

研究報告書

「ナノ半導体配列構造を用いた情報処理機能創製」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成22年10月～平成26年3月

研究者: 小寺 哲夫

1. 研究のねらい

本研究のねらいは、スピン間相互作用によるコヒーレンスを利用して、情報処理機能を創発する新原理デバイスの実現を行うことにある。自然界にありふれた非磁性のシリコンという素材を利用し、高度な微細加工技術を駆使することで、人工原子やスピン量子ビットの実現を目指す。量子ドット構造を用いた電子スピン量子ビットは長いコヒーレンス時間を有するため注目を集めているが、GaAs 等の化合物半導体中では、核スピンとの超微細相互作用による電子スピンのデコヒーレンスが避けられないという問題がある。シリコン系で電子スピン量子ビットが実現されれば、95%のシリコン同位体が核スピンを持たないため、超微細相互作用の影響が小さくなり、長い電子スピンコヒーレンス時間が期待される。また、シリコン量子ドット作製には、既存のシリコンテクノロジーを適用することができ、スピン量子ビットの集積化に有利な系である。

本研究では、ナノシリコン配列構造中のスピン間相互作用により情報処理機能を創発することを目指す。具体的には、次の4つの(A)から(D)をねらいとする。まず(A)ナノシリコン中に電子スピンを1つ1つ制御して閉じ込める技術を開発する。この研究においては、電子数ただ1つの変化を高感度に読み出すための電荷検出技術の開発も行う。(B)2つ配列させたナノシリコンにおいて、電子スピンの性質により電流が流れなくなるスピン閉塞現象を実現する。さらに、スピン緩和要因についての物理の解明も行う。(C)複数配列させたナノ半導体に電子を閉じ込め、その状態を量子ドット電荷検出計により読み出す。この研究においては、2つ配列させたナノシリコン構造だけではなく、正三角形に配列させたナノシリコン構造の作製も行う。その構造中での電子配置を制御し、フラストレート状態を実現することも目指す。(D)外部からナノシリコン中の電子スピンを回転させる機構を作りこみ、電圧パルスや高周波により制御する。これにより、量子情報処理に必要な操作を実現する。(A)から(D)を実現することで、スピンを利用した量子情報素子やフラストレート系の実現に向けた基盤技術を開発し、その物理を解明する。

2. 研究成果

(1)概要

本研究では、ナノシリコン配列構造中のスピン間相互作用を利用した量子情報素子やフラストレート系の実現に向けた基盤技術の開発、関連物理の解明を達成した。具体的には、上述の研究のねらいに対応した研究テーマにおいて成果を得ることができた。研究テーマ A では、シリコン量子ドット構造中の単一電子状態の実現と電荷検出技術の開発を行った。電子数ただ1つの変化を高感度に読み出すための電荷検出技術の開発に成功し、量子情報素子以外にも高感度センサーとして応用可能な技術を得ることができた。研究テーマ B では、制御性に優

れたシリコン量子ドットを作製し、低磁場下での電子輸送特性評価を行うことで、スピンの依存する電気伝導特性を得た。本研究により、非磁性のシリコンを用いたナノ半導体配列構造において、スピン現象を発現させたことを意味しており、電子スピン量子ビットに向けた重要な進展を達成した。また、スピン閉塞時の漏れ電流の磁場依存性を調べることで、スピン軌道相互作用によるスピン緩和が起きていることを明らかにした。研究テーマ C では、多重シリコン量子ドット構造を実現し、電荷検出技術を応用することで、各量子ドット内の電子数変化の検出を達成した。また、正三角形に配列させたシリコン3重量子ドット構造の作製に成功し、その構造中の電子配置を制御し、フラストレート状態に近い状態を実現することができた。実験・シミュレーションの両面から研究を進めることができた。研究テーマ D では、シリコン量子ドット中の電子スピンを回転させる機構としてマイクロマグネットを作りこんだ構造を実現した。また、電圧パルスやマイクロ波領域の高周波に対する応答を得ることができた。研究テーマ A から D により、スピンを利用した量子情報素子やフラストレート系の実現に向けた基盤技術を開発し、その物理を解明することに成功した。

