

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 9 月 1 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400413

研究課題名(和文)1次元相互作用ボーズ粒子系の自由エネルギー：結晶微斜面における不連続表面張力

研究課題名(英文)The energy of interacting one-dimensional bosons: discontinuous surface tension on vicinal crystal surfaces

研究代表者

阿久津 典子 (Akutsu, Noriko)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：40167862

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：(1) ステップ間に点型引力相互作用を持つ制限solid-on-solid(p-RSOS)模型の微斜面について、密度行列繰り込み群法により、表面張力の精密計算を行った。<111>方向に傾いた微斜面について、表面張力の不連続性と結晶の形、微斜面のモルフォロジーとの関係を明らかにした。引力の強さ、温度に関して網羅的に計算し、ファセッティング・ダイヤグラムを作成した。

(2)量子モンテカルロ法とは逆の考察：p-RSOS模型は $T=0K$ の1次元準非貫通型(QI)ボーズ粒子に写る。(001)面のラフニング温度以下に対応するQIボーズ粒子は、古典的に振る舞い、適当なパラメタで1次元の固相・液相になる。

研究成果の概要(英文)：(1)We calculated the surface tension of the restricted solid-on-solid model with point-contact-type step-step attraction (p-RSOS model) by using the density matrix renormalization group method. We showed that the surface tension of the p-RSOS model is discontinuous at low temperatures. The relationship between the discontinuous surface tension and the equilibrium crystal shape or the morphology of a vicinal surface has been clarified. The faceting diagram was obtained by using the results of this relationship.

(2)Based on the inverse process of the quantum Monte Carlo method, the steps on the p-RSOS model is mapped to one-dimensional quasi-impenetrable (QI) bosons at zero temperature. The QI bosons behave like classical particle when the corresponding surface system is below the roughening temperature  $T_r$  of the (001) surface. The QI bosons solidify or liquefy to the parameters corresponding to the values below  $T_r$ .

研究分野：表面・界面の統計熱力学

キーワード：ファセット化したマクロステップ 表面張力 1次元ボーズ粒子系 密度行列繰り込み群 積波動関数繰り込み群 結晶微斜面 モンテカルロ計算 統計熱力学

1. 研究開始当初の背景

結晶微斜面上のステップ列を線状素励起多体系とみなすと1次元自由フェルミ粒子系と等価(ステップの低密度極限において)になる。結晶微斜面は1次元自由フェルミ粒子普遍的クラス [1] として

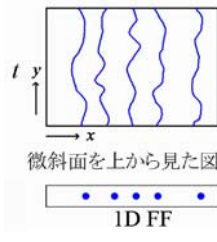


図1 結晶微斜面と1次元自由フェルミ粒子との対応のイメージ

共通の性質を示すことが知られている。我々は共同研究者と共に結晶微斜面における1次元自由フェルミ粒子普遍的クラスの確立に貢献してきた[2]。

一般に、1次元量子粒子系は Suzuki - Trotter 公式[3]により等価な2次元古典系にマップできる。2次元表面模型に於いて線状素励起多体系がフェルミ粒子と等価と考えられたのは線状素励起同士の非貫通性のためである。ここで非貫通性とは2本以上のステップが同じ場所を占めることができない、ということを示している。

結晶表面の凹凸を記述する格子模型として制限 solid-on-solid (RSOS) 模型 [4] を考えると、 $\langle 111 \rangle$ 方向に傾いた微斜面では、2本のステップが同じ場所を占めることができる。このため RSOS 模型に対応する1次元量子粒子はフェルミオンではあり得ない。このように、 $\langle 111 \rangle$ 方向に傾いた微斜面はボーズ粒子系とみなす方が自然である。しかし、幾何学的制限により、3本以上のステップが同じ場所を占めることができない。この準非貫通性質 (quasi-impenetrable, QI) が  $\langle 111 \rangle$ 方向に傾いた微斜面の特徴である。

