HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	銀河と分子雲スケールで見た星間分子の組成
Author(s)	渡邉, 祥正
Citation	低温科学, 78, 211-218
Issue Date	2020-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.78.211
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/77785
Type	departmental bulletin paper
File Information	24_p211-218.LT78.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 78 （2020） 211–218
doi: 10.14943/lowtemsci. 78. 211

銀河と分子雲スケールで見た星間分子の組成

渡邉　祥正[1)]*

2019 年 11 月 6 日受付，2019 年 11 月 13 日受理

星間空間では 200 種類ほどの星間分子が発見されており，星形成領域では星間分子の組成に多様性があることが知られている．その多様性の起源を明らかにするためには，星形成に至る前段階の分子雲における化学組成を明らかにする必要がある．本稿では，銀河系内の分子雲と近傍銀河の分子雲の化学組成を電波望遠鏡によるスペクトル線サーベイ観測の手法を用いて調べた．その結果，分子雲スケールでは化学組成に多様性がほとんどないことが明らかになった．この結果は星形成領域の化学組成の多様性は，母体となる高密度なコアが形成されてから獲得されたことを示唆する．

Compositions of interstellar molecules at the molecular cloud and galaxy scales

Yoshimasa Watanabe[1]

More than 200 interstellar molecules have been identified in the universe. Strong diversity has been recognized in the chemical composition of interstellar molecules in star-forming regions. In order to reveal the origin of the chemical diversity, there is a need to explore the chemical characteristics at the scale of the molecular cloud, which defines the initial conditions for chemical evolution and star formation. With this in mind, we conducted spectral line survey observations of molecular clouds, both in the Milky Way and in other nearby galaxies. We found that the chemical composition was almost uniform at a molecular cloud scale, which implies that the chemical diversity seen in star-forming regions is acquired after the formation of dense parent cores.

キーワード：分子雲，星間分子，元素組成
Molecular cloud, Interstellar molecule, elemental abundance

1．はじめに

宇宙に存在するおびただしい数の星々は，分子雲の中で誕生する．分子雲の主成分は水素分子と塵であり，温度は絶対温度で 10–30 K，水素分子の個数密度は $10^{2–3}$ cm^{-3} 程度である．我々の地球の大気の温度と分子の個数密度がそれぞれ，300 K と 3×10^{19} cm^{-3} 程度であることと比較すると，分子雲がいかに希薄で低温のガスであるのかわかる．分子雲の中ではガスが自身の重力で引き合い収縮し密度が高くなり，最終的に星が誕生する．このように新しい星が生まれる場所を星形成領域と呼ぶ．

分子雲の主成分は水素分子であるが，微量ながらそれ以外の様々な種類の分子も存在している．これらの分子は星間分子と呼ばれ，分子分光データベースの The Cologne Database for Molecular Spectroscopy（Müller et al., 2001, 2005）によると，約 200 種類の分子がこれまで検出されている．多くの星間分子は，分子雲の中でも特に密度が高い星形成領域で見られる．しかも，星間分子の組成（以下，化学組成と呼ぶ）は，星形成領域ごとに異なっている（*e.g.* Sakai and Yamamoto, 2013）．この

*連絡先
渡邉　祥正
日本大学工学部
〒963-8642　福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地
e-mail：watanabe.yoshimasa@nihon-u.ac.jp
1）日本大学工学部
College of Engineering, Nihon University, Fukushima, Japan

化学組成の多様性は星形成後に惑星系にもたらされると考えられることから太陽系の起源との関連で興味が持たれる．従って，その多様性がどのようにして生じたかを理解することは，重要な研究課題となっている．そのためには，星形成の母体となる分子雲の化学組成を知る必要がある．そこで，我々の銀河系にある分子雲と近傍の銀河にある分子雲の化学組成を観測して，その特徴を調べた．

2. スペクトル線サーベイ観測

化学組成を知るためには，「どの分子」が「いくら存在するのか」を観測によって調べる必要がある．分子雲が手の届く場所にあればサンプルを採取して分析すればよいが，分子雲は近くても数 100 光年先に存在するためにそれは不可能である．そこで，分子の回転準位間の遷移に伴って放射される，ミリ波・サブミリ波帯のスペクトル線を利用して調べる．

