



JAPAN P&I CLUB

第 41 号 2017 年 11 月

P&I ロスプリベンションガイド

編集：日本船主責任相互保険組合 ロスプリベンション推進部

💧 ベンチレーション 🌊



目次

はじめに	2
Box 1 汗濡れの科学.....	4
Box 2 吸湿性のある貨物、平衡相対湿度、換気.....	7
Box 3 袋詰めの米：積み付け、ダンネージ.....	9
Box 4 露点温度表の例.....	13



はじめに

本稿では貨物の換気の基本を紹介します。貨物区画の換気は、在来型の船舶を対象としており、コンテナや冷蔵艙は含みません。本稿における換気とは、意図して貨物区画へ外気を取り入れ満たすことと、ホールド内の空気を排出することです。換気を行う理由は幾つかありますが、主に人命の安全と貨物の適切な保全です。本稿では後者、適切な貨物の保全、すなわち適切な換気の方法、貨物の濡れ損のリスク、在来型船舶の貨物換気の実情に焦点をあてます。



安全

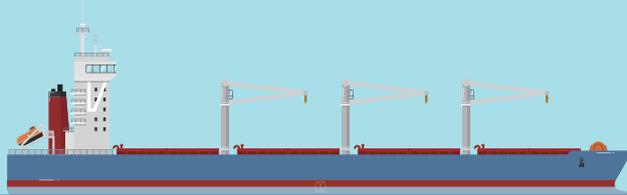
人が安全に貨物区画に入るためには、酸素の供給が十分確保されていなければならないため、換気を行う必要があります。同時に、危険な状況を引き起こす可能性のある有毒もしくは可燃性ガスを除去するために換気が必要な場合もあります。これらのガスは、貨物自体から生成される場合があります。例えば、発熱性石炭から発生する一酸化炭素です。あるいは、他の外部要因、例えば貨物燻蒸中のリン酸ガスの発生が挙げられます（燻蒸ガスの危険性については、Japan P&I 2012年3月発行のロスプリベンションガイド 22号をご参照）。いずれにせよ、この意味での換気は、「エアレーション」と呼ばれることもあり、通常の、または安全なレベルに戻ったとみなすことができるまで空気中のガス濃度の測定を必要とします。これは本質的に貨物の保全と特に関係はありません。

貨物の保全

前述の安全上の理由とは別に、貨物区画を換気する主な目的は、貨物区画内で生じる汗濡れ、いわゆる結露を最小化することにあります。これは、船長の監督の下、特定の貨物が本船上で取り扱われる際には重要な事項となります。これに失敗するとカーゴダメージが発生し、その結果、揚荷の際のカーゴクレーンにつながる恐れがあります。貨物区画を換気するかどうかを決定する際には、結露の発生を排除し最小限に抑えるために、乗組員は外気温度と貨物自体あるいは貨物区画内の空気とを比較測定しなければなりません。（これについては記事の後半で詳しく説明します）

汗濡れとは？

船積みにおいて「汗濡れ」とは貨物区画における水分の結露を指す用語です。気温と露点と汗濡れの形成との関係の詳細については、Box 1 をご参照ください。結露に起因する貨物の損害との関連で、私たちは「貨物の汗濡れ」と「船体の汗濡れ」という風に表現しがちです。しかしこれらの用語の使い方は、単に現象の視覚による状態を反映するものの、貨物も船もそれ自身が発汗することはないのでどちらの表現も正しくはありません。これらについては以下詳しく説明します。



貨物の汗濡れ

結露が貨物に直接生じると、それは「貨物の汗濡れ」と呼ばれます(写真1を参照)。比較的冷たい貨物を比較的暖かい気候の中で輸送する場合に、暖かい空気(不適切に)換気される時、貨物の汗濡れが潜在的な問題となります。暖かい空気が貨物区画に入り、冷たい貨物と接触すると空気が露点以下に冷却され、貨物の露出面に水蒸気が凝縮して液体(水)になります。このようにして、貨物は「発汗」しているように見えます。

