日本雪氷学会誌 雪 氷
74巻3号（2012年5月）223－241頁

解説・総説

中緯度と極域での観測に基づいた新しい雪結晶の分類 ―グローバル分類―

菊地勝弘[1]，亀田貴雄[2]，樋口敬二[3]，山下　晃[4]，
雪結晶の新しい分類表を作る会メンバー*

要　旨

雪結晶の分類は，Magono and Lee（1966）の気象学的分類（以下MLと略記）が用いられることが多いが，この分類を基本として極域での観測結果を加え，新たに雪結晶のグローバル・スケール分類（略してグローバル分類）を提唱する．この分類は，MLに準じて，雪結晶の特徴的な形状および成長の型による相違に着目して作成した．MLと比較すると，グローバル分類は以下のような特徴がある．MLのN: 針状結晶とC: 角柱状結晶を統合して新分類では『C: 柱状結晶群』とした．また，MLのP: 板状結晶のP1: 正規六花やP2: 変遷六花などを『P: 板状結晶群』として，【P1: 角板状結晶】，【P2: 扇状結晶】などのように，具体的な結晶形がイメージできるように整合性を持たせて整理・統合した．さらに，MLのCP: 角柱・板状組合せとS: 側面結晶を統合して『CP: 柱状・板状結晶群』とした．MLのN2: 針状結晶組合せやC2: 角柱組合せなどのほか，P: 板状結晶やCP: 角柱・板状組合せなど，結晶同士の付着・併合したものを，まとめて新たに『A: 付着・併合結晶群』として加えた．これまで中谷やMLの分類では対象外であったが，国際雪氷委員会が制定した実用分類（Schaefer, 1951; Mason, 1957; 1971）には含まれている霙，凍雨，雹に凍結雲粒などを加えて，新たに『H: その他の固体降水群』として加えた．その他の大分類の『R: 雲粒付結晶群』，『G: 初期結晶群』，『I: 不定形群』などは一部名称の変更や，全体の整合性を考慮して，大筋では従来の分類を踏襲した．MLの気象学的分類は8大分類，31中分類，81小分類であったが，グローバル分類は8大分類，39中分類，121小分類となった．

キーワード：雪結晶，分類，グローバル・スケール分類，グローバル分類
Key words: snow crystals, classification, Global-Scale Classification, Global Classification

1 北海道大学名誉教授・秋田県立大学名誉教授
〒004-0014 北海道札幌市厚別区もみじ台北2-5-4
2 北見工業大学社会環境工学科
〒090-8507 北海道北見市公園町165番地
3 名古屋大学名誉教授
〒470-0154 愛知県東郷町和合ヶ丘1-12-4
4 大阪教育大学名誉教授
〒665-0035 兵庫県宝塚市逆瀬川1丁目11-1-813
* 雪結晶の新しい分類表を作る会メンバー
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

1. はじめに

従来の雪結晶の分類は中谷による一般分類（中谷，1938; 1949; Nakaya, 1954），国際雪氷委員会の実用分類（Schaefer, 1951; Mason, 1957; 1971），Magono and Lee（1966）（以後MLと略記）による気象学的分類があり，現在では主としてMLが使われることが多い．これらの分類では，主として中緯度帯での観測に基づくことに注意する必要がある．例えば，中谷は厳冬期のサハリン（旧南樺太）で中田金市が撮影した畸形の写真を紹介しており（中谷，1949; Nakaya, 1954; 菊地，2001），MLは南極氷床上で観測されたLong prism

（Shimizu, 1963）を「針状角柱」として組み入れている．

一方，北極域の雪結晶としては，シベリアでの観測をもとに，Заморский（1955）がその著書『Атмосферный Лед（大気中の氷）』で，またклинов（1960）は『Вода в Атмосфере при Низких Температурах（氷点下における大気中の水）』の中で，－30℃ 以下の低温下で見られる数多くの結晶を紹介しているが，統一的に分類するという形ではまとめていない．

中谷が『雪』（1938）の中で分類を示してから 74 年，ハーバード大学から『Snow Crystals—natural and artificial—』（1954）を出版してからも 58 年，更に ML の分類が発表されてからも 46 年が経過した．その後は日本南極地域観測隊による雲物理学分野の越冬観測（菊地，1970），加えて，新たに人工雪生成のための好都合な小型で温度・湿度を制御し易い拡散型の低温実験箱も開発され（例えば小林，1957），低温下の雪結晶も容易に成長させることが出来るようになった．南極昭和基地で発見された当時の低温型雪結晶に限って，暫定的に名前を付け，分類する試みがなされたが（菊地，1974），残念ながら広く普及するには至らなかった．

このような現状にあって，南極や北極域で観測され，人工的にも容易に成長させることが出来る「低温型雪結晶」に正規の和名，英語名が十分検討されておらず，さらにそれらを含めた雪結晶の分類がないのは大きな課題であった．最近では，Bailey and Hallett（2004）が－20℃～－70℃ で成長する氷晶の成長速度と晶癖を多くの観測データを引用して比較検討をし，更に温度，氷飽和蒸気圧の実験データと観測データから氷晶の Habit Diagram の確証を得るための研究を精力的に行っているが（Bailey and Hallett, 2009），低温領域の結晶形を含めた分類などは行っていない．また，アメリカなどによる上層雲の航空機観測やアラスカでの Ice Fog などの観測もあるが，観測された雪結晶や氷晶を統一的に分類したものはなく，最近出版された雪結晶の啓蒙書（Libbrecht, 2006）でも ML の気象学的分類を引用している．

我々は 2009 年の雪氷学会全国大会で実施した企画セッションを契機として「雪結晶の新しい分類表」の検討を開始し，その成果は 2010 年および 2011 年の雪氷研究大会で発表した（菊地ら，2010; 2011）．また，概要は 1600 枚の顕微鏡写真とともに雪結晶のグローバル分類（菊地・梶川，2011）として公表した．本解説では実際の雪結晶の分類時に役立つことを念頭に置いて，このグローバル分類をさらに詳しく記述した．なお，今回の分類では，主として観測によって得られた雪結晶や氷晶を対象とし，人工雪については参考とした．実際に分類の対象になった主な観測地点は表 1 に示されるように，国内では北海道，秋田県，石川県を含み，国外では，北半球はカナダ・アラスカ北極域（Magono, 1978; Higuchi *et al.* 1981; Kikuchi, 1987, 1989），スカンジナビア北極域（Kikuchi and Asuma, 1999, 菊地, 2006a），グリーンランド（Kikuchi and Uyeda, 1992），スバルバール諸島など，北アメリカおよび北ヨーロッパの国々，また南半球では南極昭和基地（Kikuchi, 1969; 1970），南極ドームふじ基地（Kameda *et al.*, 2007），南極マクマード基地，南極点基地（Kikuchi and Hogan, 1976; 1979）など，中緯度域から極域を含んだ地域である．そのため，新しい雪結晶の分類をグローバル・スケール分類（Global-Scale Classification，略してグローバル分

表 1 雪結晶の主な観測地点．

国内の主な観測地点

番号	観測地点	観測施設
1	北海道札幌市手稲区	北海道大学手稲山雲物理観測所
2	北海道石狩市横町	北海道開発局石狩波浪観測所
3	北海道上川郡東川町勇駒別	北海道教育大学大雪山自然教育研究施設
4	秋田県鹿角市	八幡平スキー場
5	石川県かほく市	石川県砂丘地農業試験場

国外の主な観測地点（北半球）

番号	観測地点	緯度，経度
6	Science Research Center, Inuvik, Canada	67°22′N, 133°42′W
7	Yellowknife Airport, Yellowknife, Canada	62°28′N, 114°27′W
8	Barrow, Alaska, USA	71°18′N, 156°44′W
9	Peters Lake, Alaska, USA	69°N, 145°W
10	Alta River Camping Site, Alta, Norway	69°56′N, 23°16′E
11	Kautokeino, Norway	69°01′N, 23°03′E
12	Ny-Alsund, Svalbard, Norway	78°55′N, 11°56′E
13	Longyearbyen, Svalbard, Norway	78°13′N, 15°38′E
14	Space Physics Institute, Kiruna, Sweden	68°56′N, 21°04′E
15	Arctic Research Center, Sodankyla, Finland	67°22′N, 26°38′E
16	Arctic Station, Godhavn, Greenland	69°15′N, 53°34′W
17	Godthab, Greenland	64°10′N, 51°45′W

国外の主な観測地点（南半球）

番号	観測地点	緯度，経度
18	Syowa Station, Antarctica	68° 00′ S, 39° 35′ E
19	Dome Fuji Station, Antarctica	77° 19′ S, 39° 42′ E
20	McMurdo Station, Antarctica	77° 51′ S, 166° 40′ E
21	Amundsen–Scott South Pole Station, Antarctica	90° 00′ S

類：Global Classification）と命名し，中谷や ML と同様に基本的には雪結晶の特徴的な形状および成長の型による相違に着目して分類を行った．

2.　グローバル分類の特徴

本章では，グローバル分類を ML の気象学的分類と比較しながら，それらの主な相違点を結晶群ごとに紹介する．本分類では大分類を『～結晶群（～crystal group）』，中分類を【～状結晶（～type crystal）】と呼称して統一し，ML で小分類に使われていた～組合せ，～形，～型，～状，無垢～，普通～などの名称を出来るだけ使用せずに，整合性を取った．ただし，実際に小分類名を使う時に，この名称が雪結晶を表すことを明示する場合には，小分類名に「型」または「型結晶」を付けて示しても良い．英文の場合には，小分類名に（～shape）を付けて示しても良いものとする．

分類表は表 2 に，結晶形の名称の和英対照表は表 3 に，また分類された代表的な雪結晶の顕微鏡写真は図 1–1 から図 1–3 を参照されたい．

2. 1　C: 柱状結晶群（Column crystal group）

この結晶群の C は中谷による Columnar crystal の C を使い，4 中分類にした．ML の N: 針状結晶と C: 角柱状結晶を統合し，新たに『C: 柱状結晶群』とした．柱状成長の針状と角柱状は成長様式も同じなので分類上の整合性をとった．

【C1: 針状結晶】（Needle-type crystal または Needle type のように crystal を付けなくても良い．以下同様）：ML の中分類での N1: 単なる針を C1: 針状結晶とし，N1a: 単針を針と変え，「C1a: 針」，「C1b: 束状針」とし，新たに「C1c: 針集合」を加えた．この結晶の平均的なサイズは（以下，柱状結晶群や柱状・板状結晶群の柱面が成長したものは長さを，板状結晶群や立体的に成長した結晶はその外接円の直径を表す）2 mm.

