

— 3. 平成 23 年度第 2 回支部研究発表会要旨 —

日 時：平成 23 年 12 月 13 日（火）13 時 00 分～

14 日（水）11 時 30 分

場 所：札幌管区气象台 大会議室

1 領域気象モデル WRF を用いた温暖化による北海道道央周辺の降水特性の予測 ……9

北海道大学大学院工学研究院 鈴木 英一

株式会社雪研スノーイーターズ 西田 浩平

株式会社雪研スノーイーターズ 齋藤 佳彦

2 低次元系における確率微分方程式による中高緯度冬季の長周期変動の力学と
予測可能性(1) ……11

北大院理 稲津 將

北大院理 中野 直人

京大防災研 向川 均

3 中緯度と極域での観察に基づいた新しい雪結晶分類(グローバル分類)の提案(2) ……13

雪結晶の新しい分類表を作る会メンバー

北海道大学名誉教授 菊地 勝弘

北見工大 亀田 貴雄

名古屋大学名誉教授 樋口 敬二

大阪教育大学名誉教授 山下 晃

領域気象モデル WRF を用いた

温暖化による北海道道央周辺の降水特性の予測

鈴木 英一（北海道大学大学院工学研究院）

西田 浩平（株式会社雪研スノーイーターズ）

齋藤 佳彦（株式会社雪研スノーイーターズ）

植松 孝彦（株式会社雪研スノーイーターズ）

1. はじめに

気象庁による約 100 年後の日本周辺の気候予測¹⁾によると、北海道では、7 月の降水量が道東の一部を除いて増加し、日降水量 50mm 以上の年間日数もほとんどの地域で増加することが予測されている。

一方、2010 年 8 月 23～24 日には湿った空気が北海道に流入し、線状の降水域が形成され狭い地域に集中して 1 時間降水量 50mm を超える雨が降った結果、道路の陥没に乗用車 3 台が転落し 3 名が死傷した他、住宅の浸水、道路 18 路線が通行止めになる大災害が発生した²⁾。北海道では、このような集中した降水はあまり例がなく、温暖化に伴い増加が懸念される。

そこで RCM20 を入力とした領域気象モデル WRF により北海道付近の数値シミュレーションを行い、空間的・時間的に細かい降水量を予測し（ダウンスケーリング）、温暖化時の北海道道央周辺における降水特性の変化を考察する。

2. 領域気象モデル WRF によるダウンスケーリング

(1) 使用したデータ

使用したデータは、IPCC の温室効果ガスシナリオのうち A2 シナリオ（経済重視で地域志向が強まると仮定したシナリオ）に基づいて、日本付近の通年の気候変化を予測計算した RCM20 の出力データである。使用したデータ内容を表 1 に示す。

RCM20 では過去の気候の再現実験（以下、過去）と、将来の気候の予測実験（以下、将来）が実施されており、温暖化の評価では将来から過去の結果を差し引くなど相対比較での使用が推奨されている¹⁾。そこで、過去と将来の RCM20 を入力とした計算結果を比較し、将来の温暖化による降水特性を予測した。

(2) 計算の対象事例の設定

降水特性を明らかにするためには RCM20 の全期間

表 1 使用した RCM20 の諸元

項目	内容
メッシュ数	182 個（東西 13 × 南北 14）
水平解像度	20km
要素	日降水量※、海面気圧、風向・風速、気温、湿度、ジオポテンシャル高度 ※計算の対象事例の設定のみで使用
期間	過去 20 年（1981～2000 年） 将来 20 年（2081～2100 年）

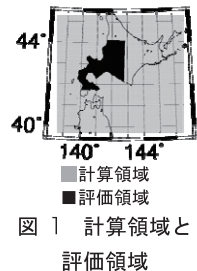


図 1 計算領域と評価領域

の計算を行う事が理想であるが、現実的ではない。そこで、計算の対象事例を 8 事例（過去、将来各 4 事例）設定した。

設定方法は、道央付近（図 1 の評価領域）の日降水量が 2010 年 8 月 24 日の災害時（以降、災害時と表記）と同規模の事例を抽出した。

ただし、過去と将来で降水分布が全く異なる事例は、気象条件が大きく異なり降水特性の違いを比較することが困難だと考えられる。そこで、降水量が同規模の事例のうち、降水分布が過去と将来で類似した事例を抽出し、計算対象として設定した。

