



SDM関連シミュレーション技術高度化の歴史

—MCFの解析・設計技術—



北海道大学 名誉教授 小柴 正則

1. MCFとは

EXAT研究会が発足した2008年ころから、空間分割多重 (SDM: space-division multiplexing) 伝送のためのマルチコアファイバ (MCF: multicore fiber) の検討が本格的に始まった。MCFは、コア中心間の距離 (本稿ではコア間隔と呼ぶことにする) によって、非結合型MCF (UC-MCF: uncoupled-core MCF) と結合型MCF (CC-MCF: coupled-core MCF) に大別される (本稿ではUC-MCFをMCFと呼ぶことにする)。

MCFは、コア間クロストーク (XT: crosstalk) を十分に低減させ、各コアを独立した伝送路として利用するもので、同種コア型MCFと異種コア型MCFに分類される。これらのMCFの英語名称については、当時、中沢先生をはじめ、グラスゴー大学のDe La Rue先生にもご意見をうかがって、同種コア型MCFはhomogeneous MCF^[1]、異種コア型MCFはheterogeneous MCF^[1]に落ち着いたと記憶している。

MCFでは、各コア内のモードは基本的に1個であるが、複数のモードを収容して空間多重度を拡大することもできる。こうしたMCFは、マルチモードMCF (MM-MCF: multi-mode MCF) あるいはフェューモードMCF (FM-MCF: few-mode MCF) と呼ばれる。

一方、CC-MCFは、複数のコアを近接配置することによって生じるスーパーモードのそれぞれを独立した伝送路として利用するものである。このとき、コア間隔を適切に設定すると、各スーパーモードが互いにランダム結合するようになり、群速度が平均化されて群遅延広がり (GDS: group delay spread) が伝送距離の平方根に比例するMCFを実現できる。こうしたMCFはランダム結合型MCF (RC-MCF: randomly-coupled MCF) と呼ばれ、長距離伝送に適している。

ところで、國分先生は、2コアファイバのコア間隔をコア半径の4倍程度に設定すると、偶モードと奇モードの伝搬定数がほぼ等しくなって互いに結合しやすくなることを、2008年開催のEXATシンポジウムで指摘している^[2]。このコア間隔は、2010年代半ばころから本格的に検討が始まったRC-MCFのコア間隔とほぼ一致しており、大変興味深い。

2. MCFの解析・設計技術

ファイバの諸特性を評価するには、まず、固有モード解析を行って各モードの伝搬定数 (固有値) と電磁界分布 (固有関数) を知る必要がある。真円コアファイバのように厳密解が分かっている場合もあるが、ファイバ構造が複雑になると厳密解の導出が困難になり、数値解析が必要になる。

数値解法には様々なものがあるが、光領域では有限要素法 (FEM: finite element method) やビーム伝搬法 (BPM: beam propagation method)、電波領域では有限差分時間領域法 (FDTD: finite-difference time-domain method) がよく利用されている。現在、FEMやBPMはMCFの設計にも必須になっているが、曲げやねじれ、さらには構造のランダムな変化を組み込むことは難しい。このため、MCF解析に特化したモード結合理論 (CMT: coupled-mode theory) とパワー結合理論 (CPT: coupled-power theory) の開発が進められてきた。

本稿では、MCFの解析・設計技術としてのCMTとCPTを取り上げ、これらの理論の高度化の歩みを概観する。

3. MCFのXT解析

光導波路間あるいはモード間の結合の評価には、伝統的にCMTが利用されてきた。このCMTによれば、MCFのXTは伝搬方向に周期的に変化すると予想される。ところが、予想に反して、XTは伝送距離に比例して大きくなるのが、2010年、実験的に示された^[3]。これは、構造が伝搬方向にランダムに変化していることを示唆しており、同じく2010年、CPTの導入によってこの実験結果の説明が可能になった^[3]。

また、2010年には、異種コア型MCFのXTの曲げ半径依存性が測定され、臨界曲げ半径と呼ばれる曲げ半径を境として、位相整合領域 (PMR: phase-matching region) と位相不整合領域 (non-PMR) が存在することが実験的に示された^[4]。この実験結果を説明するために、2011年、位相整合点 (PMP: phase-matching point) における結合パワーのランダムな離散変化を考慮した解析モデル (DCM: discrete changes model) が開発され^[5, 6]、PMRではXTが曲げ半径とともに大きくなることが明らかになった^[5, 6]。

DCMは簡便であるが、PMPが存在しないnon-PMRには適用できないので、2011年、曲げやねじれ、構造のランダムな変化を考慮したCMTが開発された^[7]。結果として、XTは、PMRでは曲げに支配され、non-PMRでは構造変動の統計的性質（相関長）に支配されることが明らかになった^[7]。

さて、CMTでは計算に時間がかかるので（確率的取扱が必要）、2011年、構造変動のみならず、曲げやねじれを考慮したCPTが開発された^[7]。この場合、パワー結合係数（PCC：power coupling coefficient）が伝搬方向に変化するので、パワー結合方程式を逐次的に解くことになる。