分子は微視的に見ると回転している．さらに，分子の大きさは非常に小さいため，その回転エネルギーはとびとびの準位に量子化される．分子の回転エネルギーがあるエネルギー準位から別の準位に移る際に，そのエネルギー差に相当するエネルギーを持つ電磁波が発生する（回転スペクトル線）．このとき，量子化された分子の回転エネルギーの構造は分子ごとに決まっているため，回転スペクトル線の周波数は分子の種類によって決まっている．そのため，回転スペクトル線の周波数から，分子の種類を特定できる．分子雲の中では分子が周囲の水素分子（H_2）と衝突することでより高いエネルギー準位に励起され，低いエネルギーに遷移することで輝線を放射する（分子輝線）．この分子輝線の強度は主に分子の存在量に比例するため，分子輝線の強度から分子の存在量も推定することができる．

広い周波数にわたりスペクトル線を観測することにより，様々な分子を一挙に捉え対象天体の化学組成の全貌を調べることができる．この観測手法はスペクトル線サーベイ観測と呼ばれている．通常，ミリ波・サブミリ波帯のスペクトル線サーベイ観測における周波数帯域は非常に広く数 10 GHz にわたる．図 1 は，国立天文台野辺山宇宙電波観測所の直径 45 m の電波望遠鏡を使い観測した，NGC 2264 CMM3 とオリオン KL と呼ばれる星形成領域のスペクトルである（Watanabe et al., 2015）．2 つスペクトルを比較すると分子輝線のパターンが異なっており，2 つの天体の化学組成の違いを反映している．これらの分子輝線を解析しその存在量を求めることで，化学組成を調べることができる．

3. 分子雲の化学組成の測定方法

上記のスペクトル線サーベイ観測の手法を使うことで分子雲の化学組成も同様に調べることができる．分子雲は近傍の銀河や我々の天の川銀河にあるため，我々は両

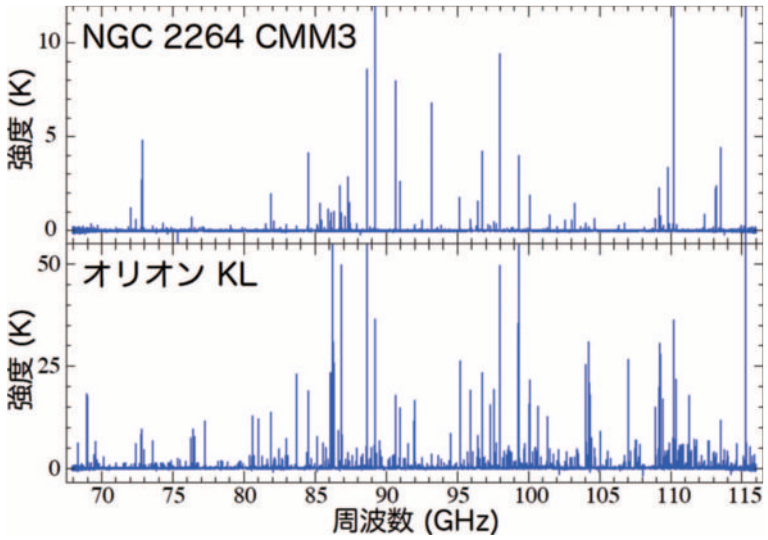

図 1：国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡を使い観測した，星形成領域 NGC 2263 CMM3 とオリオン KL のスペクトル．これらの天体はともに大質量星が形成されている領域であるが，分子輝線のパターンが異なっている．その理由として，NGC 2263 CMM3 がオリオン KL と比較して，まだ若い進化段階にあることが考えられる．Watanabe et al.（2015）を改変（著作権：2015 American Astronomical Society）．

方の銀河の分子雲を対象に観測し，化学組成を比較した．

分子雲の大きさは典型的に数十光年程度と巨大である．しかし，近傍の銀河は距離が数 100 万光年と遠くにあるため，近傍の銀河ではその見かけの大きさが望遠鏡の空間分解能と比較して 10 分の 1 以下と非常に小さくなる．そのため，銀河の 1 点のみを観測すれば，分子雲の化学組成を調べることができる．ただし，天体が遠くにあるということは，そこから放射される分子輝線の強度は弱くなる．そのため，その微弱な分子輝線を検出するには高い感度の観測が要求されるため，長時間の観測が必要になる．

一方，天の川銀河の分子雲は地球からの距離が数 100 から数 1000 光年であり，近傍銀河と比較して距離が非常に近い．そのため，近傍銀河の観測と比較すると，分子輝線を検出するために高い感度の観測は必要ない．しかし，距離が近いため分子雲は見かけの上で広がっており，分子雲全体を捉えるためには広い面積を観測する必要がある．したがって，天の川銀河の分子雲を観測する場合も，比較的長い時間の観測が必要になる．