(3) 領域気象モデル WRF による力学的ダウンスケーリング

RCM20 より時間・空間的に細かい降水特性を明らかにするため、RCM20 を入力とした WRF 計算による力学的ダウンスケーリング⁴⁾を実施した。計算領域を図 1、WRF の設定概要を表 2 に示す。

表 2 ダウンスケーリングでの WRF の設定概要

項目	設定内容
計算時間	48 時間（計算対象前日 12 時～計算対象翌日 12 時）
格子	2km
格子数	東西 321 × 南北 301
mp_physics	WRF Single-Moment 6-class scheme

3. 結果・考察

ダウンスケーリングにより 2km メッシュの降水分布を得た。図 2 に 1 例を示す。以降では図 1 に示した評価領域について整理した。

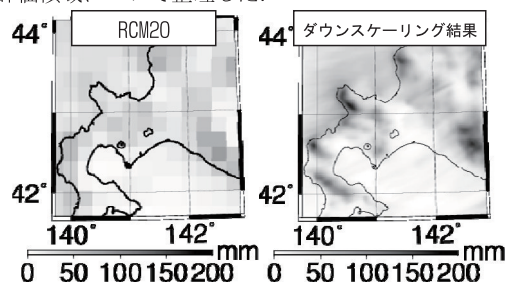


図 2 RCM20 とダウンスケーリング結果の日降水量 (1984 年 5 月 26 日)

(1) WRF と RCM20 における日降水量の比較

領域平均した WRF による日降水量は RCM20 の 50 ~144% となった。4 事例を平均すると、過去 29.1mm, 将来 27.9mm であり、同規模の降水だと言える。以降では過去と将来の 4 事例をまとめて比較した。

(2) 将来の降水強度の増加

降水強度別の出現回数について、過去と将来を比較する目的で、図 3 に示す降水強度の超過頻度を整理した。なお、使用したデータの総数は領域の 7788 メッシュに 96 時間 (4 事例, 24 時間/事例) を乗じた 747648 データである。

降水強度 10mm/h 以上では、過去 1.00%, 将来 0.87% と将来が 0.13% (747648 データ中 992 データ) 減少した。降水強度 20mm/h 以上では過去 0.06%, 将来 0.10% と 0.04% (747648 データ中 286 データ) 増加した。

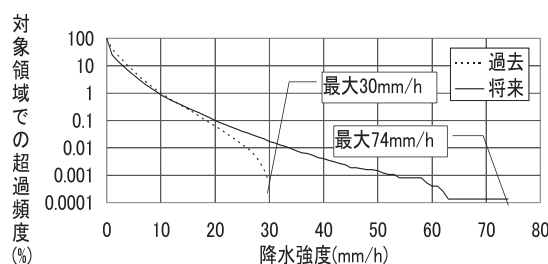


図 3 降水強度の超過頻度 (評価領域)

(3) 将来の降水強度 20mm/h 以上が出現する面積の増加

降水強度 20mm/h が現れた位置を図 4 に整理した。面積は過去 1548km², 将来 2248km² であり、将来は過去の約 1.5 倍に増加した。将来、広い範囲で強い降水が生じることを示している。

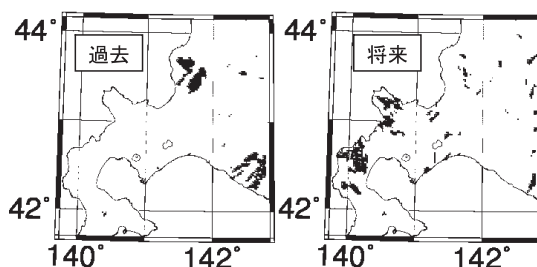


図 4 降水強度 20mm/h 以上の降水の出現した位置

(4) 考察

入力した評価領域の RCM20 を整理することにより、降水特性の変化について考察した。

比湿は、過去 9.8g/kg, 将来 11.0g/kg であり、将来は水蒸気量が増加している。気温は過去 287.2K, 将来 289.6K であり、過去に比べ将来は高くなっている。

このことから、将来は気温が大きく、大気中の水蒸気量が増加したと考えられる。そのため、潜熱エネルギーが増加し、積乱雲などによる対流性降水が生じやすい条件となったと考えられる。

