

主論文の要約

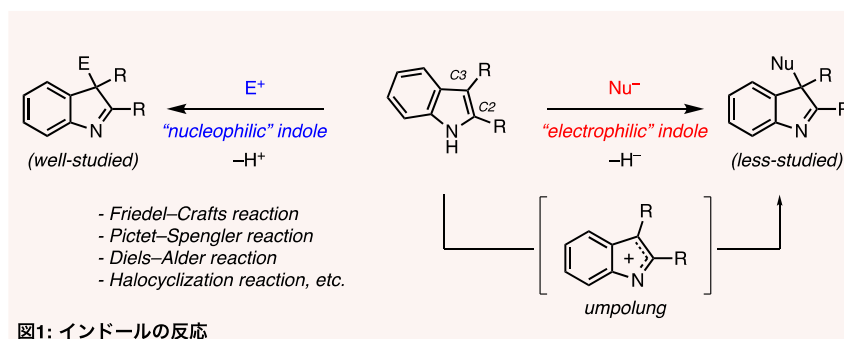
論文題目 **Development of Hypoiodite-catalyzed Oxidative Dearomatization of Indoles**
(次亜ヨウ素酸塩触媒を用いるインドール類の酸化的脱芳香族化反応の開発)

氏名 田中 啓貴

論文内容の要約

■ 第一章 序論

インドールは、トリプトファンの側鎖に含まれる電子豊富な芳香族化合物である。また、インドール 3 位は求電子剤に対する高い反応性を示し、そ



の反応性はベンゼンの 10^{13} 倍にも及ぶ。従って、Friedel-Crafts 反応、Pictet-Spengler 反応、Diels-Alder 反応、ハロ環化反応などその高い求核性を利用した反応が数多く開発されてきた。一方、求電子的なインドールは従来とは対照的な反応性を示すため、新たな分子変換反応への展開が期待できる。特に、酸化的極性転換反応は基質の事前の官能基化を必要とせず求核剤を求電子剤へ変換可能であることから、求電子的インドールの調製に有効であると考えられる。しかし、電子豊富なインドールの化学選択的酸化が困難であるためか、インドールの酸化的極性転換反応は僅か数例しか報告されていない(総説: Bandini, M. *Org. Biomol. Chem.* **2013** *11*, 5206)。

一方、当研究室では第四級アンモニウムヨウ化物と過酸化水素やアルコール由来の過酸化化物から *in situ* で調製される次亜ヨウ素酸塩(総説: Uyanik, M.; Ishihara, K. *ChemCatChem*.)

2012, 4, 177)を用いるフェノール類の様々な酸化のカップリング反応の開発に成功している。これらは、電子豊富なフェノールのヨウ素化に伴う極性転換により反応が進行していると考えられている (Uyanik, M.; Nishioka, K.; Kondo, R.; Ishihara, K. *Nat. Chem.* **2020** *12*, 353)。そこで、私は電子豊富なインドールもフェノール同様に極性転換できれば、これまでにない新しい酸化のカップリング反応への展開が可能になると考え研究に着手した。

■ 第二章 次亜ヨウ素酸塩触媒を用いるピリドインドール類の化学選択的合成法の開発

ピリドインドール類は、天然物や医薬品に含まれる重要な分子骨格である。そこで、私は保護基 (PG) の電子及び立体効果によって反応性を制御可能なホモトリプタミンの環化反応に着目し、ピリドイン

