

## 2010/2011 鳥取・島根の集中豪雪による船の転覆について

石坂雅昭\*・納口恭明\*\*

### Studies on Capsizing of Boats Caused by 2010/2011 Heavy Snowfall at Tottori and Shimane Prefectures in Japan

Masaaki ISHIZAKA\* and Yasuaki NOHGUCHI\*\*

*\*Snow and Ice Research Center,  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan  
ishi@bosai.go.jp*

*\*\*Disaster Risk Research Unit,  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan  
ngh@bosai.go.jp*

#### Abstract

Over 500 boats were capsized by severe snow storm which attacked coastal regions in Tottori and Shimane Prefectures from December 31 in 2010 to January 1 in 2011. In this period snow depth increased from 0 cm to 89 cm and precipitation amounted to 109 mm during 22 hours. In this report we discuss how snow affects capsizing of boats by investigating meteorological data of Yonago weather station located near the damaged areas. From weather data we estimate heights of center of gravity (COG) of snow layers formed every 1 hour considering compressive viscosity of snow, and that of COG of a boat loaded by the snows using a half cylinder type boat model. We also evaluate rises of a waterline of the boat weighted by snow on board. Our analysis indicates that rises of the COG of the boat by accumulation of heavy snowfall might rapidly make boats unstable, and rises of waterline of the boat by snow weight might induce submergence. Moreover weather data suggests severe snow accretion since the air temperature continued to be around 0 °C during the snowfall. The accretion of snow to high positions of tall structures of boats is thought to make boats more unstable, which result in capsizing. The analysis also reveals that the smaller a boat, the more easily it becomes unstable due to the rises of both COG and a waterline. This may be the reason why the displacement of most damaged boats was less than 5t.

**Key words** : 2010/2011 heavy snowfall, Capsizing of boat, Center of gravity of snow cover, New snow density, Accretion of snow, Tottori, Shimane

#### 1. はじめに

2010年12月31日から翌年1月1日未明にかけて、鳥取、島根県の沿岸部からやや内陸の地域は、集中的な降雪に見舞われ、ライフラインや交通機関の途絶を含め大きな被害を受けた。その中に500隻を超える船舶の転覆浸水事故(うち海難扱いは約350隻、境海上保安部調べ)があったが、これは一般的な雪の被害ではあまりみられないものである。実際、船舶関係者の話では、船舶の構造によ

て、雨水等が流れ出ない構造のものは係留せずに陸に揚げ、水がたまらない構造のものは水上に係留しているが、雪の場合はとけるまでは積もるので多量の雪が予想される場合は除雪しているとのことである。しかし、今回の場合は、まれにみる集中した豪雪による、急速な積雪深と重量の増加があったことに加え、多くの仕事場が休業する大晦日から元旦にかけての大雪であって監視が行き届きにくかったこと、さらに港への道路も除雪が間に合

\* 独立行政法人 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

\*\* 独立行政法人 防災科学技術研究所 災害リスク研究ユニット

わずアクセスに手間取る等のが重なり不測の事態を招いたと思われる。

転覆事故については、当初は雪の重さが強調された。筆者らはこの当初の報道に対して、単なる雪の重さのみで船が沈むだろうか、という疑問をもった。その後、報道された関係者の話の中では、例えばイカつり漁船では船の高い位置に集光器等の構造物があり、それへの着雪や冠雪による重量バランスの不安定について言及されている。単なる重さではなく、重心位置の変化によるバランスの不安定化も重要な点であることも認識されてきた。重心が高くなるのは、ある意味で雪が軽いからであり、筆者の一人納口は「同じ重量の荷物でも鉄と綿では船のバランスは後者がはるかに悪くなる」と指摘した(納口・石坂, 2011)。

そこで、本論文では当日の降積雪をはじめとする気象の特徴、とりわけ積雪による重量の増加と重心の移動による不安定の増大や船の喫水位置上昇による浸水の可能性等について考察した。気象データについては沿岸に近い米子のデータを用い、船については簡単な部分円筒形モデルによって安定度および喫水位置を論じている。

## 2. 降積雪の状況と積雪の重心

ここでは、漁船転覆事故があった沿岸部に近い米子特別地域気象観測所の気象データから当時の降雪の特徴、それが積雪層を形成した後の層厚や密度の推移等を推定し、船の安定度の考察に必要な積雪の重心位置を求める。

