

現在こそゴールドラッシュの星間分子発見

荒木 光 典

〈東京理科大学理学部第一部 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3〉

e-mail: araki@rs.kagu.tus.ac.jp



現在こそ新しい星間分子発見のゴールドラッシュである。2004年以来、新しい星間分子の年間発見数は4個以上となり、7原子以上の大きな星間分子の発見数は17個になる。負イオン (C_4H^- , C_6H^- , C_8H^- , CN^- , C_3N^- , C_5N^-) やフラレーン (C_{60} , C_{70}) というこれまでにない分子類も発見されている。そして、現時点での総検出数は、177個に及ぶ。この状況から、今後はさらに新奇な星間分子の発見が期待できる。

1. はじめに

1969年を皮切りに、星間分子が電波で発見されている。筆者は1996年ごろから、発見された星間分子の集計を独自に行ってきた¹⁾。かつて星間分子の発見はゴールドラッシュと言われたが、今は「ゴールドラッシュは過去のもの」としばしばささやかれる。しかし、この集計から、むしろ「現在こそゴールドラッシュである」ことが見えてきた。

近年は年間数個の発見が続いており、発見総数は増え続けている。そのため、星間分子に携わっている研究者からも、全体のイメージがつかみにくいと聞く。これが本稿を執筆する動機となった。

発見された星間分子のリストは、ケルン大学²⁾、ウィキペディア³⁾、理科年表⁴⁾からも公開されているが、筆者は大学のサイトから公開している¹⁾ (図1)。エクセルで集計しているため、電荷、原子数、原子種、報告年などごとに並べ替えることができる。集計は以下の基準で行っている。正確に発見された分子をリストに入れる。重水素置換体や ^{13}C 同位体などの同位体はリストに入れない。ただし、 $CH_3D^{+5)}$ のように重水素置換体だ

けが観測されている場合は、それを一つの分子としてリストに入れる。一つの分子の新発見の後、他の天体でも発見されることが多いが、その分子の最初の発見のみをリストに入れる。発見場所は銀河系内でも系外でも問わない。しかし、系内の分子のほうがより強く観測されるため、どの分子も今のところ最初は系内で発見されている。結果的に系内で発見された分子でリストが構成される。惑星大気分子は含めない。また、暫定検出の分子は原則リストに入れない (報告を見つければtentativeのフラグをつけたうえでリストに記入しているが、網羅性はない)。検出の波長領域は、電波 (回転遷移)、赤外 (振動遷移)、可視 (電子遷移) を問わない。ただし、赤外領域で観測される多環芳香族化合物のように、正確に分子種の同定ができないものは、リストに含めない。結果的に、ほとんどの分子が電波で発見されることになる。現在の発見総数は177種¹⁾ (2014年10月現在) に達する。

本稿では、星間分子の発見状況を定量的に示している (論文の発表年を発見年としている)。できるだけ間違いがないように努めているが、数が多いため、細部には間違いや認識の違いがあるかもしれない。この点をご容赦願いたい。