スチールコイルの表面に結露が発生した、いわゆる貨物の汗濡れ。これは、冷たい貨物が暖かい空気(不適切に)換気された時に発生する、最も一般的な損害事例。



写真 1

船体の汗濡れ

ホールド内の船体構造部材に水分の凝結が形成されると、“船体の汗濡れ”が生じます。これらは普通、コーミングやハッチカバーの裏面で発生し(写真2ご参照)、その下の貨物の表面に滴下することで典型的なカーゴダメージのパターンを作り出します(写真3ご参照)。船体の汗濡れは、暖かいまたは、自然発熱する貨物を冷たい気温の中で輸送する場合や、暖かい湿った空気を冷たい外気に置き換えるような十分な換気が、貨物上部スペースでなされないと発生します。上部スペース内のこの暖かい湿った空気が、(より低部の外気および/または海水の温度で冷却される)冷たい船体構造部材と接触すると、空気は露点以下に冷却され、水蒸気は液体の水になります。結露した水が滴下したり部材表面から流れ出たりするので船が「発汗」しているように見えるのです。



写真 2

ハッチカバーの裏面に結露が発生、いわゆる船体の汗濡れ。暖かく湿った空気が冷たい鋼材と接触したことによって水蒸気が液化(水)した状態。

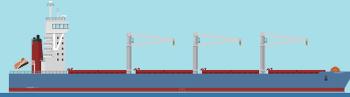


写真 3

船体の汗濡れが穀物貨物に損傷を与えた特徴的な事例。閉じたハッチカバーの下面から液化した水蒸気分がばら積み穀物に滴下し、表面を変質させ(変色、カビの発生)特徴的な線状模様が生じた事例。格子状のパターンはハッチカバー裏面の鋼材構造配置を反映している。



ベンチレーション



Box 1

汗濡れの科学

任意の温度に対して、空気中には水蒸気として最大量の水分を保持できます。これは飽和蒸気量と呼ばれ、(空気中の水分の質量またはその水分によってもたらされる圧力のいずれかを)測定することができ、各温度での飽和蒸気量との関係をまとめた標準表が公開されています。

各温度における空気が飽和状態に達していない場合、その空気中の実際の水分量はその温度における飽和水分量の百分率(パーセント)として表されます。これは相対湿度として知られています。

所与の温度および相対湿度の空気が飽和含水率に達する温度に冷却されると、それより低い温度では露点となります。露点温度以下でさらに冷やされることにより、空気中の水分が液体の水分として凝結、結露あるいは「汗濡れ」が形成されます。