### 2.1 米子の気象記録からみる降雪の特徴

図1に示した米子の気象データを見ると、降雪は2010年12月31日7時頃から降り始め、7時の積雪ゼロからわずか1日足らずの22時間で89 cmの積雪となった。これは、月最深積雪の観測史上第1位を更新するものとなった。その間の降水量は109 mmで米子の1月の月降水量の平年値が145.3 mmであるから、わずか1日足らずの期間に平均的な月降水量の7割を超える量の降水があったことになる。しかも、この間の同観測所の天気記録は雪として降ったことを示している。米子では冬でも雨となること

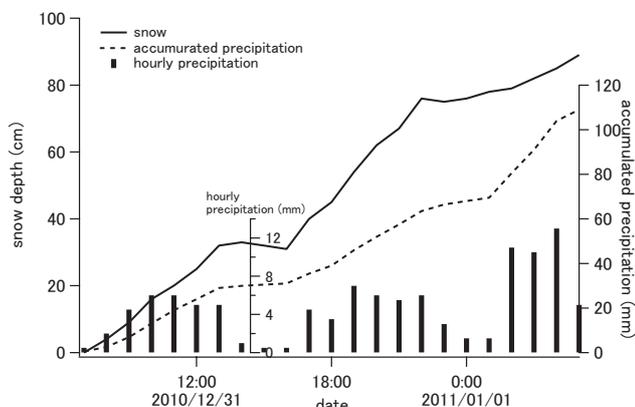


図1 米子の気象積雪深、時間降水量、積算降水量の推移  
Fig. 1 Snow depth, and hourly and accumulated precipitation at Yonago weather station during the snow storm.

も多く、平年値は雨も含んだ1か月の降水量であるから、今回の雪として降った短時間の降水がいかに記録的なものであったかがわかる。

### 2.2 積雪の重心の推移

これまで積雪の重心についてはほとんど意識されたことがないが、船のバランスを考える時、船の空身の時の重心に加え、船上に積もる雪の重心位置と重量が重要な要素となる。積雪は古いものほど自身および後から上に積もる雪の荷重によって縮む。すなわち圧縮されて密度が大きくなる。積雪の断面観測等が行われていて、積雪各層の密度が得られているなら、それをもとに重心位置を求めることは容易であるが、そのようなものは一般的に記録されていない。そこで、ここでは、米子の気象資料を基に、圧密過程を計算で求め古い雪から新しい雪までの各層の密度を推定して、その結果から重心を推定した。

このような方法の他にも、積雪モデルによる推定も考えられる。ただ、積雪モデルで新雪を扱う場合、初期入力として積雪深を基準にその後を推定する方法と降水量を基にするものがある。そして、積雪深を基準にする場合は新雪の密度を気温と風を考慮した経験式から求めているが、この場合はその間に降った降水量(観測値)と合わなくなることが生じることがあり、また、降水量を基準にすると積雪深が合わないことがあるなど、新雪の取り扱いが難しい。今回の米子では次々と新雪が降り積もる場合にあたり、かつ積雪深と降水量が既知であるケースなので、積雪モデルを使わずに圧密過程の計算を行って各層の密度および層厚を求めた。なお、米子と対比した長岡の場合は、積雪全期間という長い期間から重心推移の急峻なところを見いだすということが必要なため、煩雑さの少ない積雪モデルを用いた。

さて、話を米子に戻すと、積雪層は1時間毎に一層が形成されるとして、各層の層厚の変化および密度の変化を追った。31日7時から8時に形成された積雪層を第一層、最深積雪に達した翌1月1日4時ら5時に形成されたものが最後の層として、総数22層となった。

粘性圧縮理論を積雪に適用すると、層厚 $h$ の圧縮速度(歪み速度) $de/dt$ は、密度 $\rho$ にも関係していて、層にかかる応力を $\sigma$ とすると、次の式で書ける。

$$\frac{de}{dt} = -\frac{1}{h} \left( \frac{dh}{dt} \right) = \frac{1}{\rho} \left( \frac{d\rho}{dt} \right) = \frac{1}{\eta} \sigma \quad (1)$$

