

研究報告

No.34

— 2023 —



国立大学法人 室蘭工業大学

MONOづくりみらい共創機構

— 目 次 —

【令和 5 年度 プレ共同研究成果】

- (1) MH タンク搭載のための次世代型水素吸蔵合金の水素活性化特性に関する研究 1
亀川 敦則
- (2) 深宇宙キックモーター用タンク内酸化剤排出特性の可視化実証 3
中田 大将, 武 子賀, Kamps Landon
- (3) ニトロメタンによる低毒一液系推進剤の実用化に関する研究 6
湊 亮二郎, 東野 和幸, 中村 秀一
- (4) 地方自治体住民の住宅の断熱性能等向上に対する意識調査とその改善 10
栗原 浩平, 田中 輝幸, 縄田 健志, 高宮 則夫
- (5) 伊達天然藍で染めた廃ウレタンの応用に関する検討 15
馬渡 康輝, 佐藤 輝

MH タンク搭載のための次世代型水素吸蔵合金の水素活性化特性に関する研究

亀川 厚則

室蘭工業大学 希土類材料研究センター

1. はじめに

水素吸蔵合金は、1 MPa 未満の水素を繰り返し吸蔵・放出でき、70 MPa の水素ガス容器よりも高密度に水素を貯蔵可能であるため、水素貯蔵媒体として注目されている。特に、1 MPa 未満の水素は、高压ガス保安法の規制を受けない「低圧水素」として、水素利用機器をはじめとする水素サプライチェーン全体の水素利用システムの低圧化を可能にする。これにより、水素利用システム全体の部品コストが低減する。また、それを取り扱う保守点検事業者や水素タンクの配送事業者において、高压ガス保安法に関係する資格・免許が基本的に不要となり、既存エネルギーインフラ分野の雇用を活かすことができる。

近年、実用化が進められている TiFe 合金は、従来の LaNi₅合金と比較して低コストであり、水素貯蔵量が 1.8 mass% と、現用合金の 1.2 mass% よりも多いことから、普及が期待されている次世代型水素吸蔵合金である。この合金は 1974 年に可逆的な水素吸蔵・放出が可能であることが報告されたが、未反応の合金を水素化するには高温・高压 (500°C・7 MPa-H₂) の水素処理 (初期活性化処理) が必要であったため、長らく実用化には至らなかった。しかし近年、添加元素の最適化や溶解鋳造法の改良により、数 MPa の圧力下で常温水素化が可能な TiFe 合金が開発された。この合金は、市販化されて間もなく、低圧水素サプライチェーン構築に重要な MH タンク (水素吸蔵合金タンク) へ搭載するための知見がほとんどない。

一方で MH タンクの主な製造工程は以下の通りである。

- ① 水素吸蔵合金の溶解鋳造
- ② 合金の粉碎・分級
- ③ 容器 (シリンダー) への合金の装填
- ④ 容器にバルブ類を取り付け、封止
- ⑤ 容器内を水素に置換・加圧し活性化処理
- ⑥ 減圧後、出荷

出荷後の製品が、1 MPa 未満で使用できる設計であっても、活性化処理 (工程⑤) を行う際に、活性化に必要な水素圧が数 MPa であれば、シリンダーやバルブ類の耐圧設計もそれ以上のものが必要となり、コストや重量が大きくなる。この問題を解決するためにも、合金の活性化圧力を低下させることが重要である。

つまり、初期水素吸蔵活性化圧が低いほど、水素吸蔵合金タンク (MH タンク) の製造コストは削減される。さらに、初期活性

化圧が 1 MPa 以下であれば、タンクの容器 (シリンダー) は高压ガス保安法の規制対象外となり、さらなるコスト削減が可能となる。

我々はこれまでに、様々な組成・タイプの水素吸蔵合金の合成 (溶解・鋳造) から測定評価を行ってきた。この経験の中で、水素化前の水素吸蔵合金に、ある前処理を施すことによって、合金の水素との反応の活性化条件が変化することを見いだした。

以上のことから、道内における水素吸蔵合金タンクの製造や水素利活用産業との連携を進め、市販の TiFe 合金を用いた水素吸蔵合金タンクの開発を推進することが重要である。特に、MH タンクのコストダウンに向けた TiFe 合金の前処理の有効性を検証し、開発課題を明らかにした上で、民間企業との共同研究につなげることを目的として、プレ共同研究を開始した。

2. 実験方法

試料には、TiFe 系市販合金を用いた。合金 (粒子径: 0.04–0.5 mm) の粉碎した。合金の粉碎時に条件を幾つか変化した前処理を合金粉末に施し、水素吸蔵特性を評価した。水素化速度と水素吸蔵・放出特性 (PCT 特性) の測定には、ジューベルト型 PCT 測定装置を使用した。なお、処理 A, B, C, D の取り扱い、すべて大気中でおこなった。

3. 結果

3.1 前処理による水素との活性化速度の変化

合金の粉碎時に各処理を施した TiFe 合金と未処理試料 (as-received 試料: 購入まま材) の水素化速度特性を、図 1 に示す。大気中で粉碎して得た合金粉末を、参照試料 (reference) とし、今回検討した新しい処理方法と比較を行った。処理 D を除く処理方法で得た粉末試料、および参照試料は、未処理試料と比較して水素化速度が向上したが、水素吸蔵量に大きな変化は見られなかった。一方、処理 D で得た粉末試料では、水素化速度が低下し、水素吸蔵量も減少した。

処理 A で得た粉末試料だけが、参照試料よりも水素化速度が向上した。対照的に、処理 B および処理

D で得た粉末試料では水素化速度が低下した。大気中で粉碎して得た粉末試料は、アルゴン雰囲気下で粉碎した試料と比較すると、表面の酸化被膜の形成により水素化速度が低下する。しかし、処理 A で得た粉末試料は、大気中に曝されたにもかかわらず

ず、大気中で粉砕した試料よりも水素化速度が向上した。

処理 B および処理 C は、酸化被膜や合金の新生表面と反応せず、乾燥後に合金表面に処理に用いた溶媒成分が残留することで水素化速度が低下したと考えられる。

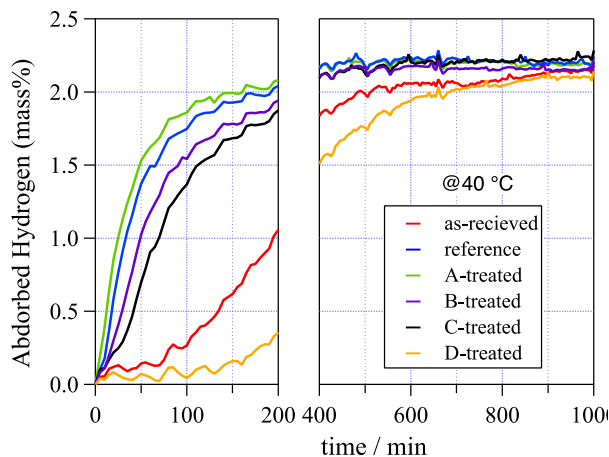


図1 水素圧 7 MPa における TiFe 合金の水素化速度特性（未処理、大気中で乾式粉砕を施したもの、および処理 A,B, C,D を施したもの）

3.2 処理 A による TiFe 合金粉末の 1MPa 水素（低圧水素）との活性化速度の変化

図 2 に、前処理粉砕された TiFe 合金粉末の 1MPa における水素化速度特性を示す。未処理試料は 1MPa の水素圧ではほとんど水素と反応しなかった。大気中で粉砕した試料は、測定開始直後には水素化が確認できなかったが、およそ 200 秒後に水素との反応を開始し、14,400 秒（4 時間）後には約 1.09 mass% の水素を吸蔵した。一方、処理 A の前処理で得た粉末試料は、測定開始直後から速やかに 1MPa の水素と反応し、水素化が進行した。14,400 秒後には約 1.61 mass% の水素を吸蔵した。

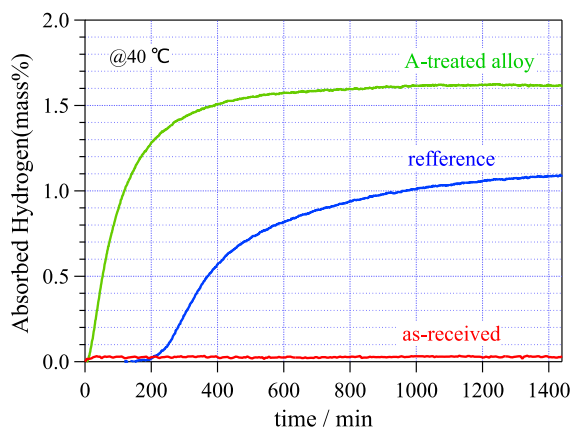


図2 水素圧 1 MPa における TiFe 合金の水素化速度特性

図 3 に、各雰囲気前で前処理粉砕後に 1MPa、24 時間の水素化処理を行った TiFe 合金粉末の PCT 曲線を示す。

未処理試料は、およそ 4MPa の水素圧まで水素を吸蔵せず、この圧力で急激に水素吸蔵量が増加した。これは、4MPa までは合金が活性化せず、この圧力で初めて水素と反応を開始したことを示している。