以上のように，分子雲の化学組成を調べるためには，近傍銀河でも天の川銀河でも，長時間の粘り強い観測が必要である．しかし，近年の観測技術の向上により，感度の高い受信機と一度に観測できる周波数帯域の広い分光計が利用できるようになり，上記の観測が現実的に可能になった．特に，スペクトル線サーベイ観測では広い周波数範囲を観測するため，一度に観測できる周波数帯域が広くなったことが観測効率を大きく上昇させた．

4. 近傍銀河の分子雲の化学組成

近傍銀河の分子雲の化学組成を調べるために，M51（図 2）をスペインのベレッタ山（標高 2,850 m）にある IRAM 30 m 望遠鏡を使い観測した（Watanabe et al., 2014）．望遠鏡の空間分解能は M51 の距離（約 2700 万光年）の距離で約 3300 光年に相当するので，観測領域の中には数 10 個の分子雲が存在すると考えられる．この観測では異なる領域の化学組成を比較するために，図 2 の 2 つの丸の領域（領域 A と領域 B）を観測した．図 3 が観測で得られたスペクトルである．領域 A と B で，それぞれ 13 種類と 11 種類の分子を検出した．

それぞれのスペクトルを比較すると分子輝線の強度は領域 A の方が強く，分子の量は領域 A の方が多いと考えられる．しかし，分子輝線のパターンを比較すると非常によく似ている．分子輝線の強度は分子の存在量に比例するので，そのパターンが似ているということは化学組成も似ていることを意味する．実際，図 4 に示すように化学組成がほぼ一致している．ここで，図 5 では，分子の量ではなく，分子の組成を比較するために，観測領域内に存在する水素分子（H_2）の量で規格化して比較している．

領域 A と B の化学組成がよく似ているという結果は意外な結果であった．それは，領域 A では領域 B よりも活発に大質量星が形成されており，大質量星から放射される紫外線などの影響を受けて化学組成が異なることを期待していたからである．IRAM 30 m 望遠鏡の空間

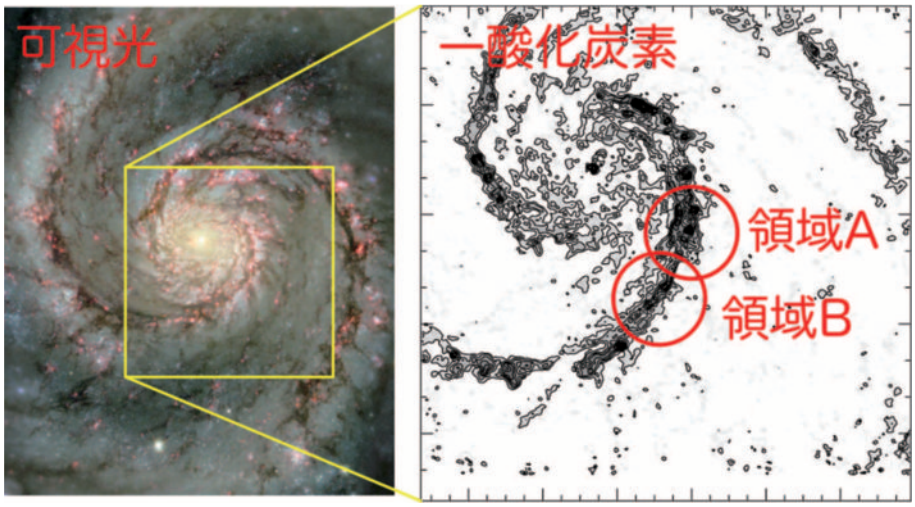

図 2：近傍銀河 M51 の可視光画像（左）と一酸化炭素の分布（右）．可視光画像の黄色の枠線は一酸化炭素の画像の範囲を示す．一酸化炭素の画像の赤丸が IRAM 30 m 望遠鏡で観測した領域を示す．可視光画像はハッブル宇宙望遠鏡により観測されたものである（http://heritage.stsci.edu/gallery/galindex.html）．一酸化炭素分子は，フランスの PdBI 電波干渉計によって観測されたものであり（Schinnerer et al., 2013 の観測データをもとに図を作成），一酸化炭素の分布は分子ガスの分布とほぼ一致する．

