

北海道大学低温科学研究所
技術部技術報告

第 18 号

2012年 12月

北海道大学低温科学研究所
技術部技術報告

第 18 号

2012年 12月

2012年度技術報告会開催に寄せて

みなさまのご協力を頂き、本日、第18回目の低温科学研究所技術報告会（教育研究支援本部共催）を迎えることができました。ここに御礼申し上げます。本報告会は技術部職員にとって一年の節目であり、多くの教員と議論を交わすことのできる重要な行事です。今回も力のこもった9件の発表が予定されています。いずれも技術部職員と教員・研究員・大学院生の努力の結晶です。実際には、まだ成果に表れていない研究にも技術部の貢献は多岐に渡り、低温研の研究アクティビティにとって技術部はなくてはならない存在になっています。

本年、低温科学研究所の自己点検評価報告書が作成されました。そこで明らかになったことは、2006年以降、低温研の研究業績が着実に向上していることです。これは、低温研研究者の研究形態を考えたとき、技術部の支援が長きに渡り継続的に行われてきたことと無関係ではありません。実際、低温研研究者の多くの原著論文で、技術部職員が共著者として名を連ねています。これは、研究に対する技術部の関わりが単なる支援に留まらず、研究の一翼を担っていることを意味します。

今日、多くの大学・研究所で改革の名のもとに技術支援組織の統合・廃止が進められています。効率化は大切ですが、結果として技術支援組織と研究者組織との距離が離れてしまっただけでは意味がありません。限られた予算の中で効率的な組織作りを進めつつも、研究者と一体となった技術支援体制を堅持することが何より大切です。低温研は全国共同利用・共同研究拠点です。関連研究者からも評価の高い低温研技術部を維持・発展させていくことは、低温研の使命でもあります。技術部職員はこれからも慢心することなく日々研鑽を積み、教員、事務職員と協力して、より良い組織づくりを目指して改善に努めて参ります。今後とも、低温研技術部に対するみなさまの一層のご支援、ご鞭撻の程よろしくお願い申し上げます。

2012年12月14日

技術部長 渡部直樹

目次

1. 葉緑体新規タンパク質 LIL8 の解析 加藤 由佳子・田中 亮一・高林 厚史・田中 歩	1
2. 第 53 次南極地域観測隊 —ラングホブデ氷河熱水掘削— 福田 武博・杉山 慎・澤柿 教伸・新堀 邦夫	5
3. 母子里における積雪底面流出量の観測と実験 石井 吉之・中坪 俊一・藤田 和之・森 章一・高塚 徹・池田 正幸・ 新堀 邦夫・的場 澄人	9
4. 氷表面で生成する擬似液体層の安定性 麻川 明俊・佐崎 元・長嶋 剣・中坪 俊一・古川 義純	16
5. LAMMPS を用いた気相からの凝縮核生成過程の大規模分子動力学計算 田中 今日子・田中 秀和・Jurg Diemand・Raymond Angelil・河野 明男	21
6. 氷の構造・電子状態解析のための極低温超高真空透過型電子顕微鏡の開発 香内 晃・渡部 直樹・日高 宏・羽馬 哲也・中坪 俊一・藤田 和之・ 新堀 邦夫・池田 正幸	25
7. 打ち抜きによる Au リングの製作 藤田 和之	29
8. 同位体組成が一定な氷作製のための水容器および電磁バルブ制御系の開発 福士 博樹・中坪 俊一・千貝 健・森 章一・香内 晃	33
9. 極低温表面原子反応によるメチルアミンの重水素化： 星間分子雲におけるその重水素濃集度の見積もり 大場 康弘・千貝 健・渡部 直樹・香内 晃	39
10. 流氷とシークラッターの識別 大井 正行・千貝 健・福士 博樹・藤吉 康志	43

11. 流星バースト通信によるオホーツク海域環境情報収集システムの開発 3 高塚 徹・長澤 正氏・椋本 介士・若林 良二・亀井 利久・ 藤田 和之・三寺 史夫	51
12. 切削型基板加工機による電子基板の製作 森 章一	56
13. 低温研ウェブサーバアクセス解析 2011/10–2012/09 千貝 健	59

葉緑体新規タンパク質 LIL8 の解析

加藤 由佳子¹、田中 亮一²、高林 厚史²、田中 歩²

1. 技術部先端技術支援室
2. 生物環境部門生物適応分野

はじめに

植物は光合成によって光エネルギーから生命を維持するのに必要なエネルギーを得ている。光合成には多くのタンパク質が関与する。複合体の組み立て、集光、反応の触媒など、様々なタンパク質が働く複雑な機構によって光合成は成り立っている。植物は進化の過程で、新しく遺伝子を取り込んだり、また失ったりしてきた。それによって光合成で働くタンパク質もまた変化している。それらのタンパク質について知ることは、光合成全体についての理解を深め、より効率よく光合成することについての知見につながると考えられる。

目的

LHC タンパク質 (light-harvesting chlorophyll-binding protein) は光合成反応において光を集めるアンテナの形成に関与するタンパク質である。植物の持つタンパク質の約 7 割を占める重要なタンパク質であるが、植物の祖先とされるシアノバクテリアは LHC タンパク質を持っていない。しかしその一方で、シアノバクテリアは植物と同じく Light-harvesting like protein (LIL) と呼ばれるタンパク質を持っている。LIL タンパク質は現在までに 7 つ知られており、構造は LHC タンパク質と似ている。LHC タンパク質はこれまでよく研究されているが、LIL タンパク質についてはその機能がよくわかっていない。

今回、植物の実験でモデル植物として広く用いられているシロイヌナズナ *Arabidopsis thaliana* の遺伝子配列から、新しく LIL の構造を持ったタンパク質をコードする配列を見つけた。そのコードされるタンパク質を LIL8 と名付け、その局在や機能等について調べたので報告する。LIL8 タンパク質の解析は、まだその機能等について知られていない他の LIL タンパク質について知る手がかりとなることを期待したい。

実験に使用した植物について

実験には LIL8 をコードする遺伝子に変異をもつシロイヌナズナの変異体をアメリカのストックセンター (ABRC) から取り寄せた。それらの変異体を *li18-1* と *li18-2* と呼ぶ。



図 1 実験に使用した植物。 *lil8* 欠損株 (*lil8-1* と *lil8-2*) と野生型の Col。成長や外見上の差異は見られなかった。

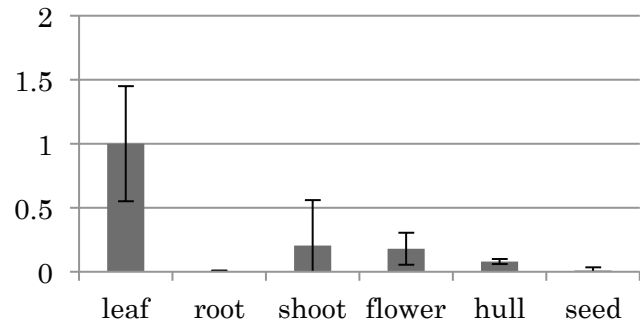


図 2 シロイヌナズナの各器官における LIL8 の発現量 (葉を 1 としたときの相対値)。リアルタイム PCR により発現量を調べたところ、葉で多く発現していることが分かった。

実験にはこれら 2 種類の変異体と野生型の Columbia (Col) を用いた。2 つの変異株について Col と比較すると、成長過程における外見上の違いは見られなかった (図 1)。

また、これら 2 つの変異株については、DNA シークエンシングによって、LIL8 をコードする遺伝子の 5'UTR*¹ に短い配列が挿入されていることを確認している。またウエスタンブロッティングとリアルタイム PCR (方法については後述) によって *lil8-1* と *lil8-2* はともに LIL8 がほとんど発現していないことを確認している。

LIL8 の局在

LIL8 の組織間での発現パターンの違いをリアルタイム PCR で調べた。また細胞内の局在について、YFP を導入した形質転換体の観察、ウエスタンブロッティングの 3 つの方法で確認した。

リアルタイム PCR では PCR (ポリメラーゼ連鎖反応 : polymerase chain reaction) による DNA の増幅を経時的にモニタリングすることで鋳型 DNA を定量し、目的のタンパク質の発現量を知ることができる。Col の葉、茎、根、花、さや、種の mRNA を抽出し、cDNA*² を合成した。その cDNA を用いてリアルタイム PCR を行なった結果を図 2 に示した。LIL8 は葉で最も多く発現し、茎などでもわずかに発現していることが分かった。光合成をしている器官で多く発現していると言える。

次に、遺伝子組み換えにより目的タンパク質である LIL8 と蛍光物質である YFP (黄色蛍光タンパク質 : Yellow Fluorescent Protein) が結合したものを Col または *lil8-2* で発現させた形質転換体を、顕微鏡で蛍光を観察した。図 3 に示したように、クロロフィルの蛍光と YFP の蛍光が重なり、LIL8 は葉緑体に局在することが示唆された。

*1 非翻訳領域。タンパク質に翻訳されない領域。タンパク質の発現を調節する。

*2 相補的 DNA。mRNA を鋳型にして逆転写酵素によって合成された DNA。

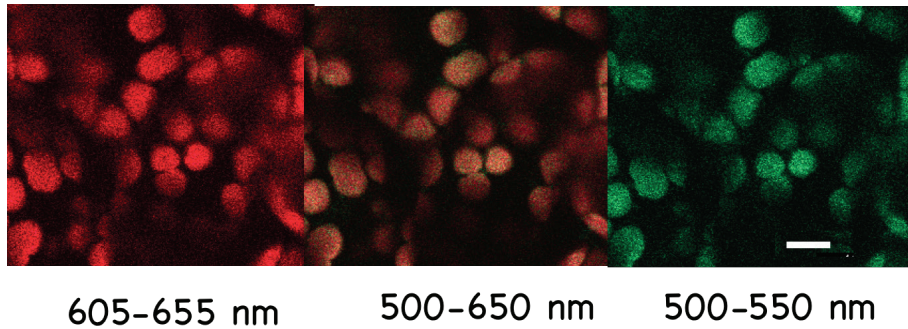


図3 蛍光観察の結果(*lil8-2*へ LIL8 + YFP を導入したもの)。左が葉緑体の蛍光、右が YFP の蛍光、中央が両者をあわせたもの。葉緑体と YFP の蛍光が重なり、LIL8 は葉緑体に存在することが分かった。

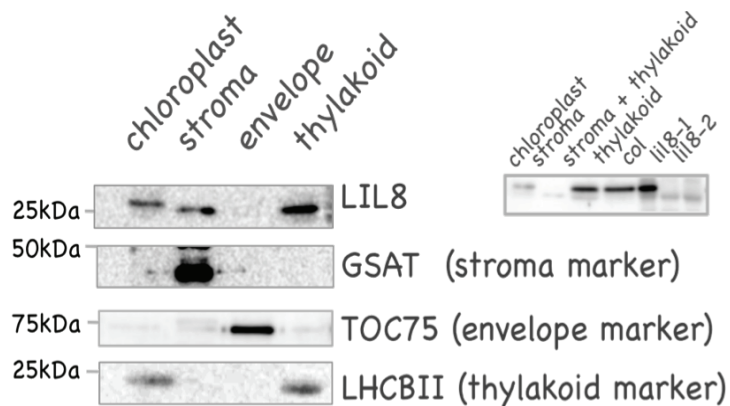


図4 ウェスタンブロッティングによる LIL8 の検出。左から葉緑体、ストロマ画分、包膜画分、チラコイド膜画分を電気泳動した。LIL8 抗体による免疫染色でチラコイド膜に特異的なバンドが見られた (ストロマに見えているバンドは非特異的バンド)。

さらに、ウェスタンブロッティングにより葉緑体のどの画分に局在するのかを調べた。ウェスタンブロッティングでは、SDS-PAGE (SDS ポリアクリルアミドゲル電気泳動: sodium dodecyl sulfate Poly-Acrylamide Gel Electrophoresis) により分子量によって分離したタンパク質をメンブレンに転写し、免疫染色を行なう。最初に Col の葉を破碎して葉緑体を抽出した (田中、2008)。その後シヨ糖密度勾配超遠心分離により、葉緑体の膜成分であるチラコイド、基質であるストロマ、葉緑体を包んでいる包膜の 3 つの組織に分画した。それらのウェスタンブロッティングの結果を図 4 に示した。LIL8 抗体による染色では、葉緑体中のチラコイド膜画分で大きさが約 25 kDa の LIL8 バンドが検出された。ストロマ画分でもほぼ同じ大きさの位置にバンドが検出されたが、変異株やストロマとチラコイドを同時に泳動した結果から、ストロマ画分のバンドは抗体の非特異的な反応によるものであることがわかった。すなわち、LIL8 は光合成の化学反応の場である葉緑体のチラコイドに局在するタンパク質である。

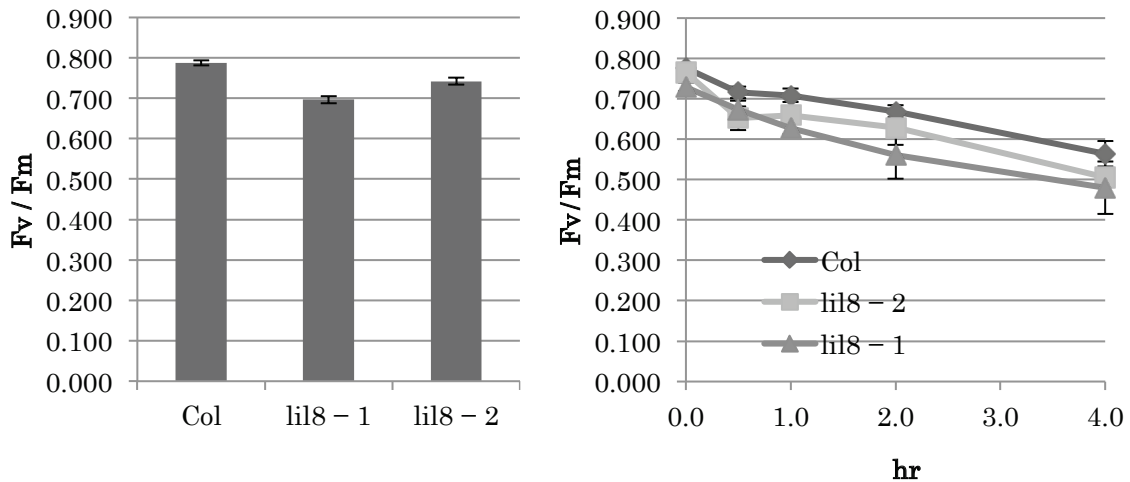


図5 変異体の光合成効率。左：*lil8-1*と*lil8-2*では、Colに比べて光合成効率が低かった。右：強光条件に置いて経時的に光合成効率を測定すると、変異体では光合成効率がより低下していた。

LIL8の機能について

ある植物がどのくらい光合成をできる能力を持っているのか、その指標であるクロロフィル蛍光の最大量子収率 F_v/F_m をパルス変調蛍光測定 (PAM) によって調べた。最大量子収率 F_v/F_m が大きいほど、受けた光を効率よく光合成に用いることができる。*lil8-1*と*lil8-2*はColに比べて F_v/F_m の値が小さく、光合成効率が低かった(図5)。また、2つの*lil8*変異体とColについて、強光条件(約 $1200 \mu\text{mol photons}/\text{m}^2/\text{s}$)に置いたときの光合成効率を経時的に測定した。一般的に強光条件においては、光合成で利用しきれなかった過剰な光エネルギーにより光合成効率が低下することが知られている。LIL8を持たない変異体では、Colに比べてより強光条件に弱く、光合成効率が低下することが分かった(図5)。これらの結果から、LIL8は光合成に関与する可能性がある。

今後の実験について

これまでの実験で、LIL8が葉緑体中に存在し、光合成に何らかの形で関与していることが示された。たとえばLILタンパク質が光合成に関与するタンパク質組み立ての足場を形成するなどの働きも考えられる。今後はLIL8が葉緑体チラコイド膜中でどのように存在し(複合体形成の有無など)、どのような働きをしているのかを中心に実験を進めて行く予定である。

参考文献

田中 亮一、田中 歩 「高等植物の葉緑体に置けるプロテアーゼの研究」北海道大学低温科学研究部技術報告、**13**、1-2、2008年3月。

第 53 次南極地域観測隊 –ラングホブデ氷河熱水掘削–

福田 武博¹、杉山 慎¹、澤柿 教伸²、新堀 邦夫³

1. 雪氷新領域部門氷河・氷床分野
2. 地球環境科学研究所
3. 技術部装置開発室

はじめに

近年の人工衛星画像解析技術の発展により、南極氷床の広範囲に及ぶ観測が盛んにおこなわれている。南極氷床の沿岸部において、数年の短い時間スケールで、表面標高の低下や流動速度の加速など顕著で急激な氷床変動が生じていることが報告されている。南極氷床末端部における氷河の流動加速は、海水の循環によって生じる棚氷の底面融解が一つの原因とかがえられており、棚氷と海洋の相互作用が注目されている。

この棚氷底面で生じるプロセスを衛星画像から解析するのは難しく、また現地観測もあまり行われていないため、この底面融解による氷床変動のメカニズムはいまだ理解されていないことが多い。南極氷床末端の短期変動と、棚氷・海洋間の相互作用の解明を目的に、2011年12月から2012年2月にかけて熱水掘削による棚氷下環境の観測を行った。本報では、日本の南極観測では初めてとなる、氷河の熱水掘削について報告する。

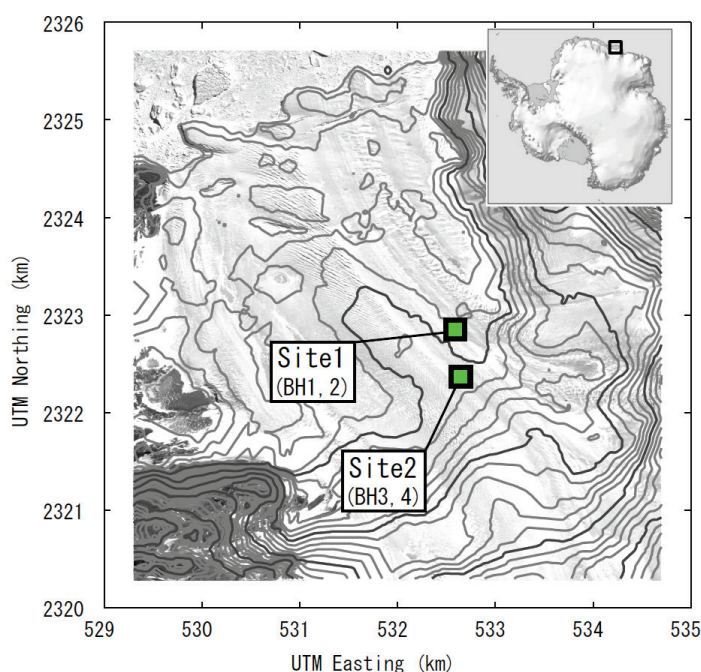


図1 ラングホブデ氷河の掘削地点。2012年1月2日 – 14日に Site1 にて、2012年1月15日 – 29日に Site2 にて熱水掘削と観測を行った。氷河表面の標高を10 m 間隔の等高線で示す。

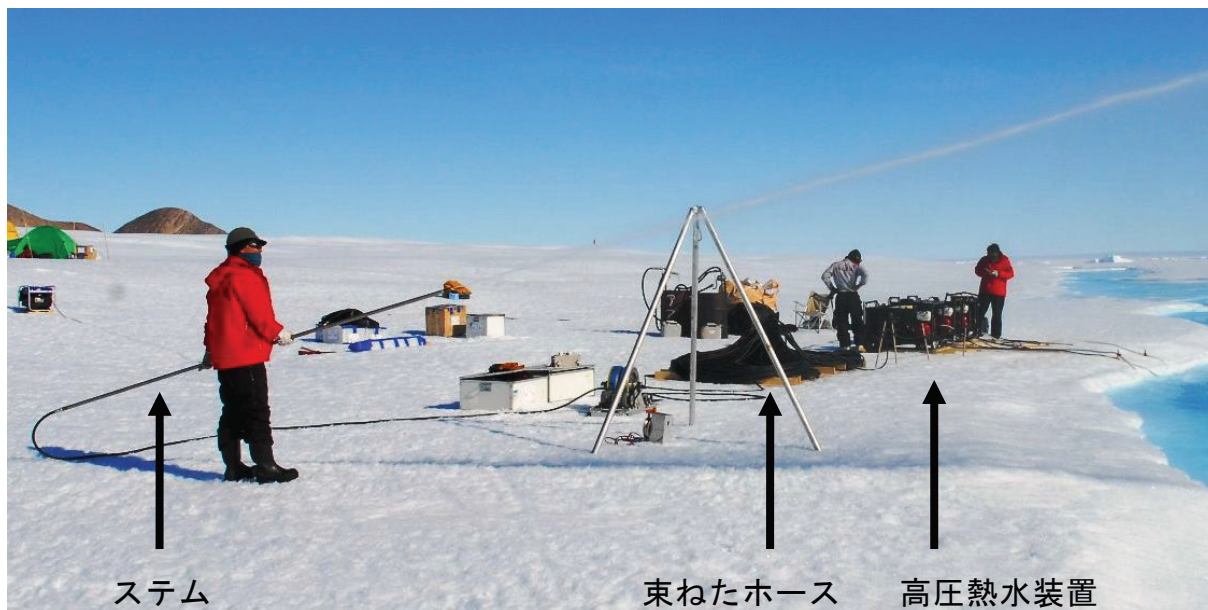


図2 熱水掘削システムの全景。氷河表面に流れる融解水を高圧熱水にする3台の高圧熱水装置、熱水を送るホースと噴射するステムから構成される。

観測地

本研究では、日本の南極観測の起点となる昭和基地から南へ20 kmに位置する、ラングホブデ氷河(69°11'S, 39°47'E)において観測を行った。ラングホブデ氷河は幅約3 kmの比較的小さな氷河で、右岸を南極氷床、左岸を露岩域に接する。氷河はリュツォホルム湾に流れ込み、その末端では氷河が海に浮いた状態である「棚氷」を形成している。本研究では、棚氷と接地氷河の境界である接地線付近を対象とし、氷河末端から約2.5 kmと約3.0 kmの2か所(Site1, 2)を観測地点として熱水掘削を行った(図1)。

熱水掘削システム

ラングホブデ氷河の熱水掘削には、低温科学研究所が保有する熱水掘削システムを使用した。このシステムは、高圧熱水装置(Kärcher HDS1000BE)を改良した装置と、熱水を送り出す耐圧耐熱ホース、熱水をジェット状に噴出するステムから構成される。これに、ホースの繰り出しを制御するウインチやブレーキが付随する。高圧熱水装置は、氷河表面に流れる融解水をポンプとボイラーで加圧・加熱することで高圧の熱水を連続で作り出す装置である。ポンプとボイラーはそれぞれガソリンと軽油を燃料に動作する。2007年に国内初となるこの熱水掘削システムの開発を行い(Tsutaki and Sugiyama 2009)、スイスアルプスのローヌ氷河において100 m以上の熱水掘削に成功した。また、2010年には南米パタゴニアのペリトモレノ氷河での掘削のため、高圧熱水装置を2台並列に接続して供給熱量を増強し、500 mを超える掘削を行った実績を有する(杉山ら2010)。

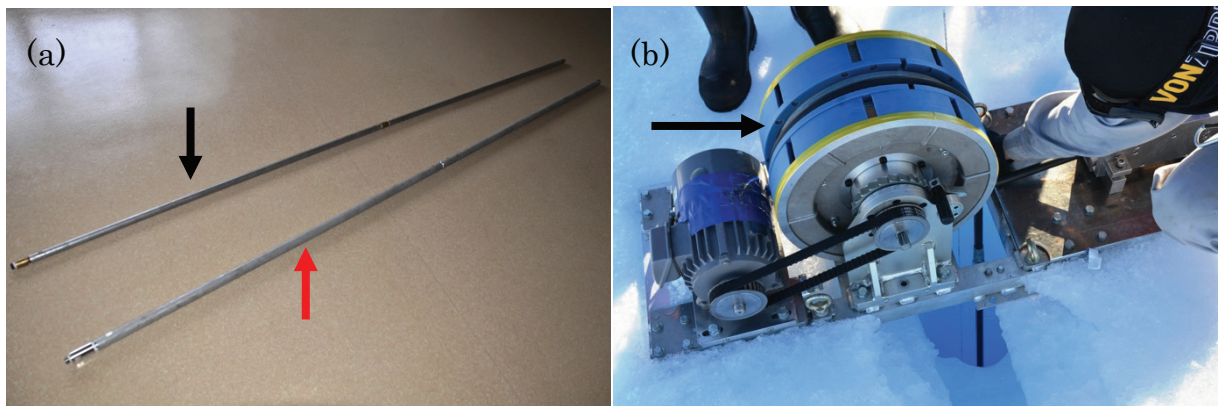


図3 (a) 熱水掘削システム先端に取り付ける全長 3.2m のステム。これまでは細いステム（黒矢印、直径 27 mm・重量 7.4 kg）を用いていたが、新たに技術部装置開発室にて太いステム（赤矢印、直径 34 mm・重量 13.7 kg）を製作した。
 (b) 掘削用ホースが移動しないように、ウインチに取り付けたプラスチック製のウインチガイド（黒矢印）。

寒冷な南極氷河では、熱水掘削に多くの熱量を要するため、2台並列に接続した高圧熱水装置にさらに同装置を直列に接続し、3台構成で流量と水温の上昇を図った。構築した熱水掘削システムは水温 90℃ 以上の熱水を毎分 30ℓ で供給することが可能であった（図2）。また、この氷河はこれまで氷厚が測定されたことはないため、これまで用いていたホースにさらに追加し、延べ 700 m のホースを用意した。様々な掘削孔観測を円滑に行うためには、曲がりや峽部のない掘削孔をあける必要がある。そのため、熱水ジェットを噴出するステムの重量と全長を増し、熱水噴射によってステムが傾斜しないようにした。また、掘削ホースを操作するウインチにホース幅に合わせたガイドを設置することで、ホースがずれることなく鉛直に掘削を行えるようにした（図3）。このステムとウインチガイドは技術部装置開発室にて今回新たに製作したものである。

