

日本学士院賞 受賞者

高柳 邦夫



専攻学科目 物性物理学

| 略 生 年 月 略 歴 | 昭和二二年 二月 | 昭和四四年 三月 | 同 四六年 三月 | 同 四七年 一月 | 同 五〇年 一月 | 同 五二年 五月 | 同 五六年 二月 | 同 六三年 一月 | 平成 四年 七月 | 同 一三年 四月 | 同 二四年 四月 | 同 二四年 四月 | |
|-------------|------------------|-----------------------|-------------|----------|---|--------------|-------------|---------------------|-------------------|------------|-------------------|----------|--|
| | 東京工業大学理工学部物理学科卒業 | 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了 | 東京工業大学理学部助手 | 理学博士 | ドイツ・マックスプランク協会フリッツハーバー研究所研究員（昭和五四年三月まで） | 東京工業大学理学部助教授 | 東京工業大学理学部教授 | 東京工業大学大学院総合理工学研究科教授 | 東京工業大学大学院理工学研究科教授 | 東京工業大学名誉教授 | 東京工業大学特任教授（現在に至る） | | |

理学博士高柳邦夫氏の「超高真空電子顕微鏡によるナノ構造の研究」に対する授賞審査要旨

1. シリコン(111)表面の 7×7 再配列の構造決定

シリコン結晶の(111)面は、結晶構造から正三角形の格子から構成されるとの予想に反し、実際の表面は単位格子一辺の長さの七倍の周期を持っている。一九五九年にこのSi(111) 7×7 構造が発見されて以来、原子はどのように配列し、結合しているのか、二〇年以上にわたって、詳しい構造は解明されなかった。

表面構造決定の主な手段は低速電子線回折であるが、低速電子と表面近傍原子との相互作用が強結合であるために、解析は容易ではなかった。表面の第一層だけでも $7\times 7=49$ 個の原子が含まれるその表面の構造解析は難関で、多くの表面科学者が挑戦し、沢山の構造模型の提案があったもののどれも説得力はなく、この表面の構造決定は最後まで難関として残るだろうと思われていた。

高柳氏のグループはこのような状況の中で透過電子線回折(TED)を用いた。TEDは電子線のエネルギーが高く、電子と表面近

傍原子との相互作用が弱く、解析が非常に容易になる。しかしそのためにはサンプルを薄くする必要があるが、それに成功し、一九八三年にはDAS模型と呼ばれる模型に到達した。この模型では単位胞あたり一五対のdimer(原子対)と、二二個のadatom(付加原子)があり、また第二層の原子のうち単位胞の半分の部分にあるものが水平にずれておりstacking fault(積層欠陥)をなしている。DASはこの頭文字をとったものである。このような再配列はもとの三角格子と比べてどこにメリットがあるか。それはダングリングボンドの数が少なくなっていることで、切り出したままの(111)表面は、単位胞あたり四九個のダングリングボンドがあったのに対し、DAS模型では単位胞あたり合計一九個に減少したため、安定化したと考えられている。Adatomに関しては、走査トンネル顕微鏡(STM)を用いてその位置がすでに確定されていたが、STMでは最表面の層しかわからず、dimerやstacking faultを含む全体像は高柳氏の電子線回折によってはじめて明らかにされた。このDAS模型はその後の表面X線回折実験、低速電子線回折実験、第一原理計算などの結果でもびくともせず、 7×7 再配列の最終的な模型として万人の認めるところとなり、二〇年来の問題が解決した。

2. 金の量子細線の電気伝導度測定

走査トンネル顕微鏡のチップ（針）を金で作り、そのチップを金の試料表面に接触させてから引き離すと、チップと試料の間に金のナノワイヤが生成する。この系は走査トンネル顕微鏡をなしているが、この系を超高真空電子顕微鏡に組み込み、顕微鏡でナノワイヤの様子を観察しながらチップと試料との間の電気伝導度を測定した。その結果、例えばナノワイヤが1列の金原子から出来ているときは、電気伝導度は $2e^2/h$ となり、2列の金原子から出来ているときは $4e^2/h$ の二倍となった。（ e は電子の電荷、 h はプランク常数）このようにナノワイヤの様子を詳しく観測しながら、量子化された電気伝導度を測定したのははじめてで、この分野に大きな貢献をしたといえる。