我々は申請直前に点接触型のステップ間

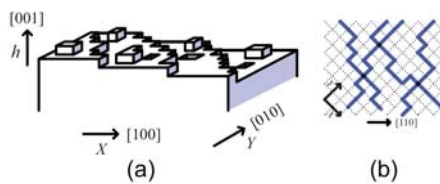


図2 RSOS 模型の説明図 (a)見取り図。(b)上から見た図(雑誌論文 5-②から採録)。

引力が働く RSOS 模型 (p-RSOS 模型、19 頂点模型にマップ可能) について(001)面周辺の表面張力を密度行列繰り込み群 (DMRG) 法 [5]により計算し、 $\langle 111 \rangle$ 方向に傾いた微斜面では低温で表面張力が不連続になることを示した [6]。さらに、微斜面の長時間モンテカルロ計算と組み合わせ特定の温度範囲、方位において、表面自由エネルギーのステップ密度の展開形に、密度の2乗の項が現れるこ

とを示した[6]。そして、密度の2乗の項が現れる仕組みは 不均一系の導入—言い換えれば 1次元 n 体ボーズ粒子クラスターの形成—が本質的であることを示した。

なお、表面系ではこの有限寿命の1次元 n 体ボーズ粒子クラスターをステップ・ドロプレットと呼んでいる。

2. 研究の目的

本研究はステップ間に引力相互作用を持つ RSOS 拡張模型の微斜面について、表面張力の精密計算を基本に、より基礎的な方向への研究と、より応用的な方向の研究を行った。

- (1) 1次元準非貫通型相互作用ボーズ粒子系に等価な2次元古典系、すなわち結晶微斜面において数値計算を行い、相互作用している希薄な1次元ボーズ粒子系の自由エネルギーをボーズ粒子の密度の展開形として求める。
- (2) 引力型ボーズ粒子系に対応する結晶微斜面について異方的表面張力を網羅的に計算し、表面張力の不連続性を調べる。表面張力の不連続性から生じるステップ・ファセティング現象などについて、「相互作用している1次元ボーズ粒子系」という視点から解明する。さらにナノテクノロジーへの応用を探る。

3. 研究の方法

- (1) 1次元系はゆらぎの多体効果が大きく、分子場近似等の計算では正しい結果が得られない。そこで、密度行列繰り込み群 (DMRG) 法を使用する。

本研究では量子モンテカルロ法とは逆に 2次元表面模型に DMRG 法を適用し、1次元量子粒子系の性質を調べた。すなわち、DMRG 法を転送行列に拡張した積波動関数繰り込み群 (PWFRG) 法により表面自由エネルギーと微斜面の傾きの計算を行う。

- (2) 表面の、よりミクロな構造を知るために、表面模型のモンテカルロ計算を行う。
- (3) ステップ張力、ステップ・スティフネスを高精度で計算するため、Imaginary path-weight random walk (IPW) 法 [7]を用いて計算する。

4. 研究成果

基礎研究として当初の研究目的は達成され、ナノテクノロジーへの応用としては、期待以上の成果を出せたと考えている。

主に研究をしたのは点型のステップ間相互作用のある RSOS 模型 (p-RSOS 模型) である。模型ハミルトニアンは

$$\begin{aligned}
 H = & \epsilon \sum_{(m,n)} \{ |h(m+1, n) - h(m, n)| + \\
 & |h(m, n+1) - h(m, n)| \} \\
 & + \epsilon_{\text{int}} \sum_{(m,n)} \{ \delta(|h(m+1, n+1) - h(m, n)|, 2) + \\
 & \delta(|h(m+1, n-1) - h(m, n)|, 2) \} \\
 & - \sum_{(m,n)} \{ \eta_x [h(m+1, n) - h(m, n)] + \eta_y
 \end{aligned}$$

$$[h(m, n+1) - h(m, n)] \quad (1)$$

である。ここで  $h(m, n)$  はサイト  $(m, n)$  上の表面高さ  $h$ 、 $\varepsilon$  は 1 段差作るエネルギー（形成仕事の 1/2）、 $\varepsilon_{\text{int}}$  は対角方向に 2 段差ができた場合のエネルギー変化、 $\delta(i, j)$  はクロネッカーのデルタである。 $\boldsymbol{\eta} = (\eta_x, \eta_y)$  は Andreev 場と呼ばれステップに対する化学ポテンシャルの役割を果たす。隣り合う高さの差は  $\{-1, 0, 1\}$  に制限されている。

$\varepsilon_{\text{int}} < 0$  の場合に点型ステップ間引力として働く。この相互作用の起源としては、ステップにあるダングリングボンド同士が重なり結合状態を形成した際のエネルギー利得を想定している。従って大きさは数十～100meV を想定している。