【C2: 鞘状結晶】（Sheath- type crystal）：ML の N1c: 単鞘を「C2a: 鞘」，N1d : 束状鞘を「C2b: 束状鞘」に，新たに「C2c: 鞘集合」を加えて中分類とした．ML の N2a，N2b，N2c は結晶の付着・併合（雪片）を表しているので，新分類では『A: 付着・併合結晶群』（後述）として新たに大分類を設けた．平均的なサイズは C1 よりやや長め．

【C3: 角柱状結晶】（Column- type crystal）：ML の C1: 単なる角柱と C2: 角柱組合せを削除し，新分類では「C3a: 角柱」，「C3b: 骸晶角柱」，「C3c: 巻込骸晶角柱」，「C3d: 細長角柱」，「C3e: 角柱集合」を設けて 5 小分類にした．「C3d: 細長角柱」は ML の N1e: 針状角柱のことで，この結晶は Shimizu（1963）がアメリカの南極バード基地で観測したものである．「C2a: 鞘」との違いはその軸比（c/a）が～50 にも達し，中身が完全に詰まったバルクの結晶である．その後，Kobayashi（1965）によって人工的に再現され，一種のひげ結晶であろうと推察された．C3a の平均的なサイズは数百 μm，C3b，C3c は 0.5 mm 位，C3e は 1 mm，C3d は 1 mm を超える．

【C4: 砲弾状結晶】（Bullet-type crystal）：新分類の C3 に準じて，「C4a: 角錐」，「C4b: 砲弾」，「C4c: 骸晶砲弾」，「C4d: 砲弾集合」とし，ML の C1，C2 を整理した．ML の N: 針状結晶，C: 角柱状結晶の 2 大分類，4 中分類，19 小分類は，新分類では 1 大分類，4 中分類，15 小分類と，大分類と小分類数は減った．C4a の平均的なサイズは 0.1 mm，C4b，C4c，は 0.5 mm，C4d は 1 mm.

以上のように，『C: 柱状結晶群』は，ML の大分類 N の 2 中分類と，C の 2 中分類を合わせて 19 小分類を整理，統合して新しい『C: 柱状結晶群』として C1 から C4 の 4 中分類とし，C1a から C4d の 15 小分類とした．

2. 2　P: 板状結晶群（Plane crystal Group）

この結晶群の P は中谷の Plane crystal の P である．ML では 7 中分類だが，新分類の『P: 板状結晶群』では名称変更などで 8 中分類にした．ML の中分類の正規六花，変遷六花，不規則六花，畸形といった名称が具体的な結晶形のイメージが掴めないことからである．

【P1: 角板状結晶】（Plate-type crystal）：ML の P1: 正規六花を分解して，「P1a: 角板」，ML には無かった「P1b: 厚角板」に「P1c: 骸晶角板」の 3 種にした．平均的なサイズは 0.1～1 mm.

【P2: 扇状結晶】（Sector-type crystal）：中分類の「P2a: 扇六花」と「P2b: 広幅六花」で独立させた．平均的なサイズは 0.5～2 mm.

【P3: 樹枝状結晶】（Dendrite-type crystal）：中分類として独立させ，「P3a: 星六花」，「P3b: 樹枝六花」，「P3c: 羊歯六花」とした．ML の小分類が新

表 2　雪結晶のグローバル分類.

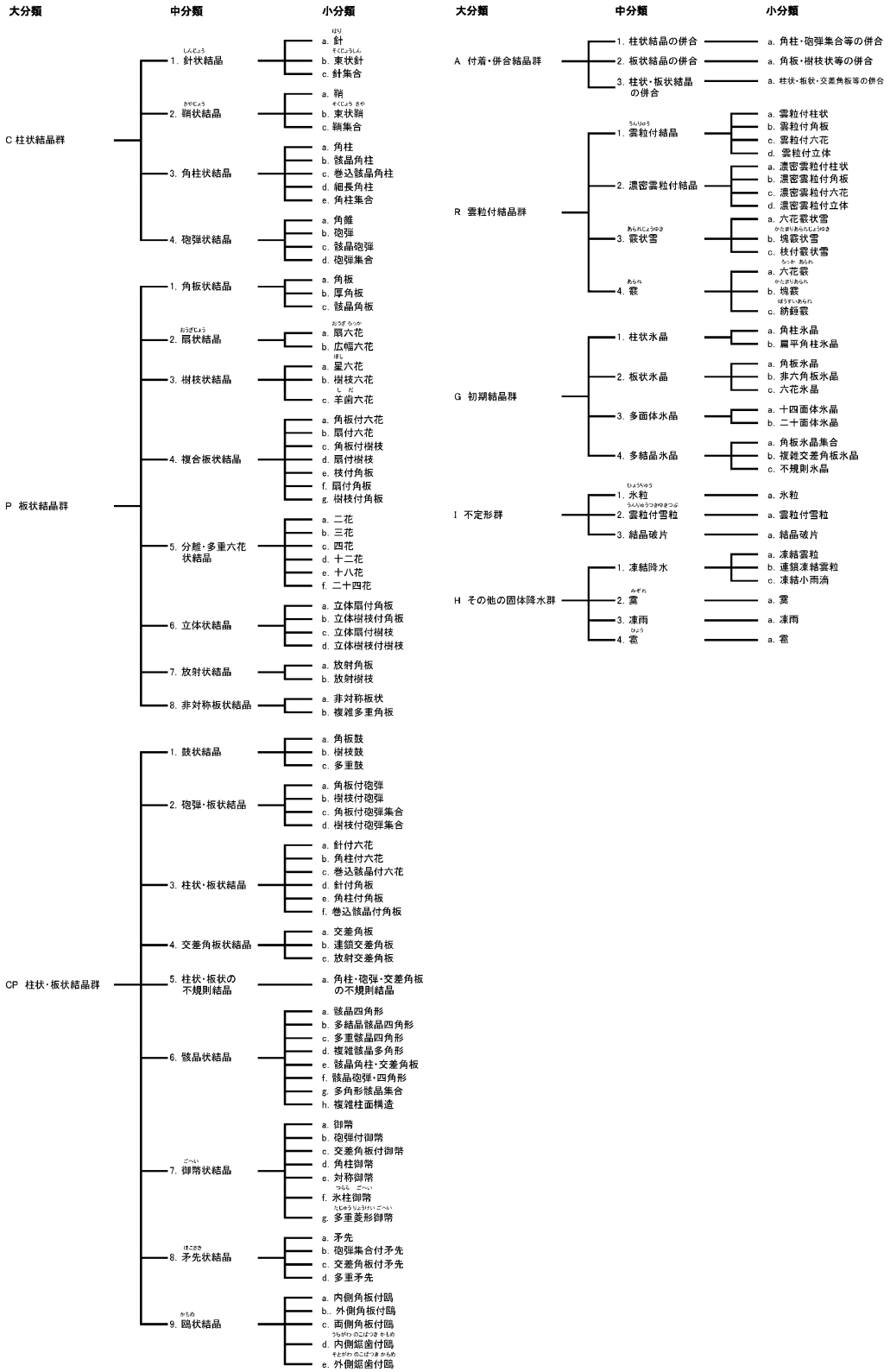


表 3　雪結晶の名称の和英対照表（表中，G: Genaral level，I: Intermediate level，E: Elementary level はそれぞれ大分類，中分類，小分類を意味する）．

G	I	E	和 名	English names
C			柱状結晶群	Column crystal group
	C1		針状結晶	Needle-type crystal
		C1a	針	Needle
		C1b	束状針	Bundle of needles
		C1c	針集合	Combination of needles
	C2		鞘状結晶	Sheath-type crystal
		C2a	鞘	Sheath
		C2b	束状鞘	Bundle of sheaths
		C2c	鞘集合	Combination of sheaths
	C3		角柱状結晶	Column-type crystal
		C3a	角柱	Solid column
		C3b	骸晶角柱	Skeletal column
		C3c	巻込骸晶角柱	Skeletal column with scrolls
		C3d	細長角柱	Long solid column
		C3e	角柱集合	Combination of columns (Column rosettes)
	C4		砲弾状結晶	Bullet-type crystal
		C4a	角錐	Pyramid
		C4b	砲弾	Solid bullet
		C4c	骸晶砲弾	Skeletal bullet
		C4d	砲弾集合	Combination of bullets (Bullet rosettes)
P			板状結晶群	Plane crystal group
	P1		角板状結晶	Plate-type crystal
		P1a	角板	Plate
		P1b	厚角板	Thick solid plate
		P1c	骸晶角板	Skeletal plate
	P2		扇状結晶	Sector-type crystal
		P2a	扇六花	Sector
		P2b	広幅六花	Broad branches
	P3		樹枝状結晶	Dendrite-type crystal
		P3a	星六花	Stellar
		P3b	樹枝六花	Dendrite
		P3c	羊歯六花	Fern
	P4		複合板状結晶	Composite plane-type crystal
		P4a	角板付六花	Stellar with plates
		P4b	扇付六花	Stellar with sectors
		P4c	角板付樹枝	Dendrite with plates
		P4d	扇付樹枝	Dendrite with sectors
		P4e	枝付角板	Plate with branches
		P4f	扇付角板	Plate with sectors
		P4g	樹枝付角板	Plate with dendrites
	P5		分離･多重六花状結晶	Separated and multiple dendrite-type crystals
		P5a	二花	Two branches
		P5b	三花	Three branches
		P5c	四花	Four branches
		P5d	十二花	12-branches
		P5e	十八花	18-branches
		P5f	二十四花	24-branches
	P6		立体状結晶	Spatial assemblage of plane-type crystal
		P6a	立体扇付角板	Plate with spatial sectors
		P6b	立体樹枝付角板	Plate with spatial dendrites
		P6c	立体扇付樹枝	Dendrite with spatial sectors
		P6d	立体樹枝付樹枝	Dendrite with spatial dendrites
	P7		放射状結晶	Radiating assemblage of plane-type crystal
		P7a	放射角板	Radiating assemblage of plates
		P7b	放射樹枝	Radiating assemblage of dendrites
	P8		非対称板状結晶	Asymmetrical plane-type crystal
		P8a	非対称板状	Asymmetrical plane
		P8b	複雑多重角板	Complex multiple plates