| 1 | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S |
|-----|-----------|------|--------|---|----|---|---|---|----|----|----|-----|-----|--------|--------|------------|------|--------------------|----------|
| 1 | molecule | atom | charge | H | C | N | O | S | HA | CN | OH | CH3 | cyc | linear | status | transition | year | Ref | Ref |
| 159 | HOCN | 4 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | | | | 2009 | ApJ, 697, 88 | A&A, 516 |
| 160 | C2H5OCHO | 11 | | 6 | 3 | 2 | | | | | | 1 | | | | | 2009 | A&A, 499, 215 | (2009) |
| 161 | C3H7CN | 12 | | 7 | 4 | 1 | | | | 1 | | 1 | | | | | 2009 | A&A, 499, 215 | (2009) |
| 162 | AlO | 2 | | | | 1 | | | 1 | | | | | | 1 | | 2009 | ApJ, 694, L59 | (2009) |
| 163 | OH+ | 2 | 1 | 1 | | | 1 | | | | 1 | | | | 1 | | 2010 | A&A, 518, 26 | (2010) |
| 164 | AlOH | 3 | | 1 | | | 1 | | 1 | | 1 | | | | 1 | | 2010 | ApJ, 712, L93 | (2010) |
| 165 | H2Cl+ | 3 | 1 | 2 | | | | | 1 | | 1 | | | | | | 2010 | A&A, 521, L9 | (2010) |
| 166 | H2O+ | 3 | 1 | 2 | | | 1 | | | | | | | | | | 2010 | A&A, 518, 111 | (2010) |
| 167 | CN- | 2 | -1 | | 1 | 1 | | | | | 1 | | | | 1 | | 2010 | A&A, 517, 2 | (2010) |
| 168 | KCN | 3 | | | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | | | 1 | | 2010 | ApJ, 725, 181 | (2010) |
| 169 | C60 | 60 | | | 60 | | | | | | | | 1 | | vib. | | 2010 | Science, 329, 1180 | (2010) |
| 170 | C70 | 70 | | | 70 | | | | | | | | 1 | | vib. | | 2010 | Science, 329, 1180 | (2010) |
| 171 | SH+ | 2 | 1 | 1 | | | | | 1 | | | | | | 1 | | 2011 | A&A, 525, 77 | (2011) |
| 172 | HOOH | 4 | | 2 | | | 2 | | | | 2 | | | | | | 2011 | A&A, 531, L8 | (2011) |
| 173 | FeCN | 3 | | | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | | | 1 | | 2011 | ApJ, 733, 36 | (2011) |
| 174 | HO2 | 3 | | 1 | | | 2 | | | | 1 | | | | | | 2012 | A&A, 541, L11 | (2012) |
| 175 | ClH+ | 2 | 1 | 1 | | | | | 1 | | | | | | 1 | | 2012 | ApJ, 751, L37 | (2012) |
| 176 | C3H+ | 4 | 1 | 1 | 3 | | | | | | | | | | 1 | | 2012 | A&A 548, A68 | (2012) |
| 177 | HNCNH | 5 | 2 | 1 | 2 | | | | | 1 | | | | | | | 2012 | ApJ, 758, L33 | (2012) |
| 178 | CH3O | 5 | | 3 | 1 | | 1 | | | | | 1 | | | | | 2012 | ApJ, 759, L43 | (2012) |
| 179 | CH3D | 5 | | 4 | 1 | | | | | | | 1 | | | | 1 | 2012 | ApJ, 758, L4 | (2012) |
| 180 | TiO | 2 | | | | | 1 | | 1 | | | | | | | | 2012 | A&A, 543, L1 | (2012) |
| 181 | HNCHCN | 6 | | 2 | 2 | 2 | | | | 1 | | | | | | | 2013 | ApJ, 765, L10 | (2013) |
| 182 | NH3D+ | 5 | 1 | 4 | 1 | | | | | | | | | | | | 2013 | ApJ, 771, L10 | (2013) |
| 183 | CH3CHNH | 8 | | 5 | 2 | 1 | | | | 1 | | | 1 | | | | 2013 | ApJ, 765, L9 | (2013) |
| 184 | CH3OCOCH3 | 11 | | 6 | 3 | | | | | | | 2 | | | | | 2013 | ApJ, 770, L13 | (2013) |
| 185 | TiO2 | 3 | | | | | 2 | | 1 | | | | | | | | 2013 | A&A, 551, A113 | (2013) |
| 186 | MgCCH | 4 | | 1 | 2 | | | | 1 | | | | | | 1 | 1 | 2014 | A&A, 570, 45 | (2014) |
| 187 | HMgNC | 4 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | | | | | 2014 | ApJ, 775, L133 | (2013) |
| 188 | AlH+ | 2 | 1 | 1 | | | | | 1 | | | | | | | | 2014 | Science, 342, 1343 | (2014) |
| 189 | H2NCO+ | 5 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | | 1 | | 2014 | ApJ, 778, L1 | (2013) |
| 190 | SiH3CN | 6 | | 3 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | 1 | | | 1 | | 2014 | A&A, 570, 45 | (2014) |
| 191 | NCCP | 4 | | | 2 | 1 | | | 1 | 1 | | | | | 1 | 1 | 2014 | A&A, 570, 45 | (2014) |
| 192 | C5S | 6 | | | 5 | | | 1 | | | | | | | 1 | | 2014 | A&A, 570, 45 | (2014) |
| 193 | NO+ | 2 | 1 | | | 1 | 1 | | | | | | | | 1 | 1 | 2014 | ApJ, 795, 40 | (2014) |
| 194 | CCN | 3 | | | 2 | 1 | | | | | | | | | 1 | | 2014 | ApJ, 795, 11 | (2014) |