ここで、 $\eta$ は圧縮粘性係数である。

さらに、遠藤ら(1990)によると密度の小さい新雪の場合は、圧縮粘性係数と密度の関係が $\eta = C\rho^n$ と近似でき( $C, n$ は定数,  $C=0.3925, n=4$ ), この関係を用いると式(1)から初期密度 $\rho_0$ として、時間 $t$ 後の積雪層の密度 $\rho_t$ は次の式で与えられる。

$$\rho_t = \left( n \int_{t_0}^t \frac{1}{C} W g dt + \rho_{t_0}^n \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

ここで、 $W$ は上載荷重、 $g$ は重力加速度である。

第1項は積もってから時間tまでの荷重に対応している。ここでは積分ではなく1時間毎に荷重の増加(=降水量)を入れて上の式から各層の密度を見積もった。密度がわかるとその層の重量を密度で除すことによって層厚が見積もられる。しかし、第2項の雪の初期密度(各1時間に降った雪の密度)は与えられていない。そこで、各時刻において全層の層厚の和が実際の積雪深と合うように初期密度を決めた。ただし、この過程においては、雪がとけて水となってその層から流れ出ないということを前提にしている。このようにして求めた、米子の各1時間毎の積雪層の層厚の変化と積雪重心位置の推移を図2に示した。先に積もった積雪層はその後積もった雪の載荷重によって圧密されて層厚が小さくなっていく。しかし、短時間に急速な積雪増加となった今回の雪では、その重心が全体の半分程度の高さと、かなり高い位置にあることがわかる。

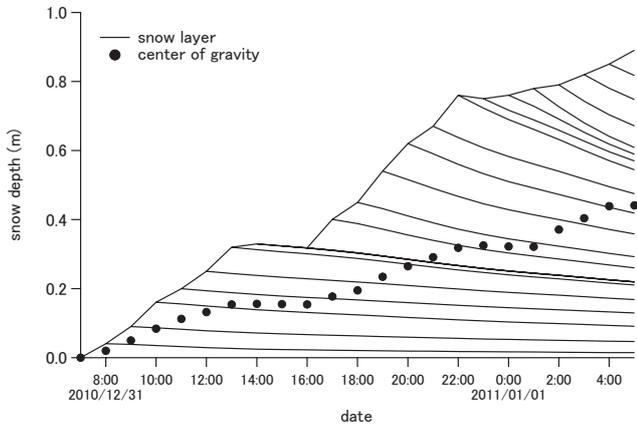


図2 米子の気象データから推定された時間毎の積雪層の層厚と全体の重心の推移

Fig. 2 Changes of the snow layer formed every 1 hour, and the center of gravity of the snow cover estimated with Yonago weather data.

### 3. 降積雪と船の安定性

#### 3.1 雪による船の重心の変化と不安定

積雪に関する重心の移動を加味して、船の安定性について考察する。簡単のために、図3のような水没部分が円筒形の船をもとに議論する。このモデルは、浮心と重心のバランスによる安定性に関して、同じ形状の起き上がり小法師と力学的に同等である。起き上がり小法師モデルの場合、浮心に相当するのは起き上がり小法師が載っている台との接点である。このモデルの場合、浮心を考えなくても、船の転覆に関する安定・不安定は円筒の中心と積雪が載った状態での全体としての重心の位置で判断できるため、直感的に全体像を把握しやすい。全体の重心は、船だけの重心と重量、船の上に積もった積雪だけの重心と重量から求めることができる。積雪は甲板から積もり始めると考えるとその重心の位置は甲板の位置に依存する。問題は以下で与えるパラメータ

- $X_{center}$  : 船底をゼロとした時の円筒の中心位置
- $X_{floor}$  : 船底をゼロとした時の甲板の位置
- $X_{snow}$  : 甲板をゼロとした時の積雪の重心の位置
- $X_{ship}$  : 船底をゼロとした時の船の重心の位置
- $W_{snow}$  : 積雪の重量
- $W_{ship}$  : 船の重量

を用いて、船底をゼロとした時の全体の重心の位置  $X_{all}$  を求めることに帰着する。このとき全体の重心の位置は単純に

$$X_{all} = (W_{ship} X_{ship} + W_{snow} (X_{floor} + X_{snow})) / (W_{ship} + W_{snow}) \quad (3)$$