(2) 詳細

研究テーマ A「シリコン量子ドット中の単一電子状態の実現と電荷検出技術の開発」

本研究では、並列に静電結合したシリコン量子ドットの作製を行い、スピン状態の読み出しに必要な電荷検出技術の開発と少数電子状態の実現に成功した。

用いた素子は、エッチングと酸化により作製した並列静電結合シリコン量子ドットである(図1(a))。図の上側の量子ドットを QD、下側の量子ドットを SET とする。シリコン量子ドット構造の上部には絶縁膜を介してトップゲート(TG)が形成されており、MOS(Metal-Oxide-Semiconductor)構造となっている。TG は非ドーパのシリコン層にキャリアを誘起するために用いられる。

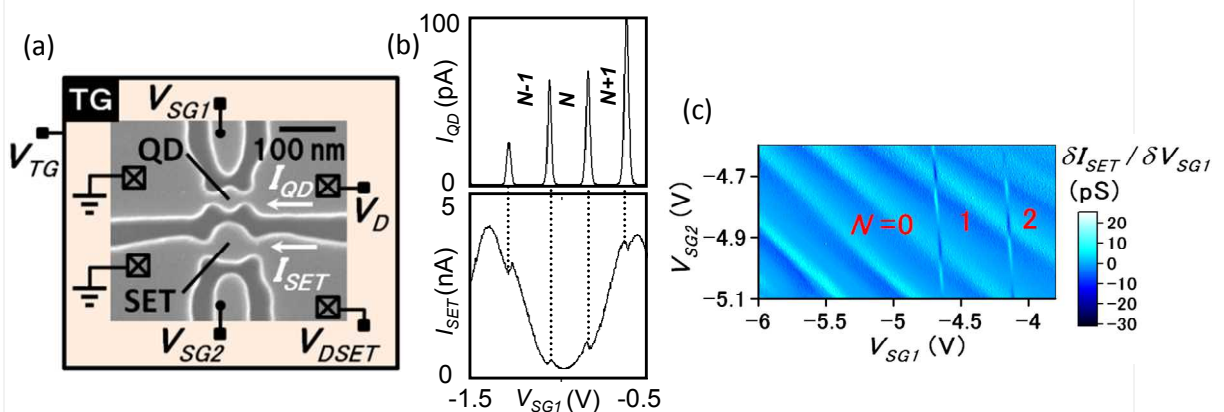


図1. (a) 並列静電結合シリコン量子ドットの電子顕微鏡写真。(b) 同時に測定した各量子ドットの伝導特性。(c) 2つのゲート電圧(V_{SG1} と V_{SG2})を変化させながら、 I_{SET} を測定した伝導特性。少数電子状態を実現した。

4.2 Kにおいて、サイドゲート電圧 V_{SG1} を掃引して、各量子ドットに流れる電流 I_{QD} , I_{SET} を同時に測定した結果を図1(b)に示す。 I_{SET} には、幅の広いクーロンピークと、それに重畳した複数のキックが観測された。点線で示すように、キックは I_{QD} のクーロンピークの位置に対応している。クーロンピークを1つまたぐと、その量子ドット内の電子数は1つ変化する。従って、 I_{SET} に見ら

れるキックは、QD 内の電子数が1つ変化することで、QD と SET の間に働く静電相互作用が変化していることを反映している。これにより、QD 内の電子数変化を SET の電流により検出する、電荷検出技術の開発に成功した。

さらに、 V_{SG1} と V_{SG2} を変化させながら、 I_{SET} を測定した結果を図 1(c) に示す。ここでも幅の広いクーロンピークと、それに重畳した複数のキックが観測されており、 V_{SG2} の変化に応じて系統的にキックの位置が変化している。 V_{SG1} の値がある負電圧 ($V_{SG1} \sim -4.7V$) 以下ではキックが見られず、この領域では、QD 内の電子数が一定、すなわち 0 になっていることがわかる。図 1(c) に示すように、QD 内の電子数 N を 0 から 1 つ 1 つ制御することに成功した。

本研究により、シリコン量子ドットにおいて少数電子領域を実現し、近傍に配置したシリコン量子ドット電荷検出計により少数電子状態の読み出しに成功した。[参考文献 1-3]