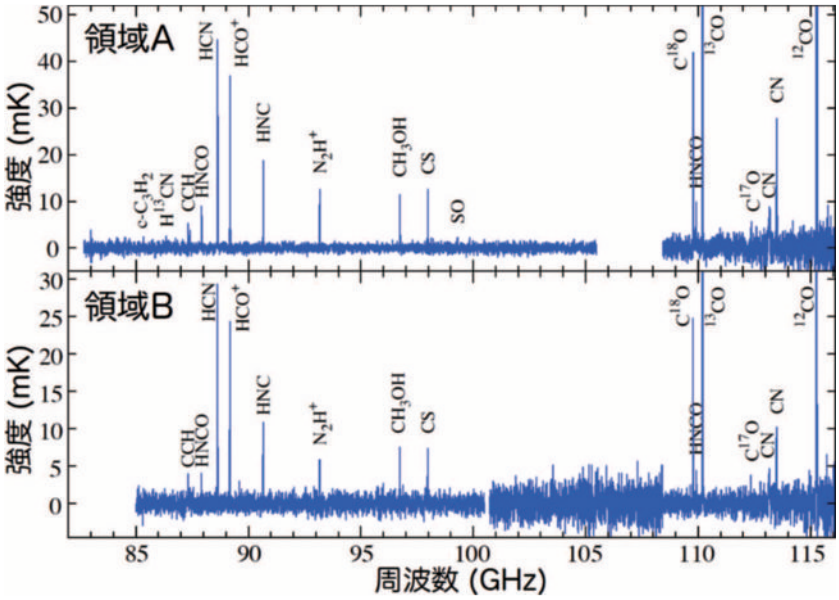

図 3：IRAM 30 m 望遠鏡で観測した，M51 の領域 A（上）と領域 B（下）のスペクトル．Watanabe et al.,（2014）を改変（著作権：2014 American Astronomical Society）．

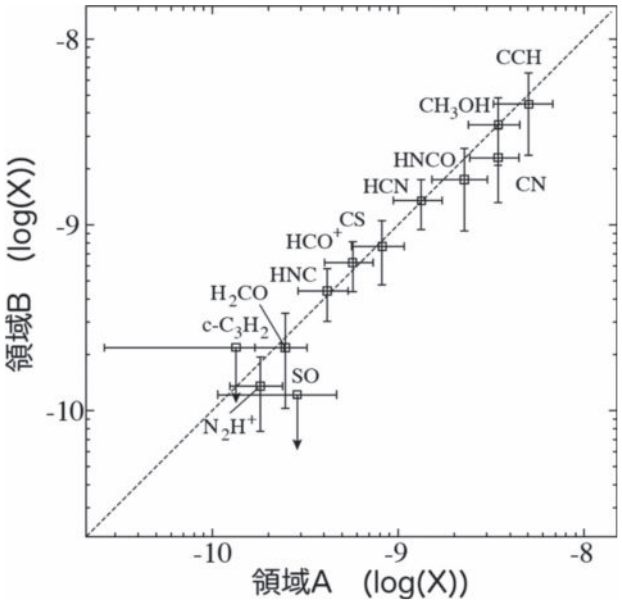

図 4：M51 の領域 A と領域 B の様々な分子の存在量を比較した図．X は水素分子（H_2）に対する存在量である．Watanabe et al.,（2014）を改変（著作権：2014 American Astronomical Society）．

分解能は分子雲の大きさと比較して 10 倍以上大きいため，観測領域内部には多くの分子雲が存在する．その結果，それらを平均した化学組成が観測されているため，大質量星の影響を受けた分子雲の化学組成はそれ以外の分子雲の化学組成により平均されて，違いが見られない可能性が考えられる．しかし，アメリカ合衆国カリフォルニア州にある CARMA 電波干渉計を使い空間分解能を約 4 倍上げた観測でも同様の結果が得られている（Watanabe et al., 2016）．さらに，IRAM 30 m 望遠鏡や野辺山 45 m 望遠鏡を使い，別の銀河 NGC 3627 についてスペクトル線サーベイ観測をした結果，やはり同様であった（Watanabe et al., 2019）．これらのことから，分子雲の化学組成は内部あるいは周囲の大質量星からの紫外線に大きく影響されないことがわかった．さらに，M51 と NGC 3627 の化学組成も互いによく似ていた．これらの天体においては，重元素量（炭素より重い元素の水素に対する存在量比）が同程度であることが知られている．上記の結果は，重元素量が大きく違わない限り，近傍銀河では分子雲の化学組成はかなり一様に近いことを示唆する．