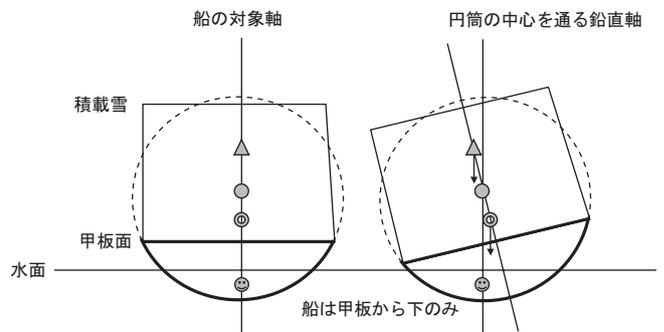
となり、 $X_{all}/X_{center} = \xi$  とすると、 $\xi > 1$  ならば不安定、 $\xi = 1$  ならば中立、 $\xi < 1$  ならば安定となる。

円筒の半径を  $r$ 、船の重心と甲板の位置を特徴づけるパラメータを  $\alpha$ 、 $\beta$  とすると、 $X_{center} = r$ 、 $X_{ship} = \alpha r$ 、 $X_{floor} = \beta r$  と表され、 $\xi$  は船に関するパラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $r$ 、 $W_{ship}$  と雪に関するパラメータ  $X_{snow}$ 、 $W_{snow}$  によって

$$\xi = (\alpha W_{ship} + (X_{snow}/r + \beta) W_{snow}) / (W_{ship} + W_{snow}) \quad (4)$$

となる。

(3)、(4) 式から船に関しては、船の重心が高いほど、または甲板の位置が高いほど不安定であり、円筒の半径が大きいほど、すなわち船が平べったいほど安定であることがわかる。



△ ◎ 船の甲板上に雪が載った状態の全体の重心 (円筒の中心よりも上の場合△と下の場合◎) ● 円筒の中心 ◎ 浮心

図3 部分円筒船モデルによる重心位置と安定・不安定  
Fig. 3 Schematic images of a half cylinder type boat model and its center of gravity.

さて、ここで5トンの半円筒の船を想定し、船に関するパラメータを  $\alpha = 0.8$ 、 $\beta = 1$ 、 $r = 1$  m、 $W_{ship} = 5$  t、甲板の面積を  $20 \text{ m}^2$  とする。積雪はその甲板の上に一様に積もるものとして、前節でもとめた米子の2010年12月31日7:00から2011年1月1日5:00までの積雪の重心の位置  $X_{snow}$ 、と積雪の重量  $W_{snow}$  から船の安定、不安定の指標  $\xi$  の推移を計算すると図4のようになる。積雪が最高に達した1月1日5:00で最大の0.994となり不安定に近い。もちろ

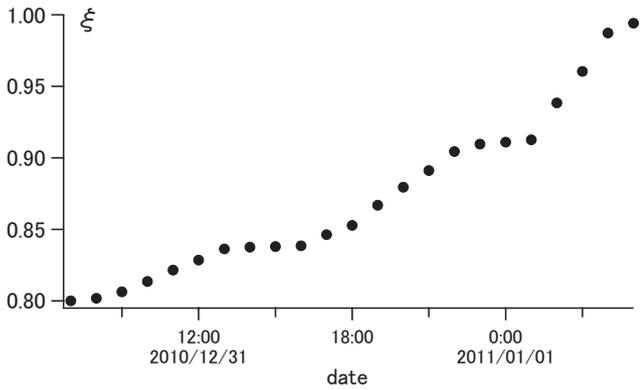


図4 安定度の指標ξの推移  
Fig. 4 The change of stability index of the boat, ξ.