研究テーマ B「シリコン 2 重量子ドットにおけるスピン依存トンネルの実現」

本研究では、制御性に優れたシリコン量子ドットを作製し、低磁場下での電子輸送特性評価を行うことで、スピンに依存する電気伝導特性を得た。本研究により、非磁性のシリコンを用いたナノ半導体配列構造において、スピン現象を発現させたことを意味しており、電子スピン量子ビットに向けた重要な進展を達成した。

本研究で用いた素子の模式図を図 2(a) に、電子線顕微鏡写真を図 2(b) に示す。エッチングにより量子ドット構造と複数のサイドゲート (C, L, R 等) を作製し、その上部にポリシリコンのトップゲート (TG) を形成した構造となっている。ソース (S) -ドレイン (D) 間のワイヤ領域に 3 箇所の狭窄領域をパターニングすることで 2 重量子ドットを形成した。図 2(b) の電子線顕微鏡写真に量子ドットの位置を模式的に点線の楕円で示している。電子線リソグラフィ条件、酸化条件、エッチング条件、酸化膜堆積条件等の最適化を行い、制御性に優れた素子を作製した。

素子の電気伝導特性を測定すると、直列結合 2 重量子ドットに特有の電荷安定状態図が得られた。すなわち、三角形の電荷三重点 (電流が流れる領域) が、ハニカム状に現れた。図 3 はある電荷三重点を詳細に調べた結果である。(a) はソースドレ

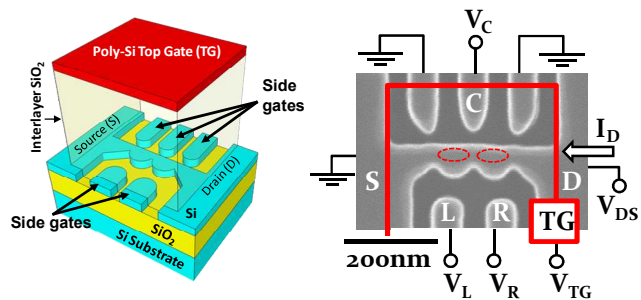


図 2 (a) 素子の模式図。ポリシリコンのトップゲート (TG) を有する。(b) 素子の電子線顕微鏡写真。

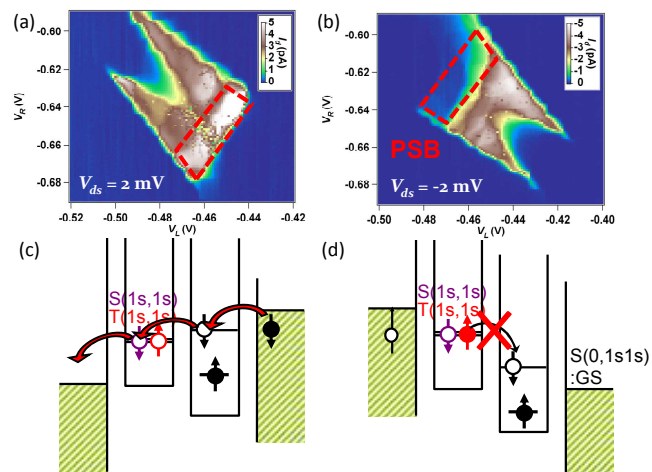


図 3 2つのゲート電圧に対する電流値の依存性。(a) は $V_{ds}=2mV$ 、(b) は $V_{ds}=-2mV$ 。(b) ではパウリの排他律に起因するスピン依存トンネルが起きている。

イン間電圧 V_{ds} が 2mV , (b)は -2mV である。(a)では三角形の対が観測されているが、(b)では三角形の底辺近傍(赤い点線で囲んだ領域)に、台形状に電流値が抑制された構造が現れている。これは、(d)の模式図で示すような、パウリの排他律に起因するスピン依存トンネル現象により説明できる。さらに、スピン閉塞時の漏れ電流の磁場依存性を調べることにより、スピン緩和要因について詳細に調べた。その結果、スピン軌道相互作用によりスピン緩和が起きていることを明らかにした。[参考文献 4-9]。

