

報 文

備讃瀬戸周辺の濃霧の発生プロセス
～ 2006年3月11日の事例～

依岡幸広*, 牧田広道**

The outbreak process of the dense fog around the bisanseto sea area
-An example of March 11, 2006-

Yukihiro YORIOKA and Hiromichi MAKITA

要 旨

2006年3月11日早朝、瀬戸内海沿岸の広い範囲で濃霧が発生した。部外資料等の解析及び数値モデルを用いた再現実験の結果、備讃瀬戸周辺での濃霧の発生・消散の要因として以下のことがわかった。

- (1) 暖かい海面上に陸上から寒気が移流することで海面付近の暖かい気塊を冷却させた。
- (2) 海上の空気塊は局地循環による上昇流で持ち上げられ、断熱冷却で凝結したと推定される。
- (3) 日射による加熱等で成層は不安定となり濃霧は消散した。
- (4) 解析結果を踏まえ、霧予測ワークシートを提案した。

1. はじめに

2006年3月11日早朝に発生した霧は、交通機関等に大きな影響をもたらした。高松港では06時30分に停船が勧告され、高松自動車道や瀬戸中央自動車道等では通行止めや速度規制が行われた。特に、瀬戸中央自動車道では濃霧による初めての通行止めとなった。この日の濃霧は瀬戸内海だけではなく、中国地方や近畿地方の一部でも観測された大規模なものであった。

海上交通の盛んな瀬戸内海では、海上の濃霧予報は防災上極めて重要な要素となっている。瀬戸内海に発生する霧については、過去にさまざまな調査が行われている。大江(1976)は、潮流の速い低水

温域で濃霧が発生しやすいことに着目し、海水温度よりも高い露点温度を持つ暖湿気塊が直接海面付近で冷やされることで濃霧が発生することを報告した。この考え方をもとに、福原(2001)は停船が勧告された日の統計処理から濃霧発生予測図を作成し、現在でも高松の予報現業で利用している。

しかしながら、2006年3月11日に発生した霧は、前述の発生過程と異なり予測図は不十分であった。このため、注意報発表においては実況監視により補うところが多かった。

本稿では、どのような要因によって霧が発生したのかを念頭におき、2006年3月11日早朝、瀬戸内海沿岸の広い範囲で発生した霧について、その詳細

* 高松地方気象台, ** 高松地方気象台(現大阪管区気象台)

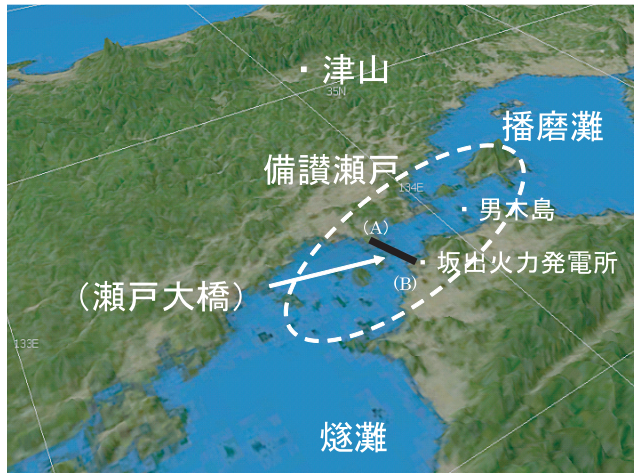
(2007年6月5日受領, 2008年4月14日受理)

を報告する。

なお、対象とする地域は観測資料が他の地域よりもそろっている備讃瀬戸周辺である。時間はすべて日本時間である。

2. 調査資料

部内資料としては、各種天気図、衛星、アメダス、男木島霧観測所、高層エマグラム、レーダー、ウィンドプロファイラ（以下、WPR）、数値予報資料である。部外資料としては、本四架橋公団南北備讃瀬戸大橋（以降、「香川側」）及び同下津井瀬戸大橋（以降、「岡山側」）と四国電力坂出火力発電所の視程・風・気温等、香川県水産試験場の水温、環境省大気汚染物質広域監視システムの相対湿度（以下「湿度」という）、宇宙航空研究開発機構と東海大学の衛星画像（MODIS：Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer、中分解能撮像分光放射計）の資料を用いた。第1図に主な地点の位置関係を示し、



第1図 主な地点と海域の位置関係

- (A) 本四架橋公団下津井瀬戸大橋（岡山側）
 - (B) 本四架橋公団南北備讃瀬戸大橋（香川側）
- 点線は備讃瀬戸周辺海域をそれぞれ示す。

第1表には主な施設の観測要素等を示す。

3. 総観場

第2図には3月11日09時の地上天気図を示す。3月9日から10日にかけて四国沖を低気圧が通過し、その後四国地方は九州の南海上に中心を持つ高気圧に覆われた。中国地方から四国地方では、11日00時は快晴、その後薄曇りの天気となった。香川県では9日夜遅くから10日昼過ぎまで降水があり、大阪では10日21時頃まで弱い雨を観測していた。10日21時の700hPa面天気図によると、低気圧が通過した後の西日本には顕著な寒気の流入はなく、湿度にも大きな変化は見られなかった。1000hPa面天気図によると、アムール川下流の低気圧に向かい暖気移流の軸が九州付近にあり濃霧発生当日は、四国地方から中国地方にかけて暖気が流入しやすい環境場であった。また、高松のWPRによると地上から高度約2kmまでは5m/s以下の弱い風であった。

4. 衛星画像から見た霧の概要

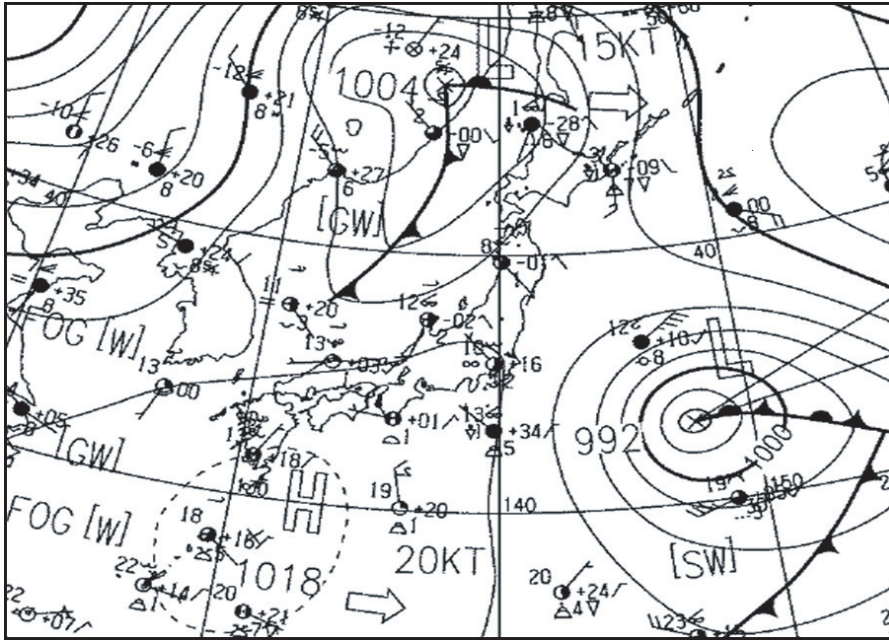
赤外差分画像から備讃瀬戸において不明りょうながら霧・層雲が確認できるのは、11日01時あるいは02時以降である。（注：01時36分から02時03分に、南へ約5km画像ずれが起こっているのに、陸上の霧・層雲が海上へ流れ出たように見えるが、この時間は実際にはあまり霧・層雲域の南下は起こっていない。）岡山県側の陸上にも層雲域が見えるが、海上にも所々で霧・層雲が発生している（第3図①）。燧灘で霧・層雲域の面積が増大した04時において、備讃瀬戸でも霧・層雲域は増大しているようだが（第3図②）、上層雲が存在しており、あまり不明りょうではない。また、陸上からの霧・層雲

第1表 本文中で使用した主な施設の観測要素等

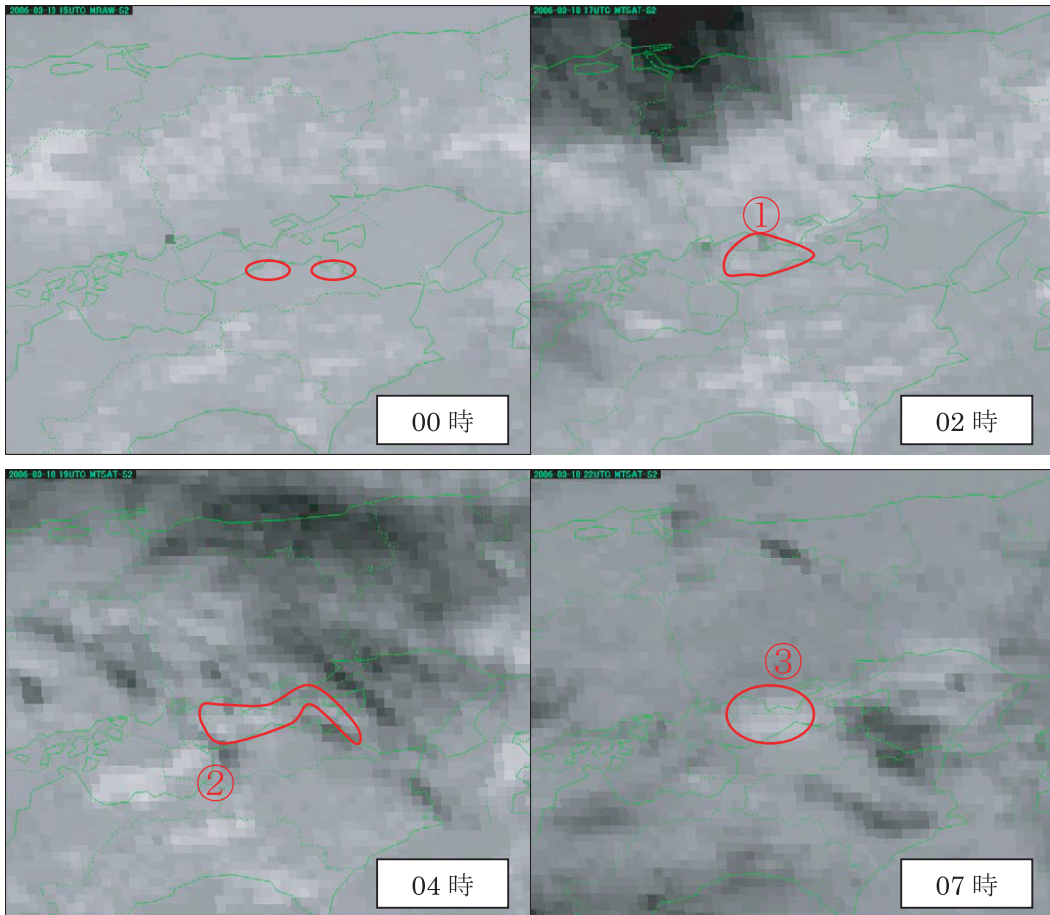
*印は正確には（東京湾平均海面上）91.5mであるが、数mの高度変化に対し気温等の変化幅は無視できるほどなので便宜上100mとした。

**印は同様に57.5mであるが、便宜上50mとした。

観測所名	高度(m)	観測要素
四国電力坂出火力発電所	地上、50,100,150,200	風・気温
男木島霧観測所	20	視程・気温・露点温度・湿度
本四架橋公団南北備讃瀬戸大橋	(TP上)100*	視程・気温・風・湿度
本四架橋公団下津井瀬戸大橋	(TP上)50**	視程・気温・風・湿度



第2図 3月11日09時の地上天気図



第3図 備讃瀬戸の衛星画像

- (00時) 備讃瀬戸にはほとんど雲はない。坂出、高松付近に下層雲あり(図中の丸印のあたり)。
- (02時) 児島半島の雲域と共に海上の雲域(霧・層雲)も増えてきている。
- (04時) 上層雲がかかり不明瞭だが濠洲の霧・層雲とともに備讃瀬戸でも雲域が増大している。
- (07時) 上層雲の隙間から下層の霧・層雲域がわかる。

域の流れ込みがあったかどうかとも判然としないが、07時で海上にはかなり明りょうな霧・層雲域があることがわかる(第3図③)。その後の可視画像で陸上と海上の雲域の動きを見ると、どちらもほぼ停滞しているように見える。11日10時のMODISの画像を用いて、霧・層雲のすき間から見える山地の高度から、霧・層雲の雲頂高度を推定した。日射が加わり霧は消散期に移行する時間帯ではあるが、備讃瀬戸周辺の雲頂はおおむね400m～500m、播磨灘を覆う霧・層雲は800m以上と見積もれる。