ん全体の重心位置は空身の時の船の重心位置によるので、これは一つの目安である。

先の例の最終段階の積雪深は89 cm、雪の重心の高さは44 cm、積雪の平均密度は123 kg/m<sup>3</sup>であった。ちなみに、積雪の重量を同じにして重心の高さが20 cmの密度の大きな雪(271 kg/m<sup>3</sup>)の場合は、ξ = 0.921 となり、安定側へと変化する。逆に、重心の高さが50 cmと密度の小さな雪(109 kg/m<sup>3</sup>)の場合はξ = 1.01 となり、不安定となる。したがって、積雪の重さが同じならば、密度の小ささがこの不安定の重要な要素となる。例えていうならば、1トンの鉄よりも、1トンの綿の方が転覆に関しては危険ということである。

3.2 雪の重さと喫水位置について

船の転覆が報道された当初は、マスコミをはじめ一般の受け止め方は、復元力の低下ではなく、雪の重量そのもので船が沈んだという印象が強かった。当然そのようなことがないわけではないので、ここでは雪の重さによって船が沈む可能性について検討する。前節で取り上げた単純な船モデルでβ=1の半円筒船モデル(図5)を考え、船底を原点として喫水線の位置をγr、船の重量W、長さL、水の密度ρ<sub>water</sub>とすると、浮力と重力の釣り合いから次のように書ける。

$$W = \rho_{water} L r^2 (\cos^{-1}(1-\gamma) - (1-\gamma)\sqrt{\gamma(2-\gamma)}) \quad (5)$$

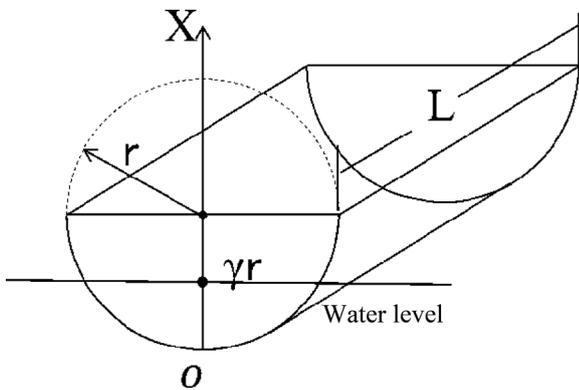


図5 半円筒船モデルと喫水の位置  
Fig. 5 The waterline of the half cylinder boat model.

ここで、前節のようにr=1 m、甲板面積20 m<sup>2</sup>(L=10 m)、W=5 トンの船を考え、ρ<sub>water</sub> = 1,000 kg/m<sup>3</sup>とすると空身の時の喫水位置γ = 0.43 が求まる。これに米子の雪が最も重くなった時の重さ(109 kg/m<sup>2</sup>)を与えると、甲板に積もった雪の荷重は約2.2 トンで、その結果、γ = 0.56 となり、空身の場合から20 cmほど沈むことがわかる。しかし、喫水線はまだ船底から6割程度のところにある。ちなみにγ = 0.9 まで喫水するには、同じ密度の雪ならば3.5 mも積もらなければならない。5トン程度の船を雪の重さだけで沈めるにはかなりの雪が積もらなければならない。今回の雪は重いとはいえ不十分であり、重さで浸水するというより、先の復元力の低下や後で述べる着雪や積もり方の偏り等による転覆と考えられる。ただ、式(5)から浮力はLr<sup>2</sup>と長さの三乗に効くのに対して、雪の荷重は甲板の面積Lrすなわち長さの二乗で増える。したがって船を一回り大きくすると船の排水量が増えるが、甲板の面積の増加はそれに比べて緩いので、大きい船ほどより雪荷重に対する安定が増すことがわかる。したがって、今回の場合でも小さな船の場合は雪の重さによってかなり危険な所まで喫水し、先に示した安定度の低下に風などによる揺れが加わって浸水したと思われる。同様なことは前節の重心位置の変化についても言える。被害が5トン以下の船に多かったのも、小さい船のこれら上載荷重に關係する脆弱性の表れと考えられる。

3.3 重心位置とモーメントの急速な増加

船全体の重心を高くして船の復元力を低下させるのは、甲板上の雪の重心の位置とその重さの積である。雪が軽いことによる重心位置の上昇に加え、それに一定の重さがかかっていることが重要である。そこで、今回の位置の高さと重量との積(以後単に積とする)の増加を同じ冬の長岡(雪氷防災研究センター露場)でのものと比較した(図6)。先に述べたように長岡の重心は、積雪モデルを用いて得られた積雪層の密度と層厚から求めた(Hirashima et