表 3（続き）．

G	I	E	和 名	English names
CP			柱状･板状結晶群	Combination of column and plane crystals group
	CP1		鼓状結晶	Column with plane-type crystals (Capped columnでも良い)
		CP1a	角板鼓	Column with plates
		CP1b	樹枝鼓	Column with dendrites
		CP1c	多重鼓	Column with multiple planes
	CP2		砲弾･板状結晶	Combination of bullets with plane-type crystal
		CP2a	角板付砲弾	Bullet with plate
		CP2b	樹枝付砲弾	Bullet with dendrite
		CP2c	角板付砲弾集合	Combination of bullets with plates
		CP2d	樹枝付砲弾集合	Combination of bullets with dendrites
	CP3		柱状･板状結晶	Plane crystals with column-type crystal
		CP3a	針付六花	Dendrite with needles
		CP3b	角柱付六花	Dendrite with columns
		CP3c	巻込骸晶付六花	Dendrite with scroll
		CP3d	針付角板	Plate with needles
		CP3e	角柱付角板	Plate with columns
		CP3f	巻込骸晶付角板	Plate with scroll
	CP4		交差角板状結晶	Crossed plate-type crystal
		CP4a	交差角板	Crossed plates
		CP4b	連鎖交差角板	Chained crossed plates
		CP4c	放射交差角板	Radiating assemblage of crossed plates
	CP5		柱状･板状の不規則結晶	Irregular crystal of combination of columns and planes type crystal
		CP5a	角柱･砲弾･交差角板の不規則結晶	Irregular crystal of combination of crossed plates
	CP6		骸晶状結晶	Skeletal-type crystal
		CP6a	骸晶四角形	Skeletal tetragon
		CP6b	多結晶骸晶四角形	Polycrystalline skeletal tetragon
		CP6c	多重骸晶四角形	Multiple skeletal tetragon
		CP6d	複雑骸晶多角形	Complex skeletal polygon
		CP6e	骸晶角柱･交差角板	Combination of skeletal columns and crossed plates
		CP6f	骸晶砲弾･四角形	Combination of skeletal bullets and tetragon
		CP6g	多角形骸晶集合	Combination of skeletal polygons
		CP6h	複雑柱面構造	Complicated prism plane structures
	CP7		御幣状結晶	Gohei twin-type crystal
		CP7a	御幣	Gohei twin
		CP7b	砲弾付御幣	Gohei twin with combination of bullets
		CP7c	交差角板付御幣	Gohei twin with crossed plates
		CP7d	角柱御幣	Gohei twin composed of multiple columns
		CP7e	対称御幣	Double symmetrical gohei twin
		CP7f	氷柱御幣	Icicle like gohei twin
		CP7g	多重菱形御幣	Multiple lozenge gohei twin
	CP8		矛先状結晶	Spearhead-type crystal
		CP8a	矛先	Spearhead
		CP8b	砲弾集合付矛先	Spearhead with combination of bullets
		CP8c	交差角板付矛先	Spearhead with crossed plates
		CP8d	多重矛先	Multiple spearhead
	CP9		鴎状結晶	Seagull-type crystal
		CP9a	内側角板付鴎	Seagull with attached plates inside wings
		CP9b	外側角板付鴎	Seagull with attached plates outside wings
		CP9c	両側角板付鴎	Seagull with attached plates on both sides of wings
		CP9d	内側鋸歯付鴎	Seagull with attached serrate crystals inside wings
		CP9e	外側鋸歯付鴎	Seagull with attached serrate crystals outside wings

分類では中分類に格上げされたことになり，中緯度における代表的な結晶の特徴を明確にした．したがって，ML の P1: 正規六花は 3 中分類になったことになる．これまで勝手に樹枝状六花，樹枝状結晶などと呼んだことのある研究者が多いと思われるが，中谷にも ML の分類にもそのような単独の結晶名は無く，対応するものは中谷はⅢ1 vi，ML では P1e の普通樹枝である．また，従来 ML で親しんできた星状六花や羊歯状六花はこの新分類では星六花，樹枝六花，羊歯六花のようになる．小分類では〜状の「状」は中分類を意味するので使わない呼称とし，整合性をとった．平均的なサ

表 3 （続き）.

G	I	E	和 名	English names
A			付着・併合結晶群	Aggregation of snow crystals group
	A1		柱状結晶の併合	Aggregation of column-type crystals
		A1a	角柱・砲弾集合等の併合	Aggregation of combination of columns and bullets
	A2		板状結晶の併合	Aggregation of plane-type crystals
		A2a	角板・樹枝状等の併合	Aggregation of combination of plates and dendrites
	A3		柱状・板状結晶の併合	Aggregation of column and plane-type crystals
		A3a	柱状・板状・交差角板等の併合	Aggregation of combination of columns, planes and crossed
R			雲粒付結晶群	Rimed snow crystal group
	R1		雲粒付結晶	Rimed crystal
		R1a	雲粒付柱状	Rimed column
		R1b	雲粒付角板	Rimed plate
		R1c	雲粒付六花	Rimed dendrite
		R1d	雲粒付立体	Rimed spatial branches
	R2		濃密雲粒付結晶	Densely rimed crystal
		R2a	濃密雲粒付柱状	Densely rimed column
		R2b	濃密雲粒付角板	Densely rimed plate
		R2c	濃密雲粒付六花	Densely rimed dendrite
		R2d	濃密雲粒付立体	Densely rimed spatial branches
	R3		霰状雪	Graupel-like snow
		R3a	六花霰状雪	Graupel-like snow of hexagonal shape
		R3b	塊霰状雪	Graupel-like snow of lump shape
		R3c	枝付霰状雪	Graupel-like snow with non-rimed branches
	R4		霰	Graupel
		R4a	六花霰	Hexagonal graupel
		R4b	塊霰	Lump graupel
		R4c	紡錘霰	Cone graupel
G			初期結晶群	Germ of ice crystal group
	G1		柱状氷晶	Column type ice crystal
		G1a	角柱氷晶	Column ice crystal
		G1b	扁平角柱氷晶	Tabular column ice crystal
	G2		板状氷晶	Plane type ice crystal
		G2a	角板氷晶	Plate ice crystal
		G2b	非六角板氷晶	Non-hexagonal ice crystal
		G2c	六花氷晶	Dendrite ice crystal
	G3		多面体氷晶	Polyhedral type ice crystal
		G3a	十四面体氷晶	14-faces polyhedral ice crystal
		G3b	二十面体氷晶	20-faces polyhedral ice crystal
	G4		多結晶氷晶	Polycrystalline type ice crystal
		G4a	角板氷晶集合	Assemblage of hexagonal ice crystals
		G4b	複雑交差角板集合	Complex crossed plates ice crystal
		G4c	不規則氷晶	Irregular ice crystal
I			不定形群	Irregular snow particle group
	I1		氷粒	Ice particle
		I1a	氷粒	Ice particle
	I2		雪粒付雪粒	Rimed snow particle
		I2a	雪粒付雪粒	Rimed snow particle
	I3		結晶破片	Broken snow particle
		I3a	結晶破片	Broken snow particle
H			その他の固体降水群	Other solid precipitation group
	H1		凍結降水	Frozen hydrometeor particle
		H1a	凍結雲粒	Frozen cloud particle
		H1b	連鎖凍結雲粒	Chained frozen cloud particles
		H1c	凍結小雨滴	Frozen small rain drop
	H2		霙	Sleet particle
		H2a	霙	Sleet particle
	H3		凍雨	Ice pellet
		H3a	凍雨	Ice pellet
	H4		雹	Hail stone
		H4a	雹	Hail stone

イズは 1〜3 mm，大きなものは 10 mm.

【P4: 複合板状結晶】（Composite plane-type crystal）: ML の P2: 変遷六花を名称変更したものだが，小分類の各結晶名には変更はない．それぞれ「P4a: 角板付六花」，「P4b: 扇付六花」は，それぞれの六花の先端に角板や扇が成長，「P4c: 角板付樹枝」や「P4d: 扇付樹枝」は，樹枝の先端に角板や扇が成長，「P4e: 枝付角板」，「P4f: 扇付角板」，「P4g: 樹枝付角板」は，角板の先端に少しだけ枝，扇や樹枝が成長した雪結晶である．通常，樹枝六花と分類される結晶の多くは，樹枝付角板であることが多い．平均的なサイズは 1〜3 mm，大きなものは 10 mm.

【P5: 分離・多重六花状結晶】（Separated and multiple dendrite-type crystals）: ML の P3: 不規則六花，P4: 十二花が，それぞれ六花の分離，併合したものが多いことから新たに統合して，「P5a: 二花」，「P5b: 三花」，「P5c: 四花」を分離六花と表し，「P5d: 十二花」，「P5e: 十八花」，「P5f: 二十四花」を多重六花の中分類とし，6 小分類にした．平均的なサイズは 1〜3 mm.

【P6: 立体状結晶】（Spatial assemblage of plane-type crystal）: ML の P6: 立体型を踏襲した．「P6a: 立体扇付角板」，「P6b: 立体樹枝付角板」は，角板の先端に扇または樹枝が立体的に成長したもの，「P6c: 立体扇付樹枝」，「P6d: 立体樹枝付樹枝」は，樹枝の先端に立体的に扇または樹枝が成長したものである．平均的なサイズは 1〜3 mm.

【P7: 放射状結晶】（Radiating assemblage of plane-type crystal）: ML の P7: 放射型を踏襲した．「P7a: 放射角板」，「P7b: 放射樹枝」は，角板または樹枝が中央にある凍結雲粒などから放射状に成長したもの．平均的なサイズは 1〜3 mm.

【P8: 非対称板状結晶】（Asymmetrical plane-type crystal）: ML の P5: 畸形が対称性の崩れた板状結晶であることから，新分類では「P8a: 非対称板状」として，板状の対称性の崩れた結晶を，また「P8b: 複雑多重角板」は，新たに極域でしばしば見られる角板が数個から十数個が面的に複雑に成長した単結晶を加えた．平均的なサイズは 1〜5 mm.

