であり、日独で上位にある分野がはっきりと分かれた。

図4 各サブエリア毎の日独比較(研究開発資金)



4. 分野別実現動向

・太陽電池

「101:効率20%以上の大面積アモルファスシリコン太陽電池の実用化」、「102:効率20%の大面積薄膜太陽電池の実用化」の様な変換効率20%程度の太陽電池の実用化が、日本では今後約10年で進むと見られている。変換効率のそれ以上の向上は、「106:高効率の太陽光発電効果をもつ新材料の開発」(2013年)、「103:効率30%の太陽電池の普及」(2017年)に見られるようになり先となっており、30%以上の変換効率が実現するには今後15年から20年を要するとみられている。このような技術的困難の認識は、回答者のコメントにも現れており、技術的に困難な変換効率の向上を目指すより、20%程度の変換効率でもコスト的な面で実用性のある技術開発を志向するのが現実的なアプローチであるという意見が多い。

太陽電池の応用が、ビルや住宅に普及していくのは、「107:ビル壁面や屋根に太陽電池一体型建材が普及」(2005年)、「113:住宅用太陽電池の普及による住宅の電力供給や余剰電力提供の実現」(2009年)の様に比較的早いという展望を日本の専門家は持っている。また、太陽電池を電源として利用する電気自動車の普及についても、2010年前後と考えている。一方、「116:太陽光発電による世界的な水素経済の確立」、「114:高温超電導送電等により世界的な電力供給を行う太陽光発電産業の成立」の様な太陽エネルギーの国際的な利用システムの確立については実現するとしても2020年頃になると見られている。

・超電導

比較的早く実現すると予測されているのは、「120:ジョセフソン接合を用いた簡単な高温超電導回路の開発」(2002年)、「117:高温超電導のメカニズムの解明」(2003年)、「125:25T以上の超精密超電導マグネットによる1GHz NMR装置の製作」(2006年)等の理論の解明や装置の開発に関するものであり、また、2013年以降に実現すると予測されているのは、「119:常温に転移点をもつ超電導体の開発」(2014年)、「126:超電導体を応用した発電プラントが一般的利用の実現」(2016年)、「122:高温超電導材料を用いた超電導送電の実用化」(2016年)等の常温超電導材料の開発や超電導の大規模な利用技術の開発に関するものである。

今後10年余りの間に比較的規模の小さい応用技術が実現し、また、高温超電導のメカニズムについてもここ10年以内に解明されると予測されているが、常温超電導材料の開発については、高温超電導のメカニズムが解明されてからさらに10年程度を要するという慎重な見方になっている。

・人工知能

人工知能については2003年から2010年にかけて約85パーセントの課題が実現すると予測されており、21世紀初頭には様々な利用が集中的に実用化・普及すると考えられる。

「213:コンピュータネットワークを利用した電子図書館の普及」、「212:ネットワークからデータベースを指定せずに必要なデータを検索するシステムの普及」の様に比較的身近な技術が日独とも2003年頃の実現すると見られている。これらについては、通信コストの低減、著作権、データの公開性等の経済的・社会的な問題を指摘する回答者のコメントが多い。様々な応用の基盤となると考えられる「202:大規模な協調分散型AIシステムの開発」、「211:汎用エキスパートシステムの開発の短期化」が日独ともに比較的早期に実現されると考えられている。

一方、「209:数万語のボキャブラリーを持つ音声対話システムの開発」、「204:写真のような2次元パターンを人間並みの速度で認識するシステムの実用化」、「206:問題を言葉や図で記述できる言語の開発」のように人間に近い機能を実現する課題は、日本の予測の方が遅いという傾向が現れている。この点については、例えば、パターン認識の場合、日本では手書き文字の認識のニーズ等からかなり多くの研究が実施されており、逆に技術開発の困難さも良く認識されていることが影響していると思われる。

・ナノテクノロジー

全体として、この分野においては、両国の展望は良く一致しており、2003年から2010年の間に80パーセント以上の課題が実現すると予測されている。

様々な応用の基盤となる「220:高分解能表面分析による個々の原子の種類の判別技術の実用化」、「225:シリコン表面の欠陥の修復・制御技術の開発」等の技術が2006年までに進展し、2010年までに「217:ナノメータオーダーで決まった表面構造を持つ材料の生産」、「222:STM関連技術による原子・分子単位の反応・合成技術の実用化」、「223:近接法以外の方法で原子サイズのパターンを生成する技術の実用化」等が進むと考えられている。

実現時期に差が見られた例としては、「229:マイクロシステムが人体に埋め込まれ診断・治療を行うようになる」があり、日本2013年に対して、ドイツ2007年になっている。この課題については、一部の回答者から体内に埋め込むことについての抵抗感が指摘されている。実現がもっとも困難と考えられたのは、「224:生きている細胞を利用するマイクロプロセッサの開発」で、実現時期は両国ともに2019年となっている。この課題については、実現しない(他の方法で実現する)と考える専門家も多い(日本25%、ドイツ14%)。

・がん

2003年から2010年頃にかけて、約70から80パーセントの課題が実現するという点で両国の予測は一致しており、課題ごとの実現の早さは、ドイツが日本より早いか同時期という関係になっている。