ラングホブデ氷河での熱水掘削

観測機材、燃料およびキャンプ用品を含めたすべての装備はおよそ 6t に及んだ。2012年1月2日に、これらの機材を保管しておいた氷河左岸の露岩域から氷河上の観測地 Site1 まで、小型ヘリコプター10便以上を使って輸送した。砕氷艦しらせによる2ヶ月におよぶ海洋輸送や、ヘリコプターによるスリング輸送など、過酷な輸送を経た高圧熱水装置には、加圧ポンプのシールパッキンやボイラー点火系に不具合が生じていた。障害に見舞われ計画は遅れたものの、現場でパーツの交換や調整などを行うことで、1月6日と8日に氷河を貫通する約 400m の掘削に成功した (BH1, 2)。その後、ヘリコプターを使ってすべての機材を 500m 上流側へと移動し、観測地 Site 2 でも同様に熱水掘削を行った。掘削はおおむね順調に進み、1月16日と21日にそれぞれ約 430m の掘削に成功した (BH3, 4)。本観測では、2か所の掘削地において計4本の熱水掘削を行った（表1）。

表1 BH1-4掘削のまとめ。

	掘削地点	掘削日	氷厚 (m)	平均掘削速度 (m hr ⁻¹)
BH1	Site 1 S 69°12'09" E 39°49'21"	2012年1月6日	-	-
BH2		2012年1月8日	398.4	34
BH3	Site 2 S 69°12'24" E 39°49'26"	2012年1月16日	431.4	33
BH4		2012年1月21日	429.6	43

BH1においては、氷河を貫通する掘削に成功したものの、深さ100m付近で掘削孔に屈曲や狭部が生じており、直径50mm程度以上の観測機材が挿入できない掘削孔であった。BH2, 3では掘削速度を減少し、毎時35m程度の比較的遅い速度で掘削を行った。氷河表面で直径50cm程度の大きさで、様々な観測機器をスムーズに挿入できる掘削孔をなした。4本の熱水掘削に要したガソリンと軽油の総消費量は、それぞれ255ℓと810ℓであった。

参考文献

- Tsutaki, S. and S. Sugiyama. 2009. Development of a hot water drilling system for subglacial and englacial measurements. *Bulletin of Glaciological Research*, **27**, 7-14.
- 杉山 慎、刀根 賢太、新堀 邦夫、高塚 徹 2009。パタゴニア・ペリートモレノ氷河での熱水掘削とGPS連続測定。北海道大学低温科学研究所技術部技術報告、**16**、1-5。

母子里における積雪底面流出量の観測と実験

石井 吉之¹、中坪 俊一²、藤田 和之²、森 章一³、高塚 徹³、池田 正幸^{4,5}、
新堀 邦夫²、的場 澄人⁶

1. 水・物質循環部門水文気象分野
2. 技術部装置開発室
3. 技術部先端技術支援室
4. 技術部共通機器管理室
5. 共和暖房工業株式会社
6. 環オホーツク観測研究センター

はじめに

積雪底面流出量の観測は、積雪内部における融雪水の浸透・貯留機構や積雪中の化学物質の輸送過程を調べる目的で行なわれる。また、積雪表面の融雪量ではなく、地表面土壌層に流入する融雪量を直接測定するので、流域水文学的にも重要な観測項目である。水文気象研究室では 20 年程前より、北海道北部の北大雨龍研究林・母子里の融雪観測室前の露場において、3.6 m × 3.6 m の大型積雪ライシメータをはじめとする様々なタイプの積雪ライシメータを用いて積雪底面流出量の観測を行なってきた（石井ほか 2010）。本報告では、始めに、2011 年に引き続いて行なった 2012 年融雪期の雪面上への模擬降雨散水実験の結果を示す。次に、同じく 2012 年融雪期に雨龍川流域で生じた顕著な河川増水について、母子里での気象要素、積雪底面流出量、河川流量の観測結果をもとに、その発生機構を考察する。

雪面上への模擬降雨散水実験

1 年目の実験は 2011 年 4 月 5-7 日に行なった。期間中の積雪深は 100-80 cm、気温は -6.0 から +9.9°C で推移した。前年の秋に地表面に 1m × 1m の積雪ライシメータを設置しておき、融雪期にはライシメータ真上の雪面に直径 70-80 cm の円形状に噴霧ノズルによって微水滴を散布した。実験は 3 回行い、各回の総散布量（総雨量）、平均雨量強度、散布時間はそれぞれ 1 回目が 25 L（25 mm）、35 mm/h、43 分、2 回目が 60 L（60 mm）、23 mm/h、159 分、3 回目が 200 L（200 mm）、34 mm/h、356 分であった。積雪底面流出量は実験 1 ではゼロ、実験 2 では実験中から翌日にかけて約 1.5 L（流出率 3%）、実験 3 では 200 L も散水したにもかかわらず流出量はゼロであった。実験 3 において積雪底面流出がゼロであった理由については次のように考えた。積雪内に供給される水量が少ないうちは、水は雪粒間に保持されるが、供給水量が増加し、下方への浸透速度（強度）以上の水が加わってくると、雪粒間の水はもはや下方ではなく、多くの水を保持できる層内を水平方向に流れるようになる。つまり、散布する水の量が多くなると撒いた水は積雪内を水平方向に流れるようになり、鉛直下方の積雪底面からは流出しなかった。

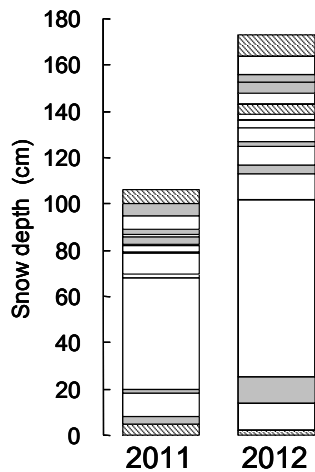


図1 2011年と2012年における実験時の積雪深と層構造の比較（斜線部は水で濡れた層、灰色部と白色部はそれぞれ粒径の大きい層と小さい層）。



図2 2012年の模擬降雨散水実験の様子（実験1）。

2年目の実験も、ある程度の融雪が進み、積雪深が100cm程度になった時期に行なおうとした。ところが、2012年の融雪期は、4月上旬は寒気の影響を受けて融雪が遅れ、4月15日になっても積雪深は170cmもあった（図1）。2011年に比べ2倍近い積雪深であったが、4月16-17日に2011年と同じ方法で2回の実験を行なった（図2）。この時の積雪深は170-164cm、気温は-1.9から+12.5℃で推移した。総散布量（総雨量）、平均雨量強度、散布時間はそれぞれ1回目が170L（170mm）、35mm/h、295分、2回目が120L（120mm）、33mm/h、220分である。積雪深が多いので2011年以上に水平方向の流れが生じやすく、積雪底面流出量は観測されないことが予想されたが、1回目は散水開始後50分で積雪底面流出が現れ、総散布量170Lに対し総流出量は46L、流出率は27%であった。2回目も同様に散水開始後90分で積雪底面流出が現れ、総散布量120Lに対し総流出量は48L、流出率は40%であった（図3）。散水した岩内海洋深層水（脱塩水）の水素同位体比は+1‰、実験前の全層積雪の水素同位体比は実験1、2とも-93‰であった。積雪底面流出水の水素同位体比は、実験1では流出開始時の-86‰から散水終了時には-26‰まで重くなった。同様に実験2では流出開始時の-109‰から終了時には-34‰になった。散水量と流出量がほぼ定常となった時点で散水を終了したが、終了時における積雪底面流出水に含まれる模擬降水の割合は、水および同位体収支式より、実験1では71%、実験2では63%と見積もられ、概ね6-7割であった。

これまでの融雪水の積雪内浸透に関する研究では、化学成分や水の安定同位体をトレーサーに用いることによって、晴天日や弱い降雨時（総雨量20mm程度）には積雪内部に貯留されていた水が押し出されるように積雪底面から流出し、その割合は9割以上に及ぶと言われていた（鈴木1993；宍戸ほか2005など）。しかし、顕著な降雨と融雪が重なった時にはこうした流出過程とは異なることも指摘されていた。今回の実験では、

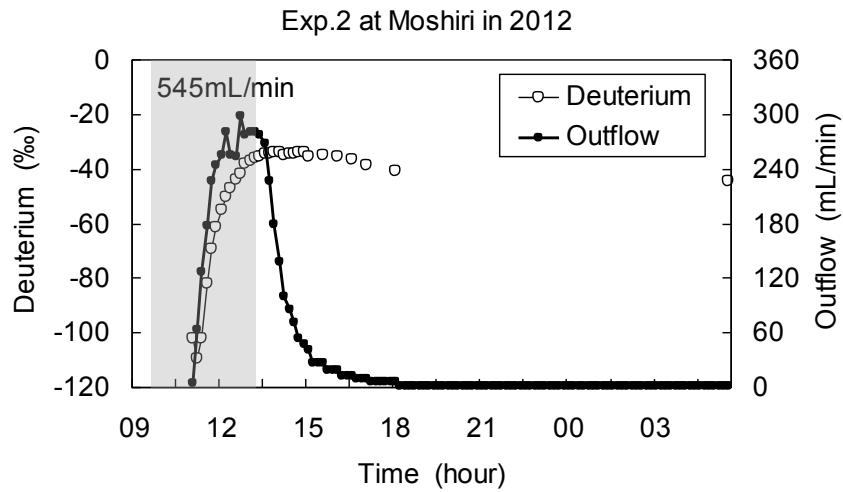
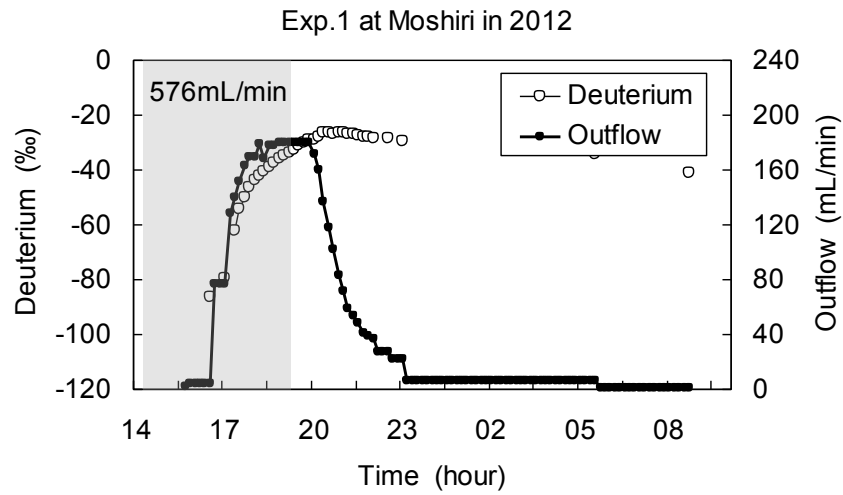


図 3 実験 1 と 2 における積雪底面流出量と重水素同位体比の時間変化（灰色部は上方に記した一定強度で模擬降雨を散布した時間帯）。

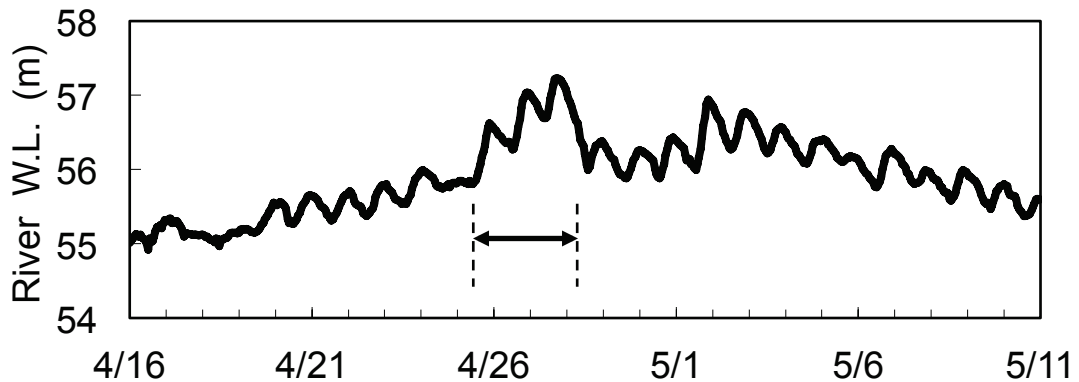


図 4. 雨龍川多度志観測所（996 km²）における 2012 年融雪期の河川水位変化。矢印は 4 月 25-27 日の顕著な増水が起きた期間（資料：国土交通省水文水質データベース）

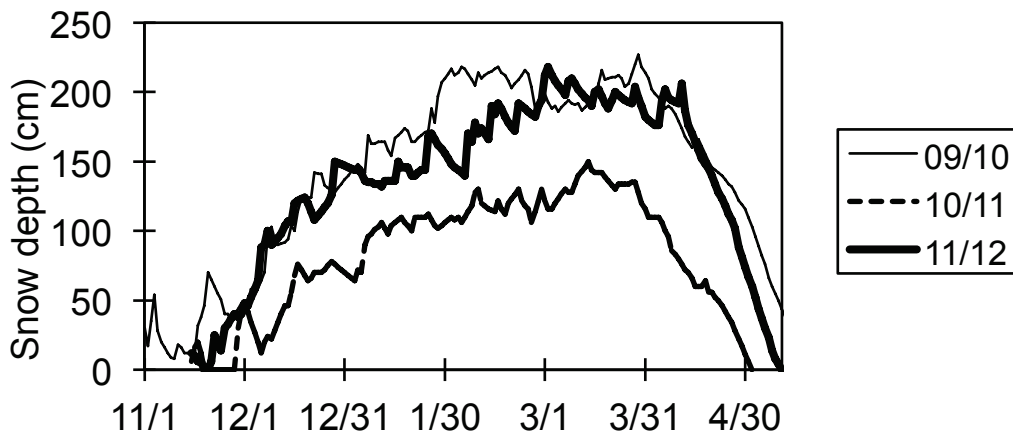


図5 母子里における多雪年（09/10年）、少雪年（10/11年）、11/12年の積雪深変化。

積雪上に総量 120–170 mm の降雨があった時には、降ってきた降水の概ね 6–7 割が積雪底面から流出することが明らかになった。しかし、2011 年の実験では積雪底面流出が全く観測されなかったため、2012 年の実験結果だけから結論を下すには、なお検討の余地がある。積雪内で水平方向の水みちとなる氷板や大粒のザラメ雪層ができる前後で、融雪水の浸透がどのように変化するかを明らかにするために、水平方向の顕著な水みち層が発達する前（積雪深 150 cm 程度）と後（同 80 cm 程度）とで模擬降雨散水実験を比較するなどの追試が必要であろう。

雨龍川における 2012 年融雪期の顕著な河川増水

前述したように、北海道の日本海側地域における 2012 年の融雪期は、4 月上旬までは寒気の影響を受けて融雪が遅れていたが、4 月下旬から 5 月上旬には南からの暖気が流入し気温の高い日が続いた。このため各地で急速に融雪が進み、それに伴う河川の氾濫や土砂崩れが相次いだ。夕張川や天塩川では氾濫注意水位まで増水したために住民が避難し、一部の田畑が冠水した。夕張市内の JR 石勝線では線路下の土砂が流出し鉄道が運行不能になった。国道 239 号（霧立峠）や国道 230 号（中山峠）では土砂崩れによって道路が崩壊し、長期間の通行止めを余儀なくされた。石狩川水系雨龍川でも 4 月 27 日から 28 日にかけて水位が避難判断水位に達した（図 4）。融雪期にはしばしば降雨と融雪が重なって洪水が起きるが、この時は顕著な降雨はなく、融雪のみによって著しい増水が生じた。母子里実験流域（面積 1.2 km²）でも、同じように融雪期の顕著な増水が観測された。

母子里における 3 冬期（09/10、10/11、11/12 年）の積雪深変化を見ると、2010 年（多雪年）と 2011 年（少雪年）とでは融雪期前の積雪深が 50–70 cm も異なるが、母子里は風が弱く放射による融雪が卓越するので、積雪深が大きくても小さくてもその減少速度には大きな違いがない。ところが、2012 年は融雪の開始が 4 月 13 日頃で、例年より

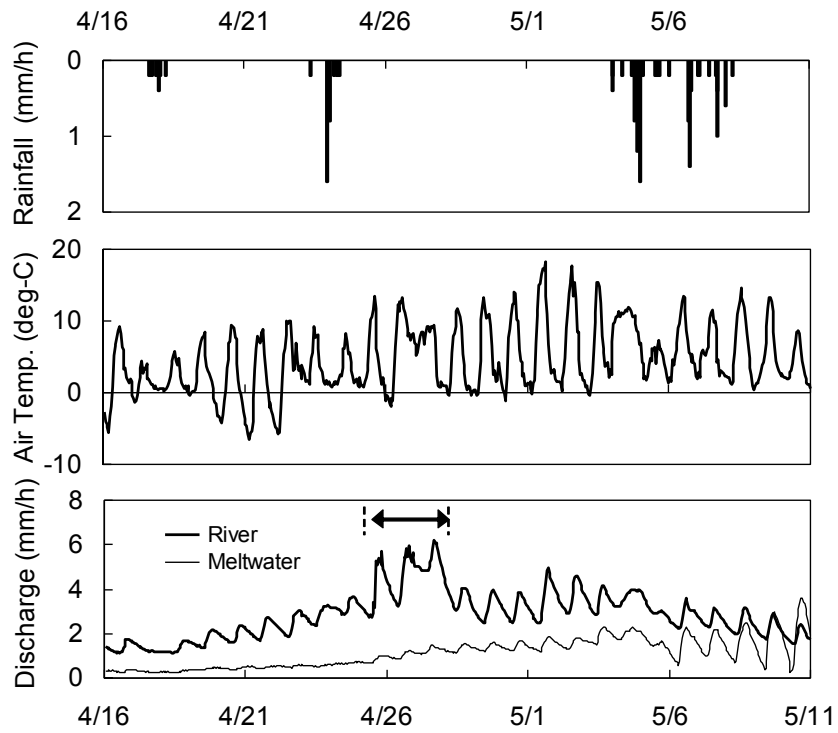


図 6 母子里における降雨量、気温、河川流量・積雪底面流出量の経日変化 (ただし、河川流量の単位は流出高で、かつ 3 倍して表記してある)。

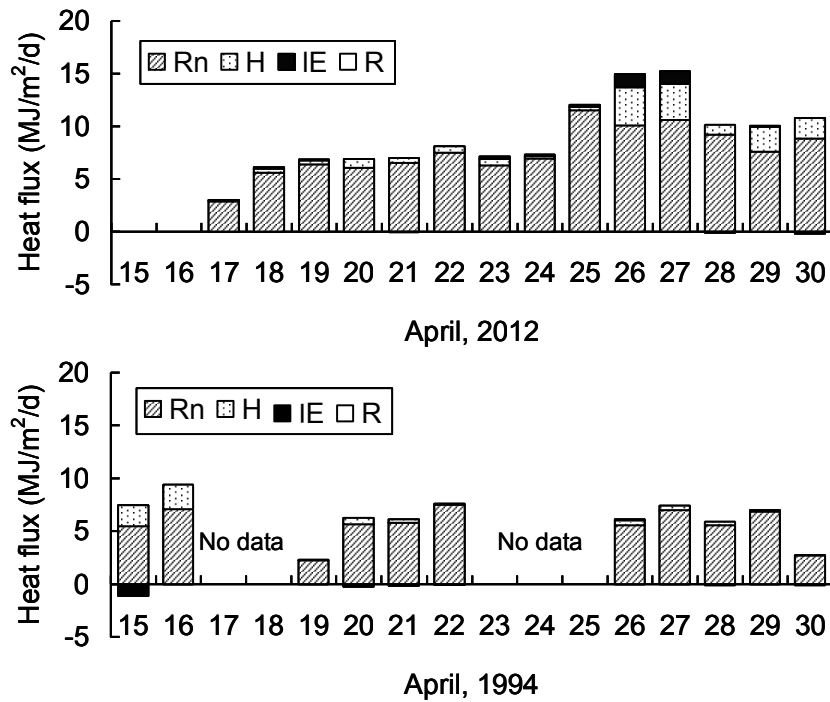


図 7 母子里における 1994 年と 2012 年の融雪熱収支の比較 (Rn: 放射収支量、H: 顕熱伝達量、IE: 潜熱伝達量、R: 雨による熱伝達量)。

10日ほど遅かったが、その後の積雪深の減少速度は他の2冬期と比べて明らかに早かった(図5)。図6に母子里における降雨量、気温、河川流量・積雪底面流出量(平坦地)の経日変化を示す。河川流量には雨龍川の水位変化と同様に4月25日から27日にかけて顕著な増水が認められるので、この増水は雨龍川水系に共通して起きたと考えられる。降雨量は23-24日にかけての4mmにすぎず、降雨と融雪が重なって生じた増水ではない。一方、この期間の積雪底面流出量には河川で見られたような際立った流出量増加は観測されなかった。積雪底面流出量には顕著な増加がない、すなわち、地表面への融雪水の供給量には前日までと大きな違いがなかった。それにもかかわらず、河川流量は前日より著しく増水した。このような結果が得られた理由として、1) 平坦地と斜面では積雪底面流出の出方が異なり、斜面では積雪底面流出が顕著に増加していた; 2) 河川近傍など流域内の一部でのみ著しい融雪が進んだ、などが考えられる。

この時の融雪熱収支解析の結果を図7に示す。比較のために1994年融雪期の熱収支解析結果も示すが、風の弱い母子里では、通常は1994年のように融雪熱量の70-90%は放射収支量によって賄われ、顕熱・潜熱伝達量は小さい。しかし、2012年融雪期の4月25-27日にかけては、放射収支量に加え、高い気温と強めの風速に伴う顕熱・潜熱伝達量が加わり、融雪量が著しく大きくなった。4月17-30日の14日間の表面融雪量と積雪底面流出量の対応を図8に示す。両者は日単位ではほぼ1:1に対応し、積雪底面流出量は正しく計測されていたと言えるだろう。しかも、4月25-30日にかけては、表面融雪量に対して積雪底面流出量は反時計回りに変化し、急速な融雪に対して前半は流入量、後半は流出量が多くなり、積雪内で貯留されつつ流出したようすが明瞭に現れている。しかし、河川流量や表面融雪量に見られる4月26日と27日のピークが、なぜ積雪底面流出量には現れなかったかについては、依然としてよく分らない。以上のことから、4月25-27日にかけては顕熱・潜熱伝達量が例年になく大きくなって急速に融雪が進み、顕著な河川増水につながったことが明らかになった。

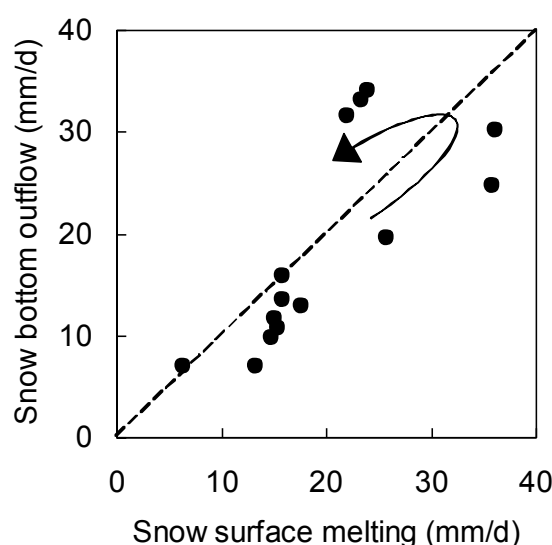


図8 表面融雪量と積雪底面流出量の関係(4月25-30日は矢印の方向に経過した)。

おわりに

融雪流出過程の研究では、積雪表面融雪に始まり河川流出へと至る水及び物質の流れが議論される。積雪中や地中での目に見えない水の流動量を測定することはそれほど簡単ではなく、融雪流出モデルを適用する上でもモデルの妥当性を確かめにくくしている。積雪ライシメータを用いた積雪底面流出量の観測データは、モデルを検証する際の有力な情報になると期待される。しかし、数トンに及ぶ雪の積載荷重に耐えるための補修や、パイプの目詰まりや凍結の防止策など、装置の維持にはそれなりの手間暇を掛けねばならない。1、2冬期であれば維持管理もそれほど難しくはないが、長年に渡ってデータを取り続けるのは容易なことではない。母子里ではこれまでも積雪ライシメータを用いた多くの研究実績があり（小島 1980; Nomura 1994; 石井 2002; 石井 2007; 石井と佐藤 2012 など）、今後も有力な武器として研究に役立てていきたい。

最後に、模擬降雨用の岩内海洋深層水（脱塩水）の利用にあたっては岩内町地場産業サポートセンターのご協力を頂いた。中家正希所長をはじめとする職員の皆様に感謝致します。

参考文献

- 石井吉之, 2002. 融雪水の積雪内浸透に及ぼす雪質の効果. 北海道大学地球物理学研究報告, **65**, 53–68.
- 石井吉之, 2007. 水資源としての雪. 水環境学会誌, **30**, 58–61.
- 石井吉之, 兒玉裕二, 新堀邦夫, 中坪俊一, 藤田和之, 池田正幸, 森章一, 2010. 大型ライシメーターによる積雪底面流出量の観測. 北大低温研技術部技術報告, **16**, 10–15.
- 石井吉之, 佐藤大輔, 2012. 積雪底面融解量の場所による変化と流域平均量. 北海道大学地球物理学研究報告, **75**, 59–71.
- 小島賢治, 1980. 冬期間の積雪下面における融雪量の連続観測（序報）, 低温科学, **39**, 101–108.
- 宍戸真也, 石井吉之, 山崎学, 田中夕美子, 2005. 降雨と融雪が重なった時の出水現象. 北海道の農業気象, **57**, 15–27.
- 鈴木啓助, 1993. 積雪中における押し出し流の形成. 地理学評論, **66A-7**, 416–424.
- Nomura, M, 1994. Studies on the delay mechanism of runoff to snowmelt. *Contributions from the Institute of Low Temperature Science*, **A39**, 1–49.

