

A01

移動する原子供給源による特異なステップパターン

金沢大学総合メディア基盤センター

佐藤正英

名古屋大学理学研究科

上羽牧夫

名古屋市立大学システム自然科学研究科

三浦均

平成 26 年度および 27 年度に、「移動する粒子供給源による特異なステップパターン」という研究課題で A01 公募班に参加した。本研究課題では、結晶表面上のステップのパターンのうち、特に、前方に一定の速度でステップから遠ざかる直線的な粒子供給源がある場合のステップの不安定化を、フェーズフィールドモデルを用いて調べた。

このモデルは、低温のシリコン(111)微斜面に、ガリウム原子を入射したときにステップが示す櫛の歯状パターンの解明のために考えたモデルである。Si 表面では Ga を入射することでステップ下段の近傍から表面構造の転移が起きることが実験的⁽¹⁾に分かっている。表面構造の相境界からは、転移に伴って過剰になった Si 原子が結晶表面上に放出される。放出された Si 原子はステップで固化するのでステップは前進し、Si 原子を放出しながら表面構造の相境界も前進する。以上のことを考慮に入れて、ステップ前方に一定の速度で遠ざかりながら一定の原子を供給する直線的な粒子の供給源を考えている。

本課題に採択された時点では、このモデルを用いることで、図 1 のような櫛状パターンが再現されることが分かった。モデルでは、ステップ前方にのみ粒子の供給源を考えているので、表面拡散場が非対称である。これによりステップがマリーンス - セカーカ型の不安定性を起こすことが、不安定になること自体は理解できていた。本課題では、最終的的な櫛状構造において、枝の間隔がどのように決まるのかという点に注目して研究を進めた。

図 2 は粒子の供給源の速度と櫛の歯の間隔の関連を示す図である^(2,3)。粒子供給源の速度が遅いときには、櫛の歯の間隔が速度の二分の一乗で狭くなる。これは初期に現れるマリーンス - セカーカ型の不安定の影響によるものである。一方で、速度が速くなると櫛の歯の間隔が広がり始める。櫛状の解があると考え、櫛の歯の先端の曲率が大きい枝のほうが、ギブストムソン効果の影響を受けずに速く成長することができると考えられる。その性質を持っているものが高速側の解であると考えられる。そのために、同一の櫛の歯の間隔であっても、粒子供給源の速度が遅い場合と速い場合の 2 つの場合が現れる。

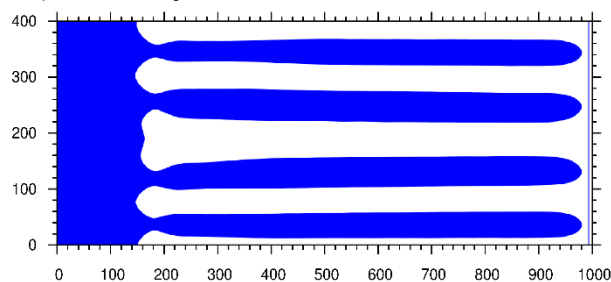


図 1 典型的な櫛状パターン

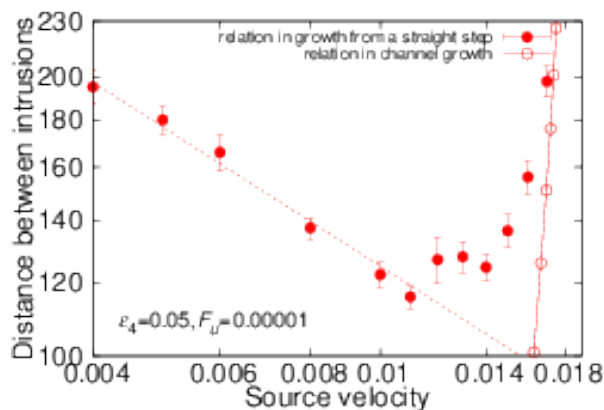


図 2 粒子源速度と櫛の歯の間隔の関係

2つの場合で楕円状パターンの性質のどのような違いがあるかを明らかにするために、ほぼ同一の枝間隔にある条件で枝周辺での吸着原子の密度分布の違いを調べた⁽⁴⁾。図3は高速度側での形状と過飽和度の分布を表している。枝の輪郭は白い線で表している。濃淡は濃度の変化を表しており、左側の濃い部分は低過飽和度の領域で右側は高過飽和度の領域である。点線は等過飽和度線を表しており、ちょうど系の右端に粒子供給源がある。ステップの前方近傍から粒子供給源に向かって急激ではあるが、滑らかに濃度が変化していることが分かる。