図1 星間分子リストの一部. 東京理科大学サイト¹⁾より.

本リストの活用方法であるが、どんな分子が発見されているかを一望することに適している（ただし、tentative列に1と記載されているものは、検出が確定していないので注意）。「あの分子は発見されているのか？」と思ったとき、星間分子に携わっている研究者でも、すべて頭に入っているわけではない。このようなときに活用できる。また、「どの分子が何年に発見されたか？」、「どのような順番で分子が発見されたか？」、「どの時代にどの望遠鏡が活躍しているか？」、「どのような元素をもつ分子が多いのか？」、「原子数5個の分子にはどのようなものがあるか」、こういった基本的な疑問にすぐ答えることができる。さらに、何か文章を執筆しているとき、「○○のような分子は星間空間に何個発見され、…」という一文を入れたければ、ぜひ活用して欲しい。ちなみに、筆者は論文へのリンク集としても活用している。

2. ゴールドラッシュ

ゴールドラッシュという言葉は、天文月報1971年10月号「宇宙電波分光学の発展」で海部宣男氏が「アリゾナのゴールドラッシュ」として用いたことが始まりである⁶⁾。その後ゴールドラッシュといわれる時代は長く続き、90年代の始めまでは、そう呼ばれている（図2a）。しかし、その後、年間発見数は少なくなる。そして、90年代の終わりには、すでに100個程度の星間分子が発見されているため、「もはや新しいものが発見されても意味がない」といわれていた。しかし、2004年ごろから再び年間発見数は増えている。むしろ、ここ10年は、70年代や80年代をしのぐゴールドラッシュである（図2a）。本稿では、2004年に始まり現在進行中のこれを“21世紀のゴールドラッシュ”とする。これにはいくつかの特徴がある。一つは、大きな分子が多く発見