氷表面で生成する擬似液体層の安定性

麻川 明俊¹、佐崎 元^{1,2}、長嶋 剣¹、中坪 俊一³、古川 義純¹

1. 雪氷新領域部門相転移ダイナミクス分野
2. 共同研究推進部
3. 技術部装置開発室

はじめに

氷は地球上で極めて大量に存在するため、その相転移は地球の寒冷圏で起こる様々な現象を支配する。その相転移の中で、擬似液体層の生成はこれまで特に注目されてきた。擬似液体層とは、氷が生成する 0°C 以下であるにもかかわらず、氷表面を覆う液体のことを指す。氷表面に生じた液体は下地である結晶構造の影響を受け、液体と固体の間際の物理的性質を持つ[1]ため、擬似液体層と呼ばれている。擬似液体層は氷表面の性質を変えるため、スケートの滑りやすさや復水、霜柱による凍上、氷結晶粒の再結晶化や粗大化、雪結晶の形の変化、食品や臓器の低温保存、雷雲での電気の発生など、幅広い現象のカギを握ると考えられている。これまでの研究では、融点直下で氷結晶の形状をマクロスコピックに観察したり、氷表面の空間的に平均された性質を分光学的に捕える測定などが行われてきた。しかしながら、擬似液体層を分子レベルで直接観察することができなかつたため、その生成メカニズムはほとんどわからないままであった。最近、当研究グループが開発したレーザー共焦点微分干渉顕微鏡を用いると、気相から成長する氷結晶表面の単位ステップ(高さ 0.4nm)の動的挙動を直接可視化できるようになった[2]。そして、同顕微鏡を用いたその後の研究により、層状及び液滴状の 2 種類の擬似液体層が存在することが明らかとなった[3]。これまでは擬似液体層は 1 種類しか存在しないと考えられてきたため、擬似液体層についての概念そのものを再検証する必要がある。その取りかかりとして、2 種類の擬似液体層の熱力学的安定性を調べる必要がある。そのため、本研究ではレーザー共焦点微分干渉顕微鏡を用い、2 種類の擬似液体層が生成する温度-圧力条件を明らかとすることを目指した。

実験

図 1 に観察用チャンバーを模式的に示した。図 1 に示した上部の銅板に固定した AgI 結晶上に、観察体となる氷を成長させた。また下部の銅板上に、水蒸気源となる氷を成長させた。両者の温度を独立に制御することにより、AgI 結晶の温度 $T_{\text{substrate}}$ (その氷が蒸発する水蒸気分圧 P_e)、及び観察対象となる氷に供給する水蒸気分圧 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ を制御することができる。このチャンバーを用い、氷の成長温度 $T_{\text{substrate}}$ と過飽和度 ($\Delta\mu = kT_{\text{substrate}} \ln P_{\text{H}_2\text{O}} / P_e$) を制御しながら、氷結晶ベーサル面上での擬似液体層の成長及び消滅過程をレーザー共焦点微分干渉顕微鏡で観察した。

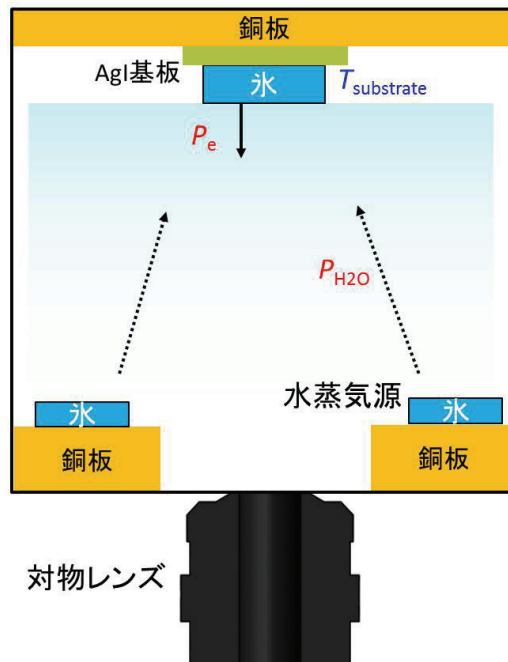


図1 観察用チャンバーの模式図。

結果と考察

種々の過飽和条件での層状及び液滴状の擬似液体層の定性的挙動

$T_{\text{substrate}} = -2.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ での種々の過飽和条件下における擬似液体層の挙動を図2に示す。条件(a)では、層状の擬似液体層及び液滴状の擬似液体層が核生成・成長し、融合する様子が観察された。(a)の条件よりも過飽和が小さい(b)の条件では、層状の擬似液体層は著しい速度で消滅し、液滴状の擬似液体層のみが存在した。(b)よりも更に過飽和が小さな(c)の条件では、液滴状の擬似液体層は緩やかな速度で消滅し、氷表面は裸の状態となった。この時、単位ステップが前進する様子が見られたことから、(c)の条件は氷結晶に対しては過飽和状態にあることがわかる。以上の結果は、結晶相が最も熱力学的安定性が高く、層状の擬似液体層が最も不安定であることを示す。

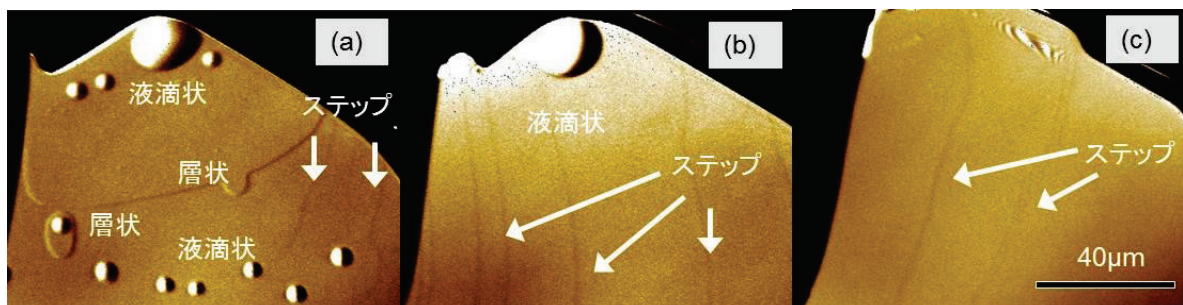


図2 レーザー共焦点微分干渉顕微鏡により観察された種々の過飽和条件での氷ベール面上の擬似液体層の挙動。 $T_{\text{substrate}}$ は全て $-2.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。過飽和度：(a) 高い ($\Delta\mu = 192.2\text{ J/mol}$)、(b) 中程度 ($\Delta\mu = 156.7\text{ J/mol}$)、(c) 低い ($\Delta\mu = 97.1\text{ J/mol}$)。

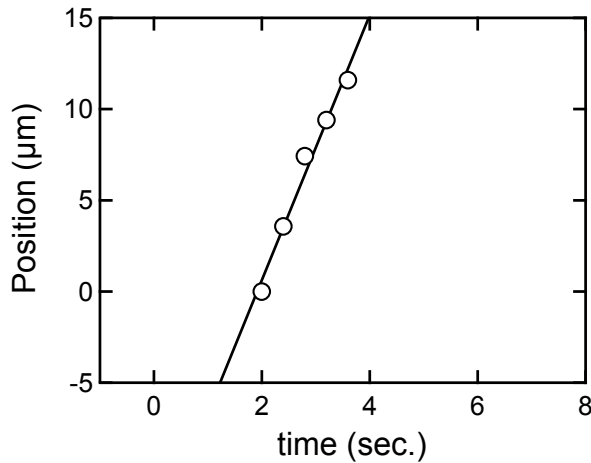


図 3 単位ステップの位置の経時変化 ($T_{\text{substrate}} = -4.40^{\circ}\text{C}$ 、 $P_{\text{H}_2\text{O}} = 439 \text{ Pa}$)。

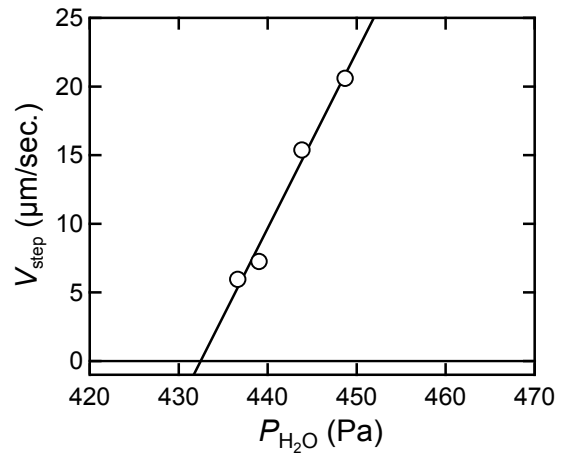


図 4 ステップ前進速度の水蒸気分圧依存性 ($T_{\text{substrate}} = -4.40^{\circ}\text{C}$)。

固-気平衡水蒸気圧の評価方法

図 3 にステップの位置の経時変化の一例を示す。データを直線近似した傾きから、ステップの前進速度を求めた。このような解析を種々の水蒸気圧に対して行った。その結果の一例を図 4 にまとめた。ステップの前進速度は水蒸気分圧の増加とともに直線的に増加した。この直線を外挿することで、ステップの前進速度がゼロとなる固-気平衡水蒸気圧を求めた。

層状及び液滴状の擬似液体層が存在し得る境界条件の評価方法

図 5 に 2 種類の擬似液体層の半径の経時変化を示す。横軸は相対的な時間を表わす。半径の経時変化により、2 種類の擬似液体層の成長速度を求めた。このような解析を種々の水蒸気圧に対して行った結果の一例を図 6 に示す。層状及び液滴状の擬似液体層の成長速度も水蒸気分圧の増加とともに直線的に増加した。またこの直線を外挿することで、2 種類の擬似液体層の成長速度がゼロとなる水蒸気分圧を求めた。

層状及び液滴状擬似液体層の存在し得る領域

図 7 に、 $T_{\text{substrate}}$ に対する 2 種類の擬似液体層の成長速度がゼロとなる水蒸気分圧を示す。赤い実線よりも上の領域では層状及び液滴状の擬似液体層の両者は存在し、赤い実線と青い実線との領域では液滴状の擬似液体層のみが存在した。 $T_{\text{substrate}} = -2.00^{\circ}\text{C}$ を下回ると赤い点線及び青い点線よりも過飽和度の高い条件であっても 2 種類の擬似液体層は現れなかった。更に $T_{\text{substrate}} = -2.00^{\circ}\text{C}$ 以上で生成した 2 種類の擬似液体層を $T_{\text{substrate}} = -2.00^{\circ}\text{C}$ 以下の条件下でアニールすると、2 種類の擬似液体層は共に消滅した。さらに、青い実線と固-気平衡水蒸気分圧曲線との水蒸気分圧領域の、結晶の表面上では、ステップが前進するにも関わらず、2 種類の擬似液体層は存在しなかった。この結果は、2 種類の擬似液体層が生成するためには臨界水蒸気圧 ($\Delta\mu^{\text{層状}}$ 、 $\Delta\mu^{\text{液滴状}}$) 以上の過飽和が必要であり、2 種類の擬似液体層が準安定相であることを示す。

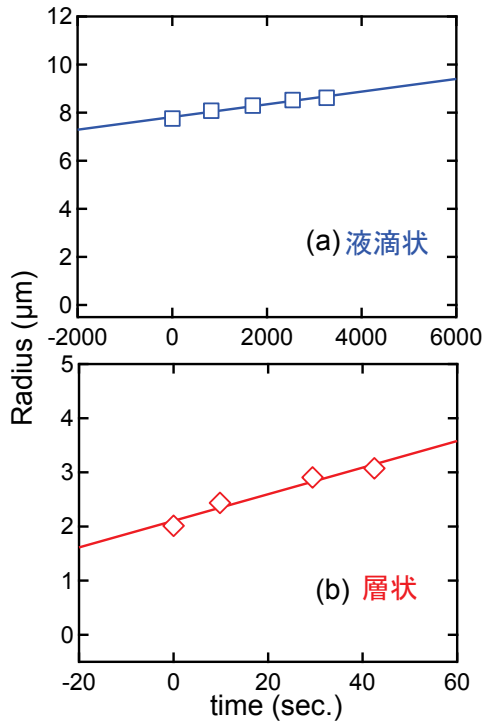


図 5 層状及び液滴状の擬似液体層のサイズの経時変化。(a) 液滴状の擬似液体層 ($T_{\text{substrate}} = -0.70^\circ\text{C}$ 、 $P_{\text{H}_2\text{O}} = 593\text{ Pa}$ 、 $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_e = 1.021$)、(b) 層状の擬似液体層 ($T_{\text{substrate}} = -0.60^\circ\text{C}$ 、 $P_{\text{H}_2\text{O}} = 600\text{ Pa}$ 、 $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_e = 1.026$)。

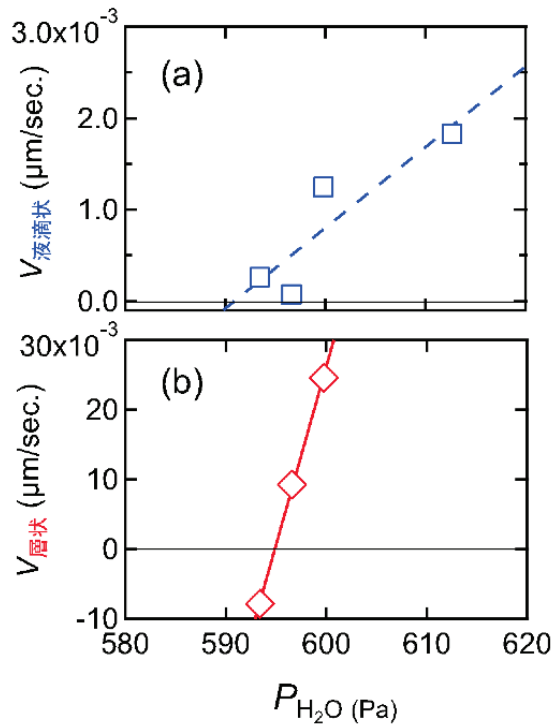


図 6 層状及び液滴状の擬似液体層の成長及び消滅速度の水蒸気分圧依存性。(a) 液滴状の擬似液体層 ($T_{\text{substrate}} = -0.70^\circ\text{C}$ 、 $P_{\text{H}_2\text{O}} = 593\text{ Pa}$ 、 $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_e = 1.021$)、(b) 層状の擬似液体層 ($T_{\text{substrate}} = -0.60^\circ\text{C}$ 、 $P_{\text{H}_2\text{O}} = 600\text{ Pa}$ 、 $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_e = 1.026$)。

最後に図 7 についての注意点を 1 点記す。層状及び液滴状の擬似液体層の成長速度がゼロとなる水蒸気分圧は、気相や結晶相に対して擬似液体層が平衡ではなく、定常状態となる条件を示す。平衡点とは 2 つの相が互いに共存しあう条件を指す。それに対し、擬似液体層が氷表面に存在すると、3 相あるいは 4 相の間で分子の移動が起こるため、平衡点を一義的に決定できない。そのため、図 7 中の 2 種の擬似液体層の成長速度がゼロとなる条件は、見かけが定常となる条件を示している。

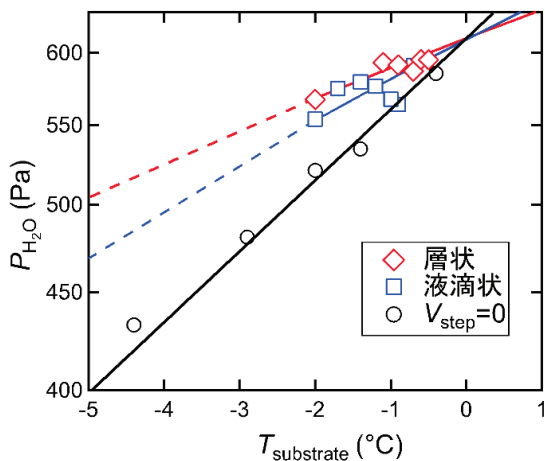


図 7 層状及び液滴状の擬似液体層の存在領域。◇は層状の擬似液体層、□は液滴状擬似液体層の存在し得る境界条件を示しており、○は固-気平衡水蒸気分圧を示す。種々の実線はプロットに対し近似直線を引いたものを示す。点線は $T_{\text{substrate}} = -2.00^\circ\text{C}$ 以下に対し種々の実線を延長したものを示す。

これまでの報告と本研究結果との比較

擬似液体層の熱力学的性質に対するこれまでの解釈と本研究結果を図 8 に示す。黒田と Lacmann [4] は氷表面と擬似液体層の界面の濡れ性を検討した。そして、結晶相に対して水蒸気が未飽和、平衡、過飽和のいずれの状態であっても、擬似液体層は氷表面上で安定に存在すると考えた。この概念は、これまで誰も擬似液体層の可視化することができなかったため、30 年以上も信じられてきた。それに対し本研究では、未飽和、平衡、低い過飽和状態では擬似液体層が現れず、臨界過飽和よりも高過飽和状態で初めて擬似液体層が出現することを明らかとした。この結果は、黒田と Lacmann が提唱した擬似液体層に関する理論を覆す著しい成果であり、擬似液体層の生成メカニズムの解明に向けて大きな方針を与えるものである。

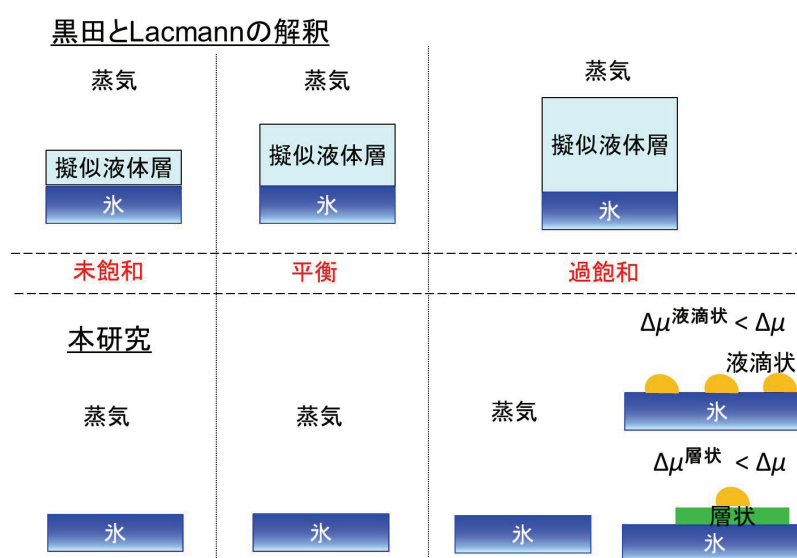


図 8 擬似液体層の熱力学的性質に対する黒田と Lacmann の解釈[4]と本研究結果の比較。

まとめ

本研究では、層状及び液滴状の擬似液体層が存在する圧力-温度条件をその場観察で決定することに成功した。その結果、2 種類の擬似液体層は固-気平衡近傍では存在せず、臨界過飽和以上でようやく生成し得る準安定相であることを明らかにした。今後、2 種類の擬似液体層と室温で安定的に存在する水との差異を明らかとするため、顕微ラマン分光測定を行い、2 種類の擬似液体層中の水分子の運動性を計測する。

参考文献

- [1] Y. Furukawa, *et al.*, *J. Cryst. Growth*, **82**, 665–677 (1987).
- [2] G. Sazaki, *et al.*, *PNAS*, **107**, 19702–19707 (2010).
- [3] G. Sazaki, *et al.*, *PNAS*, **109**, 1052–1055 (2012).
- [4] T. Kuroda & R. Lacmann, *J. Cryst. Growth*, **56**, 189–205 (1982).

LAMMPS を用いた気相からの凝縮核生成過程の 大規模分子動力学計算

田中 今日子¹、田中 秀和¹、Jurg Diemand²、Raymond Angelil²、河野 明男³

1. 雪氷新領域部門理論惑星科学分野
2. チューリッヒ大学
3. 独立行政法人海洋開発機構

はじめに

核形成過程は、気象学(雲の形成)、物性論(ナノ粒子形成)、および宇宙物理学(晩期型星のダスト生成)等、多くの分野で重要な役割を果たすが、分子レベルでの理解は未だ限られている。古典的核形成理論は、均質核形成の巨視的記述を与え、広く用いられている。しかし、理論から得られる核生成率は室内実験やモンテカルロ (MC) および分子動力学 (MD) シミュレーションから得られる核生成率と何桁も一致しないことが示されている[1–6]。その原因として、古典的核生成理論では、表面張力は単にバルクと同じであると仮定している一方、実験や分子シミュレーションで考えられている凝縮の臨界核はナノスケール以下(数十分子から成るクラスター)であり、ナノ粒子のバルクからの表面張力のずれが原因であると考えられる。すなわち核生成理論において微小クラスターの表面エネルギーの評価は本質的な問題である。

我々のグループではレナードジョーンズ分子や水分子に対し気相からの核生成の分子動力学計算を行うことで、精度の高い核生成理論モデルの構築を目指している。古典的核生成理論の補正はこれまでさまざまな試みがなされてきたが、最も成功しているモデルとして Dillmann and Meier (1991) が提唱した半現象論的核生成モデル (SP モデル) がある[1]。SP モデルはいくつかの室内実験から得られる核生成率を良く再現することが示されている。しかし、系がどのような性質を満たすときに SP モデルが正確な予測を与えるのかは明らかではない。

我々はレナードジョーンズ分子を用いた気相–液相間の核生成過程を再現する MD 計算を行い、得られた核生成率が SP モデルと良く一致することを示した[4]。また、得られたクラスター分布を用いて、クラスターを形成するためのギブス自由エネルギーと表面エネルギーの評価を行い、SP モデルと比較することにより、分子レベルで SP モデルの有効性を示した。さらに近年は、気相–固相間の核生成の MD 計算を行い、低温領域においても SP モデルの有効性を示すことに成功した[6]。また気相–固相間の核生成においては、凝縮核はまず不安定相である液相として現れ、それが成長する際に結晶化し固化することを示した(図 1 参照)。これまでの MD 計算は高い高過飽和状態に限られており、計算パラメータ範囲を越えた SP モデルの妥当性はまだ分かっていない。

MD 計算ではこれまで計算機上の制限から核生成率が高い高過飽和状態しか扱えな



図1 我々の計算[6]に基づき、分子からの核生成によるクラスター生成と成長を映像化したムービーのスナップショット。

かった。本研究ではより低過飽和状態での核生成過程を調べるため、LAMMPS*1を用いたスーパーコンピュータでの大規模並列計算による分子動力学計算を行う。これにより最大10億分子までの計算が可能となる。核生成率では従来のものより4桁小さい現象を調べることができ、室内実験と数値実験のギャップを大幅に狭くすることができる。

計算手法と目的

MD計算において低過飽和状態での低い核形成率 J [1/times/volume]を再現するためには大きな粒子数が必要である。また時間ステップは非常に大きくなりワークステーション上では難しい。本研究ではスーパーコンピュータを用いて大粒子数(10億体分子)の核形成のMDのシミュレーションを実行する。このために本研究では大規模並列計算用の分子動力学シミュレーションコードであるLAMMPSを用いる。LAMMPSのオープンソースは広く使用されており、多くのスーパーコンピュータシステムにもインストールされている。スーパーコンピュータはSuperMUC(ドイツ)、PRACE(Partnarship for Acvanced Computing in Europe)、JAMSTEC大型計算機システム等を計画している。LAMMPSでは、空間内の粒子の相互作用を解くことにより、原子/分子の運動を計算する。またLAMMPSの大きな特徴として並列性能が挙げられる。本研究ではOpenMPとMPIを用いたハイブリッド並列化により100から32768 CPUコアを用いて、1計算あたり10万から600万コア時間のシミュレーションを行う。SuperMUCを用いた10億体分子の結果はすでに出始めている(図2参照)。またPRACEについては2012年11月から1年間、3,500万コア時間の計算資源を獲得している。

*1 Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator by CNU General Public license from the Sandia national Laboratory. 詳細は <http://lammps.sandia.gov> を参照。

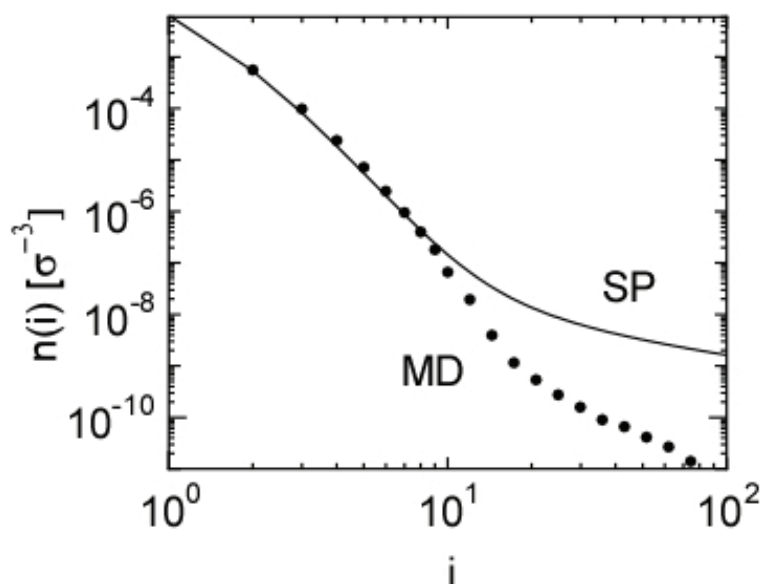


図 2 10 億体 LJ 分子(アルゴン)のクラスター分布例 (温度は 72K、過飽和比 $S=15.15$)。縦軸はクラスター数密度、横軸はクラスターに含まれる分子数 (MD 計算結果が黒丸。SP モデルが実線)。MD 計算では 8 桁にわたる分布が得られている。

本研究では MD シミュレーションにより過飽和状態のガスから凝縮核が作られる様子を再現し、核生成率やクラスター分布からクラスター生成のための自由エネルギーを評価する。本研究の目的は以下である。

SP モデルの適用できる範囲の明確化と新たなモデル構築

SP モデルは古典的核生成理論では考慮されてこなかった表面張力のサイズ依存性を導入し、その中に含まれるパラメータに第 2 ビリアル係数を用いて決定する。近年のモンテカルロ (MC) 計算による結果は、クラスター生成の自由エネルギーが大きな臨界核に対して SP モデルに反することを示唆している。本研究ではより大きな臨界核になる場合の計算を行い、クラスター分布から自由エネルギーを評価し SP モデルからのずれについて明らかにする。また SP モデルを超えた新たなモデルを構築する。

クラスター上の気体分子の付着確率の過飽和依存性

臨界核より大きいクラスターは安定であり、気相分子をさらに付着させることにより成長する。従来の研究では核生成率を決定するひとつの要素である付着確率は 1 に仮定されてきた。Tanaka et al. (2011) は、分子の付着確率が 1 ではなく、過飽和比 S に依存すること、また S と共に減少する傾向を示した[6]。しかし調べられた S の範囲はまだごく狭い。本研究ではより S の広い範囲に対して付着確率の S 依存性を明らかにすることが可能である。

微小クラスターの結晶化のその場観測

クラスター内の結晶化はもうひとつの核形成過程である。Tanaka et al. (2011) は、三重点より低い温度でさえ、クラスターはまず液体の状態ですべて核生成した後、結晶化することを示している[6]。本研究では、少数の大きなクラスター ($N=10^6-8$) に関して、結晶化過程の詳細を観察することが可能である。

おわりに

本研究ではまず最も単純で標準的なレナードジョーンズポテンシャル (LJ 分子) について扱う。次に具体的な重要物質である H_2O 分子について計算を行うことを計画している。本講演ではこのレナードジョーンズ分子に対する大規模計算の初期結果を紹介する。

参考文献

1. A. Dillmann and G. E. A. Meier, J. Chem. Phys. 94, 3872 (1991).
2. K. Yasuoka and M. Matsumoto, J. Chem. Phys. 109, 8451 (1998).
3. K. Yasuoka and M. Matsumoto, J. Chem. Phys. 109, 8463 (1998).
4. K. K. Tanaka, H. Tanaka, K. Kawamura and K. Nakazawa, J. Chem. Phys. 122, 184514 (2005).
5. J. Merikanto, E. Zapadinsky, A. Lauri, I. Napari and H. Vehkamäki, J. Chem. Phys. 127, 104303 (2007).
6. K. K. Tanaka, H. Tanaka, K. Kawamura and T. Yamamoto, J. Chem. Phys. 134, 204313 (2011).