5. 濃霧の概要

男木島では11日05時頃には視程が100mに低下し、その状態が約5時間継続した(第4図)。男木島の濃霧は衛星画像からは11日04時頃から発生したように見える。男木島の濃霧発生時の特徴は、11日03時50分頃に露点温度が急上昇し湿度が100%となった後、視程が低下したことである。一方、瀬戸大橋の観測点では2地点とも男木島に先行して湿度が100%となり、その状態が約10時間継続した(第5図)。視程は、11日02時頃に200mとなり、07時頃にかけて0m～100mとさらに低下した。

6. 実況解析

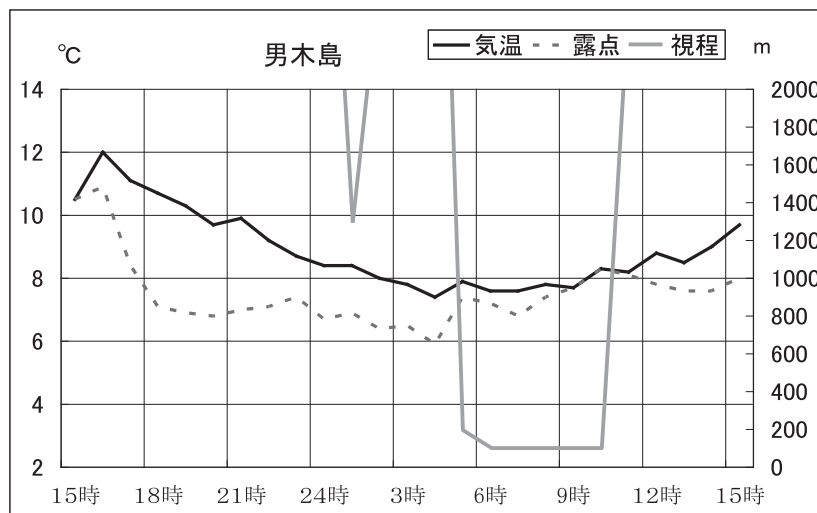
6.1 湿潤な気塊

10日09時以降の瀬戸大橋の気温、湿度の変化に

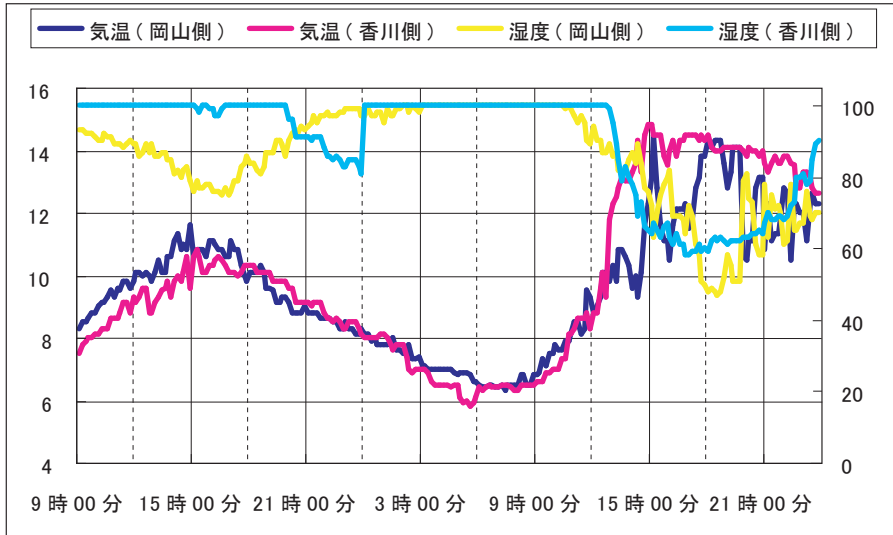
着目(第5図)すると気温は岡山側、香川側いずれも10日15時に最高気温を観測して11日06時頃にかけ低下している。湿度の変化は、一時的に75%～80%と低下した時間帯はあるものの雨が降り始めた9日夜遅くから11日昼頃まではほぼ100%の状態を維持している。また、備讃瀬戸周辺の気象官署と環境省大気汚染観測所による湿度の経過を見ても、10日15時頃にいったん70%と低下したものの10日から11日09時頃まで85%以上と高温な状態が続いた。このことから、霧発生の前日から備讃瀬戸周辺には湿潤な気塊が存在していたと推定される。

6.2 局地循環

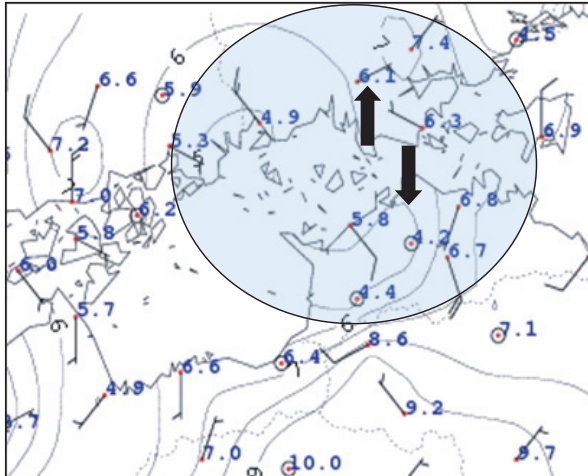
10日夜遅くから11日昼前の間の備讃瀬戸周辺のアメダスの気温・風の経過は、10日21時頃から中国山地や四国山地では気温の低下が顕著になり山風が卓越、海に向かう風となる。気温低下は、11日01時頃に燧灘沿岸、東備(岡山県の東)で著しく、その低温域は11日10時頃にかけて播磨灘沿岸へ移り、丁度同じ時間帯に備讃瀬戸周辺の風は海風に変った。第6図に11日01時のアメダスの気温・風分布図を、第7図に11日04時の赤外差分画像とアメダスの観測データを重ね合わせた図を示す。特徴としては、夜間に讃岐山脈や中国山地からの冷たい空気塊が山風となって相対的に暖かく湿った瀬



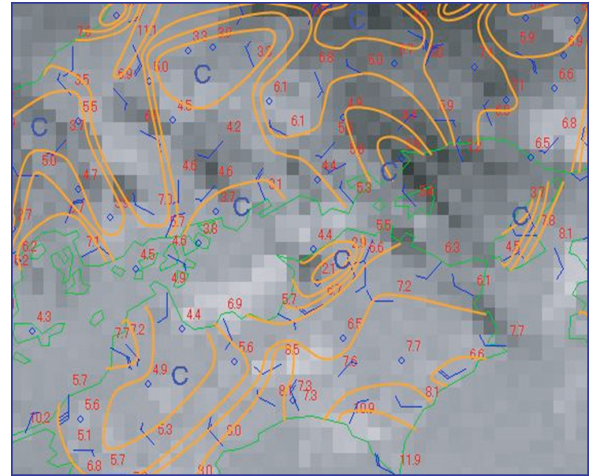
第4図 男木島の気温・露点温度・視程の時系列
(3月10日15時～11日15時)



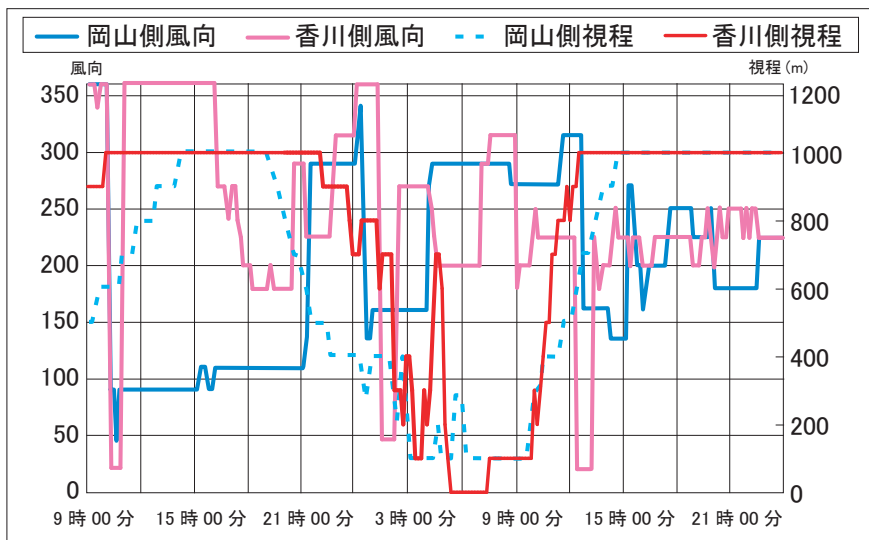
第5図 瀬戸大橋の気温と湿度の時系列
(3月10日09時~11日24時)



第6図 11日01時のアメダスの気温・風分布図
矢羽は1本2m/s、矢印は瀬戸大橋での2地点の風向を示す。



第7図 11日04時の赤外差分画像と同時刻のアメダス風
と高度補正した気温 (0.65°C/100m) の分布図



第8図 瀬戸大橋の風向と視程の時系列
(10日09時~11日24時)

戸内海（海面水温は約9℃）に流れ込んだこと、一般的には海上よりも陸上の気温が2℃～6℃低く、陸上の風速は3m/s以下と弱かったことである。

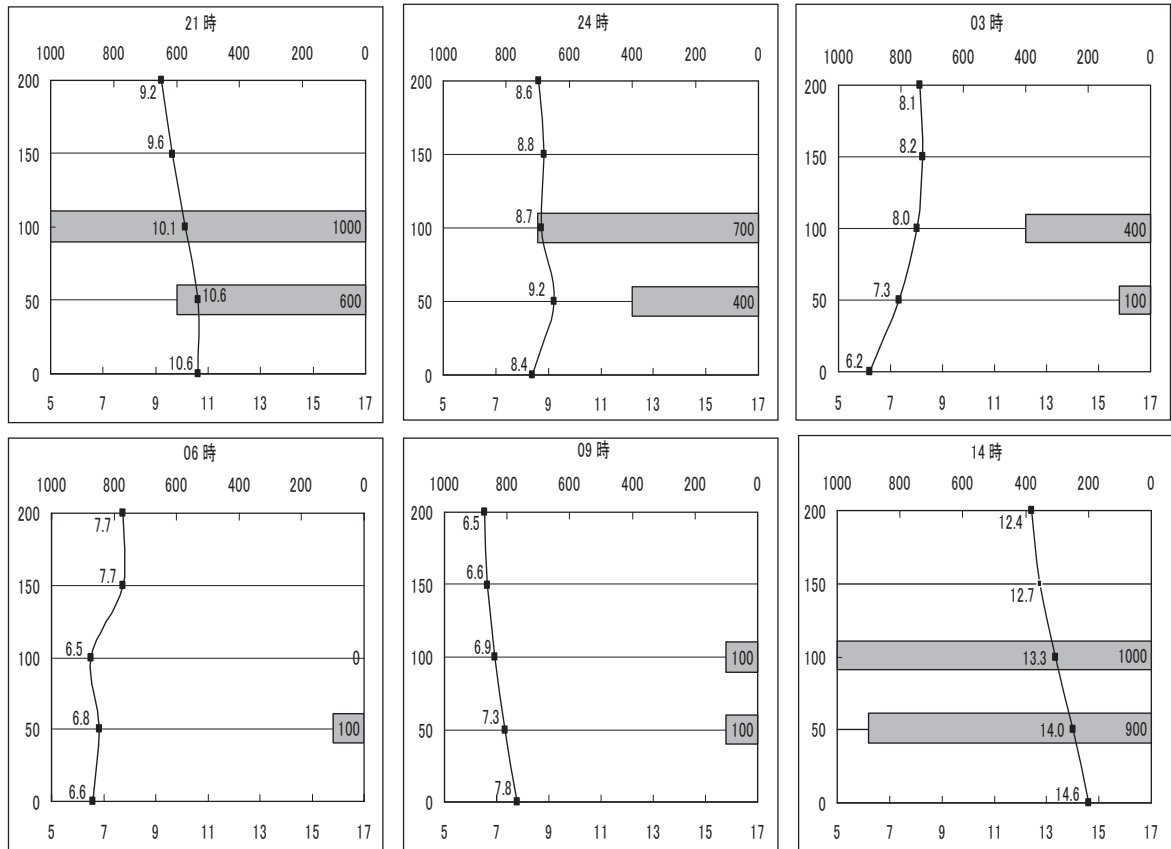
霧発生期と思われる01時の瀬戸大橋の風向（第8図）を第6図のアメダスの気温・風分布図に重ね合わせ比較すると、風速は3m/s以下と弱いものの、高度100m付近の香川側、高度50m付近の岡山側ともに地上と約180度異なった風向が観測されていた。この風向の違いは、第7図の気温分布から放射冷却により冷やされた地表付近の空気塊が讃岐山脈及び中国山地から山風として海上に流入したため、海上の上空では山風の水平収束により生じた風が反流となって陸上に向かって吹く局地循環が形成されたためと推定される。

