
東京学芸大学リポジトリ
Tokyo Gakugei University Repository

おうし座分子雲に付随する冷たい中性水素原子ガスの測定

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2010-05-12 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 土橋,一仁, 江草,芙実 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2309/107117

東京学芸大学紀要　自然科学系　61: 73－79，2009.

おうし座分子雲に付随する冷たい中性水素原子ガスの測定

土　橋　一　仁*・江　草　芙　実*，**

宇宙地球科学分野

（2009年5月20日受理）

DOBASHI, K. and EGUSA, F.: Measurement of cold HI gas associated with molecular clouds in Taurus. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Division of Natur. Sci., 61: 73–79. (2009) ISSN 1880–4330

Abstract

In this paper, we report results of an attempt to quantify cold HI gas contained in molecular clouds in Taurus on the basis of the all-sky survey of λ21–cm emission from Galactic neutral hydrogen (Kalberla et al. 2005). The cold HI gas associated with the molecular clouds can be recognized as an absorption or emission line in the 21–cm spectra observed toward the Taurus region at the same radial velocity as the CO(J=1–0) emission line (Dame et al. 1987, 2001). Utilizing the absorption and the emission lines originating from the cold HI gas, we have developed a new method to determine its spin temperature T_S. Application of the method to the 21–cm data indicates that T_S is likely to vary in the range $23 < T_S < 68$ K over the Taurus region. An average column density of the cold HI gas in Taurus is inferred to be $N[H]=3\sim4\times10^{20}$ cm^{-2} which corresponds to ~10% of the total H_2 mass traced in CO.

Key words: molecular clouds, HI 21cm line, cold HI gas

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨： 本研究では，中性水素原子（HI）ガスが放射する21cm線の全天データ（Kalberla et al. 2005）を利用して，おうし座分子雲に付随する冷たいHIガスの定量を試みた。おうし座分子雲の方向で観測される21cm線のスペクトルには，冷たいHIガスによるものと考えられる吸収線や輝線がCO（J=1–0）分子輝線（Dame et al. 1987, 2001）と同じ速度に見られる。我々は，吸収線・輝線の両者の特徴を利用することにより，冷たいHIガスのスピン温度T_Sを推定する方法を考案した。この方法を用いることにより，おうし座分子雲に付随する冷たいHIガスのT_Sは$23 < T_S < 68$ Kの範囲にあること，及び，その平均的な柱密度は$N[H]=3\sim4\times10^{20}$ cm^{-2}程度であることが分かった。これは，CO分子輝線の積分強度から推定される同分子雲の水素分子の柱密度の約10%に相当する。つまり，おうし座分子雲の全ガスの質量のうち，1割程度を冷たいHIガスが占めているものと考えられる。

＊　東京学芸大学（184–8501　小金井市貫井北町 4–1–1）
＊＊　California Institute of Technology（MS 249–17 Pasadena, CA 91125, USA）

1．はじめに

分子雲の主成分は水素分子（H_2）ガスであるが，水素原子（HI）ガスも分子雲内に存在する。分子雲の背景に明るい光源（連続波源や輝線スペクトル）がある場合，分子雲に付随するHIガスは中性水素原子が放射する波長21cmの輝線（以後単に21cm線という）の吸収線として観測される。実際，このような吸収線は，W3・W4領域（Hasegawa et al., 1983），W5領域（Sato, 1990），M17SW領域（Sato et al., 1982）の分子雲や，銀河中心方向にある分子雲（McClure-Griffiths et al., 2006）などで広く検出されている。このようなHIガスは光学的に厚く（$\tau > 1$），$T_S = 30 \sim 60$ Kという低いスピン温度をもち，分子雲の全面にわたって分布していることが知られている。以後，この論文では，このようなガスのことを「冷たいHIガス」と呼ぶ。

銀河面（銀緯＝0° 付近）にある分子雲の場合，分子雲の背景からは強烈な連続波や，明るく速度幅の広い21cm線が放射されているので，速度幅の狭い吸収線として現れる冷たいHIガスを検出・定量することは比較的容易である。上に例として挙げたW3・W4領域や銀河中心方向の分子雲などの一連の研究は，このような場合に相当する。しかし，太陽系近傍の多くの分子雲は背景からの放射が微弱な高銀緯にある。このため，このような分子雲については，冷たいHIガスに起因する吸収線はなかなか検出されない。検出される場合でも，限られた速度幅をもつ背景からの微弱な21cm線の中の広い切れ込み（あるいは窪み）として観測されるため，冷たいHIガスのスピン温度や柱密度を高い精度で定量することは困難である（例えば，佐藤ほか2002）。