大気中で粉砕した試料（参照資料）は、測定開始圧力の 0.1MPa 以下で水素の吸蔵を開始したが、TiFe 合金特有の二段のプラトー領域が吸蔵プロセスにおいて不明瞭であった。また、最大水素吸蔵量も約 1.6 mass% と報告値より低かった。

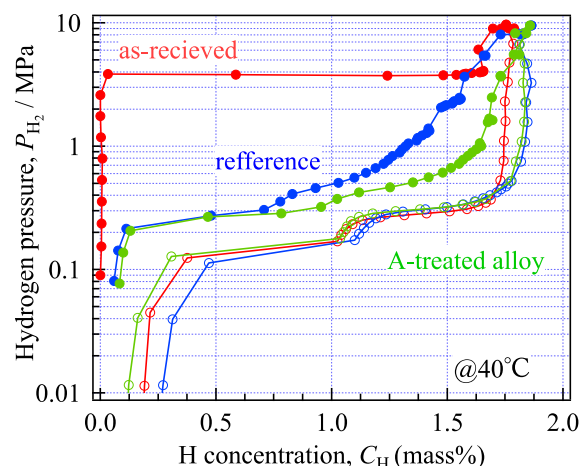


図3 1 MPa 素圧で活性化処理された TiFe 合金の PCT 曲線

処理 A で得た粉末試料も、測定開始圧力の 0.1MPa 以下で水素の吸蔵を開始したが、吸蔵および放出プロセスにおいて TiFe 合金特有の二段のプラトー領域が明瞭に観察された。さらに、最大水素吸蔵量は約 2.0 mass% と報告値（1.8 mass%）よりも大きかった。この結果は、0.01MPa において約 0.2 mass% の水素が残留していたことと関連し、粉末 X 線回折法による相同定および SEM-EDX による微細組織観察の結果、合金に含まれる希土類成分が水素化し、TiFe の報告値よりも水素吸蔵量が増加したことを確認した。

4. 結論と成果

初期活性化能力が向上したとされる市販の TiFe 合金について、さらなる初期活性化能力の向上を期待して、本合金の新しい合金の前処理方法を検討したところ、高圧ガス保安法の規制を受けない 1 MPa 以下でも初期活性化する TiFe 合金の前処理方法を開発することに成功した。

この結果を受け、プレ共同研究先企業との協議のもと、TiFe 合金の水素吸蔵合金タンク搭載に向けた共同研究を開始することとなった。

令和 6 年度 共同研究費

- 直接経費：4,610 千円
- 間接経費：1,390 千円
- 令和 7 年度以降は協議の上決定する。

深宇宙キックモーター用タンク内酸化剤 排出特性の可視化実証

中田 大将^{*1}, 武 子賀^{*2}, Kamps Landon^{*3}

- 1 室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター
- 2 室蘭工業大学 生産システム工学専攻
- 3 株式会社 Letara

1. はじめに

北大発ベンチャー企業（2025 年 2 月に室工大発ベンチャー企業にも認定）の Letara 社では、亜酸化窒素（N₂O）を酸化剤とするハイブリッドロケットを用いた宇宙機用スラストの事業化に向けた開発を行っている。特に、推進剤タンクは 3 次元造形の特徴を生かしたユニークな形状（特許出願中）となる予定である。

本学ではロケットスレッド設備において長年動的環境における亜酸化窒素の充填・排出を実施してきた経緯があり、その知見を活かし N₂O の排出特性を調査するための試験設備を構築し、実際の宇宙機環境で想定されるスピンテストを行った。

2. 試験設備

スピン試験設備の概要を図 1 に示す。設備構築においてはプレ共同研究費用の一部を用いて先行設計に着手し、その後に配算となった Go tech 助成事業の分担金を用いて完成した。ポリカーボネイト製の可視化透明タンクやバルブ等をまとめたユニット（総重量 100kg 程度）を 200V 三相交流モーターで最大 5Hz 回転しながら N₂O の排出を行うことができる。可視化透明タンクは地上に置かれた一眼レフカメラおよび回転系に取り付けられた Go Pro で撮影される。この他、タンク圧、タンク温度、排出流量の情報を回転台上のデータロガーで収録し、無線ユニットにより地上に送信してリアルタイム監視が出来るようになっている。タンクの両端を固定するフランジにかかる内圧は最大 8MPa であり、図 2 のように強度解析を行い、厚み 25mm の SUS 板で設計した。また、これらをつなぐボルトは SCM440 製とした。



図 1 スピン試験設備

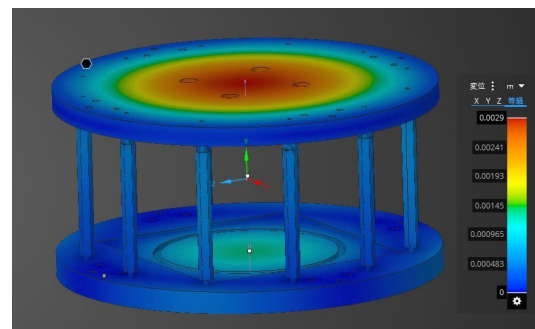


図 2 上下部フランジ強度解析

表1 試験条件一覧

Test #	date	Spinning rate	Vortex Breaker	Needle valve	Initial Tank Pres. (MpaG)	Mass Flow Rate (g/s)	Initial Propellant Level	Final Propellant Level (Height, mm)	Discharging Time (movie)
Flow 1	10/15	-	None	?				-	ドライアイス発生
Flow 2	10/16	-	None	1/16	3.90 (tank :277.95 K)	3.61	50 %	-	地上静止排出 559秒液出確認
Flow 3	10/16	-	None	1/4	4.32 (tank :282.4 K)	24.70	95 %	-	地上静止排出 150秒液出確認
Flow 4	10/16	-	None	3/16	3.94 (tank :278.77K)	22.70	95 %	-	地上静止排出 168秒液出確認
Flow 5	10/16	1Hz	None	3/16	4.11 (tank :280.48K)	22.30	95 %	-	175秒液出確認
Flow 6	10/17	1Hz	None	3/16	3.61 (tank :276.80K)	22.19	95 %	-	180秒液出確認
Flow 7	10/17	2Hz	None	3/16	3.58 (tank :278.25K)	20.81	95 %	45	164秒液出確認
Flow 8	10/17	2Hz	Side Wall	3/16	3.97 (tank :280.25K)	21.00	95 %	45	156秒液出確認
Flow 9	10/18	2Hz	Side Wall	1/16	3.36 (tank :274.55K)	1.0??	90 %	43	381秒液出確認
Flow 10	10/18	2Hz	Side Wall	1/4	3.51 (tank :276.62K)	21.10	95 %	43	181秒液出確認
Flow 11	10/18	2Hz	Side Wall + Cross Cap	3/16	4.11 (tank :282.17K)	23.69	90 %	35	138秒液出確認
Flow 12	10/18	-	Side Wall + Cross Cap	3/16	タンク内に満充填したが、なぜかventを開のまま約20 %の液がなくなり、その後上部から少し漏れがひどいためか回転もせずそのまま液が投棄？充填中にドライアイスが発生しMainが故障？途中から半球の合わせ目の所から漏れが発生噴き出している				



図3 試験シリーズ参加者一同

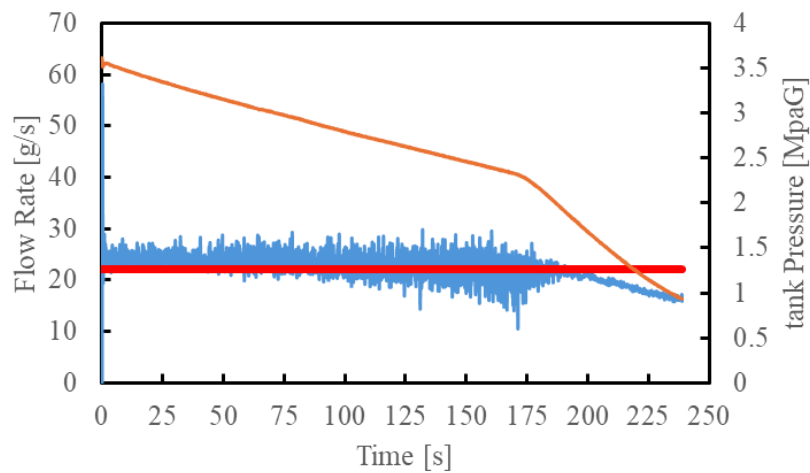


図4 Flow 6における流量（青線）とタンク圧（橙線）の履歴

3. 結果

試験は白老実験場にて 10 月 15-18 日に行われた。7 月のシリーズでは設備に不具合あり、再製作の後 10 月に再実施した。試験条件を表 1 に、参加者一同での保安写真を図 3 に示す。スピニレートやタンクへの渦流防止デバイスを変更しながら計 12 回の試験を実施した。Flow7-10 の Side Wall デバイスでは大幅な無効推進薬量の低下は確認されなかったが、Flow 11 の Cross Cap デバイスにより、無効推進薬が低減し、本デバイスが有効であることが示唆された。また、所定の時間安定した排出が確認された。