研究テーマ C「多重量子ドット構造の実現と電荷検出技術の応用」

本研究では、研究テーマ A で開発した電荷検出技術を用いて 2 重量子ドット(DQD: 図4(a))や3重量子ドット(TQD:図4(b))の電子数変化を検出することに成功した(図5(a))。その際、量子ドット電荷検出計のソース電極・ドレイン電極の両方に負電圧を印加することにより、2 重量子ドットのポテンシャルを制御するゲート電極として量子ドットを機能させる動作実証も行った(図5(b))。これは、量子ドットに対して電荷検出機能とゲーティング機能の 2 つの役割を持たせることを意味しており、シリコン量子ビットの集積化に向けて有用な知見が得られた。

また、正三角形状に配列させたシリコン 3重量子ドット構造の作製に成功し(図4(b))、その構造中での電子配置を制御し、フラストレート状態に近い状態を実現することができた。[参考文献 10, 11]。

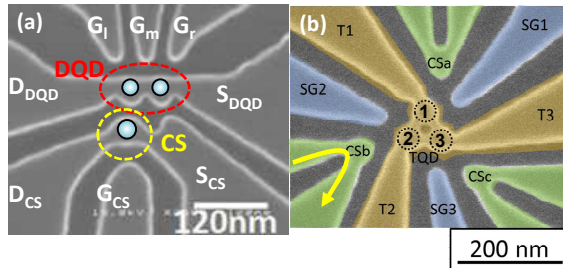


図4 多重量子ドットの電子顕微鏡写真。
(a) 2 重量子ドット(DQD)と電荷検出計(CS)。
(b) 3 重量子ドット(TQD)と電荷検出計(CS)。

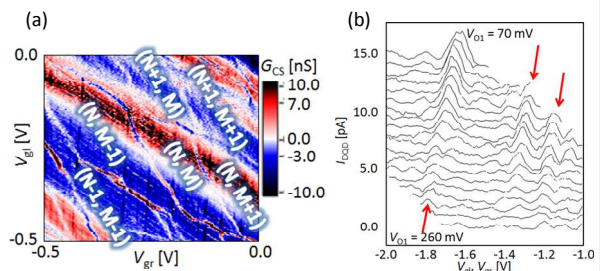


図5 (a)単電子トランジスタの微分コンダクタンスに表れる 2 重量子ドット内電子数の変化。
(b)単電子トランジスタに印加する電圧によるクーロンピークのシフト。

研究テーマ D「スピン回転機構を有するシリコン量子ドット構造の実現と高周波操作」

本研究では、シリコン量子ドット中の電子スピンを回転させる機構としてマイクロマグネットを作りこんだ構造を実現した(図6)。マイクロマグネットが作り出す傾斜磁場下で電子の位置を振動させることで、電子スピン共鳴を起こすことができる。本構造や、上述のシリコン量子ドット素子を用いて、電圧パルスや高周波に対する応答を得ることができた。

2 重量子ドットを用いた実験では、各量子ドット内の電子数が(3,3)と(2,4)の間でトンネリングが起きている領域に注目し、ゲートにパルス電圧を印加した。外部磁場の有無により、トンネリングを表す線が変化しており、スピンやバレーが関与すると示唆されるトンネル現象を捉えることができた。

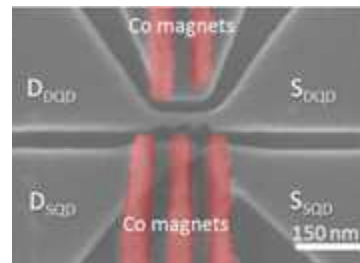


図6 マイクロマグネットを作りこんだシリコン量子ドット素子の電子顕微鏡写真。マイクロマグネットはコバルトを用いて形成している。

3. 今後の展開

上述の成果を踏まえて、電子デバイスの高性能化と低消費電力化を両立させるスピンドバイスや、量子効果を利用した革新的電子デバイスへと発展させることができる。究極的な目標としてナノ半導体中の単一スピンを利用した量子コンピュータの実現がある。このためには、1つのスピンを精度よく制御し、読み出す技術が必要となる。また、スピンのコヒーレンスの物理を理解し、制御する必要がある。これらの技術や知見は、量子コンピュータ実現に必要なだけでなく、磁性金属を利用したスピントロニクス分野の発展にも役立つと考える。さらに、電子1個やスピン1個の性質を利用した新原理デバイスは、周囲の電荷やスピンの変化に敏感であり、高感度センシングデバイスへの応用も可能である。情報分野のみならず、環境・医療・バイオ分野においても有用なデバイスに繋がると考えている。

