

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23760328

研究課題名(和文)低密度パリティ検査畳込み符号とその応用に関する研究

研究課題名(英文)Spatially coupled LDPC codes and their applications

研究代表者

笠井 健太(Kasai, Kenta)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：70431997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：Hsu-Anastasopoulos空間結合符号とMacKay-Neal空間結合符号を提案した。この提案符号が2元消失通進路において、有限の次数分布で通信路容量を達成することを証明した。さらに提案符号の高速符号化法を考案し、提案符号をもとにした通信路容量を達成するレートレス符号の設計を行った。量子誤り訂正に関して、多元符号と空間結合量子誤り訂正符号の提案を行い、任意の一般化消失通信路の対称情報レートを万能に達成することを証明した。

研究成果の概要(英文)：We have proposed Hsu-Anastasopoulos spatially coupled codes and MacKay-Neal codes. The proposed codes was proved to achieve the channel capacity of binary erasure channels with bounded degree distributions. We developed a fast encoding method of the proposed codes and rateless coding methods that achieve the capacity. We have developed non-binary codes and spatially coupled codes for quantum error correction. We have proved that the proposed codes universally achieve the symmetric information rate of the arbitrary generalized erasure channels.

研究分野：符号理論

キーワード：空間結合符号

## 1. 研究開始当初の背景

(LDPC) 符号は Belief Propagation (BP) 復号法によって低計算量で復号可能な次世代の誤り訂正符号として注目されている。1999年に Felstrom と Zigangirov は, LDPC ブロック符号から LDPC 畳み込み符号を構成する方法を提案した。この LDPC 畳み込み符号は, 符号化と復号化がより簡単で必要な記憶空間も少ないにもかかわらず, 符号長を揃えた LDPC ブロック符号よりも優れた復号性能を示したのである。このことは, LDPC 符号の研究者にとって驚くべきことであった。さらに驚くべきことに, LDPC 畳み込み符号の BP 復号性能は, 漸近的にもとの LDPC ブロック符号の最大事後確率復号性能に等しいことが観測されたのである。Kudekar らは, この現象を 2 元消失通信路に対して厳密に証明し, 一般の無記憶 2 元入力出力対称通信路に対してもこの現象が起こることを支持する状況証拠を確認している。このことは, 元の LDPC ブロック符号の最大事後確率復号性能を, BP 復号によって達成できる LDPC 畳み込み符号に変換することができたことを意味する。

## 2. 研究の目的

低計算量で復号可能, 符号化率可変符号化が可能, 組織符号化が可能な, シヤノン限界を達成する, LDPC 畳み込み符号の設計法を確立すること, 量子誤り訂正および各種応用問題に適用することが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

畳み込み LDPC 符号および多元 LDPC 符号の設計法を提案する。その提案符号を, 量子誤り訂正および各種応用問題に適用し, 性能を解析的及び実験的に評価した。

## 4. 研究成果

空間結合 LDPC 符号 (畳み込み LDPC 符号) は多くの通信路で通信路容量に迫る復号性能を示す符号であるが, 最大次数を有界に保ったままで, 厳密に通信路容量を達成することができないという欠点があった。Kasai らはパンクチャドビットを含む符号である Hsu-Anatasopoulos (HA) 符号と MacKay-Neal (MN) 符号を空間結合させた空間結合 HA 符号と空間結合 MN 符号を提案し, 有界な次数で通信路容量を達成することを密度発展法の計算により確認している。

Pusane らは, 畳み込み LDPC 符号の効率の良い符号化と復号を提案している。畳み込み LDPC 符号の符号化は, 効率良く低計算量で実行できる逐次処理と多くの計算量が必要となってしまう効率良く実行できない

終端処理の 2 つに分けて考えることができる。空間結合 LDPC 符号においても終端処理の計算量が大きいことは問題となっている。研究代表者らは空間結合 LDPC 符号の効率の良い終端法を提案している。空間結合 HA 符号の終端処理の問題について考える。次に効率良く終端処理が解けるようにプロトグラフに修正を加えた修正空間結合 HA 符号を提案した。