この他、タンクへの充填方法の確立や排出時のタンク内温度低下の様子などが確認された

4. モデリング

N2O は炭酸飲料と同様に自らの発泡によりタンクを加圧して排出される特徴があり、その圧力低下履歴を正しく予測することが重要である。自己加圧タンク内の圧力・温度低下を説明するための計算プログラムを作成し、実験結果と比較した。表 2 の通り Flow 3 の際の試験条件をモデリングし、図 5、6 のように流量・圧力・温度履歴を比較した。タンク壁面からの熱伝達や表面積を適切に仮定することで実験結果を説明できることがわかった。また、本プログラムを活用し、異なる容量や初期温度における排出挙動への影響を精査した。

表 2 計算プログラムの初期条件

初期重量	3.8 kg
表面積	0.01 m ²
熱伝達係数	1000 W/kg-K
初期温度	283 K
オリフィス Cv 値	0.37 * 1/4
作動流体	CO2

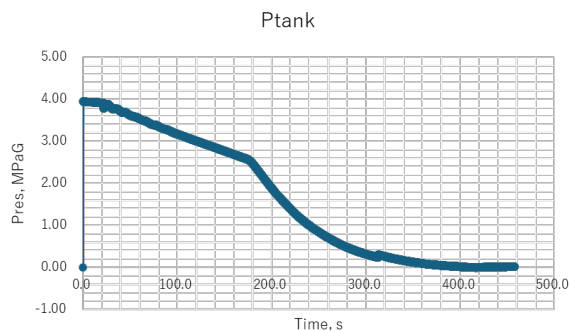


図 5 試験時の圧力低下 (Flow 3)

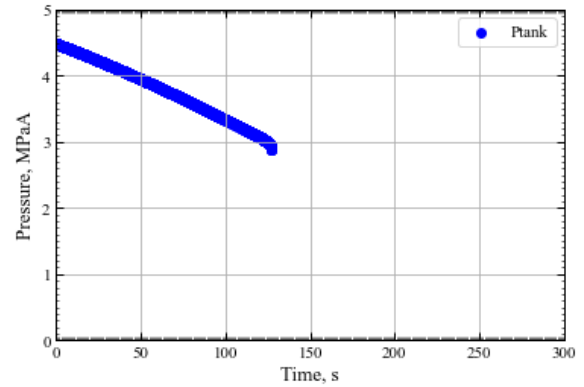


図 6 圧力低下履歴の計算事例 (Flow 3)

5. おわりに

本プレ共同研究の資金は年度の変わり目に先行で必要な部材を発注することができ、大変な支援となりました。本成果を発展させ、さらなる成果創出へとつなげてゆく所存です。

ニトロメタンによる低毒一液系推進剤の実用化 に関する研究

湊亮二郎^{*1}, 東野和幸^{*2}, 中村秀一^{*2}

- 1 室蘭工業大学 創造工学科
2 株式会社ネッツ

1. はじめに

近年、宇宙利用が拡大しており、特に小型衛星の開発、利用が進んできている。従来こうした衛星の姿勢制御系スラスターの推進剤は、ヒドラジン、モノメチルヒドラジン(MMH)などを触媒で着火させる方式が主流となっていた。しかしヒドラジン系の推進剤は、毒性が強いという欠点があり、そのためヒドラジン系推進剤の利用に、多大な手間とコストが掛かっていた。こうした状況を変えるべく、硝酸ヒドロキシアモニウム(Hydroxyl Ammonium Nitrate, HAN)を用いた推進剤の研究が盛んに行われてきた。HAN系推進剤はヒドラジン、MMH等と比較すると、毒性が低いという利点があるものの、爆轟性が高いなどの問題もあり研究は続けられている[1,2]。

このような背景の元、筆者らはニトロメタンを新たな一液系推進剤としての利用することを提案し、そのための基礎研究を行ってきた[3,4]。ニトロメタンはメチル基とニトロ基が一つずつ結合した最も単純なニトロ化合物であり、化学式では CH_3NO_2 と表される。日本の消防法では危険物第5類第2種自己反応性物質に指定されている。ニトロメタンはニトロ化合物の一種でもあるが、爆発性は低く火薬類取締法では規制対象外である。またニトロメタンの半数致死量(LD_{50})は 940mg/kg であり、毒物劇物取締法の規制対象外(300mg/kg 以下)となっている。このためニトロメタンはヒドラジンに代わる低毒推進剤として期待できる。ニトロメタンの大気圧下での沸点は 101°C 、融点は -27°C であり、室温下では液体である。また密度は 1.13g/cm^3 と高く推進剤としては取り扱いが容易な液体である。このような性質は、一液推進剤としてのポテンシャルを有している[5-8]。

筆者らは、ニトロメタン燃焼試験設備を構築し、その高圧燃焼試験を実施した。本報ではそれについて報告する。

2. ニトロメタン燃焼試験装置と試験条件

図1にニトロメタン燃焼試験設備の系統図を示す。本試験では、ニトロメタンタンクを窒素で加圧し、ニトロメタンを加圧供給させる仕組みになっている。流路の途中に $\phi 2.5\text{mm}$ のオリフィスを設けており、その差圧を計測することで、流量を把握する。ニトロメタンの着火には水素-酸素バーナーを用いている。また図2に本試験で用いた燃焼器の写真を示し、図3にはそのCAD図を示す。燃焼器の内径は 50mm 、外径 96mm で銅製である。燃焼器本体の全長は 100mm で、これに 50mm 長の追加部を連結させている。出口には収縮ノズルを装着しており、ノズル出口径は $\phi 7\text{mm}$ 、 $\phi 8.5\text{mm}$ 、 $\phi 12\text{mm}$ の3種類を用意した。今回の試験でこのうち $\phi 12\text{mm}$ のノズルを使用した。この燃焼器とノズル口径から決まる燃焼器特性長さ L^* は 3.2m と通常のロケットエンジンの L^* の3倍ほどの長さがあるが、過去のニトロメタン燃焼試験では $L^*=12.5\text{m}$ ほど必要であったこともある[9]。本試験は一液系の推進剤の燃焼試験だが、噴射器は3点衝突型の噴射器を用いた。

本研究の噴射器は、3点衝突型噴射孔が8組あり、噴射孔の孔径は $\phi 0.3\text{mm}$ である。1液系推進剤の燃焼試験で衝突型噴射器を用いたのは、噴流を衝突させることで噴霧微粒化を促進させる狙いがある。本燃焼試験での燃焼圧力は $1.0\text{MPa}\sim 3.0\text{MPa}$ を計画しており、燃焼温度はNASA CEAによる計算では 2450K と予測されている。また流量は 75g/sec を予定している。