例

標準表によると、飽和状態にある 20 の空気的水分量は 17.30g/m^3 です。

仮に実際の水分量が 10g/m^3 であった場合、20 における相対湿度は 58% になります。

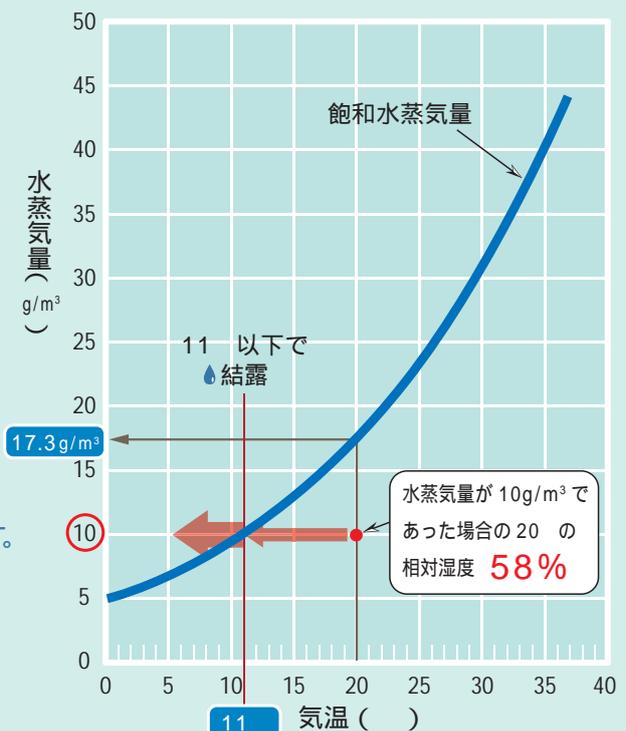
計算式 $(10 \div 17.30 \times 100) = 57.8$

11.1 での飽和空気中の水蒸気の質量は 10.08g/m^3 ですから、20、相対湿度が 58% の空気の露点は 11 になります。

同じ空気を 11 以下に冷却すると、結露ないし汗濡れ(あせぬれ)が発生します。

この関係により、露点は空気中の水分量の尺度として使用することもできます。

気温 ()	30	25	20	15	10	5
飽和水蒸気量 (g/m^3)	30.4	23.1	17.3	12.8	9.4	6.8



どのような貨物が最も危険にさらされているか？

汗濡れによる損傷の影響を受けやすい貨物は、水と接触して何らかの形で劣化するものです。これらは吸湿性のある貨物か非吸湿性の貨物で、吸湿性のある貨物は空気と相互に作用することが可能な水分を含んでいます（Box2 ご参照）。非吸湿性の貨物は、固有の含水量を持たないが、少なくとも空気と相互作用することができないものです。

一般的に、吸湿性のある貨物とは、穀物類、油脂用種子類、カカオ豆、木材などの天産物、またはこれら天産物から作られた食料類、シードケーキ類、その他、動物用飼料類などです。こうした貨物に水が接触して発生する損傷を防止あるいは最小限に抑えるために、適切な換気が必要となります。このような貨物の安全な運送は、積載時の水分量に左右されることに留意する必要があります。結果として、水分（凝結分）が追加されると、穀物自体の発芽あるいはカビの局所的な発生をもたらします。一般的に、この劣化（発芽 / カビ）の様相（パターン）は水分の供給元をよく反映しています（写真3 ご参照）。

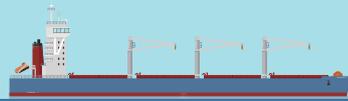


写真 3

ポリプロピレン製縫製袋詰め米は、貨物艙上部の空気との関係で吸湿性のある貨物になります。袋詰め米に関する貨物クレームは、結露による損傷が一般的で、特に東南アジアから西アフリカへの輸送時にみられます。損傷には特徴的なパターンがあり、表層に積載された袋には奥部に積載されたそれよりもより損傷が認められる傾向にあります。これは、積み付け、ダンナーの使用しないし換気が不適切に行われた場合とされます。（Box3 ご参照）

砂糖や肥料などの貨物は、理論上は吸湿性がありますが、通常は換気されません。これら貨物の水分含有量が換気時の空気よりもずっと少ないため、ほぼ常時、空気中の水分を僅かに吸収します。このことにより、粘着性を増したり、凝固したり、物性の変化がもたらされ、最終的に船舶から揚げ荷される貨物に対してクレームが提起されるかもしれません。また、これらの貨物は、よくポリプロピレン製の裏地付縫製袋に梱包されます。この場合、貨物区画内の空気と関係する従来の吸湿性のある貨物ではなく、袋内の空気とだけ相互に作用します。よって、このような状況下では換気は貨物に対してほとんどあるいは全く必要はなく、むしろ不適切に換気された場合は貨物の汗濡れによる損害発生の要因になります。

ベンチレーション



Box 2

吸湿性のある貨物、 平衡相対湿度、換気

貨物区画内に吸湿性のある貨物が積まれているが換気されていない場合、空気の温度および湿度は、貨物自体の特性に左右されます。

吸湿性のある貨物が、ある水分下およびある湿度の下で積荷された場合、当初は周辺の空気中から水分を吸収するか、または自身の水分を周囲の空気に放出するかのいずれかになります。このプロセスは、貨物による水分の吸収ないし放出が起こらなくなる平衡状態になるまで続きます。貨物周囲の相対湿度が平衡状態になった状態を、平衡相対湿度（Equilibrium Relative Humidity：ERH）と呼びます。

