

協奏機能分子触媒の化学

東京工業大学 大学院 理工学研究科 応用化学専攻 教授 碓屋 隆雄
東京工業大学 大学院 理工学研究科 応用化学専攻 助教 榎木 啓人

1 はじめに

遷移金属錯体を基盤とする分子触媒は有機合成化学に欠かすことのできないツールであり、研究室レベルだけでなく実用プロセスにも利用されている。高活性・高選択性を実現する多様な分子触媒が開発されている要因は、錯体触媒の中心金属や配位子を適切に選択することにより、分子レベルで精密に反応を制御できる点にある。配位子によるチューニングは、反応点である金属の電子状態に影響を及ぼす電子的効果と、金属周りの空間的配位環境を支配する立体的効果に大別され、いずれも配位した状態における「静的な」効果である。例えば、最も汎用されている支持配位子であるホスフィン類に関しては、既にさまざまな誘導体が開発され、その多くが市販されており、これらの電子的および立体的効果について幅広く調節が可能になっている。

配位子による触媒機能の変化は、上述の「静的な」効果や配位子の解離による空配位座の生成により説明されることが多いが、近年、配位子が構造変化しながら触媒反応が進行するケースや、配位子の一部が基質分子の変換に直接関与する、「動的な」配位子効果を有する分子触媒系が開発されている。このような従来の触媒メカニズムの範疇に入らない新たな概念に基づく分子触媒機能の拡充をめざした研究を集約し、発展させる目的で、われわれは、2006年に科学研究費補助金・特定領域研究「協奏機能触媒」を開始し、多くの研究者の協力を得て、昨年度末に終了するまでに多くの研究成果を上げることができた。

本稿では、協奏機能触媒の基本原理解説するとともに、最近までに開発した触媒系を紹介することで、協奏機能分子触媒の設計理念の一般性を明らかにしたい。

2 協奏機能触媒とは

「動的な」配位子効果を有する分子触媒系では、配位子上の官能基との水素結合性相互作用やプロトン移動を介した基質の取り込みや活性化が鍵となる。

90年代半ばに新技術事業団（現 科学技術振興機構）ERATO 野依分子触媒プロジェクトにおいて、一級アミンキレート配位子をもつ遷移金属錯体の特異な触媒機能を有することが相次いで見いだされた。例えば、オレフィンに対して水素化活性をもつルテニウム-ホスフィン錯体 $[\text{RuCl}_2(\text{PPh}_3)_3]$ にエチレンジアミンと水酸化カリウムを添加した触媒系では、カルボニル基への水素化が優先し高い化学選択性を発現する。この結果をもとに、同プロジェクトはキラルジアミンとジホスフィンをもつ錯体を設計し、単純ケトン類の不斉水素化反応に有効な触媒系として報告した¹⁾。また、(*R,R*)-*N*-トシル-

1,2-ジフェニル-1,2-エチレンジアミン [(*R,R*)-TsDPEN] を配位子とするハーフサンドイッチ型アレーンルテニウム錯体が、2-プロパノールを水素源とする芳香族ケトンの不斉水素移動型還元反応の触媒として高い活性と立体選択性を示すことも明らかになった²⁾。さらに、この水素移動反応の触媒中間体を単離することに成功し、**Figure 1** に示す配位不飽和な 16 電子アミド錯体と 18 電子ヒドリド (アミン) 錯体間の相互変換を駆動力として反応が進行することがわかった。アミド錯体はブレンステッド塩基として作用し、2-プロパノールとの反応では速やかにヒドリド (アミン) 錯体を定量的に与える。一方、ヒドリド (アミン) 錯体は配位により酸性度の向上したアミンプロトンが酸として働き、ケトン基質を活性化し、六員環遷移状態を経てプロトン (H^+) とヒドリド (H^-) を供与する形式でアルコールに変換するとともに、アミド錯体を再生する。この金属/配位子協同効果 (metal-ligand cooperating effect; bifunctional effect) により、プロトン性アミン錯体がカルボニル基をもつ基質の還元に対して選択的に作用するものと理解されている。特に、(1) 配位様式の変換を伴う配位子上のプロトン授受が誘起する水素移動能と (2) 基質分子の中心金属への配位を経ずに進行するユニークなメカニズムは、特異な反応性や選択性を発現する基本原理であり、われわれは協奏機能触媒 (*concerto catalyst*) として系統的に研究を進めてきた。その結果、アミン/アミドルテニウム錯体の類縁化合物として、**Figure 2** に示すような、アミン配位子や中心金属の異なる協奏機能触媒群への拡張が進み、各々に特徴的な触媒機能の開発に成功している³⁾。