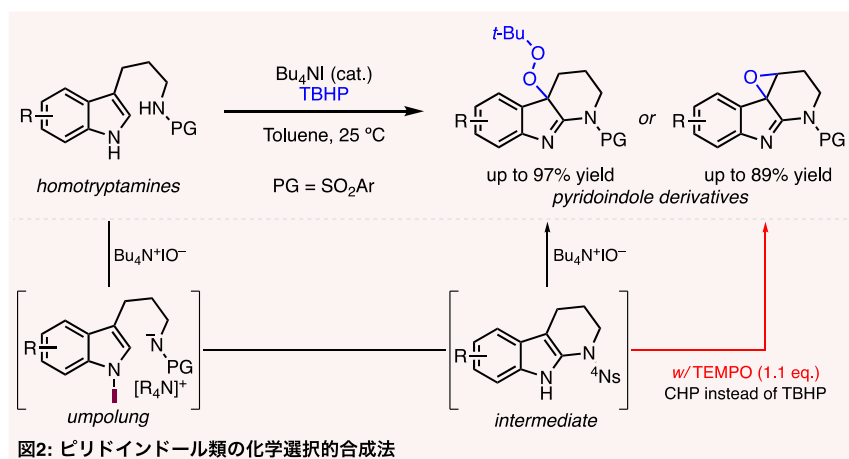


図2: ピリドインドール類の化学選択的合成法

ドール類の酸化合成法を検討した。触媒量のアンモニウムヨウ化物 (Bu_4NI) 存在下、酸化剤として *tert*-ブチルヒドロペルオキシド (TBHP) を用いた結果、スルホニル保護基を有する基質において反応が円滑に進行し、TBHP の付加体であるペルオキシインドレニンを高収率で得た。また、反応の鍵中間体の単離にも成功し、添加剤としてニトロキシラジカルを用いることで本中間体からエポキシインドレニンが得られることを見出した。この偶発の発見からピリドインドール類の化学選択的合成へも展開し、様々なペルオキシド及びエポキシドを高い化学収率で得ることに成功した。さらに、反応機構解析の結果からインドール窒素上のヨウ素化に伴う極性転換が酸化反応の進行に有効であることが示唆された。

■ 第三章 次亜ヨウ素酸塩触媒を用いるインドロキノリン類の酸化合成の開発

インドロキノリンアルカロイドは抗炎症作用、降圧作用など様々な生物活性を示すことから、合成化学の分野で大きな関心を集めている。既に、インドロキノリンの

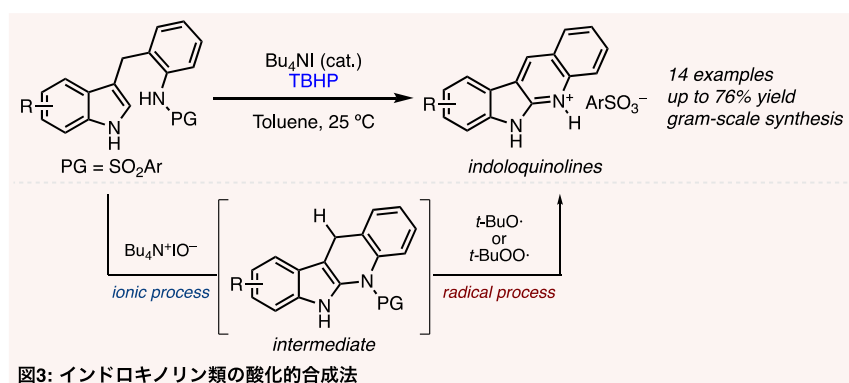


図3: インドロキノリン類の酸化合成法

酸化合成法も開発されているが、高価な酸化剤や激しい反応条件を必要とする等の課題

が残されている(総説: Bracca, A. B. J.; Heredia, D. A.; Larghi, E. L.; Kaufman, T. S. *Eur. J. Org. Chem.* **2014**, 7979)。私は、第2章で述べた反応開発の研究過程において分子内求核種としてアニリンを有する基質の酸化反応を検討した結果、予想されたペルオキシドは得られず、インドロキノリンがスルホン酸塩として得られることを発見した。本反応は穏やかな条件下で反応が進行し、インドール及びアニリン上に様々な官能基を有する基質にも適応可能である。また、生成物のスルホン酸塩はトルエンに対する溶解性が低いため、反応混合物を濾過のみで精製が可能でありスケールアップ合成も容易である。興味深いことに、本I⁺/TBHP触媒システムはイオン機構で進行する環化及びラジカル機構の脱スルホニル化の双方の反応においても機能することを見出した。

■ 第四章 次亜ヨウ素酸塩触媒を用いるインドールのエナント選択的スピロ環化反応の開発

堅固な三次元構造を有するスピロ化合物は、ケミカルスペースの観点から創薬化学において注目されている。また、天然に存在するスピロ化合物の多くは光学活性体であるため、その不斉合成法の開発は重要である(総説: Zheng, C.; You, S.-L. *Nat. Prod. Rep.* **2019**, 36, 1589)。上述した反応は、嵩の低いインドール2位で環化が進行したのに対し、2位に置換基を導入し、3位選択的環化反応を制御することでスピロ環