6.3 成層状態

坂出火力発電所の鉛直気温プロファイルを用いて高度200mまでの大気の成層状態を解析する。第9図には10日21時～11日14時までの坂出火力発

電所の気温と瀬戸大橋の香川側、岡山側の視程を示す。各高度の気温は0.65℃/100mで補正している。濃霧発生中及び発生前後の大気の成層状態は、地表付近から高度200m付近にかけてほぼ等温で安定した成層状態といえる。各高度の微細な気温変化も含めて再考すると、霧発生前（10日21時）は、地表から上空に向かって気温減率が生じているが、濃霧発生初期（10日24時～11日03時）は50m以上の高度では等温、地表付近は低温化が進み、濃霧最盛期（11日06時）には地表から高度200mにかけてほぼ等温となっている。濃霧消散時（11日09時以降）は再び地表から上空に向かって気温減率を持ち始め不安定な成層となっている。

以上の鉛直気温変化から、安定層下にある地表付近から高度50m付近の冷たい気塊とその上空にある等温層内の暖かい気塊との間で混合が生じていたと推定される。第9図の各高度における最低気温は、地表から高度50mでは11日05時頃、高度100mでは06時頃、高度150m～200mでは11日09時頃に



第9図 10日21時～11日14時までの坂出火力発電所の気温と瀬戸大橋（香川側100m、岡山側50m）の視程の時系列
縦軸は高度（m）、下の横軸は気温（℃）、上の横軸は視程（m）をそれぞれ示す。

それぞれ観測しており、気温低下は地表付近から始まり、遅れて上空が低下したことがわかる。つまり11日09時以降地表付近では日照が出て気温が上昇しているのに対し200m付近はまだ低温である。これは、上空まで霧が発達していることを示唆しており、地表付近の濃霧が消散しても上空では霧（層雲）が存在していたと推定される。

6.4 まとめ

実況解析の結果から、霧の生成の主なプロセスとして以下の2項目が推定された。

- (1) 放射冷却により中国山地や四国山地から山風が瀬戸内海に流れ込み、海上では水平収束が発生、下層では反流となって陸上に向かう局地循環が生じる。
- (2) 局地循環により海面付近の湿潤気塊が持ち上げられる。

第7章では、(1)(2)項を確認するため数値実験を行った。なお、数値実験の結果には複数の効果が重なっており、各物理量を定量的に評価することは難しいが、第7章では放射冷却によって生じる局地循環、海面付近の湿潤気塊が瀬戸内海から供給された水蒸気なのかに着目した。

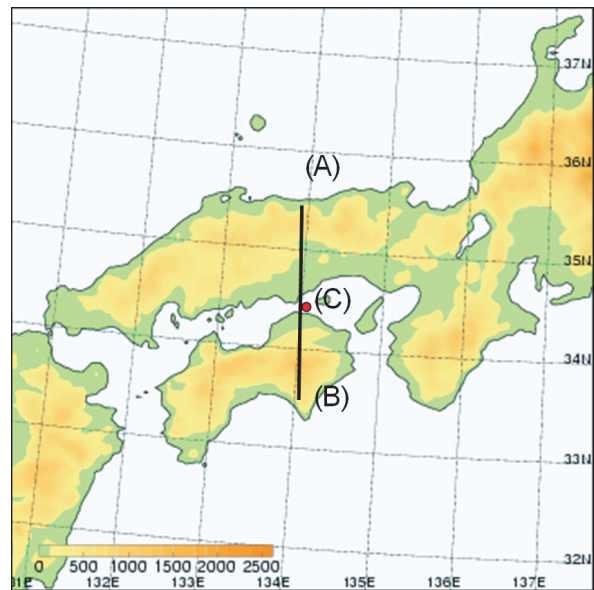
7. 数値実験塊

7.1 数値モデルの概要

実況解析の結果を踏まえ霧の発生メカニズムを解

明するため、気象庁の非静力学メソ数値予報モデル（以下「NHM」という）を用い数値実験を行った。3月10日18時（JST）を初期値とし、その他NHMの主な設定は第2表、NHMの計算領域と地形を第10図に示す。図中の(A)、(B)は次節以降の計算結果の断面区間を示す。以後、備讃瀬戸周辺の物理量は、数格子の平均的な値を示す。NHMの詳細については、気象庁予報部（2003）を参照されたい。

なお、3月10日18時（JST）初期値について、



第10図 NHMで用いた計算領域等

(A) (B)は断面図の区間を示し、
(C)は男木島霧観測所を示す。

第2表 NHMの主な設定

主要要素	NHMの設定
・湿潤過程	・対流パラメタリゼーションと雲物理過程を併用
・雲物理過程	・氷相を含むバルクモデル
・対流パラメタリゼーション	・KFスキーム
・下部境界条件	・陸上の地表面fluxのbulk係数の計算方法: Louis, 海上の地表面fluxのbulk係数の計算方法: Kondo, 海面粗度の決め方: Kondo
・上部境界条件	・摩擦のない断熱壁
・側面境界条件	・レイリーダンピングを使用、側面緩和格子数: 12
・乱流、拡散	・乱流クロージャーモデル
・投影法	・等角投影(ランベルト)
・鉛直座標	・地形に沿った高度座標系(Z*座標)
・タイムステップ	・20秒
・初期値と予報時間	・10日18時(JST)と18時間
・南北東西方向の格子数	・130格子
・鉛直層数	・50層
・南北東西水平格子間隔	・5km

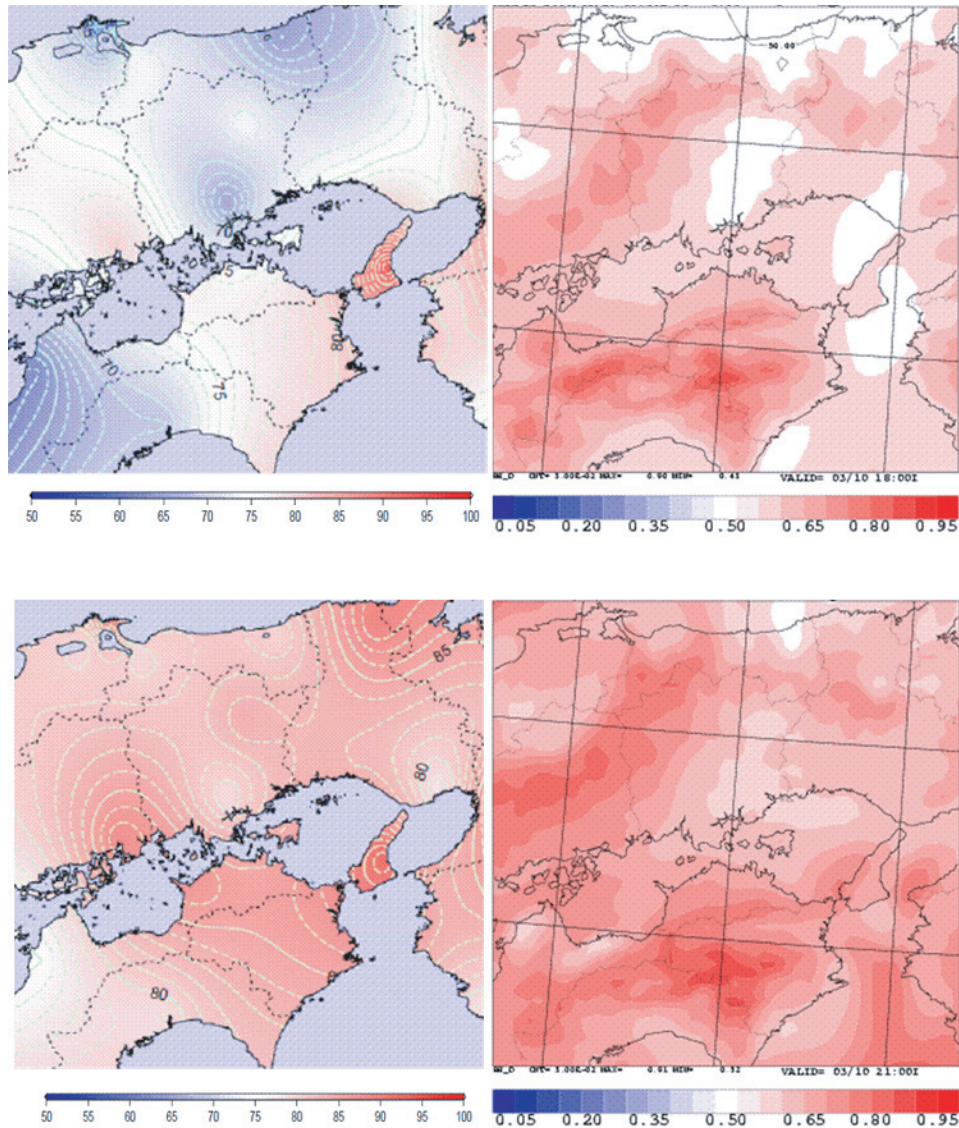
気象要素のモデル値と実況値とを比較した（第11図）。この結果、気温や風の分布はほぼ一致したが、相対湿度の値には違いが見られた。モデルは備讃瀬戸周辺で55%前後と乾燥していたが実況は70%前後と湿潤であった。相対湿度の初期値は必ずしも実況値とは一致していないが、山陽側や香川県付近の相対湿度の高低分布はよく似ている。また、モデルでは3時間後（FT=3）から次第に相対湿度も高くなり、数時間のタイムラグをもって実況値に近い分布を示したことから、初期値・境界値ともほぼ適切なものとして数値実験を行った。また、今回の数値実験では、地表面からのフラックス量や各種放射フラックス量の効果について定量的な評価は行って

おらず、今後の課題である。

7.2 局地循環

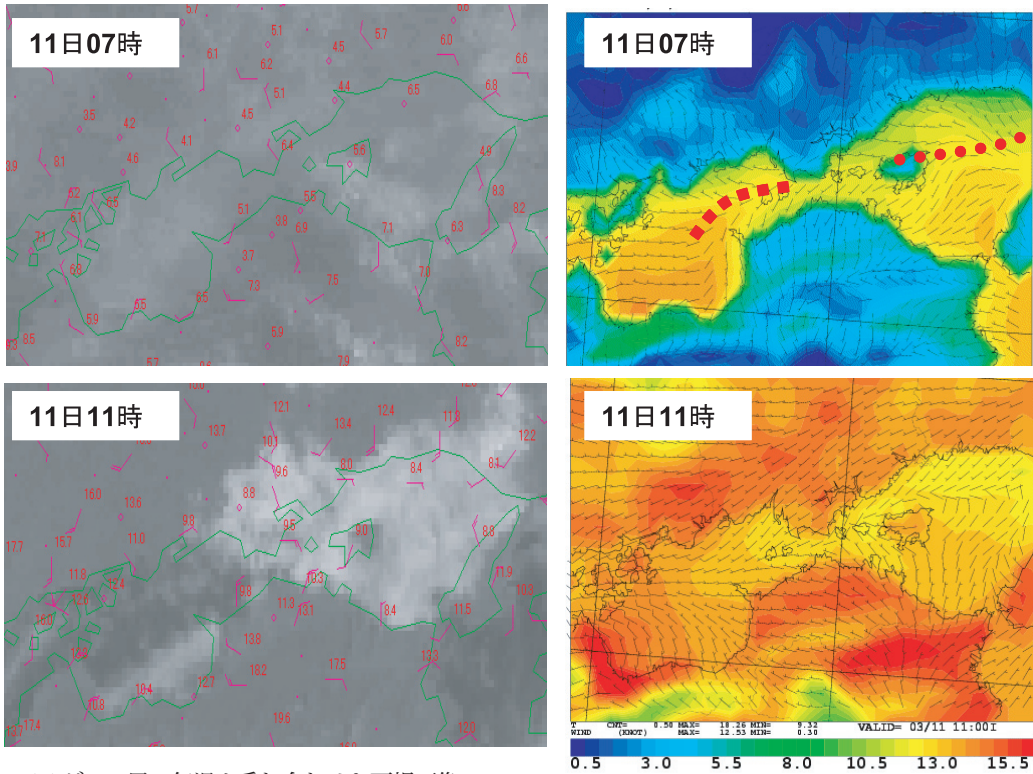
NHMの地上風の水平分布によると、10日23時頃（FT=13）から燧灘から備讃瀬戸にかけ収束域が見られ、11日07時頃には播磨灘にも広がり瀬戸内海の広範囲に収束域が見られる。そして、11時頃（FT=17）からは発散域に変わる。風速は期間を通して全般的に3m/s以下と弱い（第12図）。衛星画像からも、風の収束域があった11日01時頃備讃瀬戸で霧・層雲を確認しており、NHMの収束域とほぼ一致する。