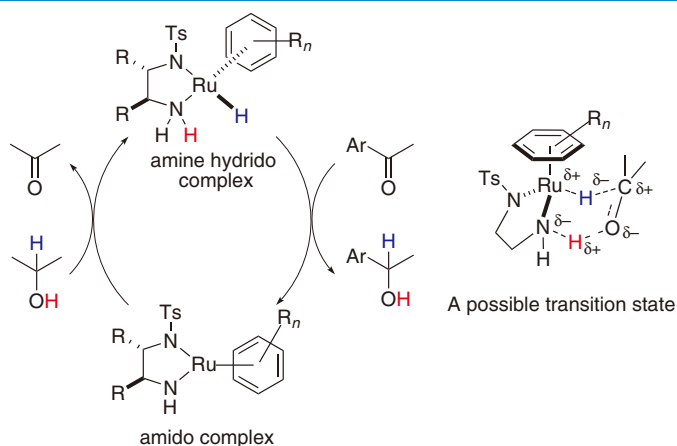


Figure 1. Interconversion of the amido and the amine (hydrido) Ru complex *via* a possible six-membered transition state.

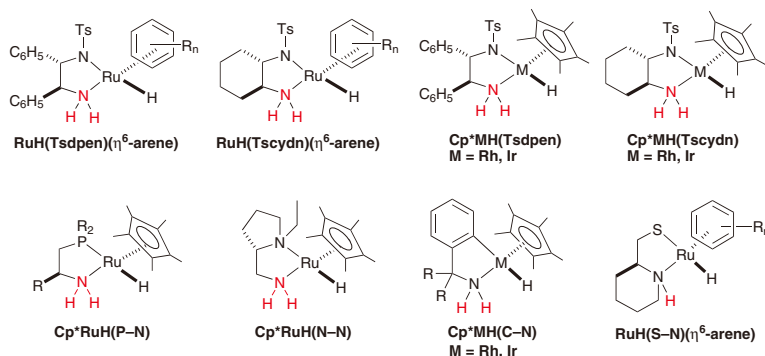


Figure 2. Bifunctional catalysts bearing protic chelate amine ligands.

われわれのグループ以外にも、**Figure 3** のような協奏機能触媒の概念に包含される錯体触媒が報告されている。金属／NH 部位の特性に起因する協奏機能触媒としては、Zhang らによるビス(オキサゾリニルメチル)アミン配位子を用いた水素移動触媒⁴⁾ (**A**) や Grützmacher らによるビス(トロピリデンル)アミン配位子を有するロジウム錯体⁵⁾ (**B**) などが挙げられる。

1985 年に Shvo らが開発した、ヒドリド配位子とシクロペンタジエニル配位子上のプロトンで架橋された特徴的な構造をもつルテニウム二核錯体 (**C**)⁶⁾ はアミン／アミド錯体系と同様にカルボニル化合物の還元や、アルコール／ケトン間の水素移動反応の触媒として有効であることが示されている⁷⁾。反応系中で二核錯体から解離して生じる 18 電子ヒドリド錯体と 16 電子配位不飽和錯体が、真の触媒活性種と考えられており、水酸基をもつシクロペンタジエニル配位子とシクロペンタジエノン配位子間の相互変換により反応が進行する。

また、Milstein らは、PNN ピンサー型 3 座配位子をもつルテニウム錯体 (**D**)⁸⁾ を開発し、通常酸性度が極めて低いと考えられるメチレン部位の可逆的な脱プロトン化が容易に起こること、16 電子錯体上で水素の不均等開裂による 18 電子ジヒドリド錯体生成が可逆的に進行することを鍵とする酸化／還元触媒として機能することを明らかにしている。

藤田、山口らは、ヒドロキシピリジン配位子をもつ Cp* イリジウム錯体 (**E**) による酸化還元系を開発している⁹⁾。ヒドロキシピリジン配位子はヒドリド錯体からの自発的な水素脱離と、アルコールの活性化に重要な役割を担う協奏機能を有していると考えられる。また、2-キノリンカルボン酸を配位子として用いる Cp ルテニウム錯体 (**F**) の協奏機能は北村らにより報告されている¹⁰⁾。カルボン酸／カルボキシラト配位子の変換の過程でアリルアルコールの水酸基が金属近傍に位置するプロトンにより活性化を受け、効率よくアリルエーテルが合成できる。