(1) 表面自由エネルギーと対応する 1 次元量子系基底状態エネルギー（ステップ間相互作用が反発力の場合）[雑誌論文 5-④]

1 本のステップを 1 個の 1 次元量子粒子とみなし、表面系の熱力学量を 1 次元量子粒子系の熱力学量へ対応付けた。表面自由エネルギーは 1 次元量子粒子系の単位長さ当たり基底状態エネルギーに対応し、Andreev 自由エネルギーは単位長さ当たりグランドポテンシャル、すなわち圧力に対応することが解った。

①  $\langle 111 \rangle$  方向に傾いた微斜面と呼ぶことにする。

PWFRG 計算により得られた  $f(\mathbf{p})$  の表面勾配  $\mathbf{p}$  依存性を解析したところ、先に述べた 準非貫通性 のため  $|\mathbf{p}| \rightarrow 0$  の極限で、

$$f(\mathbf{p}) = f(0) + \gamma |\mathbf{p}| + B |\mathbf{p}|^3 + C |\mathbf{p}|^4 + O(|\mathbf{p}|^5) \quad (2)$$

となることを解った。ここで、 $\gamma$  はステップ張力、 $B$  はステップ相互作用係数、 $C$  はステップ会合係数である。1 次元のフェルミオンでは  $|\mathbf{p}|$  の奇数次しか現れない。 $|\mathbf{p}|^4$  項はステップが会合する効果であり、 $|\mathbf{p}| \rightarrow 0$  で 1 次元のハードコアボゾン[8]と等価であることを示している。

②  $\langle 101 \rangle$  方向に傾いた微斜面

この方向に傾いた微斜面では、厳密な非貫通型ステップとなる。PWFRG 計算により得られた  $f(\mathbf{p})$  の  $\mathbf{p}$  依存性を解析したところ、 $|\mathbf{p}| \rightarrow 0$  の極限で、 $|\mathbf{p}|^4$  の項は現れなかった。すなわち、 $|\mathbf{p}| \rightarrow 0$  で典型的な 1 次元フェルミオン系になることが数値的に示された。

(2) ステップ間相互作用が点型の引力の場合 [雑誌論文 5-②, ③, ④, ⑨]

$\langle 101 \rangle$  方向に傾いた微斜面の場合、引力相相互作用の無い RSOS 模型と同じであった。

一方、 $\langle 111 \rangle$  方向に傾いた微斜面の場合、表面張力の不連続性、すなわち結晶平衡形の一次相転移、が PWFRG 計算により得られた (図 3)。すなわち、温度  $T < T_{f,1}$  で、表面張力

が  $\langle 111 \rangle$  面近傍で不連続になる。温度  $T < T_{f,2} < T_{f,1}$  で表面張力が  $\langle 001 \rangle$  近傍で不連続になる。

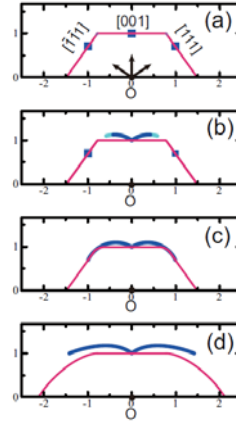


図 3 p-RSOS 模型の表面張力極図形と結晶平衡形の外形 (赤色曲線) (a)  $k_B T / \varepsilon = 0.6$ . (b)  $k_B T / \varepsilon = 0.63$ . (c)  $k_B T / \varepsilon = 0.7$ . (d)  $k_B T / \varepsilon = 0.6$  (RSOS 模型). (雑誌論文 5-②から採録)

$T_{f,1}$  で起きる高温側の相転移は、高ステップ密度で生じる。高ステップ密度の場合、ネガティブ・ステップを考えると低ステップ密度の場合と同じように取り扱うことができることが解った。

$T_{f,2}$  で起きる低温側の相転移は、低ステップ密度で生じる。 $T < T_{f,2}$  では  $\langle 001 \rangle$  面と  $\langle 111 \rangle$  面のみが熱力学的に安定に存在する。

(3) ファセティング・ダイアグラム [雑誌論文 5-④]