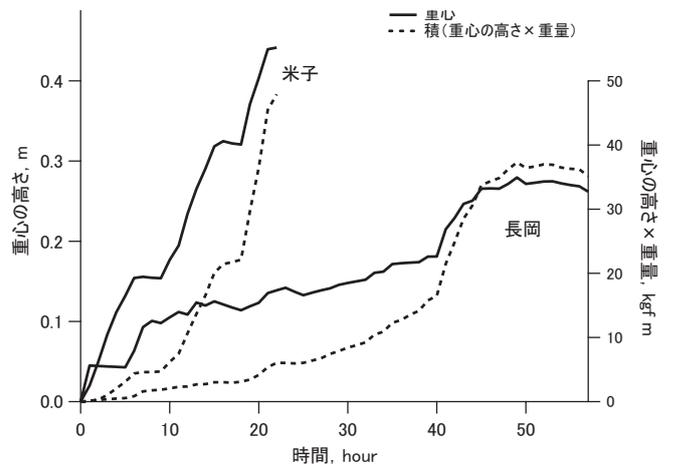


図6 米子の重心位置とモーメントの変化および長岡における急速増加期間の同要素の推移

Fig. 6 The changes of the center of gravity and the moments of the snow cover at Yonago and that at Nagaoka, during the most rapid increase period in 2010/2011 winter.

al., 2010). 図6の長岡の値は、同所において数日間で最も積が増加した期間(2010年12月24日9時~12月26日18時)の重心の高さと積の推移である。米子における同要素の推移と速度を比べるために原点を同じにして時間経過を比べたものである。重心位置および積とも米子の増加の急峻なことがわかる。すなわち、今回の米子での重心位置に影響する積の増加は、多雪地域の長岡でも見られなかった急激なものであったことがわかる。

### 3.4 着雪による不安定度の増加

以上述べたように今回の集中的な降雪期間には、急速な雪の深さと重量の増加によって船の重心位置が高くなりそれに伴う急激な安定度の低下があったことが推測された。そして、さらに不安定を助長したのが着雪であったと考えられる。図7には、気温の推移と2.1で得られた各時間の降雪直後の雪の推定密度を示した。密度は気温が低い時間帯には小さく、高い時には大きくなる傾向があることがわかる。また、12月31日14時から16時の間(図7の時刻15時と16時の値)は計算上では密度が $1,000 \text{ kg/m}^3$ になり、このときは雨に近い曇であったと推定される。ただし、圧縮粘性係数の関係でやや密度を大きく推定した可能性も否定できないが、この間の降水はきわめて少ないので影響は少ないと考えられる。いずれにしても、雪が降った期間、気温はほぼ $0^\circ\text{C}$ 付近で推移して、密度は $50 \text{ kg/m}^3$ 以上で時には $100 \text{ kg/m}^3$ を超えていて新雪としては密度の大きいものが降り続いたと言える。

着雪は $-2^\circ\text{C}$ から $2^\circ\text{C}$ の間で起こり易いと言われているので、今回の気象条件下では重い雪の着雪が生じたことが推測される(高橋, 1952)。実際、この時の雪によって美保湾と中海の間にある米子市和田町で3基の送電鉄塔が倒壊する事故も報告されていることから、沿岸部に降った雪の着雪が激しいものであったことを物語っている。したがって、船でも様々な部位に着雪したことは容易に想像できる。甲板より高い位置にあるものに着雪が生じると、それらはすべて船全体の重心をより高くし、また、構造物の配置も必ずしも船の中心線に対称ではないと考えられるので、船の不安定を増す方向に働くはずである。イカ釣り船のように集光器が高い位置にあるものなど特に重心が高くなり、不安定が起こりやすいと考えられ、

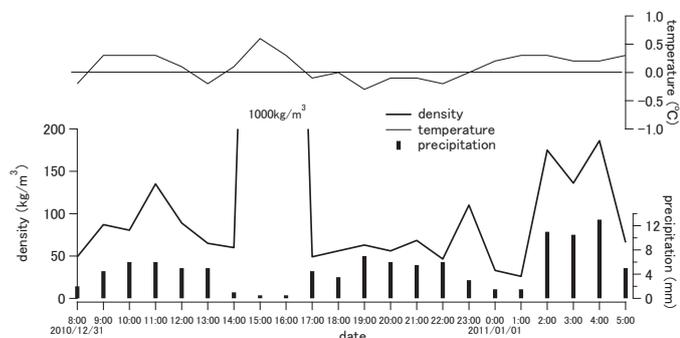


図7 米子の各時間の新雪の初期密度と気温の変化、時間降水量の推移

Fig. 7 The new snow density, air temperature, and hourly precipitation at Yonago.