量子誤り訂正は, 量子状態を確実に保存し高信頼度で通信すること, つまり量子計算および量子通信を実現するために必要な技術である。量子 LDPC 符号は, 疎なパリティ検査方程式によって定義された, 古典 LDPC 符号に対応する量子誤り訂正符号である。CSS (Calderbank, Shor and Steane) 符号とその一般クラスであるスタビライザ符号は, 量子誤り訂正符号の重要な符号クラスである。CSS 符号  $CSS(C, D)$  は  $H_{CH_D}^T = 0$  となる 2 元パリティ検査行列  $H_C$  と  $H_D$  を有する, 符号化率  $1/2$  以上の, 2 つの 2 元古典符号  $C$  と  $D$  によって定義される量子誤り訂正符号である。通信路にも依存するが, 古典符号としての  $C$  と  $D$  の誤り訂正性能が高いほど, CSS 符号  $CSS(C, D)$  の量子誤り訂正性能も高くなる。LDPC-CSS 符号は拘束条件  $H_{CH_D}^T = 0$  を満たす疎なパリティ検査行列  $H_C$  と  $H_D$  によって定義される CSS 符号である。LDPC 符号の設計に詳しい読者は, 少し考えてみると分かることだが, 拘束条件  $H_{CH_D}^T = 0$  を満たし, タナーグラフに小さなサイクルを含まないような, 疎なパリティ検査行列のペア  $H_C, H_D$  を見つけることは容易ではない。ランダムに構成した疎行列が拘束条件  $H_{CH_D}^T = 0$  を満たす確率を MacKay が計算しているが, 符号長を大きくすると速く 0 に収束してしまう。有限幾何符号をそのまま使った LDPC-CSS 符号が Postol によって初めて提案され, その後, MacKay らによって自転車符号, ケイリーグラフに基づいた符号が, 提案されている。さらに, Poulin らによってターボ符号を用いた CSS 符号が提案されている。研究代表者の知る限りでは, これらの CSS 符号が, 今まで知られている最良の量子誤り訂正符号である。

萩原と今井は, quasi-cyclic (QC) LDPC 符号を用いた LDPC-CSS 符号を提案している。この LDPC-CSS 符号のパリティ検査行列は任意の偶数の行重みと列重みを有するように設計可能である。

研究代表者らによって, 萩原と今井の LDPC-CSS 符号の構成法が多元 LDPC 符号に拡張されている。この多元 LDPC-CSS 符号は, 今まで知られている最良の CSS

符号の2倍以上の誤りを訂正することが可能となっている。さらに従来の LDPC-CSS 符号では、大きな問題となっていた小さな最小距離のために引き起こされていた高いエラーフロアも、部分行列のサイズ  $m \times m$  を大きくすることにより解消できることが観測された。

インターネットでのデータ通信では、データをパケットという単位で表す。TCP では、破棄された（消失した）パケットを復元するために、受信側が消失パケットの再送要求である Negative ACKnowledgement (NACK)を送信先に送ることで、信頼性の高い通信を実現している。

しかし、複数の受信者が存在する通信（例えばマルチキャスト）では NACK が受信者の数に比例して増加するためサーバの障害を引き起こす要因となる。

この問題は、パケットが消失しても再送要求を行わない User Datagram Protocol (UDP)により解消されるが、逆に UDP は信頼性の高い通信を実現できない。

このためマルチキャスト等で信頼性の高い通信を実現するためには、パケットの消失を全て訂正可能な誤り訂正符号が必要となる。

複数の状態が異なる通信路が存在するマルチキャストでは、符号化率  $R$  が最も状態の悪い通信路に設定されるため、状態の良い通信路で結ばれる受信者は遅延やレートロスが発生してしまい通信効率が悪い。一方、噴水符号は  $k$  個の情報パケットからそれぞれ独立に計算される無数のパケットを符号パケットとして、消失を訂正する符号である。受信者は通信路の状態に依らず、任意に受信した  $n=(1+\alpha)k$  個のパケットを消失なく受信することで、 $k$  個の情報パケットを全て復号できる。式内の  $\alpha$  はオーバーヘッドと呼ばれ、通信路容量との差を表しており、 $\alpha=0$  で  $k$  個の情報パケットを復号することが噴水符号の設計目的である。

ここで、噴水符号が様々な通信に応用可能であることを紹介する。まず、最もシンプルな1対1の通信について紹介する。1対1の通信では、TCPにより信頼性の高い通信を実現可能である。しかし、送信者と受信者の距離が大きい場合、それぞれの間を行き来する受信確認を表す ACKnowledgement (ACK)が通信の効率性を大きく妨げることになる。この問題に対して、ACKを用いない噴水符号は、送信