「309:3次元イメージング技術等のがんの臨床診断技術の実用化」、「314:がん治療に関するデータベースの普及」といった研究が最初に進み、続いて「308:ゲノム研究のがんの診断・予防・治療の新しい戦略開発のための応用」、「311:特定がんについての遺伝子治療法の開発」といった遺伝子的な研究や、「301:細胞がん化におけるシグナル伝達などのメカニズムの分子レベルでの解明」、「332:【追加課題】がんのDNA診断の普及」といった、分子学的がん化プロセスの研究が2010年までに並行して進展すると考えられている。

また、「308:ゲノム研究のがん予防、がん治療への応用」、「312:ガンの転移を防ぐ有効な手段の臨床応用」、「311:特定がんの遺伝子治療法の開発」に見られるようながん治療への応用については、ドイツの方が2年から4年早い予測を行っている。実現に最も時間を要すと考えられたのは、「313:自己のガン細胞を正常化して組み込んだ人工臓器の実用化」で、日本2018年、ドイツ2014年となっている。

・脳機能

両国ともに2008年頃まではあまり大きな進展はなく、その後、約10年をかけて70%強の課題が段階的に実現していくと予測されている。比較的早期に実現すると考えられているのは、

「317:多数のニューロンの活動を同時に、かつ長時間記録する技術の開発」、「316:ヒトの高次脳機能活動の無侵襲・高解像度観察技術の開発」、「315:ヒトの脳活動に伴う分子レベル変化の無侵襲観察技術の開発」等の研究ツールとなる実験観察技術であり、いずれも2008年までに実現すると考えられている。

脳の機能解明に直結した課題については、両国とも大部分2010年以降の実現となっているが、概してほぼ同時期か、ドイツの予測時期の方が早くなっている。具体的には、「318:シナプス可塑性と記憶の関係の解明」(日本2008年、ドイツ2009年)、「323:人間の言語活動の神経生理学的基礎の解明」(日本2018年、ドイツ2014年)等である。両国ともに最も遅いのは、「324:脳のニューロン活動と思考過程の関係の解明」で日独とも2020年となっている。

ドイツの予測が日本より遅くなっている例としては、「327:モデル動物の脳神経系の情報処理機能の解明」(日本2013年、ドイツ2018年)が挙げられるが、これについては、ドイツでは、動物実験が動物保護との関係でなかなか進まないと考えている可能性が強い。このことは、ドイツ回答者のコメントに現れている。これ以外の課題についても、ドイツのコメントでは動物保護法が研究の障害になるという意見が散見される。

・ごみ処理技術

両国の実現時期は全体として比較的良好一致しており、差が大きかったのは「415:大規模に汚染された土壌の微生物利用による浄化実現」(日2010年、独2003年)、「401:どのようなごみも自動的に分類する小型の家庭用ごみ箱の普及」(日2013年、独2005年)の2課題である。

この分野の技術の展開としては、日独ともに、2006年頃までに「404:有価物に関する環境保全やリサイクルのための工業基準の導入」、「403:都市ごみから有価物を分別・分離しリサイクル可能とする経済的方法の実用化」、「405:プラスチックが混合物としても多様にリサイクルできるように構成されることの一般化」の様なリサイクル関連技術が実現すると考えられている。続いて、「414:全ての廃棄物の発生から最終処分までを管理する地域情報管理システムの普及」の様なシステム化が進み、両国とも2011年には「406:資源の循環経済が確立して、ほとんどの材料がリサイクルされる」ようになると考えられている。

両国ともに実現が遅いと考えられているものとしては、「402:住宅、オフィスビルのごみの管路収集システムの普及」(日2014年、独2013年)、「407:製品(消費材)の寿命が5倍になる」(日2015年、独2017年)がある。課題402番については、回答者のコメントを見ても、将来的には、ごみ収集車に変わるごみ収集方法として大型オフィスビルや大型住宅で有力な方法であるという意見がある一方で、リサイクルが困難になる、設備投資、メンテナンスを含めた経済性を確保しにくい等の点をあげてあまり好ましくないとする意見もあるため、日独ともに実現時期の予測がかなり遅くなったと考えられる。

・地球規模の気象変動

2005年から2010年までの比較的短い期間に約70パーセントの課題が実現すると考えられている。残る30パーセントの課題は長期的なものが多く、2020年頃までかかって順次実現していくと見られている。個別の課題について見ても、日独の結果はかなりよく一致しており、実現時期について大きな差の見られたものはない。

日独ともに「429:フロン及びハロンの完全な代替品の実用化」、「421:地球温暖化効果の経済的インパクトがおおよそ評価される」、「432:【追加課題】メタンガスの地球温暖化に与える影響の定量的かつ定性的な解明」の様な地球温暖化及びオゾン層に関する研究開発が2007年頃までの比較的早い段階で実現すると見られている。続いて、「417:火山や太陽の活動の気象への影響の定量的解明」、「419:気象モデル計算における雲の役割の定量的解明」、「424:黒潮やメキシコ湾流に伴う冷水塊の出現予測技術の普及」の様にグローバルな大気・海洋に関する課題がいずれも2010年までに実現すると予測されている。

化石燃料の利用による炭酸ガス増加については、「418:大気圏、海洋、生物圏の二酸化炭素循環に人間が与える影響の定量的解明」が2010年頃(日2011年、独2010年)に可能となり、2020年には「428:世界の二酸化炭素の排出量が現在の80%まで低下」すると考えられている。両国ともに最も実現時期が遅かった課題は「427:再生システムの化石エネルギー代替による二酸化炭素の指数的増加の抑制」であり、ともに2020年までには実現しないという評価になっている。