星形成領域として有名なおうし座（Taurus），へび遣い座（Ophiuchus），オリオン座（Orion）などの高銀緯にある分子雲については，一酸化炭素分子（CO）やその同位体（^{13}CO・$C^{18}O$）の低い回転遷移による分子輝線を用いた観測がここ20年ほどの間に盛んに行われ，内部のH_2ガスの密度・温度・総質量等に関する理解がかなり進んでいる。一方，H_2ガスのもとになるHIガスについての定量的な理解は，その測定の難しさ故にあまり進んでいない。よく研究されている太陽系近傍の分子雲でのHIガスの測定方法を確立することは，希薄な原子雲（HI雲）から濃密な分子雲の形成過程をモデル化する上で極めて重要な課題である（例えば，McClure-Griffiths et al., 2006）。また，水素原子の総柱密度をトレースするガンマ線放射を用いた最近の研究（Grenier et al., 2005）によると，星間空間には21cm線やCO分子輝線では十分に検出されない未知のガス成分が多量に存在し，その質量は銀河系内のCOで検出される分子ガスの30%以上にもなることが示唆されている。同様のガス成分は，大マゼラン銀河内でも多量に存在することが判明しつつある（Bernard et al., 2008; Dobashi et al., 2008）。分子雲に付随する冷たいHIガスは未知のガス成分の正体として極めて有望であるが，実際のその寄与を確かめるためには冷たいHIガスをより高い精度で定量する必要がある。

本論文では，おうし座の分子雲に付随する冷たいHIガスの定量を試みる。同分子雲の一部には，背景からの21cm線の中に冷たいHIガスと思われる吸収線が見られるが，別の一部には冷たいHIガスからの放射と考えられる輝線も確認することができる。吸収線と輝線の両方を利用すれば，冷たいHIガスのスピン温度の範囲に制限を付けることが可能となり，ガスの柱密度をより高い精度で推定することができる。本論文で用いるデータについては，第2章で述べる。第3章では，おうし座領域における21cm線の吸収線と輝線の分布について述べ，冷たいHIガスを定量する。さらに，CO分子輝線の強度から推定されるH_2ガスとの比についても調べる。本論文の結論を，第4章にまとめる。

2．使用データ

本研究では，Kalberla et al.（2005）によってまとめられた21cm線の全天データを用いる。これは，北天（Leiden/Dwingloo Survey, Hartmann & Burton, 1997）と南天（Instituto Argentino de Radioastronomia Survey, Arnal et al. 2000; Bajaja et al., 2005）の21cm線サーベイを統合したデータベースであり，全天空を0.5° のグリッド，0.6° の角分解能で網羅している。カバーされている速度範囲は$-450 < V_{LSR} < 450$ km s^{-1}であり，ノイズレベルは速度分解能1.3 km s^{-1}に対して0.07 ～ 0.08 Kである。我々はこのデータからおうし座領域を包括する銀経$155° < \ell < 180°$，銀緯$-25° < b < -5°$の範囲の3次元データ（銀経・銀緯・速度）を切り出し，使用した。

また，分子ガスとの比較のために，Dame et al.（1987, 2001）によるCO(J=1-0) 分子輝線の全天サーベイのデータも使用した。このデータは，コロンビア大学（米国）とセロ・トロロ天文台（チリ）に設置した口径1.2 mの2台の電波望遠鏡（角分解能8.5’）によって取得されたデータを繋ぎ合わせたものであり，銀緯の絶対値で$|b| = 10 \sim 20°$程度以下の領域をカバーしている。データの速度範囲やノイズレベルは，天空の領域によって異なる。特に，1987年に発表されたデータは，角分解能を0.5° に，また速度分解能を1.3 km s^{-1}に焼き直したものであり，21cm線データとの比較に都合がよい。我々は，この