以上のように『P: 板状結晶群』は，ML では P: 板状結晶として，正規六花から放射型の 7 中分類，24 小分類であったが，新分類では P1 から P8 までの 8 中分類とし，「P1a: 角板」から「P8b: 複雑多重角板」の 29 小分類とした．

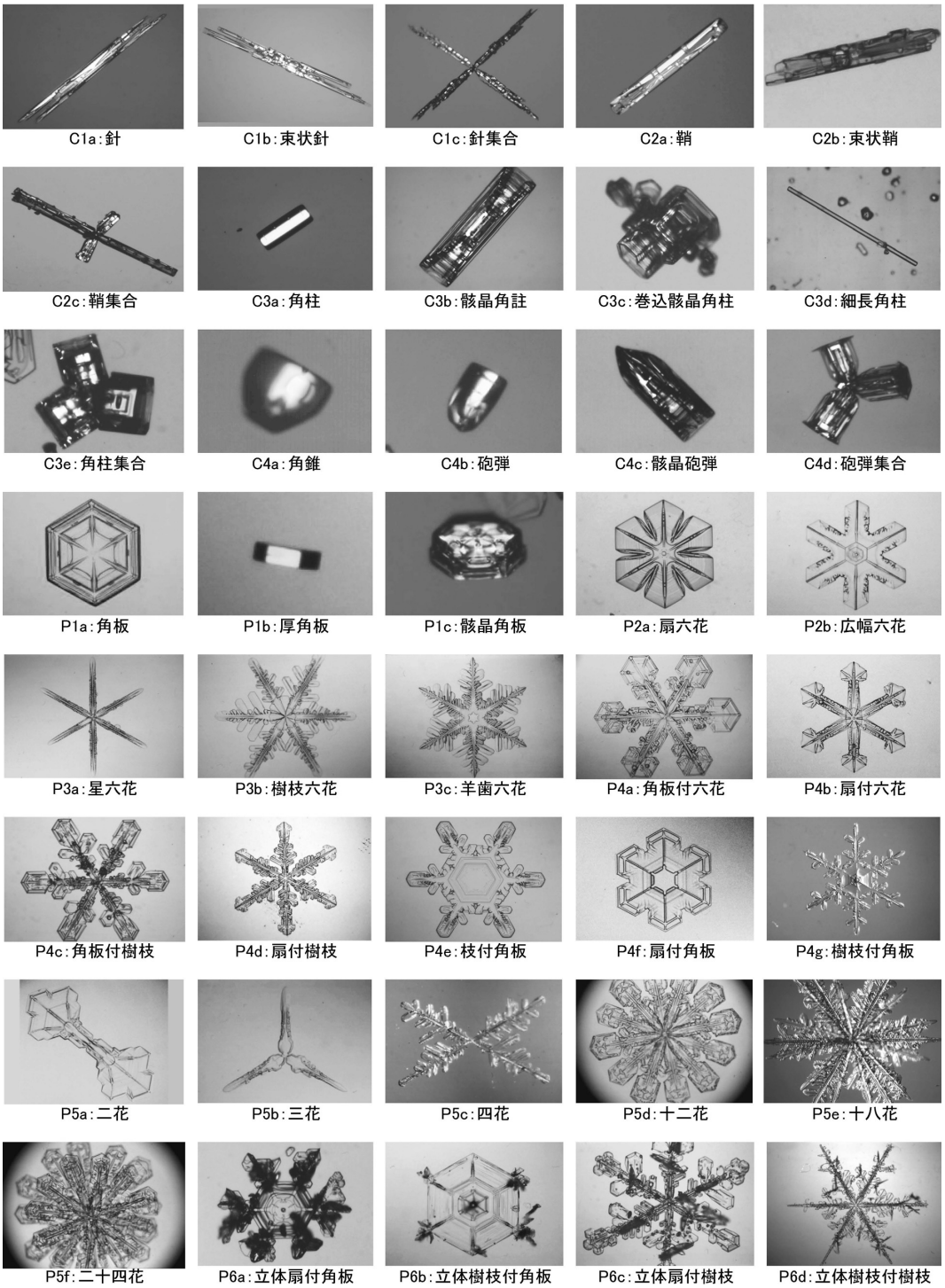


図 1-1　雪結晶のグローバル分類の代表的な顕微鏡写真（C1a から P6d）.

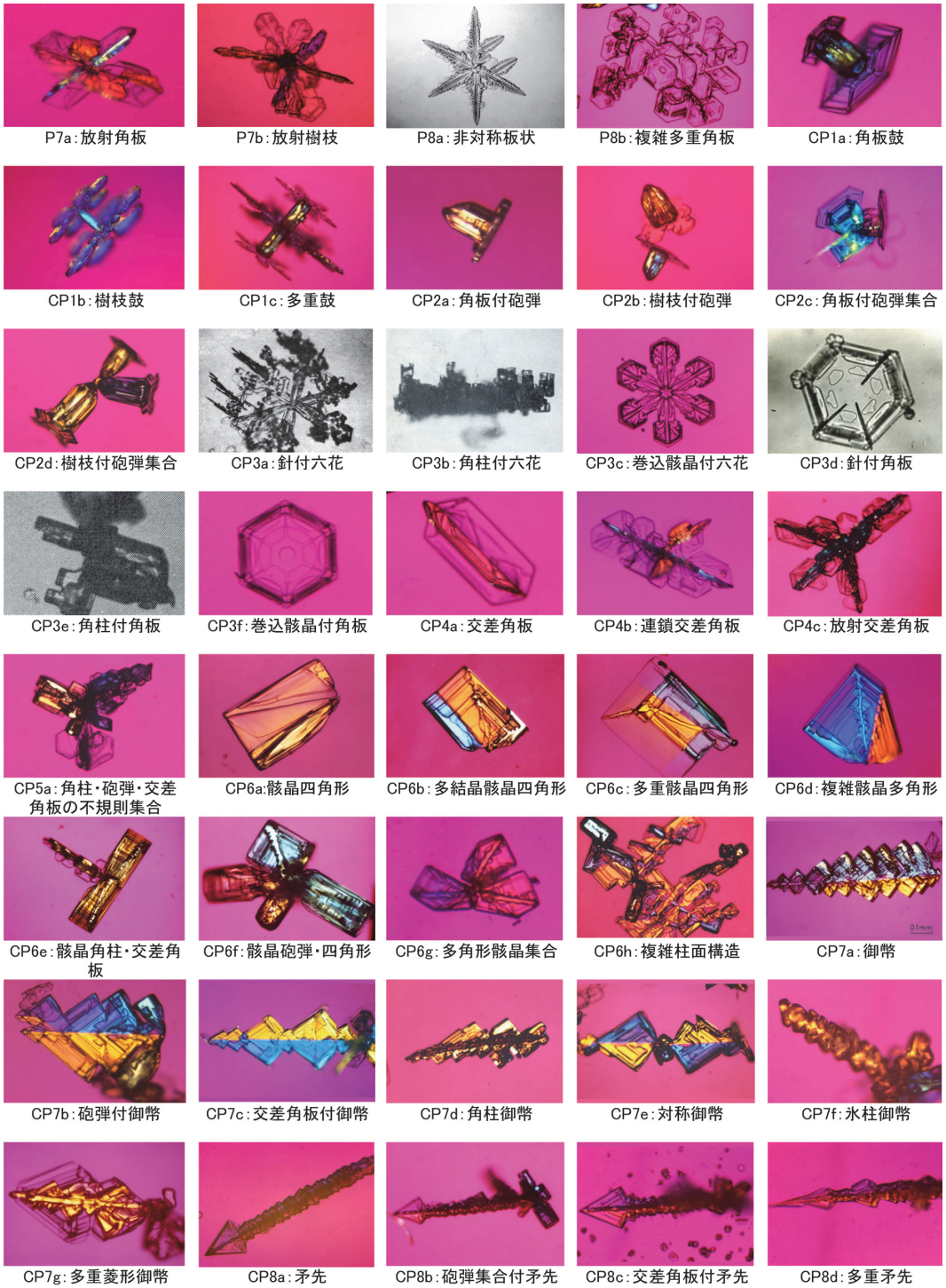


図 1-2　雪結晶のグローバル分類の代表的な顕微鏡写真（P7a から CP8d）.

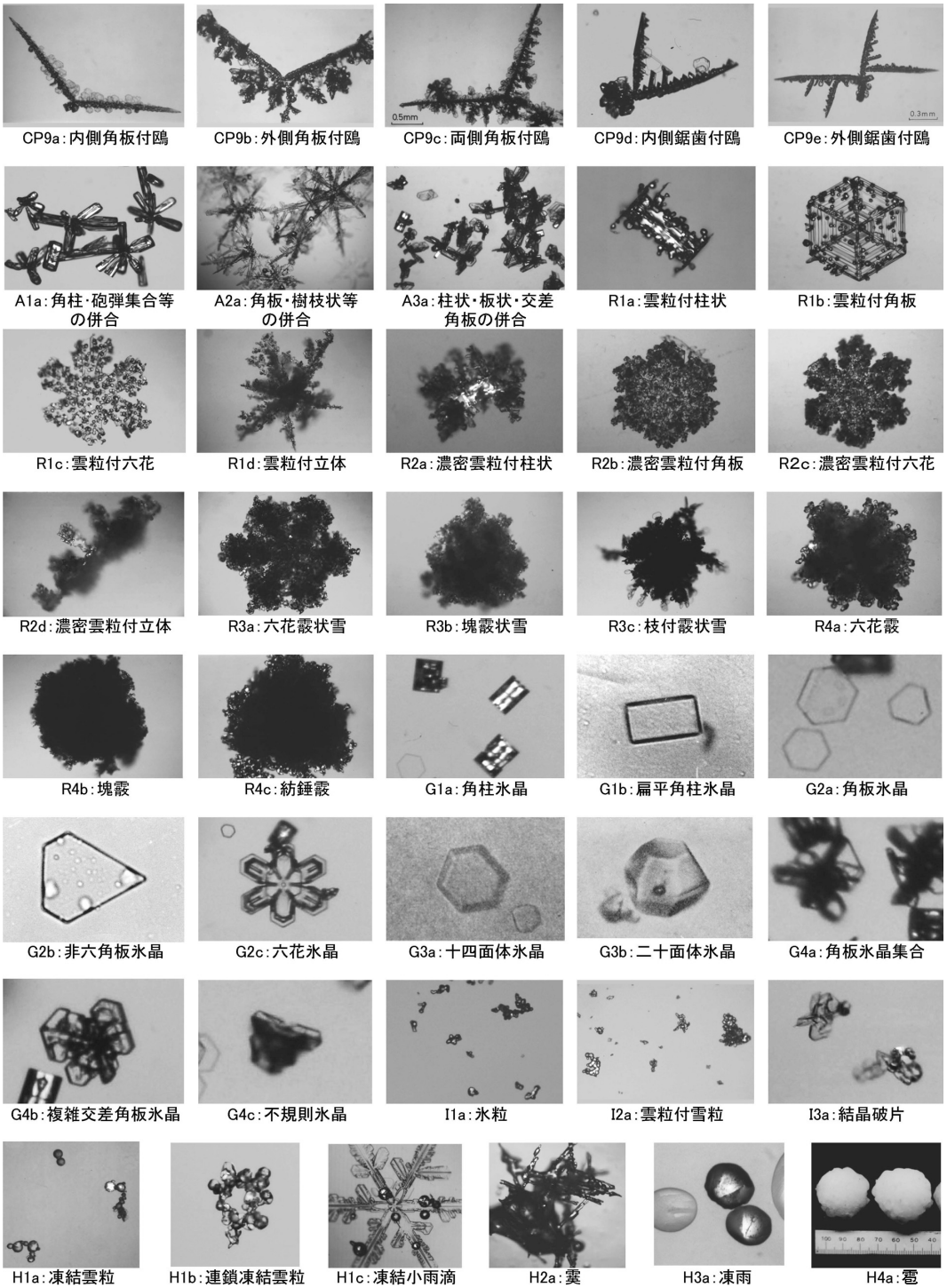


図 1-3　雪結晶のグローバル分類の代表的な顕微鏡写真（CP9a から H4a）.