者と受信者の距離に依らず信頼性の高い通信を実現できる。1対多のマルチキャストについては前述の通り、噴水符号であれば各受信者を結ぶ通信で信頼性の高い通信を実現できる。

空間結合符号はこれらの問題を解決することができる。空間結合符号はベースとなる符号が結合された符号であり、LDPC ブロック符号を結合させた空間結合 LDPC ブロック符号が最初に提案された。Kudekarらによって、空間結合 LDPC ブロック符号は2元消失通信路(BEC)と2元入力無記憶出力対称通信路で MAP 閾値を BP 復号で達成することが証明された。

研究代表者らは、空間結合 MacKay-Neal (MN) ブロック符号と空間結合 Hsu-Anastasopoulos (HA) ブロック符号を提案し、それらが有界な最大次数で BEC の通信路容量を達成することを数値的に示し、さらに BEC において空間結合 MN ブロック符号と空間結合 HA ブロック符号が通信路容量を達成することを証明した。Binary-input Memoryless Symmetric (BMS)通信路において、空間結合 MN ブロック符号と空間結合 HA ブロック符号の BP 閾値がシャノン限界に接近することが観測されている。

研究代表者らは、空間結合 Low-Density Parity-Check (LDPC)符号を外符号（事前符号）、空間結合 Low-Density Generator-Matrix (LDGM)符号を内符号とする接続噴水符号を提案した。この符号は空間結合 HA 噴水符号とみなすことができる。空間結合 HA 噴水符号の次数分布は一様である。そのため、平均次数と最大次数が共に有界となり復号の計算量問題を解決できる。また、修正空間結合 LDPC 符号を事前符号に採用することで、情報パケット数に比例した計算量で符号化が可能となる。空間結合 HA 噴水符号は十分大きな数の情報ビット数を用いれば、復号誤り率を0にすると同時に、オーバーヘッド閾値  $\alpha$  を0に（通信路容量を達成）できることを密度発展法により確認している。さらに、密度発展式に関する安定性解析から、復号誤り率を0にするオーバーヘッド閾値の下界を導出し、オーバーヘッド閾値を0にするための必要条件が導出された。

この必要条件を満たす空間結合 HA 噴水符号は、密度発展法による数値実験で通信路容量を達成することを多くのパラメータの

組で確認している。また、ポテンシャル関数と双対性を応用することで提案符号がオーバーヘッド  $\alpha=0$  を BP 復号で達成することが証明された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 18 件、全て査読あり)

- (1) T. Deleu, M. Dervin, K. Kasai and F. Horlin, "Iterative Predistortion of the Nonlinear Satellite Channel," IEEE Trans. on Communications, vol. 62, no. 8, pp. 2916--2926, Aug. 2014. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=6851193>
- (2) T. Nozaki, K. Kasai and K. Sakaniwa, "Message Passing Decoder with Decoding on Zigzag Cycles for Non-binary LDPC Codes," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E97-A, no. 4, pp. 975--984, Apr. 2014. [10.1587/transfun.E97.A.975](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e97-a_4_975)
- (3) T. Nozaki, K. Kasai and K. Sakaniwa, "Weight Distribution for Non-binary Cluster LDPC Code Ensemble," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E96-A, no. 12, pp. 2382--2390, Dec. 2013. [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e96-a\\_12\\_2382](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e96-a_12_2382)
- (4) P. Suthisopapan, K. Kasai, A. Meesomboon, and V. Imtawil, "Achieving Near Capacity of Non-Binary LDPC Coded Large MIMO Systems with a Novel Ultra Low-Complexity Soft-Output Detector," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 12, no. 10, pp. 5185--5199, Sep. 2013. [10.1109/TWC.2013.090513.122056](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e12-w_10_5185)
- (5) R. Mori, T. Tanaka, K. Kasai and K. Sakaniwa, "Effects of Single-Cycle Structure on Iterative Decoding of Low-Density Parity-Check Codes," IEEE Trans. on Information Theory, vol. 59, no. 1, pp. 238--253, Jan. 2013. [10.1109/TIT.2012.2.216252](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e59-i_1_238)
- (6) T. Nozaki, K. Kasai and K. Sakaniwa, "Analysis of Error Floors for Non-binary LDPC Codes over General Linear Group through q-ary Memoryless Symmetric Channels," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E95-A, no. 12, pp. 2113--2121, Dec. 2012. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6283931>
- (7) P. Suthisopapan, K. Kasai, A. Meesomboon, V. Imtawil and K. Sakaniwa, "Simple