氷の構造・電子状態解析のための 極低温超高真空透過型電子顕微鏡の開発

香内 晃¹、渡部 直樹^{2,3}、日高 宏¹、羽馬 哲也²、中坪 俊一⁴、藤田 和之⁴、
新堀 邦夫⁴、池田 正幸⁵

1. 雪氷新領域部門宇宙雪氷学分野
2. 雪氷新領域部門宇宙物質科学分野
3. 共同研究推進部
4. 技術部装置開発室
5. 技術部共通機器管理室

はじめに

香内他(2009)では、開発中の超高真空・極低温透過型電子顕微鏡の仕様を紹介した。その後、超高真空透過型電子顕微鏡本体は日本電子での製作が完了し低温研に設置された。それと並行して、低温研で電子顕微鏡本体に取り付けるさまざまな部品の開発・製作を進めてきた。本稿では、その現状や問題点を報告する。

超高真空透過型電子顕微鏡本体

電子顕微鏡本体は、まずターボ分子ポンプで排気し、続いてイオンポンプおよびチタン・サブリメーションポンプで本排気をおこなう。試料周辺の真空度向上のため、二組の液体窒素シュラウドがついている。この状態で、 1×10^{-9} Torrの真空度を達成した。分解能は、80–200 kVで0.14nmを達成している。また、試料を透過した電子線のエネルギー分析ができるイメージング・フィルター(詳細は香内他、2009を参照)も装備されている(図1)。

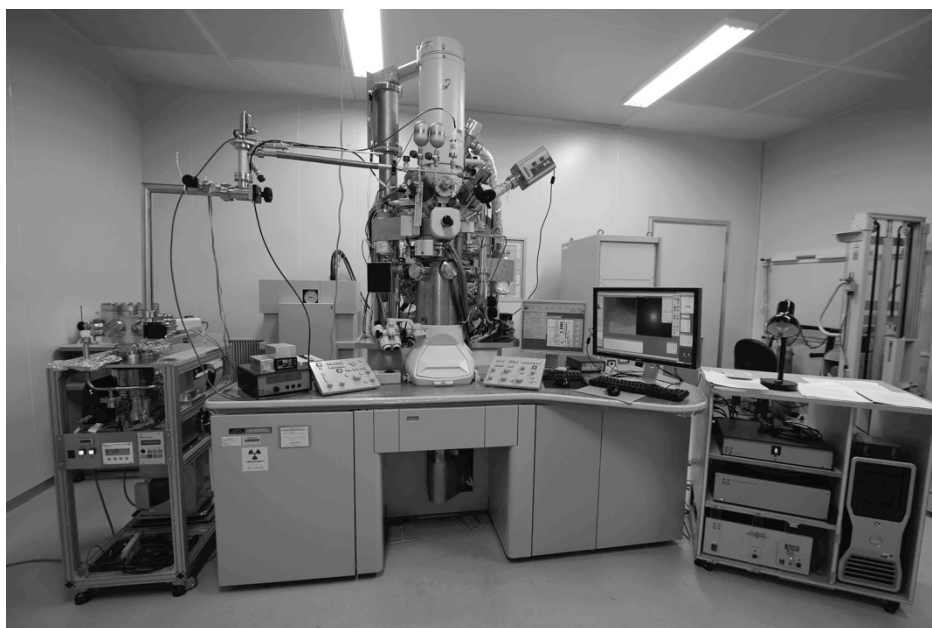


図1 超高真空・極低温透過型電子顕微鏡の全景。

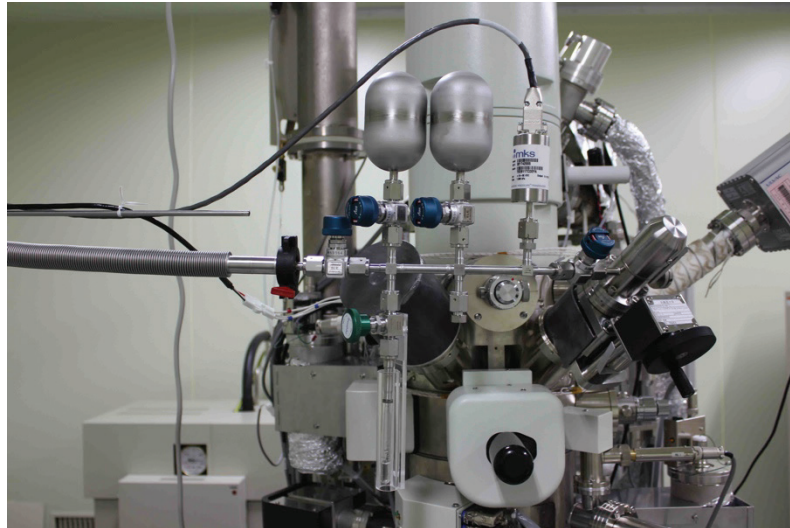


図 2 ガス導入系およびガス混合系。左側が真空排気用フレキシブルチューブ。



図 3 チタン製ガス導入パイプ

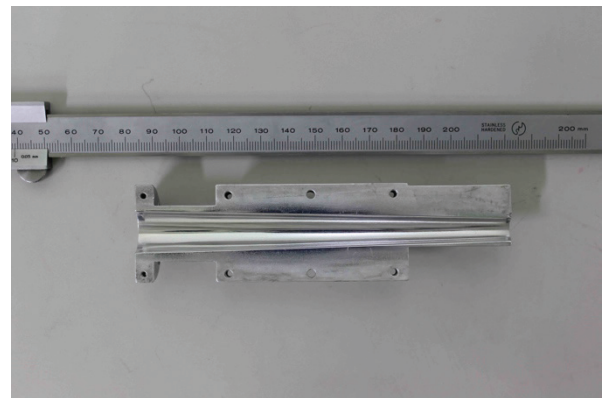


図 4 純アルミニウム製紫外線ガイドパイプ。鏡面研磨面に研磨剤がめり込み使用できなかった。

付属部品の開発

ガス導入機構

氷を作るためには、水蒸気や他のガスの導入機構が必要になる。図 2 はガス混合系およびガス導入バルブである。通常は、ガスを試料基板付近に導入するためにステンレス製のチューブを用いている。しかし、電子顕微鏡では、試料基板の上下にはポールピースと呼ばれている強い磁場を作っているレンズがあり、磁性体のパイプは使用できない。一般にステンレスは磁性を持たないが、加工時に磁化することがあり、ポールピース周辺では使用することはできない。そこで、チタン製のガス導入パイプを外注で作製した(図 3)。外径 1 mm のパイプを絞ることによって外径 0.6 mm のパイプを作製した。ガス導入系と真空排気装置の間は、肉厚 0.15 mm のフレキシブルホースでつなぐことにより、真空排気系の振動を除去した(図 2)。この状態でも、0.14 nm の分解能を達成している。また、真空排気装置も磁気浮上型のターボ分子ポンプを用い、さらに、荒引き用の油回転ポンプの振動がターボ分子ポンプに伝わらないような工夫を施した。

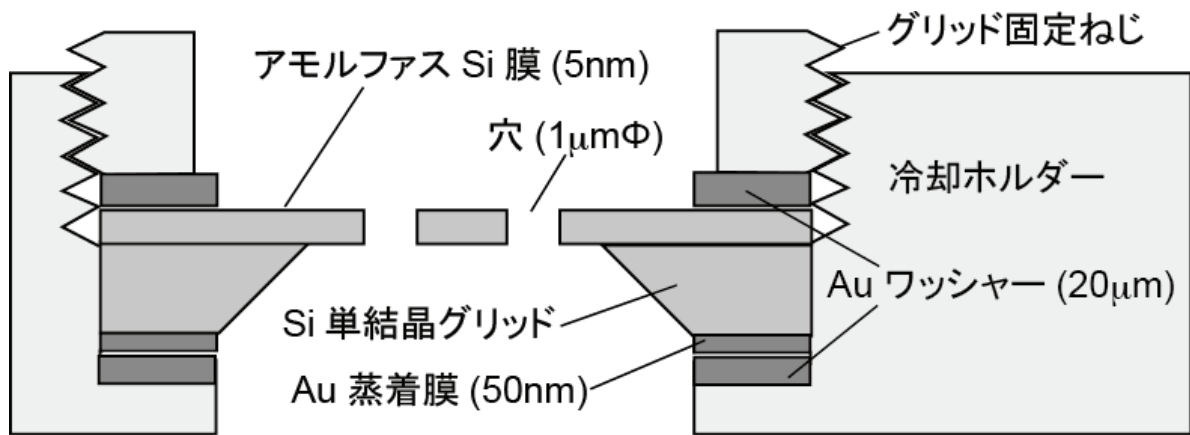


図5 シリコン単結晶グリッドと冷却ホルダーへの取り付け法。

紫外線ガイド

氷に紫外線を照射するためには、市販の重水素ランプを用いるが、紫外線が試料以外の部分に照射されないようにするためのライトガイドが必要である。形状は長さが15cm程度のロート状のパイプであり、両端の直径は、それぞれ15mm、3mmである。紫外線を集光するためには、このロート状パイプの内面を鏡面研磨する必要がある。波長200nm以下の紫外線の反射率が大きな材料は、ほぼ純アルミニウムに限られる。純アルミニウムは柔らかいため鏡面研磨は難しく、超音波洗浄により研磨剤が純アルミニウムにめり込んでしまった。その結果、真空度が上がらなくなり、低温研での製作を断念した(図4)。結局、ロート状のパイプは、金型を作り、それに合わせて叩きだして作製し、内面は複合電解研磨をおこなった(いずれも外注)。重水素ランプの外側は鉛板で遮蔽した。

氷作製用基板薄膜

氷を作製するための基板となる薄膜は、氷の主成分である酸素原子よりできるだけ軽く、しかも熱伝導率の大きなベリリウムが理想的である。しかし、諸々の規制のため、国内でベリリウム薄膜を製作することはできない。そこで、次善の策として、市販の薄膜で最も薄い(コントラストの弱いイメージ)5nm厚のシリコン薄膜を使用することにした。このシリコン薄膜は穴のあいたシリコン単結晶グリッド上に載せられ、シリコン薄膜の上に氷を作製することになる。図5に示すようにシリコン単結晶と液体ヘリウム冷却ホルダー間の熱伝導を良くするために、シリコン単結晶グリッドの下の面に金をリング状に蒸着するとともに、シリコン単結晶グリッド上下に厚さ20μmのリング状の金箔を挟み込む(藤田、2012参照)。なお、イメージング・フィルターの調整(軸合わせ)のため、シリコン薄膜に収束イオンビーム加工により、直径1μm程度の穴を開けた。

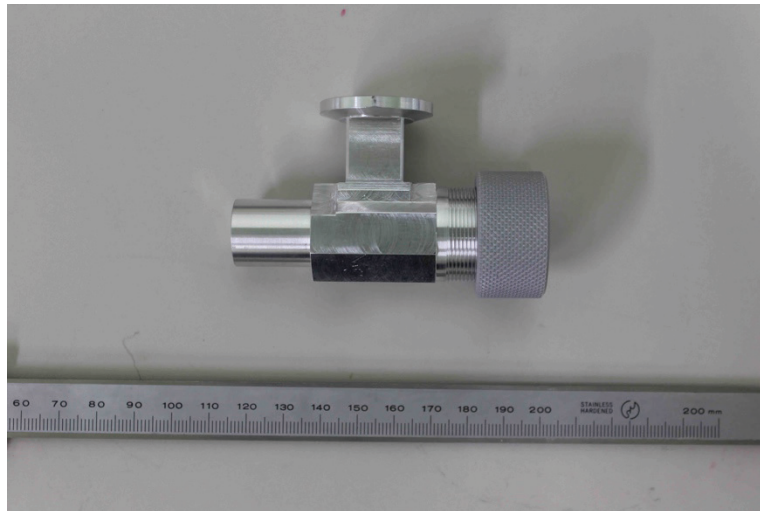


図 6 液体ヘリウムホルダー用軽量排気バルブ。

液体ヘリウムホルダー

上記基板薄膜を冷却するために、Gatan 社製の液体ヘリウムホルダーを用いた実験を始めた。しかし、以下に記すような種々の問題が明らかになった。液体ヘリウムの保持時間が 1 時間程度であり、基板薄膜の冷却後、氷凝縮を始めたところで液体ヘリウムがなくなってしまい、実験にはほとんど使用できない。温度調整範囲は 5–20 K であり、より高温で一定温度を保持する実験はできない。さらに真空漏れもひどく、液体ヘリウム容器表面に霜ができてしまい、ほとんど使い物にならない。現在、本来の使用法ではないが、軽量の真空排気用バルブを作製し（図 6）、真空を引きながら使用している。

おわりに

上記液体ヘリウムホルダーに関する諸問題を解決するために、現在、冷凍機を用いた冷却システムの開発に取り組んでいる。これらの問題は冷凍機の振動をいかに減らすかであり、種々の除振対策が鍵となる。

参考文献

香内 晃、日高 宏、渡辺 直樹 「超高真空・極低温氷作製透過型電子顕微鏡の紹介」北海道大学低温科学研究所技術部技術報告、**15**、3–4、2009 年 12 月。

藤田 和之 「打ち抜きによる Au リングの製作」北海道大学低温科学研究所技術部技術報告、**18**、29–32、2012 年 12 月。

打ち抜きによる Au リングの製作

藤田 和之

技術部装置開発室

はじめに

透過型電子顕微鏡（極低温超高真空透過型電子顕微鏡）を用いて、アモルファス氷の生成過程のその場観察ならびに氷の構造（マイクロからマクロ）・化学結合状態の解析を行う。この観察と解析において、透過型電子顕微鏡の鏡体内にある Si 単結晶グリッドとホルダーとの熱伝導が良くななくてはならない。そのため、Si 単結晶グリッドを 20 μm 厚の金 (Au) リングで挟む。今回、1. 熱伝導率が高いものに銀や銅があるが、酸化しにくく軟らかい材質で、かつ 10K (ケルビン) のときに比較的熱伝導率が高い金を用いること、2. リングの寸法は外径 $\Phi 3.0\text{ mm}$ (+0 mm、-0.05 mm) 内径 $\Phi 1.8\text{ mm}$ ($\pm 0.05\text{ mm}$) であること、の条件で Au リングを製作した。

加工方法

金箔は非常に高価で製品用の時しか加工できないため、金箔の厚み (20 μm) に近いアルミホイル (15 μm 厚) で試した。はじめはアルミホイルをワックスで固定用板に固定し、フライス盤で切削加工した。しかしこの加工方法ではワックスが貼りつきにくく、貼りついたとしても加工の途中ではがれた。そのため加工方法を打ち抜き*1に変更した。

打ち抜きの概念を図 1 に示す。金箔固定用治具の中心に打ち抜き用の穴をあけ、リング製作のためリング内側の輪とリング外側の輪を二段階で打ち抜く。

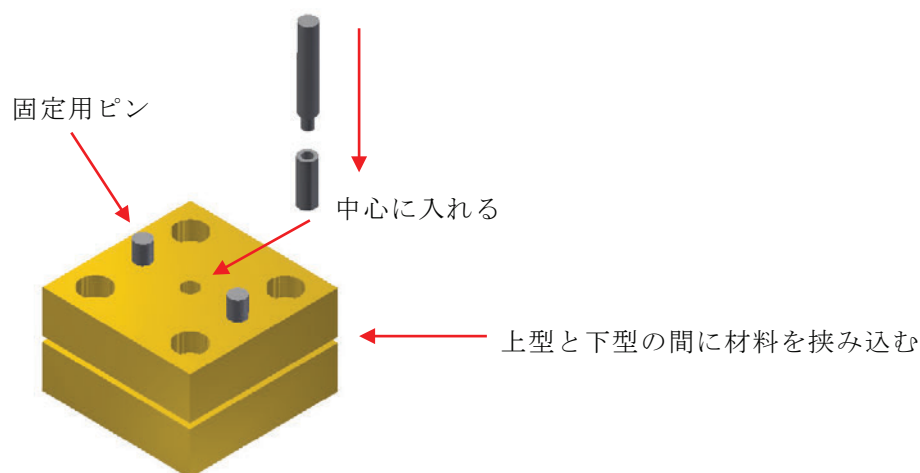


図 1 抜き型、内側抜き用凸型丸棒（オス型）と凹型パイプ（メス型）の概念。

*1 材料を二つ以上に分離する作業の中で多く利用されているせん断加工の一種であり、抜き型を使って板材から必要な形状の部品を形抜きする加工法のこと。抜き型さえあれば、壊れるまで何度でも同じ形に作ることができる。

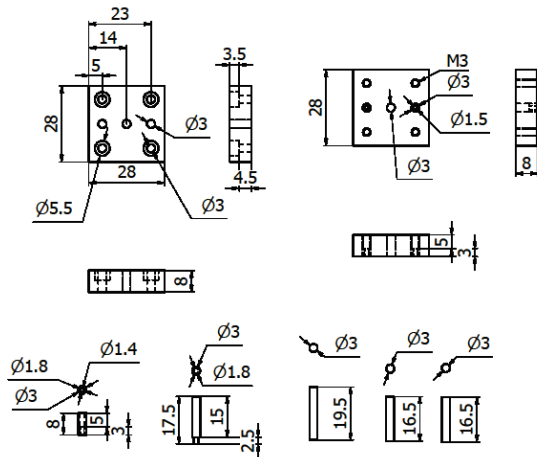


図 2 抜き型の設計図面。

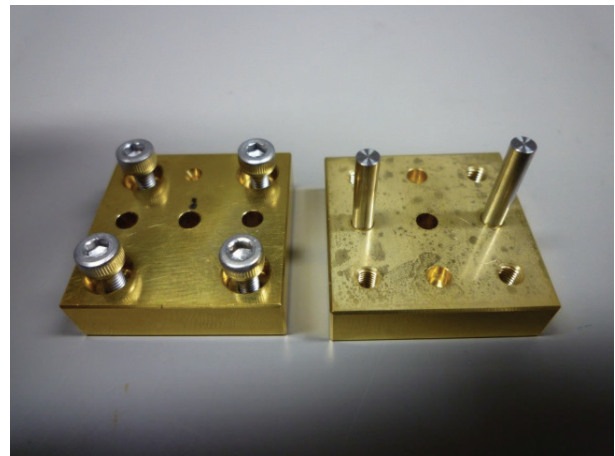


図 3 ピンを刺した金箔固定用治具。

抜き型の製作

抜き型の設計図面（図 2）と金箔固定用治具（図 3）を示す。金箔を 4 本のボルトで固定し、打ち抜く。この時、金箔がずれたり浮いたりしてしまうと、打ち抜いたリングの形が均一にならない。そのため、治具に 2 本のピンを付け加え、金箔がずれないように固定できる仕組みにした。

はじめ凸型丸棒（オス型）でリングの内側・外側を打ち抜こうとしたが、リングの外側を打ち抜くときは凸のない丸棒の方が打ち抜いたときの形状がきれいだったため、二段階で打ち抜く構造にした。具体的には内側抜き用凸型丸棒（オス型）を凹型パイプ（メス型）に押し込むことで内側を打ち抜き、それから凸型丸棒から凸のない丸棒（オス型）に変えて、金箔固定用治具を持ち、凹型パイプ（メス型）ごとリング外側を打ち抜くようにした。特に

- ・ 打ち抜き部分のオス型とメス型のはめ合わせ
- ・ 軸がずれないようにガイドのはめ合わせ
- ・ 刃の切れ味（オス型の刃の部分が丸いときれいに打ち抜けない）

の 3 点に気をつけた。加工が容易で強度も強いため、金箔固定用治具は真鍮を使用した。ガイド用のピンと打ち抜き部分のオス・メス型はステンレスを使用した。

試作の抜き型はガイド用ピンの穴径が大きすぎ、芯のずれが大きくなった。また、オス型の刃が少し丸くなり、切れなくなっていた。オス型とメス型のはめ合わせがきつすぎて噛む事が多かった。そのため、(正常に打ち抜く時もあったが)アルミホイルがぐしゃぐしゃになり打ち抜けない時もあったため、失敗箇所を注意して作り直した。

打ち抜き方法

打ち抜きの方法は以下の手順で行う。

1. 金箔を挟んで固定する（図 4）。
2. 下側にメス型パイプを入れて上から凸型丸棒で押し込み、リングの内側部分を打ち抜く（図 5）。
3. 下側のメス型パイプはそのまま、オス型の棒を凸型丸棒から段差の付いていない丸棒に変えて、メス型パイプごと押し込み、リングの外側部分を打ち抜く（図 6）。
4. 抜き出したリングを取り出す（図 7）。

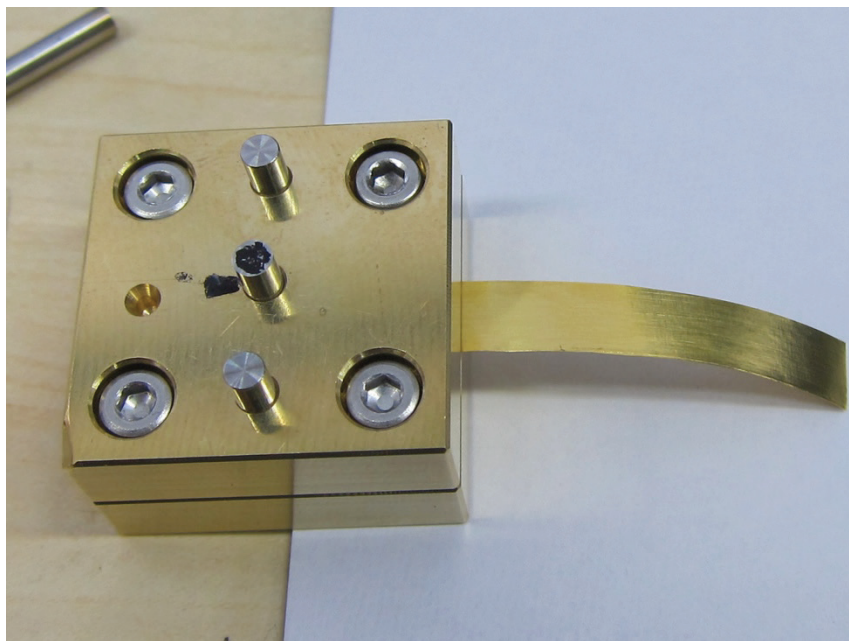


図 4 金箔を治具で固定した様子。

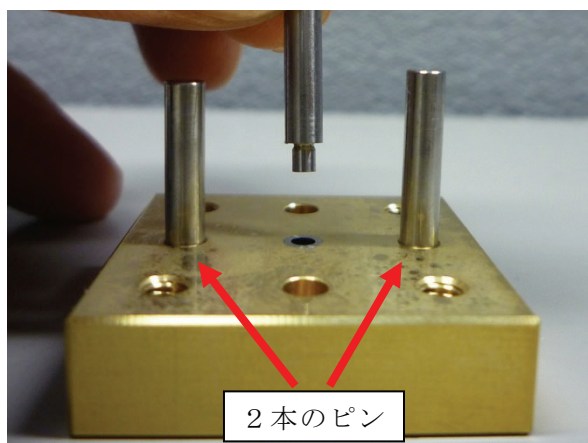


図 5 凸型丸棒（オス型）でリングの内側を打ち抜いている様子。わかりやすくするため、金箔固定用治具の上部を外した。

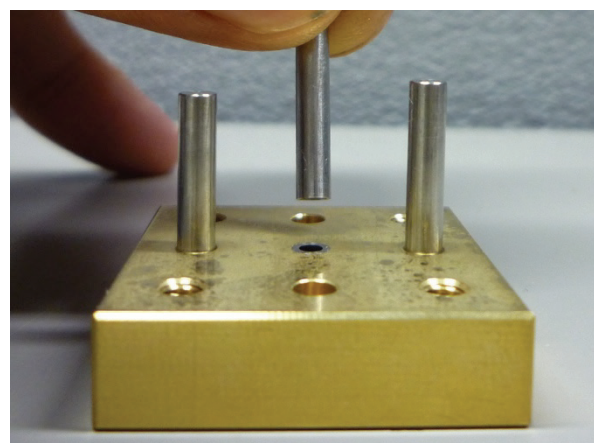


図 6 凸なし丸棒（オス型）でリングの外側を打ち抜いている様子。図 5 と同様に上部を外した。

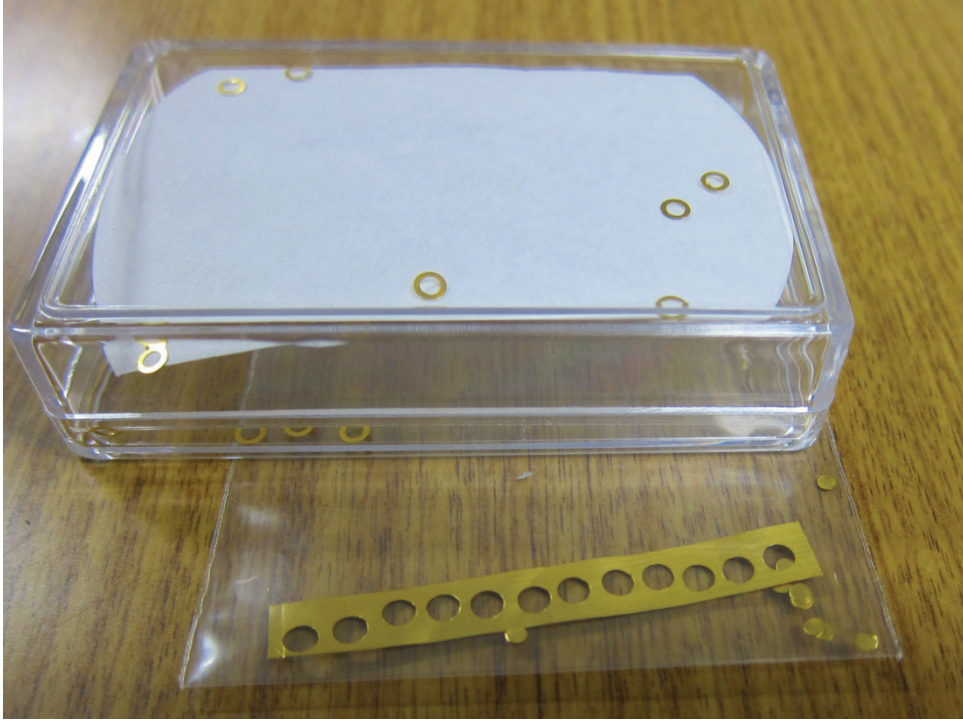


図7 リング完成品と打ち抜かれた後の金箔。

おわりに

完成した厚さ $20\mu\text{m}$ 金製リングは Si 単結晶グリッドを挟み込むことができ、実際に使用することができた。

テストにはアルミホイルを使用した。材質の特性として金の方がアルミよりも展延性が大きい、厚みが $5\mu\text{m}$ しか変わらないからか、打ち抜いた感触はあまり変わらなかった。