2. 3 CP: 柱状・板状結晶群 （Combination of column and plane crystals group）

この結晶群の CP は中谷の Combination of column and plane crystals の C と P からなっている．ML の CP: 角柱・板状組合せを大幅に内容を変え，さらに，S: 側面結晶を含めて従来の二つの大分類を統合した．今回，新しい分類表を作る契機になった理由の一つには，この結晶群の再編と，極域で発見された多種多様な結晶の名称と分類にある．更に従来の側面結晶の名称の不都合さを解消することもあった（樋口，2007）．

この結晶群は，ML では CP の 3 中分類，9 小分類，S の 3 中分類であったものを，新分類の『CP: 柱状・板状結晶群』では 9 中分類，41 小分類と大幅に増加させた．また，ML では角柱や砲弾の底面に板状結晶が成長している鼓に代表される結晶を，小分類では CP1a: 角板付角柱，CP1b: 樹枝付角柱となっているが，これでは鼓のイメージを持てない．さらに，中谷の側面結晶はその後の観測から，角板の多結晶成長であること，さらに，極域の低温条件下で成長する多種多様な結晶は，板状結晶の立体化や底面構造の複雑化，それに柱状結晶の立体化や柱面の平板化に代表されるように，殆どの結晶が柱状・板状結晶の複雑成長が関与しているからでもある（菊地，2011）．

【CP1: 鼓状（つづみじょう）結晶】（Column with plane-type crystals, または Capped column でもよい）: ML の CP1a: 角板付角柱や，CP1b: 樹枝付角柱は，この名称からは鼓のイメージが無いので新分類では「CP1a: 角板鼓」,「CP1b: 樹枝鼓」とし，鼓であるということを明確にし，さらに，ML の CP1c: 段々鼓を「CP1c: 多重鼓」と名称を変えた．鼓の胴に相当する角柱の長さや面の結晶サイズによって大きく変わるが平均的なサイズは最大 1 mm.

【CP2: 砲弾・板状結晶】（Bullet with plane-type crystal）: ML の CP2: 砲弾・板状組合せに対応するが，新分類では，「CP2a: 角板付砲弾」,「CP2b: 樹枝付砲弾」に，新たに「CP2c: 角板付砲弾集合」と「CP2d: 樹枝付砲弾集合」を加えて角板や樹枝が成長しているのは，単砲弾なのか砲弾集合なのかを明確にした．平均的なサイズは 0.5〜1 mm.

【CP3: 柱状・板状結晶】（Plane crystals with column-type crystal）: ML の P3: 縁高結晶が六花や角板の周辺部に渦巻（Scroll）が成長したものであるが，なかなか馴染めない名称であった．新分類ではこの渦巻付を巻込骸晶と名称を変え，6 小分類にした．「CP3a: 針付六花」や「CP3b: 角柱付六花」は，主として六花の先端部から針または角柱が成長したもの．「CP3c: 巻込骸晶付六花」は，六花の先端付近に骸晶状の柱面が巻込むような形で成長したもの．「CP3d: 針付角板」,「CP3e: 角柱付角板」は，角板の先端部から針または角柱が成長したもの．「CP3f: 巻込骸晶付角板」は，角板の先端付近に骸晶状の柱面が成長したものに分類したが，これらの結晶は観測例が非常に少ない．平均的なサイズは 0.5 mm.

【CP4: 交差角板状結晶】（Crossed plate-type crystal）: ML の大分類 S: 側面結晶を新分類では『CP: 柱状・板状結晶群』の中分類に変更し，ML の S1: 側面結晶と S2: 鱗型側面結晶を「CP4a: 交差角板」と，「CP4b: 連鎖交差角板」にし，新たに「CP4c: 放射交差角板」の 3 小分類に増やした．これに関して，油川（2008）は ML の側面結晶を「交差角板型」と「矩形状結晶」にすることを提案しているが，新分類の 3 小分類で十分であろう．平均的なサイズは 0.5 mm.

【CP5: 柱状・板状の不規則結晶】（Irregular crystal of combination of columns and planes type crystal）: ML の S3: 側面，砲弾，角柱の不規則集合に対応し，新分類では，1 小分類で「CP5a: 角柱・砲弾・交差角板の不規則結晶」とした．この結晶は，角柱，砲弾，交差角板が中心核からランダムに成長したもので，ML では側面結晶に分類していたが，今回の分類で，その位置づけをより明確にした．平均的なサイズは 2 mm.

【CP6: 骸晶（がいしょう）状結晶】から【CP9: 鴎状（かもめじょう）結晶】までは極域で見られる代表的な結晶である．当初，新しい分類表を作るに当たって，著者の一人（KK）は ML の分類表にこれらの結晶を大分類の形で分類したほうが良いと思っていた．しかし，【CP4: 交差角板状結晶】が中分類に構成されたことで，これらの結晶もそれに準じることにした．これらの結晶の分類は，樹枝状結晶の規則性の美しさとは別に，多様性の美しさがあり，それらはまた鋭敏色板をつけた偏光顕微鏡で撮影されて，初

めてその美しさと構造が分かる結晶でもある．これらの雪結晶を雪結晶分類に含めることは世界で初めてであり，グローバル分類の所以である．

【CP6: 骸晶状結晶】（Skeletal-type crystal）：この結晶は低温領域ではよく見られる結晶だが，一方では骸晶というのはどのような結晶なのか良く分からないとも聞く．それで，骸晶の説明を簡単にすると，通常の結晶はいくつかの平らな結晶面で囲まれた多面体の形をしているが，雪の結晶は，大きく成長を始めると稜の部分が外側に向かって成長しているのに，それと共に成長するはずの面の部分の成長が取り残されたような形になる．これは，建築途中の家の構造を思い描くと分かり易い．柱を含む骨組みが出来ているのに，外壁が全く出来ていない建物のイメージである．特に柱状結晶の成長に顕著に現れる．多くの骸晶は，角柱や砲弾，厚角板などの外形がそのままで，底面や柱面が結晶の中心に向かって窪んだいわば蟻地獄のような形状が主だったが，極域では従来とは異なるものが数多くあることが明らかになった．それらは 8 小分類からなり，多くは外形が四角形の板状構造からなっている．偏光顕微鏡写真を見なければ，名称だけではその違いが分かりにくい．「CP6a: 骸晶四角形」は「C3b: 骸晶角柱」を a 軸に沿って切った縦断面の半分と思えば分かり易い．偏光顕微鏡のステージ上に水平に置かれた状態での結晶は偏光下では青一色か，黄一色かに見えるので単結晶の柱面である．また，外形が長方形で直交する 2 本の砲弾の片方の一柱面のみが成長して長方形をなす単結晶とでもいえば分かり易いかもしれない．「CP6b: 多結晶骸晶四角形」は外形もその構造も「CP6a: 骸晶四角形」と全く変わりはない．2 本の砲弾が直交しているが，柱面の成長は 1 本に限られ，多結晶である．もし，偏光で撮影されていなければこの CP6b は CP6a として分類されるはずである．「CP6c: 多重骸晶四角形」は，外形は CP6a や CP6b と全く同じだが，柱面の成長の途中から主軸が 90°変った，つまり結晶が青色から黄色，または黄色から青色へと，主軸が 90°変わって成長している多結晶である．これらの相違は図 1-2 から明らかである．「CP6d: 複雑骸晶多角形」は，骸晶構造を持つ二つの結晶が多角形（多くの場合は五角形）から構成されている．「CP6e: 骸晶角柱・交差角板」は，はっきりした骸晶構造を持つ角柱と交差角板との集合．「CP6f: 骸晶砲弾・四角形」は，骸晶構造を持つ砲弾と単結晶の骸晶四角形の集合で，「CP6g: 多角形骸晶集合」は，「C4d: 砲弾集合」の砲弾にあたる結晶が多角形の骸晶構造からなっているが，それぞれは単結晶である．「CP6h: 複雑柱面構造」は，【CP6: 骸晶状結晶】の中で骸晶構造を持った柱面が最も複雑に絡み合った，極めて異常な成長をした結晶である．平均的なサイズは 0.2〜5 mm．

【CP7: 御幣状（ごへいじょう）結晶】（Gohei twin-type crystal）：新しい雪結晶の分類表を作るきっかけとなった，−25℃ 以下の低温下で観測される最も代表的な結晶の一つである．御幣の名称は，神社のしめ縄や正月の門松などに見られる御幣に良く似ていることから著者の一人（KK）が付けた名前である．今日では，外国でも“Gohei-twin（御幣双晶）”と訳されて使われている． Twin は結晶学的には双晶と訳されるが，双子，双生児と同様の意味合いを持っている．結晶の成長方向に向かって，左右対称に角柱や砲弾の一柱面が異常に成長したものと特徴付けられる．成長する先端の角度は約 80°，偏光顕微鏡では青系統と黄系統のほぼ直交する柱状結晶の向きの違いによる色合いからとても美しく見える．結晶の大きさは，最も単純な最初の一段目だけの双晶では成長方向に 100 μm 以下で，十分成長した結晶では数 mm 以上になるので，肉眼でも容易に確認出来る．成長温度範囲は−25℃ 以下で，水飽和の条件が必要らしいこと以外はまだ良く分かっていない．後述する【CP8: 矛先状結晶】との違いは，成長している先端の角度が御幣は約 80°で，矛先は約 60°である．両者とも双晶構造をしていることは共通であるが，御幣に見られる双晶境界の凹入角成長という骸晶角柱，または渦巻状に柱面の一面だけが異常に成長を繰り返す構造が，矛先では十分な骸晶構造の成長が認められないことが特徴である．両者の結晶写真を見比べると納得できると思う．