本試験における計測項目は、ニトロメタン供給圧力、オリフィス前後圧力、マニフォルド圧力、燃焼器圧力

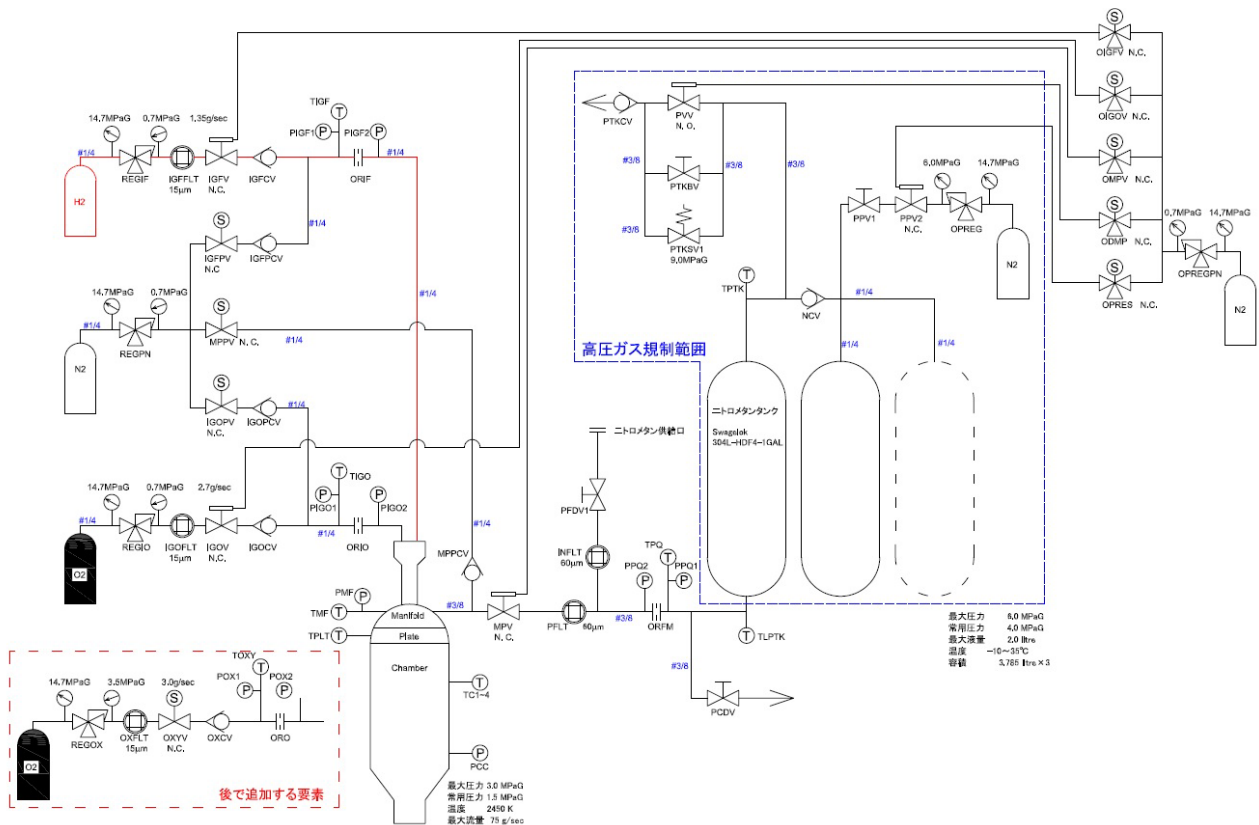


図 1 ニトロメタン燃焼試験設備系統図

を計測している。また温度計測に関しては、本試験では燃焼温度を直接計測していない。その代わり、燃焼器の壁内には熱電対孔を設け、燃焼器内壁から径方向に 3mm の位置で温度計測している。燃焼器内内壁からの熱伝導で燃焼の有無を判断するためである。

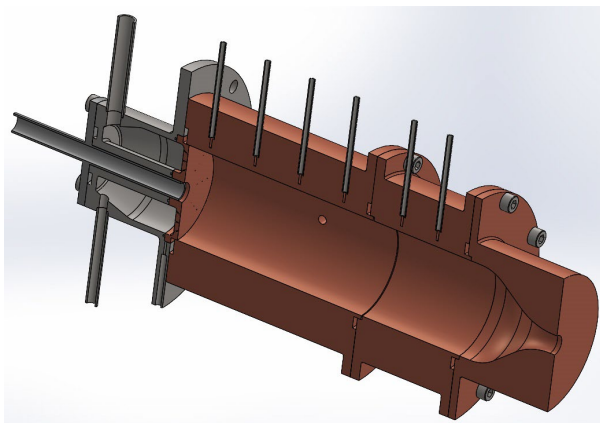


図 2 ニトロメタン燃焼器の CAD 図

図 4 にニトロメタン燃焼試験設備の概観を示す。図 1 に示されている本試験設備は、高圧ガス保安法の規定よりタンクユニットと燃焼器ユニットの間は 5m の間隔を空けている。また点火器用の水素ボンベと酸素ボンベは、共に燃焼器供試体から 5m の距離を取って離

れて設置している。

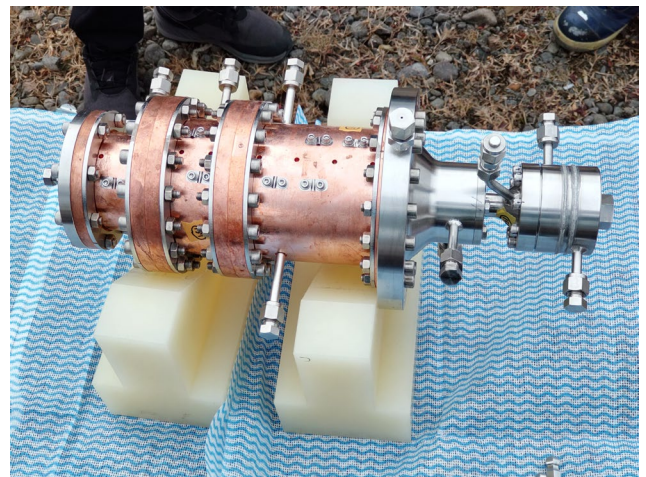


図 3 ニトロメタン燃焼試験供試体

3. 燃焼試験結果

これより 2023 年 12 月時点でのニトロメタン燃焼試験結果について報告する。本試験では、タンク加圧圧力 1.6MPaG に設定してニトロメタンを供給した。図 5 にニトロメタン燃焼試験時の試験映像を時系列で示す。図 5a) が点火器作動時の映像で、その後、図 5b), 図 5c) と遷移していった。図 5a) から図 5c) まで時間は

1.5 秒程度である。

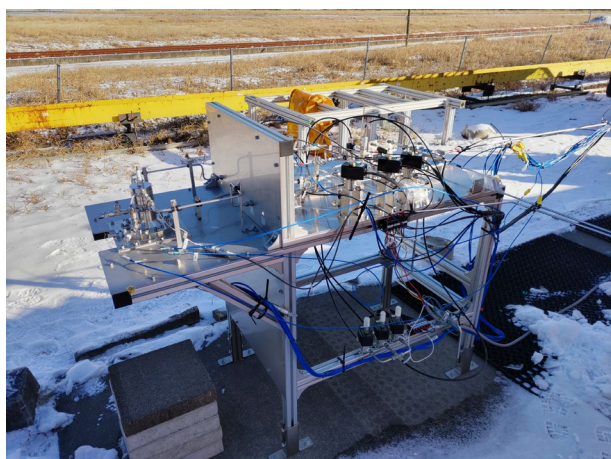


図 4 ニトロメタン燃焼試験設備

図 5a)の映像では、水素-酸素点火器の火炎がノズルから噴射されていることが分かる。その直後の図 5b)以降ではノズルから火炎が消え、ニトロメタンの噴霧と思われる噴流が観察される。燃焼器の外部に噴射されたニトロメタンは点火器火炎に引火して、燃焼器外部で燃焼していた。

燃焼圧力の時間履歴を図 6 以降に示す。

図 6 に初回の燃焼試験での圧力履歴を示す。なお、図 6 における略号の意味は以下の通りである。

PCC	燃焼器圧力
PFQ1	ニトロメタンオリフィス上流圧力
PFQ2	ニトロメタンオリフィス下流圧力
PMF	噴射器マニフォルド圧力
PIGO1	酸素ガスオリフィス上流圧力
PIGO2	酸素ガスオリフィス下流圧力
PIGF1	酸素ガスオリフィス上流圧力

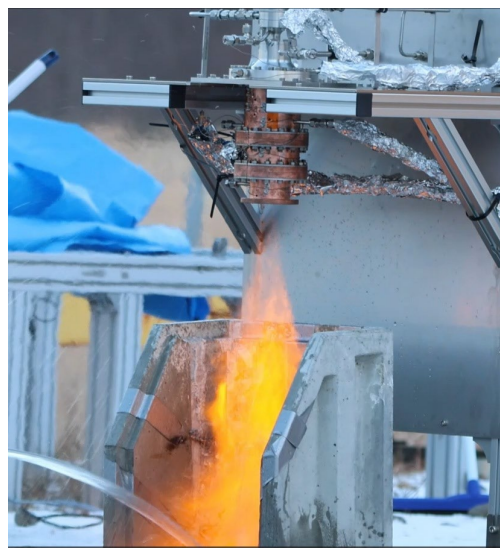


図 5 ニトロメタン燃焼試験
(上から a), b), c))

ニトロメタン着火試験では、水素-酸素点火器では持

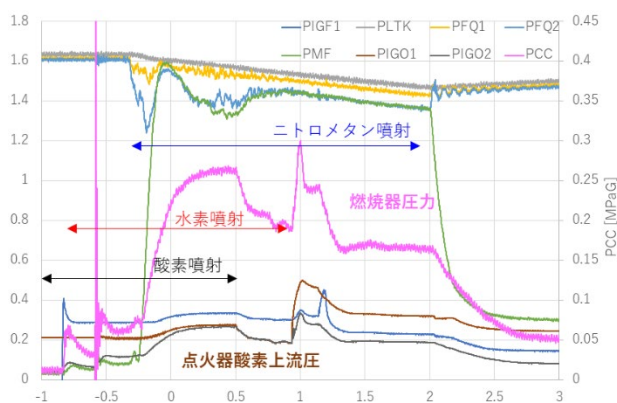


図6 ニトロメタン着火試験時の圧力履歴

続的な着火燃焼が出来なかった。そこで、点火器からの酸素ガスを予め噴射し、燃焼器内を酸素で満たしつつ、更に火薬も用いて着火補助を行った。図7はその時の圧力時間履歴である。水素-酸素点火ガスだけの着火では、0.02MPa程度の圧力上昇しか計測されなかったが、酸素ガスを充填し火薬を併用することで、0.25MPa程度の圧力上昇を計測することが出来た。しかしながら、これでも予定していた圧力上昇には程遠く、更なる着火補強策が必要になる。