4. まとめ

過去 20 年間と温暖化した将来 20 年間の気候を予測した RCM20 のうち、日降水量が 2010 年 8 月 24 日に北海道で発生した災害と同規模の 8 事例 (過去 4 事例, 将来 4 事例) を入力とし、北海道周辺について WRF による計算を行い、空間的に 2km メッシュ、時間的に 1 時間ごとにダウンスケールした降水量を得た。

ダウンスケールした降水量より、北海道道央周辺の過去と将来を比較し、将来の降水特性を評価した。その結果、将来では降水強度 20mm/h 以上の発生回数、面積とも増加する事が示された。

気温が高く、大気中の水蒸気量が大きいため、対流性降水が生じやすい条件となったと考えられる。

本研究は特定の事例について解析したものであり RCM20 の全期間について一般化されるものではない。今後はより多くの事例を計算し、検証を進めたい。

参考文献

- 1) 気象庁：地球温暖化予測情報 第6巻，2005。
- 2) 札幌管区気象台：平成22年8月23日～24日 大雨に関する気象速報，2010。
- 3) 文部科学省研究開発局：超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究，2008。
- 4) 高藤 出，金光正朗：力学的ダウンスケーリングのレビュー，天気，57(7)，pp435-477，2010。

低次元系における確率微分方程式による中高緯度冬季の長周期変動の力学と予測可能性 (1)

稲津 将・中野直人 (北大院理)・向川 均(京大防災研)

1. 目的

本研究の目的は、確率微分方程式を季節予測可能性と結びつける理論を構築し、解析・予報データを使って検証することである。まず、気象庁再解析データ(Onogi et al. 2007)を使って、対流圏中緯度、北半球冬季の長周期変動の2つの主成分を基底とする位相空間(Kimoto and Ghil 1993)を張り、その位相空間上に、現業の1か月予報の予報スプレッドを射影する。このような試みは、サンプル数が少ないこともあって、これまで行われることはなかった。本研究ではそのようなデータ寡少の欠を、確率微分方程式を使った予報・解析データ間のつながりに関する理論により補完する。構築した新理論の有効性は、決定論的に広がるべきスプレッドと確率論的に広がるべきスプレッドの両者を、現業における予測スプレッドを比較することにより確かめられる。

2. 理論

低次元系における大気の振る舞いを伊藤の意味での確率微分方程式

$$dx_i = A_i(\mathbf{x})dt + S_{ij}(\mathbf{x})dW_j, \quad (1)$$

で表せたとする。ただし、 $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ は状態ベクトル、 $A_i(\mathbf{x})$ はドリフトベクトル、 $S_{ij}(\mathbf{x})$ は乗法的ノイズの係数テンソル、お

よび dW_j は各成分が独立なウィナー過程を表す。式(1)より、低次元系における大気確率密度関数 $P(\mathbf{x}, t)$ の時間発展方程式であるフォッカー＝プランク方程式

$$\partial_t P = -\partial_i(A_i P) + \partial_{ij}(B_{ij} P), \quad (2)$$

を導くことができる。一方、ドリフトベ

クトル A_i や拡散テンソル B_{ij} は

$$A_i \cong \left\langle \frac{\Delta x_i}{\Delta t} \right\rangle, \quad (3)$$

および

$$B_{ij} \cong \left\langle \frac{\Delta x_i \Delta x_j}{\Delta t} \right\rangle, \quad (4)$$

と、状態ベクトルの時系列データより経験的に求めることができる(Penland and Matrosova 1998)。ただし、 $\langle \cdot \rangle$ はアンサンブル平均を表す。

従来型の予報誤差成長理論は、力学系に内在する性質に従って初期誤差が拡大するという原理に基づいている。式(1)から乗法的ノイズを除いた決定論的方程式を、ある大気状態まわりに線形化した接線型方程式

$$\frac{dy_i}{dt} = J_{ij} y_j, \quad (5)$$

を用いる。ただし、 J_{ij} はドリフトベクトルのヤコビアンである。式(3)よりドリフトベクトルを計算できるため、時系列データが与えられれば、アンサンブル平均の意味で誤差行列を

$$\mathbf{M}(t, 0) \cong \exp(t\mathbf{J}) \cong \mathbf{I} + t\mathbf{J}, \quad (6)$$