5. 天の川銀河の分子雲の化学組成

次に，太陽系が属する天の川銀河にある分子雲の化学組成を調べるために，W51 分子雲をオーストラリアにある Mopra 22 m 望遠鏡を使い観測した（Watanabe et al., 2017）．先ほど述べたように天の川銀河の分子雲は近傍銀河と比較して近くにあり，見かけの大きさが大きく Mopra 22 m 望遠鏡の空間分解能では分子雲の一部しか観測できない．そのため，望遠鏡を動かしながら分子雲内の全ての場所を観測し，スペクトルを取得する必要がある．そして，取得したすべてのスペクトルを平均することにより，1 個の分子雲全体としてのスペクトルを再

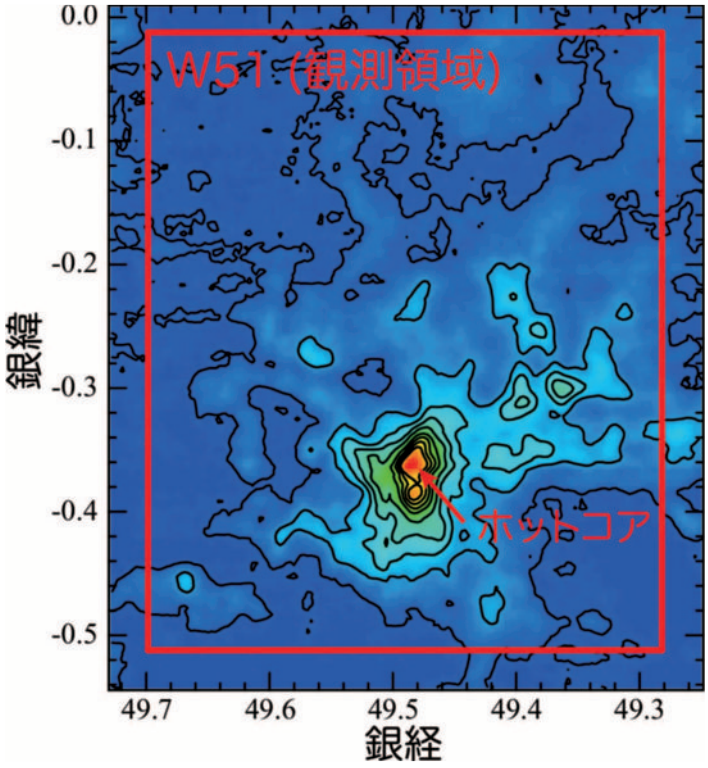

図 5：天の川銀河の分子雲 W51 の一酸化炭素の画像（Bieging et al., 2010 の観測データをもとに図を作成）．赤枠は Mopra 22 m 望遠鏡で観測した範囲を示す．赤矢印はホットコアの位置である．

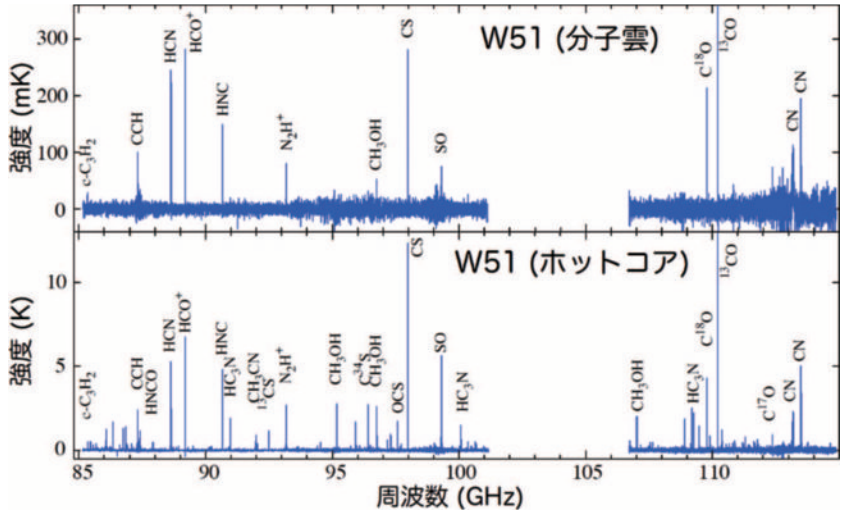

図 6：Mopra 22 m 望遠鏡で観測した W51 全体を平均したスペクトル（上）と W51 のホットコアのスペクトル（下）．Watanabe et al. (2017) を改変（著作権：2017 American Astronomical Society）．