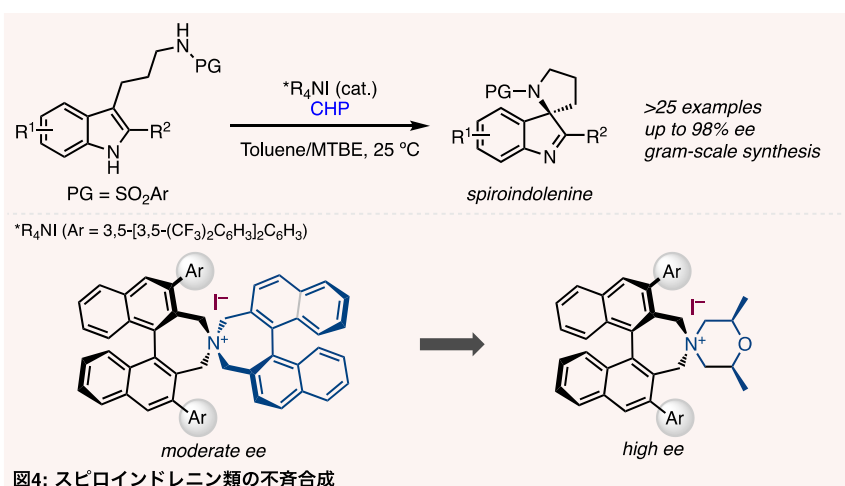
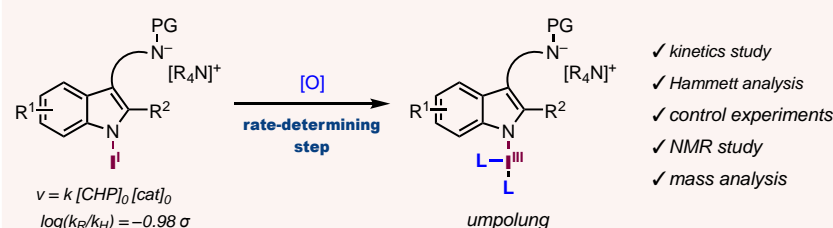


図4: スピロインドレニン類の不斉合成

□mechanistic studies



□harnessing electrophilic indole

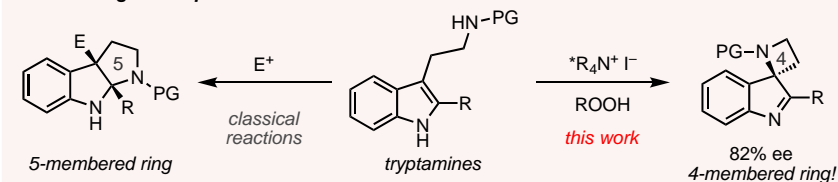


図5: インドールの極性転換と応用

化反応に展開できると考えた。また、適切なキラルアンモニウムヨウ化物を分子設計することで不斉反応へ展開できると考えた。まず、インドール2位に置換基(R²)を導入したホトリプタミンを用いた結果、狙い通り3位での環化反応が進行し目的とするスピロインドレ

ニンを得た。続いて、キラル第四級アンモニウムヨウ化物を詳細に検討した結果、モルホリン骨格を有する触媒が不斉収率の向上に有効であることを見出し、ジメチルモルホリンを導入した触媒を用いることで目的生成物を高い不斉収率で得ることに成功した。

続いて反応機構を詳細に調査した。反応速度論解析及び Hammett 則に基づく置換基効果の定量化を行なった結果、本反応ではヨウ素化された基質の酸化が律速段階であることが示唆された。また、その反応定数 ($\rho = -0.98$) から律速段階の遷移状態ではインドール窒素上に正電荷が生じていることが示唆された。即ち、*N*-ヨード化中間体の形成及び超原子価ヨウ素への活性化により本酸化反応が進行していることが示唆された。さらに、コントロール実験、NMR 実験、質量分析により *N*-ヨード化中間体の同定に成功した。このように、**次亜ヨウ素酸塩触媒がインドール窒素上のヨウ素化に伴う極性転換に有効であることを見出した。**

続いて、インドールの触媒的極性転換を利用した反応の拡張を目指し、トリプタミンの脱芳香族化反応に着目した。これまでに、トリプタミンの脱芳香族化反応が数多く報告されてきたが、これらはインドール2位で環化が進行した五員環生成物を与える(総説: Ruiz-Sanchis, P.; Savina, S. A.; Albericio, F.; Álvarez, M. *Chem. Eur. J.* **2011**, *17*, 1388)。そこで、求電子的インドールを応用することでトリプタミンのスピロ環化反応に展開できると考えた。期待通り、本手法を用いることで**形成困難なスピロアゼチジン**を不斉構築することにも成功した。また、反応生成物は様々なインドールアルカロイドへと容易に誘導可能であることも見出した。

■ 結論

以上、私は次亜ヨウ素酸塩触媒がインドールの酸化に有効であることを見出し 3 つの反応を開発した。これらは穏和な条件下で反応が進行し、容易にスケールアップが可能である。また、キラルアンモニウムヨウ化物を触媒として用いることで、インドールの不斉酸化的脱芳香族化反応にも展開した。さらに、反応機構解析を駆使することで、次亜ヨウ素酸塩触媒がインドール窒素上のヨウ素化に伴う極性転換に有効であることを見出した。このように触媒的に調製できる求電子的インドールはこれまでにない反応性を示し、トリプタミンの脱芳香族化反応では形成困難なスピロアゼチジンの不斉構築にも成功した。この研究結果に基づくインドールの極性転換を利用することで、今後新たなインドールの酸化反応の開発が期待できる。