霧発生前の10日21時頃（FT=03）、備讃瀬戸の香川側の高度約20mで局地循環が発生し、海上か



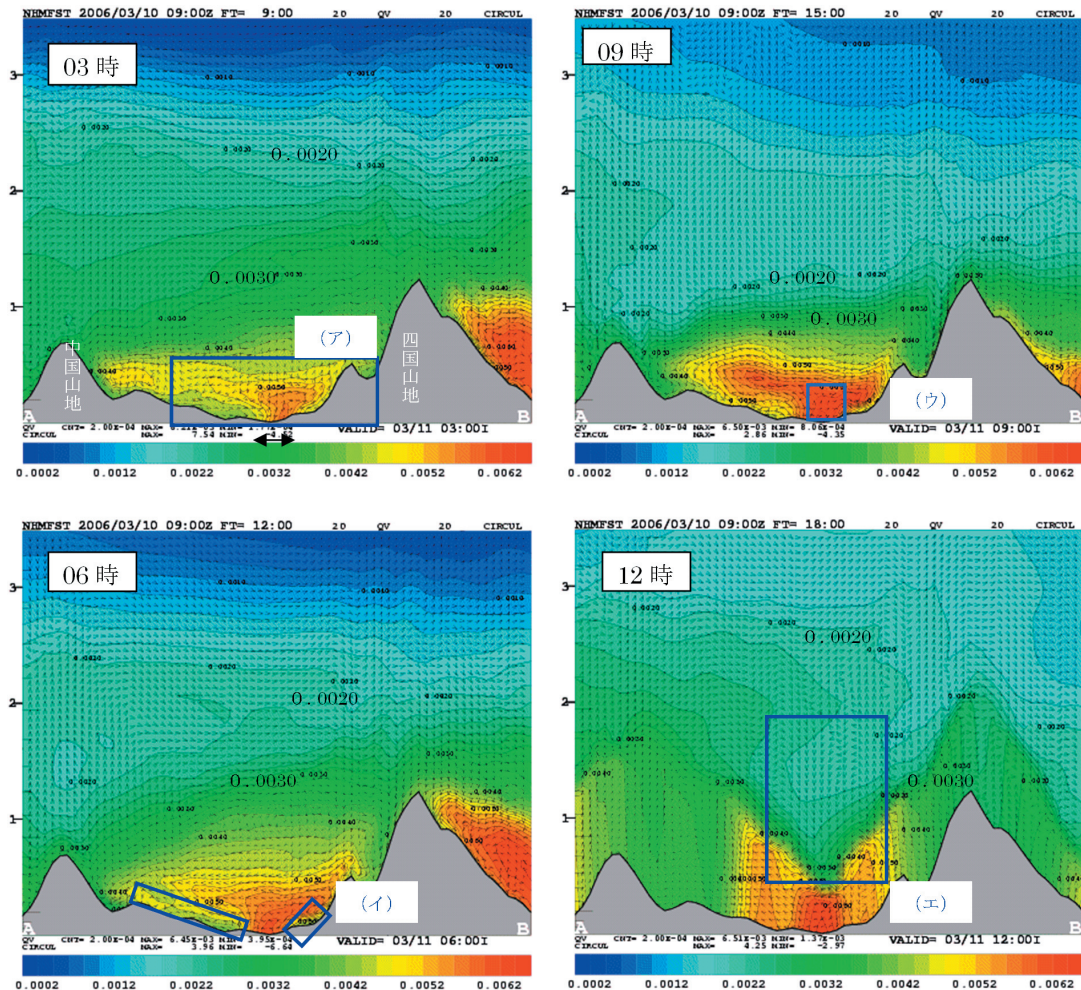
第11図 観測値（左）とNHM（右）の地上相対湿度分布図

上段は、10日18時JST（FT=0）、下段は10日21時JST（FT=2）、凡例は湿度%（左）、×100%（右）を示す。



第12図 アメダスの風、気温を重ね合わせた可視画像

(左図)と10日18時(JST)初期値のNHM地上気温と風分布図(右上図:FT=13,右下図:FT=17) 点線は収束線を示す。



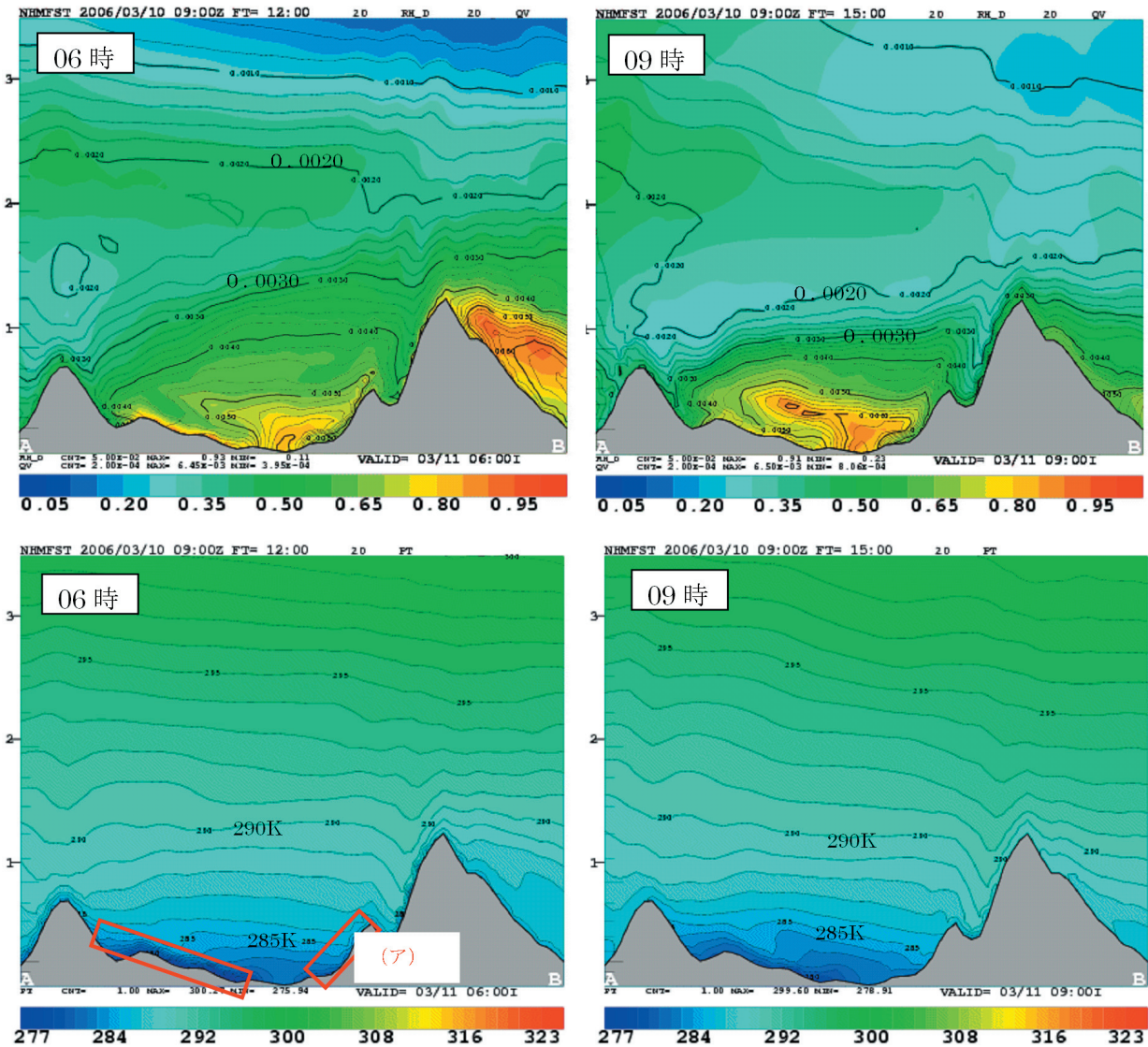
第13図 ABを断面図化したNHMの計算結果。Aが日本海側でBが太平洋側。凡例は水蒸気の混合比を(2×10⁻³kg/kg毎)で表し、矢印は鉛直循環。Y軸はモデルの高度面(×1000m)を表す。時刻は左上から下へ10日18時(JST)初期値のFT09:11日03時,FT12:06時,FT15:09時,FT18:12時(JST)。03時の⇔は瀬戸内海を示す。

ら上空へ水蒸気の供給が始まる(図略). 11日03時頃(FT=09)からは海上で局地循環が顕著(第13図(ア))になり海上中心に水蒸気の拡散が始まり, 水蒸気量も増加傾向になる.

濃霧最盛期の06時頃(FT=12)からは水蒸気が岡山側・香川側に広がる一方で, 陸面に沿って水蒸気量の少ない気塊が海上に流れ込んでいる.(第13図(イ))観測結果からも男木島では05時30分頃と07時頃, 気温変化がほぼ一定に対し露点温度が下降し, 乾燥した気塊の移流が認められていた. 同時刻の地上付近の温位は(第14図(ア)), 陸面に沿い低下が見られ, 特に山地の傾斜の緩やかな中国地方で顕著である. 等温位線が集中した地上付近の

湿度は80%と高く, 放射冷却による要因が大きいことを表している. また, 低温位の上端部や海上に流れ込む先端部では, 湿度が約70%以上と相対的に高湿度域である.

08時頃(FT=14)からは海上で鉛直方向に運ばれた水蒸気が100m~200m付近の高度で岡山側, 香川側に広がり, 特に海上では約 $5 \times 10^{-3} \text{kg/kg}$ から約 $6 \times 10^{-3} \text{kg/kg}$ へと混合比が増加(第13図(ウ))している. 09時(FT=15)には温位の集中帯は解消に向かい(第14図), 地上気温は昇温している. 海面付近の200m~300m付近の高度では湿度が80%以上と高く, 混合比が増加していることから海上の水蒸気供給が高湿度の原因として挙げられる.

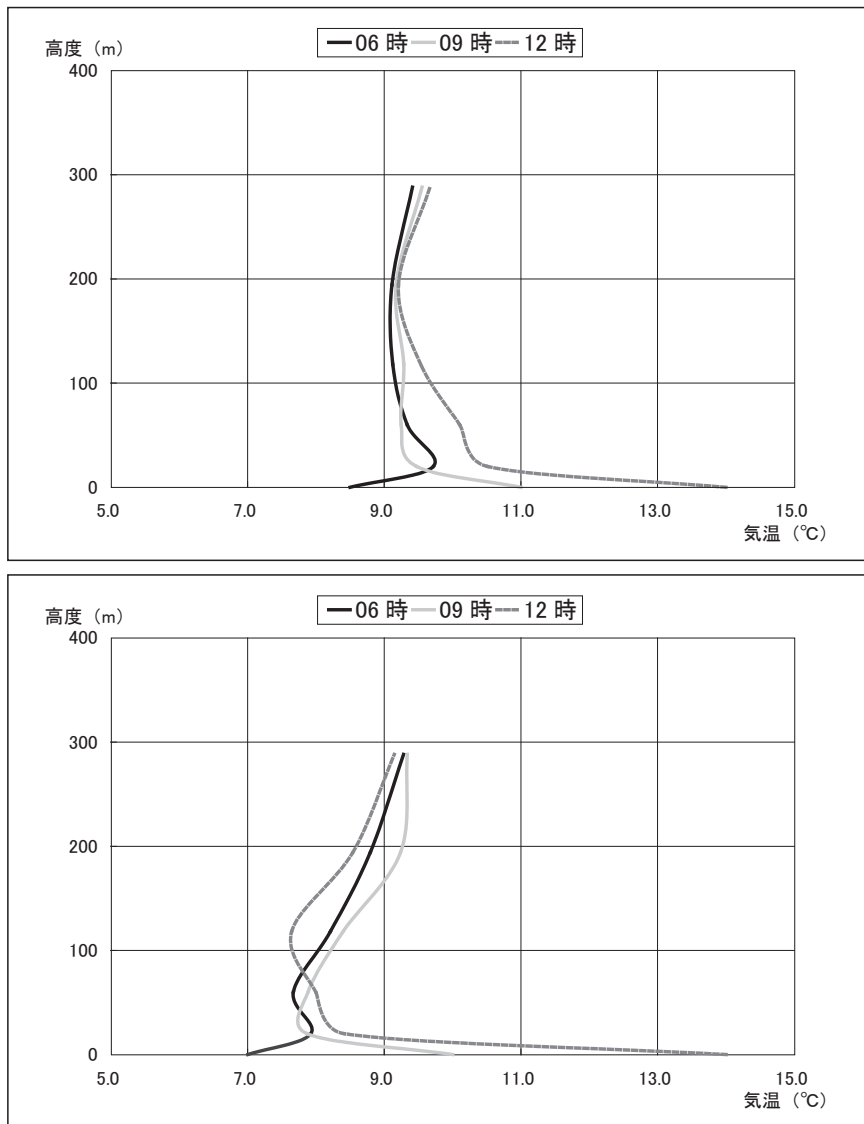


第14図 ABを断面図化したNHMの計算結果. Aが日本海側でBが太平洋側. 上段の凡例は相対湿度(×100%, 5%毎), コンターは水蒸気の混合比を表す. 下段コンターは温位(1K毎)を表す. 時刻は10日18時(JST)初期値の左がFT=12, 06JST, 右がFT=15, 09JST. その他は第13図に同じ.