4. 評価

(1) 自己評価

さがけ研究期間において、研究のねらいを達成できただけでなく、他の応用にも繋がる技術を得ることができ、今後の研究展開の幅を広げることができたと考えている。

本研究では、ナノシリコン配列構造中のスピン間相互作用を利用した量子情報素子やフラストレート系の実現に向けた基盤技術の開発、関連物理の解明を行い、さがけ研究のねらいを達成することができた。特に、シリコン量子ドット構造中の単一電子状態の実現やスピンの発現、電荷検出技術の開発といった重要な進展を得ることができた。単一スピンの電氣的操作やフラストレート系の研究についても基盤技術を確立し、現在研究を推進中である。電子数ただ1つの変化を読み出すことのできる電荷検出技術は、量子情報素子以外にも高感度センサーとして応用可能な技術につながる。情報分野のみならず、環境・医療・バイオ分野においても有用なデバイスなど、今後の発展研究の基盤を築くことができた。

さがけ研究を推進する過程で、領域内や、国内外での共同研究の提案を頂いており、今後の研究発展や加速的な研究進展が大いに期待できる。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

ナノシリコン配列構造中のスピン間相互作用により情報処理機能を創発することを目指し、(A)ナノシリコン中に電子スピンを制御して閉じ込める技術の開発、(B)電流が流れなくなるスピン閉塞現象の実現さらに、スピン緩和要因の解明、(C)ナノ半導体に電子を閉じ込め、その状態を量子ドット電荷検出計による読み出し、(D)電子スピンを回転させる機構を作り、電圧パルスや高周波により制御して、量子情報処理に必要な操作を実現する。という4つの課題を設けた。

それぞれの課題について、A では電子数ただ1つの変化を高感度に読み出すための電荷検出技術の開発の成功、B では、制御性に優れたシリコン量子ドットを作製し、低磁場下でのスピンに依存する電気伝導特性を得、電子スピン量子ビットに向けた重要な進展を達成した。また、スピン閉塞時の漏れ電流の磁場依存性を調べることにより、スピン軌道相互作用によるスピン緩和が起きていることも明らかにした。C では、多重シリコン量子ドット構造を実現し、各

量子ドット内の電子数変化を検出した。D では、シリコン量子ドット中の電子スピンを回転させる機構としてマイクロマグネットを作りこんだ構造を実現し、電圧パルスやマイクロ波領域の高周波に対する応答を得た。これらの成果は、スピンを利用した量子情報素子やフラストレート系の実現に向けた基盤技術を開発したもので、単にこれらの新規現象を他に先んじて見出しただけでなく、背景にある物性・物理の基本原則を解明することに成功し、それらをトップクラスの学術雑誌に数多く発表したことは科学の基本原則の解明を尊ぶ研究者の優れた資質を示すものであり、その学究姿勢とともに高く評価すべきであって、今後の同氏の発展を大いに期待したい。同氏が学会などで正しく高い評価を受け、数々の賞を受賞していることを、総括として喜びたい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. K. Horibe, T. Koderu , T. Kambara, K. Uchida, and S. Oda, “Key capacitive parameters for designing single-electron transistor charge sensors”, J. Appl. Phys. 111 , 093715-1-5 (2012)
2. T. Ferrus, A. Rossi, W. Lin, D. A. Williams, T. Koderu , and S. Oda, “Localization effects in the tunnel barriers of phosphorus-doped silicon quantum dots” AIP Advances 2 , 022114-1-9 (2012)
3. A. Rossi, T. Ferrus, W. Lin, T. Koderu , D. A. Williams, and S. Oda, “Detection of variable tunneling rates in silicon quantum dots”, Appl. Phys. Lett. 98 , 133506-1-3 (2011).
4. M. A. Sulthoni, T. Koderu , Y. Kawano, S. Oda, “A Multi-purpose Electrostatically Defined Silicon Quantum Dots”, Jpn. J. Appl. Phys. 51 , 2, 02BJ10-1-4 (2012)
5. M. A. Sulthoni, T. Koderu , K. Uchida, and S. Oda “Numerical simulation study of electrostatically defined silicon double quantum dot device”, J. Appl. Phys., 110 , 054511-1-4 (2011)
6. T. Kambara, T. Koderu , T. Takahashi, G. Yamahata, K. Uchida, S. Oda, “Simulation study of charge modulation in coupled quantum dots in silicon”, Jpn J. Appl. Phys., 50 04DJ05-1-4 (2011)
7. M. A. Sulthoni, T. Koderu , Y. Kawano, S. Oda, “Optimization and tunnel junction parameters extraction of electro-statically defined silicon double quantum dots structure” Jpn. J. Appl. Phys. 52 081301-1-5 (2013)
8. G. Yamahata, T. Koderu , H. O. H. Churchill, K. Uchida, C. M. Marcus, and S. Oda, “Magnetic field dependence of Pauli spin blockade: A window into the sources of spin relaxation in silicon quantum dots”, Phys. Rev. B 86 , 115322-1-5 (2012)
9. T. Koderu , G. Yamahata, T. Kambara, K. Horibe, T. Ferrus, D. Williams, Y. Arakawa, and S. Oda, “Realization of lithographically-defined silicon quantum dots without unintentional localized potentials”, AIP Conf. Proc. 1399 , 331-332 (2011)
10. T. Kambara, T. Koderu , Y. Arakawa, and S. Oda, “Dual function of single electron transistor coupled with double quantum dot: Gating and charge sensing” Jpn. J. Appl. Phys.

