

1. 本論文の目的

本論文の目的は、半導体MIRAIプロジェクトにおける研究開発についての事例記述・分析を通じて、これまで必ずしも注目されてこなかった科学と技術の相互作用のメカニズムを明らかにすることである。特に本研究が注目しているのは、科学者が自然現象を計測・評価する日常的な活動の中から派生して蓄積されている知識である。

科学者は日々の実験の中で自然現象を計測・評価するという活動を行っている。非常に測定が難しい電子の動きや原子、分子などを高い精度で測定しようと試み、その中で計測機器を扱うノウハウや測定データが何を意味しているのかということについての解釈を深く蓄積しているのである。これらのノウハウや解釈は、論文や特許といった直接的な成果の副産物として科学の世界に深く蓄積されているのである。本研究の目的は、計測・評価を通じて、科学と技術がどのように相互作用しているのかを明らかにすることである。

2. 問題設定

第一章では、科学と技術の相互作用について既存研究がどのように答えてきたのかを明らかにすることで、本論文で扱う基本的な問題設定を行った。科学と技術の関係を考える際の最も単純なモデルは、科学的な知識が技術を規定するというリニアモデルである。このモデルはシンプルであるがゆえに、一般的な支持を得た考え方であったが、一方で科学と技術の間にリニアモデルは成立していないという主張も多くの研究者によって展開された。そうした議論の中で、科学は科学独自のパラダイムにもとづき累積的な進歩を遂げ、一方で技術は顧客や競争業者との相互作用の中で独自の進歩を遂げるという考え方が支配的になっていった。

しかし科学と技術の間にまったく相互作用がないと結論付けられたわけではなかった。科学と技術は時に非常に重要な相互作用をするということが指摘されている。まず技術→科学という経路については、技術の進歩が時に科学的にも興味深い問題を提示し、その問題を解決しようという応用研究の領域において、科学の進歩がもたらされることが指摘されている。例えばパスツールの細菌学上の大きな発見も、フランスのワイン産業における発酵と腐敗の研究の中で見出されたのである。また応用研究を通じてだけではなく、技術の世界で作られるモノである計測・実験機器が科学の世界にもたらされることで、それまで見えなかったものが見えるようになり、科学革命が生じることがありうるということも指摘されている。

一方で科学→技術という経路も存在している。技術の世界で科学的にも興味深いモノが見出され、そのモノについての応用研究が進むと、モノを改良していくための知的基礎が応用研究によって見出され、その知的基盤が技術の改良に役立っていくのである。つまり科学で生み出された知識は、大きなブレークスルーをもたらすようなものではなく、累積的な技術進歩に対して効果を持っているのである。

科学→技術という経路は、応用研究を通じたものに関してのみ指摘されているわけではない。科学で生み出された知識が発明として技術の世界に流れ込み、技術進歩がもたらされることが現代では多くなってきたという主張も存在する。つまり科学の研究の中で生み出された知識が、直接技術の世界で利用されるようになってきたという主張が展開されているのである。

科学で生み出された論文や特許といった明示的な知識が技術の世界に直接流れていくようになったという議論に対しては、科学の世界で生み出された知識を技術として利用するのは容易ではなく、知識は科学から技術にすぐに流れていくわけではないという主張がなされている。科学で生み出された知識を企業が技術として利用するためには、知識を生み出した科学者と密接な接触をしたり、自らも基礎研究を行ったり、優秀な科学者と共同研究を行い、共同で論文を執筆したりすることが必要であるという指摘がなされている。

これらの研究が示唆しているのは、科学の世界には、必ずしも論文や特許といった明示的な知識だけでなく、自ら基礎研究に携わったり、優秀な科学者と直接接するこでしか獲得できない暗黙的な要素があることである。こうした暗黙的な要素があってはじめて科学で生み出された成果を技術として利用できるというのである。