濃霧消散期の12時頃 (FT=18) になると, 山地の斜面が加熱しはじめ, 斜面直上の空気は軽くなって斜面に沿って上昇し, それを補うために備讃瀬戸の上空で下降流が形成され海上は発散場が変わった (第13図 (エ)). 同時に相対的に混合比が減少しており, この状態は特に海上でその傾向が強い.

11日06時 (FT=12), 09時 (FT=15), 12時 (FT=18) の瀬戸大橋付近の気温鉛直分布の計算結果を第15図に示す. 上段は海面水温13°Cを初期値と

したときの鉛直分布を, 下段は海面水温を実況値に近い9°Cとしたときの鉛直分布をそれぞれ示す. ともに地上から100mまでの気温減率は, 濃霧消散期の12時頃 (FT=18) は06時 (FT=12) のそれより大きい. この傾向は, 6.3節の濃霧消散時の成層状態と似ており, NHMの計算結果も地表付近の気温上昇によって不安定化が進み, 霧が消散している様を表している.



第15図 瀬戸大橋付近の気温の鉛直分布
 10日18時 (JST) 初期値の FT=12 (11日06JST), FT=15 (09JST), FT=18 (12JST),
 上段は初期値の海面水温13°C, 下段は初期値の海面水温9°CのNHMの計算結果

7.3 海面水温

海上からの水蒸気供給には海面水温が大きく寄与する。実況における海面水温は約9°Cであったのに対し、NHMにおける初期値の海面水温は約13°Cと4°C高かった。本節では、海面水温を実況と同じ約9°Cに変更し、その他の設定は変えずにNHMを駆動した（以下、海面水温の初期値13°Cを「実験13」、初期値9°Cを「実験9」という）。計算結果は第15図（下段）、第16図及び第17図に示すとおりである。気温の鉛直分布は高度100m～200mの気温が実験13に比べ約2°C低下し実況の第9図に類似する。実験9の備讃瀬戸の混合比は、実験13と比べ期間を通じて約 1×10^{-3} kg/kg低く、11日09時の湿度分布は混合比が減少したことによって実験13より約5%低下している。温位は実験13と同様に陸上の低温域が海上に流れ込んでいる（第17図（ア））。第12図に示した燧灘から播磨灘に発生していた収束域も表現されており（図略）、海面水温が実況に近い条件下であっても局地循環によって海上の水蒸気を上空に持ち上げる機構は変わらなかった。

7.4 水蒸気輸送

高松地方気象台（1986）は、陸風による水蒸気の輸送が晴れ霧発生に寄与していると述べている。吉川（1988）は水蒸気が海面から供給され備讃瀬戸の南北沿岸に蓄積され北岸の高比湿気塊が北東風によって移流したと報告しており、いずれも海陸風の効果が大きいことを主張している。実況解析からも湿潤な気塊の存在、局地循環が霧発生に寄与していると述べた。

本節では、瀬戸内海で発生する水蒸気輸送の振る舞いを調べるため、放射冷却、海上からの水蒸気供給を取り除く感度実験を行った。

(1) 地面からの潜熱や顕熱を考慮せず放射が大气に寄与しない設定による実験

本実験では、放射冷却、日照による地表面の加熱・冷却、雲からの大気放射による加熱・冷却、地表面から大気への熱（水蒸気）の輸送をなくし、放射冷却、水蒸気の供給を取り除いた場合の霧生成の変化

を調べた。ただし、潜熱・顕熱のフラックスは、地面温度の平衡状態に関与しているため、環境場を大きく変更している可能性があり本節は推測として論じる。

(2) 燧灘から播磨灘にかけての海陸分布の海の部分をすべて陸に変更した設定による実験

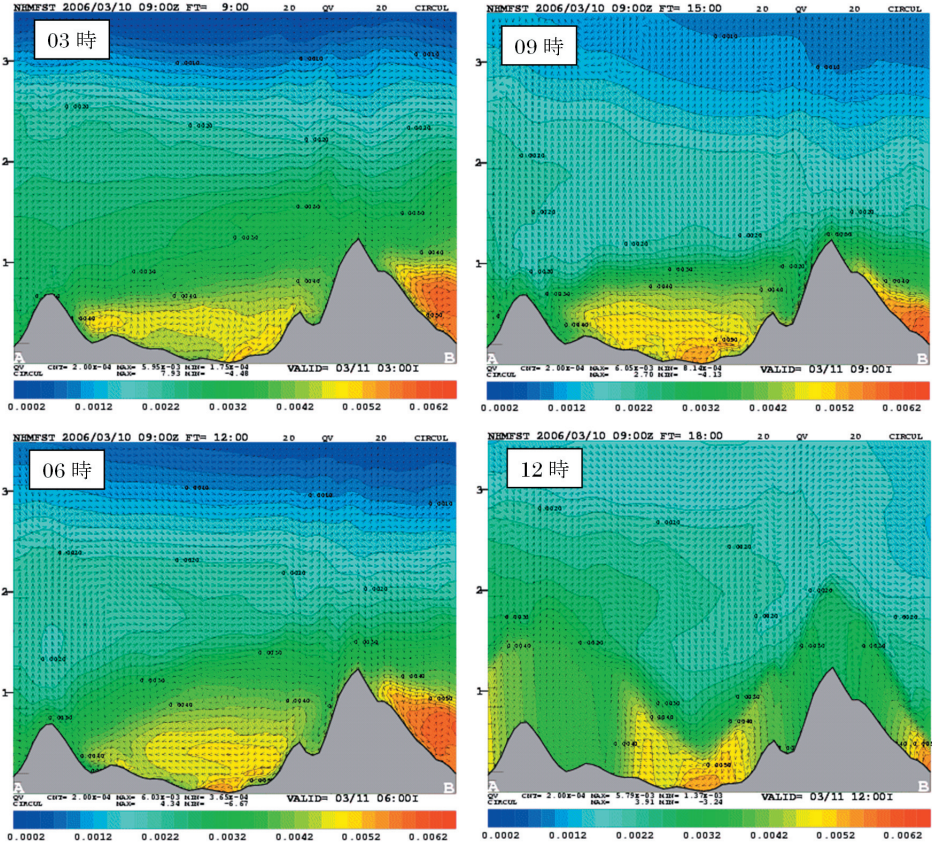
海から陸に変更することで、海上に比べ地表面から大気への水蒸気の供給量少なくすることができ、このときの霧生成の変化を調べた。

海面水温9°Cの初期値において、(1)を「実験II」、(2)を「実験III」、7.3節の実験9を「実験I」とする。濃霧最盛期における06時（FT=09）の実験II、IIIの結果を第18図に示し、第16図及び第17図と比較する。各実験における備讃瀬戸の温位、混合比、湿度の値を第3表に示す。

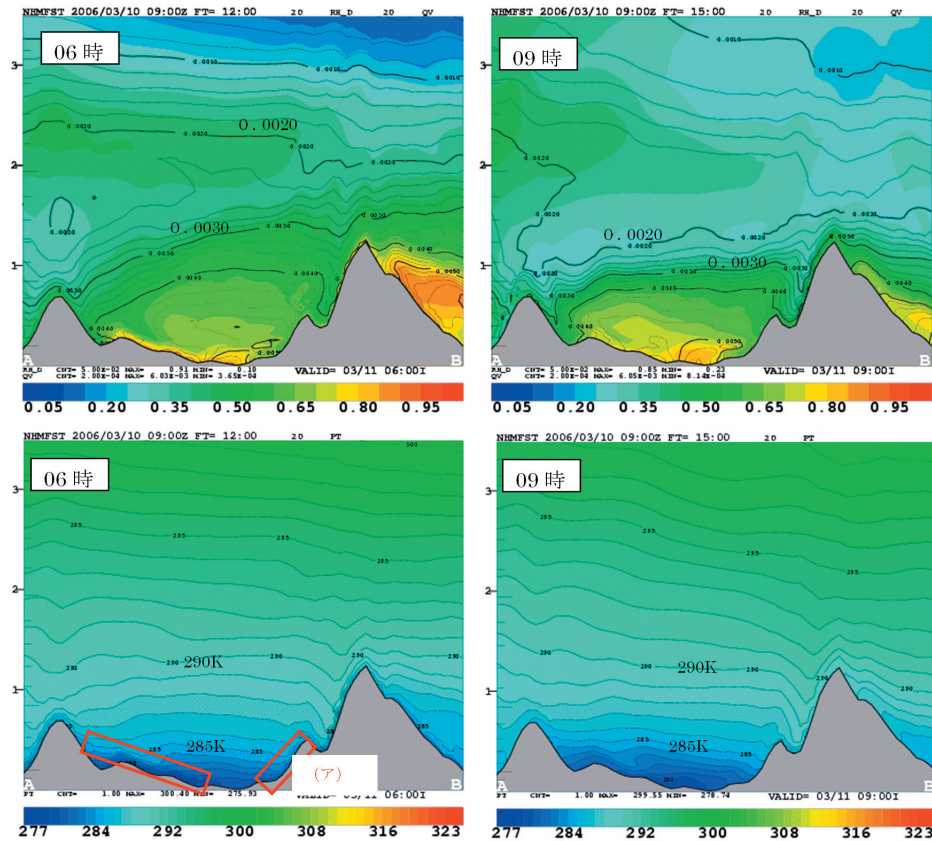
実験IIでは、西寄りの風が卓越し、山風や斜面下降流も持続しなかったために局地循環が生じず、海上の湿潤な気塊を上空に輸送するシステムも発生しなかった。地上付近の温位は284Kと実験Iより7K高く、相対的に地上付近とそれに近い大気は暖かい。そのときの混合比及び湿度は実験Iより 0.4×10^{-3} kg/kg、約20%それぞれ少ない。

実験IIIでは、山風や斜面下降流は発生し、局地循環も認められたが、実験Iに比べ継続性は短く循環高度はやや低い。陸上付近（地形変更前は海上）の温位は276Kと実験Iの海上と比べると1K低く、放射冷却により陸上に変更した備讃瀬戸に低温な気塊が堆積している様子がわかる。その結果、地上付近は下層大気（高度200m～300m）より高湿度である。下層大気の混合比及び湿度は、実験Iより 0.4×10^{-3} kg/kg、約10%それぞれ少ない。

実験結果をまとめると、実験IIでは放射冷却が効かなかったため局地循環が発生せず、実験IIIでは放射冷却によって局地循環は発生したが、高湿度の表現は地表面付近に留まった。いずれも海上の水蒸気の供給を取り除いた設定であることから、実験Iの上空の高湿度の原因は瀬戸内海にあり、備讃瀬戸上空への輸送には、放射冷却によって生じた局地循環が寄与していたと考えられる。