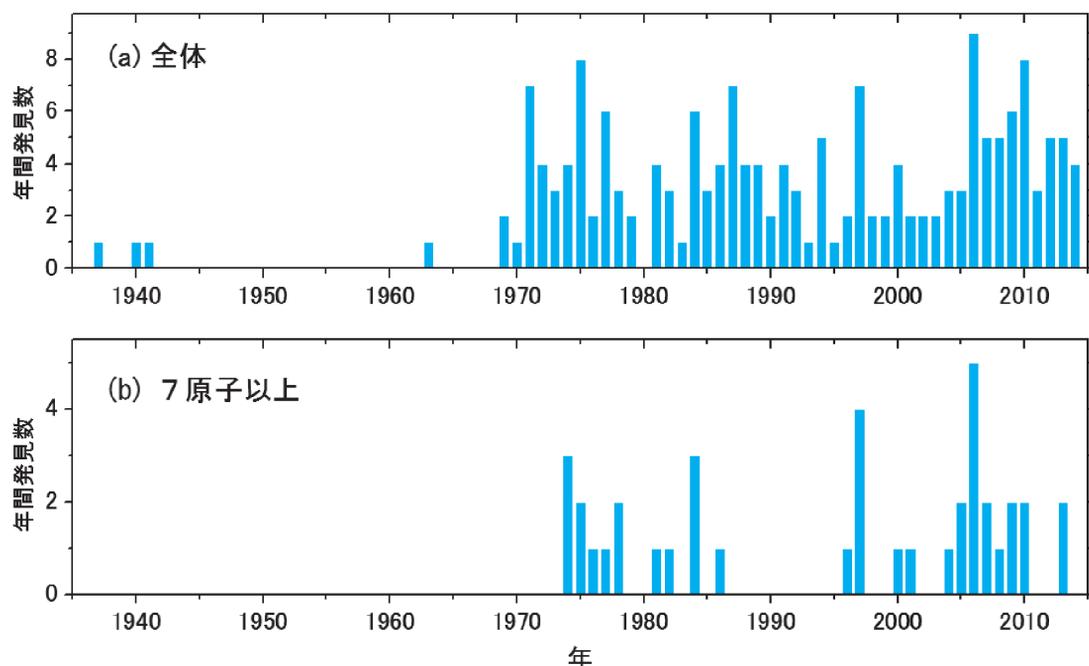


図2 星間分子の年間発見数. (a) 全体, (b) 7原子以上.

されていることである. 図2bには, 原子数7個以上の星間分子について, その年間発見数を示してある. 原子数7個以上の星間分子は全部で39個発見されているが, そのうち17個が2004年以降に発見されている. 特にフラレーン C_{60} や C_{70} の発見が大きな話題となった⁷⁾. 原子数以外に, イオンが数多く発見されていることも特徴である. C_4H^- , C_6H^- , C_8H^- , CN^- , C_3N^- , C_5N^- , CF^+ , OH^+ , H_2O^+ , H_2Cl^+ , SH^+ , ClH^+ , NH_3D^+ , ArH^+ と14種もある. 27種発見されているイオンのうち, その半分以上がこの21世紀のゴールドラッシュで発見されている. 特に, 負イオンはこれまで発見がなされていなかった分子類であるため, 注目されている.

3. 発見される星間分子の傾向

これまでの発見総数177個の中には, 地球上に見られる安定種だけでなく, 直線炭素鎖分子, ラジカル, イオンなど, 不安定種も数多く含まれている. ここで, 表1に星間分子の傾向の一面を分

表1 電荷・元素・官能基ごとの星間分子の発見数.

| | |
|-------------------|----|
| 負イオン | 6 |
| 正イオン | 21 |
| O | 58 |
| S | 18 |
| 重い元素 ^a | 37 |
| OH | 15 |
| CH ₃ | 28 |
| 環構造 ^b | 8 |

^a 硫黄を除く酸素より重い元素を含むもの.

^b $c-C_3H_2$, $c-H_2C_3O$, H_3^+ , $c-C_2H_4O$, $c-SiC_2$, $c-SiC_3$, C_{60} , C_{70} .

析してみた. 星間分子の多くは, 水素と炭素が主たる構成元素だが, 酸素を含む星間分子は全体の3割を超える. そのうち, 15個の分子がOHすなわちアルコールという形で酸素を含んでいる. 酸素より重い元素を含む星間分子は, 硫黄を含むものを合わせると, 全体の3割を占める. その半分程度が赤色巨星周辺雲IRC+10216で検出されている.

ここで, 図3の星間分子のサイズ分布を見ると, 分子が大きくなるに従って発見数が減少して

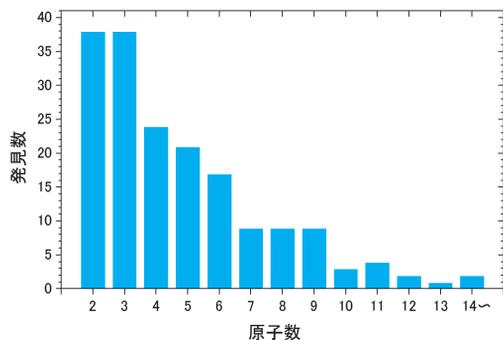


図3 検出された星間分子のサイズ分布.