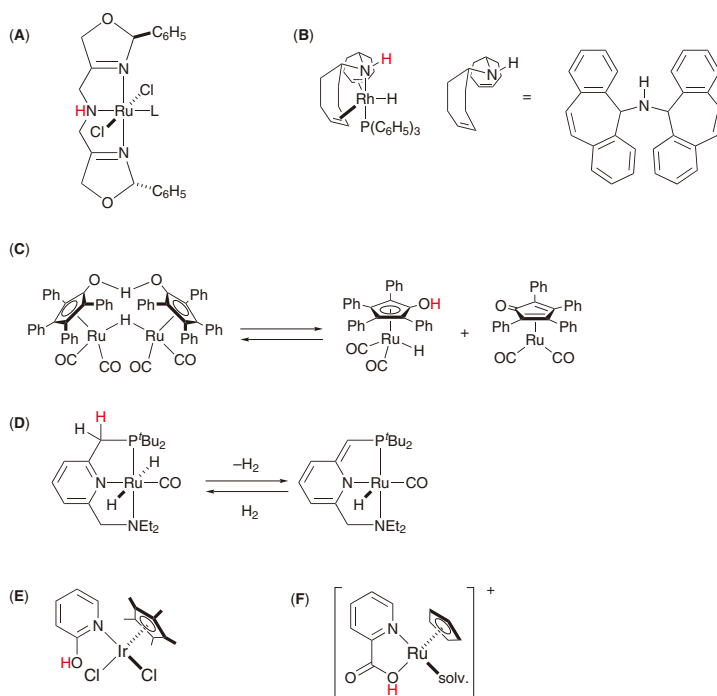


Figure 3. Related examples of metal-ligand cooperating catalysts having protic functional moiety.

3 協奏機能触媒による水素移動反応^{3c)}

N-トシルジアミン (TsN-N) を配位子にもつハーフサンドイッチ型錯体は、ギ酸／トリエチルアミン混合物を水素源とする水素移動型還元反応にも有効であり、アルコールの場合と同様に、アミド／ヒドリド (アミン) 錯体間で水素授受が進行する¹¹⁾。本触媒系は、水素受容体となるケトン基質の適用範囲が広く、Figure 4 に示すようにアルキン、ハロゲン、シアノ基やヘテロ芳香環に対する許容性があり、1,2-ジケトンや1,3-ジケトンの不斉還元にも高い選択性を発揮する。また、ケトン／アルコール間の水素移動は可逆であり、ケトンを経酸剤として用いれば、アルコールの脱水素酸化が可能である¹²⁾。等電子構造を有するロジウム、イリジウム錯体でも水素移動活性を示し、これらの *N*-トシルジアミン (TsN-N) を配位子とする協奏機能触媒系では、ケトンの他にイミン¹³⁾ やキノリン¹⁴⁾、あるいは α , β -不飽和ケトンやニトロアルケンなどの π 受容性の高いオレフィン¹⁵⁾ に対する還元も進行することが報告されている。