これらの研究は科学で生み出された知識が、直接的に技術に流れていくという主張と比較すると、暗黙的な要素があってはじめてこの種の流れができるという非常に重要な点を指摘しているように思われる。しかしこれらの暗黙的な要素の実態が何であるのかということについて十分な研究が進められているとはいえない。暗黙的な要素を吸収能力とか研究スキル、知的基盤といった概念で説明しようとはしているものの、その実態が何であるのかということについて十分な研究がなされているわけではないのである。

そこで本研究が注目するのが、科学者たちが日々の実験や分析の中で行っている、自然現象の計測・評価に関する知識である。本研究が注目する、科学の世界に蓄積されている計測・評価技術には4つの要素がある。それは①計測・評価のための機器、②ツールを扱うノウハウ、③計測についての理論的な理解、④測定結果についての解釈の4つである。これら4つの要素の総体である計測・評価技術があってはじめて、自然現象を解明していくことができる。しかしこれらの4つの要素は、必ずしもコード化された形で論文や特許の中に記載されるわけではない。科学的な研究において論文という形で提示される成果というのは、研究者が生み出した成果のほんの一部であり、論文や特許を生み出す背後に、実際に実験や分析を重ねた研究者だけに体化した様々なノウハウや計測結果の解釈といった暗黙的な知識があり、こうした知識が自然現象を観察し、理解するための計測・評価技術として科学の世界に高度に蓄積されているのである。

こうした科学の世界に蓄積されている計測・評価技術は、科学の世界においてのみ有効なものではない。技術の世界でも試行錯誤を進めるために多様な計測・評価が行われており、技術進歩の結果、計測の精度が限界に到達したり、まったく新しいものを計測・評価しなければならぬような場合に、科学の世界に蓄積された計測・評価技術が有効に機能し、技術の世界に見えをもたらすと考えられるのである。

3. 事例分析

本研究は、計測・評価技術を通じた科学と技術の相互作用について考察するために、半導体MIRAIプロジェクトLow-kグループにおける、半導体用の次世代材料開発の研究開発についての事例研究を行った。Low-kグループではポーラスLow-k材料という半導体用の絶縁膜の材料開発を行っている。既存の絶縁材料では今後絶縁の要求性能を満たすことができなくなるため、MIRAIプロジェクトでは、大学や公的研究所、企業から科学者や技術者が参加し、共同で研究開発を行っている。

ポーラスLow-k材料は、300nmの薄膜内に多数の空孔を導入した材料である。材料内部に多数の空孔があるため、ポーラスLow-kは非常に柔らかい上に、成膜したときに下地との密着性が弱い材料である。そのため半導体製造プロセスで扱うのが非常に難しい。そこでLow-kグループでは、硬く密着性の高い材料を開発するための試行錯誤と、これらの材料を用いるプロセス装置の処理条件の最適化を行っている。

硬い材料や密着性の高い材料を開発したいという状況で、Low-kグループには一つの大きな問題があった。それはポーラスLow-k膜が厚さ約300nm(0.3 μ m)しかないため、硬さや柔らかさ、密着性、さらにはポーラスLow-k材料内部の空孔に関する計測を行えなかったのである。ポーラスLow-k材料はそもそも、それまでに使われたことがなかった新しい材料である。300nmしかない厚さの膜に、空孔が空いている材料が、産業内で利用されることはなかった。また柔らかい薄膜や密着性の弱い薄膜が産業内で利用されることはなく、企業の技術者たちがこの種の計測・評価を行ったことがなかったのである。

しかしこうした測定ができなければ、どのような処理をすれば材料が硬くなったとか、密着性が高くなったということを判断することができず、性能向上のための試行錯誤を行うことができないのである。

計測・評価ができないという問題に対して、Low-kグループでは、基礎研究を行ってきた科学者たちが問題を解決した。空孔の状態や、薄膜の機械的な強度、柔らかさ、ポーラスLow-k膜と下地の基板との密着性といったものを測定する方法を、科学者が考え出し、その方法を体化させたツールを作り、そのツールを研究者自身が用いて測定するというを行ったのである。

ではなぜ基礎研究を行ってきた科学者たちは、産業内で測られてこなかったこれらの基準を測定する方法を生み出し、そのツールを操ることができたのであろうか。それは科学者たちが基礎研究を行う中で、自然現象を計測・評価するための技術を蓄積してきたからである。