1987年に発表されたCOデータから，上記の21 cm線のデータと同じ銀河座標の範囲の3次元データを切り出し，使用した。

3．おうし座分子雲に付随する冷たいHIガス

3．1　冷たいHIガスの分布

図1に，おうし座領域の21cm線の積分強度図（カラースケール）とCO(J=1–0) 分子輝線の積分強度図（コントア）を示す。銀河面から離れた銀緯 $b < -10°$ の領域を見ると，21cm線の分布には銀経 $175° < \ell < 180°$ と $155° < \ell < 160°$ の範囲で銀緯の負の方向（図の下方）に伸びた放射強度の強い円弧状の構造があり，その中間には放射強度の弱い領域が存在する。このシェルのような構造の成因は明らかではないが，CO分子輝線でトレースされる濃密な分子雲のうちTMC1の名称で知られる部分は21cm線の放射強度の強い領域に，またL1498の名称で知られる部分は放射強度の弱い領域に位置している。

図2に，TMC1及びL1498の方向（図1の黄色の丸印）で観測された21cm線（図2の上段の赤の実線）とCO分子輝線（黒い実線）のプロファイルを示す。TMC1方向では21cm線のスペクトルに2つのピークがあり，その間に「谷」が確認できる（図2a)。この2つのピークは，別々の速度をもつ2つの独立したHIガスが視線方向上に偶然重なることにより形成されたものか，あるいは分子雲に付随する冷たいHIガスによる吸収により形成されたものであると考えられる。CO分子輝線のピーク速度が21cm線の谷の最下点の速度に一致することから，この2つのピークの間の谷は，冷たいHIガスによる21cm線の吸収によって形成されたものである可能性が高いと考えられる。このような吸収線はTMC1周辺で広く見られる。明らかな吸収線が確認できる場所を，図1中に黒丸で示す。

一方，L1498方向のプロファイル（図2b）には，CO分子輝線と同じ速度に周囲より盛り上がった「山」の部分が見られる。おそらく，これは分子雲に付随する冷たいHIガスからの放射であると考えられる。このようにCOと同じ速度に明らかな山（輝線）が確認できる場所を，図1中に赤丸で示す。

なお，銀緯 $b > -10°$ の銀河面に近い領域では，21cm線やCO分子輝線は複雑な速度構造をしており，21cm線に谷や山があっても，それがCO分子輝線と速度的に対応しているか否かは，容易に判別することはできない。よって，この論文では，銀緯 $b < -10°$ の領域のうち冷たいHIガスによる明らかな吸収線や輝線が確認できる部分（図1の黒丸と赤丸）についてのみ解析を行う。