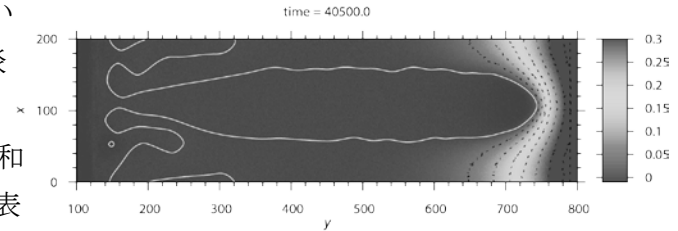


図3 高速度側での過飽和度とステップ形状

図4は低速度側での形状と過飽和度の分布である。濃度勾配が高速度側ほど形成しておらず、粒子供給源位置で、原子密度が不連続的に高くなっていることが分かった。また、ステップと粒子供給源の距離も狭くなっている。

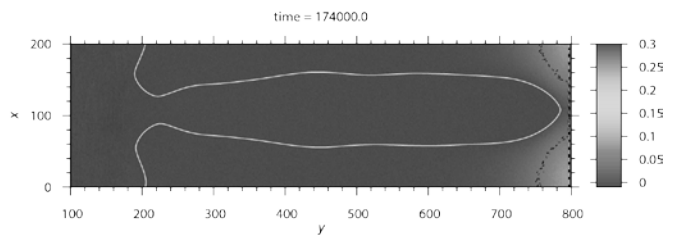


図4 低速度側での過飽和度とステップ形状

低速度側での密度分布は、まるで粒子供給源があることで、途中で打ち切られているように見える。そのような意味で、低速度側のほうがより強く、粒子供給源の影響を受けていると思える。図5に示すステップ先端の速度の時間変化からもそのことが良くわかる。課題研究期間終了後も本研究を続け⁽⁴⁾、高速側では十分に粗大化が進み安定定常解に達したのに対して、低速側では粗大化が進む過程で前方にある粒子供給源が障害となり、粒子供給源に近づいたところで粗大化が打ち切られてしまい、枝間隔が決まることが分かった。ノイズを小さくして不安定化が起きにくくすると、枝の先端が粒子供給源に近づくまでの時間が長くなることで粗大化がより進み、枝間隔が長くなることなども示せた。

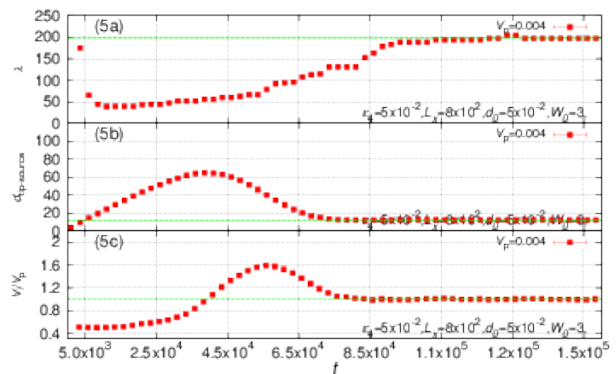


図5 低速度側での(a)枝間隔、(b)先端と粒子供給源の距離、(c)ステップ先端の速度の時間変化

参考文献：

- (1) H. Hibino, H. Kageshima, and M. Uwaha, *Surf. Sci.* **602**, 2421 (2008).
- (2) M. Kawaguchi et al., *Phys. Rev. E* **91**, 012409 (2015).
- (3) K. Kishi et al., *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **13**, 269 (2015).
- (4) M. Sato et al., *Phys. Rev. E* **95**, 032803(2017).