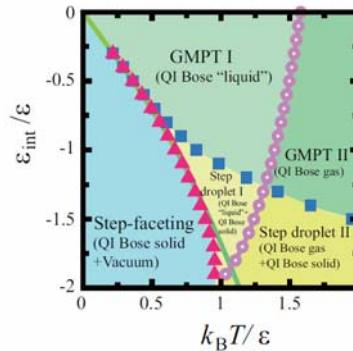


図 4 ファセティング・ダイアグラム。(雑誌論文 5-④から採録)

ステップ張力の不連続性に対応して  $T_{f,1}$ 、 $T_{f,2}$  の  $\varepsilon_{\text{int}}$  依存性を網羅的に PWFRG 計算により調べ、ファセティング・ダイアグラムを求めた。図 4 の縦軸は  $\varepsilon_{\text{int}} / \varepsilon$  を表し、横軸は温度  $k_B T / \varepsilon$  を表す。 $\blacktriangle$ 、 $\blacksquare$  はそれぞれ  $T_{f,2}$ 、 $T_{f,1}$  を表す。 $\circ$  は  $\langle 001 \rangle$  面のラフニング温度を表す。なお、この模型の  $\langle 111 \rangle$  面のラフニング温度は無限大である。

$T < T_{f,2}$  の領域をステップ・ファセティング・ゾーンと呼び、 $T_{f,2} < T < T_{f,1}$  の領域をステップ・ドロプレット・ゾーン、 $T_{f,1} < T$  の領域を GMPT (Gruber- Mullins- Pokrovsky- Talapov) ゾーンと呼ぶ。さらに  $\langle 001 \rangle$  面のラフニング温度を境にステップ・ドロプレット・ゾーンと GMPT ゾーンを I と II に分ける。

ステップ・ファセティング・ゾーンでは、熱平衡状態で微斜面は側面を  $\langle 111 \rangle$  面とする一つのマクロステップと平坦な  $\langle 001 \rangle$  面のテ

ラスに完全に分離する(図 5(a))。1 次元 QI-ボゾン系とみなせば、図 5 の縦軸を虚時間とみなして、全ての粒子が凝縮した相と真空相の 2 相共存状態であると考えられる。凝縮相と真空の基底状態エネルギーは互いに不連続である。

ステップ・ドロプレット・ゾーン I では微斜面の平均傾き  $|p_e|$  が結晶平衡形で(111)面と接する表面の傾き  $p_1=|p_1|$  より大きくなると図 5(b)のようにマクロステップと  $p_1$  の微斜面に分離する。このゾーンでは  $|p| \rightarrow 0$  において、表面自由エネルギー  $f(p)$  の  $|p|$  展開形に  $|p|^2$  の項が有ることを再び確認した。

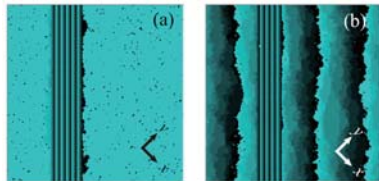


図 5 マクロステップの例. (a)  $k_B T / \epsilon = 0.8$ . (b)  $k_B T / \epsilon = 0.83$ .  $\epsilon_{int} / \epsilon = -1.3$ . (雑誌論文 5-④から採録)

ステップ・ファセティング・ゾーンとステップ・ドロプレット・ゾーンのゾーン境界は

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \gamma_n / n = \gamma_1 \quad (3)$$

で与えられる。 $\gamma_1$  は段差 1 のステップに関するステップ張力、 $\gamma_n$  は段差  $n$  ( $n$ -合体) ステップに関するステップ張力である。(4)式に基づき 2 次元 Ising 模型により IPW 法で計算したゾーン境界線を曲線で示した。 $|\epsilon_{int}|$  が小さいところでは非常に良く PWFRG 計算結果を再現した。(3)式は 1 次元 QI ボーズ粒子系では無限大のサイズの  $n$  体クラスターの化学ポテンシャルが 1 体の化学ポテンシャルに等しい、という式に対応する。