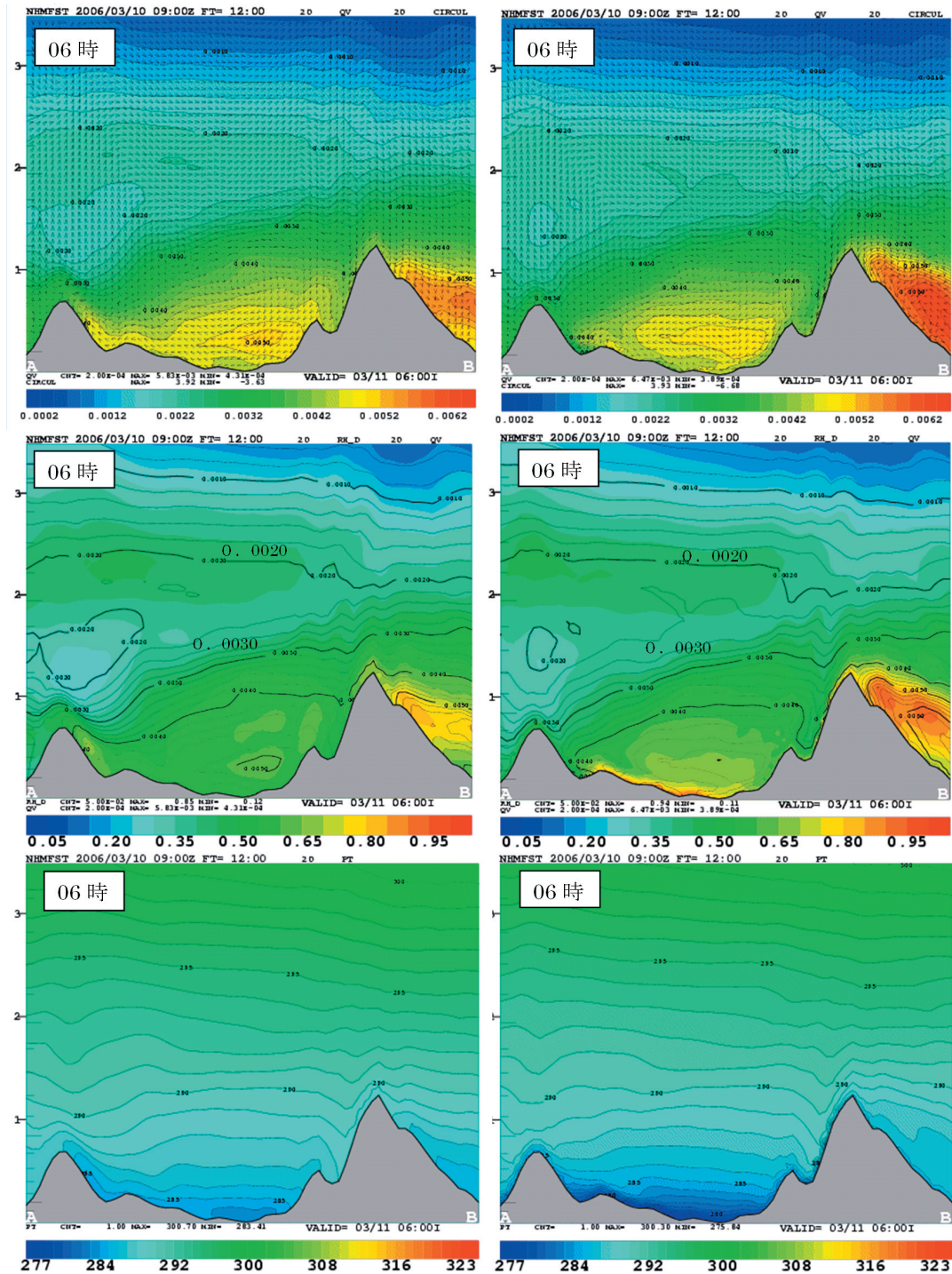
第16図 初期値の海面水温を9°Cに変更したNHMの計算結果. 凡例等は第13図に同じ.



第17図 初期値の海面水温を9°Cに変更したNHMの計算結果. 凡例等は第14図に同じ.

また、実験Ⅱ、実験Ⅲが意図する効果を再現しているかを確認するため、長波放射の加熱量（長波放射による温位の前1時間変化率）、短波放射による加熱量（短波放射による温位の前1時間変化率）を調べた。実験Ⅱについては、全く放射が考慮されていないため予報期間中長波放射、短波放射による温位の変化はなかった。実験Ⅲでは、実験Ⅰと比較

し、地表面からの長波放射の射出による温位の低下が、内陸部と同様に備讃瀬戸付近でも発生していた（第19図上段）。短波放射による加熱量は、日の出頃の07時（FT=13）から変化が現れ、実験Ⅲが実験Ⅰに比べ備讃瀬戸上空で温位の増加量が約 $1 \times 10^{-6} \text{K/s}$ 多く（第19図下段）、備讃瀬戸の水蒸気量の違いが微量に反応したと思われる。

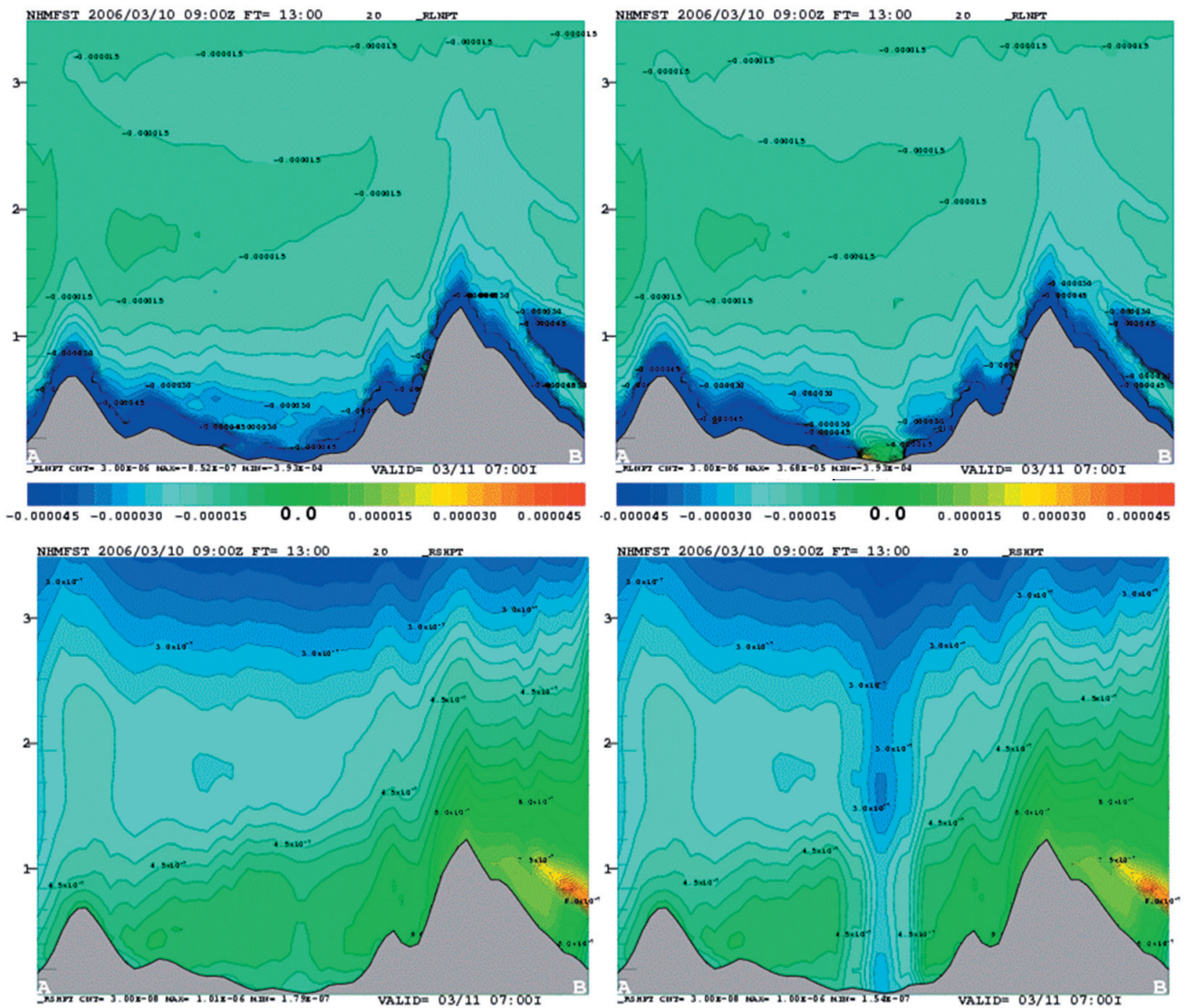


第18図 地面からの潜熱等を考慮しない設定（左）、瀬戸内海を陸に設定（右）のNHMの計算結果。上段から凡例は水蒸気の混合比 (kg/kg) 及び鉛直循環、中段が相対湿度 (%), コンターは水蒸気の混合比 (kg/kg), 下段の凡例は温位 (K). 時刻はいずれも10日18時 (JST) 初期値のFT=12, 06JST. その他は第13図に同じ。

第3表 各実験の要素一覧

実験種類	温位 (K)	混合比 (kg/kg)	相対湿度 (%)
I	277	5.0×10^{-3}	65 ~ 75
II	284	4.6×10^{-3}	50 ~ 55
III	276	4.6×10^{-3}	60 ~ 65

* NHM パラメータを変更した比較実験の結果。温位は、備讃瀬戸の海上付近の最小値、混合比及び相対湿度は、備讃瀬戸の高度 200m ~ 300m 付近の最大値を抽出。時刻は10日18時 (JST) 初期値の FT=12 (06JST)



第19図 初期値海面水温9℃, 地形変更なし (右), 瀬戸内海を陸に設定 (左) のNHMの計算結果. 上段から凡例は長波放射による温位の前1時間変化率, 3×10^{-6} (K/s) 毎, 下段は短波放射による温位の前1時間変化率, 3×10^{-8} (K/s) 毎. 時刻はいずれも10日18時 (JST) 初期値の FT=13, 07JST.

7. 5 発生メカニズム

NHM の計算結果から、備讃瀬戸周辺の濃霧発生メカニズムを以下に示す。(第 20 図)

(1) 「濃霧発生前」

夜間になって陸上の気温低下が始まると、中国、四国地方の山風や斜面流によって低温な気塊が瀬戸内海に流れ込む。

(2) 「濃霧発生期」

山風や斜面流は瀬戸内海で水平収束し、上昇流となって局地循環が発生する。このとき、陸上から流れ込んだ低温な気塊が海上の暖湿気塊を冷却する。

(3) 「濃霧最盛期」

局地循環は、海上の水蒸気を上空(高度 100m ~ 300m)に輸送するとともに拡散させる。このとき、水平収束による上昇流で持ち上げられた気塊が、断熱冷却により凝結する(飽和する)。

(4) 「濃霧消散期」

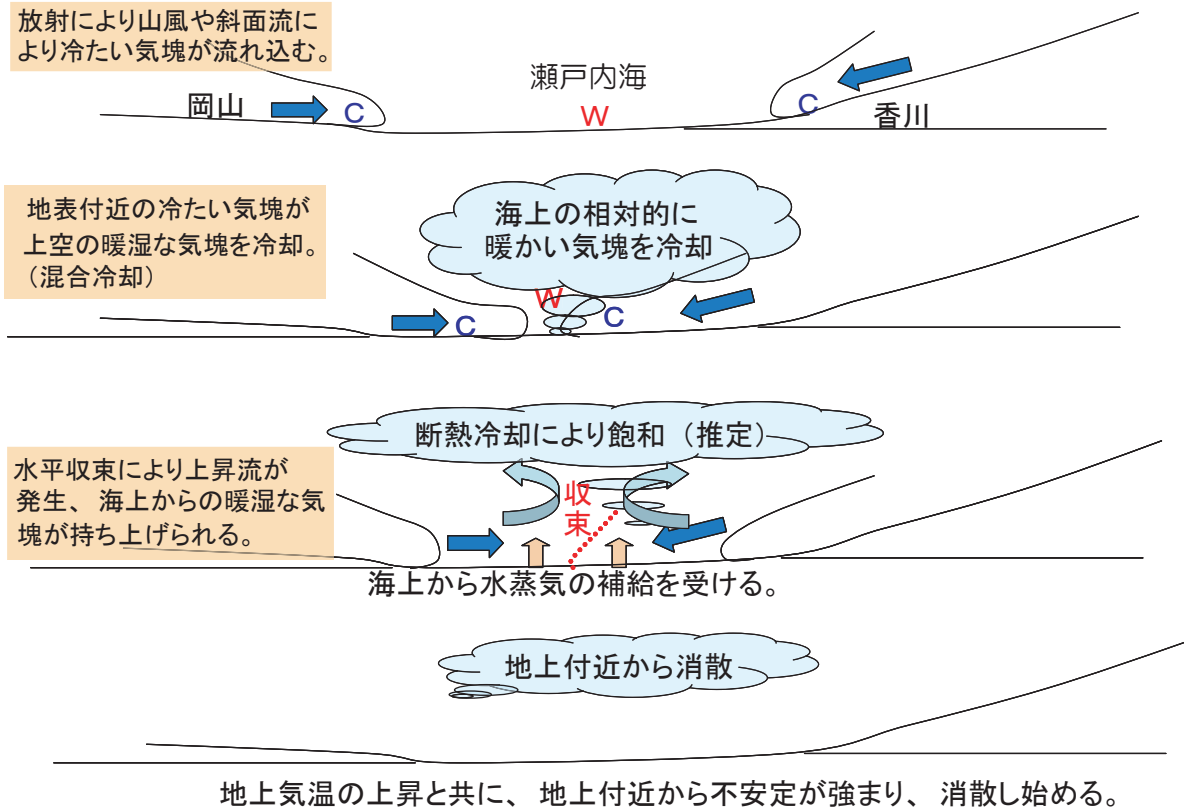
地上気温の上昇により下層大気は、不安定化が進み霧は消散する。

8. 実況と数値実験の比較

数値実験の結果と観測結果を比較する。(1) ~ (4) は、7.5 節に対応する。

(1) 第 7 図の観測結果からも岡山側と香川側に低温域が見られ、風は瀬戸内海に向かって弱いながら継続して吹いている(山風, 斜面流)。実験結果の第 16 図でも瀬戸内海に向かって低温な気塊の流れ込みを顕著に表しており、観測結果とほぼ一致する。