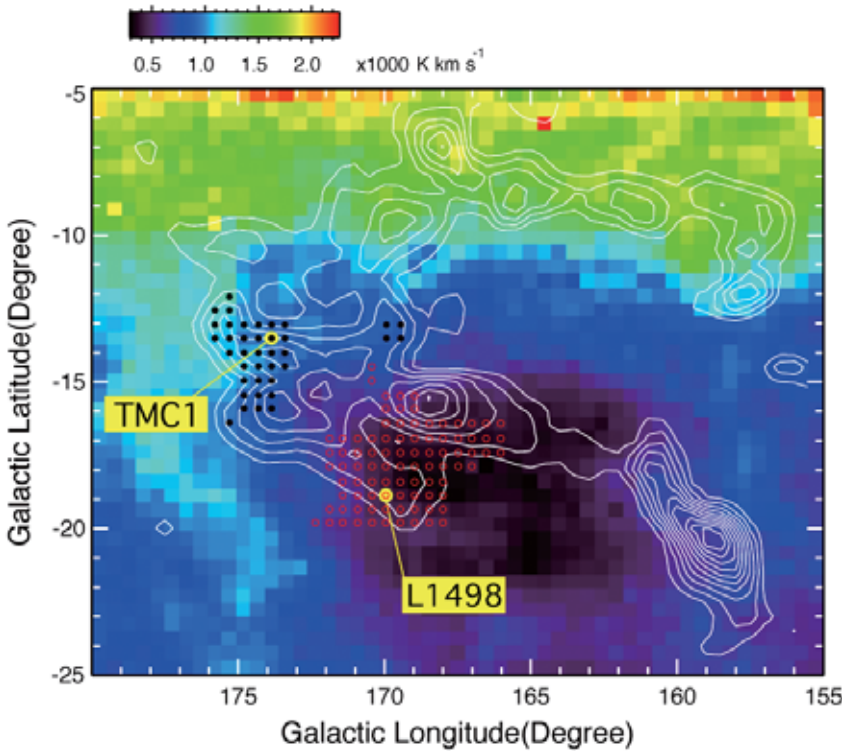


図1　HI 21cm線（カラースケール）とCO(J=1–0) 分子輝線（白のコントア）の積分強度図。積分した速度範囲は，HI 21cm線が $-100<V_{LSR}<100$ km s^{-1}，CO分子輝線が $-10<V_{LSR}<10$ km s^{-1} である。白のコントアは，5 K km s^{-1} から2.5 K km s^{-1} 毎。黒丸は冷たいHIガスが吸収線として観測される場所であり，赤丸は輝線（放射）として観測される場所である。黄色の丸は，TMC1およびL1498の位置である。

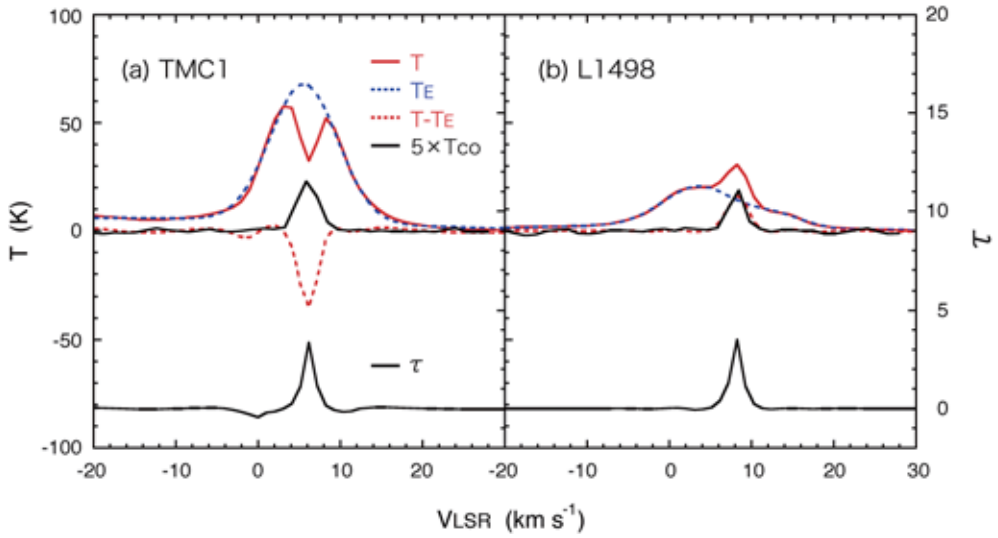


図2　上段は，HI 21cm線の実測プロファイルT（赤の実線），背景放射T_E（青の破線），及びその差$T-T_E$（赤の破線）。参考までにCO(J=1–0)分子輝線を 5 倍したプロファイルも示す（黒の実線）。下段の黒の実線は，スピン温度T_S= 35 Kを仮定した場合のHI 21cm線の光学的厚さ τ である。(a)はTMC1，(b)はL1498で取得されたデータである。

3．2　TMC1及びL1498方向のデータの解析

図1の黒丸・赤丸の分布から分かるように，冷たいHIガスによる吸収線と輝線は，それぞれ21cm線の積分強度が強い場所と弱い場所でのみ見られる。また，吸収線の場合にも輝線の場合にも，CO分子輝線のピーク速度での21cm線の輝度は多くの場所で30～40 Kである（図2）。これらの事実に留意すると，分子雲とそれに付随する冷たいHIガスについて，次の2点が強く示唆される。