「CP7a: 御幣」は，低温下で成長する最も代表的な結晶の一つで，中心核から一方向のみに成長したもので，「CP7b: 砲弾付御幣」，「CP7c: 交差角板付御幣」は，「CP7a: 御幣」の成長方向と反対方向に「C4d: 砲弾集合」または「CP4c: 放射交差角板」が

成長したものである .「CP7d: 角柱御幣」は，結晶の外形は一見 CP7a と同じように見えるが，成長方向に左右対称に成長する柱面が，この結晶では左右とも同じ結晶主軸を持つ角柱か砲弾が成長したものである .「CP7e: 対称御幣」は，中心核から一方向に左右対称に成長する CP7a が，この結晶では中心核から両側にしかも対称に成長したもので，双晶が中心核から左右に双晶成長したものといったほうが分かり易い．両側に合わせて 10 段以上もの御幣が成長しているのを見ると「アッ」と息を呑むくらいの感じがする結晶である .「CP7f: 氷柱（つらら）御幣」は，御幣の特徴である成長方向に左右対称で , はっきりした角柱や砲弾の一柱面が成長した構造を示しているが，この結晶は単結晶で , 氷柱のように団子状に連なっていて，先端の御幣成長以外ははっきりした柱面の成長が認められないのが特徴である .「CP7g: 多重菱形（りょうけい）御幣」は，また一寸変わった成長機構を持った結晶だが，御幣に分類した．成長方向に対して，御幣独特の角柱や砲弾のような主軸に左右対称の構造は無く , 単結晶で , 先端部分の形状が多様なのも特徴の一つである . この結晶は山下（1974）の人工雪実験で見られた三角樹枝状氷晶の内の 1 本の枝に対応するとも思われるが，先端部分の多様な形状は認められていない．また，Schaefer and Cheng（1968）の Pyrotechnic（ヨウ化銀花火法）で氷晶化させた結晶も，これに良く似た点がある．これらの【CP7: 御幣状結晶】に代表される－25℃以下で成長する結晶のいくつかは人工的にも成長させることに成功している（Kikuchi and Sato, 1984; Sato and Kikuchi, 1985）．また山下のグループ（浅野ら ,1989; 中田ら，1991）は自然循環型のクラウドチェンバーを使用して，－20～－35℃の温度範囲で「巨大多結晶雪」を生成させた．これらの結晶は【CP7: 御幣状結晶】や【CP8: 矛先状結晶】に対応するかもしれない．平均的なサイズは 0.2～5 mm.

【CP8: 矛先状（ほこさきじょう）結晶】（Spearhead-type crystal）：先端の形状が「矛先」に似ていることから，これも著者の一人（KK）が名付けた名称である．御幣に似ているが，矛先の先端の角度が約 60° と御幣より狭い．御幣と同じく双晶からなる多結晶だが，各段階で見られる角柱や砲弾の一柱面だけが成長したというのには，柱面の外形がはっきりしない．また，左右対称の結晶境界に沿って突起状の結晶が連なって見えるのが多いことも特徴の一つである．これらの点で御幣とは大分違いがはっきりしている．十分成長したものは数 mm，温度範囲も－25℃以下である．

「CP8a: 矛先」は，御幣には見られなかった先端の角度の違いと結晶の先端だけが飛び抜けて大きいことが上げられる .「CP8b: 砲弾集合付矛先」,「CP8c: 交差角板付矛先」は，矛先の成長方向と反対側に砲弾集合または交差角板が成長しているもので ,「CP8d: 多重矛先」は，成長する矛先の先端が一旦閉じた形状から二度，三度と矛先の先端が複数回成長を繰り返している結晶である．平均的なサイズは 2～5 mm.

【CP9: 鴎状（かもめじょう）結晶】（Seagull-type crystal）: 一寸変わった名称にしたが，両側に大きく開いた羽根で大空を滑空している鴎に似ていることから，これも著者の一人（KK）が名付けた名称である．羽根の付け根の中央部はあたかも鴎の胴体と頭のように見える．羽根の両先端までの幅は数 mm 以上もあり，肉眼で容易に発見することが出来る．成長温度範囲は－25℃以下である．一般に低温型といわれてきた結晶の出現頻度は観測された結晶数の精々1～5% 程度だが（Kajikawa *et al.*, 1980），この鴎状結晶は短時間にまとまって降る傾向がある．発見当初は開いた羽根の角度の大小が議論されたが（Kikuchi and Kajikawa, 1979），サンプル数が増えるにつれて更に数種に分類されることが分かった．それは羽根の内側や外側に角板か鋸歯（のこは）のような形をした結晶が成長する外形の大きな違いである .「CP9a: 内側角板付鴎」と「CP9b: 外側角板付鴎」は，羽根の内側と外側，つまり胴体側とその反対側に角板が連続して成長している結晶 .「CP9c: 両側角板付鴎」は，羽根の内側と外側の両側に主として角板が成長している結晶である .「CP9d: 内側鋸歯付鴎」,「CP9e: 外側鋸歯付鴎」は，羽根の内側と外側に角板ではなく鋸歯のような形の結晶が成長している結晶である．これらの観測事実から「CP9c: 両側角板付鴎」のように両側鋸歯付鴎があってもよさそうだが，現在までのところ報告されていない．山下（1974; 1979）は，これに類似した結晶として高温領域（－3～－10℃）と低

温領域（－18℃以下）で「V 字氷晶」の成長を報告しているが，この結晶の細かなところを除けば【CP9: 鴎状結晶】によく似た形状をしている．平均的なサイズは 2〜8 mm.

以上のように『CP: 柱状・板状結晶群』は，ML では，CP: 角柱・板状組合せとして 3 中分類，9 小分類にし，S: 側面結晶として 3 中分類のみにしていたが，CP の内容が角柱・板状そのままであるのは良いとしても，S の中味も柱状・板状結晶から構成されていることを考慮して，両方の大分類を整理統合して，新分類では『CP: 柱状・板状結晶群』とした．この結晶群は【CP1: 鼓状結晶】から【CP9: 鴎状結晶】までの 9 中分類とし，「CP 1a: 角板」から「CP9e: 外側鋸歯付鴎」の 41 小分類とかなり多くなった．しかし，これらの内「CP 6a: 骸晶四角形」から「CP9e: 外側鋸歯付鴎」までの結晶はほとんどが極域で発見されたことを考えると，当然のことでもある．従来の中谷や ML の分類との特徴的な変更点はここにあるといっても過言ではない．

2. 4　A: 付着・併合結晶群（Aggregation of snow crystals group）

A は Aggregation（集合）の A を使用した．雲物理学では，合体，併合は Coalescence が使われるが，その頭文字 C は既に Column（柱状）で使っているので A にした．これは中谷や ML には無かった新しい大分類の導入である．ML は中分類で N2: 針状結晶組合せを，小分類で N2a: 針組合せ，N2b: 鞘組合せ，N2c: 針状角柱組合せ，としてそれぞれの結晶の付着・併合したものを〜組合せとしている．一方，C2: 角柱組合せでは小分類で C2a: 砲弾集合，C2b: 角柱集合としているが，組合せと集合の使い分けがはっきりしない．更に，N2: 針状結晶組合せのような 付着・併合したものを小分類にすると，ML の P: 板状結晶のように多種ある結晶それぞれに〜組合せ，例えば広幅六花組合せとか，羊歯六花組合せという形で分類しなければ整合性が取れない．降雪は単体というより，複数の結晶が数個から時には数十個が付着・併合した，いわゆる雪片の形で降ることの方が多い．そのため，この『A: 付着・併合結晶群』は，それぞれの結晶の単体について組合せを分類するよりも，付着・併合した結晶を柱状，板状，柱状・板状などの結晶群ごとに分類する方が繁雑さを避け合理的である．

【A1: 柱状結晶の併合】（Aggregation of column-type crystals）:『C: 柱状結晶群』に属する，C1〜C4 までの同じ結晶同士，または針状と鞘状，角柱状と砲弾状のように成長条件がほぼ同じ結晶同士の併合が一般的である．「A1a: 角柱・砲弾集合等の併合」は，柱状結晶の総称としてのそれらの併合である．平均的なサイズは単体の結晶の数倍．

【A2: 板状結晶の併合】（Aggregation of plane-type crystals）:『P: 板状結晶群』の P1〜P8 までの同じ結晶同士，または扇状，樹枝状，複合板状のように成長条件がほぼ同じ結晶同士の併合が一般的である．「A2a: 角板・樹枝状等の併合」は，板状結晶の総称としてのそれらの併合である．平均的なサイズは単体の結晶の数倍．

【A3: 柱状・板状結晶の併合】（Aggregation of column and plane-type crystals）:『CP: 柱状・板状結晶群』は，CP1 から CP9 まで多種にわたっているが，これらが同時に併合することは殆どない．「A3a: 柱状・板状・交差角板等の併合」は，CP2，CP3 や CP4 など，それぞれ同じ結晶同士の併合が多く，CP6 から CP9 などの併合は殆ど見られない．それは，これらの結晶の数が極端に少ないことの他，これらの結晶は初期結晶と一緒に低温条件下で見られることに起因している．平均的なサイズは単体の結晶の数倍．

以上のように『A: 付着・併合結晶群』は，ML の〜組合せや〜集合といった分類上の整合性を図るために，新分類では大分類として，新たに『A: 付着・併合結晶群』を設けた．これも大きな変更点の一つである．また，ML では N2: 針状結晶組合せに対して，C2: 角柱組合せのように〜結晶と結晶を付けたり，付けなかったりと統一的でない表現もあり，この点も統一するようにした．

2. 5　R: 雲粒（うんりゅう）付結晶群（Rimed snow crystal group）

R は中谷が用いた Rimed crystal の R である．雪の結晶の代表的な形といえば，誰もが六花で代表される樹枝六花，星六花などであると思うが，冬期間で最も頻繁に降ってくるのは雲粒付結晶である．南北に長い日本列島の北は北海道から南は九州までの日本海側では，北西の季節風による降