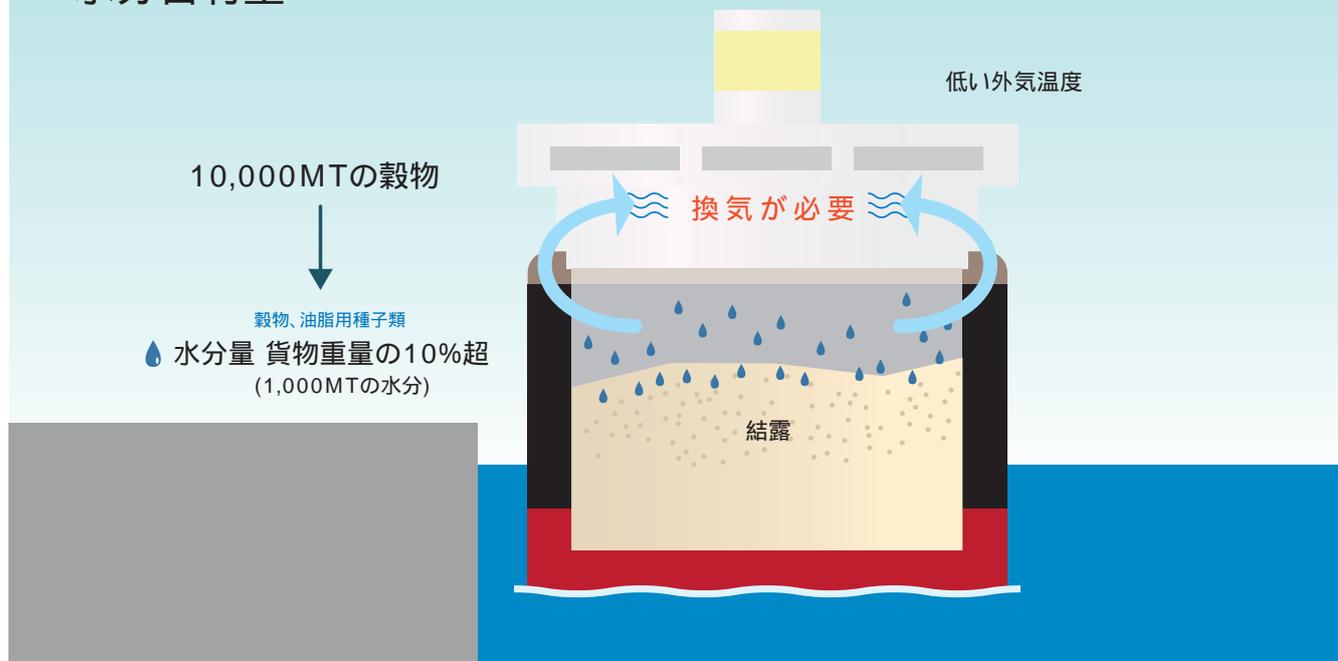
多くの農産物（例えば、穀物、油脂用種子類など）の表面の平衡相対湿度は、穀物表面の菌胞子（カビ）の発生、成長に影響を及ぼします。これらの貨物に付着して存在するカビは、平衡相対湿度の約 65 ~ 70%、またはそれ以上になると発生します。平衡相対湿度は湿度ないし温度が高いほど上昇します。そのような貨物は輸送中のさらなる湿度や温度の上昇から保護しなければなりません。

多くの穀類貨物は輸送中の損傷リスクを最小限に抑えるべく、穀物表面の平衡相対湿度を十分に下げる（すなわち 65 ~ 70% 未満）ために、貯蔵前（陸上での貯蔵ないし、船舶による輸送前）に乾燥されます。しかし残念ながら実際は世界中で船積みされる多くの当該貨物は十分に乾燥されておらず、結果としてカビの繁殖による損害の発生がよく見られます。

つまり、一旦は貨物が十分に乾燥されていたとしても、船積み時点における多くの穀物、油脂用種子類の水分含有量は相当なものになります。多くの場合、船積みされた貨物に含まれる水分量は貨物重量の 10% を超えます。これを考慮すると、10,000MT の穀物を積載した貨物区画には 1,000MT の水分が貯留していることとなります。すなわち穀類貨物の場合、貨物区画の空気中に含まれる水分量よりはるかに多い水分量を貨物自体が含んでいることとなります。

吸湿性のある貨物の上部区画で結露が起きているという事は、結露で空気中から失われた湿気が水分を含む吸湿性のある貨物からの湿気に置き換えられることを意味しています。低い外気温度が維持されたままの場合、結露が連続する事態になります。そうした条件下では、結露（すなわち船体の汗濡れ）による貨物への損傷を最小化するために換気が必要となります。