4. 結言

筆者らは、次世代の低毒一液系推進剤として、ニトロメタンに着目し、高圧燃焼試験を実施した。ニトロメタンの着火にはまだ成功していないものの、燃焼試験は継続中であり、着火シーケンスの見直しや着火条件の見直しなど、いくつも条件を見直してニトロメタンの着火・燃焼を目指していく予定である。

文 献

- [1] S. Igarashi, A. B. Fukuchi, N. Azuma, K. Hatai, H. Kagawa and H. Ikeda Development of a High-Performance HAN/HN-Based Low Toxicity Monopropellant Transaction of JSASS Aerospace Technologies Japan. 14 No. ISTS 30 (2016) Pa_101-Pa_105.
- [2] R. Amrousse, T. Katsumi, N. Azuma, and K. Hori, Hydroxylammonium Nitrate (HAN)-Based Green Propellant as Alternative Energy Resource for Potential Hydrazine Substitution : From Lab Scale to Pilot Scale-up, Combustion and Flame 176 (2017) 334-348.
- [3] R. Minato, S. Tanaka “Fluid Hammer Phenomena for Nitromethane Propellant Feed System” Science and Technology of Energetic Materials Vol.83 No.4 2022.08

pp.111-116.

- [4] R. Minato, “Low Toxic Nitromethane Based Monopropellant for Gas Generator Cycle Air Turbo Ramjet Engine” Propulsion and Power Research, Vol.11, Issue.3, September (2022), pp.311-324.
- [5] E. Boyer and K. K. Kuo, “Characteristics of Nitromethane for Propulsion Application” Proceeding of the 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Reno Nevada, January 9-12, 2006, AIAA Paper 2006-361.
- [6] J. D. Clark, “Ignition ! : An Informal History of Liquid Rockets Propellants” Rutgers University Press, New Brunswick, NJ, 1972, pp. 7-10
- [7] A. Mayer and W. Wieling, “Green Propulsion Research at TNO the Netherlands” Transactions of the Institute of Aviation. Vol.4 No.253, (2018), pp.1-24
- [8] L. Werling et. al “Research and Test Activities on Advanced Rocket Propellants at DLR’s Institute of Space Propulsion in Lampoldshausen” Proceedings of 9th European Conference for Aeronautical and Space Sciences (EUCASS) (2022).
- [9] H. M. Kindsvater, K. K. Kendall, K. H. Mueller, P. P. Datner, “Research on Nitromethane” Aerojet Engineering Cooperation, Report No.493, 1951.

地方自治体住民の住宅の断熱性能等向上 に対する意識調査とその改善

栗原浩平^{*1}, 田中輝幸^{*2}, 縄田健志^{*2}, 高宮則夫^{*2}

- 1 室蘭工業大学 もの創造系領域
2 NPO 法人公共環境研究機構

1. はじめに

2050 年カーボンニュートラルを達成するためには、民生部門（特に住宅）における省エネルギー化が必須である。住宅の省エネルギー達成のために、リフォームによる断熱気密性能の向上や高性能設備への入れ替えなどの方法がある。地方自治体において上述したリフォームに対する補助金制度が整備されているものの、美瑛町が令和 5 年度に実施したエネルギー使用状況等のアンケートの結果から、住宅リフォームに対する補助制度が認知されていない状況がわかった。リフォームの費用対効果や健康への影響⁽¹⁾等が伝わっていないことが原因と考えられる。

そこで本研究では、住宅リフォームを実施した住民に対するアンケート調査を行い、町民に対して省エネルギーの重要性や住宅リフォームの効果について正確かつ理解しやすい情報を提供することを目的とする。年度末に住宅リフォーム等の効果に関する町民向けの研修会を開催する予定であり、断熱改修や設備改修の効果を啓発するための住民向け資料の作成を目指す。

2. 研究方法

2.1 住宅リフォーム推進のための設備仕様等調査

美瑛町民を対象に、現在の住宅の設備仕様や健康影響等の現状を調査することで町民の住まい方等の特徴を把握し、断熱・設備改修の効果を推定する。表 1 に示す通り、町民を対象に住宅の設備仕様や住まい方、健康影響、リフォーム経験の有無等に関するアンケート調査を実施した。

また現状の住宅・設備性能から断熱改修や高効率設備の導入を導入することで住宅の CO₂ 排出量がどの程

度削減するかを試算するために、国土交通省の「エネルギー消費性能計算プログラム」⁽²⁾を用いて断熱改修・設備更新の影響を分析した。

表 1 アンケート調査概要

対象	美瑛町民
調査期間	2024/11/30~12/27
回答方法	インターネット上の質問票を介して回答
回答数/依頼数	90 世帯/約 3300 名 (回収率:2.7%)
主な質問項目	世帯構成、お住まいの状況（建築年など）、住まい方（光熱費など）、健康影響、リフォームの経験

2.2 寒冷地中古住宅の壁体内部の状況調査

士別市と名寄市の築 50 年弱の木造住宅を対象とした研究⁽³⁾では、明白な断熱性能低下を示す箇所が多く存在することを示し、その原因として壁体内気流があげられていた。本研究では、寒冷地中古住宅の実際の壁体の状況がエネルギー消費量に及ぼす影響を検証することを目的とし、美瑛町内の 2 つのコンクリートブロック造（以下、CB 造）住宅の壁体内部を調査した（表 2、図 1）。部屋で暖房を行って 2 時間程度経過後、熱電対や熱画像で室温・壁表面温度等を測定した。測定後に壁体を解体し、部材の厚さや壁内気流を測定した。

表 2 美瑛町の実測対象町営住宅

	実測日	建築造	築年数
白樺団地	2024/12/11	CB 造	52 年
憩町団地	2024/12/12	CB 造	57 年

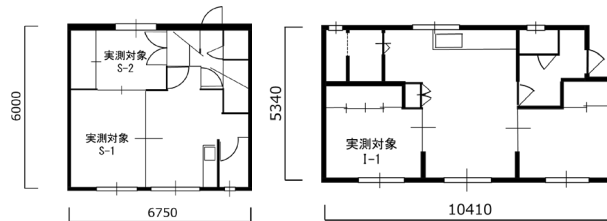


図 1 平面図(左:白樺団地, 右:憩町団地)

2.3 壁体再現実験による熱貫流率の測定

実験では既往研究³⁾の木造住宅と今回実測した CB 造住宅の壁体内部を再現し、熱貫流率を測定した。試験体の断面構成を図 2 に示す。断熱材で作成した 300×300×300mm の Box の一面に試験体を設置し、ラバーヒーターにより Box 内外で温度差を 15℃程度生じさせた。熱流密度を試験体表面に貼り付けた熱流計 (M55A, ETO DENKI) で、試験体の Box 内外表面温度を T 型熱電対で測定した。1 分間隔で測定し、定常状態に達した 10 分間の平均値を用いて式(1)より熱貫流率を算出する。

$$U=Q/\Delta T \quad (1)$$

ここで、 U :熱貫流率[W/(m²・K)], Q : 熱流計の熱流[W/m²], ΔT :試験体の内外表面温度差[K]

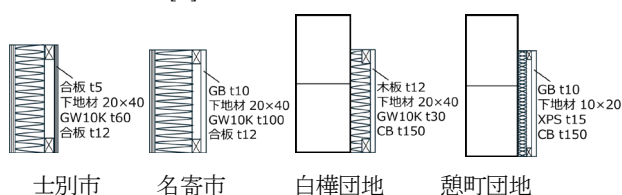


図2 試験体の断面構成

壁内気流を生じさせる条件では既往研究²⁾より、断熱欠損をそれぞれ土別住宅で 20mm, 名寄住宅で 40mm 設け、その部分にファンを上向きに設置し、試験体下部の空間から気流を引き上げることで壁内気流を発生させた。壁内気流の条件は無風, 0.28, 0.5m/s とした。

2.4 測定した熱貫流率を用いたシミュレーション

壁内気流が暖房負荷に及ぼす影響を Energy Plus で検証した。図 1 より白樺団地と憩町団地の住宅モデルを作成し、旭川市の気象データを用いて暖房の設定温度を 20℃とした場合の暖房負荷を算出した。壁体は図 2 の構成とした。土別・名寄住宅はモデル化せず、白樺団地のモデルを利用した。壁内気流に関しては実験で得られた熱貫流率から断熱材の熱伝導率を逆算し設定することで再現した。土別・名寄住宅の壁体は、断熱欠損なし、断熱欠損ありで無風を比較対象とした。