(2) 観測結果から、備讃瀬戸では海上 50m, 100m の高度で霧又は層雲を確認し、6.2 節で報告したように持続性はないものの NHM で認められた局地循環も確認できた。瀬戸大橋の気温は、10 日 15 時頃約 10℃を観測した後 11 日 06 時には約 6℃を観測している。この気温の低下は、約 9℃の海水の保温効果以上に夜間熱源がないことや陸上からの冷たい気塊の流れ込みが効いており、NHM の結果と整合が取れている。瀬戸大橋の湿度の変化は第 5 図より一時的に乾燥気塊の流入も見られるが霧発生前から



第 20 図 備讃瀬戸周辺の濃霧発生メカニズム

上から濃霧発生前, 濃霧発生初期, 濃霧最盛期, 濃霧消散期を示す。

約90%の高湿度な状態を保っていた。これに対しNHMの結果は10日18時(FT=0)以降約60%と実況より低い状態を保ち11日03時頃(FT=09)から次第に湿度は高くなった。NHMは霧発生前から存在していた湿潤な気塊を表していなかったが、低温な気塊の流れ込み等により約20%の上昇を見せた。

(3) 数値実験の高湿度(70~75%)の高度は0m~300mである。4章のMODISの画像から解析した雲頂高度は、約400m~500mであった。また、6.2節の局地循環によって海上の暖湿気塊が上空に持ち上げられたと仮定し、瀬戸内海沿岸の観測データを用いてHenningの式から持ち上げ凝結高度(LCL)を求めると(第21図)、11日01時頃から09時頃の間LCLは約200mであった。NHMの高湿度な高度と観測結果を比較しても、±100m程の差でほぼ一致している。

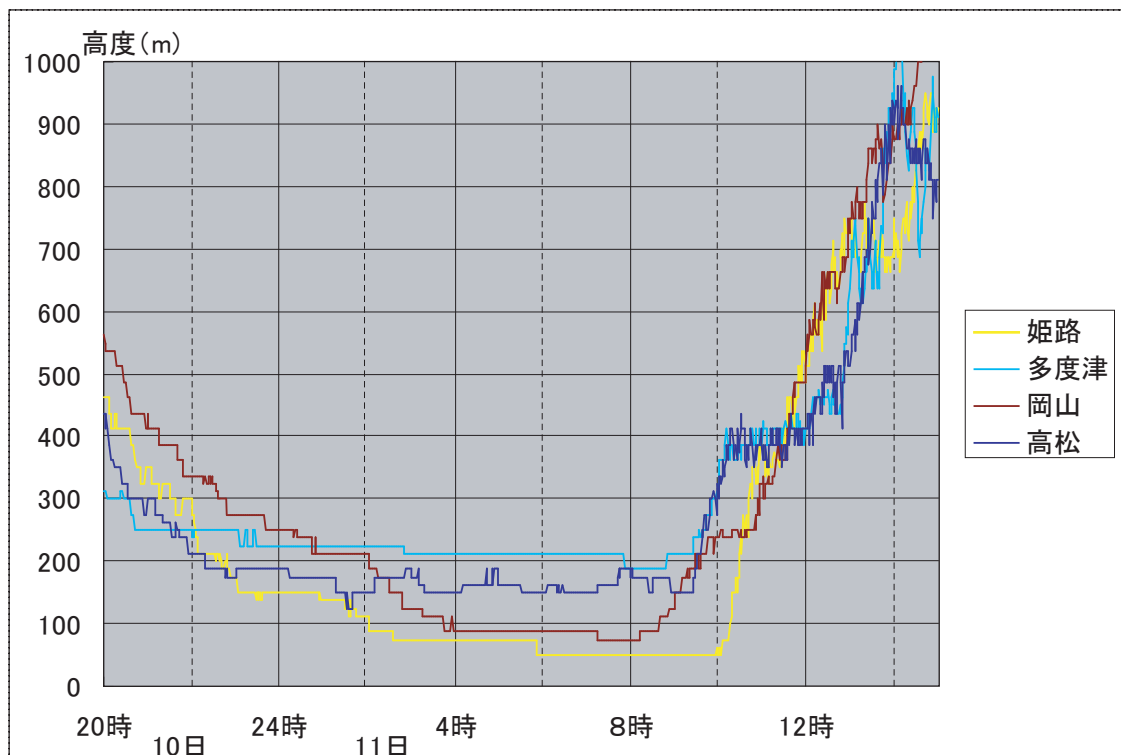
(4) 大気下層の気温の鉛直分布について、6.3節の坂出火力発電所の観測値(第9図)とNHMの計

算結果(第15図下段)を比較すると時間及び高度のずれはあるものの次第に鉛直方向に気温減率が増し不安定化が進む様子は似ている。

9. 霧予測ワークシートの提案

これまでの実況解析及び数値実験の結果を踏まえ、第22図のとおり備讃瀬戸周辺の霧予測ワークシートを提案する。従来の濃霧予測は、暖湿気塊が低温な海水で冷却され発生する霧を対象とし、海面水温、気温及び露点温度を用いて予測しており、本シートとは対象とする霧が異なる。福原(2001)の作成した濃霧判定グラフ(第23図)を用いると、従来の予測対象は第一象限の霧となるが本シートでは第三象限に該当する。本シートは(1)の使用前提条件と以下に示す(2)~(4)の三つの条件で構成される。

(1) ワークシート使用の前提条件として四つの条件に合致するか判断する。



第21図 Henningの式*から求めた備讃瀬戸周辺気象官署の持ち上げ凝結高度(LCL)の時系列

* 持ち上げ凝結高度(LCL)は次式により簡略的に求められる。LCL=125(気温-露点温度)。

(2) 第一に冷たい山風がそれぞれ中国山地及び讃岐山脈から瀬戸内海へ流れ込むかを判断する。

(3) 第二に海上や地上付近の大気が飽和に近い状態であるかを備讃瀬戸周辺の相対湿度を用いて判断する。

(4) 第三は冷却気塊の存在を計る目安として地上気温と海面上の気塊との気温差を条件に挙げ、備讃瀬戸周辺の地上気温が瀬戸大橋の気温よりさらに低下するかを判断する。

10. 考察

10.1 蒸気霧の可能性

冷たい乾いた気塊が相対的に暖かい海水面を移動するとき海水面から立つ湯気のように発生する蒸気霧の可能性について考える。以下三つの観点からも蒸気霧とは考えにくい、いずれも他例や通説との比較で蒸気霧ではないと断言できない。

①気温と海水温度の差は、備讃瀬戸の沿岸部で 3°C ～ 6°C 、男木島ではわずか 1°C の差である。愛媛県長浜の「肱川あらし」や北海道の「けあらし」の例では気温と海水温度の差は 10°C 以上あり、それと比較すると小差である。

②前日の降雨により陸地から流れ込む冷気も高湿度であり、霧発生前から備讃瀬戸周辺の内陸部でもやを観測していた。

③一般に、蒸気霧はその高さが非常に低く 20m ～ 30m 程度であるといわれており、雲頂が 500m 以上に達した本事例とは大差である。

黒岩他(1959)は、気温と海水温度の差よりも水蒸気圧の差を重要視しているが、観測データの希薄な備讃瀬戸周辺での本事例では蒸気霧の証明はできなかった。

10.2 霧の発生高度

実況解析では霧の発生高度が瀬戸大橋の観測データから 50m ～ 100m に存在していることは確認している。しかしながら、瀬戸大橋下に観測データがなく海面付近に霧が存在していたのかは明らかでない。同時に4章の衛星画像で見た備讃瀬戸の霧は最初に海面付近で発生したのか、それとも 50m ～

100m 付近の高度なのかも判別できなかった。男木島では瀬戸大橋で霧を観測した約4時間後に視程が 200m を切り、湿度が 100% に近い状態となった。上空で発生した霧又は層雲が赤外放射の射出により層全体が冷え、層の厚みを増し、やがて地面に届くといった層雲の発達過程を踏まえると、上空で発生した霧が次第に高度を下げたとも考えられる。ただし、瀬戸大橋と男木島は約 20km 離れており、あくまでも推論となる。

10.3 霧予測ワークシートのフローチャートの条件

本事例において作成したワークシートは、湿潤な気塊、冷たい気塊、局地循環を発生させやすい環境場の三条件を柱として作成した。本節では、第22図の②、⑥、⑦の条件について考察する。

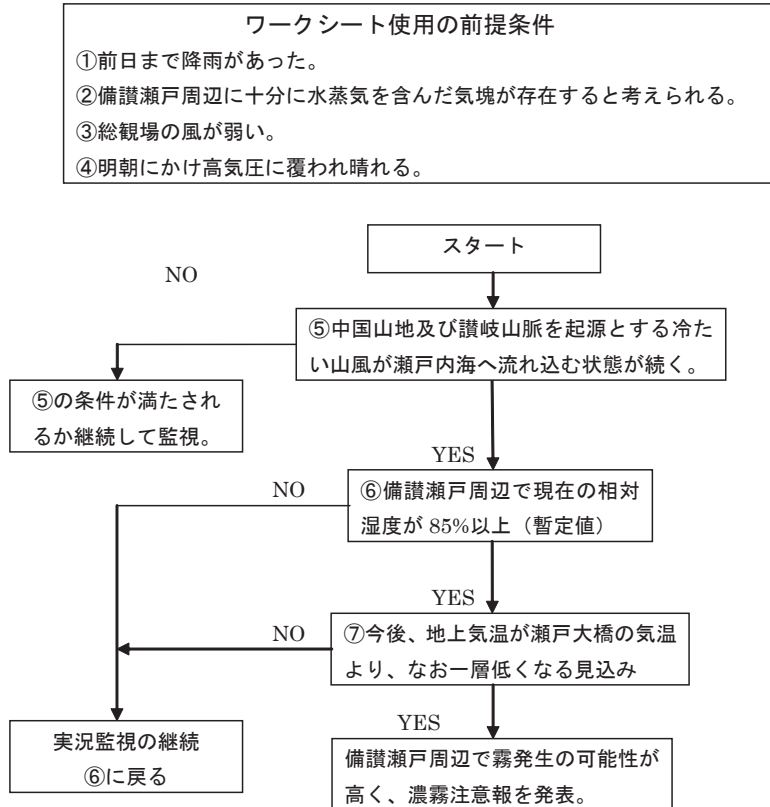
②の条件とし湿度の値を検討したが、気温の変化により湿度も変わることから本事例のように天気が回復し一時的に湿度が低下するような場合には条件を満たせず見逃しとなる。このため本シートには、主観的ではあるが経験的に雨が降ったという履歴を条件に加えた。数値化は、季節的な変化はあるものの水蒸気量を用いる等今後の検討課題として挙げられる。

⑥の条件は、②の湿潤な気塊が気温の低下によって飽和に近い状態に変化しつつある様を指標として示し、⑦の条件と併せて予測することで湿潤な気塊が冷たい気塊によって飽和に達するかどうかを判断する。つまり、ここで示す湿度 85% の状態が濃霧注意報発表のリードタイムの目安といえる。この値が適切な値であるかどうかは、今後検証する必要がある。ここでは暫定値とした。