ステップ・ドロプレット・ゾーンと GMPT ゾーンについて、(001)面のラフニング温度以上では、ステップがバラバラになっており、1 次元 QI ボーズ粒子の気相に対応する(ステップ・ドロプレット・ゾーン II、GMPT ゾーン II)。一方、ラフニング温度以下では有限寿命・有限サイズの  $n$ -合体ステップが形成されており、1 次元 QI ボーズ粒子においては  $n$  体クラスターが形成されている。この相を固相でもなく気相でもないという意味で液相と呼ぶことにした(ステップ・ドロプレット・ゾーン I、GMPT ゾーン I)。

(4) 点型引力のある 1 次元量子粒子系との対応[雑誌論文 5-④, ③]

① 1 次元系なのに凝縮する理由

p-RSOS 模型の転送行列を Suzuki-Trotter 公式により 1 次元量子粒子系へ写すと温度  $T=0K$  の量子粒子系へ写される。このため、熱揺らぎによる秩序状態の破壊からは免れる。ステップ間相互作用が反発力の場合かつ

$|p| \rightarrow 0$  の極限で、(2) 式の係数  $B$  と  $C$  から換算した運動エネルギーと位置エネルギーの比は、(001)面のラフニング温度以下では、1 より大きい。すなわち、粒子の波動関数は古典粒子のように局在している。ステップ間相互作用が引力の場合もこの性質は維持されていた。

(001)面のラフニング温度以上では、運動エネルギーと位置エネルギーの比が 1 以下になる。この場合、 $p$  が 0 付近で局所的な  $n$ -体ステップが存在しないことが表面系のモンテカルロ計算から得られた[雑誌論文 5-③]。

以上のように、(001)面のラフニング温度以下ではステップが 1 次元古典粒子のように振る舞うので量子ゆらぎによる秩序の破壊を免れる。

② 凝集はボーズ・アインシュタイン凝縮なのか

ステップの凝集に対応する 1 次元ボーズ粒子系の凝集は古典粒子としての凝集であり、ボーズ・アインシュタイン凝縮ではないことが解った。

③ 凝集相が 1 点に収縮しない理由

(001)面のラフニング温度以下の RSOS 模型の幾何学的な制限は 1 次元量子粒子系では排除体積球に写る。そのため、ハードコアボズンのように 1 点に収縮することは無い。

(5) 表面現象への応用

p-RSOS 模型を表面現象へ応用としたものは、当初の期待以上に成果が得られた。主な成果は

① 平衡状態におけるマクロステップの高さプロファイルの分類[雑誌論文 5-②].

② ステップ・ドロプレット・ゾーン I 非平衡定常状態における高さプロファイルの駆動力依存性[雑誌論文 5-①, ⑤].

である。また、RSOS 模型と 2 次元 Ising 模型との結合模型については、

③ Si(111)面のステップ・スティフネス解析によるキंकエネルギーの決定[雑誌論文 5-⑦].

④ Si(111)面のステップ・バンチングの詳細な温度変化の再現[雑誌論文 5-⑥, 投稿準備中].

を得た。

⑤ また、Co と Ni の層状化合物の磁性及び磁区の時間発展について SP-LEEM の実験結果を LLG 方程式に基づく秩序形成シミュレーションなどを用いて解析し、積層数とともに磁気異方性が変化する様子を説明した[雑誌論文 5-⑧, ⑩-⑫].

以上の表面現象への応用はそれぞれ、重要性が理解され、4 年間に 7 件の国際会議招待講演を依頼され、1 件の招待論文を依頼された。

<参考文献>

[1] 結晶成長の分野では Gruber - Mullins - Pokrovsky - Talapov (GMPT) 型普遍的性質と呼ばれている。例えば太田隆夫、物理学最前線 10 巻 (共立出版、1985 年)。

[2] Y. Akutsu and N. Akutsu, J. Phys. Soc. Jpn. **56** (1987) 2248; Y. Akutsu, N. Akutsu, and T. Yamamoto, Phys. Rev. Lett. **61** (1988) 424; T. Yamamoto, Y. Akutsu, and N. Akutsu, J. Phys. Soc. Jpn. **57** (1988) 453.

[3] M. Suzuki, Comm. Math. Phys. **51**, (1976) 183; H. F. Trotter, Proc. of the American Math. Soc. **10**, (1959) 545.

[4] K. Sogo, Y. Akutsu, and T. Abe, Prog. Theor. Phys. **70**, (1983) 739; T. T. Truong and M. den Nijs, J. Phys. A **19**, (1986) L645.