Nonbinary Coding Strategy for Very Noisy Relay Channels," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E95-A, no. 12, pp. 2122--2129, Dec. 2012. [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e95-a\\_12\\_2122](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e95-a_12_2122)

- (8) K. Kasai, D. Declercq and K. Sakaniwa, "Fountain Coding via Multiplicatively Repeated Non-Binary LDPC Codes," IEEE Trans. on Communications, vol. 60, no. 8, pp. 2077--2083, Aug. 2012. [10.1109/TCOMM.2012.061112.110177](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e60-c_8_2077)
- (9) T. Nozaki, K. Kasai and K. Sakaniwa, "Analytical Solution of Covariance Evolution for Irregular LDPC Codes," IEEE Trans. on Information Theory, vol. 58, no. 7, pp. 4770--4780, Jul. 2012. <http://arxiv.org/pdf/1011.1701.pdf>
- (10) K. Kasai, M. Hagiwara, H. Imai and K. Sakaniwa, "Quantum Error Correction beyond the Bounded Distance Decoding Limit," IEEE Trans. on Information Theory, vol. 58, no. 2, pp. 1223--1230, Feb. 2012. [10.1109/TIT.2011.2167593](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e58-i_2_1223)
- (11) T. Nozaki, K. Kasai and K. Sakaniwa, "Analysis of Error Floors of Non-Binary LDPC Codes over BEC," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E95-A, no. 1, pp. 381--390, Jan. 2012. [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e95-a\\_1\\_381](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e95-a_1_381)
- (12) K. Kasai and K. Sakaniwa, "Spatially-Coupled MacKay-Neal Codes and Hsu-Anastasopoulos Codes," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E94, no. 11, pp. 2161--2168, Nov. 2011. [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a\\_11\\_2161](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a_11_2161)
- (13) H. Uchikawa, K. Kasai and K. Sakaniwa, "Design and Performance of Rate-compatible Non-Binary LDPC Convolutional Codes," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E94-A, no. 11, pp. 2135--2143, Nov. 2011. [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a\\_11\\_2135](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a_11_2135)
- (14) H. Uchikawa, K. Kasai and K. Sakaniwa, "Spatially Coupled Protograph-based LDPC Codes for Decode-and-Forward in Erasure Relay Channel," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E94-A, no. 11, pp. 2127--2134, Nov. 2011. [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a\\_11\\_2127](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a_11_2127)
- (15) T. Nozaki, K. Kasai and K. Sakaniwa, "Analysis of Stopping Constellation Distribution for Irregular Non-binary LDPC Code Ensemble," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E94-A, no. 11, pp. 2153--21

60,Nov.2011.[http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a\\_11\\_2153](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a_11_2153)

(16) T. Nozaki, [K. Kasai](#) and K. Sakaniwa, ``Analysis of Error Floors of Non-Binary LDPC Codes over MBIOS Channel,' ' IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E94-A no. 11, pp. 2144--2152, Nov. 2011. <http://arxiv.org/pdf/1106.2109.pdf>

(17) [K. Kasai](#), D. Declercq, C. Poulliat and K. Sakaniwa, ``Multiplicatively Repeated Non-Binary LDPC Codes,' ' IEEE Trans. on Information Theory, vol. 57, no. 10, pp. 6788--6795, Oct. 2011. [10.1109/TIT.2011.2162259](http://arxiv.org/pdf/1106.2109.pdf)

(18) [K. Kasai](#), C. Poulliat, D. Declercq, and K. Sakaniwa, ``Weight Distribution of Non-binary LDPC Codes,' ' IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E94-A, no. 4, pp. 1106--1115, Apr. 2011. [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a\\_4\\_1106](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a_4_1106)

[学会発表](計 26 件、全て査読あり)

(1) M. Fukushima, T. Okazaki and [K. Kasai](#), ``Spatially-Coupled MacKay-Neal Codes Universally Achieve the Symmetric Information Rate of Arbitrary Generalized Erasure Channels with Memory,' ' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2015, Hong Kong, China, Jun. 14--19, 2015. <http://arxiv.org/abs/1501.06736>

(2) T. Okazaki and [K. Kasai](#), ``Spatially-Coupled MacKay-Neal Codes with No Bit Nodes of Degree Two Achieve the Capacity of BEC,' ' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2014, pp. 506--510, Hawaii, USA, Jun. 29--Jul. 4, 2014. <http://arxiv.org/abs/1401.7289>