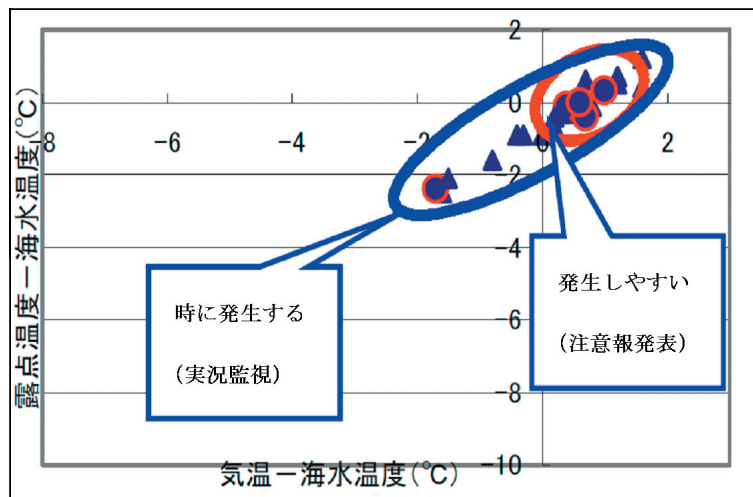
⑦の条件に数値化を試みたが次の理由で今回の予測ワークシートには加えなかった。6.2節の実況解析から陸上と海水温度との温度差は、 2°C ～ 6°C 陸上低かったと報告したが、厳密に言えば海水温度との比較ではなく、海面付近の気塊でなければならない。6.3節の坂出火力発電所の観測データからその高度の対象を約 50m と推察したが、これは観測データがその高度しか存在しないためであり高度 50m

とは断言できない。再び坂出火力発電所の地上と高度 50m の気温差に着目してみると (第 24 図), 霧発生初期にあたる 11 日 00 時から 11 日 03 時の時間帯の気温差がそれ以外の時間帯より大きく, 最大気温差は 1.1℃である。これは, 陸上から流れ込んだ低温な気塊が海水に温められたために小差であった可能性もある。仮に海面付近の気温が海水温と近

似的に約 9℃であれば, 霧発生初期にあたる時間帯の温度差は約 3℃である。この 1℃~3℃の気温差は, 飽和に近い気塊を凝結させるには極端な低温気塊の存在が絶対条件ではないことを示している。また, 沢井 (1982) は気温と露点温度の変化から現実的に霧が発生するかどうかは極めて微妙なバランスのもとにあると述べている。⑦の条件に気温差が 1℃~



第 22 図 備讃瀬戸周辺の霧予測ワークシート



第 23 図 従来の濃霧判定グラフ

3℃以上として考えた場合、気温差 1℃は霧の有無に係わらず起こりえる気象条件であり、気温差 3℃は海面付近の気塊が海水温度と近似値として算出した値でいずれも適した予測条件とはいえない。当然、気温差が大きくなれば霧発生には好条件となるが、今回は明確な値として示せなかった。なお、坂出火力発電所の気温データはリアルタイムでは入手できないため、坂出火力発電所の気温データの高度とほぼ酷似する瀬戸大橋の気温データを予測に用いることとした。本ワークシートは 1 事例の解析結果から作成したためいずれの条件も今後事例を増やし吟味しなければならない。

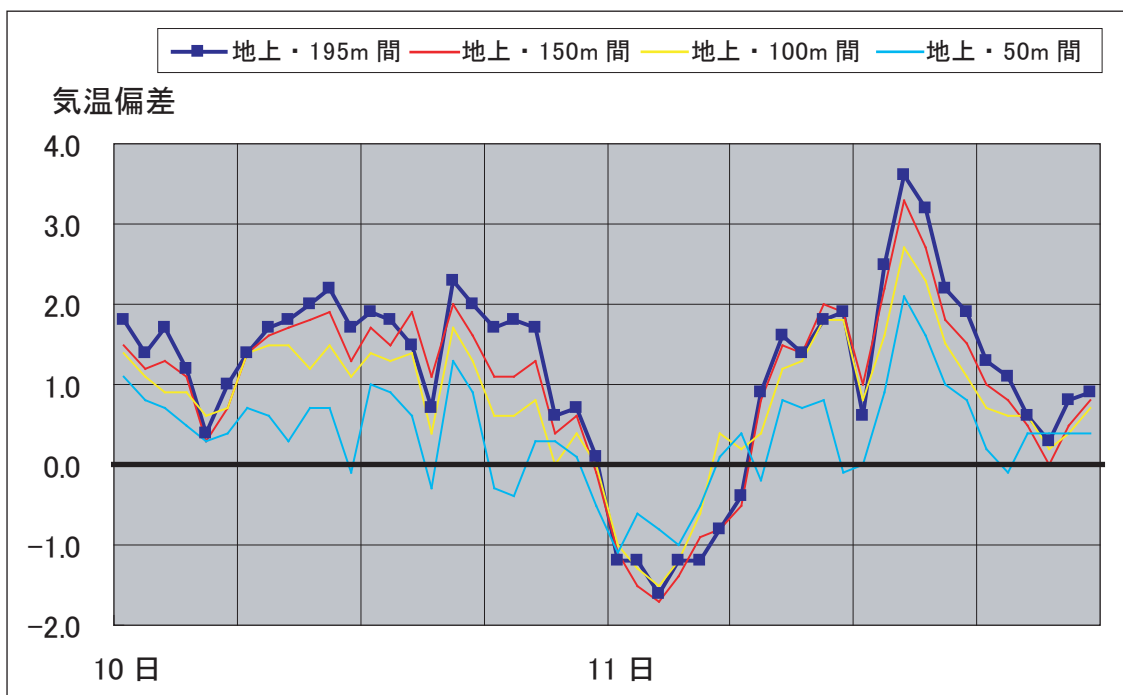
10. 4 霧予測ワークシートの有効性

本節では、濃霧判定グラフ（第 23 図）の 2001 年の 21 事例と 2005 年から 2006 年の 5 事例を用いて霧予測ワークシート有効性を調べた。同ワークシートの条件を満足しているかどうかを第 4 表に示す。列項目の①～⑦は、第 22 図のそれに対応する。瀬戸大橋のデータが障害欠測により条件⑦の確認はできなかった。

第 4 表の大きな特徴は、停船勧告のあった 8 事例は濃霧発生時に降水がないことである。停船勧告

のなかった 18 事例は、濃霧発生時に断続的な降水があった。従来の濃霧判定グラフ（第 23 図）の第一象限にあたる 14 事例にも同様なことがいえ、総観スケールによる分類ができる。降水がなかった 4 事例は、日本海又は九州の西海上に前線が存在し、西日本は日本の東海上にある高気圧の圏内で暖湿気塊の入りやすい場であったのに対し、降水のあった 10 事例は四国付近に前線が停滞していた。14 事例は、これまで低温な海水が海面付近の暖湿気塊を冷却して発生する霧として結論付けられていたが、山本 (1997) が報告した「粒径が小さく霧粒の数が多いほど視程は低下する」というように降水が寄与している可能性や、前線による暖かい雨が下層の冷氣層で蒸発し、すぐさま凝結して霧になる前線霧の可能性もあり、従来の予測手法の利用には慎重でなければならない。

次に提案した霧予測ワークシートの有効性について確認する。四つの使用前提条件を満たした事例が 3 事例、そのうちの 2 事例（2001 年 2 月 22 日、2005 年 3 月 16 日）が予測可能であり、暫定値とした相対湿度 85% の条件も満たしていることを確認した。予測できなかった事例(2001 年 6 月 19 日)は、日本海に前線が停滞し、太平洋高気圧の後面流によ



第 24 図 坂出火力発電所の地上と各高度 (50m, 100m, 150m, 200m) との気温差の時系列

り西日本は暖湿気塊が流入していた。備讃瀬戸周辺の地上気温が夜間1℃～2℃の低下しかなく前日からやや、煙霧を観測していたのが特徴的である。霧予測ワークシートは、条件⑤に放射冷却により熱を奪われた地面付近の冷たい大気が備讃瀬戸に流れ込むことを加味しており、2001年6月19日の事例のように梅雨時期等の放射冷却の効かない季節は予測できない。したがって、季節を限定し利用する場合に効果が発揮できそうである。

11. 結論

2006年3月11日早朝、瀬戸内海沿岸の広い範囲で発生した霧に関し、部外資料等を用いた事例解析及びNHMを用いた数値実験の結果、備讃瀬戸周辺での霧の発生・消滅の要因として次のことがわかった。

- (1) 夜間放射によって熱を奪われた地上付近の大気が海面上に流れ込み、海面上の暖湿な気塊を冷却した。
- (2) 山風等によって生じた局地循環が海上の湿潤な気塊を上空に持ち上げ断熱冷却による凝結が上空で生じた。

(3) 日射による加熱等で成層が次第に不安定となり濃霧は消散した。

(4) 瀬戸内海の霧発生には、局地循環による水蒸気輸送が寄与し、その水蒸気の源は瀬戸内海にある。瀬戸内海を陸上と仮定した場合と比較して湿度は約10%上昇する。

(5) 解析結果から、霧予測ワークシートを提案した。

謝辞

調査にあたり、沢井哲滋教頭（気象大学校）には多くの御助言をいただきました。衛星画像の解析には、佐々木勝調査官、毛利浩樹技術専門官（気象衛星センター）に御支援いただきました。また、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、東海大学（TSIC/TRIC）からMODISの画像を提供していただきました。この場を借りて、深謝申し上げます。なお、本研究は、依岡ほか（2006）、依岡、牧田（2006）の内容を加筆、修正したものである。

第4表 霧予測ワークシートの条件と過去事例の対比

	停船勧告	①前日までの降雨	②備讃瀬戸の水蒸気存在	③総観場の風が弱い	④明朝にかけ高気圧に覆われる	⑤冷たい山風が瀬戸内海に流れ込む	⑥備讃瀬戸周辺で湿度が85%以上	⑦地上気温が瀬戸大橋の気温より低い	霧発生時の降水	視程低下開始時刻
2001/2/22*	有	○	○	○	○	○	前日 21時 89%	-	×	08時頃
2001/5/21	有	×	○	○	○	×	03時 84%	-	×	07時頃
2001/6/18	有	×	○	○	○	×	03時 84%	-	×	08時頃
2001/6/19	有	○	○	○	○	×	01時 91%	-	×	05時頃
2001/6/25	有	○	○	○	○	×	21時 85%	-	×	03時頃
2005/3/16*	有	○	○	○	○	○	21時 83%	-	×	06時頃
2006/6/27	有	○	○	○	×	×	21時 90%	○	×	04時頃
2006/7/8	有	○	○	○	×	×	21時 85%	○	×	04時頃
2001/2/6*	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2001/2/24	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2001/2/28	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2001/3/4	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2001/3/17*	無	×	○	○	×	×	○	-	○	
2001/3/25	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2001/3/26	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2001/5/2*	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2001/5/8	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2001/5/24	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2001/5/30*	無	○	○	×	×	×	○	-	○	
2001/6/6	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2001/6/14*	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2001/6/23*	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2001/6/24	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2001/7/6	無	○	○	○	×	×	○	-	○	
2006/7/4	無	○	○	×	×	×	21時 85%	○	○	02時頃
2006/7/18	無	○	○	×	×	×	21時 85%	○	○	06時頃

日付の*は、海水温が気温及び露点温度よりも高かった事例

参考文献

- 大江健夫 (1976) : 昭和 51 年春先きからの備讃瀬戸を中心とした濃霧について. 大阪技術情報, 21, 49-50 欄間
- 気象庁予報部 (2003) : 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告別冊, 49
- 黒岩大助, 大喜多敏一 (1959) : 最近の霧の研究とその展望. 気象研究ノート, 10, 247-294
- 沢井哲滋 (1982) : 霧の理解のために. 天気, 29, 731-746
- 高松地方気象台 (1986) : 備讃瀬戸の「晴霧」観測. 研究時報, 38, 273-283
- 福原正明 (2001) : 海水温度を用いた濃霧の予測. 大阪管区気象台香川県気象研究会
- 山本哲 (1997) : 霧よもやま話. 気象, 41 巻 8 号, 4-8
- 吉川郁夫 (1988) : 備讃瀬戸の晴れ霧. 研究時報, 40, 215-228
- 依岡幸広, 牧田広道, 佐々木勝, 毛利浩樹 (2006) : 2006 年 3 月 11 日の瀬戸内海を中心とした濃霧の実況解析. 日本気象学会関西支部例会
- 依岡幸広, 牧田広道 (2006) : 2006 年 3 月 11 日の瀬戸内海を中心とした濃霧のモデルシミュレーション. 日本気象学会関西支部例会