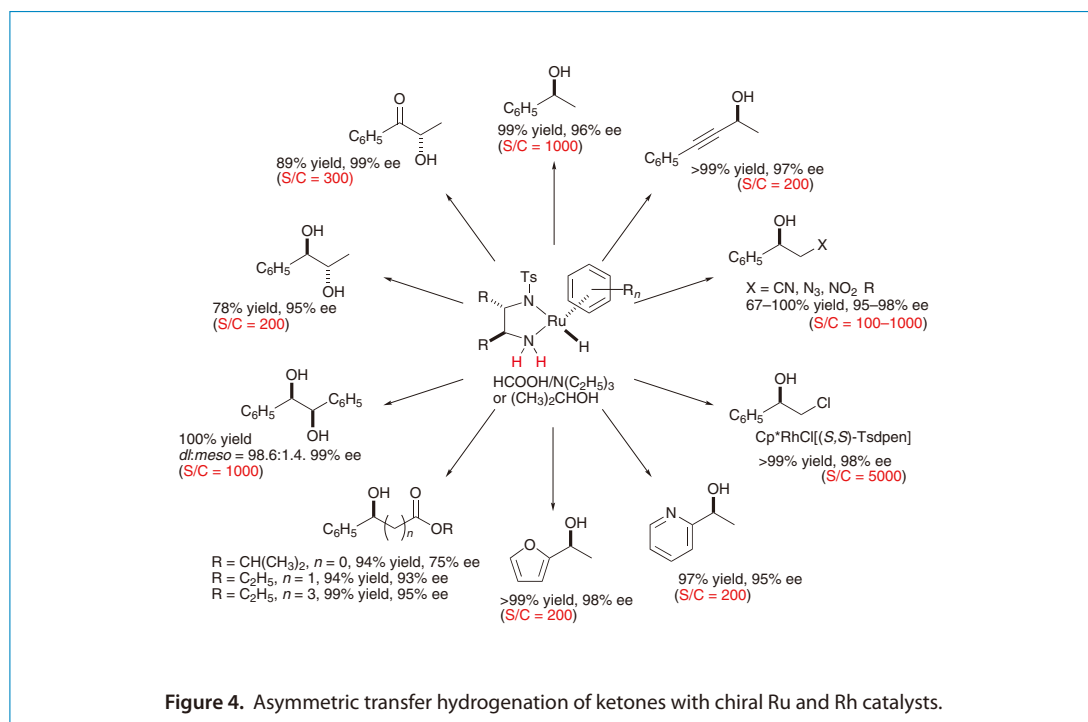


Figure 4. Asymmetric transfer hydrogenation of ketones with chiral Ru and Rh catalysts.

一方、ホスフィンとアミンでキレート配位した $\text{Cp}^*\text{Ru}(\text{P}-\text{N})$ 錯体も高い水素移動能を有する。例えば Figure 5 に示すように、水素移動の可逆性に基づき、キラルアルコール類の高速ラセミ化反応¹⁶⁾ やジオール類の酸化による位置選択的ラクトン化¹⁷⁾ を利用したリグナン類の合成が可能である。アリルアルコールの分子内水素移動反応では、ケトンを与える。キラル P-N 配位子を用いると、中間体のプロキラルな α , β -不飽和ケトンに対するエナンチオ選択的還元が進行し、(*R*)-muscone 合成への応用にも成功している¹⁸⁾。

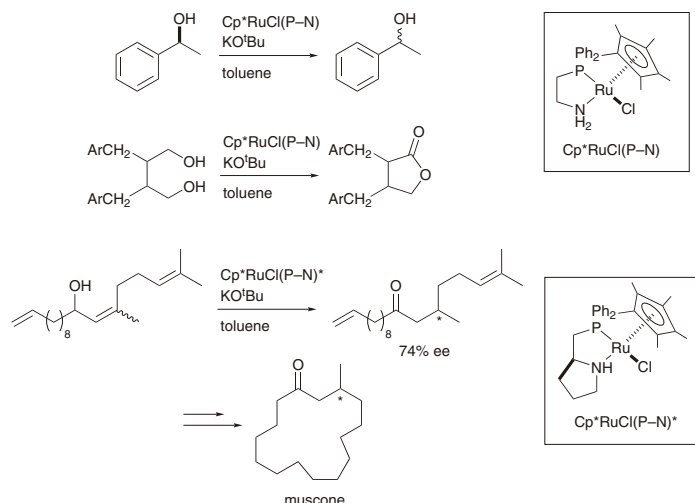


Figure 5. Hydrogen transfer reactions with $\text{Cp}^*\text{Ru}(\text{P-N})$ catalysts.

4 協奏機能触媒による極性官能基の水素化¹⁹⁾

ハーフサンドイッチ型アミド錯体のプレンステッド塩基性やアミンヒドリド錯体のヒドリド性は、アミン配位子骨格のチューニングや中心金属の選択により精密に制御できる。TsN-N 錯体に比べ、電子供与性の N-N, P-N キレート配位子を有する錯体は水素化活性を有する²⁰⁾。特に、P-N 配位子を有するアミンヒドリド錯体は、ケトンだけでなくエポキシド²¹⁾やイミド類^{22,23)}などの極性不飽和化合物の水素化触媒として有効である。これらの水素化は合成化学的に有用な分子変換に応用できる。例えば、イミド類の官能基選択的水素化反応は、アミノ基の保護基として用いられるフタロイル基の簡便な脱保護法として利用できる。また、Figure 6 に示すように、キラルオキサゾリジノンを用いる不斉合成の生成物である *N*-アシルカーバメートから、光学純度を損なうことなくキラル補助基を回収できる。一方、キラル触媒を用いると、対称グルタルイミド類は不斉水素化により非対称化され、抗うつ剤パロキセチンの合成中間体へと導かれる。

さらに、同触媒に対して過剰量の塩基存在下では、安息香酸エステルやラクトン類が円滑に水素化され、対応するアルコール類に変換される²⁴⁾。本水素化は金属ヒドリド試薬を用いる化学量論的な還元比べ原子効率の高い代替法になり得る。