[5] S. R. White, Phys. Rev. Lett. **69**, (1992) 2863; T. Nishino and K. Okunishi, J. Phys. Soc. Jpn. **64**, (1995) 4084; Y. Hieida, K. Okunishi and Y. Akutsu, Phys. Lett. A **233**, (1997) 464.

[6] N. Akutsu, J. Phys.: Condens. Matter **23**, (2011) 485004; Phys. Rev. E **86**, (2012) 061604.

[7] Y. Akutsu and N. Akutsu, Phys. Rev. Lett. **64**, (1990) 1189.

[8] E. H. Lieb and W. Liniger, Phys. Rev. **130** (1963) 1605; K. Okunishi, Y. Hieida, and Y. Akutsu, Phys. Rev. B **59** (1999) 6806.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 19 件)

① Noriko Akutsu, ``Disassembly of Faceted Macrosteps in the Step Droplet Zone in Non-Equilibrium Steady State'', Crystals, 査読有, Vol. **7**, No. 42 (2017), Article ID cryst7020042, (17 pages) doi: 10.3390/cryst7020042.

② Noriko Akutsu, ``Profile of a Faceted Macrostep Caused by Anomalous Surface Tension'', (Invited) Advances in Condensed Matter Physics, 査読有, **2017** (2017), Article ID 2021510 (pp. 10), <http://dx.doi.org/10.1155/2017/2021510>.

③ Noriko Akutsu, ``Effect of the roughening transition on the vicinal surface in the step droplet zone'', Journal of Crystal Growth, 査読有, **468**, 57-62, (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.10.014> (pp. 6).

④ Noriko Akutsu, ``Faceting diagram for sticky steps'', AIP Advances, 査読有, **6** (2016), Article ID 035301 (pp. 17), doi: 10.1063/1.4943400.

⑤ Anna Krasteva, Hristina Popova, Noriko Akutsu, and Vesselin Tonchev, ``Time scaling relations for step bunches from models with step-step attractions (B1-type models)'', AIP Conf. Proc.

(USA), 査読無, No. 1722 (2016), 220015--1 - 4, doi:10.1063/1.4944247.

⑥ Noriko Akutsu, Hiroki Hibino, and Takao Yamamoto, ``Determination of ledge energies and domain wall energy based on a lattice model for Si(111): step bunching near (1x1)-(7x7) phase transition'', Proceedings of the 10th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices'15, 査読無, (2015), 28-p-P-53-1 -- 28-p-P-53-5.

⑦ Noriko Akutsu, ``Measurement of microscopic coupling constants between atoms on a surface: combination of LEEM observation with lattice model analysis'', Surf. Sci., 査読有, **630** (2014), 109-115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.susc.2014.07.017>.

⑧ Kazue Kudo, Masahiko Suzuki, Kazuki Kojima, Tsuneo Yasue, Noriko Akutsu, Hideaki Kasai, Wilson Agerico Dino, Ernst Bauer and Takanori Koshikawa, ``Simulations of magnetic domain patterns on the surface of Co/Ni multilayers'', Surf. Interface Anal. 査読有, **46** (2014) 1174-1477. DOI 10.1002/sia.5562.

⑨ Noriko Akutsu, ``Pinning of steps near equilibrium without impurities, adsorbates, or dislocations'', J. Cryst. Growth, 査読有, **401** (2014) 72-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.01.068>.

⑩ Masahiko Suzuki, Kazue Kudo, Kazuki Kojima, Tsuneo Yasue, Noriko Akutsu, Wilson Agerico Dino, Hideaki Kasai, Ernst Bauer and Takanori Koshikawa, ``Magnetic domain patterns on strong perpendicular magnetization of Co/Ni multilayers as spintronics materials: I. Dynamic observations'', J. Phys.: Condens. Matter, 査読有, **25** (2013), 406001 (8pp); doi:10.1088/0953-8984/25/40/406001.

⑪ Kazue Kudo, Masahiko Suzuki, Kazuki Kojima, Tsuneo Yasue, Noriko Akutsu, Wilson Agerico Dino, Hideaki Kasai, Ernst Bauer and Takanori Koshikawa, ``Magnetic domain patterns on strong perpendicular magnetization of Co/Ni multilayers as spintronics materials: II. Numerical simulations'', J. Phys.: Condens. Matter, 査読有, **25** (2013),

395005 (6pp); doi:10.1088/0953-8984/25/39/395005.