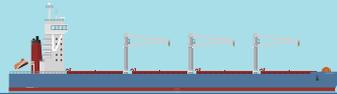
水分含有量



ホールド内の空気の温度はホールド内の貨物の温度に左右され、換気によって上部区画に取り込まれた冷たい空気はその下部の貨物で暖められます。換気する空気が暖められることで相対湿度が低下し、平衡相対湿度に近づくまで水分は空気中に取り込まれます。

換気を継続する事が適切な条件であるならば、換気する空気を上部区画から連続的に取り除くことで濡れ損を最小限に抑えることができます。上部区画で結露が生じなくなった（すなわち外気温度が上昇し、船体構造部材の温度が上昇した）場合、換気の必要はなくなります。

ベンチレーション



Box 3

袋詰めの米： 積み付け、ダンネージ

袋詰めの米の汗濡れクレームは、そのほとんどが、積み付け、ダンネージの使用方法、また、換気が不適切であることによります。

ダンネージを適切な方法で使用すると、汗濡れによる貨物損傷のリスクを最小限に抑えることができます。タンクトップや積付貨物の側面にダンネージ（木製の平板、同支柱、竹製マット等）を適切に組み合わせると、貨物と船体の構造部材との間に数センチの空積を確保することができます。それによって、貨物区画の側面の鋼材部に発生した汗濡れは、貨物に接触することなく鋼材上を移動してホールドビルジとして排出されます。

つい最近では、東南アジアからの袋詰め米の輸送において、ダンネージを使用する従来の方法から、発泡スチロールのブロックを船体との間の断熱材として使用して、表面をプラスチックシートで覆う方法が、場合によりクラフト紙で数層覆う積付を行うことがあります。これは、米（こめ）の貿易会社が導入したもので、Allied システムと呼ばれます。基本的に貨物と外気の状態との間を断熱することで、汗濡れ損害を排除するとしてすぐれた方法とされています。ダンネージを一切使用しないというのは確かですが実際には袋詰め米の汗濡れによるクレームは続いています（Allied システムの採用の有無にかかわらず）。

加えて、この種の輸送では貨物艙内への積み際に、貨物の間にトレンチないし通気道が設けられることが一般的になってきています。これは貨物区画内の空気の入れ替えを容易にするという理論が基になっているようです。しかしそうではありません。袋詰めの米は吸湿性があるので、通気道の空間の温度や露点は、米自体の温度や水分量次第です。通気道自体、汗濡れによる損傷の防止に有効ではありません。汗濡れの形成のリスクは、貨物の積み付け時に通気道を設けてもブロック積み付けと同様です。

もちろん袋詰め貨物が上部区画の空気の入れ替えを妨げないよう、積み付け中には注意が必要です。貨物区画への通気口は塞いではいけません。



一息入れましょう



荷役が始まる前に、船長と一等航海士は、貨物の積み付けにあたり注意深く検討して、航海中に換気の必要性があるか否かを慎重に考慮する必要があります。場合によっては、用船者が航海 / 輸送指示書に積み付けや換気に関して明確なガイドラインを記載しています。これらは航海を開始する前に注意深く読み、疑問点を明らかにしなければなりません。換気に関する指示がない場合、賢明な船長であれば貨物の積み付けや航海中の換気の必要性の有無に関する業界の標準参考資料（例えば教本、P&I ロスプリベンション刊行物など）に加えて、船長自身の知識と経験で対応することが期待されます。

換気の決定

汗濡れの発生とそれに伴う貨物損傷のリスクを排除 / 最小化するために、船長が貨物区画の換気を行うか否かの決定には、“露点ルール”ないし“3ルール”を基本としましょう。

これらは、次のように定義されます。

“露点ルール”と“3ルール”



