

Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Croatia, pp. 51-64.

Cubrinovski, M., Ishihara, K. and Hatano, M. (1998), "Effective stress analysis of seismic vertical array sites at Kobe", Proc. 11th Danube-European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Croatia, pp. 325-332.

Ishihara, K., Cubrinovski, M., and Nonaka, T. (1998), "Characterization of Undrained Behaviour of Soil in the Reclaimed Area of Kobe", Special Issue of Soils and Foundations, No. 2, Japanese Geotechnical Society, pp. 33-46.

Cubrinovski, M., Ishihara, K. and Furukawazono, K. (1999), "Analysis of full-scale tests on piles in depositions subjected to liquefaction", 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisbon, Vol. 2, pp. 567-572.

理学博士千川純一氏の「シリコン結晶の成長と完全性」に対する授賞審査要旨

X線の発見 (W. C. Röntgen, 1895) 後、C. G. Barkla (1905) がX線は電磁波であることを示してから、その波長が問われていた。それには極細の回折格子が必要で、原子が整列した結晶を用いて、X線回折実験 (Laue-Friedrich-Knipping の実験、1912) が行われた。

まもなく、結晶からのX線回折強度が計算された (C. G. Darwin, 1914; P. P. Ewald, 1917)。多重散乱を考慮した動力学的回折理論による「理想的に完全な結晶」に対する回折強度は下限値を、一回散乱を仮定した運動学的理論による「理想的なモザイク構造」または「理想的に不完全な結晶」に対する回折強度は上限値を与える。現実の結晶はその中間の回折強度を示し、長い間、「理想的に完全な結晶」は実在しないと信じられてきた。

この通念を打ち破ったのはC. W. Dashが、一九五八年に転位(原子配列の線状の乱れ、線欠陥)を含まないシリコン結晶の製作に成功した。この無転位結晶によって、「理想的に完全な結晶」の回折強度が実証され、さらに、原子配列の乱れた結晶の回折理論と実験に進展した。転位近くの格子が歪んで回折角度が変り、回折し

たところから来る回折線強度が変る。この分野では伝統のある我が国の貢献が大きい。このように、無転位シリコン結晶は半導体デバイス、集積回路を可能にただけでなく、X線結晶学をも躍進させた。では、どうして完全な結晶になるのであろうか。

千川氏は、この問題に応えるため、強力回転対陰極X線管と高分解能X線テレビを開発、X線回折顕微法による結晶欠陥の直視を實現して、シリコン融液（融点 1130°C ）からの結晶成長過程を長時間で観察し、結晶完全化の過程を解明した。

その観察結果によると、結晶が融液に接して固液平衡状態にあるとき、転位は安定に固液界面に存在する。しかし、結晶成長が始まると多くの転位は界面の進行に追従せず、界面近傍は無転位になる。平衡からのずれ（過冷却度）が若干大きくなると転位がなくても結晶は成長することは既にいくつか報告されている。もう一つの無転位化の基本は、成長した完全結晶の中に転位の侵入を防止する性質があることである。これが侵入するのは熱歪によることも示すことが出来た。

転位による結晶成長効果、いわゆる渦巻成長は、無転位結晶成長と互いに異なった描像を与えるにもかかわらず、これまで独立した事象として考えられることが多かった。実際には、逆の成長が転位に及ぼす効果で転位が成長界面に存在できないゾーンが出来ること

が説明できる。渦巻成長は安定化された特殊な転位によることが示された。

一方、融解過程では、転位芯が融解して成長の場合と同様に界面自由エネルギーが増大するため、融解界面には転位の存在が困難になり、界面近傍は無転位を維持し、「理想的に完全」な領域（等厚干渉縞が見える）を形成しながら、表面から融解が進む。

さらに、千川氏は結晶の加熱中に発生する転位の起源を観察し、転位発生の抑制法を工夫した。これにより、Dashは無転位で結晶を成長させたのに対して、同氏は至難と思われていた無転位の融解を観察した。その結果、無転位結晶は融点より高い温度に過熱され、結晶中にドロップを形成して、内部からも融解が起こることが示された。「固体は殆ど過熱せず、融解は結晶表面から起こる」という経験則は、表面から一層乃至数層ずつはがれてゆく過程以外には、転位が表面に高密度に導入されていることが多いからであって、古くからのナゾに解決の示唆が与えられた。

このドロップの固化によって微小欠陥が発生することから、成長中の再融解で発生する渦巻状に分布した格子間原子型の微小欠陥スワールの形成モデルも提出している。さらに、無欠陥と考えられていた領域にも一様に分布した格子間原子型の極微細欠陥を見出した。これらすべての格子間原子型の欠陥が、酸素と結合しやすい不

純物アルミニウム（またはガリウム）の微量の添加によって消滅し、原子空孔型の欠陥だけが残留することから、これまでさまざまに議論されてきた点欠陥に対して、シリコンの真性欠陥は原子空孔であり、格子間原子は不純物酸素によると結論している。

このように、千川氏は結晶欠陥の本性を示す一動的挙動を直視する装置を開発して“Live X-ray Topography”と呼ばれる新分野を開き、さらに、これを用いて、結晶化と融解過程での結晶欠陥の起源と挙動を初めて解明した。