ここでは、空孔の状態の評価についてのみ触れておこう。空孔に関する評価を可能にしたのは、アモルファス・シリコンの光劣化という現象の解明を行っていた産業技術総合研究所の秦であった。アモルファス・シリコンとは結晶構造のないシリコンの薄膜であり、太陽電池や液晶モニターなどに用いられている。このアモルファス・シリコンの薄膜に光を当て続けると、アモルファス・シリコンの性能が落ちてしまう光劣化という現象が存在していた。秦はこの現象のメカニズムを解明するために、光やX線を薄膜にあて、薄膜内部の電子の動きを捉えるための努力を行っていた。そうした努力の中で、光の微妙な変化を捉えるためのツールを扱うノウハウを習得したり、光の変化が得られた場合に、その変化がそもそも正しく測定できているのかという解釈や、変化がアモルファス・シリコン内部の何を意味しているのかという解釈を積み重ねており、光やX線を用いた計測・評価技術を蓄積していたのである。

こうした計測・評価技術が秦の中に蓄積されていたがゆえに、ポーラスLow-k薄膜の内部の空孔を特定するための計測方法を考えることができ、しかもツールを扱う多様なノウハウがあるがゆえに、自ら調整を行いながらツールを組み上げ、正しい測定を行うことができたのである。また、光やX線で測定して得られたデータがポーラスLow-k材料のどのような状態を意味しているのかについての解釈も技術者に対して提示することができたのである。

つまり秦はアモルファス・シリコンの光劣化現象のメカニズムを解明するという研究の中で、光やX線に関連した計測・評価技術を蓄積しており、その蓄積があったからこそ、ポーラスLow-kの空孔を測定する原理を生み出し、原理を体化したツールを扱い、再現性の高い測定値を出すとともに、薄膜内部の空孔の状態がどのようなになっているのかという解釈を技術者に対して伝えることができたのである。秦の論文としての業績は、アモルファス・シリコンの光劣化現象のメカニズムを解明した論文である。しかしその論文を生み出す背後で、自ら工夫を加えながらアモルファス・シリコン薄膜の計測・評価を行っており、そこで光の変化を捉えるツールを扱うノウハウや、測定についての原理的な理解、および測定結果についての解釈といった要素を蓄積しており、それらの計測・評価技術があったがゆえに、ポーラスLow-k材料の空孔評価を正確に行い、技術者たちに正確な測定値と現象についての解釈を与えることができたのである。

こうした正確な値が、起こっている現象の解釈とともに技術者にもたらされることには大きな意義がある。それまで見えなかった空孔の状態や密着性、機械強度などについて正確な値がもたらされることで、どのような条件で材料を合成した場合に、密着性や機械強度が上がるのかということ特定することができるのである。また例えばポーラスLow-k材料をエッチングをした後の空孔の状態について技術者と科学者が議論する中で、エッチングのプラズマが、空孔にどのように作用しているのか、空孔内部で何が起こっているのかということについての解釈が科学者からエッチングプロセスの技術者にもたらされることで、エッチング条件の最適化を行うことができるようになるのである。

4. 結論

事例分析から以下のような命題を導き出すことができる。それは科学が生み出している成果は、論文や特許といった明示的な知識だけではなく、これらの成果を生み出す背後で、科学者たちは多様な計測・評価を行っており、そうした経験の中でツールを扱うノウハウや、計測結果についての解釈といった暗黙的な側面が、深く科学の世界に蓄積されている。こうした暗黙的な側面まで含んだ計測・評価技術は、技術進歩によって、計測の精度が限界に到達した場合や、新たな計測・評価が必要になった場合などに、技術者たちに見えもたらす可能性が高い。こうした見えが技術者たちの試行錯誤を誘発し、さらなる技術進歩が実現されていくと考えられるのである。つまり、自然現象を捉えるという点において、科学と技術は密接なつながりを持っており、科学者と技術者が直接接する中で、計測・評価に関する暗黙的な側面が科学から技術の世界にも

たらされると考えられるのである。