3. アンケート調査結果と考察

3.1 現在の住まいの状況

住宅の建築年について、省エネ基準が制定された年を基準に分類した (図 3)。1999 年 (次世代省エネ基準制定年:断熱等級 4 (現行基準)) 以降とそれ以前で半分に分かれる結果となり、特に旧省エネ基準 (断熱等級 2 相当) が制定された 1980 年以降とそれ以前の基準がなかった年代が全体の 3 割ほどを占める結果となった。

続いて、設備仕様を建築年別に分類したものを図 4 (給湯器)、図 5 (暖房機) に示す。1999 年以前では、給湯・暖房設備どちらでも灯油熱源の設備の使用割合が高く、2013 年以降ではエコジョーズが多く採用されていた。外窓のサッシの種類について、建築年別に見たものを図 6 に示す。1999 年以前はアルミサッシの使用割合が高くなっているが、1999 年以降は樹脂サッシの割合が高いことがわかる。

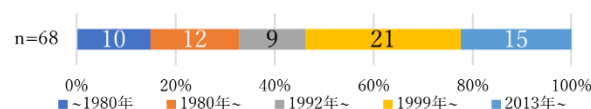


図3 住宅の建築年内訳(省エネ基準制定年別)



図4 建築年別給湯設備仕様の内訳

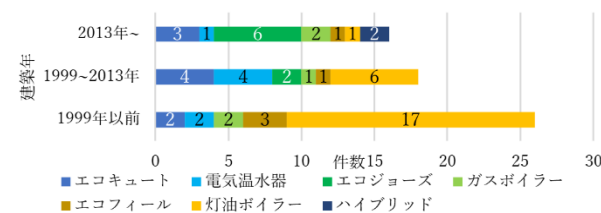


図5 建築年別暖房設備仕様の内訳

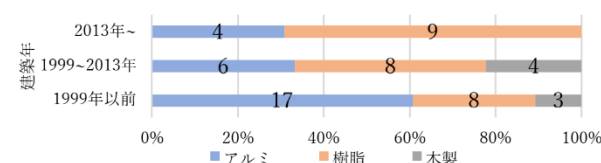


図6 建築年別外窓サッシの種類

3.2 住まい方

冬期のひと月当たりの光熱費を図 7 に示す。給湯・暖房設備の組み合わせを熱源別に電気・電気、ガス・ガス、灯油・灯油、ガス・灯油の世帯に限定して比較した。ガス・ガスが最も低い値を示したが、電気・電気は平均値 50000 円と最も高く、分布も広がっている。また、冬期の各部屋で普段感じる暑さ寒さを図 8 に示す。寒いと回答した割合が最も多かったのが廊下で、6 割の世帯が「やや寒い」、「寒い」、「とても寒い」に票を入っていた。次に冬期の服装の設問から全身の着衣量 (clo 値) を建築年別に推定した (図 9)。2013 年以降では他の年

代よりも値が低くなっており、平均値は2013年以降が約0.67clo、2013年以前では約0.8cloとなった。

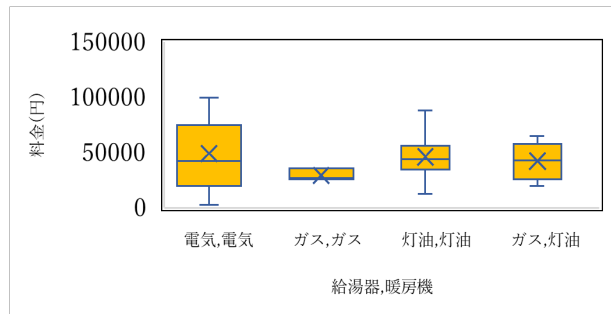


図7 冬のひと月当たりにかかる光熱費
(給湯,暖房設備の組み合わせ別)

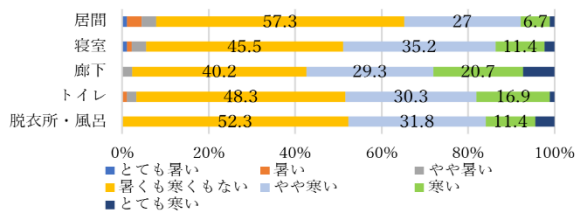


図8 冬の各部屋で普段感じる暑さ寒さ(n=89)

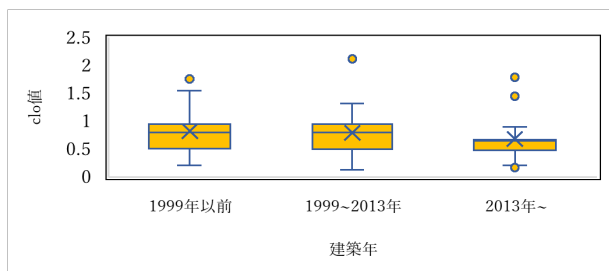


図9 建築年別の冬の着衣量(clo 値)

3.3 健康について

「ご家族の健康について現状当てはまる症状を全てお選びください」という設問に対しての結果を図10に示す。15~65歳に関しては4割ほどが「ない」と回答したが、「高血圧」で16件(22%)となった。65歳以上に関しては3割ほどが「ない」と回答したが、それを上回ったのが「高血圧」で全体の38%(18件)である。

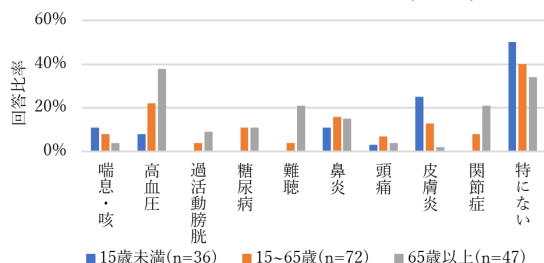


図10 ご家族の健康について現状当てはまる症状

3.4 リフォームについて

リフォームの経験、予定に関して図11に示す。約45%がリフォーム済み又は予定があるとなった。また、リフォーム済みの方で省エネリフォームを行っている世

帯は13件のみで、窓の断熱改修が10件、壁の断熱改修が6件、高効率設備の導入が4件となった(図12)。リフォームの理由は、傷んでいた、寒いからが多かった(図13)。

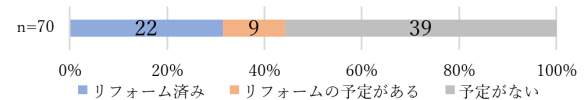


図9 リフォームの経験、予定があるか

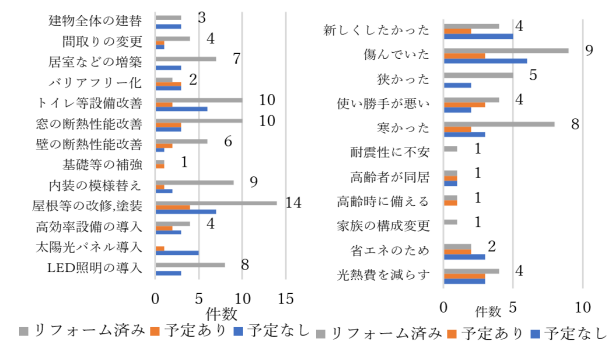


図10 リフォーム内容

図11 リフォームの理由

3.4 改修によるCO₂排出削減量の分析

アンケート結果より、現行の省エネ基準が制定された年よりも前に建てられた住宅が半分を占めており、灯油ボイラーなど石油従来型の設備が多く採用されていることが示された。そこで給湯設備を省エネ型に変更した場合や断熱リフォームを行った場合の年間CO₂削減量をWebプログラムで試算した(表3:計算条件)。給湯器では、電気ヒーター式(電気温水器)を電気ヒートポンプ式(エコキュート)や潜熱回収型(エコジョーズなど)に変更した場合が最もCO₂を削減できる(約2200kg-CO₂減)。しかし、ガス・石油従来型から潜熱回収型に変えた場合は、削減量が最大でも300kg-CO₂ほどと、削減量は少ない。そこで断熱リフォームを想定し、外皮平均熱貫流率U_A値:0.46W/(m²・K)(断熱等級4)から0.40W/(m²・K)(断熱等級5)へリフォームをした場合は1141kg-CO₂、断熱等級4から0.34W/(m²・K)(北方型住宅2020相当)へのリフォームは2243kg-CO₂の削減が期待できる結果となった。窓のみの断熱改修として、熱貫流率4.1W/(m²・K)(1980年基準相当)から2.3W/(m²・K)に変更すると、約1600kg-CO₂の削減が期待できる結果となった。

表3 計算条件

床面積[m ²]	主たる居室29.81, その他居室51.34, 合計120.08
地域区分	1地域
平均日射熱取得率	冷房期:2.0, 暖房期:1.7で固定
暖房方式	居室のみを暖房(住戸全体ではない)
暖房機器	電気蓄熱暖房機, FF暖房器(灯油), 石油従来型温水暖房機(パネルヒーター)
冷房方式	なし
換気設備(換気回数)	壁付け式第三種換気設備(0.5回/h)
給湯設備(給湯専用)ふろ追焚あり	ガス従来型, ガス潜熱回収型, 石油従来型, 石油潜熱回収型, 電気ヒーター, 電気ヒートポンプ, 電気ヒートポンプとガス瞬間式併用型
照明設備	白熱灯以外(蛍光灯)