雪のほとんどは量の多寡はあれ，雲粒付が多い．『R: 雲粒付結晶群』は，結晶への雲粒の付着量によって中分類では 4 種に分類している ML を踏襲した．

【R1: 雲粒付結晶】（Rimed crystal）：この結晶の母体は柱状，角板，樹枝（六花），立体によって分けられる．「R1a: 雲粒付柱状」は，針，角柱状などをまとめて，それらに雲粒が付着したものであり，「R1b: 雲粒付角板」は，結晶を角板に限定している．「R1c: 雲粒付六花」は，同じ板状結晶でも六花に代表される樹枝状や複合板状結晶で個々の小分類の結晶を指定しているものではない．「R1d: 雲粒付立体」は，広い意味での立体状結晶と放射状結晶を合わせたものである．平均的なサイズは母体の結晶形と同じ．

【R2: 濃密雲粒付結晶（のうみつうんりゅう）】（Densely rimed crystal）：この結晶は，【R1: 雲粒付結晶】に更に雲粒が付着したもので，まだ母体の結晶が判別できる状態である．「R2a: 濃密雲粒付柱状」，「R2b: 濃密雲粒付角板」，「R2c: 濃密雲粒付六花」，「R2d: 濃密雲粒付立体」は，それぞれ母体の結晶が柱状，角板，六花，立体と判別できる状態を表している．平均的なサイズは母体の結晶形よりやや大きめ．

【R3: 霰状雪（あられじょう）】（Graupel-like snow）：この結晶は【R2: 濃密雲粒付結晶】から更に付着雲粒量が増加して霰に近くなった状態だが，まだ霰までにはなっていない．「R3a: 六花霰状雪」は母体の六花が何とか確認できる状態，「R3b: 塊霰状雪」は，母体が単に塊状になった状態で，「R3c: 枝付霰状雪」は，塊状になった雲粒から枝が伸びたり（Fujiyoshi, 1985），枝の先端部分だけが雲粒の塊から見える状態である．平均的なサイズは母体の結晶形よりかなり大きい．

【R4: 霰】（Graupel）：霰は英語では Soft hail だが，ドイツ語の Graupel が一般に使われている．この結晶は，母体の結晶がはっきり分からないくらいに付着雲粒量が増加して完全に霰になった状態で外形のみで分類している．「R4a: 六花霰」は，まだ六花が僅かに残る状態．「R4b: 塊霰」は，丸い塊状になっている状態．「R4c: 紡錘霰」は，霰の中で最も多く見られる塊のようにも見えるが，紡錘状にも見える霰のことである．平均的なサイズは 1〜3 mm.

以上のように『R: 雲粒付結晶群』では，ML の R: 雲粒付結晶の 4 中分類，13 小分類を，内容はそのまま踏襲し，一部名称変更や整合性を考慮して，新分類でも『R: 雲粒付結晶群』として R1〜R4 の 4 中分類，R1a〜R4c の 14 小分類とした．

2. 6 G: 初期結晶群（Germ of ice crystal group）

この結晶群の G は，ML が使った Germ of snow crystal の Germ（胚，芽の意）の G である．この『G: 初期結晶群』は，いわゆる単に氷晶とか初期氷晶といわれる雪の結晶の素のことであり，柱状氷晶か板状氷晶が多い．発生初期の結晶は，顕微鏡の視野のもとでは全ての粒子が柱状または板状だけということはほとんどない．多くの場合，微小な交差角板などを含めて混在している．そのような点から ML では 6 中分類のみだったものを新分類では 4 中分類，10 小分類とし，新たな『G: 初期結晶群』とした．これは極域観測の充実による成果である．

【G1: 柱状氷晶】（Column type ice crystal）：氷晶の多くが微小な凍結雲粒から成長したものであることから柱状氷晶が圧倒的に多い．中緯度の厳冬期に見られる細氷（ダイヤモンド・ダスト）の代表的な結晶形である．「G1a: 角柱氷晶」は，最も代表的な氷晶だが，結晶化した当初はいわゆる無垢の氷で詰まった結晶のことが多く，大きくなるにつれて骸晶構造のものが増え始め，時として主軸に直交して中央に細く浅い溝（Groove）が出来るものもある．「G1b: 扁平角柱氷晶」は，角柱の相対する柱面の二面だけが大きく成長して，他の四面が極端に薄く，見かけ上四角形，つまり扁平の角柱の結晶である（樋口，1968）．平均的なサイズは十数 μm から 50 μm.

【G2: 板状氷晶】（Plane type ice crystal）：柱状氷晶に次いで出現頻度の高いのがこの結晶である．「G2a: 角板氷晶」は，発生初期のものは表面に全く模様の無い無垢のものが多いが，成長し始めると骸晶構造を示すものが多くなる．「G2b: 非六角板氷晶」は，三角，四角，五角形及び変形六角形の結晶で，殆どは無垢のものが多い．「G2c: 六花氷晶」は板状結晶の一種だが，こんなに小さい段階から立派に六花に成長するものがあるので，敢えて別の小分類とした．平均的なサイズは数十 μm〜100 μm.

【G3: 多面体氷晶】（Polyhedral type ice crystal）: 通常見られる結晶の内，角柱は底面二面と柱面六面の八面体からなっているが，これ以外のピラミッド面が成長した結晶である．ここに使用した写真はアラスカ・フェアバンクスのアイス・フォッグの中から大竹武によって撮られたものである（Ohtake, 1970）.「G3a: 十四面体氷晶」は，底面二面と上下のピラミッド面十二面からなる結晶で，「G3b: 二十面体氷晶」は，底面二面と上下のピラミッド面十二面に，それらに挟まれた柱面六面の二十面で囲まれた結晶で，天然では滅多に見られないが，山下（1974; 1979）は球形の凍結微水滴から 20 面体の構造を持つ氷晶の成長過程を報告している．平均的なサイズは十数 μm〜50μm.

【G4: 多結晶氷晶】（Polycrystalline type ice crystal）: 初期結晶は微小な凍結雲粒から面の成長が始まったばかりなので，G1 から G3 までは単結晶なのだが，唯一この結晶だけは多結晶である．「G4a: 角板氷晶集合」は，角板が数個集合したもので，交差角板とは異なっている．「G4b: 複雑交差角板氷晶」は，更に多くの角板が集合したものである．「G4c: 不規則氷晶」は，正に不規則に氷晶が集まったものである．平均的なサイズは数十 μm〜100μm.

以上のように『G: 初期結晶群』では，ML の G: 初期結晶は 6 中分類だけにしているが，それぞれの結晶は小分類に相当すると思われる個々の結晶名であるので，新分類ではそれらを全面的に見直した．その結果，『G: 初期結晶群』として R1 から R4 まで 4 中分類として，R1a から R4c までの 10 小分類とした．また，ML には無かった「G1b: 扁平角柱氷晶」，「G3a: 十四面体氷晶」，「G3b: 二十面体氷晶」や「G4b: 複雑交差角板氷晶」など小分類では細かく分類した．

2. 7 I: 不定形群（Irregular snow particle group）

I は中谷の Irregular snow particle の Irregular（不定の）の I を使い，特に代表されるような結晶形がある訳ではない．多くは積雪表面から風で巻き上げられたものや風雪で破壊されたものが多く，新分類でも ML の分類を踏襲したが，I4: 其の他は削除した．

【I1: 氷粒（ひょうりゅう）】（Ice particle）:「I1a: 氷粒」は，粒子の多くは積雪表面からまきあげられたもの．平均的なサイズは数十 μm.

【I2: 雲粒付雪粒（うんりゅうつきゆきつぶ）】（Rimed snow particle）:「I2a: 雲粒付雪粒」は，R1 が強い風によってちぎれて変形したものである．平均的なサイズは数十 μm〜100μm.

【I3: 結晶破片】（Broken snow particle）:「I3a: 結晶破片」は，雪粒の破片に結晶の一部が確認できるものである．平均的なサイズは数十 μm〜100μm.

以上のように『I: 不定形群』では，ML の I: 不定形の 4 中分類から，I4: 其の他を除いて同じにした．

2. 8 H: その他の固体降水群（Other solid hydrometeor group）

中谷や ML では考慮されていなかった分類として，新分類では『H: その他の固体降水群』を設けた． 中谷や ML では霰は細かく分類しているが，「その他の固体降水」としての凍雨，霙（みぞれ），雹（ひょう）は含まれていない．しかし，1949 年夏のカナダで中谷も出席した「雪結晶国際分類特別委員会」では「実用分類 （Classification of Solid Precipitation）」 として 10 種に分け， Code 番号 9 で Ice Pellet （アメリカでは Sleet）， Code 番号 0 で Hail を取上げている．これらのことも考慮して，新分類では『H: その他の固体降水群』として大分類に加えた．また実用分類では Ice pellet（凍雨）を入れ，アメリカでは Sleet（霙）と断り書きを入れているので同義と解釈されるが，しかし極域においては，凍雨は明らかに完全に凍結した球形の結晶と，完全に融解した雨滴が共存している状態が観測されることも珍しくない．それは針状結晶が融解して完全な結晶形を保持していない状態とは別物と解釈出来ることから，この分類では霙と凍雨を別のものとした．それと同時に新たに凍結降水を加えた．

【H1: 凍結降水】（Frozen hydrometeor particle）: 中緯度帯では雪の結晶以外の固体降水といえば，霙を含めることにして，稀に凍雨，雹があげられるが，極域ではその低温条件からしばしば凍結した雲粒や雲粒より大きく雨滴より小さな凍結小雨滴が観測されることがある．「H1a: 凍結雲粒」は，雲粒の凍結したもので，大きさは 10μm 以上 50 μm 以下であり，「H1b: 連鎖凍結雲粒」は，その名のとおり凍結雲粒が数珠つなぎ状に

なったもので，単一の凍結雲粒よりも連鎖状のものの方が多く見られ，時には数十個が連なっていることも珍しくない．「H1c: 凍結小雨滴」は，直径 200 μm 以下の小さい雨滴が単独で降ってくることもあるが，雪の結晶に付着している場合の方が多い．結晶表面で凍結したと思われる小雨滴は，その表面からスピキュル（Spicule: 針状突起，小突起物）とかスパイク（Spike: 釘状の突起物）といわれる突起が出ているものがある．これらの小雨滴は母結晶である雪と同じ主軸を持ったものや，母結晶とは別に多結晶に凍るものもある．小雨滴の直径は 100 μm から 150 μm 位で，共存する雲粒の数倍から十数倍の大きさなので，容易に区別することができる．平均的なサイズは 10 μm〜200 μm.