と近似的に求めることができる。したがって、初期誤差 ε をとしたとき、有限時間後のスプレッドは

$$E_D = \varepsilon \|\mathbf{M}(t, 0)\|, \quad (7)$$

と見積もることができる。また、誤差の広がる方向は誤差行列の特異値解析によって評価する。

しかしながら、低次元系で大気の振る舞いを考えるとき、容易に想像できるように、ドリフトベクトルを有意に決定で

きるとは限らない。非決定論的な系では、ドリフトベクトルのアンサンブル平均のノルムは、ドリフトベクトルのノルムのアンサンブル平均より極端に小さくなる。よって、式(3)と式(6)を組み合わせた見積もりでは、誤差成長は過小評価になることが予想される。そこで本研究では、低次元系における大気の振る舞いに式(1)のような場に応じた大きさのノイズが課せられており、ノイズによるばらつきこそが誤差の拡がりに対応すると考えた。つまり、この新理論では初期誤差がなくとも確率的に拡散されることで大気状態にばらつきができると考える。初期にばらつき ε があった場合、位相空間内で $\mathbf{B}$ が局所的に定数であると仮定すると、有限時間後のスプレッドは

$$E_S = \sqrt{\varepsilon^2 + 2\|\mathbf{B}\|t}, \quad (8)$$

と見積もることができる。また、ばらつきの拡がる方向は、拡散テンソルの固有値解析によって評価する。

3. 結果

図 1a は気象庁 1 か月予報の 500 hPa 等圧面高度の予報 10 日目における 2 次元基底の線形結合で表現されるスプレッド

のうち誤差が最大成長した方向への射影である。2001/02～2009/10 冬季に 216 回の 1 か月予報しかないので、位相空間の原点付近でも数個程度しかないことに注意せよ。位相空間への射影より、予測可能性は第 2 象限で高く、第 4 象限で低いという結果を得た。両象限間のスプレッドの差は 20%を超える。

図 1b,c は、初期誤差のスプレッドは $\varepsilon \sim 0.12$ 程度であること(図略)を利用した理論的に推測される決定論的なスプレッドと確率論的なスプレッドである。決定論的なスプレッド(図 1b)は明らかに 10 日予報スプレッド(図 1a)とは異なる。スプレッドが、原点付近で小さく原点から遠くで大きいほかは、偏角依存性の小さな分布である。また、決定論的なスプレッドは現業における予測スプレッドに比べて随分小さい。他方、確率論的なスプレッド(図 1c)は、現業予測スプレッドと比較して、第 1 象限の一部を除き非常に良い一致をしている。拡散テンソルノルムの極大は第 3 象限と第 4 象限にあり、極小は第 1 象限から第 2 象限に広がる。拡散テンソルの優固有ベクトルは第 2 象限を除き、概ね第 2 主成分の方向を向いている(次編に続く)。

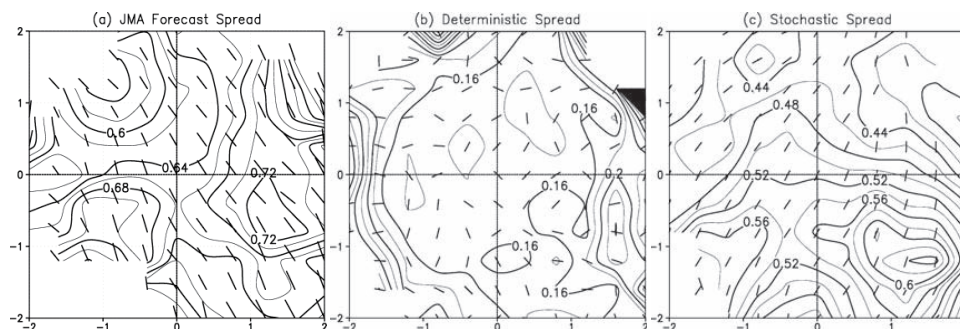


図 1 : (a) 気象庁 1 か月アンサンブル予報の予報 10 日目におけるスプレッドのうち、2 次元基底で表現される成分の最大成長ノルムと最大成長の方向。等値線間隔は 0.02。値は 0.4×0.4 のビンに含まれる量をアンサンブル平均し、 3×3 の平滑化を行った。(b) 気象庁再解析データより式(7)を使って統計的に求めた予報 10 日目の決定論的予測スプレッド。線分は誤差行列の第一特異ベクトル。(c) 式(8)を使って統計的に求めた予報 10 日目の確率論的予測スプレッド。線分は拡散テンソルの第一固有ベクトル。