(1) 分子雲に付随するHIガスは光学的に厚く，そのスピン温度は30～40 K程度である。

(2) 図1の積分強度図に示した21cm線の成分のほとんどは，分子雲の背景からの放射である。

以上より，我々は図3に示すようなモデルを仮定して，冷たいHIガスの定量を行うことにする。すなわち，冷たいHIガスを含む暗黒星雲の背景に広がったHIガスがあり，さらにその背景に連続波源があるものとする。連続波源の輝度温度をT_C，分子雲に付随した冷たいHIガスのスピン温度及び光学的厚さをそれぞれT_S及び τ とすると，分子雲方向で観測される輝度温度Tは，以下のようになる（例えば，佐藤ほか2002）。

$$T = e^{-\tau}T_E + (1 - e^{-\tau})(T_S - T_C) \qquad \text{式1}$$

ここで，T_Eは冷たいHIガスが存在しない場合（$\tau = 0$）

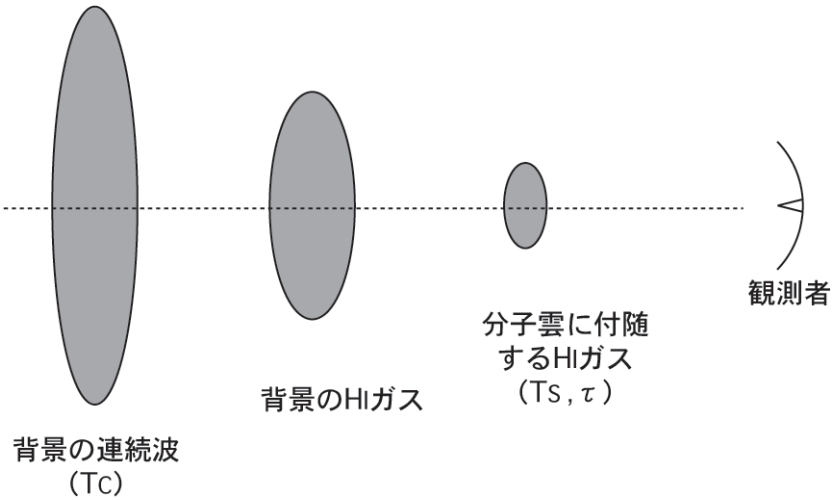


図3　冷たいHIガスの分布モデル

に観測されることが期待される輝度温度である。また，T，T_E，及びτは速度 v の関数である。

式 1 中のパラメータのうち直接観測可能な量は T と T_C である。TMC1 や L1498 付近の波長 21 cm（1.42 GHz）帯での T_C は，約 3.8 K であることが分かっている（Reich 1982）。T_E については，直接観測することはできない。そこで我々は，冷たい HI ガスによる吸収線や輝線が見られない速度範囲で T を 3 成分のガウス関数でフィットすることにより，TMC1 及び L1498 方向の T_E を推定することにした。得られた T_E を図 2 に示す（青の破線）。

T_S を何らかの方法で推定することができれば，式 1 より τ も推定することができる。式 1 を τ について解くと，以下のようになる。

$$\tau(v) = -\ln\left(\frac{T(v) - T_S + T_C}{T_E(v) - T_S + T_C}\right) \qquad \text{式 2}$$

ここで，τ が下記のようにガウス関数の形をしていると仮定する。

$$\tau(v) = \tau_0 e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{v-v_0}{\sigma}\right)^2} \qquad \text{式 3}$$

この式で，速度分散 σ は $\tau(v)$ の半値幅 ΔV と，

$$\Delta V = \sigma\sqrt{8\ln 2} \qquad \text{式 4}$$

という関係にある。この ΔV と式 3 の τ_0 を使えば，冷たい HI ガスの柱密度 N[H] は，

$$N[H] = X_{HI} T_S \int \tau(v) dv \approx X_{HI} T_S \tau_0 \Delta V \qquad \text{式 5}$$

と表すことができる。ここで X_{HI} は定数で，

$$X_{HI} = 1.8224 \times 10^{18} \quad (\mathrm{K\ km\ s^{-1}})^{-1}\ \mathrm{cm^{-2}} \qquad \text{式 6}$$

である。（例えば，赤羽ほか 1988）。

我々は TMC1 および L1498 のデータについて，τ_0，ΔV，及び N[H] が T_S の関数としてどのように変化するか調べた。すなわち，様々な T_S の値に対して式 2 より τ を計算し（図 2 の下段），これをガウス関数でフィットすることにより τ_0 と ΔV を求め，さらに式 5 より N[H] を計算した。得られた結果を図 4 に示す。冷たい HI ガスが吸収線として観測される TMC1 では，N[H] は T_S に強く依存し，T_S = 36.2 K 付近で無限大へと発散する。一方，冷たい HI ガスが輝線として観測される L1498 では，N[H] は T_S = 34.5 K 付近で無限大へ発散するものの，それよりも高い温度では T_S にあまり依存しない。もし TMC1 と L1498 での冷たい HI ガスの物理量（T_S や N[H]）が同程度であるとすると，T_S は 35 K 程度，τ_0 は 3 ～ 4 程度の値をもつものと考えられる。仮に，T_S=35 K を仮定した場合の τ_0 と N[H] を，表 1 に示す。参考までに，同じ場所で観測された CO(J=1−0) 分子輝線の積分強度から推定される H_2 ガスの柱密度（水素原子の柱密度に換算した値；Egusa & Dobashi 2009）も，表に並記する。