4. 中古住宅実測調査結果と考察

4.1 CB 造住宅の実測調査の結果

断熱欠損部の熱画像と壁体内部を図 12 に示す。白樺団地では断熱欠損が見られたが、その他の壁体では目立った欠損部は見られず、壁体内風速も確認されなかった。

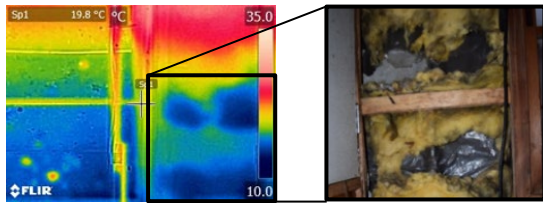


図 12 断熱欠損部の熱画像と壁体内部(S-2)

4.2 壁体再現実験による熱貫流率の測定結果

再現実験で得られた熱貫流率を表 4 に示す。壁内気流が大きくなるほど熱貫流率が上がっていき、断熱欠損の有無で約 $1\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ の差があることが分かる。また、CB 造住宅では現場実測で計測した熱貫流率と概ね一致していた。

表 4 各住宅の再現実験での熱貫流率

条件		熱貫流率 [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
士別市 中古住宅	断熱欠損なし	0.69
	断熱欠損あり(0m/s)	1.63
	断熱欠損あり(0.28m/s)	3.03
	断熱欠損あり(0.5m/s)	3.17
名寄市 中古住宅	断熱欠損なし	0.77
	断熱欠損あり(0m/s)	1.82
	断熱欠損あり(0.28m/s)	2.14
	断熱欠損あり(0.5m/s)	3.67
美瑛町白樺団地		1.12
美瑛町憩町団地		1.20

4.3 壁内気流が暖房負荷に及ぼす影響

壁内気流の影響が大きく見られた名寄市中古住宅の結果を図 13 に示す。断熱欠損部では壁内気流が増すほど断熱性能は低下し、その差は断熱欠損なしの状態の 2 倍以上になる可能性があることが示された。

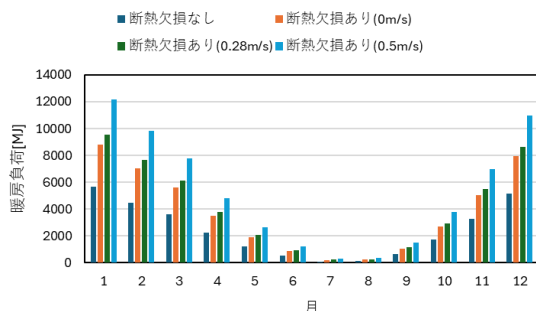


図 13 名寄市木造住宅の暖房負荷の比較

4.4 壁体構成が暖房負荷に及ぼす影響

CB 造住宅の白樺団地の結果を図 14 に示す。30mm の GW を外側に設置した外断熱は、内断熱より年間約 8% の負荷低減となった。また断熱改修の一例として外断熱を付加した内断熱+外断熱の条件では、内断熱のみよりも年間で約 21% 低減した。

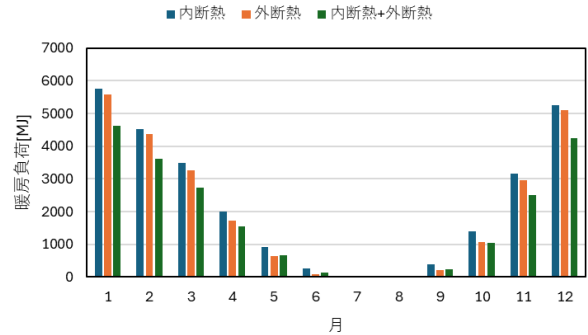


図 14 白樺団地の暖房負荷の比較

4.5 壁内気流が暖房負荷に及ぼす影響

図 13 で得られた壁内気流の影響の大きさを示すために、断熱材がない壁体との年間暖房負荷の比較を示す(図 15)。断熱材なしとは、石こうボード+下地材分の厚さの半密閉中空層+合板で構成される。図 15 より断熱材がない状態の暖房負荷と比較すると 40mm 以上の断熱欠損が生じた状態だと概ね一致し、壁内気流が生じるとそれ以上に大きくなる可能性があるため、大きな断熱欠損と壁内気流どちらも生じさせないことが重要である。

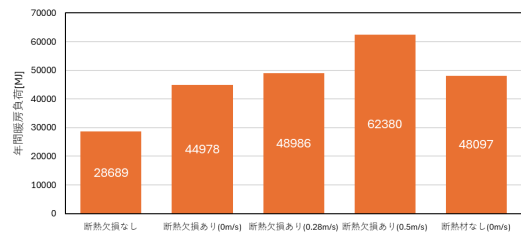


図 15 断熱材がない状態の壁体との比較

4.6 断熱改修を想定したシミュレーション

CB 造住宅の断熱改修を想定し、内断熱と外断熱における暖房負荷をシミュレーションした。条件は、①図 2 の内断熱、②図 2 の断熱材を外側に移動(外断熱)、③図 2 の内断熱+同じ厚さで外断熱を付加、とした。

断熱材を厚くした場合の年間暖房負荷の低減効果を図 7 に示す。内断熱+外断熱では外側の断熱材のみ厚くし、内側と外側の断熱材の合計の厚さを断熱材の厚さとした。その結果、同じ断熱材の厚さでは外断熱が最も年間暖房負荷が小さくなった。断熱改修により外断熱 60mm にするだけでも年間約 24% の負荷削減効果となる。

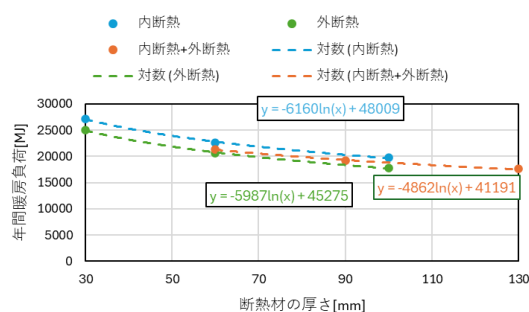


図7 断熱材の厚さが年間暖房負荷に及ぼす影響

5. おわりに

アンケート調査結果より、美瑛町では灯油ボイラーなど石油従来型の設備が多く採用されていたが、CO₂削減量の計算結果では最も簡単な石油従来型給湯器から潜熱回収型ヘリフォームをしても排出量の削減があまり期待できないことが示された。また現行の省エネ基準が制定された年よりも前に建てられた住宅が半分を占めていることや、省エネルギー化に有効なリフォームをしている住宅が少ない現状にあることも示された。窓の断熱改修や断熱リフォームによる CO₂ 削減量の算出結果により、旧省エネ基準相当から現行基準へとリフォームする場合や現行基準からさらにリフォームする場合に、CO₂ の削減が期待できることを示した。

またシミュレーション結果より、40mm 以上の断熱欠損が生じると断熱材がない状態の暖房負荷と概ね一致し、壁内気流が生じると断熱材がない状態の暖房負荷以上となり、大きな断熱欠損と壁内気流どちらも生じさせないことが重要である。また、CB 造住宅の壁体構成では外断熱が最も年間暖房負荷が小さくなった。内断熱 30mm から断熱改修により外断熱を付加した内断熱+外断熱の条件では年間で約 21%、外断熱 60mm にするだけでも年間約 24%の改修効果がみられた。

以上の結果より、木造中古住宅において気流止め設置や断熱欠損を無くすこと、高効率設備への更新だけでなく窓の断熱改修やより高い断熱等級へのリフォームを美瑛町民に促すことがゼロカーボンへより有効であることが示唆された。

文献

- (1) 住宅における良好な温熱環境実現推進フォーラム、生活環境病による不本意な老後を回避するための住まい、<https://www.onnetsu-forum.jp/file/document6.pdf>, 2025/2/2 閲覧
- (2) 国土交通省、「エネルギー消費性能計算プログラム」, <https://house.lowenergy.jp/program>, 2025/2/2 閲覧

- (3) 川上竜輝, 栗原浩平, 森太郎, 寒冷地の中古住宅流通活性化に向けた断熱性能の経年変化に関する研究(その 11) 名寄市・士別市の中古住宅における測定事例, 空衛学会北海道支部会, 58, pp.197-200, 2024