抜き型の製作では金箔固定用治具に 2 本のピンを挿すことで打ち抜き部分の軸を中心に合わせることができた。内側を打ち抜いてから外側を打ち抜く様に二段階にしたことにより、打ち抜いた面はきれいだった。精度の高い金型さえ製作すれば打ち抜き自体は短時間でできたので、加工方法は良い選択だったと思う。

打ち抜き加工でここまで精度が厳しいのは初めてだったが、打ち抜いた時のバリもなく問題なく使用できた。ガイド用のピンをもう少し太い径にすれば、ガイドが直立しやすくなって遊びがなく、更に精度の良い抜き型になると思う。また、4 本のボルトを締めて金箔を固定するが、トルクスレンチを使い均等な力でボルトを締めると更に精度が上がるのではないかと思う。

同位体組成が一定な氷作製のための水容器 および電磁バルブ制御系の開発

福士 博樹¹、中坪 俊一²、千貝 健¹、森 章一¹、香内 晃³

1. 技術部先端技術支援室
2. 技術部装置開発室
3. 雪氷新領域部門宇宙雪氷学分野

はじめに

雪氷新領域部門の宇宙雪氷学・宇宙物質科学分野では、実験室において、宇宙の条件（10–200 K, 10^{-8} Pa）で様々な氷を作製し、それらの物性を調べたり、氷表面での化学反応を調べる研究を行ってきた。しかし、これまでの研究では、作製した氷の同位体（H/D, $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$ ）には注意を払ってこなかった。今後、氷の同位体組成を制御した研究を展開しようとしており、同位体組成を制御するためのシステム構築を行っている。今回は、その一環として、ガス導入系の改良を報告する。

超高真空容器中の低温の金属基板に氷を作るためには、真空容器にガス（水蒸気）を導入するためのガス導入系を用いる（図 1）。これまでの装置では、以下の過程で同位体分別が生じる。1) 液体の水が水蒸気に蒸発する過程、2) 高真空にしておいた 1000 cc 程度の容器に水蒸気を導入し多層吸着が起きる過程、3) 微量リークバルブを通す過程、4) キャピラリープレート（内径数 μm 、長さ 1 mm 程度の毛細管を束ねてプレート状にしたもの）を通す過程。これらすべての過程で、水（水蒸気）は同位体的に軽くなり、最初の水の同位体組成とは相当異なる。作製した氷の同位体組成は、最初は軽いが時間とともに重くなり、同位体組成が不均質な氷となる。

今回は、以下の 2 つの方法で同位体組成の均質な氷を作製するためにガス混合系の改良を行った（図 2）。

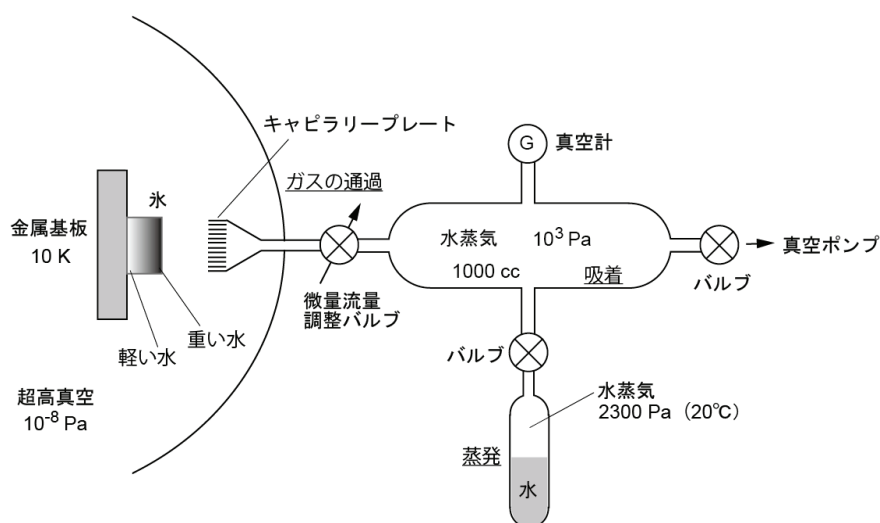


図 1 これまでのガス導入系。下線で示した箇所が同位体分別の起こる原因となる。

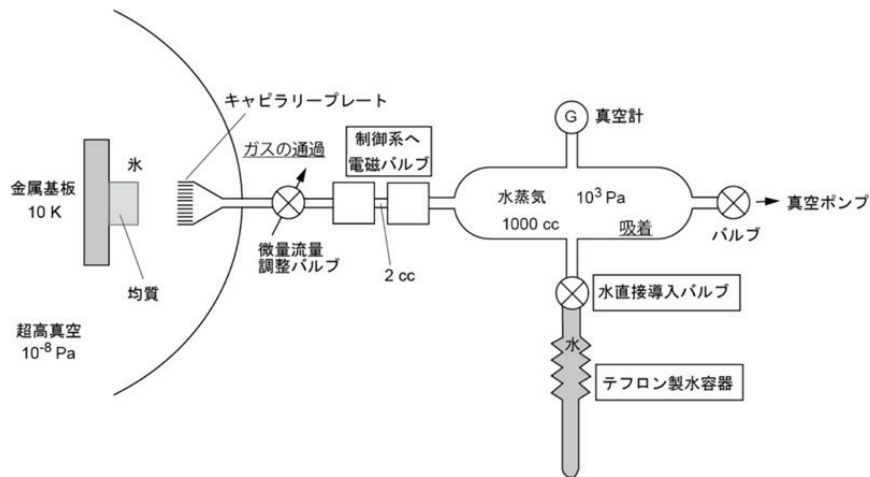


図 2 新しいガス導入系。四角で囲んだ改良部により、同位体的に均質な氷の作製が可能になる。



図 3 水容器の完成写真。

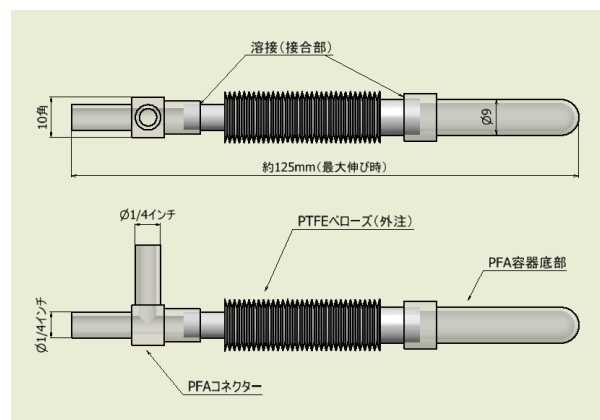


図 4 水容器の設計図。

1) の過程で、水蒸気ではなく、水を直接 1000cc 程度の容器に導入するために、水容器の水蒸気部分をなくし、分別が起こらないようにする。このためにテフロン製で容量を変化させることができる水容器を作製し、水直接導入バルブに接続することで、問題の解決を図った。

3) と 4) の過程における分別を避けることはできないので、1000 cc の容器から水蒸気を直接 3)、4) へ導入せずに、その前に 2 つの電磁弁で仕切られた 2 cc 程度の部分を通し、2 つの電磁弁の動作を制御することで、分別の起こらない氷を作製する（実際には分別が起こってしまうが、それらの影響が無視できるような氷の作り方をする）。

水容器の製作

水容器は水直接導入バルブが取り付けられ、容器自体が収縮するようベローズが設けられた形状である（図 2）。材質は PFA^{1*}と PTFE^{2*} のフッ素樹脂を加工し溶接したものである（図 3 と図 4）。

*1 四フッ化エチレン（C₂F₄）とパーフルオロアルコキシエチレンとの共重合体。

*2 四フッ化エチレン樹脂。

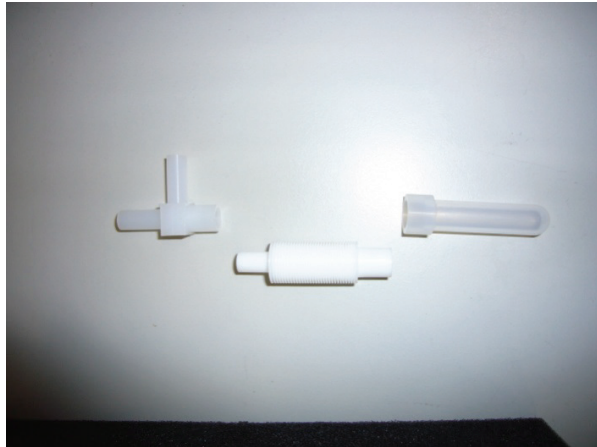


図 5 組み合わせ前の部品。



図 6 保持用治具（ジュラルミン製）。

PFA や PTFE などのフッ素樹脂の精密加工は以前にも経験があり、今回の加工に必要なとされた精密寸法仕上げ（コネクター部）、精密表面仕上げ加工（容器内の水が見える加工）の加工技術はあった。しかし、加工をした水容器の形状はこれまでの形状とは異なる。それは 1 つの材料から加工するには、製品とすることが非常に難しい形状であった。加えて、我々はベローズ加工の経験はなかった。そこで、水容器を 1 つの材料から加工するのではなく、幾つかの加工した部品を溶接して組み合わせることを検討した。PFA などのフッ素樹脂の溶接は外注により可能であった。樹脂製ベローズ加工についても、数社の企業が手掛けている。しかし、PFA 製ベローズは収縮度が小さく、今回の使用条件では使えなかった。そこで今回の使用用途に適しており、同じフッ素樹脂である PTFE を選定した（ただし、不透明で容器内に混入した気泡の有無は確認しづらい）。水容器は製作可能な 3 つのパーツを組み合わせ溶接する形状として設計した（図 5）。

容器底部は以前にも同様の形状をした容器を加工した経験があるため、その時の加工方法を用いた。しかし、容器上部のコネクターにおいて、このような形状をしたフッ素樹脂製コネクターを製作した経験がない。また精密寸法仕上げ、精密表面仕上げ加工という制約もあることから、最適な加工工程の検討と治具（図 6）の製作をおこなった。

フッ素樹脂は加工が容易だが、精密な寸法・形状維持が難しい。そこで、コネクターの加工段階に応じて 4 種類の治具をあらかじめ製作した後、検討した最適な加工方法をおこなった（図 7）。

PTFE ベローズの納品後、容器底部とコネクターの製作に取り掛った。ベローズとの接合部（溶接部：2 か所）はフッ素樹脂溶接業者の指示通り嵌めあい、溶接を委託した。

電磁バルブ制御装置の製作

図 2 の電磁バルブ部分を図 8 に示す。A および B の 2 つの電磁バルブで構成されている。この 2 つの電磁バルブを自動あるいは手動で動作させる。

真空容器のガスを、2 つのバルブ間の 2 cc 程度の空間に送り、それを別のバルブを通して別の真空容器に導入する。この際、同位体分別が起こらないようにするために、A と B のバルブをそれぞれ図 9 のように動作させる。

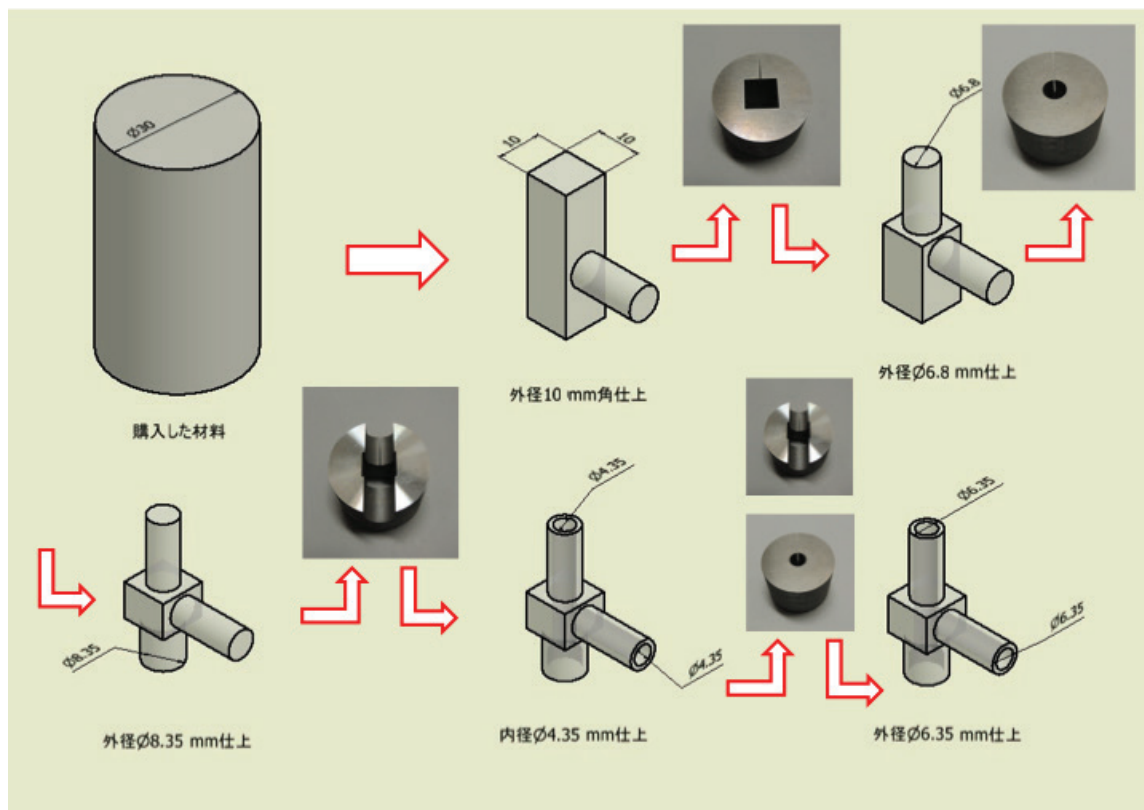


図7 コネクターの加工方法と治具の構成。

装置の仕様は以下の通りである。

1. 「manual」と「automatic」を設け、「manual」時は電磁バルブを手動で開閉する。
2. 2つの電磁バルブの動作状態を色違いランプで表示する。
3. t_1-t_4 を10秒から10時間で任意に設定可能とする。
4. 自動動作サイクルの繰り返し数 N を1から1000回まで設定可能とする。
5. 「automatic」に設定したあと、「start」スイッチを押すことで自動動作を始める。
6. N 回の繰り返しが終わった時は、両方のバルブが閉じる。
7. 「automatic」動作中から「manual」に戻した場合、バルブ開閉動作は行わず、そのままの状態を維持する。その後、手動にて開閉可能とする。
8. 現在動作中のシーケンスが t_1-t_4 のどこであるかを分かるようにする。

図9の電磁バルブ動作および仕様を満たすシーケンス制御をおこなうため、オムロン社製のタイマー4個にそれぞれ t_1-t_4 を設定した。「automatic」設定後、「start」により順次タイマーをトリガーしてゆく。1サイクルのシーケンス自動動作終了時、つまり2つ目の電磁バルブを解除した時点でカウンタをインクリメントさせ、繰り返し設定回数に達した時点で自動動作を終了させている。この場合、「reset」ランプを点灯させ、終了したことを知らせている。また動作途中で「reset」を押すと自動動作を解除し停止させている。

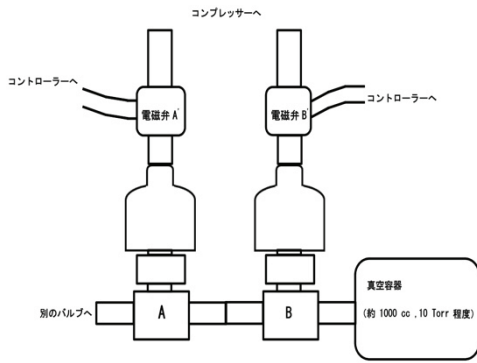


図 8 電磁バルブ。

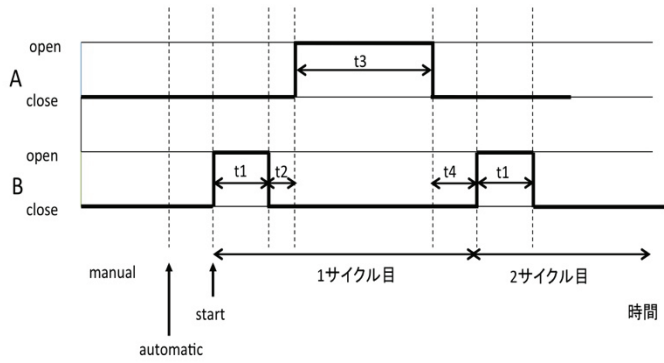


図 9 2つの電磁バルブ動作。

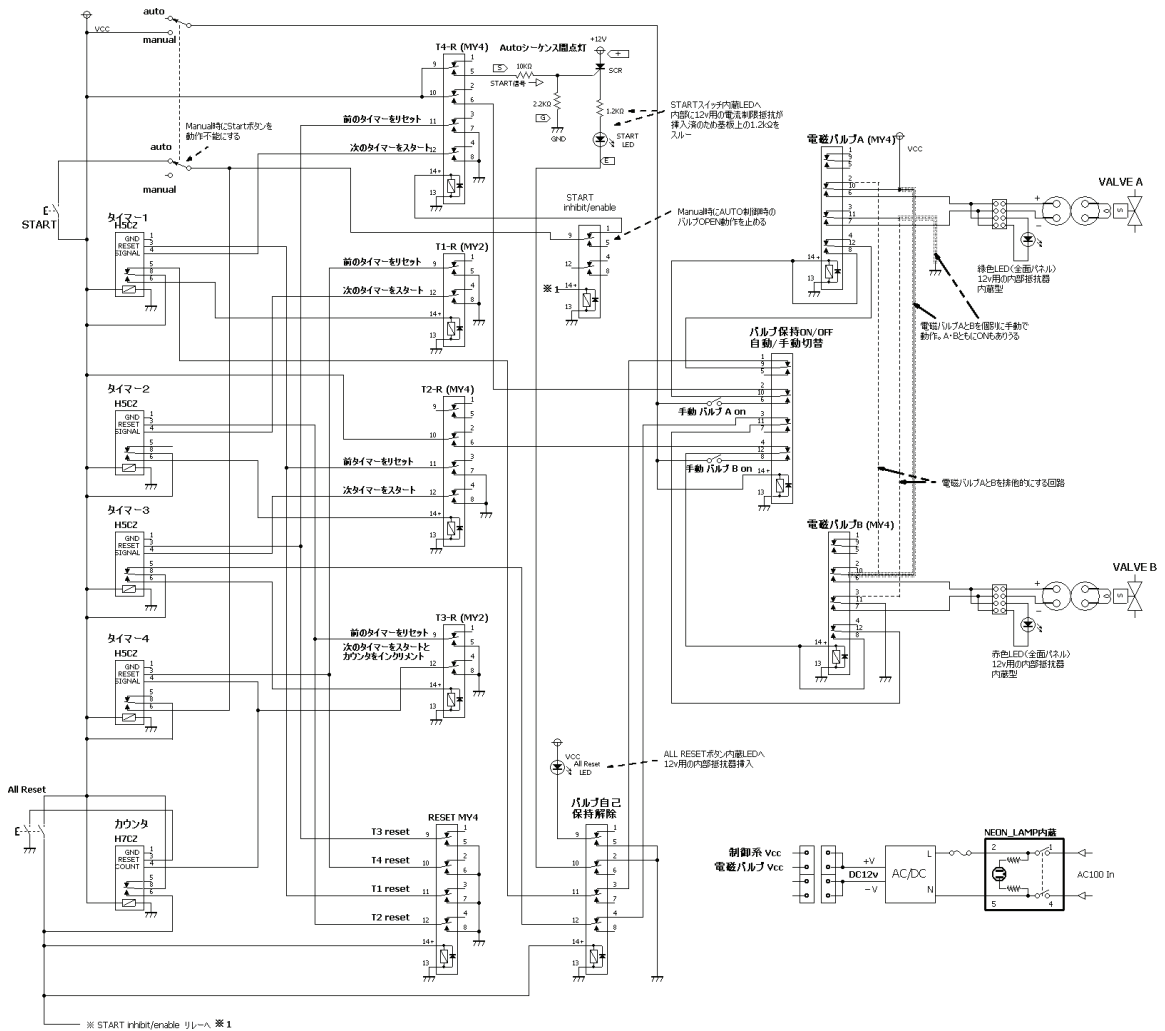


図 10 制御装置回路。

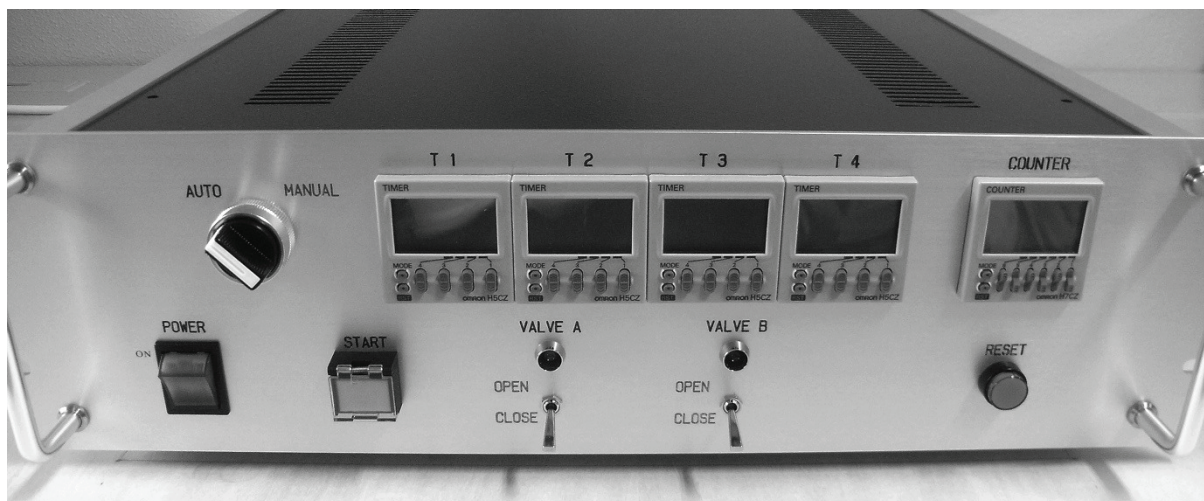


図 11 装置外観。

各タイマーからの中継や最終的な電磁バルブの駆動には MY リレーを用いている。これらの部品はレール上のソケットに装着し、部品や配線のレイアウトの自由度と故障が起きた場合の部品交換を容易にしている。また、一部回路に SCR^{3*} を使用し、「automatic」制御動作期間中は「start」スイッチを点灯させ誤操作の注意を促している。

タイマーからの出力はワンショット出力とし、後段の各リレーのソレノイド駆動を短時間に止め、最終的なバルブ駆動リレーのみを自己保持させている。バルブ駆動リレーは手動時に A、B バルブを片方ずつ、あるいは同時に動作させることが可能であるが、配線の変更により、2つのバルブの動作を相反関係にすることもできる。図 11 に完成した装置の外観を示す。

おわりに

水容器に使用したフッ素樹脂は、柔らかく変形し易く、かつ傷つきやすい。よって、加工する際、これらの欠点を補うため創意工夫された治具の製作が鍵となる。シーケンス制御回路はリレーなどによる論理回路の組み合わせが多い。個々の回路は単純なようでも、総体として複雑な動作や多種に渡る機器への制御が可能となる。そのため、仕様の異なる部品の選定にあたって、負荷となる制御対象を含めた幅広い知識が必要になる。

*3 Silicon Controlled Rectifier: シリコン制御整流子。サイリスタとも呼ぶ。

極低温表面原子反応によるメチルアミンの重水素化： 星間分子雲におけるその重水素濃集度の見積もり

大場 康弘¹、千貝 健²、渡部 直樹^{3,4}、香内 晃¹

1. 雪氷新領域部門宇宙雪氷学分野
2. 技術部先端技術支援室
3. 共同研究推進部
4. 雪氷新領域部門宇宙物質科学分野

はじめに

星誕生の場である星間分子雲では、これまでに 140 種以上の分子・ラジカル・イオン (= 星間分子) が発見されている。星間分子の中には、重水素 (D) を含むものも発見されている。たとえば、ホルムアルデヒド (H_2CO) とメタノール (CH_3OH) はともに代表的な星間分子であるが、それらの D 置換体 (HDCO、 CH_2DOH など) の存在度は標準体 (= 水素 (H) 置換体) の数十パーセントにおよぶ場合がある。このような高い重水素濃集度は、宇宙の平均重水素存在度 ($\text{D}/\text{H} \sim 10^{-5}$) および地球の平均的な重水素存在度 ($\sim 10^{-4}$) と比べて特異的に高い。そのため、星間分子の重水素濃集メカニズムは、化学進化解明のカギとなる重要な研究テーマだといえる。