中緯度と極域での観察に基づいた新しい雪結晶分類（グローバル分類）の提案（2）

○ 菊地勝弘（北海道大学名誉教授），亀田貴雄（北見工大），樋口敬二（名古屋大学名誉教授），
山下 晃（大阪教育大学名誉教授），雪結晶の新しい分類表を作る会メンバー*

1. はじめに

前回の報告（菊地ら，2010）では，気象学的分類（Magono & Lee, 1966；以下 ML と略記）をベースにして，その後の極域を主として報告されてきた結晶を含めた新しい分類を提案し紹介した。それから1年を経過し，今回は，その後に検討を進めた【CP：柱状・板状結晶群】の「CP6：骸晶状結晶」から「CP9：鴈状結晶」とともに，前報では考慮されていなかった【H：その他の固体降水群】を中心として報告する。

2. 新しい分類の特徴

今回提案する分類には次のような特徴がある。大分類を○○結晶群，中分類を△△状結晶として出来るだけ統一し，小分類で使われていた・・組合せ，・・形，・・型，・・状，無垢・・，普通・・といった名称を出来るだけ整合性を持たせて統一させた。新しい分類の主なる点は次のようである。

- 1) 【C：柱状結晶】—MLのN：針状結晶の2中分類、8小分類と、C：角柱状結晶の2中分類、11小分類の計19小分類を整理統合して4中分類、15小分類にした。
- 2) 【P：板状結晶群】—MLのP：板状結晶の7中分類、24小分類を8中分類、29小分類に再編した。特にMLのP1：正規六花の小分類P1a：角板からP1f：羊歯状六花を「P1：角板状結晶」、「P2：扇状結晶」、「P3：樹枝状結晶」と中分類に格上げした。また、MLのP3：不規則六花、P4：十二花を「P5：分離・多重六花状結晶」として統合した。さらに、MLのP5：畸形を「P8：非対称板状結晶」と改称した。
- 3) 【CP：柱状・板状結晶群】—MLのCP：角柱・板状組合せの3中分類、9小分類とS：側面結晶の3中分類の計6中分類、9小分類を、新たに「CP1：鼓状結晶」から「CP9：鴈状結晶」の9中分類、41小分類に統合し再編した。低温型雪結晶などと総称される結晶の大部分はこの結晶群に属する。
- 4) 【A：付着・併合結晶群】—MLの中分類、N2a：針組合せ、N2b：鞘組合せ、N2c：針状角柱組合

せ、などは単なる結晶同士の付着・併合であることから、【C：柱状結晶群】に限らず【P：板状結晶群】、【CP：柱状・板状結晶群】にも対応させ、「A1：柱状結晶の併合」、「A2：板状結晶の併合」、「A3：柱状・板状結晶の併合」の3中分類、3小分類とした新たな【A：付着・併合結晶群】を加えた。

5) 【R：雲粒付結晶群】—MLのR：雲粒付結晶は4中分類、13小分類を内容はそのまま踏襲し、整合性を考慮して4中分類、14小分類とした。

6) 【G：初期結晶群】—MLのG：初期結晶は6中分類だけであるが、それぞれの結晶は小分類に相当すると思われるので、全面的に見直し4中分類、10小分類にした。

7) 【I：不定形群】—MLのI：不定形の4中分類からI4を削除して、3中分類、3小分類にした。

8) 【H：その他の固体降水群】—中谷やMLの分類では考慮されていないが、実用分類で採用されている「H2：霰」、「H3：凍雨」、「H4：雹」などに「H1：凍結降水」を加えた4中分類、6小分類を新たに大分類として加えた。

以上のように新分類は表1のように、8大分類、39中分類、121小分類から構成されている。今後はこの分類を「グローバル・スケール分類」略して「グローバル分類」と呼ぶことにする。

* 樋口敬二会長，菊地勝弘副会長，山下 晃副会長，亀田貴雄幹事長，油川英明，石坂雅昭，上田 博，梶川正弘，神田健三，小西啓之，権田武彦，佐藤 昇，高橋修平，高橋忠司，平沢尚彦，藤野丈志，村井昭夫，和田 誠