いる。これには分光学的な理由がある。星間分子の発見はほとんど電波（回転遷移）でなされている（永久双極子モーメントをもたない分子は電波では検出されないため、可視や赤外で検出される）。大きな分子では、回転のエネルギーレベルが密になるため、多くのエネルギーレベルに回転分布が分散する。その結果、現れる回転遷移の数は多くなるが、その分遷移1本当当たりの強度は減少してしまい、結果的に検出が困難になる。そのため、星間空間における分子の発見は、小さな分子と直線分子に偏っている。すなわち、発見数の多さが量の多さを示すのではなく、注意が必要である。一方、赤外領域では未同定赤外バンドが検出され、分子種の正確な同定がされないだけで、多環芳香族化合物が存在することが示唆されている⁸⁾。このことから、検出されないだけで大きな分子は存在すると考えられる。

4. 星間分子が発見される天体

天体ごとの新しい分子の発見数を表2にまとめた。なんといっても新発見の最大の“漁場”は、いて座分子雲 Sgr A/B である。銀河中心の Central Molecular Zone に位置し、多くの飽和炭素鎖分子がここで発見されている。ただし、直線炭素鎖分子 HC₅N の最初の発見の場にもなっている。その次が、赤色巨星周辺雲 IRC+10216 である。ここでは、直線炭素鎖分子、Si, Ar, Mg など重い元素を含んだ分子が豊富である。また、直線分子

表2 天体ごとの新しい分子の発見数.

| | 全期間 | 2004-2014 |
|-------------------|-----|-----------|
| いて座分子雲 Sgr A/B | 62 | 18 |
| 赤色巨星周辺雲 IRC+10216 | 41 | 15 |
| おうし座暗黒星雲 TMC-1 | 25 | 5 |
| オリオン座分子雲 Orion | 15 | 3 |
| ほか | 44 | 16 |

一つの分子が2カ所以上で同時に新しく発見されることもある。

が多いため、分子のシグナル強度が分散しにくく、 10^{12} cm^{-2} 程度の量（柱密度）で発見がなされていることも特徴である。前述の負イオンが発見されているのもここである。次いで、おうし座暗黒星雲 TMC-1 である。この天体の特徴は直線炭素鎖分子の宝庫であることである。4番目のオリオン座分子雲は、多くの分子のシグナルが強く観測される割には、新発見の数が少ない。赤色巨星周辺雲やおうし座暗黒星雲に比べれば、化学組成がいて座分子雲に似ているため、そこで先に発見されてしまうためであろう。これら主要4天体を見る限り、21世紀のゴールドラッシュにおいても、各天体で順調に発見が続いている。おうし座暗黒星雲では、1997年の環状エチレンオキサイド c-C₂H₄O の発見⁹⁾ まで活躍していた野辺山宇宙電波観測所の望遠鏡（NRO 45 m）に代わり、アメリカ国立電波天文台のグリーンバンク望遠鏡（GBT 100 m）が発見を継続している。

5. 発見に活躍してきた望遠鏡

最初の星間分子の発見は、1937年に電波ではなく可視による CH の発見から始まる。これに、CN と CH⁺ の発見が続くが、その後ひと段落することになる。そして、1963年の OH の観測が電波での最初の観測になる。しばらくおいて、1969年の H₂O とアンモニア NH₃ の発見から、ゴールドラッシュが始まる。当初目覚ましい活躍をした望遠鏡がアメリカ国立電波天文台の 11 m 望

表3 主な望遠鏡の星間分子発見数.