露点ルールでは、外気の露点が貨物区画内空気の露点より低い場合、換気しなければなりません。



3ルールでは、外気の乾球温度が、貨物温度より少なくとも3度低い場合、貨物区画を換気しなければなりません。

両ルールは換気が適当か否かを判断するのに適した手法です。3ルールは露点ルールに基づいており、吸湿性の貨物（平衡相対湿度 70%、換気空気の相対湿度 80%と仮定）に対して用いるべく科学的に算出されたものです。定義上、非吸湿性の貨物に対しては平衡相対湿度を設定することはできませんが（Box 2 参照）3ルールは非吸湿性貨物に対して一般的な経験則として拡大適用できます。3ルールも露点ルールも、基本的に比較的暖かく湿った空気を比較的涼しい乾燥した外気に置き換えることで貨物区画内の鋼材と貨物双方の汗濡れの発生リスクを最小化しようとするものです。しかし、両ルールを用いるには長所と短所があるのでここで概略を説明します。

空気の露点を決定するには、乾球と湿球の両温度を測定し、基準表の数値と比較し、露点を求めます（Box4 P.13 参照）。乾球は標準的な温度計ですが、湿球温度計は球の部分を平織布（muslin wick）で覆い、先端の繊維部分を純水の中に浸した状態にします。正確な測定値を得るには、湿球部分への十分な空気の流れが必要となります。より乾燥した空気が湿球の繊維部分を通過することで、大量の水分が繊維部分から空気中へ放出され、湿球の冷却効果となって現れます。乾球と湿球の読み取り温度の差を基準表で比較し露点を算出します。

通常、乾球と湿球を一对として船橋付近の百葉箱に格納し、外気の計測に使用します。百葉箱は、湿球部分に効果的な空気の流れが確保される場所に設置されることで、外気の露点を正確に決定できます。しばしば問題が発生するのは、換気する上で、貨物区画内の湿球温度を正確に決定する場合においてです。

正確な測定値を得るには、湿球に十分な空気の流れがないといけません。閉鎖区画での計測には振回式乾湿計が有効です。理論的には、乗組員が貨物区画にアクセスできる一般貨物船では使用が可能ですが、今日では換気を要する殆どの貨物はばら積み貨物船で輸送されるので、こうした計測方法は実用的（不可能あるいは危険ではないとしても）ではありません。更に、ばら積み貨物船の場合、しばしば貨物がコーミング区画まで積み込まれることがあるため、不可能ではないとしても上部区画の空気の正確な計測は困難です。

こうした事態への対応として、持ち運び式乾湿温度計をロープ端に繋いでアクセスマンホール内に設置する方法が一般的なようです（写真4および5ご参照）。コーミングの貨物積み込み孔が閉塞状態でない場合や、貨物がマンホールのアクセストランクいっぱいまで積み込まれていない場合、アクセストランク下で計測される空気は上部区画まで連続しています。しかし、常にこうした状況ではありません。さらに、換気されていない貨物艙は空気の流れがなく、湿球の温度を正確には決定できません。他方、換気されている貨物艙の場合、湿球は換気する空気の温度を計測することになり、艙内の空気を計測したことにはなりません。



写真 4



写真 5

ばら積み貨物船のアクセスマンホールに携帯式の湿球乾球温度計を設置することは一般的なやり方となっている。

しかし計測を行うアクセスマンホール内の空気は必ずしも貨物区画上部の空気と均質ではないので、正確な湿度計測は非常に困難である。

3 ルールを用いると、積荷中には貨物自体の温度を、航海中は外気の温度を乾球で計測すれば良いのでそうした局面には至りません。しかし、このルールは貨物の温度が航海中を通して一定しているという想定の下にあります。多くの貨物では合理的な前提となりますが、経験上常に適切ということではありません。

シードケーキや大豆などの貨物の場合、時として航海中に自然発熱するような状態で積み込まれることがあり、積荷時点の貨物温度を基に換気の実施を決定すると、積荷時点の貨物温度は航海中に自然発熱した貨物の実際の温度より遥かに低いことになり貨物損害の発生につながりかねません。乗組員が積荷後の貨物温度の変化に疑念を持ったとしても、航海中に貨物温度の再測定のために貨物区画にアクセスすることは現実的ではないでしょうし（例えば海水飛沫による貨物の濡れ損のリスク）、安全上の問題にもなるで