(3) K. Sakata, [K. Kasai](#) and K. Sakaniwa, ``Spatially-Coupled Precoded Rateless Codes with Bounded Degree Achieve the Capacity of BEC under BP decoding,' ' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2014, pp. 521--525, Hawaii, USA, Jun. 29--Jul. 4, 2014. <http://arxiv.org/pdf/1401.7288.pdf>

(4) K. Tazoe, [K. Kasai](#) and K. Sakaniwa, ``Non-Binary LDPC Codes with Large Alphabet Size,' ' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2014, pp. 2445--2448, Hawaii, USA, Jun. 29--Jul. 4, 2014. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6875273>

(5) R. Ohashi, [K. Kasai](#), and K. Takeuchi, ``Multi-Dimensional Spatially-Coupled Codes,' ' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2013, pp. 2448--2452, Istanbul, Turkey, Jul. 7--12, 2013. [10.1109/ISIT.2013.6620666](http://arxiv.org/pdf/1106.2109.pdf)

(6) N. Obata, Y.-Y. Jian, [K. Kasai](#), and H.

D. Pfister, ``Spatially-Coupled Multi-Edge Type LDPC Codes with Bounded Degrees that Achieve Capacity on the BEC under BP Decoding,' ' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2013, pp. 2433--2437, Istanbul, Turkey, Jul. 7--12, 2013. [10.1109/ISIT.2013.6620663](http://arxiv.org/pdf/1106.2109.pdf)

(7) K. Sakata, [K. Kasai](#), and K. Sakaniwa, ``Spatially-Coupled Precoded Rateless Codes,' ' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2013, pp. 2438--2442, Istanbul, Turkey, Jul. 7--12, 2013. [10.1109/ISIT.2013.6620664](http://arxiv.org/pdf/1106.2109.pdf)

(8) T. Nozaki, [K. Kasai](#), and K. Sakaniwa, ``Message Passing Algorithm with MAP Decoding on Zigzag Cycles for Non-binary LDPC Codes,' ' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2013, pp. 2825--2829, Istanbul, Turkey, Jul. 7--12, 2013. [10.1109/ISIT.2013.6620741](http://arxiv.org/pdf/1106.2109.pdf)

(9) T. Nozaki, M. Maehara, [K. Kasai](#), and K. Sakaniwa, ``Weight Distribution for Non-binary Cluster LDPC Code Ensemble,' ' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2013, pp. 2830--2834, Istanbul, Turkey, Jul. 7--12, 2013. [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e96-a\\_12\\_2382](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e96-a_12_2382)

(10) J. Andrade, G. Falcao, V. Silva, and [K. Kasai](#), ``FFT-SPA Non-Binary LDPC Decoding on GPU,' ' Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp. 5099--5103, Vancouver, Canada, May. 26--31, 2013. [10.1109/ICASSP.2013.6638633](http://arxiv.org/pdf/1106.2109.pdf)

(11) D. G. M. Mitchell, [K. Kasai](#), M. Lentmaier, and D. J. Costello, ``Asymptotic analysis of spatially coupled MacKay-Neal and Hsu-Anastasopoulos LDPC codes,' ' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2012, pp. 337--341, Oahu, Hawaii, Oct. 28--31, 2012. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6400949](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6400949)

(12) P. Suthisopapan, [K. Kasai](#), V. Imtawil, and A. Meesomboon, ``Approaching capacity of large MIMO systems by non-binary LDPC codes and MMSE detection,' ' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2012, pp. 1712--1716, MIT (U.S.A), Jul. 1--6, 2012. [10.1109/ISIT.2012.6283570](http://arxiv.org/pdf/1106.2109.pdf)

(13) T. Nozaki, [K. Kasai](#), and K. Sakaniwa, ``Analysis of error floors of generalized non-binary LDPC codes over q-ary memoryless symmetric channels,' ' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2012, pp. 2341--2345, MIT (U.S.A), Jul. 1--6, 2012. [10.1109/ISIT.2012.6283931](http://arxiv.org/pdf/1106.2109.pdf)