星間分子の重水素濃集プロセスとして、気相でのイオン-分子反応がよく知られている。これは古くから実験的・理論的に研究されており、ある程度成果をあげてきた (たとえば、Gerlich and Schlemmer 2002)。しかし、メタノールなどの複数重水素置換体の存在量を説明することができないなど、気相反応のみでは星間分子の重水素濃集メカニズムを十分に説明できなかった。そのため、星間塵表面での反応も星間分子の重水素濃集に不可欠であると考えられている。われわれのグループではこれまでに、メタノール、ホルムアルデヒド、そして水の重水素濃集に関する研究をおこない、星間塵表面での反応が重要な重水素濃集プロセスであることを実験的に明らかにした (Watanabe and Kouchi 2008; Oba et al. 2012)。しかし、これまでの星間塵表面反応による分子の重水素濃集に関する研究は、数種の主要な分子 (メタノールなど) を対象としたものに限定されていた。

われわれは現在、星間分子雲におけるメチルアミン (CH_3NH_2) の重水素濃集に注目している。もっとも単純な有機アミン化合物であるメチルアミンは、星間分子雲におけるアミノ酸生成の原料となる可能性があり、生命誕生以前の化学進化 (= 分子進化) プロセスを解明するうえで重要な分子である。 CH_3NH_2 は星間分子雲で発見されているが、その重水素置換体はこれまでに宇宙空間で見つかっていない。それでも、メチルアミンが星間分子雲でメタノールのように重水素濃集している可能性は十分にある。そこで、メチルアミンが星間塵表面での反応でどれほど重水素濃縮するか調べるために、①極低温 (10 K) 固体表面における CH_3NH_2 と D 原子の反応による H-D 置換速度を実験的に求め、

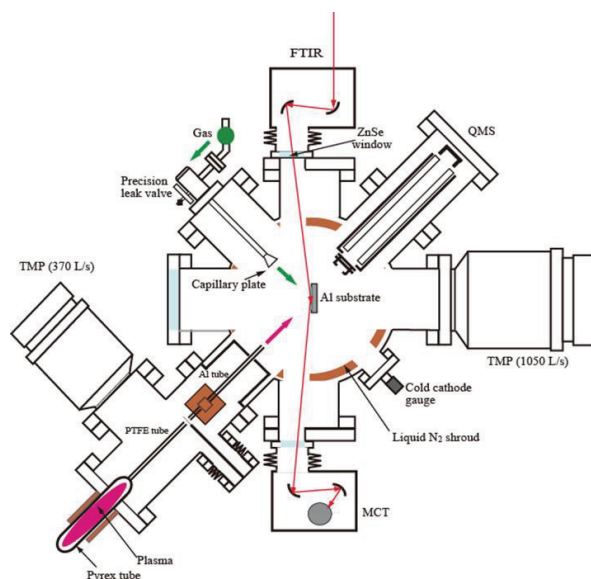


図1 極低温表面反応実験装置 (ASURA) の概略図。

②同様に、メチルアミンの重水素置換体 CD_3ND_2 と H 原子の反応による D-H 置換速度を求めた。そして、③数値計算によって、星間分子雲におけるメチルアミンの重水素濃集度を見積もった。

実験装置・操作

図1に実験装置 (ASURA) の概略図を示す。ASURA は複数のターボ分子ポンプで内部が排気され、到達真空度はおおよそ 10^{-10} Torr 程度である。反応チャンバーの中心に設置された基板 (10 K) 上に、30 分子層程度の固体メチルアミン層を作製した。続いて、原子源で作成した H 原子もしくは D 原子を基板上の固体メチルアミン (CH_3NH_2 、 CD_3NH_2 、 CH_3ND_2 、 CD_3ND_2) へ照射した。H 原子・D 原子はそれぞれ、 H_2 分子・ D_2 分子をマイクロ波放電によって解離させて作製した。反応はフーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR) でその場観測した。基板から脱離した分子は四重極型質量分析計 (QMS) で分析した。

実験結果

CH_3NH_2 へ D 原子照射すると CH_3NH_2 量が減少し、それにともない、メチルアミン D 置換体が生成した。これは CH_3NH_2 が D 原子と反応し、 CH_3NH_2 の H が D に置換したことを示す。昇温脱離法^{*1}で D 原子照射後の試料を分析すると、 CH_3NH_2 の水素がすべて D に置換された、 CD_3ND_2 の生成が確認された。また、メチルアミンのメチル基 (CH_3-) はアミノ基 ($-\text{NH}_2$) より速く H-D 交換 (= D 体化) した。

固体 CD_3ND_2 に H 原子を照射すると、メチルアミンのメチル基、アミノ基ともに D-H 交換反応が進行した (= H 体化)。H 原子照射後の試料を昇温脱離法で分析すると、すべての D が H に置換された CH_3NH_2 の生成が確認された。メチル基はアミノ基より D-H 交換速度が速かった。

*1 試料の分析法の一つで、反応基板の温度を一定速度で上昇させ、それにともなって基板から脱離する分子を QMS で検出して同定する。

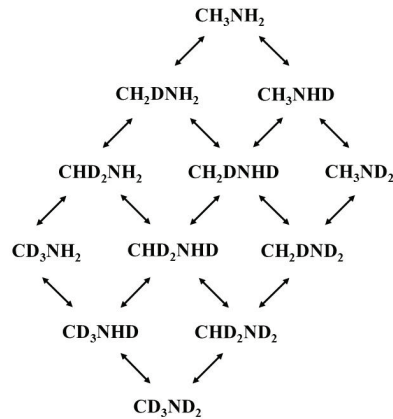


図2 メチルアミンと H 原子・D 原子の反応による水素同位体交換反応経路。
速度の差はあるものの、矢印で示すすべての反応が起きると考えられる。

置換基ごとに H-D 交換と D-H 交換速度を比較すると、メチル基では H-D 交換のほうが速く、アミノ基では H-D および D-H 交換速度に差は見られなかった。相対反応速度について、以下の関係が得られた（カッコ内の数字は速度の相対値）：
メチル基 H-D 交換(1) > メチル基 D-H 交換(0.4) > アミノ基 H-D および D-H 交換(0.1)。

表面反応によるメチルアミンの重水素濃集度

CH_3NH_2 と D 原子の反応による H-D 交換、および CD_3ND_2 と H 原子の反応による D-H 交換は、図 2 に示す経路で進行すると考えられる。そこで、図 2 に示すすべてのメチルアミンアイソトポログ*2 について反応速度式をたてた。たとえば、 CH_3NH_2 に関しては以下の反応速度式 (1) を立てることができる：

$$\frac{dn_{32}}{dt} = -k_{\text{C(H-D)}}n_{\text{D}}n_{32} + k_{\text{C(D-H)}}n_{\text{H}}n_{22} - k_{\text{N(H-D)}}n_{\text{D}}n_{32} + k_{\text{N(D-H)}}n_{\text{H}}n_{31}. \quad (1)$$

ここで、 n_{32} は CH_3NH_2 の量（3 はメチル基の H 原子の数、2 はアミノ基の H 原子の数を意味する）、 k は速度定数（添え字の C、N はそれぞれメチル基、アミノ基について、カッコ内は H-D 交換もしくは D-H 交換を意味する）である。また、 n_{H} 、 n_{D} はそれぞれ、H 原子、D 原子の存在量を示す。12 本の反応速度式を数値計算し、星間分子雲におけるメチルアミンアイソトポログ相対量の時間変化を求めた。

図 3 に、以下の条件におけるメチルアミンアイソトポログ相対量の時間変化を示す：星間分子雲の水素原子密度 n_{H} が 1 cm^{-3} 、D 原子/H 原子比が 0.01、初期状態 ($t=0$) では CH_3NH_2 のみ存在。時間の経過とともに D 置換体の相対存在量が増加し、メチル基の H が一つ D に置換した CH_2DNH_2 が、典型的な星間分子雲の寿命である 10^6 年後にもっとも多い D 置換体(全体の 2.4%)であった。ついでアミノ基の H が一つ D に置換した CH_3NHD が全体の 0.7%を占め、これら二種の一重水素置換体が、全重水素置換体量の大部分 (97.4%) を占めた。このときの $\text{CH}_2\text{DNH}_2/\text{CH}_3\text{NH}_2$ 、 $\text{CH}_3\text{NHD}/\text{CH}_3\text{NH}_2$ 比はそれぞれ 2.5×10^{-2} 、 7.8×10^{-3} という値を示した。これらの値は、星間分子雲におけるメタノールや

*2 化学組成が等しく、同位体組成が異なる分子。

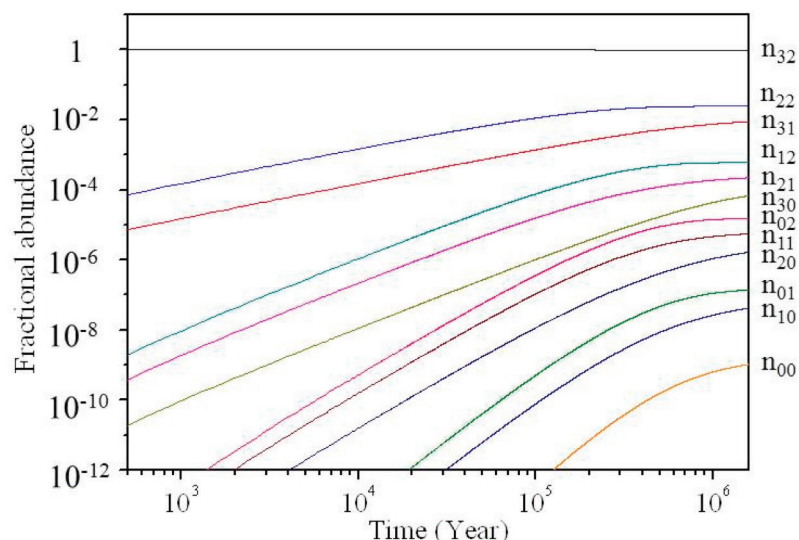


図3 極低温表面反応によるメチルアミンアイソトポログの相対存在量の時間変化。時刻 $t=0$ では CH_3NH_2 のみ存在, D 原子/H 原子比=0.01, 水素原子密度 $n_{\text{H}}=1\text{cm}^{-3}$ を仮定。 n_{XZ} はメチル基の H 原子が X 個、アミノ基の H 原子が Y 個あるアイソトポログの相対存在量を示す：たとえば、 n_{32} は CH_3NH_2 、 n_{11} は CHD_2NHD 。

ホルムアルデヒドなど、重水素置換体が発見されている分子の重水素濃集度に匹敵するほど大きい。したがって、メチルアミンは星間塵表面反応で重水素濃集可能だと結論できる。

おわりに

本研究では、星間分子雲におけるメチルアミンの重水素濃集に関する実験的な研究をおこない、得られた結果を解析して、メチルアミンが星間塵表面反応で重水素濃集可能であることを見出した。一つのグループで実験的な研究とコンピューター解析を取り入れた例は少なく、画期的な研究だといえる。本研究結果は、実際の星間分子雲環境におけるメチルアミンの重水素濃集を議論するうえで重要である。一方で、本研究の重水素濃集モデルでは計算の簡略化のために限られたパラメーターのみを与えて計算しているため、より詳細なメチルアミンの重水素濃集メカニズム解明にはさらに研究が必要である。

参考文献

- Gerlich, D. and Schlemmer S., 2002. Deuterium fractionation in gas-phase reactions measured in the laboratory. *Planetary and Space Science* **50**, 1287–1297.
- Oba, Y., Watanabe, N., Hama, T., Kuwahata, K., Hidaka, H. and Kouchi, A., 2012. Water formation through a quantum tunneling surface reaction, $\text{OH} + \text{H}_2$, at 10 K. *The Astrophysical Journal* **749**, 67 (12pp).
- Watanabe, N. and Kouchi, A., 2008. Ice surface reactions: A key to chemical evolution in space. *Progress in Surface Science* **83**, 439–489.

流氷とシークラッターの識別

大井 正行^{1,2}, 千貝 健³, 福士 博樹³, 藤吉 康志²

1. (株) ジェイ・ツー
2. 水・物質循環部門雲科学分野
3. 技術部先端技術支援室

1 はじめに

流氷の到来および退去時の季節には、船舶関係者にとって流氷の情報は重要である。これまで我々が行っているレーダー観測において、この季節はシークラッターによって流氷の識別が困難になる場合が多い。この理由は、一般的に移動中の流氷の規模または面積が付近海域に比べて小さい場合、流氷域による海面域の風波の吸収・消波作用が起きないためと考えられている [1]。さらに、シークラッターが顕著に発生した場合には、レーダーの反射強度が飽和状態に近くなり、ドップラー機能を持たないレーダーによって過去に行われた「LOG/CFAR^{*1}」や「シークラッター信号の統計的特性を利用した距離およびアンテナ回転ごとの相関処理」によるシークラッターの抑圧策は有効とはいえなかった。

ドップラーレーダーによる流氷観測において、従来から行われている流氷からの反射強度に代え、パワースペクトル幅による識別を試みた。結果、非常に良い効果が得られたので、その観測例を中心に報告する。

2 ドップラーспекトル幅

ドップラーレーダーの観測から得られる3つの基本要素は、反射強度、平均ドップラー速度、さらにスペクトル幅である (図1)。我々が運用しているドップラーレーダーの信号処理装置、米国 Sigmet 社製 RVP8 出力のスペクトル幅 W は以下のように与えられている [2]。

$$W = \frac{\sqrt{\text{Variance}}}{\pi}, \quad (1)$$

$$\text{Variance} = 2 \ln \frac{R(0)}{|R(1)|} \quad \text{for large SNR}, \quad (2)$$

$$\text{Variance} = \frac{2}{3} \ln \frac{|R(1)|}{|R(2)|} \quad \text{for small SNR}. \quad (3)$$

ここで $R(\tau)$ は気象エコーからの受信波のサンプリング列から得られる離散的時系列信号の自己相関関数であり、 τ はこの時の時間差 (タイムラグ)、SNR は信号対雑音比である。

(2)、(3) 式は、一般に成り立つ以下の関係を用いている：ある関数 $f(x)$ のフーリエ変換後の関数 $F(k)$ は、もとの関数に含まれる周波数を記述するが、いま、 $f(x)$ を正規分布 (ガウス分

*1 LOG/CFAR: Log-Amp/Constant False Alarm Rate. クラッターの振幅波高分布がレイリー分布に従うと仮定してこれを対数増幅して平均値をとる。次に、対数増幅された本来のクラッターからその平均レベルを減算すると直流成分が除去された CFAR 特性が得られる。一定振幅に揃えられたクラッターは、閾値を決めてクラッターの誤警報確率を一定に抑えて目標の検出を可能とする。

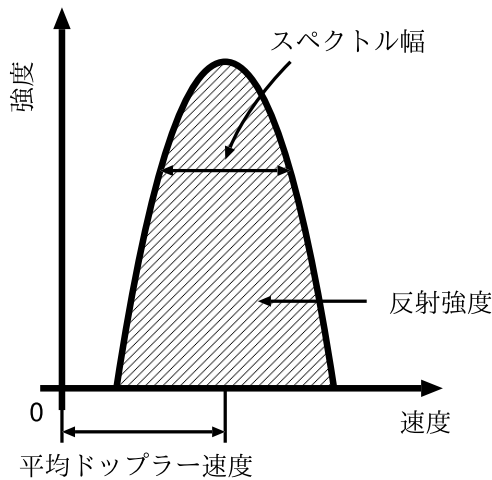


図1 ドップラーレーダー3基本要素

表1 紋別市設置ドップラーレーダー諸元

レーダーアンテナ設置高	300 m
アンテナビーム幅 水平/垂直	1.1 度/ 1.1 度
送信出力	70 kW
送信周波数	9410 MHz
繰り返し周波数/パルス幅	1000 Hz / 0.9 μ sec

布、 μ : 平均, σ^2 : 分散, S_0 : 任意の定数)

$$f(x) = \frac{S_0}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

とし、これをフーリエ変換すると

$$F(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dx f(x) e^{ikx} \quad (5)$$

$$= \frac{S_0}{2\pi} \exp\left(-\frac{k^2\sigma^2}{2}\right) e^{ik\mu}, \quad (6)$$

$$|F(k)| = \frac{S_0}{2\pi} \exp\left(-\frac{k^2\sigma^2}{2}\right) \quad (7)$$

となる。 $k = 0, 1, 2$ のとき

$$F(0) = \frac{S_0}{2\pi}, \quad |F(1)| = \frac{S_0}{2\pi} \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2}\right), \quad |F(2)| = \frac{S_0}{2\pi} \exp\left(-\frac{4\sigma^2}{2}\right) \quad (8)$$

となるが、これらから σ^2 を求めると以下ようになる。

$$\sigma^2 = 2 \ln \frac{F(0)}{|F(1)|} \quad \text{or} \quad \sigma^2 = \frac{2}{3} \ln \frac{|F(1)|}{|F(2)|}. \quad (9)$$

3 ドップラーレーダーのスペクトル幅データによる観測例

レーダーによる流氷の最大探知距離は、レーダーアンテナ高によって決まり、紋別市設置のドップラーレーダー（表1）では56 kmである。流氷からの反射強度（Reflectivity, dBZ）は、雲などの気象エコーに比べて弱い。特に初期の流氷は薄く・平坦な場合が多く、さらに遠距離にある場合、電波伝搬上の性質による距離減衰（距離のマイナス7乗）によって一層微弱となる[3]。

レーダー観測期間中のおよそ3/4は、反射強度で判別が可能である。残る1/4は主にシークラッターなどの発生によって流氷との識別ができない。このような場合、従来までは時間経過による変化を追跡して識別を行っていたが、有効ではなかった。

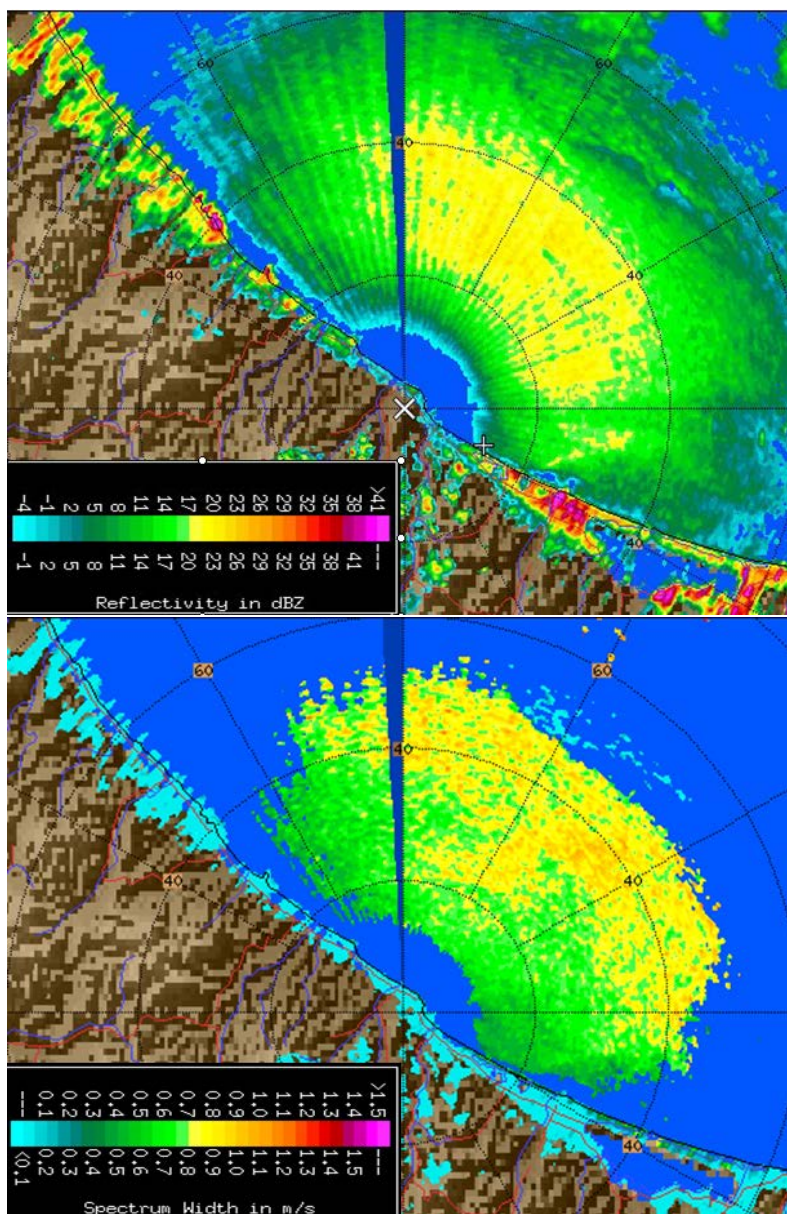


図 2a

16 JAN 2012 05:35
REFLECTIVITY (dBZ)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km

※シークラッター海域内に見られる傘状の回転ムラ(スポーク)は、過去に近接の落雷によりレーダーアンテナが故障していたため。

図 2b

16 JAN 2012 05:35
SPECTRUM WIDTH (m/s)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km

SQI Threshold : 0.4 dB

以下では、スペクトル幅 (Spectrum Width) 表示による観測例を示す。観測例は、反射強度で流氷とシークラッターとが識別ができない事例のみを対象とした。

スペクトル幅の最大表示距離は、計算の誤り率を防止するために最適な閾値 (SQI: Signal Quality Index) を設定しているため反射強度よりも少なく、最大 53–55 km までとなっている。なお、以下に上げた図の地形は、全て紋別レーダーサイトを中心として北西から南東方向の斜めに海岸線があり、その上側が海に当たる。

3.1 2012 年初到来時の流氷

図 2a の反射強度による表示では、シークラッター域が 60 km に及んでいる。60 km 以遠にあるエコーは雲である。画面中心の紋別から方位 15–70 度、距離 50 km にシークラッターが途切れている海域が観測されるが、これを流氷とは断定できない。図 2b のスペクトル幅によ

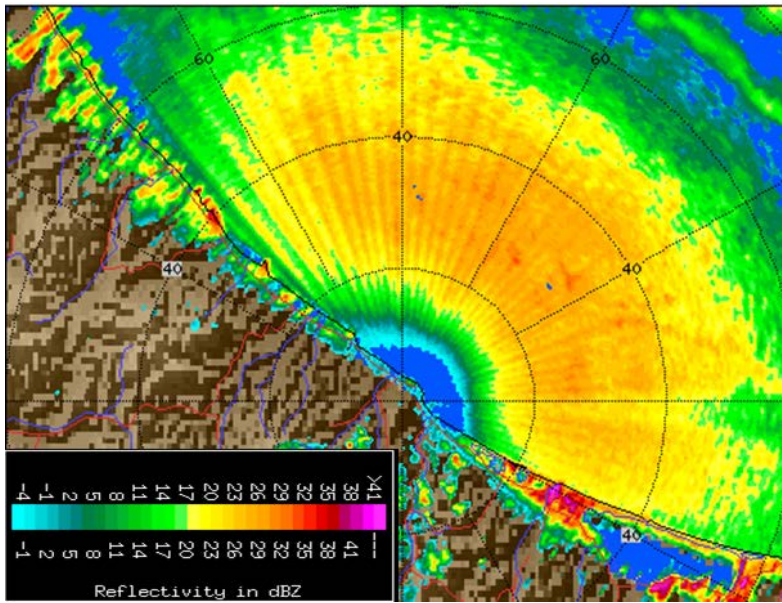


図 3a

21 FEB 2012 19:30
REFLECTIVITY (dBZ)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km

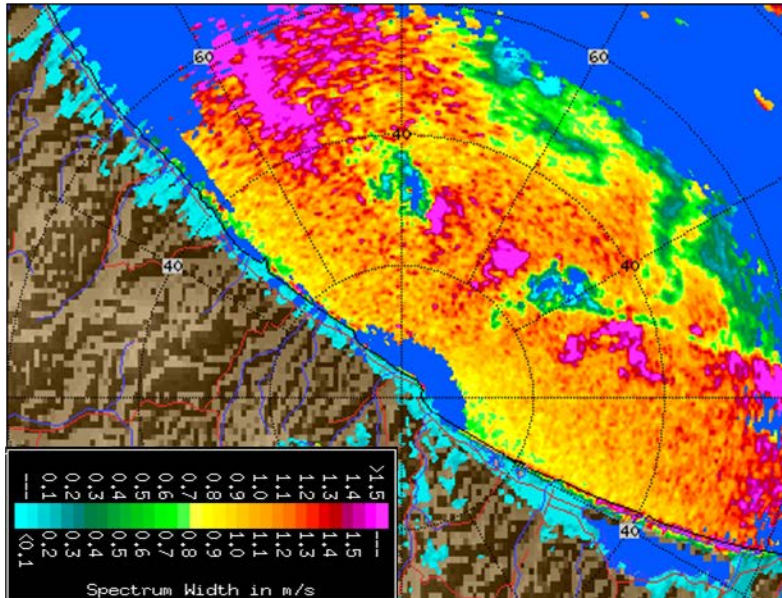


図 3b

21 FEB 2012 19:30
SPECTRUM WIDTH (m/s)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km
SQI Threshold: 0.4 dB

る表示では、シークラッター域のスペクトル幅は、同図にあるカラーバーから、0.5–1.1 m/s となっており、この海域内には流氷は存在していない。しかし、紋別から方位 20–55 度、距離 47–53 km に流氷が点在していることが判る。流氷のスペクトル幅は、海岸線を示すグラウンドエコーと同様に小さく 0.1–0.2 m/s となっており、シークラッター域とは明らかに異なっていることが判る。また、本画面の 60 km 内には雲エコーが無い。

3.2 従来では識別不可能なシークラッター内に埋もれた流氷の検出例

図 3a の反射強度表示では、シークラッター域が 65 km まで達していることだけが判るが、流氷の存在は全く識別できない。しかし、図 3b によるスペクトル幅表示では、シークラッター域内で海岸に平行して沖合い 30 km に雲エコー (Spectrum Width: 1.5 m/s) が重畳して北西から南東方向へ移動している。流氷の存在は、1. 紋別の北 28–37 km、2. 紋別から方位 55