表 1 雪結晶のグローバル分類

大分類	中分類	小分類	大分類	中分類	小分類
C 柱状結晶群	1. 針状結晶	a. 針 b. 束状針 c. 針集合	A 付着・併合結晶群	1. 柱状結晶の併合	a. 角柱・柱状結晶等の併合
	2. 鞘状結晶	a. 鞘 b. 束状鞘 c. 鞘集合		2. 板状結晶の併合	a. 角板・樹枝状等の併合
	3. 角柱状結晶	a. 角柱 b. 骸晶角柱 c. 巻込骸晶角柱 d. 細長角柱 e. 角柱集合		3. 柱状・板状結晶の併合	a. 柱状・板状・交差角板等の併合
	4. 砲彈状結晶	a. 角錐 b. 砲彈 c. 骸晶砲彈 d. 砲彈集合	R 霰粒付結晶群	1. 霰粒付結晶	a. 霰粒付柱状 b. 霰粒付角板 c. 霰粒付六花 d. 霰粒付立体
P 板状結晶群	1. 角板状結晶	a. 角板 b. 厚角板 c. 骸晶角板		2. 濃密霰粒付結晶	a. 濃密霰粒付柱状 b. 濃密霰粒付角板 c. 濃密霰粒付六花 d. 濃密霰粒付立体
	2. 扇状結晶	a. 扇六花 b. 広幅六花		3. 霰状雪	a. 六花霰状雪 b. 塊霰状雪 c. 枝付霰状雪
	3. 樹枝状結晶	a. 星六花 b. 樹枝六花 c. 羊歯六花		4. 霰	a. 六花霰 b. 塊霰 c. 紡錘霰
	4. 複合板状結晶	a. 角板付六花 b. 層付六花 c. 角板付樹枝 d. 層付樹枝 e. 枝付角板 f. 層付角板 g. 樹枝付角板	G 初期結晶群	1. 柱状水晶	a. 角柱水晶 b. 扁平角柱水晶
	5. 分離・多重六花状結晶	a. 二花 b. 三花 c. 四花 d. 十二花 e. 十八花 f. 二十四花		2. 板状水晶	a. 角板水晶 b. 非六角板水晶 c. 六花水晶
	6. 立体状結晶	a. 立体層付角板 b. 立体樹枝付角板 c. 立体層付樹枝 d. 立体樹枝付樹枝		3. 多面体水晶	a. 十四面体水晶 b. 二十面体水晶
	7. 放射状結晶	a. 放射角板 b. 放射樹枝	I 不定形群	4. 多結晶水晶	a. 角板水晶集合 b. 複雑交差角板水晶 c. 不規則水晶
	8. 非对称板状結晶	a. 非对称板状 b. 複雜多重角板		1. 氷粒	a. 氷粒
CP 柱状・板状結晶群	1. 鼓状結晶	a. 角板鼓 b. 樹枝鼓 c. 多重鼓	H その他の固体降水群	2. 霰粒付雪粒	a. 霰粒付雪粒
	2. 砲彈・板状結晶	a. 角板付砲彈 b. 樹枝付砲彈 c. 角板付砲彈集合 d. 樹枝付砲彈集合		3. 結晶破片	a. 結晶破片
	3. 柱状・板状結晶	a. 針付六花 b. 角柱付六花 c. 巻込骸晶付六花 d. 針付角板 e. 角柱付角板 f. 巻込骸晶付角板		1. 凍結降水	a. 凍結霰粒 b. 連鎖凍結霰粒 c. 凍結小雨滴
	4. 交差角板状結晶	a. 交差角板 b. 連鎖交差角板 c. 放射交差角板		2. 霰	a. 霰
	5. 柱状・板状の不規則結晶	a. 角柱・砲彈・交差角板の不規則結晶		3. 凍雨	a. 凍雨
	6. 骸晶状結晶	a. 骸晶四角形 b. 多結晶骸晶四角形 c. 多重骸晶四角形 d. 複雑骸晶多角形 e. 骸晶角柱・交差角板 f. 骸晶砲彈・四角形 g. 多角形骸晶集合 h. 複雑柱面構造		4. 霜	a. 霜
	7. 御幣状結晶	a. 御幣 b. 砲彈付御幣 c. 交差角板付御幣 d. 角柱御幣 e. 对称御幣 f. 永柱御幣 g. 多重菱形御幣			
	8. 矛先状結晶	a. 矛先 b. 砲彈集合付矛先 c. 交差角板付矛先 d. 多重矛先			
	9. 隨状結晶	a. 内側角板付隨 b. 外側角板付隨 c. 両側角板付隨 d. 内側隨面付隨 e. 外側隨面付隨			