- (14) H. Uchikawa, B. M. Kurkoski, K.Kasai, and K. Sakaniwa, ``Iterative encoding with Gauss-Seidel method for spatially-coupled low-density lattice codes,'' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2012, pp. 1737--1741, MIT(U.S.A), Jul. 1--6 2012. [10.1109/ISIT.2012.6283575](https://arxiv.org/abs/10.1109/ISIT.2012.6283575)
- (15) P. Suthisopapan, K.Kasai, A. Meesomboon, V. Intawil, and K. Sakaniwa, ``Code design for very noisy relay channels,'' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2012, pp. 930-934, MIT(U.S.A), Jul. 1--6 2012. [10.1109/ISIT.2012.6284699](https://arxiv.org/abs/10.1109/ISIT.2012.6284699)
- (16) K.Kasai, T. Nozaki, and K. Sakaniwa, ``Spatially-coupled binary MacKay-Neal codes for channels with non-binary inputs and affine subspace outputs'' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2012, pp. 463-467, MIT(U.S.A), Jul. 1--6 2012. <http://arxiv.org/pdf/1202.0979.pdf>
- (17) H. Uchikawa, B. Kurkoski, K.Kasai, and K. Sakaniwa, ``Threshold Improvement of Low-Density Lattice Codes via Spatial Coupling,'' Proc. IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications, pp. 1036--1040, Maui, Hawaii, Jan. 30--Feb. 2, 2012. <http://arxiv.org/abs/1107.4900>
- (18) K.Kasai, and K. Sakaniwa, ``Spatially-Coupled MacKay-Neal Codes and Hsu-Anastasopoulos Codes,'' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2011, pp. 752--756, Saint-Petersburg, Russia, Jul. 31--Aug. 5 2011. [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a\\_11\\_2161](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a_11_2161)
- (19) K.Kasai, M. Hagiwara, H. Imai, and K. Sakaniwa, ``Non-Binary Quasi-Cyclic Quantum LDPC Codes,'' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2011, pp. 558--562, Saint-Petersburg, Russia, Jul. 31--Aug. 5 2011. [10.1109/ISIT.2011.6034212](https://arxiv.org/abs/10.1109/ISIT.2011.6034212)
- (20) T. Nozaki, K.Kasai, and K. Sakaniwa, ``Analysis of Stopping Constellation Distribution for Irregular Non-binary LDPC Code Ensemble,'' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2011, pp. 1106--1110, Saint-Petersburg, Russia, Jul. 31--Aug. 5 2011. [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a\\_11\\_2153](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e94-a_11_2153)
- (21) H. Uchikawa, K.Kasai, and K. Sakaniwa, ``Spatially Coupled LDPC Codes for Decode-and-Forward in Erasure Relay Channel,'' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2011, pp. 1479--1483, Saint-Petersburg, Russia, Jul. 31--Aug. 5 2011. <http://arxiv.org/abs/1102.5087>
- (22) S. Kudekar and K.Kasai, ``Threshold Saturation on Channels with Memory via Spatial Coupling,'' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2011, pp. 2568--2572, Saint-Petersburg, Russia, Jul. 31--Aug. 5 2011. [10.1109/ISIT.2011.6034031](https://arxiv.org/abs/10.1109/ISIT.2011.6034031)
- (23) S. Kudekar and K.Kasai, ``Spatially Coupled Codes over the Multiple Access Channel,'' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2011, pp. 2817--2821, Saint-Petersburg, Russia, Jul. 31--Aug. 5 2011. [10.1109/ISIT.2011.6034088](https://arxiv.org/abs/10.1109/ISIT.2011.6034088)
- (24) M. Hagiwara, K.Kasai, H. Imai, and K. Sakaniwa, ``Spatially Coupled Quasi-Cyclic Quantum LDPC Codes,'' Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory 2011, pp. 543--547, Saint-Petersburg, Russia, Jul. 31--Aug. 5 2011. [10.1109/ISIT.2011.6034208](https://arxiv.org/abs/10.1109/ISIT.2011.6034208)
- (25) K.Kasai and K. Sakaniwa, ``Fourier Domain Decoding Algorithm of Non-Binary LDPC codes for Parallel Implementation,'' Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp. 3128--3131, Prague, Czech Republic, May 22--27, 2011. [10.1109/ICASSP.2011.5946358](https://arxiv.org/abs/10.1109/ICASSP.2011.5946358)
- (26) T. Nozaki, K.Kasai, and K. Sakaniwa, ``Analysis of Error Floors of Non-Binary LDPC Codes over MBIOS Channel,'' Int. Conf. on Comm., ICC Kyoto, Japan, Jun. 5--9 2011. <http://arxiv.org/pdf/1106.2109.pdf>

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

笠井 健太 (東京工業大学大学院理工学研究科・准教授)  
研究者番号 : 70431997