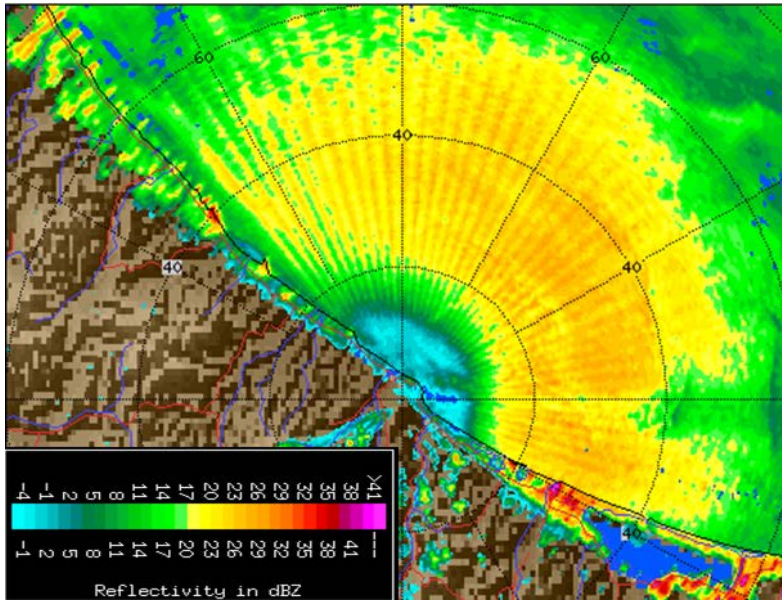


図 4a
 4 APR 2012 14:00
 REFLECTIVITY (dBZ)
 Antenna Elevation: 1.1
 Max Range: 60 km
 Range circle apart: 20 km

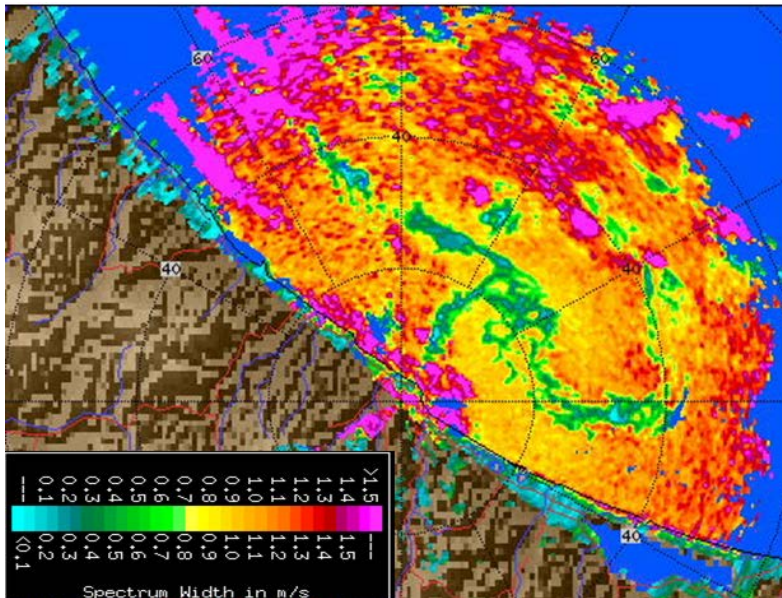


図 4b
 4 APR 2012 14:00
 SPECTRUM WIDTH (m/s)
 Antenna Elevation: 1.1
 Max Range: 60 km
 Range circle apart: 20 km
 SQI Threshold: 0.4 dB

度、距離 20–33 km（ここから東の方向に 4. まで延びている）、3. 方位 20–40 度、距離 45–56 km、4. 方位 50–85 度、距離 45–56 km（筋状の流氷）、5. 方位 95 度、距離 56 km の各海域に明らかに流氷が検出されている。

3.3 退去期の流氷

図 4a では、シークラッター域が 60 km を越え、これに雲エコーが海域全体に重畳しているように観測されるが、流氷エコーは全く識別できない。図 4b では、流氷が 1. 海岸線に平行して沖合い 25 km に帯状に長さ約 75 km、さらに 2. 北東方向に 40 km に帯状に長さ 20 km、3. 北方向 50 km、4. 北北東～北東方向 50 km 等々に流氷域が明確に識別できる。本図は、図 4a では識別が全く不可能な例にもかかわらず、スペクトル幅表示によって流氷の識別が良好な例である。

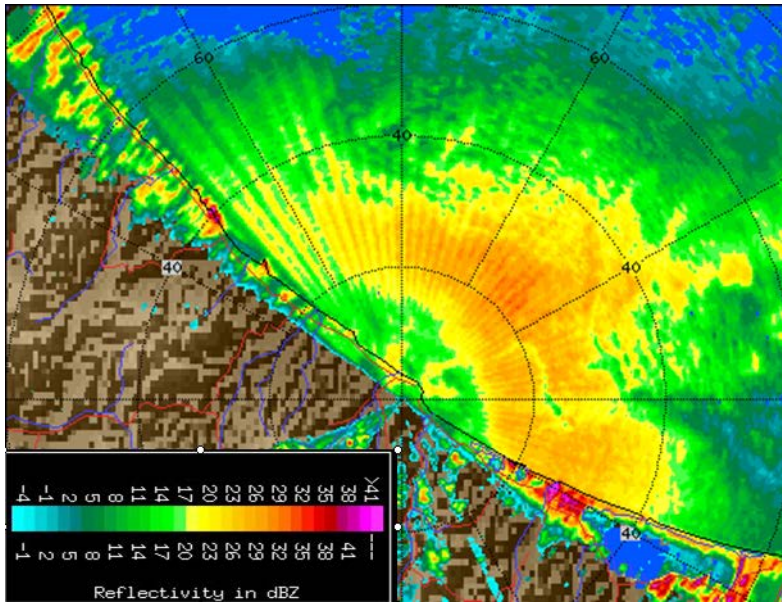


図 5a

24 FEB 2012 06:30
REFLECTIVITY (dBZ)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km

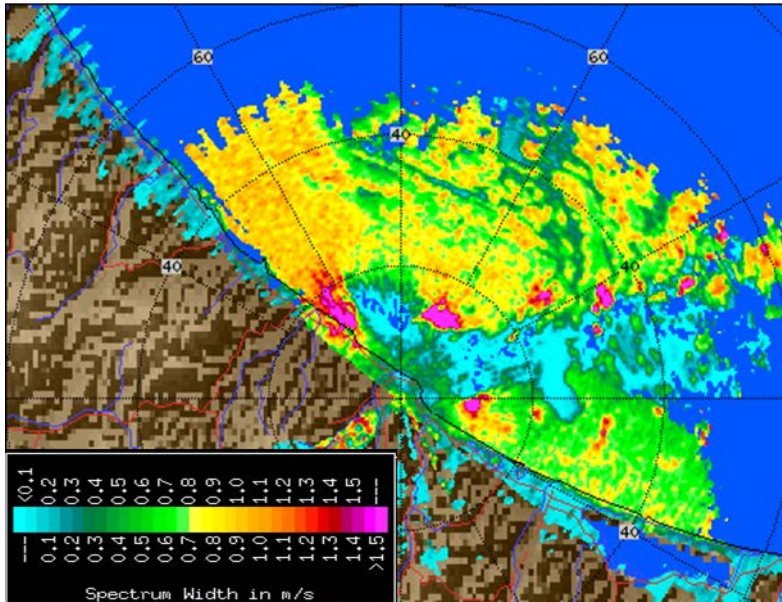


図 5b

24 FEB 2012 06:30
SPECTRUM WIDTH (m/s)

Antenna Elevation: 1.1
Max Range: 60 km
Range circle apart: 20 km
SQI Threshold: 0.4 dB

3.4 気象エコー通過の影響を受け、流氷域に部分的な誤り域が発生した例

図 5a では、シークラッター域が約 50 km に及んでいるが、強力ではない。方位 345–90 度、距離 36–50 km の広い海域に筋状のエコーが現れているが、これが流氷かあるいは雲によるものであるかは識別できない。図 5b では、方位 345–60 度、距離 30 km 以遠の広い海域に図 5a と同様な複雑な筋状のシークラッターが発生していないエコーが観測される。これは流氷による消波作用によってシークラッターが発生していない海域と推測できる。また、紋別から東方向に幅が約 10 km 連続したエコーが認められる。これは本来であれば流氷域と考えられるが、実際は紋別からおよそ 20 km 以内の海域は流氷ではなかった。これは気象エコーの影響でスペクトル幅表示に誤りが生じた結果か、あるいはその時の状況が流氷やグランドエコーと同じスペクトル幅であった結果と考える。図 5c にドップラー速度表示を示したが、海

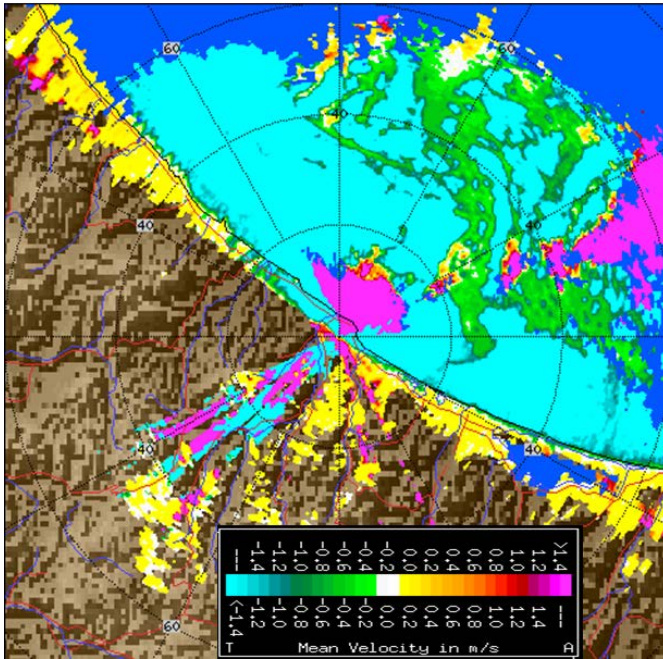


図 5c

24 FEB 2012 06:30

VELOCITY (m/s)

Antenna Elevation: 1.1

Max Range: 60 km

Range circle apart: 20 km

SQI Threshold: 0.4 dB

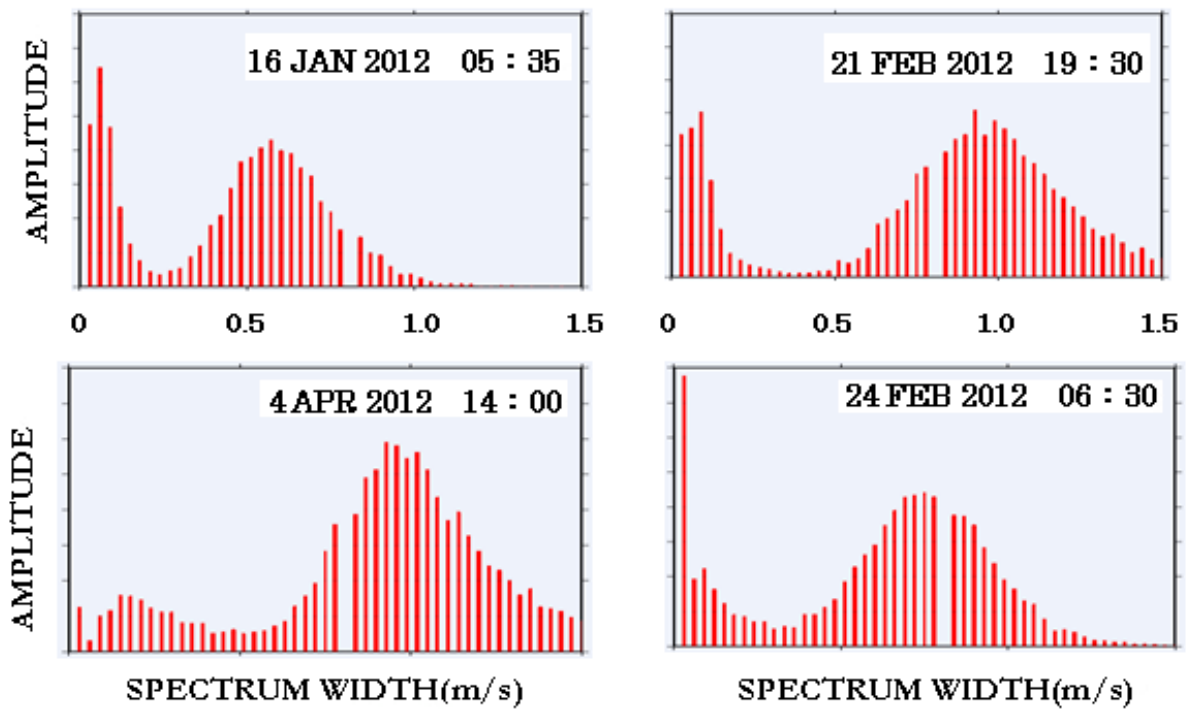


図 6 スペクトル幅によるヒストグラム

側に見える赤の領域が雲エコーであり紋別を中心に陸側の南東方向から海上へ出て東北東へ向きを変え 5 km/h 以上の速さで移動していることが判る。

図 6 は、図 2b から 5b のヒストグラムである。4 例は共に本報告の主旨から海面や雲によるクラッターが顕著な例のみをとり上げたにもかかわらず、4 月 4 日 14 時の 1 例を除いて流水や地形とクラッター域が明確に分れている。

4 おわりに

ドップラーレーダー観測におけるスペクトル幅データの利用は、航空機の *safty flight* の例をみても反射強度やドップラー速度に比べると非常に限られている。この理由は、大気の乱れなどの厳しい気象現象に対する信頼性の問題によるとされている [4]。

我々が行ったドップラーレーダーによるシークラッター海域に埋もれた流氷の検出は、1シーズンの短期間の観測結果からではあるが、強力なシークラッターの発生時においても極めて有効であることが判った。しかし、これに激しい気象エコーが重畳すると、部分的に誤りが発生することを認識した。

本来、レーダーによる気象エコーの反射因子は、任意の距離におけるレーダーアンテナのビーム幅とパルス幅によるサンプリング体積内の多数の降水粒子の集まりとされている。一方、流氷やシークラッターの場合は、レーダーアンテナ高からの俯角にあたる、アンテナビーム幅とパルス幅によるサンプリング面積内の種々の形状（凹凸）の集まりやそれら流氷表面の複素誘電率で決まるものと考えられる。さらに、レーダーアンテナから放射された電波は、物標からの直接波とその前面域で一旦反射してから本来の物標から反射される間接波、いわゆるマルチパス波の合成による複雑な伝播経路を経ると考えられている [3]。本報告では流氷に気象エコーの原理をそのまま利用したが、どのような場合に利用できるかなどのさらなる検証が今後に残された課題である。

参考文献

- [1] Aota, M., 1973: On the Discrimination between Sea Ice and Sea Clutter in Drift Ice Radar Observation. 海と空, **49**, 9–20.
- [2] SIGMET, Inc., 2006: 5.3.5 Spectrum Width Algorithms. *RVP8 User's Manual August 2006*, p.5-35.
- [3] 大井 正行, 田畑 忠司, 1978: 流氷観測レーダーにおける反射電力の距離減衰について. 低温科学物理篇, **37**, 125–129.
- [4] Fang, M., Doviak, R. J., 2001: Spectrum width statistics of various weather phenomena. *National Severe Storms Laboratory Report, Norman, Oklahoma*, 62pp.

流星バースト通信による オホーツク海域環境情報収集システムの開発 3

高塚 徹¹、長澤 正氏²、椋本 介士³、若林 良二⁴、亀井 利久⁵、
藤田 和之⁶、三寺 史夫⁷

1. 技術部先端技術支援室
2. 沼津高等専門学校電子制御工学科
3. 静岡大学工学部電気電子工学科
4. 東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科
5. 防衛大学校電気情報学群通信工学科
6. 技術部装置開発室
7. 環オホーツク観測研究センター

はじめに

流星が大気圏に突入する時、その経路に沿って電離気体が発生（流星バースト）する。この気体の発生は数秒という短い時間だが、電波の反射体となりうる。この反射体を利用した通信のことを流星バースト通信（MBC: Meteor Burst Communication）と言い、通信距離約 1,600 km 以内の 2 点間における無線通信が可能である。

2008 年 12 月、低温科学研究所に札幌マスター局（図 1）、オホーツク海沿岸サロマ湖のキムアネップ岬（図 2）にキムアネップ・リモート局を設置した（直線距離約 235 km、両局の位置関係を図 3 に示す）。設置と同時にキムアネップ岬にある気象観測ステーションで収集した気象観測データを、流星バースト通信を使い札幌マスター局へ伝送を開始した（高塚ら 2009；高塚ら 2010）。2011 年 11 月には、アンテナの仰角を水平から 45 度に変更した。そこで本稿では、アンテナの角度の違いによる電波の受信数とデータ回収率について報告する。

アンテナ仰角の変更

2009 年 5 月 14 日から 2011 年 11 月 22 日までの通信では、取得されたデータパケット数が少なかった。検証期間中は送受信頻度が少なく、気象観測データの回収率が改善されない状態が続いた。送受信頻度の少ないのは、札幌マスター局とキムアネップ・リ



図 1 低温研屋上に設置されたアンテナ。



図 2 サロマ湖キムアネップ岬。

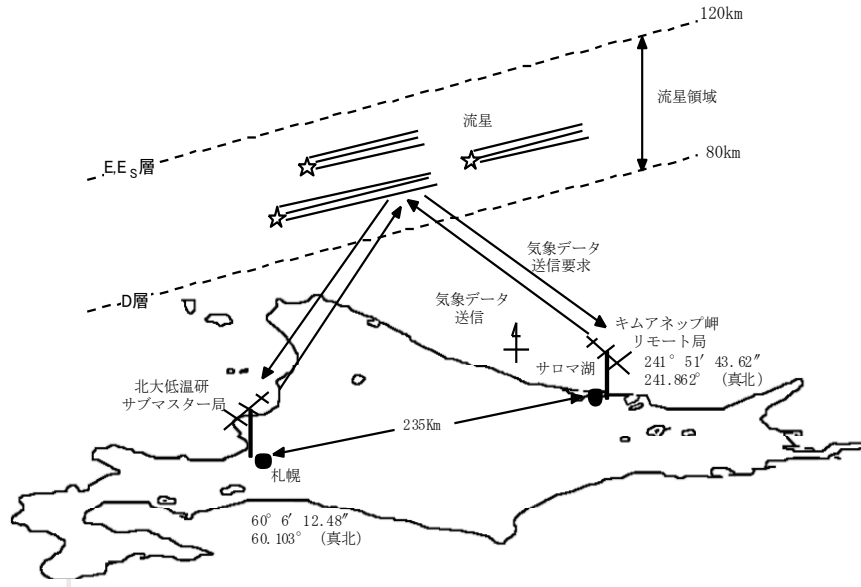


図3 流星バースト通信のシステム概要。

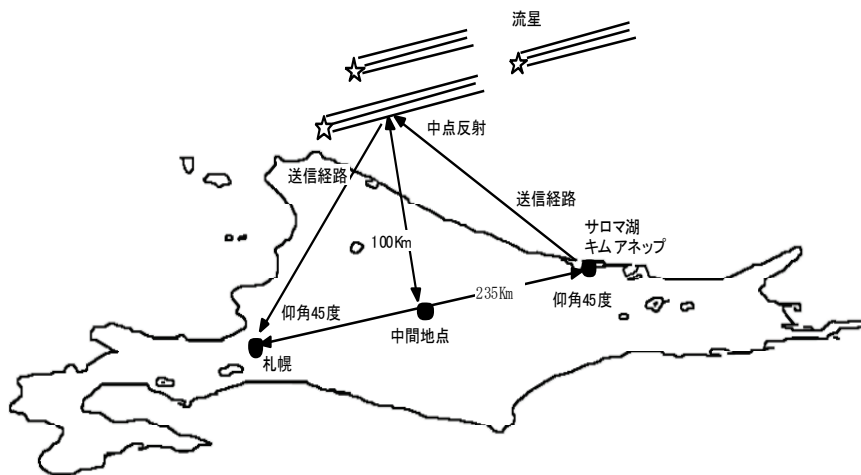


図4 中点反射の概略。キムアネップ・リモート局からの伝送の場合を示した。

リモート局のアンテナ（地上高 5 m）の主放射方向（アンテナの向き）が水平方向に向くように設置されていることが原因と考えられた（亀井ら 2012）。そこで、アンテナの主放射方向に仰角を付け、送受信の効率が良いとされる送受信間の中間地点における流星バーストを利用することにした（中点反射、図 4）。流星バーストの発生高度が約 100km、札幌ーサロマ湖キムアネップ岬間が約 235km であることから 2011 年 11 月 22 日にマスター局のアンテナを、25 日にリモート局のアンテナをそれぞれ仰角 45 度にし、通信を再開した。図 5 にアンテナの仰角を変更した様子をマスター局とリモート局でそれぞれ示す。なお、アンテナの仰角を 45 度に固定させる留め具は、装置開発室で製作した（図 6）。



図5 札幌マスター局（上段）、キムアネツプ・リモート局（下段）のアンテナ部。
左（右）はアンテナの向きを水平（仰角45度）にしたもの。



図6 アンテナ仰角を45度にするための固定用留め具。

データ受信数

マスター局は、流星バースト通信の有無を探索し、リモート局がデータを伝送するように要求する。その要求により、キムアネツプ・リモート局からデータパケットが送信され札幌マスター局が受信する（高塚ら 2009）。1つのデータパケットには通信に関する情報と気象データ8項目（観測日時、風向、風速、気温、湿度、日射、気圧、バッテリー電圧）で構成されている。

図7は2009年1月から2012年10月までの1日あたりのデータ受信数を時系列で示したものである。アンテナが水平に設置された期間（2009年5月14日－2011年11月22日）を青い線で、仰角45度に設置した期間（2011年11月25日－2012年10月31日）を緑の線で示してある。双方ともデータ受信数は日によって大きなばらつきが見られるが、2012年4月下旬からばらつきが少ない。これは、安定して多くのデータが得られていることを示している。

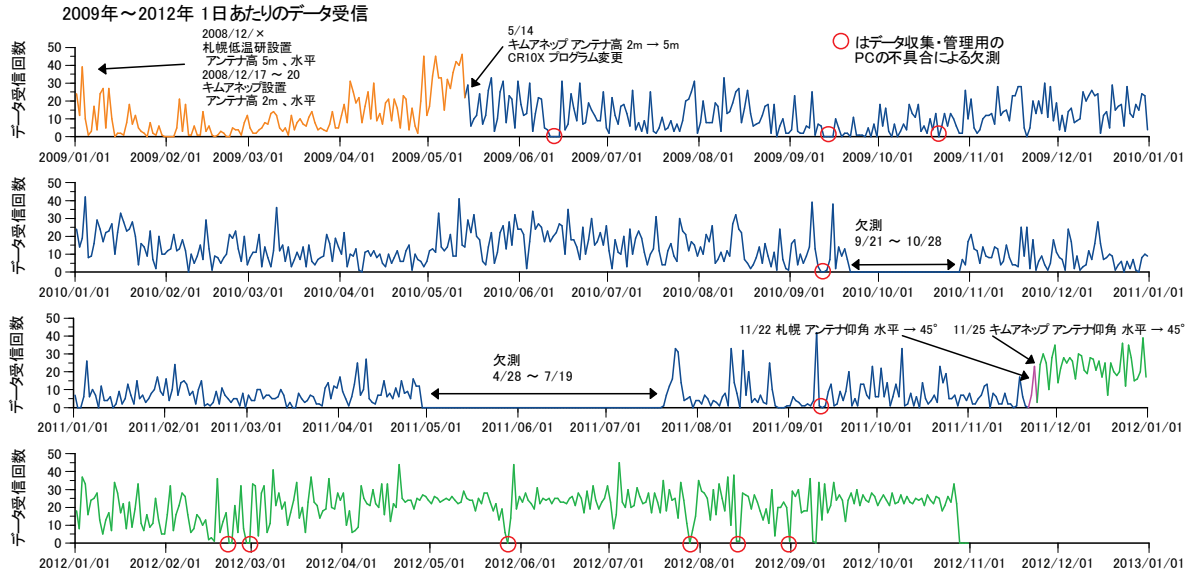


図7 1日あたりのデータ受信数。

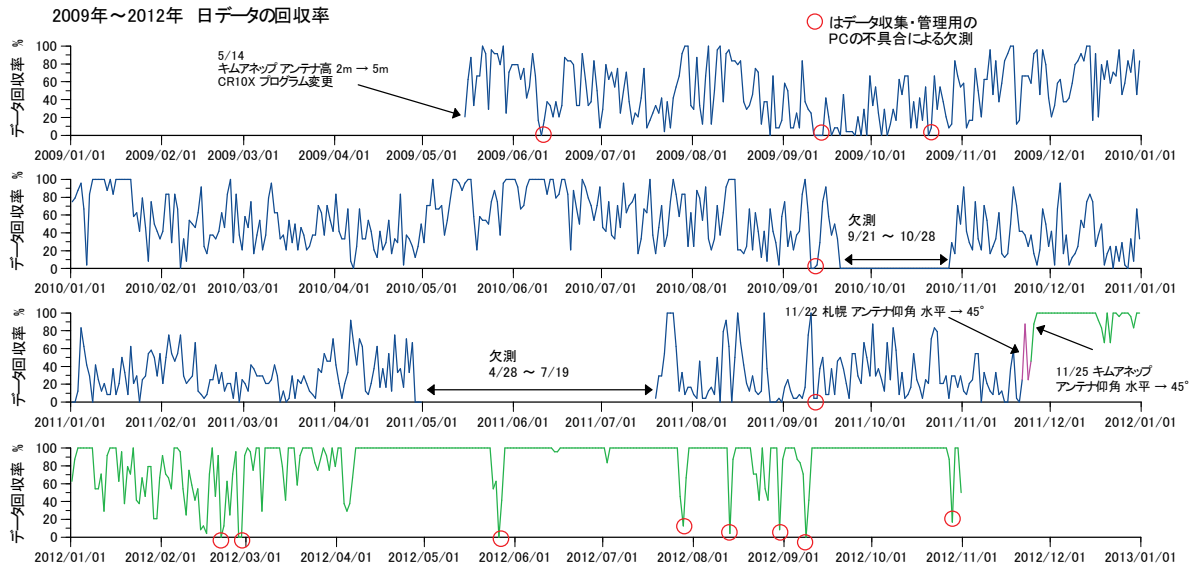


図8 日データ回収率。

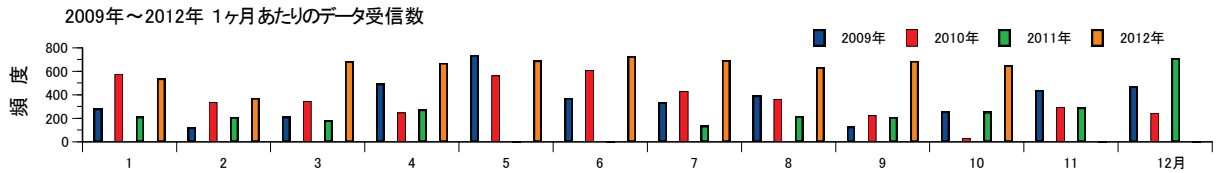


図9 1ヶ月あたりのデータ受信数 (2009年5月 - 2012年10月)。

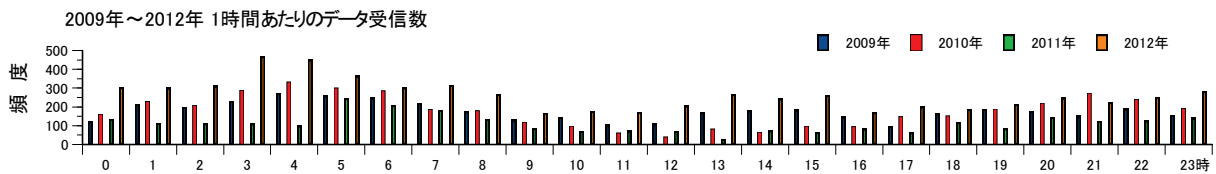


図10 1時間あたりのデータ受信数 (2009年5月 - 2012年10月)。

データ回収率

気象データは毎正時1時間ごとにデータロガーに記録され、5分後にリモート局のモデムのバッファにコピーされる。その後、流星バーストが発生した時にマスター局に伝送される。そこで、伝送されてきたデータを1日ごとに集計し、以下の式で回収率を計算した。

$$\text{回収率 (\%)} = (\text{回収した日データの個数} \div \text{日観測回数 } 24) \times 100。$$

図8に2009年5月から2012年10月までのデータ回収率を時系列で示す。仰角を45度に変更した2011年11月25日以降、変更以前の同時期に比べると大幅に回収率が良くなり、通信が安定していることが分かる。図9は年別1ヶ月あたりのデータ受信数の頻度分布、図10は同期間における年別1時間あたりのデータ受信数の頻度分布である(いずれも2009年1月から2012年10月までの期間)。アンテナの仰角を45度に変更した後、データ受信数が増え、変更以前の同時期に比べると比較的多くなりデータ回収率も良くなっている。