現することができる．

図 5 は W51 の一酸化炭素の分布であり，赤枠で囲った領域を Mopra 22 m 望遠鏡を使い観測した．図 6 は，観測によって得られたスペクトルを全て平均した，W51 の分子雲のスペクトルである．この観測では，12 種類の分子を検出した．検出した分子の種類は，M51 の観測で検出された分子の種類とほぼ同一である．

図 6 の下のスペクトルは，W51 の中でホットコアと呼ばれる星形成領域の中心部のみを取り出したスペクトルである．ホットコアでは 31 種類もの分子が検出されている．これはホットコアが分子雲の中でも特に密度が高く，星が形成されつつある領域であり，様々な分子が大

量に形成されているためである．しかし，このようなホットコアが存在するのは分子雲の中でもごく小さな限られた領域のみであり，この分子輝線のパターンが示す化学組成は分子雲を代表するものではない．実際，図 6 の上のスペクトルが示すように，分子雲全体で平均するとホットコアで検出された分子輝線の多くが見えなくなるため，これらの分子は分子雲全体では存在量が少ないと考えられる．また，密度が高い領域がどの程度平均したスペクトルへ寄与するのか見積もると，ほとんどの分子では 10%以下であった．つまり，分子雲の化学組成を代表する領域は，ホットコアなどの密度が高い領域ではなく，その周囲に広がった比較的密度が低い分子ガスの化学組成であることがわかった．

6. 天の川銀河と近傍銀河の化学組成の比較

近傍銀河 M51 のスペクトル（図 3）と銀河系の分子雲 W51 の平均スペクトル（図 6）を比較すると，分子輝線の強度パターンが非常によく似ている．W51 のスペクトルでは M51 のスペクトルと比較して，CS の強度が強く HNCO が弱い傾向が見られるが，それ以外のほとんどの分子の強度パターンは一致している．M51 の領域 A と W51 全体を平均したスペクトルの分子輝線の強度から各分子の存在量を推定し，比較したものが図 7 である．それぞれの分子の H_2 分子に対する存在量は良い相関を示しており，化学組成がよく似ていることがわかる．

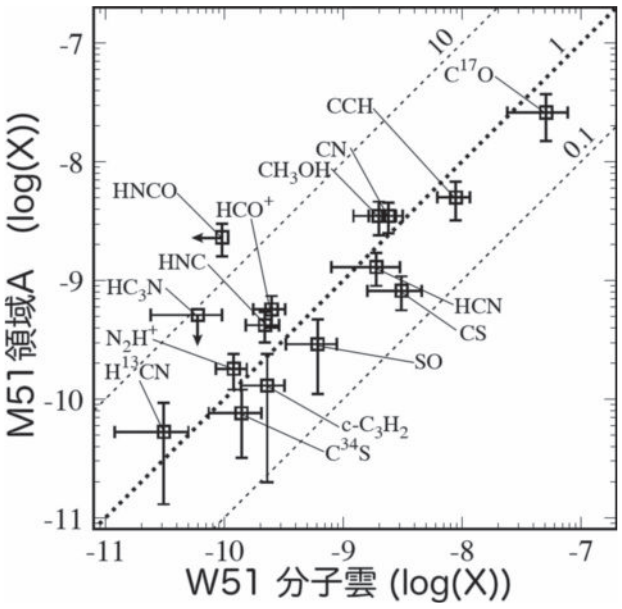

図 7：M51 の領域 A と分子雲 W51 の分子の存在量を比較した図．X は水素分子（H_2）に対する各分子の存在量である．Watanabe et al.（2017）を改変（著作権：2017 American Astronomical Society）．

さらに，我々は銀河系内の分子雲 W3OH についても，W51 の観測と同様に分子雲全体のスペクトルを平均して化学組成を調べた（Nishimura et al., 2017）．その結果は，W3OH でも W51 とほぼ同じ化学組成であった．

M51 の観測では望遠鏡の空間分解能が分子雲の大きさと比較して 10 倍以上大きいため，この観測で得られた化学組成は複数個の分子雲の化学組成を平均したものである．対して，W51 や W3OH の観測で得られた化学組成は 1 つの分子雲のみの化学組成である．これらの化学組成がほぼ一致しているということは，どの分子雲であってもその化学組成はほぼ同一であると考えられる．