しょう（例えば燻蒸下にある貨物区画）。

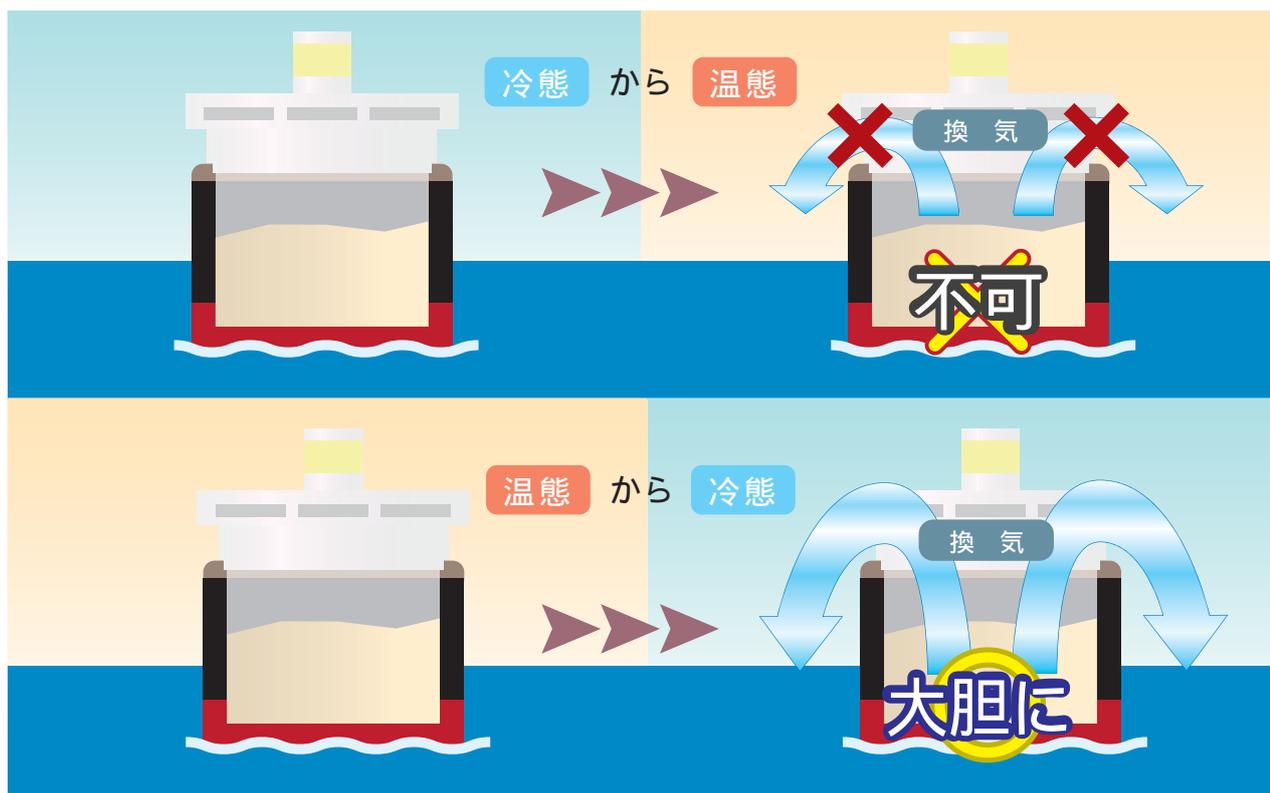
単一区画に数種類の貨物が組み合わされた形で輸送する場合や、ツインデッキを持つ一般貨物船で貨物が異なるデッキに積み込まれる場合、様々な理由で問題が生じる可能性があります。例えば、鋼材や木材製品、あるいは他の吸湿性のある貨物を単一区画や異なるデッキに搭載する場合です。この場合、吸湿性のある貨物の換気は鉄製品の表面へ汗漏れが生じないように行わなければなりません。3 ルールを用いる場合は積み込み時の鋼材温度を計測する必要があり、また、航海中は露点ルールの手順に従って露点温度を決め、船体構造部材、鋼材貨物のいずれにも汗漏れが生じないようにバランスを考慮する必要があります。