| | 全期間 | 2004-2014 |
|---------------------|-----|-----------|
| IRAM 30 m | 41 | 24 |
| NRAO 12 m (11 m) | 40 | 1 |
| NRO 45 m | 15 | 1 |
| ARO 12 m | 14 | 9 |
| GBT 100 m | 12 | 12 |
| NRAO 43 m | 7 | 0 |

望遠鏡 (NRAO 11 m) である。80年代に入って、野辺山宇宙電波観測所の望遠鏡 (NRO 45 m) と欧州のミリ波電波天文学研究所の望遠鏡 (IRAM 30 m) が稼動を開始する。さらにNRAOの11 m望遠鏡は12 mに改修されて、NRO 45 mやIRAM 30 mと並んで活躍することになる。NRO 45 mは、TMC-1に焦点を当て、直線炭素鎖分子を発見していく。これまで星間分子は、地球上の既存分子とそのラジカル種であったが、直線炭素鎖分子という新しい炭素の存在形態を発見することとなった。ただ、野辺山での発見ラッシュは10年間ほどで、1997年には前述のエチレンオキサイドの発見で一段落する (その後は2006年のギ酸メチルHCOOCH₃の発見¹⁰⁾があった)。その一方でIRAM 30 mは野辺山と同時期に発見を開始し、今日まで発見を続けている。さらに、星間分子の発見当初から活躍したNRAO 12 m望遠鏡は、現在ではアリゾナ大学に移管されARO 12 mとなり、今日でも活躍している。すなわち40年以上にわたって発見を続けていることになる。そのため、21世紀のゴールドラッシュはIRAM 30 m, ARO 12 m, GBT 100 mの活躍によるものと言ってよい (表3)。

6. 星間分子が発見されるまで

電波望遠鏡を用いて星間空間で分子を検出する作業には、三つの段階がある。なぜなら、その分子の回転遷移の周波数があらかじめ精密にわかっている必要があるからである。これを測定する仕

事は実験室で行われる。まず、分子を実験室で作らなければならない。星間分子はラジカル、イオン、直線炭素鎖分子など不安定な分子であるため、放電などの手法で生成される。次に、マイクロ波分光器を用いてその分子の回転遷移を測定する。最後に、電波望遠鏡により宇宙空間で探査を行う。一般に一つの分子の回転遷移が3本以上観測されると、検出と認識されることが多い。

筆者はこれまで、博士課程の時代から通算で6年にわたり実験室マイクロ波分光を行う研究グループに所属し、星間分子の発見を目指してきた。実際には、発見はそれなりに難しく、筆者がここで挙げた三つの段階をすべて成し遂げたことは、残念ながら一度もない。以前、熱分解により直線炭素鎖アルコールHC₄OHを生成して、マイクロ波分光により測定し¹¹⁾、野辺山の望遠鏡を用いておうし座の暗黒星雲TMC-1と星形成領域L1527で検出を試みた。しかし、検出には至らなかった (天文月報, 2012年7月号)^{12), 13)}。また、H₂Cl⁺を実験室で生成し、測定した¹⁴⁾。このときは、ハロゲン化物であること、回転遷移の多くが地球大気の吸収線に阻まれていたことから、星間分子としての検出は難しいと考えた。ところが、2010年になってから、衛星による発見が報告された¹⁵⁾。三つの段階を一度もやり遂げたことのない筆者であるが、このときは実験室の段階で貢献できた。

本リストは、発見された分子に対して、文献のリンクを張っている。文献は基本的に天文観測の論文である。実験室の文献までは引用しきれないが、一つの分子の発見の前に、いくつかの実験室の分光研究が行われていることも忘れないで欲しい。