7. 分子雲の化学組成が一様である理由

ではなぜ分子雲の化学組成はほぼ一様なのだろうか？その原因を探るために，原田らは，分子雲の中での化学反応のネットワークをコンピューターでシミュレーションし，どのような密度や温度で，化学反応が始まってどれくらいの時間が必要か推定した（Harada et al., 2019）．その結果，密度が 10^3 cm^{-3} で温度が 10 K を仮定したモデルが，観測で得られた分子輝線の強度パターンを最もよく再現することがわかった．この密度はホットコアの典型的な密度よりも低く，W51 の結果示された結果と矛盾がない．

一方で，最も観測をよく再現させるためには，化学反応が始まってからの経過時間が約 10^5 年であることも示された．これは，分子雲が形成されてからの年齢（およそ 10^6 年以上）と比べると若干短い時間であった．その理由は以下のように考えられる．分子雲は密度が一様なガスではなく，図 8 のように密度が高いクランプと希薄な部分からなっていると考えられる．星間空間には星が放つ紫外線が満ちており，その紫外線は分子雲の希薄な領域を透過し，クランプの表面に到達できる．紫外光は分子を破壊することができるため，クランプ表面に存在

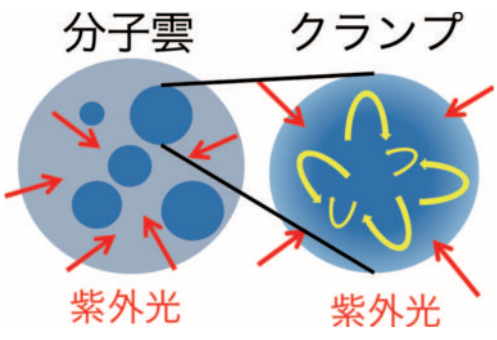

図 8：分子雲の構造（左）とクランプ（右）．赤矢印は紫外光を示す．クランプ内部の黄矢印は，乱流による分子ガスの運動を表現している．

する分子は破壊されて化学進化がリセットされる．クランプ内部のガスは乱流により絶えず内部を激しく運動している．この乱流によって分子雲の表面に現れた分子ガスは化学組成がリセットされて，再び分子雲内部に戻りその中で化学反応により再び様々な分子が形成される．このように分子の形成とリセットを繰り返しており，そのサイクルの典型的な時間が約 10^5 年ではないかと考えられる．

8. 元素組成と化学組成

上記のように天の川銀河や近傍銀河の分子雲，どちらでも同じような化学組成を持っていることが明らかになった．しかし，異なる化学組成を持つ分子雲の例もある．それは，炭素や窒素などの元素の組成（重元素量）が異なる銀河に存在する分子雲である．銀河系から最も近い（約 16 万光年）銀河である大マゼラン雲は，銀河系と比較して水素よりも重い元素（重元素）の存在量が半分程度である．特に，窒素の存在量は銀河系の 10 分の 1 程度しかない．西村らは大マゼラン雲のいくつかの分子雲に対して，Mopra 22m 望遠鏡を用いてスペクトル線サーベイ観測を行った（Nishimura et al., 2016a）．図 9 は，W51 と大マゼラン雲の分子雲 N159W の分子輝線の強度を比較したものである．相対的な強度パターンを比較するために，HCO^+ の強度で規格化している．図 9 は分子輝線の強度を比較しているが，図 4 や図 7 と同様に

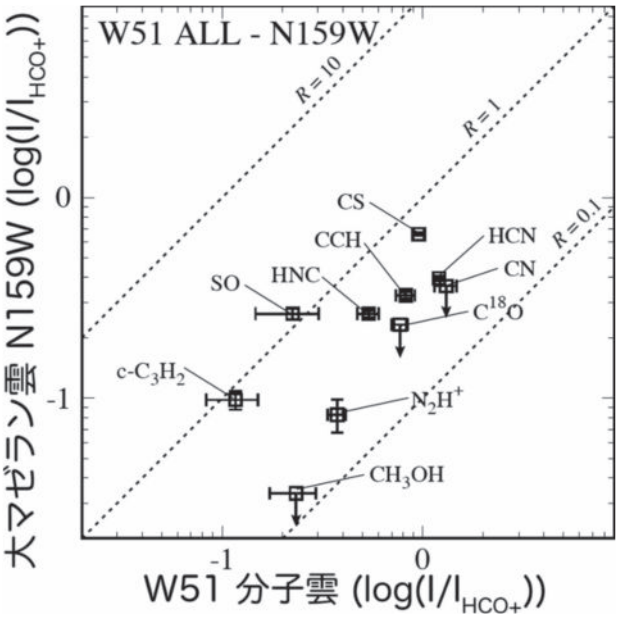

図 9：銀河系の分子雲 W51 と大マゼラン雲の分子雲 L159W の分子輝線の強度の比較．各分子輝線の強度 I は，HCO^+ のの輝線強度 I_{HCO+} で規格化した．Watanabe et al.（2017）を改変（著作権：2017 American Astronomical Society）．