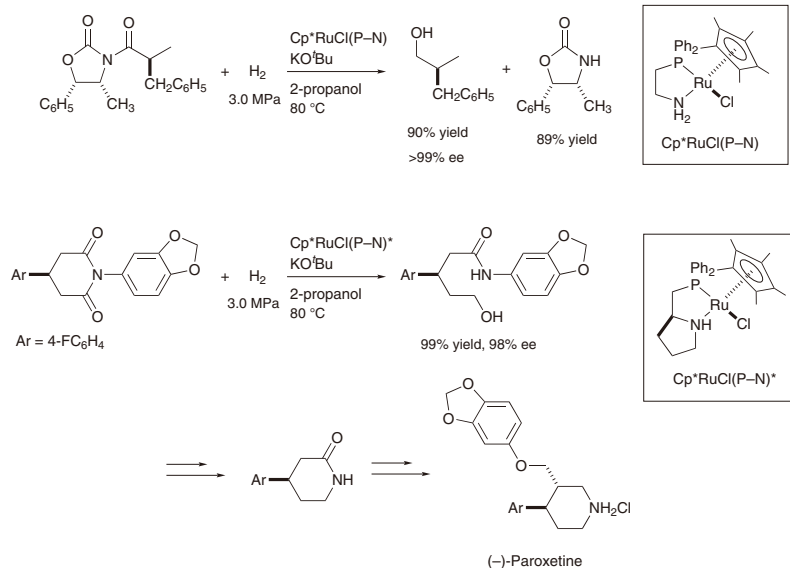


Figure 6. Hydrogenation of *N*-acylcarbamates and carboximides with $\text{Cp}^*\text{Ru}(\text{P-N})$ catalysts.

5 協奏機能触媒による酸素酸化反応²⁵⁾

金属-炭素結合をもつ一級アミンキレート錯体 (C-N 錯体) も、高い水素移動活性を有する分子触媒である²⁶⁾。触媒活性種として単離可能なヒドリド (アミン) イリジウム錯体は、THF 溶液中室温下で酸素と速やかに反応してアミド錯体へと変換する。さらに、同ヒドリド錯体は等モル量の過酸化水素を作用させるとアミド錯体を与えることから、酸素 1 分子は過酸化水素を経由して、2 分子のヒドリド (アミン) 錯体を脱水素できることがわかる。実際、C-N 錯体はアルコールの空気酸化反応の触媒となることが裏付けられている。Figure 7 に示すように、空気下においてヒドリドアミン錯体やアミド錯体を触媒として用いると 2 級アルコールは触媒的に酸化されて対応するケトンを与える²⁷⁾。1 級アルコールの空気酸化反応では、一旦生成するアルデヒドがもう 1 分子のアルコールと反応してヘミアセタールを形成し、続く脱水素酸化によりエステルへと変換できる。この酸化反応において三級アミン配位子を有するヒドリド錯体は、全く触媒活性を示さず、金属 / NH 部位の協奏機能が重要な役割を果たしている。

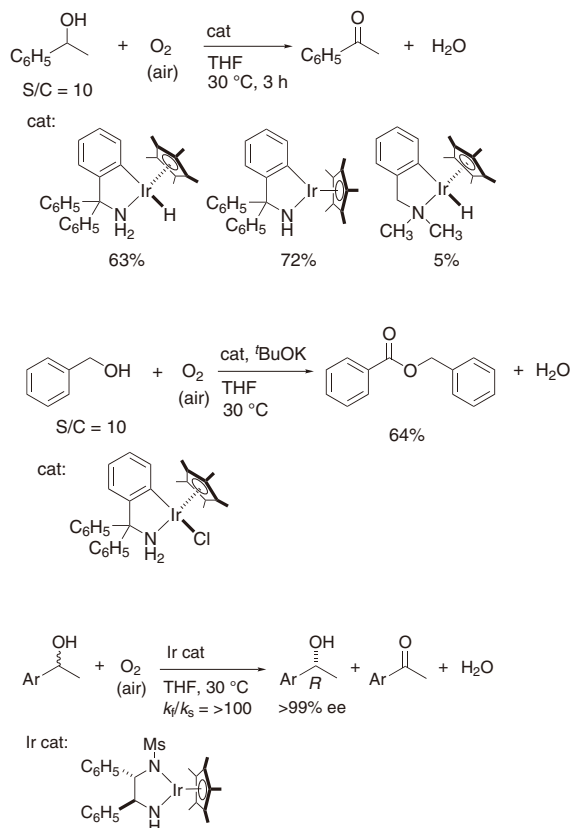


Figure 7. Aerobic oxidation of alcohols with bifunctional Ir catalysts.