- ⑫ 小島一希, Wilson Agerico Dino, 鈴木雅彦, 安江常夫, 工藤和恵, 阿久津典子, Ernst Bauer, 越川孝範, 笠井秀明, 「*W(110)*上のCo/Ni多重層における磁気異方性の理論的研究」, Journal of the Vacuum Society of Japan, 査読有, Vol. 56 (2013) 139.

他 7 件.

[学会発表] (計 5 9 件)

- ① Noriko Akutsu, (招待講演) ``*Faceting Diagram: Anomaly in Surface Tension and Formation of the Macrostep caused by Step-Step Attraction*``', 2016 Collaborative Conference on Crystal Growth, (4-8, September 2016, San Sebastian, Spain).
- ② Noriko Akutsu, (招待講演) ``*Inhibition of Crystal Growth Caused by Anomalous Surface Tension*``', National Chen Kun University, (23, August 2016, Tainan, Taiwan).
- ③ Kazue Kudo, Masahiko Suzuki, Kazuki Kojima, Tsuneo Yasue, Noriko Akutsu, Hideaki Kasai, Wilson Agerico Dino, Ernst Bauer and Takanori Koshikawa, (招待講演) ``*Magnetic domain patterns on the surface of Co/Ni multilayers: Numerical simulations*``', National Chen Kun University, (25, August 2016, Tainan, Taiwan).
- ④ 阿久津典子, (招待講演) 「ステップ・ファセティングによる成長抑制」, 計算機センター特別研究プロジェクト「結晶成長の数理」, (2015年12月24-25日 学習院大学、東京都豊島区).
- ⑤ Noriko Akutsu, (招待講演) ``*Lattice Model Analysis Combined with LEEM Observations*``', 2015 Collaborative Conference on Crystal Growth, (14-17, December 2015, Hong Kong, China).
- ⑥ Noriko Akutsu, (招待講演) ``*Inhibition of Crystal Growth Caused by Discontinuous Surface Tension: a Phase Diagram*``', 5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures, (6-11, September 2015, Hsinchu, Taiwan).
- ⑦ Noriko Akutsu, ``*One-dimensional Boson Features For Sticky Steps on a Crystal Surface*``', International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015}

(sfs2015), (23, August 2015, 京都大学芝蘭会館, 京都府京都市).

- ⑧ Noriko Akutsu, (招待講演) ``*Inhibition of Crystal Growth Caused by Discontinuous Surface Tension*``', 2014 Collaborative Conference on Crystal Growth, (4-7, November 2014, Phuket, Thailand).
- ⑨ Noriko Akutsu, ``*Step Faceting Caused by Discontinuous Surface Tension on a Crystal Surface*``', YITP workshop. Interface fluctuations and KPZ universality class, (20-22, August 2014, 京都大学湯川記念館パナソニックホール、京都府京都市).
- ⑩ Noriko Akutsu, (招待講演) ``*Discontinuous Surface Tension*``', 9th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices' 13, (ALC' 13), (2-6, December 2013, Sheraton Kona, The Big Island, Hawaii, USA).
- ⑪ Noriko Akutsu, ``*Breakdown of the Fermi-like Features in 1D Impenetrable Bosons with Attractive Interaction*``', Mathematical Statistical Physics -- A satellite meeting of STATPHYS 25 (2013) and a YITP workshop --, (30 July - 3 August, 2013, 京都大学湯川記念館パナソニックホール、京都府京都市).

他 48 件.

[図書] (計 1 件)

Noriko Akutsu and Takao Yamamoto. ``*Rough-smooth transition of step and surface*``', ed. Tatsu Nishinaga, in ``*Handbook of Crystal Growth*``', Vol. 1 (Elsevier Science, Amsterdam, New York, 2015) 265-313.

[その他]

ホームページ

<http://www.osakac.ac.jp/labs/akutsu/>  
<http://noriko-akutsu.com/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

阿久津 典子 (AKUTSU Noriko)  
大阪電気通信大学・工学部・教授  
研究者番号: 40167862

### (2) 研究分担者

無し。