52 04CJ01-1-4 (2013)

11. K. Takeda, T. Obata, Y. Fukuoka, W. M. Akhtar, J. Kamioka, **T. Koderu**, S. Oda, and S. Tarucha, "Characterization and suppression of low-frequency noise in Si/SiGe quantum point contacts and quantum dots" Appl. Phys. Lett. **102**, 123113-1-3 (2013)

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主要な学会発表

1. **T. Koderu**, "Development of quantum dot devices toward quantum computers" 2013 IEEE International Conference on Electronics Technology and Industrial Development (ICE-ID 2013), October (2013), Bali Indonesia, invited
2. **T. Koderu**, "Silicon quantum dot devices toward spin-based quantum information processing" Collaborative Conference on 3D & materials Research 2013, June (2013) Jeju, Korea, invited
3. **T. Koderu**, "Silicon spin-based quantum information devices", 3rd International Conference on Nanotek and Expo (Nanotek2013), December (2013), Las Vegas, USA, invited
4. **小寺哲夫**「二重量子ドットにおける単電子トンネルとスピン効果の観測」第69回日本物理学会年次大会, March (2014) 招待講演
5. **小寺哲夫**, 堀部浩介, 蒲原知宏, 山端元音, 内田 建, 荒川泰彦, 小田俊理、「電子スピン量子ビットに向けた少数電子シリコン量子ドットの実現」第58回応用物理学関係連合講演会, March (2011) 招待講演

受賞

1. **日本物理学会若手奨励賞**「二重量子ドットを用いた交換エネルギー測定」(2013)
2. **東工大挑戦的研究賞**「シリコン系量子ナノ構造を用いた新原理情報素子の開発」(2012)
3. **Best Poster Award**, 8th International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (INC8), "Silicon quantum dot devices toward electron spin quantum bits", (2012)
4. **手島精一記念研究賞(中村健二郎賞)**「半導体量子ドットのスピン間相互作用を利用した新原理情報素子の開発及び特性の評価」(2012)
5. **Best Poster Award**, International Symposium and IEEE EDS Minicolloquium on Advanced Hybrid Nano Devices (IS-AHND), "Development of silicon quantum dot devices toward spin quantum bits", (2011)
6. **応用物理学会講演奨励賞**、応用物理学会、「シリコン結合量子ドットにおけるスピン効果の観測」、(2011)
7. **工系若手奨励賞** 東京工業大学工学系共通経費による研究助成、「シリコン量子ドットを利用した量子スピンコヒーレンス素子の開発」、(2010)

著作物

1. 小寺哲夫 小田俊理 量子ドットエレクトロニクスの最前線 株式会社エヌ・ティー・エス
「トップゲートとサイドゲートによるシリコン結合量子ドットの静電結合制御」(2011)