3．3　冷たい HI ガスのスピン温度と柱密度の推定

おうし座分子雲に付随する冷たい HI ガスの T_S は，おうし座分子雲全体ではどの程度の値を取るのであろう。式 2 に注目すると，TMC1 のように冷たい HI ガスが吸収線（$T < T_E$）として観測される場合，τ に現実的な解（$\tau > 0$）を与える T_S には上限（T_S^{UP}）が存在することが分かる。また，L1498 のように HI ガスが輝線（$T > T_E$）として観測される場合，T_S には下限（T_S^{LOW}）が存在することが分かる。これらの上限・下限は，

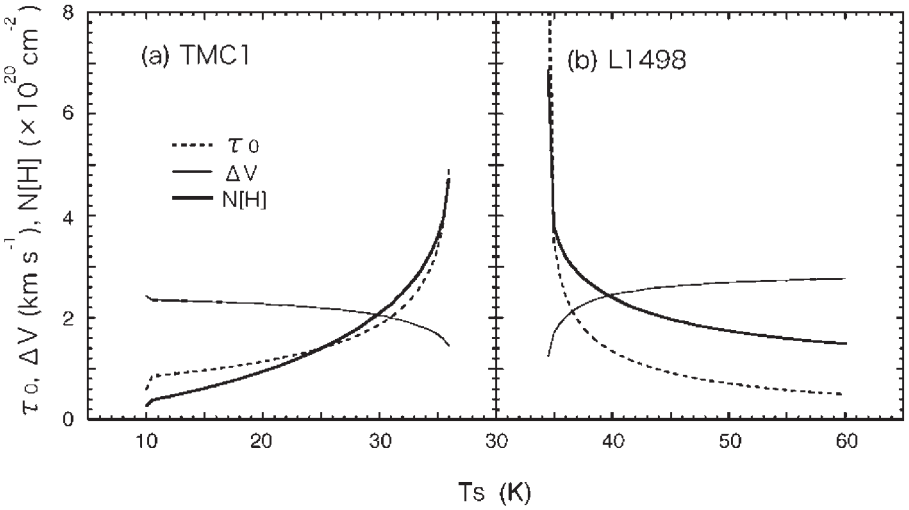


図 4　式 3 の光学的厚さ τ_0，式 4 の速度幅 ΔV，及び式 5 の水素原子柱密度 N[H] のスピン温度 T_S に対する変化。(a) は TMC1，(b) は L1498 のデータ。

表1　TMC1及びL1498方向の冷たいHIガスの柱密度

位置	銀経 ℓ（度）	銀緯b（度）	T_S^{LOW} ／ T_S^{UP} の範囲	τ_0	N[H] (10^{20} cm^{-2})	2XcoWco (10^{20} cm^{-2})
TMC1	174.0	−13.5	T_S^{UP} = 36.2 K	3.36	3.6	64.0
L1498	170.0	−19.0	T_S^{LOW} = 34.5 K	3.49	3.8	41.2

注：表中の冷たいHIガスの柱密度N[H]は，T_S = 35 Kを仮定した場合の値。CO分子輝線の積分強度Wcoと水素分子柱密度の比Xcoは，おうし座分子雲についてEgusa & Dobashi（2009）によって測定された値2.06×10^{20} (K km s^{-1})$^{-1}$ cm^{-2}を用いた。

$$T_S^{UP} = T + T_C \qquad \text{式7}$$

$$T_S^{LOW} = T_E + T_C \qquad \text{式8}$$

である。

冷たいHIガスが吸収線として検出された全ての場所（図1の黒丸）についてT_S^{UP}を計算したところ，T_S^{UP}は$36 < T_S^{UP} < 68$ Kの範囲にあることが分かった。同様に，冷たいHIガスが輝線として検出された場所（赤丸）についてT_S^{LOW}を計算したところ，T_S^{LOW}は$23 < T_S^{LOW} < 54$ Kの範囲にあることが分かった。よって，冷たいHIガスのT_Sが図1の黒丸の部分でも赤丸の部分でも同じ程度であるとすると，T_Sは$23 < T_S < 68$ Kの範囲にあるものと考えられる。