3. 金ナノチューブの発見と構造解析

金の薄膜を超高真空電子顕微鏡内で電子線照射し、薄膜に空孔を作り、さらに照射を続けると二つの空孔がくっつき、くっついた部分がナノチューブとなることを発見した。ナノチューブの構造は多層構造をなしており、一つの層は何本かの原子列からなる螺旋型のコイル状のチューブになっている。いろいろな構造のものが作り出されており、各層の原子列の数を外側から、 $n_1-n_2-n_3$ 等と書くべし、7-1, 11-4, 12-5, 13-6, 14-7-1, 15-8-1, 16-9-2 などがある。

その原子列の数には著しい特徴があり、 $2n_1-2n_2$ で飽和し、それ以上になるとさらに一層チューブが形成される。その意味で7はマジック数になっている。さらに相隣なる層の原子列の数は必ず奇数と偶数になっている。このような原子列を持つコイルを、金結晶の(111)格子面をいろいろなピッチで円筒状に丸めたものと考えて、その際のひずみ等を考慮した考察がなされている。

ナノチューブはカーボンナノチューブが有名であるが、高柳氏は金でもナノチューブが出来る事を見いだした。

4. sub-50nm 分解能電子顕微鏡の国産開発

電子顕微鏡の球面収差補正技術は欧米で一九九〇—一九九九年頃实用技術となり、分解能は100nmに達した。我国はこの技術で遅れをとっていたが、高柳氏の独自の収差補正技術により、世界最高性能のsub-50nm分解能を達成し、顕微鏡技術とナノ構造観察の最先端を再び取り戻した。

主要な論文目録

1. K. Takayanagi, D. M. Kolb, G. Lehmpl and K. Kambe: Surface Science, 100, 1981 (1980).
2. K. Takayanagi: Surface Science, 104, 527 (1981).
3. K. Takayanagi: Journal of Microscopy, 136, 287 (1982).

4. K. Takayanagi, Y. Tanishiro, S. Takahashi and M. Takahashi: Surface Science, 164, 367 (1985).
5. J. J. Metois, K. Takayanagi, Y. Tanishiro and K. Yagi: Surface Science, 155, 53 (1985).
6. T. Nakayama, Y. Tanishiro and K. Takayanagi: Jpn. J. Appl. Phys., 26, L1186 (1987).
7. K. Yamazaki, Y. Tanishiro, K. Takayanagi and K. Yagi: Surface Science, 199, 595 (1988).
8. T. Yokoyama and K. Takayanagi: Phys. Rev. B57, R4226 (1998).
9. T. Yokoyama, M. Okamoto and K. Takayanagi: Phys. Rev. Lett., 81, 3424 (1998).
10. H. Ohnishi, Y. Kondo and K. Takayanagi: Nature, 395 (6704), 780 (1998).
11. Y. Kondo, Q. Ru and K. Takayanagi: Phys. Rev. Lett, 82, 751(1998).
12. Y. Kondo and K. Takayanagi: Science, 289, 606 (2000).
13. Y. Ohshima, H. Koizumi, Y. Kondo, K. Mouri, H. Hirayama and K. Takayanagi: Phys. Rev. B65, 121401(R) (2002).
14. Y. Ohshima, A. Onga and K. Takayanagi: Phys. Rev. Lett., 91, 205503 (2003).
15. M. Yoshida, Y. Ohshima and K. Takayanagi: Appl. Phys. Lett., 87, 103104 (2005).
16. Y. Kurui, Y. Ohshima and K. Takayanagi: Phys. Rev. B77, 161403R (2008).
17. Y. Kurui, Y. Ohshima and K. Takayanagi: Phys. Rev. B79, 165414 (2009).
18. S. Lee, Y. Oshima, H. Sawada, F. Hosokawa, E. Okunishi, T. Kaneyama, Y. Kondo, S. Niitaka, H. Takagi, Y. Tanishiro and K. Takayanagi: J. Applied Physics, 109, 113530 (2011).
19. Y. Ohshima, Y. Kurui, H. D. Nguyen, T. Ono and K. Takayanagi: Phys. Rev. B84, 035401 (2011).
20. Y. Ohshima, Y. Kurui and K. Takayanagi: Applied Physics Express, 4, 055002 (2011).