7. 未来の展望

もし今のペースで例えば年間4個の発見が続けば、200個到達は2020年ごろである。さらに、これを延長すると2100年には500個に達する。こ

うなると2100年を待たずとも、近い将来に新しい宇宙の化学組成が明らかになると期待できる。その一つは、今話題になっている生体関連分子かもしれない。アミノ酸（まずはグリシン）が発見され、生命起源が宇宙にあったことが強く示唆される可能性がある。すでにその前駆体メチレンイミン $\text{CH}_2\text{NH}^{16)}$ とメチルアミン $\text{CH}_3\text{NH}_2^{17)}$ は発見されている。もう一つは、大きな分子かもしれない。現在、未同定赤外バンドだけでなく可視光領域の星間未同定吸収線（Diffuse Interstellar Bands; DIBs）も、多環芳香族化合物など大きな分子であると考えられている¹⁸⁾⁻²⁰⁾。それらはまだ同定されず、一世紀にわたって謎とされる^{21), 22)}。赤外領域では、異なる分子の振動遷移が重なっているため、今後も未同定赤外バンドの正確な分子種同定は難しいと思われる。しかし、DIBsのほうは、電子遷移であるため、異なる分子同士の遷移の重なりが少なく、分子種の同定が可能である。DIBsは600本程度発見されていて、DIBs同士の強度の相関は弱く、一つのDIBが一つの分子に対応すると予想されている。そのため、今後同定されれば、星間分子の数を大幅に増やすことになる。電波だけでなく、可視が星間分子の同定の舞台になる日も近いかもしれない。また、これまで C_{60} や C_{70} が発見されているため、さらに大きなナノサイズの分子へと展開する可能性も否定できない。

新奇な分子の発見を期待して、本稿を締めくくりたい。

参考文献

- 1) 東京理科大学サイト内, http://www.rs.kagu.tus.ac.jp/tsukilab/research_seikanlist.html
- 2) The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, University of Köln, <http://www.astro.uni-koeln.de/cdms/molecules>

- 3) Wikipedia, <http://ja.wikipedia.org/wiki/星間分子の一覧>
- 4) 国立天文台編, 理科年表(丸善出版)毎年
- 5) Cernicharo J., et al., 2013, ApJ 771, L10
- 6) 海部宣男, 1971, 天文月報64, No. 10, 42
- 7) Cami J., et al., 2010, Science 329, 1180
- 8) 例えば, 左 近樹, 2006, 日本惑星科学会誌15, 52
- 9) Dickens J. E., et al., 1997, ApJ 489, 753
- 10) Sakai N., et al., 2006, PASJ 58, 15
- 11) Araki M., Kuze N., 2008, ApJ 680, L93
- 12) Araki M., et al., 2012, ApJ 744, 163
- 13) 荒木光典, 2012, 天文月報105, 441
- 14) Araki M., et al., 2001, J. Mol. Spectros. 210, 132
- 15) Lis D. C., et al., 2010, A&A 521, L9
- 16) Godfrey P. D., et al., 1973, ApJ 13, 119
- 17) Kaifu N., et al., 1974, ApJ 191, 135
- 18) van der Zwet G. P., Allamandola L. J., 1985, A&A 146, 76
- 19) Léger A., d'Hendecourt L., 1985, A&A 146, 81
- 20) Crawford M. K., et al., 1985, ApJ 293, L45
- 21) 荒木光典, 2013, 天文月報106, 497
- 22) 荒木光典, 2006, 天文月報99, 18

The Gold Rush of Interstellar Molecules in the 21st Century

Mitsunori ARAKI

Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8601, Japan

Abstract: Now is the time for gold rush of new interstellar molecules in space. Since 2004, annual numbers of the detected interstellar molecules are more than three and the 17 large molecules having more than 6 atoms have been detected. The negative ions C_4H^- , C_6H^- , C_8H^- , CN^- , C_3N^- and C_5N^- , and the fullerenes C_{60} and C_{70} were also detected as new molecular types. As a result, the 177 interstellar molecules have been detected in space. Based on the recent gold rush of interstellar molecules, further detection of novel interstellar molecules can be anticipated in future.