我々は，冷たいHIガスが確認できた全ての観測点について，3.2節で述べた方法を用いてN[H]を計算した。その際，冷たいHIガスが吸収線として見られる観測点では，T_S =23 K（一定）を仮定して計算した値をN[H]の見積りの最小値とし，各観測点で上限よりも1 Kだけ低い$T_S = T_S^{UP} - 1$ Kを仮定して計算した値をN[H]の見積りの最大値とした。同様に，冷たいHIガスが輝線で見られる観測点では，一律T_S = 68 Kを仮定した値をN[H]の見積りの最小値とし，各観測点で$T_S = T_S^{LOW} + 1$ Kを仮定した値をN[H]の見積りの最大値とした。これらの見積りの最大値・最小値を冷たいHIガスが見られる領域全体で平均した値<N[H]>を，表2に示す。実際の<N[H]>は，これら最大値・最小値の平均値程度であると思われる。表2には，これらの平均値も示す。また，参考のために，CO分子輝線の積分強度から推定したH_2分子の柱密度も示す。

表2を見ると，おうし座分子雲全体で，<N[H]>は10^{20}–10^{21} cm^{-2}の範囲にあり，その平均は3～4 $\times10^{20}$ cm^{-2}である。これは，CO分子輝線から推定される水素分子の柱密度の概ね10%に相当する。つまり，分子雲に付随するガスの全質量の1割程度が，冷たいHIガスであると考えられる。

本論文で紹介したおうし座分子雲の他に，我々は，へび遣い座分子雲とオリオン座分子雲についても同様の解析を行った。これらの領域では，冷たいHIガスは吸収線としてのみ検出された。オリオン座分子雲内のL1641周辺などでは輝線として現れていると思われる観測点もあるが，残念ながら背景からのHI放射との分離は，おうし座の場合ほど容易ではない。そこで，これらの分子雲については吸収線の場合のみに特化した解析を行ったが，おうし座での結果（表2）を見ると，吸収線のみで解析した結果も輝線のみで解析した結果も，冷たいHIガスの定量という意味では大きな差はないものと考えられる。解析の結果，へび遣い座分子雲では，CO分子輝線の積分強度から推定される分子ガスの質量の約20%に相当する冷たいHIガスが存在することが分かった。この割合は，オリオン座分子雲ではさらに高く，約50%にも達する。おうし座との結果（約10%）と合わせて考えると，質量の大きな巨大分子雲ほど，分子雲の質量全体に占めるHIガスの割合が高いのかもしれない。銀河系内の星間分子

表2　分子ガスに対する冷たいHIガスの割合

領域	T_S^{LOW} ／ T_S^{UP} の範囲（K）	<N[H]> (10^{20} cm^{-2})	<2XcoWco> (10^{20} cm^{-2})	<N[H]> ／ <2XcoWco> (%)
吸収領域	$36 \le T_S^{UP} \le 68$	0.92–7.32 (4.12)	47.8	1.9–15.3 (8.6)
放射領域	$23 \le T_S^{LOW} \le 54$	1.80–4.15 (2.98)	33.2	5.4–12.5 (9.0)

注：冷たいHIが吸収線または輝線で観測される領域（図1）での冷たいHIガスの柱密度N[H]と，CO(J=1–0)分子輝線から推定した分子ガスに対する割合の最小値－最大値の見積り（括弧内の値は最大値・最小値の平均）。Xcoの値は表1と同じ。最小値の見積りは，吸収領域に対してはT_S = 23 Kの，放射領域に対しては68 Kの一様なスピン温度を仮定して求めた。最大値の見積りは，吸収線の場合には各点のT_Sの上限T_S^{UP}よりも1 Kだけ低い温度を仮定して求めた。輝線に対しては各点のT_Sの下限T_S^{LOW}よりも1 Kだけ高い温度を仮定して求めた。