空気酸化反応の触媒にキラルアミド錯体を用いれば、ラセミアルコール類は速度論的光学分割により光学活性体として回収される²⁸⁾。例えば、キラルMsDPEN配位子を有するイリジウム錯体の場合、最高99% eeのキラルアルコールが得られ、触媒のエナンチオマー識別能 k_f/k_s は100を超える。現時点で本空気酸化による速度論分割法は、従来のアセトンを水素受容体として用いる方法に比べて触媒活性は劣るが、副生成物として水のみ生成することから優れた方法といえる。

一方、アミン／アミド型の協奏機能は多核錯体系に展開することも可能である。Figure 8に示すように、 Cp^*Rh フラグメントをもつビス(スルホニルイミド)架橋二核錯体は水素やアルコールと反応し、ロジウム2価ビス(スルホニルアミド)錯体を与える。逆にビス(スルホニルアミド)錯体は酸素によって酸化され、3価ビス(スルホニルイミド)錯体を再生する²⁹⁾。これらの結果は、配位窒素上のプロトンの脱着を伴う協奏機能触媒の概念の一般性を示すものであり、空気酸化条件に耐える高活性触媒の開発における触媒設計の自由度がさらに広がりつつある。

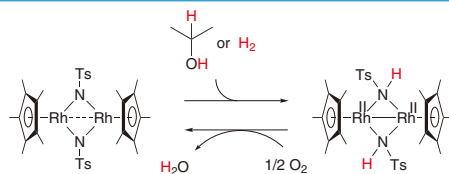
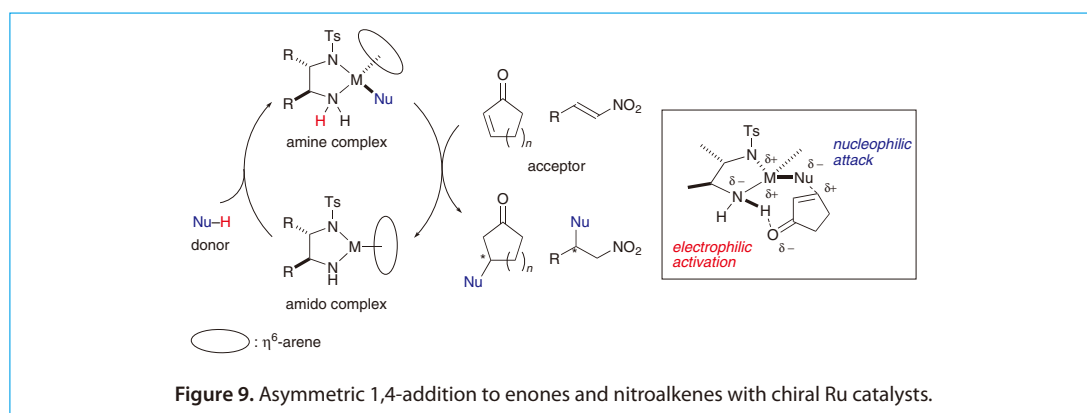


Figure 8. Interconversion between imido-bridged dirhodium(III) and amido-bridged dirhodium(II) complexes.

6 協奏機能分子触媒による不斉共役付加反応³⁰⁾

配位不飽和 16 電子アミド錯体はプレnstetted 塩基として働き、活性メチレン化合物などの酸性度の高い有機化合物と反応して対応するアミン錯体を定量的に与える³¹⁾。この素過程は、プロ求核剤の脱プロトン化による活性化に相当する。例えば、TsN-N 配位子をもつキラルルテニウムアミド錯体を用い、環状 α, β -不飽和ケトン類やニトロアルケン類などの適切な求電子剤が共存すると、Figure 9 に示すような不斉マイケル付加反応が進行する³²⁾。

プロ求核剤と求電子剤の組み合わせを拡張すれば、炭素—窒素結合形成反応の制御も可能である。実際、キラルイリジウムアミド触媒を用いた α -フェニル- α -シアノ酢酸エステルとアゾジカルボン酸エステルの反応では、炭素—窒素結合が形成され、ヒドラジン誘導体が定量的かつ高選択的に得られる³³⁾。



7 まとめ

プロトンおよびヒドリドの授受を伴う還元反応を端緒として、協奏機能触媒研究はさまざまな系に波及した結果、現在ではその多様性と一般性が実証されつつある。さらに最近では、複数の金属からなる多金属協奏機能分子触媒系³⁴⁾や、アミン／アミド型錯体以外に協奏機能が期待される錯体群³⁵⁾の設計・開発が進んでいる。協奏機能分子触媒により拓かれる新領域は、必要なものを必要なだけ無駄なくつくる「次世代ものづくり」の基盤として社会の発展に貢献できるものと確信している。