そもそも結晶成長は単なる固化ではなく、原子配列が整う過程である。長い間、指導的理論であった渦巻き転位によるものばかりとした考えは、このDashが初めて示した実験によって成立しないことがあることが示され、Kosselの発表した理論によって説明ができることは既に明らかにされた。にもかかわらず、実際の結晶成長中に発生、運動、増殖、消滅を繰り返す結晶欠陥をその場観察する手段がなかった。それは、結晶欠陥の観察に必要な分解能と、速い変化を追う時間分解能と、両方同時に達成して、はじめて可能となるもので、この装置の開発によって転位論を実際の結晶に結び付け、結晶欠陥の研究に新しい展開を起すことになった。

開発されたX線回折像直視装置については、八件の特許が登録されており、一九七五年頃から市販され、米国、ソ連、ドイツなど七

ヶ国に輸出された。国内では、北海道大学、東北大学、東京大学、名古屋大学などに、主に地域の共同利用として順次設置されていた。

また、半導体結晶の完全性がデバイスの性能に影響するため、この装置が結晶品質や工程の改善に利用され、半導体産業の隆盛に貢献したこともよく知られている。

以上の研究業績により、千川氏は紫綬褒章はじめ、多数の賞を受賞している。

主要な著書・論文の目録

- “Live X-Ray Topography” (Invited paper). J. Chikawa, Indian J. Pure Appl. Phys. 19, 890 (1981). [Special issue for the 60th Birthday of Prof. A. R. Verma.]
- “Growth and Evaluation of Bulk Crystals”. J. Chikawa and J. Matsui, in “Handbook on Semiconductors” Ed. T. S. Moss, Vol. 3, Ed. S. Mahajan (Elsevier Science B. V., Amsterdam, 1994) pp. 1-71.
- “X-Ray Topographic Observation of Moving Dislocations in Silicon Crystals”. J. Chikawa, I. Fujimoto, and T. Abe, Appl. Phys. Lett. 21, 295 (1972).
- “Real-Time X-Ray Topographic Observation of Melting and Growth of Silicon Crystals” (Invited paper). J. Chikawa and F. Sato, in “Defects in Semiconductors” Eds. J. Narayan and T. Y. Tan (North-Holland, New York, 1981) pp. 317-332.
- “In-Situ X-Ray Topographic Study of Dislocations in Silicon Crystals Growing from the Melt” (Invited paper). J. Chikawa and F. Sato, in “Proceedings of

11th International Conference on Defects and Radiation Effects in Semiconductors" Ed. R. R. Hashiguti (Institute of Physics, London, 1982) pp. 95-109.

"Melting of Silicon Crystals and a Possible Origin of Swirl Defects". J. Chikawa and S. Shirai, *J. Crystal Growth* 39, 328 (1977).

"Impurity Effect on Formation of Microdefects during Silicon Crystal Growth" (Invited paper). J. Chikawa, T. Abe, and H. Harada, *Semiconductor Silicon 1986*, Eds. H. Huff, T. Abe, and B. Kolbesen (The Electrochemical Society Inc., Pennington, N. J., 1986) pp. 61-75.

"Video Display of X-Ray Topographic Images for In-Process Inspection of Semiconductor Devices". J. Chikawa, in "Real-Time Radiologic Imaging: Medical and Industrial Applications" Eds. D. A. Garrett and D. A. Bracher (ASTM Special Technical Publication 716, Philadelphia, 1980) pp. 209-237.

"Laboratory Techniques for Transmission X-Ray Topography". J. Chikawa, in "The Characterization of Crystal Growth Defects by X-Ray Methods" Eds. B. K. Tanner and D. K. Bowen (Plenum Press, New York, 1980) pp. 368-400.

"High-Resolution Video Camera Tube for Live X-Ray Topography Using Synchrotron Radiation". J. Chikawa, F. Sato, T. Kawamura, T. Kuriyama, T. Yamashita and N. Goto, in "X-Ray Instrumentation for the Photon Factory" Eds. S. Hosoya, Y. Itaka, and H. Hashizume (KTK Scientific Publishers, Tokyo, 1986) pp. 145-157.

"X-Ray-Sensitive TV Cameras". J. Chikawa, in "International Tables for Crystallography" Vol. C, Ed. A. J. C. Wilson, International Union of Crystallography (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992) pp. 552-554.

"Live X-Ray Topography and Crystal Growth of Silicon". J. Chikawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* 38 (1999) pp. 4619-4631.

他 七一編 (英文五五：和文一六)

農学博士和田光史氏の「火山灰土壌の粘土鉱物の解析とその農業生産性に関する研究」に対する授賞審査要旨

(一) はじめに

火山国と言われる我国においては、火山噴出物に由来するいわゆる火山灰土壌が極めて広く分布しており、その面積は水田の二二%、畑の五〇%、果樹園の二二%、さらに牧草地の大部分を占めている。

しかし火山灰土壌は他の岩石に由来する土壌とは異なつた独特の理化学的性質を有することから農業生産性が低く、しかもその改良、肥料や農薬の施用管理等の技術的場面においても、多くの問題を抱えている。そのため我国では、土壌学者の多くがこの特異的な火山灰土壌の研究に古くから従事し、和田氏も九州を中心として、この問題の研究に取り組んだのである。

(二) 研究の概要

一般に土壌の生産性に最も関連が深いのは、土壌の微粒子、すなわち粘土分の性質である。その主体をなすものはモンモリロナイト