ところで、2012年、指数関数型自己相関関数（ACF：autocorrelation function）を導入し、ねじれ周期で平均化したPCCの解析解が導出された^[8]（未知変数は相関長）。この解析解はPMR、non-PMRのいずれにも適用でき、MCFのXT解析に広く利用されている。なお、MM-MCFやFM-MCFの場合には、コア内のモード間結合を考慮した解析が必要で、2015年、こうした解析が可能なCMTも開発された^[9]。

4. RC-MCFのGDS解析

2010年代半ばころから、RC-MCFのGDS解析がCMTを用いて本格的に始まり、GDSが伝送距離の平方根に比例することが明らかになった（実験的にも確認されている）。

CMTによる解析によれば、GDSはコア間隔に強く依存しており、ねじれや製造ばらつきの程度にもよるが、GDSが最小になるコア間隔はおよそ20 μm とされている^[10]。このコア間隔は、石英系シングル（単一）モードファイバのコア半径（コア直径は9 μm 程度）のほぼ4倍になっている。

5. PMCを考慮したXT解析

2011年当時、偏波モード結合（PMC：polarization mode coupling）が起こっていないMCFのXT分布が自由度2のカイ2乗分布に従い、PMCが起こっている場合には、自由度4のカイ2乗分布に従うことが理論的に明らかにされていた^[5, 6]。こうしたMCFのXT分布は実験的にも確認されていた^[6]が、複屈折相関長並びに複屈折ビート長とXTの関係については、しばらく議論されないままになっていた。

2020年になって、曲げがない場合^[11]、2022年には、異種コア型MCFを含めて曲げがある場合^[12]について、CMTによるXT解析が行われた（すべてのコアで同一の相関長と同一のビート長を仮定）。また、2020年には、偏波モード分散を未知変数としたXTの簡便な解析法が開発された^[13]（相関長がビート長に比べて十分短いという条件の下で）。

6. BSA伝送MCFのXT解析

最近、隣接コアに伝搬方向が異なる信号光を配置することによって、XTを大幅に低減することが可能な双方向信号配置（BSA：bidirectional signal assignment）伝送に対する関心が高まっている。長距離BSA伝送では、後方散乱XTと間接XT、短距離BSA伝送では、後方反射XTと間接XTの評価が必要で、いずれの評価にもCPTが用いられている^[14]。

ところで、PCCはこれまで暗黙のうちに対称とされてきたが、コア依存損失（CDL：core-dependent loss）があるとPCCは非対称になる。2023年、ACFが指数関数で与えられる場合、現実的なCDL、相関長の範囲では、PCCを対称として取り扱っても問題のないことが報告された^[15]。

7. 未解明の課題（むすびに代えて）

MCFの解析・設計技術としてのCMTとCPTを取り上げ、これらの理論の高度化の歩みを概観した。残りの紙面を借りて、未解明の課題をいくつか紹介し、むすびとしたい。

相関長の異常な長延化、クラッド径に依存するXT、曲げ半径に依存する相関長など、いずれもCMT、CPTの枠組みで合理的に説明できていない^[16]。さらには、FM-MCFにおいて、理論的には固有モードではないLPモードが固有モードとして伝搬する現象も、原因を解明できていない^[16]。

末筆ながら、SDM関連技術について、日ごろご討論いただいているEXAT研究会の関係各位に深謝する。

参考文献

- [1] M. Koshiba et al., IEICE Electron. Exp., vol. 6, pp. 98-103, Jan. 2009.
- [2] Y. Kokubun and M. Koshiba, Proc. EXAT Symp., pp. 36-48, Nov. 2008.
- [3] K. Takenaga et al., Opt. Fiber Commun. Conf., OWK7, Mar. 2010.
- [4] T. Hayashi et al., Eur. Conf. Opt. Commun., We.8.F.6, Sep. 2010.
- [5] T. Hayashi et al., Opt. Fiber Commun. Conf., OWJ3, Mar. 2011.
- [6] T. Hayashi et al., Opt. Fiber Commun. Conf., PDPC2, Mar. 2011.
- [7] M. Koshiba et al., Opt. Exp., vol. 19, pp. B102-B111, Dec. 2011.
- [8] M. Koshiba et al., IEEE Photon. J., vol. 4, pp. 1987-1995, Oct. 2012.
- [9] J. H. Chang et al., Opt. Fiber Commun. Conf., W4I.4, Mar. 2015.
- [10] T. Hayashi et al., Proc. IEEE, vol. 110, pp. 1786-1803, Nov. 2022.
- [11] C. Antonelli et al., Opt. Exp., vol. 28, pp. 12847-12861, Apr. 2020.
- [12] K. Saitoh, J. Lightw. Technol., vol. 40, pp. 1527-1543, Mar. 2022.
- [13] C. Antonelli et al., Eur. Conf. Opt. Commun., Th1A-1, Dec. 2020.
- [14] T. Hayashi et al., Opt. Fiber Commun. Conf., M1E.1, Mar. 2022.
- [15] Y. Kobayashi and T. Hayashi, Opt. Exp., vol. 31, pp. 502-508, Jan. 2023.
- [16] Y. Kokubun and M. Koshiba, IEICE Electron. Exp., vol. 17, 20202001, Aug. 2020.