各天体の化学組成そのものを反映している．大マゼラン雲では，窒素を含む HCN，HNC，N_2H^+，CN の存在量が低い傾向が見られる．また，大マゼラン雲の別の分子雲や，同じく重元素の組成が天の川銀河より小さい IC 10 という銀河でも同様に，窒素を含む分子の存在量が少ない（Nishimura et al., 2016b）．これらのことから，窒素を含む分子の存在量が少ない理由は，窒素原子の存在量が少ないためだと考えられる．このように，重元素量は化学組成に直接影響することもある．先ほどの近傍の銀河 M51 と天の川銀河の分子雲の化学組成がよく似ているのは，近い元素組成を持つことも重要な理由のひとつと考えられる．

9. 化学組成の多様性の起源

これまで説明してきたように，天の川銀河やそれと同じような元素組成を持つ銀河では，分子雲の化学組成が比較的均一であることが分かってきた．しかし，最初に述べたように，個々の星形成領域のスケールで化学組成を比較すると，多様性が見られる．では，どのようにして同じような化学組成を持つ分子ガスを材料にして，このような星形成領域の化学組成がもたらされたのだろうか？さらに，星形成領域に見られる化学組成の多様性が，原始惑星系にもたらされるのだろうか？これらを解明することが，現在の宇宙物理学における課題のひとつである．

参考文献

Bieging, J. H. et al. (2010), The Arizona Radio Observatory CO Mapping Survey of Galactic Molecular Clouds. I. The W51 Region in CO and ^{13}CO J = 2-1 Emission. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **191**, 232–246.

Harada, N. et al. (2019), Molecular-cloud-scale Chemical Composition. III. Constraints of Average Physical Properties through Chemical Models. *The Astrophysical Journal*, **871**, 238.

Müller, H. S. P. et al. (2001), The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS. *Astronomy and Astrophysics*, **370**, L49–L52.

Müller, H. S. P. et al. (2005), The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS: a useful tool for astronomers and spectroscopists. *Journal of Molecular Structure*, **742**, 215–227.

Nishimura, Y. et al. (2016a), Spectral Line Survey toward Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud. *The Astrophysical Journal*, **818**, 161.

Nishimura, Y. et al. (2016b), Spectral Line Survey toward a Molecular Cloud in IC10. *The Astrophysical Journal*, **829**, 94.

Nishimura, Y. et al. (2017), Molecular-cloud-scale Chemical Composition. II. Mapping Spectral Line Survey toward W3 (OH) in the 3 mm Band. *The Astrophysical Journal*, **848**, 17.

Sakai, N. and Yamamoto, S., (2013), Warm Carbon-Chain Chemistry. *Chemical Reviews*, **113**, 8981–9015.

Schinnerer, E. et al. (2013), The PdBI Arcsecond Whirlpool Survey (PAWS). I. A Cloud-scale/Multi-wavelength View of the Interstellar Medium in a Grand-design Spiral Galaxy. *The Astrophysical Journal*, **779**, 42.

Watanabe, Y. et al. (2014), Spectral Line Survey toward the Spiral Arm of M51 in the 3 and 2 mm Bands. *The Astrophysical Journal*, **788**, 4.

Watanabe, Y. et al. (2015), Spectral Line Survey toward the Young Massive Protostar NGC 2264 CMM3 in the 4 mm, 3 mm, and 0.8 mm Bands. *The Astrophysical Journal*, **809**, 162.

Watanabe, Y. et al. (2016), Molecular Distribution in the Spiral Arm of M51. *The Astrophysical Journal*, **819**, 144.

Watanabe, Y. et al. (2017), Molecular-cloud-scale Chemical Composition. I. A Mapping Spectral Line Survey toward W51 in the 3 mm Band. *The Astrophysical Journal*, **845**, 116.

Watanabe, Y. et al. (2019), A 3 mm Spectral Line Survey toward the Barred Spiral Galaxy NGC 3627. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **242**, 26.