おわりに

通信距離が近い札幌-サロマ湖キムアネツ岬間において、アンテナに45度の仰角を付けた。このことにより通信回線の頻度が向上し、データ受信数が増え、データ回収率が大幅に改善された。アンテナの仰角は45度が最適かどうか、引き続き検証を行っていきたい。

参考文献

- 高塚徹、石川正雄、白澤邦男、椋本介士、長澤正氏、若林良二。流星バースト通信によるオホーツク海域環境情報収集システムの開発 北海道大学低温科学研究所技術部技術報告第15号、52-57、2009。
- 高塚徹、白澤邦男、椋本介士、長澤正氏、若林良二、亀井利久。流星バースト通信によるオホーツク海域環境情報収集システムの開発 2 北海道大学低温科学研究所技術部技術報告第16号、38-43、2010。
- 亀井利久、若林良二、長澤正氏、椋本介士、白澤邦男、高塚徹、三寺史夫。近距離間での流星バースト通信に用いる指向性アンテナの一考察 電子情報通信学会総合大会講演論文集、2012年通信(1)、23、2012。

切削型基板加工機による電子基板の製作

森 章一

技術部先端技術支援室

はじめに

現在、電子基板の製造はそのほとんどが銅溶解液によるエッチングにより製造されている。しかしながらエッチングによる基板製作は処理工程も多く、腐蝕性の化学薬品を使用するため、試作段階や少数の基板製作には不向きである。

近年エッチングに代わる方法として、NC フライス加工機を用いて基板の表面銅箔を削り取る方法が行われるようになった。当技術部では需要が少なく、費用対効果を考えると高価な海外メーカー製の加工機は適さない。しかし、最近国内メーカーが 30 万円程度の小型加工機（図 1）の販売を始めた。そこでこの切削型基板加工機を導入し、使用評価することにした。

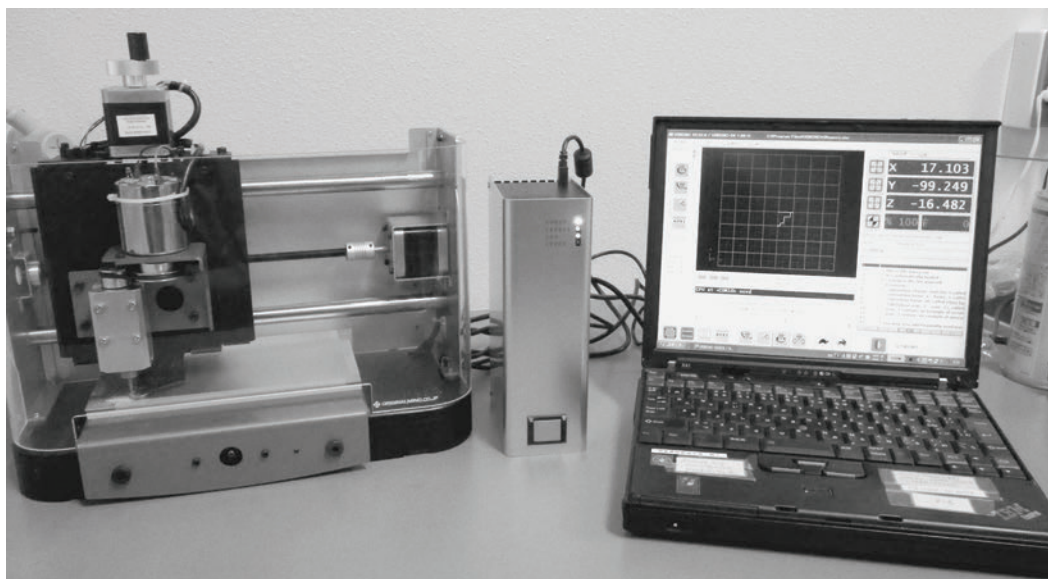


図 1 加工機本体(左)、ドライバーユニット(中)、制御用パソコン(右)。

製作工程

製作工程は以下のような流れになる。なお、1-3 は連携した専用ソフトで行う。

- 1 目的に沿った回路を設計する（図 2）。
- 2 部品の型番を決定し、レイアウトを設計する（図 3）。
- 3 基板加工機にて線路切削、部品取り付け用の穿孔を行う（図 4）。
- 4 切削穿孔によるバリを研磨して取り去る（図 5）。
- 5 銅箔面に保護剤を塗布し、部品を取り付けて完成（図 6）。

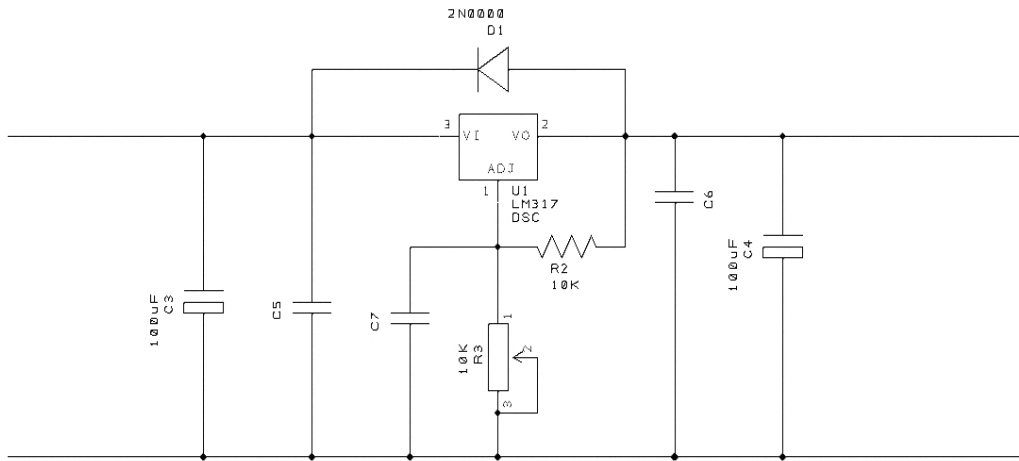


図 2 回路設計例 (シリーズレギュレーター可変電圧電源)。

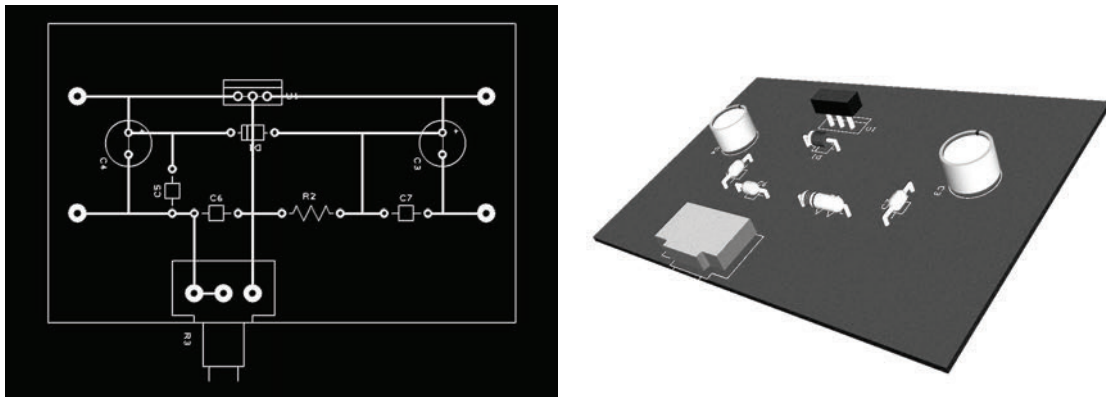


図 3 レイアウト設計。

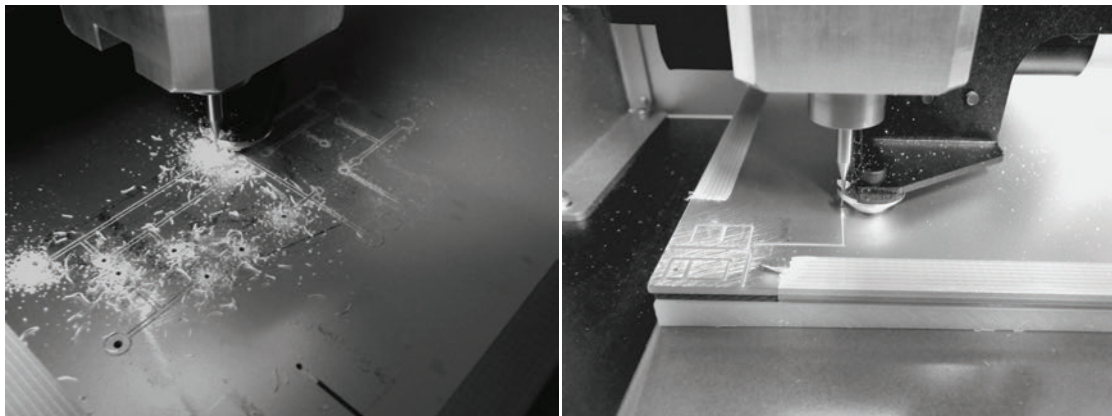


図 4 線路切削、穿孔。

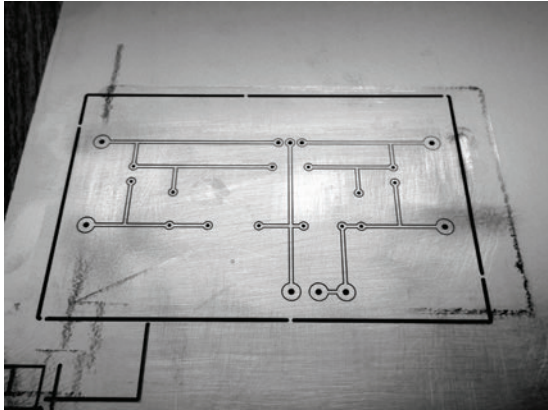


図 5 研磨処理。

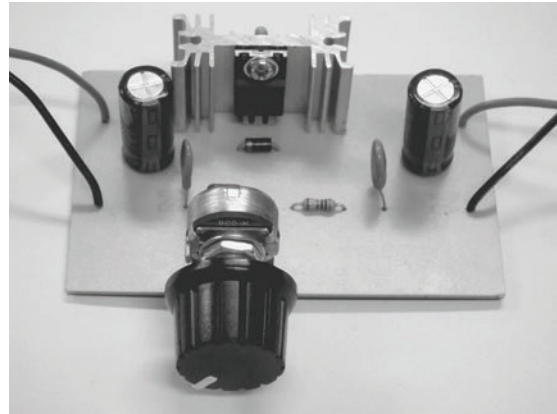


図 6 部品を取り付けて完成。

切削型基板加工機の長所と短所

<長所>

- ・プリント基板化することで、これまでのユニバーサル基板を利用した回路製作に比べ、格段に信頼性が向上する。
- ・試作や少数であれば、エッチングに比べ短時間で製作が可能。
- ・エッチングでは必ず問題になる多量の銅を含む廃液が出ない。
- ・製作データが保存できるため、後日の複製が容易。
- ・回路設計から切削制御までを連携した専用ソフトで行うため、設計変更や既存の回路を組み合わせたの製作が容易。

<短所>

- ・1枚ずつ切削するので、複数枚の製作工程を同時に行えない。そのため大量製作にはかえって時間がかかる。
- ・通常設計においては直径1mm以下の刃物を使用するため、大きく銅箔をはぎ取るレイアウトには不向きである。
- ・設計から加工まで全てパソコン上で行うため、ソフトの習熟に時間を要する。
- ・銅を含む粉塵が出る。

今後の課題

加工機の導入によりプリント基板の製作が可能になった。これまでのユニバーサル基板を利用した回路製作に比べ、格段に信頼性の向上が期待される。しかしながら、現時点では設計から加工制御を一体化するために、新しく導入した設計ソフトの習熟が必要である。また、個別部品のライブラリの構築に時間がかかっており、経験蓄積が必要である。

加工機本体については、加工精度や切削スピードに価格に見合った限界があり、廉価製品である事を否めない。これらについては、今後部品を替えて行く事である程度の改良が可能である。効果的な改良策は装置開発室と相談しながら進めて行く予定である。

低温研ウェブサーバアクセス解析 2011/10–2012/09

千貝 健^{1,2}

1. 技術部先端技術支援室
2. 所内広報委員会ホームページ担当

前回まで [1] と同様に、2011 年 10 月 1 日から 2012 年 9 月 30 日まで 12 ヶ月間のアクセス統計（表 1–10）とこれまでのアクセス推移（図 1）を示した。12 ヶ月間の全リクエスト件数（以下、リクエストと略す）は **1,681,278** 件、全ページリクエスト件数（以下、ページ数と略す）は **374,860** 件であった。

2012 年 2 月、低温科学研究所ウェブサイト进行全面改訂し、低温研から社会への情報発信の体制を充実させた。プレスリリース、研究トピックスをトップページに出し、低温研のアクティビティを以前よりもアピールする形となった。全体的なアクセスの傾向は、前回に引き続き減少傾向が見られたが、ウェブサイトの全面改訂後は増加に転じた（図 1）。今後、コンテンツの益々の充実化を図る必要があるだろう。

参考文献

- [1] 千貝 健, 低温研ウェブサーバアクセス解析 2010/10–2011/09, 北海道大学低温科学研究所技術部技術報告, **17**, 69–72, 2011

表 1 月別レポート

年	月	リクエスト	ページ数
2011	10	113451	32458
	11	119761	31414
	12	141257	25745
2012	1	142658	26774
	2	158401	42958
	3	134851	28642
	4	127166	25409
	5	156103	31239
	6	136163	26878
	7	154464	33677
	8	158010	34449
	9	138993	35217

表 2 曜日別集計

曜日	リクエスト	ページ数
日	12053	3355
月	25606	7058
火	21798	4296
水	23027	4527
木	22864	4548
金	21434	3759
土	13322	3691

リクエスト件数、ページ数は
1 ヶ月あたりの値で示した。

表3 時間別集計

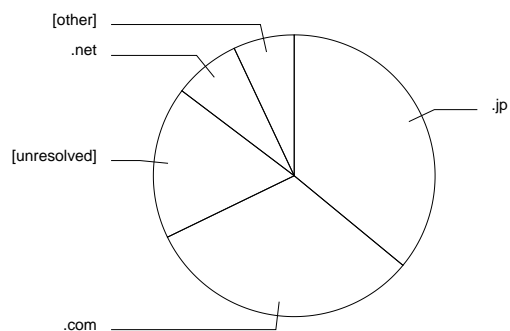
時間	リクエスト	ページ数	時間	リクエスト	ページ数
0時	3971	990	12時	7264	1687
1時	2847	960	13時	8261	1610
2時	2123	767	14時	9795	1724
3時	2391	811	15時	10338	1569
4時	1968	913	16時	9471	1517
5時	2357	1221	17時	8680	1562
6時	2232	853	18時	8328	1511
7時	2614	863	19時	6038	1234
8時	4280	945	20時	5824	1095
9時	6512	1382	21時	5348	1140
10時	10312	2808	22時	5084	1066
11時	8724	2099	23時	5333	900

リクエスト件数、ページ数は1ヶ月あたりの値で示した。

表4 ドメインレポート

リクエスト	ページ数	ドメイン
84729	11234	.jp (日本)
14187	9950	.com (商業組織)
25776	5463	【未解決 IP アドレス】
9287	2401	.net (ネットワーク)
1146	834	.ru (ロシア連邦)
776	293	.edu (米国高等教育機関)
272	269	.lv (ラトビア)
197	147	.ua (ウクライナ)
627	83	.de (ドイツ)
194	55	.cn (中華人民共和国)
141	52	.se (スウェーデン)
95	43	.org (非営利組織)
85	37	.tw (台湾)
66	36	.nl (オランダ)
249	28	.uk (イギリス)
2273	304	【その他: 105 ドメイン】

リクエスト件数、ページ数は
1ヶ月あたりの値で示した。

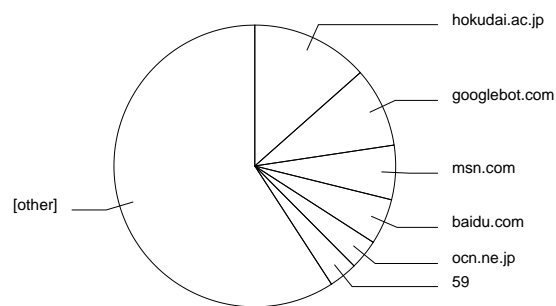


扇型の角度：ページ数

表5 組織別レポート

リクエスト	ページ数	組織
10444	4207	hokudai.ac.jp
3885	2860	googlebot.com
2338	1947	msn.com
1775	1641	baidu.com
10021	1074	ocn.ne.jp
1108	1027	59
2159	1020	218.213
1063	906	naver.jp
882	711	yandex.ru
893	693	super-goo.com
684	681	2dayhost.com
903	582	119
936	569	yahoo.net
1644	534	osaka-u.ac.jp
534	530	leaseweb.com
100831	12250	【その他: 5,912 組織】

リクエスト件数、ページ数は
1ヶ月あたりの値で示した。



扇型の角度：ページ数

表6 参照元サイトレポート

リクエスト	ページ数	サイト
71622	4779	http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/
1725	1175	http://www.google.co.jp/
946	497	http://search.yahoo.co.jp/
344	316	http://www.hokudai.ac.jp/
249	187	http://www.google.com/
362	80	http://shiro.lowtem.hokudai.ac.jp/
65	45	http://www.bing.com/
19	18	http://www.cris.hokudai.ac.jp/
16	15	http://www.ees.hokudai.ac.jp/
13	12	http://www.sci.hokudai.ac.jp/
11	11	http://www.h5.dion.ne.jp/
16	11	http://www.google.co.uk/
113	11	http://daiichi.lowtem.hokudai.ac.jp/
10	10	http://stellar.lowtem.hokudai.ac.jp/
9	9	http://desulfonema.blog.ocn.ne.jp/
856	443	【その他: 785 サイト】

リクエスト件数、ページ数は
1ヶ月あたりの値で示した。

表7 検索語句レポート

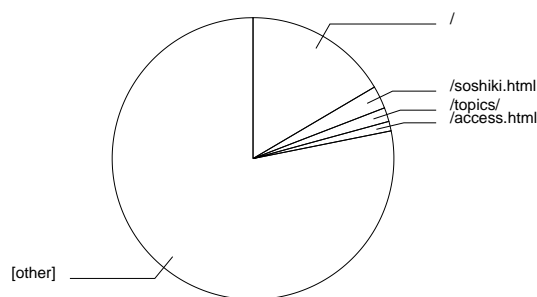
リクエスト	検索語句
91	低温研
84	低温科学研究所
74	北海道大学低温科学研究所
66	北海道大学 低温科学研究所
61	オホーツク海
45	北大 低温研
34	北大低温研
22	低温科学
18	(個人名)
14	canon プリンター ドライバー
12	低温研究所
11	北海道大学 低温
10	ishikari river
9	北大 低温
9	低温
2260	【その他: 16,827 検索項目】

リクエスト件数は
1ヶ月あたりの値で示した。

表8 リクエストレポート

リクエスト	html ファイル
5162	/
816	/soshiki.html
501	/topics/
343	/access.html
323	/meibo.html
320	/sitemap.html
252	/kyujin/
243	/kyoudou/
231	/en/
230	/syochou.html
200	/education.html
198	/symposium/
197	/english/
146	/publish.html
145	/history.html
21923	【その他: 1,427 ファイル】

リクエスト件数は
1ヶ月あたりの値で示した。



扇型の角度: リクエスト件数

表9 ブラウザ集計

リクエスト	ページ数	ブラウザ
14897	12133	Netscape (compatible)
70049	4521	MSIE
4279	3749	HyperEstraier
22035	1926	Safari
2832	1536	ichiro
13661	1250	Firefox
1015	1015	Hatena Antenna
1065	905	Yeti
596	491	osaka university[QSC-0985]
446	386	Ocelli
9026	3225	【その他: 366 ブラウザ】

リクエスト件数、ページ数は
1ヶ月あたりの値で示した。

表10 OSレポート

リクエスト	ページ数	OS
21565	16152	未知 OS
11694	7194	ロボット
89183	6155	Windows
14540	1293	Macintosh
2917	344	Unix
2	0	Symbian OS

リクエスト件数、ページ数は
1ヶ月あたりの値で示した。

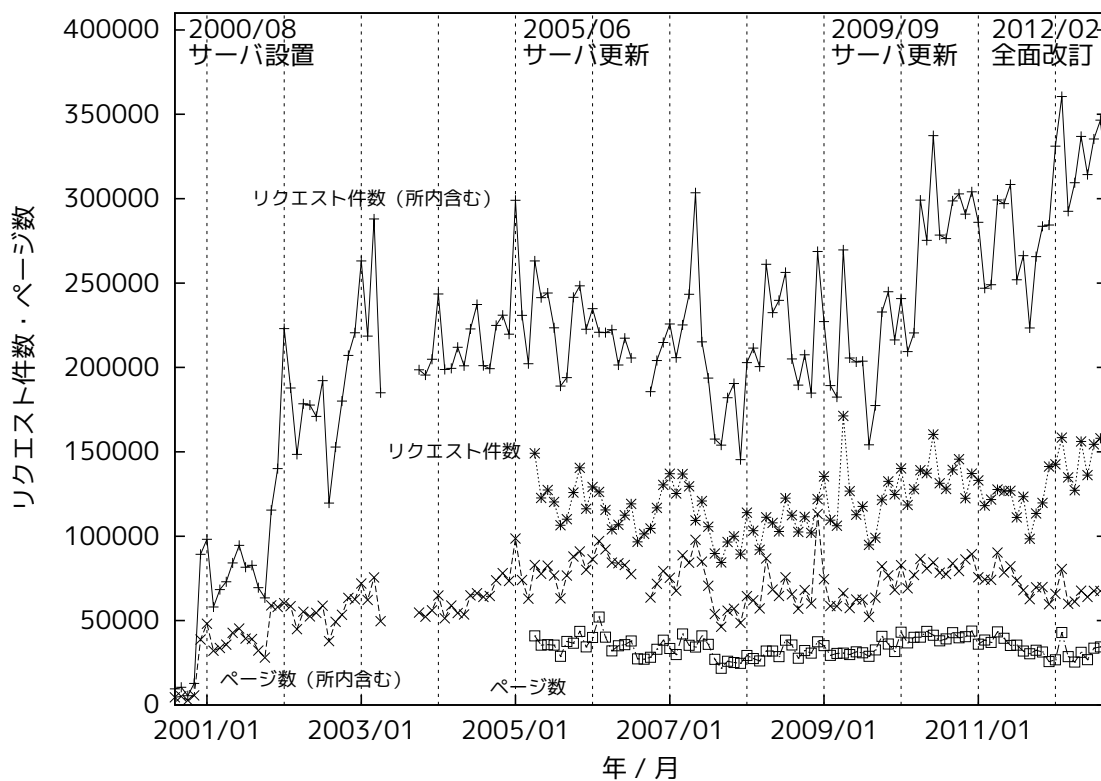



図1 これまでのリクエスト件数、ページ数



編集後記



以前から気になっていたドラッカーを読んでいる。経営学の巨人。マネジメントの生みの親ともいわれている。本に触れるまで、領域外の遠い存在だと思っていた。だが認識不足だった。ドラッカーの書いていることは、知識労働に就くすべての人に通ずる原理、というべきものだった。とは云え、カバー範囲が広く、消化にはまだ時間が必要だ。ドラッカーは、社会の変化はなぜ起こり、価値はどのように変化したか、を述べている。いち早く知識社会の来たことを告げ、知識が基本的な経済資源となることを指摘している。知識は価値ある「イノベーション」を生み出すのだ。

12月、美しい紅葉が終わった雪の季節、低温研技術報告会が開かれる。今年で18回目を迎えた。毎回、貴重な原稿が寄せられ、多くの方に支えられている。私事で恐縮だが、私にとって最後の報告会となる。お世話になった低温研技術部のこれからを思う。残る人達の高い自己実現のために、ドラッカーを読んでもてはどうだろうか。などと老婆心を巡らせている。小さな技術組織であるが故にできる事は何だろうか？ クリステンセンの「破壊的イノベーション」もその一つかも知れない。時代を読むことは、流されず歩む道標になると思っている。

技術報告会開催にあたり、古川所長はじめ渡部技術部長、そして研究者の方々のご理解とご協力に心から感謝いたします。また、毎回時間を要する原稿の校正・編集作業に参加して頂いている千貝健氏、小野数也氏に心からお礼申し上げます。

2012年12月14日

福士博樹



2012年12月14日発行

編集者：加藤由佳子、福士博樹

北海道大学 低温科学研究所 技術部

〒060-0819 札幌市北区北19条西8丁目