重い雪の着雪も今回の事故の要因の1つとなったと考えられる。

## 4. まとめ

2010年12月31日から翌1月1日未明にかけての鳥取、島根の日本海沿岸部を中心とした集中豪雪によって係留中の船が転覆するという被害が多数発生した。雪による船の転覆被害はあまり聞かないので、その要因について当時の気象条件から降積雪の諸性質を推定して考察した。

その結果、事故時は、新雪としては重い雪が急速に積もり積雪深を増加させたことによって積雪の重心が高くなり、それが船全体の重心位置を高くし安定度の低下あるいは不安定となったことが推測された。また、このときの降雪が着雪の生じやすい気温 $0^\circ\text{C}$ 付近で連続して続いたことから、船の高い位置にある構造物にも相当の着雪が生じたことが予想され、それが不安定を助長したと考えられた。さらに、雪自体の重量で船の喫水位置が上昇して、少しの傾きによって浸水しやすくなっていたことも推定できた。喫水線の上昇、そして先にあげたローリングに対する不安定の増加とも、小さい船ほど起こり易い。多くの船の被害が5トン以下の小さな船に起こったこともそれによって説明される。

これまであまりこの種の被害が生じなかったのは、今回のように雪による重心位置の増加がきわめて短時間に生じることが希であるからだと考えられる。重心位置が増加するには雪が軽いほど有利だが、船全体の重心を変化させるには位置と重さの積が効くので一定の重さも必要である。今回の場合は積雪としては最も軽い新雪の積み重ねで積雪深が急激に増加したこと、そして降雪直後の新雪の中では密度の大きい雪であったために重さも着実に増加したこと、それがきわめて短期間の間に降り積もったので圧密による変化や雪質の変化が小さい段階にとどまったことなどきわめて希な条件が重なった。そして1日程度の短期間で降り積もった今回の雪の重さ(=雪としての降水量)は豪雪地域でもめったにないものであった。それらに大晦日から元旦という特殊な事情が加わって大きな被害となったと考えられる。

## 参考文献

- 1) 遠藤八十一・大関義男・庭野昭二(1990): 低密度雪の圧縮粘性係数と密度の関係。雪氷, 52, 267-274.
- 2) Hirashima, H. et al. (2010): Numerical modeling of liquid water movement through layered snow based on new measurements of the water retention curve. Cold Reg. Sci. Technol. 64(2), 94-103.
- 3) 納口恭明・石坂雅昭(2011): 新雪による船の不安定について。雪氷研究大会(2011・長岡)講演要旨集, 255.
- 4) 高橋喜平(1952): スギの冠雪について。林試研究報告, 54, 140-148.

(2011年9月16日原稿受理  
2011年11月14日改稿受付,  
2011年11月14日原稿受理)

## 要 旨

2010年12月31日午前から翌1月1日未明にかけての鳥取、島根両県にまたがる日本海沿岸地域の集中豪雪によって500隻を超える船舶の転覆浸水被害が生じた。ここでは、その要因を探る目的で、米子特別地域気象観測所の記録を用いて当時の降積雪の特徴を推定した。雪については、積雪層の層厚や各層の密度から積雪の重心位置と重量の推移等を推定し、簡単な円筒型の船モデルによって、安定度や喫水線位置の変化等について考察した。その結果、今回の豪雪では、新雪としては重い雪がきわめて短時間に降ったこと、急激な積雪深増加があったこと、また、それらが気温0℃付近で連続的にもたらされ重い雪による着雪生じたことなどによって、積雪を被った船の重心が急激に高くなり安定度の低下や不安定を招き、それらに雪の重量による喫水線の上昇も加わり浸水転覆が生じたことが推定された。そして、これらの雪の載荷重による影響は小さい船ほど強く表れることから、被害が5トン以下の小さな船で多く生じたと考えられた。

キーワード：2010/2011 集中豪雪，雪による船転覆，雪の重心，新雪密度，着雪，鳥取，島根