文献

- 1) a) T. Ohkuma, H. Ooka, S. Hashiguchi, T. Ikariya, R. Noyori, *J. Am. Chem. Soc.* **1995**, *117*, 2675. b) T. Ohkuma, H. Ooka, S. Hashiguchi, T. Ikariya, R. Noyori, *J. Am. Chem. Soc.* **1995**, *117*, 10417.
- 2) a) S. Hashiguchi, A. Fujii, J. Takehara, T. Ikariya, R. Noyori, *J. Am. Chem. Soc.* **1995**, *117*, 7562. b) K.-J. Haack, S. Hashiguchi, A. Fujii, T. Ikariya, R. Noyori, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1997**, *36*, 285.
- 3) a) T. Ikariya, K. Murata, R. Noyori, *Org. Biomol. Chem.* **2006**, *4*, 393. b) K. Muñiz, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 6622. c) T. Ikariya, A. J. Blacker, *Acc. Chem. Res.* **2007**, *40*, 1300.
- 4) Y. Jiang, Q. Jiang, X. Zhang, *J. Am. Chem. Soc.* **1998**, *120*, 3817.
- 5) a) P. Maire, T. Büttner, F. Breher, P. Le Floch, H. Grützmacher, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 6318. b) T. Zweifel, J.-V. Naubron, T. Büttner, T. Ott, H. Grützmacher, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 3245. c) T. Zweifel, J.-V. Naubron, H. Grützmacher, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 559.
- 6) a) Y. Blum, D. Czarkie, Y. Rahamin, T. Shvo, *Organometallics* **1985**, *4*, 1459. b) Y. Shvo, D. Czarkie, Y. Rahamin, D. F. Chodosh, *J. Am. Chem. Soc.* **1986**, *108*, 7400.
- 7) R. Karvembu, R. Prabhakaran, K. Natarajan, *Coord. Chem. Rev.* **2005**, *249*, 911.
- 8) a) J. Zhang, G. Leitun, Y. Ben-David, D. Milstein, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, *127*, 10840. b) C. Gunanathan, Y. Ben-David, D. Milstein, *Science* **2007**, *317*, 790. c) S. W. Kohl, L. Weiner, L. Schwartsburd, L. Konstantinovski, L. J. W. Shimon, Y. Ben-David, M. A. Iron, D. Milstein, *Science* **2009**, *324*, 74.
- 9) a) K. Fujita, N. Tanino, R. Yamaguchi, *Org. Lett.* **2007**, *9*, 109. b) R. Yamaguchi, C. Ikeda, Y. Takahashi, K. Fujita, *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 8410.
- 10) a) S. Tanaka, H. Saburi, Y. Ishibashi, M. Kitamura, *Org. Lett.* **2004**, *6*, 1873. b) S. Tanaka, H. Saburi, M. Kitamura, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 1730. c) S. Tanaka, T. Seki, M. Kitamura, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 8948.
- 11) A. Fujii, S. Hashiguchi, N. Uematsu, T. Ikariya, R. Noyori, *J. Am. Chem. Soc.* **1996**, *118*, 2521.
- 12) a) S. Hashiguchi, A. Fujii, K.-J. Haack, K. Matsumura, T. Ikariya, R. Noyori, *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* **1997**, *36*, 288. b) Y. Iura, T. Sugahara, K. Ogasawara, *Tetrahedron Lett.* **1999**, *40*, 5735. c) J. W. Faller, A. R. Lavoie, *Org. Lett.* **2001**, *3*, 3703.
- 13) N. Uematsu, A. Fujii, S. Hashiguchi, T. Ikariya, R. Noyori, *J. Am. Chem. Soc.* **1996**, *118*, 4916.
- 14) C. Wang, C. Li, Z. Wu, A. Pettman, J. Xiao, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 6524.
- 15) a) D. Xue, Y.-C. Chen, X. Cui, Q.-W. Wang, J. Zhu, J.-G. Deng, *J. Org. Chem.* **2005**, *70*, 3584. b) O. Soltani, M. A. Ariger, E. M. Carreira, *Org. Lett.* **2009**, *11*, 4196. c) X. Li, L. Li, Y. Tang, L. Zhong, L. Cun, J. Zhu, J. Liao, J. Deng, *J. Org. Chem.* **2010**, *75*, 2981.
- 16) M. Ito, A. Osaku, S. Kitahara, M. Hirakawa, T. Ikariya, *Tetrahedron Lett.* **2003**, *44*, 7521.
- 17) M. Ito, A. Osaku, A. Shiibashi, T. Ikariya, *Org. Lett.* **2007**, *9*, 1821.
- 18) M. Ito, S. Kitahara, T. Ikariya, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, *127*, 6172.
- 19) a) M. Ito, T. Ikariya, *Chem. Commun.* **2007**, 5134. b) 伊藤正人, 碓屋隆雄. 有機合成化学協会誌 **2008**, *66*, 1042 (English version).
- 20) M. Ito, M. Hirakawa, K. Murata, T. Ikariya, *Organometallics* **2001**, *20*, 379.
- 21) M. Ito, M. Hirakawa, A. Osaku, T. Ikariya, *Organometallics* **2003**, *22*, 4190.
- 22) M. Ito, L. W. Koo, A. Himizu, C. Kobayashi, A. Sakaguchi, T. Ikariya, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 1324.
- 23) M. Ito, A. Sakaguchi, C. Kobayashi, T. Ikariya, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 290.
- 24) 伊藤正人, 大塚隆史, 椎橋彬, 碓屋隆雄, 日本化学会第 89 春季年会プログラム, **2009**, 1F113.
- 25) T. Ikariya, S. Kuwata, Y. Kayaki, *Pure Appl. Chem.* **2010**, in press. DOI:10.1351/PAC-CON-09-09-11.
- 26) S. Arita, T. Koike, Y. Kayaki, T. Ikariya, *Organometallics* **2008**, *27*, 2795.