一般雑貨や混載貨物の輸送には前述のルールに関連する注意すべき二つの大きなルールがあります。それらは、

冷態から温態 - 換気 不可

温態から冷態 - 換気 大胆に

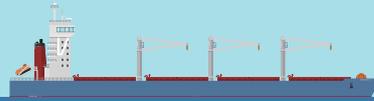
注意すべき二つの大きなルール



寒い地域から暖かい地域への航海では、貨物は一般的に冷たい状態にあり、船体構造部材は暖かくなってゆきます。外気の露点は貨物の温度を上回りますので換気はしないで下さい。暖かい地域から冷たい地域への航海では、船体構造部材は冷やされる一方で貨物は暖かいままです。船体の汗漏れが生じ易くなります。同時に、外気の露点は艙内空気の露点より低くなりますので、船体の汗漏れを避けるため換気を行って下さい。

これら事例は単純化されていますが、実際は適切に計測を行い、日々変化する周囲環境を考慮の上換気の可否を判断し実行しなければなりません。

ベンチレーション



Box 4

露点温度表の例

換気の適用

どのように貨物区画の換気を行うかは、船に装備されている換気システムに拠ります。従来型の換気システムは、自然（受動型）か機械式（ファンによるアシスト）のいずれかになります。両者とも換気の目的は貨物区画内の空気の入れ替えにあります。

これらの換気システムを機能させるには、貨物区画への送気および排気のための開口部をそれぞれ反対側に設けなければなりません。換気のための開口部は上甲板（時として意図して設計された“マッシュルーム型”装置）、ハッチカバー内（写真 6 ご参照）場合によってはクレーンマストまたは関連するハウジングに設けられます。基本的なレイアウトは自然換気、機械式換気の両者にあてはまりますが、機械式の場合はファン関係設備が追加されます。



ばら積み貨物船の自然換気。右舷前方および後方のハッチパネルの通気口が開状態。着岸中の船体は静止状態にあり、自然換気は限定されるため、より空気交換を促進するためにハッチカバーをジャッキアップしている。

写真 6

言うまでもなく、乗組員は状況に応じて換気の実施 / 停止に備え、これら開口部の開閉ができなければなりません。また、貨物の積み付けの際、貨物区画内で開口部を閉塞しないことも重要です。問題が発生した後に修正するのは非常に困難を伴うため、積荷前にその航海における換気が必要かどうかを熟慮する必要があります。

機械式換気ファンを使用する場合は連続した換気が可能ですが、自然換気では船を横切る相対的な空気の流れ、すなわち船外の風の状況に大きく依存することになります。船の周囲に空気の流れがない場合、自然換気用開口部のみを開けても十分な空気の交換は望めません。このような状況では気象 / 海象の条件が許される場合や着岸中ないし避泊錨地にある場合に限り、ハッチカバーを僅かに開けることでより効果的な換気が得られることがあります（写真 7 参照）。しかし、こうした換気を実施する際は雨など外部からの水分混入による貨物の濡れを防止する対策が求められます。実際、航海中の場合はこうしたことを実施するのは恐らく適切ではありません。



船が静止状態にあり、自然換気は限定されるため、より空気交換を促進するため、ローリングタイプのハッチカバーを僅かに開けた状態。

写真 7

換気の記録

メカニズムや換気のルールとの適用とは別に、換気をするかどうかを決定するには、貨物区画の内外の状態を定期的に観察し計測する必要があります。換気を行うについては船長宛の運送指示書やその時々気象海象状態に拠ります。

結露による貨物の損傷のリスクを排除 / 最小化するために換気を必要とする多くの貨物類は、例えば、雨や海水飛沫といった外部の水分の影響を明らかに受けやすいものです。従って、貨物をこうした水分にさらすリスクを考慮しなければなりません。逆に、船長としては気象が良好であれば何時でも換気できるということにはなりません。換気に関するルールの一つを適用するとしても、「気象が良好」ということは「暖かく晴れた」と同義語であり、貨物の汗漏れという潜在的なリスクを伴うことになります。本章で換気のルールの概要を紹介しましたが、換気のための状況としては最低気温になる夜間が最適ということになります。

状態の確認は定期的に、例えば 24 時間をベースに 4 時間ごとに航海を通して行うべきです。計測値は乗組員がとり、その時の措置と併せて換気記録簿に記載しましょう（Table 1 に換気記録の例を紹介します）。これは、貨物クレームが発生した場合、当該航海の乗組員による貨物の取り扱いが適切であったか否かの証拠として有用です。