伊達天然藍で染めた廃ウレタンの応用に関する検討

馬渡 康輝*¹, 佐藤 輝*²

1 室蘭工業大学 しくみ解明系領域

2 株式会社マテック

1. はじめに

自動車産業は持続可能な発展に向け、リサイクル技術の向上やエコフレンドリーな設計に取り組む必要がある。このような取り組みは、地球環境への貢献だけでなく、新たな価値をもたらす可能性がある。2023年の日本国内における解体/破砕等業種が引き取った使用済自動車の数は、約238万台と報告されている。¹⁾ 廃自動車は、タイヤ、ガラス、ハーネス、電子機器、触媒、プラスチックなどを取り外される。この解体済自動車は、シュレッダープラントで破砕され、鉄や非鉄金属とASR（自動車シュレッダーダスト）に分けられる。続くASR資源化工程では、プラスチックは固形燃料となる。²⁾

一方、本学が位置する室蘭市隣接する伊達市は、天然藍染が盛んな地域である。北海道の藍の生産量は全国2位であり、道内で藍を栽培しているのは伊達市の1軒の農家だけである。藍染の染料であるインジゴは、不溶性の有機化合物である。染液を調製する際には、藍の葉を約100日かけて発酵させた「すくも」を塩基条件下で菌による還元反応を経てインジゴを水溶性にする。この作業は「藍を建てる」と呼ばれる。従来、藍染の対象は綿、麻、シルクのような天然素材に限定されていた。我々は、廃自動車のシートのクッション材料であるポリウレタンフォーム（以下 PUF）のリサイクルに関する検討を進めてきており、PUFの新たな活用法を探索する中で、この PUF が藍染液に浸漬すると比較的短時間で濃く染まることを見出した（図1）。この結果は、天然由来でない合成高分子でも藍染ができる可能性を示すものであり、さらに、地域産業とリサイクルを組み合わせる新たな展開が期待された。³⁾

本研究では、伊達天然藍で染めた PUF の活用法を検討することを目的とし、藍染 PUF について詳しく調査するとともに、有機化学的アプローチによる藍染 PUF からインジゴの抽出についても検討した。



図1 藍染前後の PUF. 左：藍染前，中央：染液と数秒接触，右：染液中で吸水（絞る）・放水（解放する）を30秒間繰り返した

2. 実験結果と考察

2.1 その他の樹脂発泡体製品との比較

自動車シートに用いられる PUF が特異的に染まるか確認するために、より密度が低いポリウレタンフォームである食器洗浄用 PUF、および発泡の程度が自動車シート用 PUF とほぼ同等のメラミン樹脂フォームを染液へ投入した。吸水（絞る）・放水（解放する）を30秒間繰り返したのちに流水でよく洗浄したところ、前者は染まり、後者は全く染まらなかった（図2）。この結果から、樹脂成形体の発泡状況により内部にインジゴが残留するのみでは着色せず、樹脂自身の分子構造に起因している可能性が高いことが示された。



図2 藍染前後の台所用 PUF とメラミン樹脂フォーム

2.2 PUF の染色条件の検討

自動車用 PUF を用いて染色条件を検討した。浸漬時

間を 30 秒及び 60 秒，浸漬回数は 60 秒の場合は 1 回，30 秒の場合は 1 及び 2 回とした．また，浸漬 2 回の場合は，1 回目の浸漬後に液から出し 30 秒空中で放置したのちに 2 回目の浸漬を行った．その結果，本実験で設定した 3 パターンの中では浸漬時間 30 秒で 2 回の場合が最も濃く染まることがわかった．一般的な綿や麻の布ではこの PUF が示す色味に染める際には，3 分浸漬と空中で放置 3 分を 5 回程度繰り返す．このことから，PUF のインジゴとの親和性は綿や麻より高いことが考えられる．

PUF に対するインジゴの吸着量を浸漬前後の重量測定より求めるため，浸漬操作後にアクが出なくなるまで流水で洗浄し，大気圧下で 1 週間乾燥したのちに重量を測定した．複数の検体を用いて比較したところ，浸漬前後における重量の増加は平均 0.1 wt%以下であった．このことから，PUF に対するインジゴの吸着量は非常に少ないと言える．吸着前後の PUF の IR スペクトルを測定したところ，全く差が見られなかったことも，吸着量が非常に少ないことを支持した．

2.3 放置による脱色

また，染まった PUF を太陽光が当たらない室内に放置したところ，徐々に脱色することが明らかになった．一般に藍染品は日陰に保管することで脱色が遅れる．3 ヶ月継続して放置した結果を図 3 に示した．今回の PUF は直射日光には当たっていないが，LED ライトは当たる状況であった．さらに，ポリエチレン袋に入れることにより脱色は進まなかった．これらの影響は，引き続き検討中である．

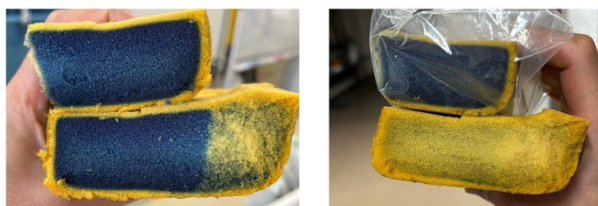


図 3 室内に 3 ヶ月間放置した染色後の PUF．ポリエチレンの袋に入れておくと脱色は進まなかった．

2.4 ソックスレー抽出

ソックスレー抽出器は，溶剤を使って固体から目的成分を抽出する装置である．ヒーターと溶媒を入れた容器，試料を入れた円筒ろ紙，冷却管から構成され，溶媒の循環により効率的に抽出を行う．加熱された溶媒は蒸発・冷却後に試料に滴下し，溶媒可溶分を溶かして容器に戻るサイクルを繰り返すことで，少量の溶媒



ソックスレー抽出装置



抽出開始直後



抽出最中



48時間後の抽出液

図 4 ソックスレー抽出の状況

で効率的な抽出が可能である．これを用いて，裁断した藍染後の PUF を円筒ろ紙へ投入し，インジゴの連続抽出を試みた（図 4）．溶剤が滴下開始した抽出開始直後には，円筒ろ紙に鮮やかな青色が染み込んできており，PUF からインジゴが溶出されたことがわかった．円筒ろ紙部分に溜まる抽出液の色は抽出時間とともに薄くなるが完全に無色にはならなかった．このため，目視による色味の変化がほぼなくなった 48 時間後に停止した．停止後に円筒ろ紙から取り出した PUF の大部分から藍色が抜けて染色前の色に戻っていた（図 5）．円筒ろ紙の中央部分に位置した PUF の色が抜けずに残ったことから，円筒ろ紙へ PUF を密に詰めすぎたことにより溶剤が接触できなかったことが考えられる．また，5.0 g の PUF から得られた抽出液を濃縮すると，黒色のインジゴ混合物が 0.1 g 得られた．この重量は染色前後の PUF の重量増加の割合より多く，PUF に元から含まれていた添加剤も同時に抽出されたと考えられる．



抽出前の藍染PUF



48時間後の藍染PUF



抽出液の濃縮後

図 5 ソックスレー抽出前後の PUF と抽出物

3. おわりに

本研究では、藍染 PUF の作成条件と生成物の基本的な性状について検討した。一般的な布を染める条件より見た目では早く染まる印象を受けたが、インジゴの吸着量が特別多くなかった。濃く染まったように見えた理由は、発泡体であることによる比較的多い表面積が原因の一つと考えられる。放置による脱色が早いことも、吸着量の少なさを反映しているかもしれない。藍染 PUF をアート作品の素材としての利用を想定していた。しかし、比較的脱色が早いため、長期間外見を維持する作品ではなく経時変化を利用する作品を考える必要がある。材料利用の面でも同様であり、色彩変化を積極的に活用する用途の探索も望まれる。加えて、PUF 以外のポリウレタン製品についても染まることも明らかになった。図 6 にポリウレタンのフィルムやチューブ、手袋を染めた結果を示した。これらは平滑な表面であるため液の浸透が遅いためか、染まるまで非常に時間がかかった。やはりこれらも PUF と同様に脱色が進む。しかし、従来の天然素材しか染まらないとの常識から外れる結果が得られたことは、今後の藍染業界の対象を広げることにつながる知見と言えるかもしれない。

本研究に関する藍染を引き受けていただきました、北海道伊達市の藍染工房 aizome - 「I」の金子智志氏と金子愛氏に感謝いたします。



図 6 種々のポリウレタン製品の藍染試験

文献

- (1) “自動車リサイクルデータ Book 2023”，公益財団法人自動車リサイクル促進センター，2024 年 7 月発行。
- (2) “マテック株式会社ウェブサイト”，<https://www.matec-inc.co.jp/business/recycle/eltv/>
- (3) “伊達市噴火湾文化研究所ウェブサイト”
https://www.city.date.hokkaido.jp/funkawan/detail/00005799.html#a2_2

国立大学法人 室蘭工業大学
MONOづくりみらい共創機構

〒050-8585 室蘭市水元町 27-1

<https://u.muroran-it.ac.jp/crd/>

crd@muroran-it.ac.jp

TEL (0143) 46 - 5860

FAX (0143) 46 - 5879