雲の質量のほとんどはオリオン座分子雲のような巨大分子雲が占めている（例えば，Dobashi et al., 1996）。もしここで得られたオリオン座分子雲での測定値が銀河系内の分子雲の平均的な値であるとすると，冷たいHIガスは，HIガスとH_2ガスを合わせた分子雲の総質量の約1/3を占めることが予想される。

4．結　論

本研究では，中性水素21cm線の全天データ（Kalberla et al., 2005）を利用して，おうし座分子雲に付随する冷たいHIガスの検出・定量を試みた。本論文の主な結論を以下にまとめる。

(1) おうし座分子雲の21cm線のスペクトルには，CO(J=1−0)分子輝線と同じ速度に「谷」や「山」がしばしば見られた。また，谷は背景の21cm線強度が強い観測点でのみ，山は弱い観測点でのみ見られる。このことから，これらの山や谷はおうし座分子雲に付随する冷たいHIガスによる吸収線および輝線であると考えられる。

(2) 吸収線・輝線の両者の特徴を利用することにより，冷たいHIガスのスピン温度T_Sの範囲に制限を与える方法を考案した。その結果，おうし座分子雲では，T_Sは$23 < T_S < 68$ Kの範囲にあることが示唆された。

(3) おうし座分子雲の冷たいHIガスの平均的な柱密度は、$3 \sim 4 \times 10^{20}$ cm^{-2}であることが分かった。これは，CO分子輝線の積分強度から推定される水素分子の柱密度の10%に相当する。つまり，おうし座分子雲に付随するガスのうち質量的に1割程度が冷たいHIガスであると考えられる。

謝　辞

本研究の一部は，伊藤科学振興会（H19）及び山田科学振興財団（2008-1125）の資金的援助を受けて行いました。ここに感謝致します。

引用文献

Arnal, E. M., Bajaja, E., Larrarte, J. J., Morras, R., & Pöppel, W. G. L. 2000, Astronomy & Astrophysics Supplement Series, 142, 35

Bernard, J.−P., Reach, W. T., Paradis, D., Meixer, M., Paladini, R., Kawamura, A., et al. 2008, Astronomical Journal, 136, 919

Bajaja, E., Arnal, E. M., Larrarte, J. J., et al. 2005, Astronomy &Astrophysics, 440, 767

Dame, T. M., Ungerechts H., Cohen R.S., de Geus E., Grenier I.A., May J., Murphy D.C., Nyman L.A., & Thaddeus P. 1987, Astrophycial Journal, 322, 706

Dame, T. M., Hartmann, D., & Thaddeus, P. 2001, Astrophysical Journal, 547, 792

Dobashi, K., Bernard, J−P., & Fukui, Y. 1996, Astrophysical Journal, 466, 282

Dobashi, K., Bernard, J.−P., Hughes, A., Paradis, D., Reach, W. T., & Kawamura, A. 2008, Astronomy & Astrophysics, 484, 205

Egusa, F., & Dobashi, K. 2009, in preparation

Grenier, I. A., Casandjian, J.-M., & Terroer, R. 2005, Science, 307, 1292

Hartmann, D., & Burton, W. B. 1997, Atlas of Galactic Neutral Hydrogen (Cambridge University Press)

Hasegawa, T., Sato, F., & Fukui, Y. 1983, Astronomical Journal, 88, 658

Karberla, P. M., Burtom, W. B., Hartmann, D., Arnal, E. M., Bajaja, E., Morras, R., & Pöppel, W. G. L. 2005, Astronomy & Astrophysics, 440, 775

McClure−Griffiths, N. M, Dickey, J. M., Gaensler, B. M., Green, A. J., & Haverkorn, M. 2006, Astrophysical Journal, 652, 1339

Reich, W. 1982, Astronomy & Astrophysics Supplement Series, 48, 219

Sato, F. 1990, Astronomical Journal, 99, 1897

Sato, F., Whiteoak, J. B., & Otrupcek, R. E. 1992, Astronomical Journal, 103, 1627

赤羽賢司，海部宣男，田原博人　1988，宇宙電波天文学（共立出版株式会社），60

佐藤文男，土橋一仁，美宅玲子，E. M. Arnal，R. Morra　2002，東京学芸大学紀要，第4部門　数学・自然科学，54，131