- 27) S. Arita, T. Koike, Y. Kayaki, T. Ikariya, *Chem. Asian J.* **2008**, *3*, 1479.
- 28) S. Arita, T. Koike, Y. Kayaki, T. Ikariya, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 2447.
- 29) K. Ishiwata, S. Kuwata, T. Ikariya, *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 5001.
- 30) T. Ikariya, I. D. Gridnev, *Chem. Rec.* **2009**, *9*, 106.
- 31) K. Murata, K. Konishi, M. Ito, T. Ikariya, *Organometallics* **2002**, *21*, 253.
- 32) a) M. Watanabe, K. Murata, T. Ikariya, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 7508. b) T. Ikariya, H. Wang, M. Watanabe, K. Murata, *J. Organomet. Chem.* **2004**, *689*, 1377. c) M. Watanabe, A. Ikagawa, H. Wang, K. Murata, T. Ikariya, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 11148. d) H. Wang, M. Watanabe, T. Ikariya, *J. Organomet. Chem.* **2005**, *46*, 963.
- 33) Y. Hasegawa, M. Watanabe, I. D. Gridnev, T. Ikariya, *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 2158.
- 34) S. Kuwata, T. Ikariya, *Dalton Trans.* **2010**, *39*, 2984.
- 35) a) Y. Kashiwame, S. Kuwata, T. Ikariya, *Chem. Eur. J.* **2010**, *169*, 766. b) K. Araki, S. Kuwata, T. Ikariya, *Organometallics* **2008**, *27*, 2176.

(Received May 2010)

執筆者紹介

碓屋 隆雄 (Takao Ikariya) 東京工業大学 大学院 理工学研究科 応用化学専攻 教授

〔ご経歴〕 1976年3月 東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了, 1976年4月 東京大学工学部合成化学科助手, 1979年10月-1981年3月 米国カリフォルニア工科大学 R.H.Grubbs 研博士研究員, 1985年4月 NKK 中央研究所, 1991年9月 科学技術振興事業団野依分子触媒プロジェクト技術参事, 1997年4月 東京工業大学工学部教授, 1999年4月 東京工業大学大学院理工学研究科教授, 2002年10月 東京工業大学フロンティア創造共同研究センター教授, 2005年4月 東京工業大学大学院理工学研究科教授, 現在に至る。

〔ご専門〕 分子触媒化学, 超臨界流体触媒化学

榎木 啓人 (Yoshihito Kayaki) 東京工業大学 大学院 理工学研究科 応用化学専攻 助教

〔ご経歴〕 1997年3月 早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了, 1996年4月 日本学術振興会特別研究員, 1998年2月 科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業 (CREST) 研究員, 2001年12月 科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業 (PRESTO) 研究者, 2005年4月 東京工業大学特別研究員, 2006年10月 東京工業大学大学院理工学研究科科学研究費教育研究支援員, 2009年10月 東京工業大学大学院理工学研究科応用化学専攻助教, 現在に至る。

〔ご専門〕 有機金属化学