【H2: 霙】（Sleet particle）:「H2a: 霙」は，雨と雪が混在している状態で，その成因は主に秋から冬は寒冷前線の通過に伴って寒気が入り込み，雨だったものが凍結し始めた状態と，雪が降って来る途中で融解層（0℃層）を通過して融解し始めた状態がある．融解の程度で分類することも考えられるが，観測現場で判断するには無理がある（Fujiyoshi，1986）．平均的なサイズは 1 mm〜10 mm.

【H3: 凍雨】（Ice pellet）:「H3a: 凍雨」は，雨滴が氷結したり，雪片の大部分が融けて再び氷結して出来た透明または半透明の氷の粒（直径 5 mm 未満），またはそれが降る現象である．平均的なサイズは 200 μm〜5 mm.

【H4: 雹】（Hail stone）:「H4a: 雹」は，透明または透明な層と半透明の層とが相互に重なって出来た氷の粒またはそれが降る現象．雹の粒の直径は 5 mm から 50 mm 位とされているが，日本では 30 mm 位でも大きい方である．アメリカでは非常に発達した積乱雲に伴って降る雹は，人頭大位のものもあるといわれている．平均的なサイズは 5 mm〜50 mm.

以上のように『H: その他の固体降水群』では，H1〜H4 の 4 中分類で，H1a〜H1c の 3 小分類を含め，6 小分類にした．

3. まとめ

雪結晶の分類として，北海道をはじめで中緯度で観測された結晶を基にして今日まで使用されてきた，一般分類（中谷，1938, 1949 ; Nakaya, 1954）や，気象学的分類（Magono and Lee ,1966）を基本にして，北極域や南極点をも含めた極域での観測結果を加えて見直し，さらに従来の結晶形の名称の整合性を考慮して，新分類を策定し，新しい雪結晶の分類をグローバル・スケール分類（Global-Scale Classification），略してグローバル分類（Global Classification）と名付けた．

グローバル分類の主な特徴は以下のようになる．

(1)『C: 柱状結晶群』は，【C1: 針状結晶】から【C4: 砲弾状結晶】の 4 中分類とし，「C1a: 針」から「C4d: 砲弾集合」の 15 小分類とした．

(2)『P: 板状結晶群』は，【P1: 角板状結晶】から【C8: 非対称板状結晶】までの 8 中分類とし，「P1a: 角板」から「P8b: 複雑多重角板」の 29 小分類とした．

(3)『CP: 柱状・板状結晶群』は，ML の大分類の CP: 角柱・板状組合せと S: 側面結晶を整理，統合し，新たに【CP1: 鼓状結晶】から【CP9: 鴎状結晶】までの 9 中分類とし，「CP1a: 角板」から「CP9e: 外側鋸歯付鴎」の 41 小分類とした．低温型雪結晶と総称されてきた結晶の大部分はこの結晶群に属する．従来の中谷や ML の分類との特徴的な変更点はここにあるといっても過言ではない．

(4)『A: 付着・併合結晶群』は，【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 小分類を新たに結晶群に加えた．

(5)『R: 雲粒付結晶群』は，【R1: 雲粒付結晶】から【R4: 霰】の 4 中分類，「R1a: 雲粒付柱状」から「R4c: 紡錘霰」の 14 小分類とした．

(6)『G: 初期結晶群』は，【R1: 柱状氷晶】，【R2: 板状氷晶】，【R3: 多面体氷晶】から【R4: 多結晶氷晶】の 4 中分類として，「R1a: 角柱氷晶」から「R4c: 不規則氷晶」までの 10 小分類とした．

(7)『I: 不定形』は，【I1: 氷粒】，【I2: 雲粒付雪粒】，【I3: 結晶破片】の 3 中分類，3 小分類とした．

(8)『H: その他の固体降水群』は，中谷や ML では考慮されていなかったが，実用分類では採用されている【H2: 霙】，【H3: 凍雨】，【H4: 雹】に【H1: 凍結降水】を加えた 4 中分類とし，【H1: 凍結降水】を，「H1a: 凍結雲粒」，「H1b: 連鎖凍結雲粒」，「H1c: 凍結小雨滴」の 3 小分類に分け，計 6 小分類とした．

以上のように，雪結晶のグローバル分類は 8 大分類，39 中分類，121 小分類となった．これは，2009 年の雪氷学会全国大会で実施した企画セッションを契機として結成された「雪結晶の新しい分類表を作る会」での 418 通のメールと国立極地研究所で開催された研究集会での議論を通して作成したものであり，2010 年および 2011 年の日本雪氷学会（菊地ら，2010; 菊地ら，2011）および企画セッション（樋口・亀田，2010; 2011）で報告し，議論した成果である．

従来の分類に比べてかなりの数に増え，馴染みの無い名称も加わったこともあり，さらに名称変更も加わって最初の内は馴染めないという声も聞かれるであろうが，先ずは早く沢山の結晶を見ることによって慣れて欲しい．もっとも日本国内で観測している間は，観測できる結晶形は従来と大きく変わらないことは当然である．しかし，一部整合性をとって名称を変更したものがあるので，この点も考慮して観測結果を記録して欲しい．

なお，私たちの手元には，数は多くは無いが，このグローバル分類のカテゴリーに入らない結晶もあり，今後の観測や人工雪生成実験などにより，新たに分類される結晶が発見されることが期待される．

謝　辞

この分類の基になった膨大な数の雪結晶の顕微鏡写真は主として菊地を研究代表者とする観測当時の文部省科学研究費海外学術調査（現地調査）によるところが大きい．また，極域での低温型雪結晶の発見の発端は菊地の第 9 次日本南極地域観測隊越冬隊（1967〜1969）のときのものであり，1975 年と 1978 年のアメリカの南極マクマード基地および南極点基地での観測はニューヨーク州立大学大気科学研究センター教授の V. J. Schaefer らの援助によるものである．各結晶の写真の大部分は菊地と梶川の資料の中から選別されたものである．また，分類写真の CP3a: 針付六花，CP3b: 角柱付六花は ML から，G3a: 十四面体氷晶と G3b: 二十面体氷晶はアラスカ大学名誉教授大竹武博士の厚意によるものである．また，今回のグローバル分類の作成に当たり，国立極地研究所共同研究（「極域と中緯度域で観察される雪結晶の分類に関する検討」，平成 22，23 年度）を利用した研究集会を開催し，議論を深めることが出来た．ここに感謝の意を表します．

文　献

油川英明，2008: 中谷の雪結晶分類における「側面結晶」について．北海道教育大学紀要，**59**，9–17.

浅野浅春，山下　晃，中田勝夫，1989: 多結晶雪の研究（第 1 報），—巨大人工多結晶雪について—，大阪教育大学紀要，第Ⅲ部門，**38**，21–35.

Bailey, M. and J. Hallett, 2004: Growth rates and habits of ice crystals between −20℃ and −70℃. *J. Atmos. Soc.*, **61**, 514–544.

Bailey, M.P. and J. Hallett, 2009: A comprehensive habit diagram for atmospheric ice crystals: Confirmation from the laboratory, AIR Ⅱ, and other field studies. *J. Atmos. Soc.*, **66**, 2888–2899.

Fujiyoshi, Y., 1986: Melting snowflakes. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 307–311.

Fujiyoshi, Y. and G. Wakahama, 1985: On snow particles comprising an aggregate. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1667–1674.

樋口敬二，1968: 極地に降る雪．自然，**23**，38–46.

樋口敬二，2007:「側面結晶」と「交差角板」—雪の結晶分類表が二種類ある不思議—．雪氷，**69**, 398–402.

樋口敬二・亀田貴雄，2010: 雪結晶をめぐる最近の話題．雪氷研究大会（2010・仙台）講演要旨集，20.

樋口敬二・亀田貴雄，2011: 雪結晶をめぐる最近の話題 −孫野・李による雪結晶分類の 45 年目の改訂−．雪氷研究大会（2011・長岡）講演要旨集，14.

Higuchi, K., T. Takeda and K. Kikuchi, 1981: Observations of Clouds and Precipitation in the Arctic Canada. *Org. Committee for POLEX*. 189pp.

Kajikawa, M., K. Kikuchi and C. Magono, 1980: Frequency of occurrence of peculiar shapes of snow crystals. *J. Meteor. Soc., Japan,* **58**, 416–421.

Kameda, T., K. Fujita, O. Sugita and G. Hashida, 2007: *JARE DATA REPORTS*, **298**（Glaciology 32），92 pp.

Kikuchi, K., 1969: Unknown and peculiar shapes of snow crystals observed at Syowa Station, Antarctica. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser., Ⅶ（Geophysics），**3**, 99–116.

Kikuchi, K., 1970: Peculiar shapes of solid precipitation observed at Syowa Station, Antarctica. *J. Meteor. Soc., Japan*, **48**, 243–249.

菊地勝弘，1970: 南極昭和基地における雲物理・大気電気観測報告．天気，**17**, 193–202.

菊地勝弘，1974: 天然雪，特異な雪，多結晶雪を中心とし

て．気象研究ノート，**123**, 767–811.
Kikuchi, K., 1987: *Studies on the Snow Crystals of Low Temperature Types and Arctic Aerosols*. Hokkaido Univ. 283pp.
Kikuchi, K., 1989: *Studies on the Snow Crystals of Low Temperature Types and Arctic Aerosols (The Second Expedition)*. Hokkaido Univ. 183pp.
菊地勝弘，2001: U. Nakaya の Snow Crystals（1954）にでてくる K. Nakata. 雪氷，**63**, 518–523.
菊地勝弘，2006a: 北半球の気候に影響を与えるノルウェー海周辺での水蒸気輸送・降水・気象擾乱の研究．秋田県立大学．553pp.
菊地勝弘，2011: 柱状・板状結晶群の CP6〜CP9 の位置づけ．2011 年日本気象学会秋季大会講演予稿集．p. 234.
Kikuchi, K. and Y. Asuma, 1999: *Studies on the Water Vapor, Aerosols and Nuclei Transportation and Snow Crystals of Low Temperature Types in the Arctic Regions*. Hokkaido Univ. 353pp.
Kikuchi, K. and A.W. Hogan, 1976: Snow crystal observations in summer season at Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser.Ⅶ, (Geophysics), **5**, 1–20.
Kikuchi, K. and A.W. Hogan, 1979: Properties of diamond dust type ice crystals observed in summer season at Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica. *J. Meteor. Soc. Japan*, **57**, 180–190.
Kikuchi, K. and M. Kajikawa, 1979: Comments on V-shaped snow crystals observed in Arctic Canada. *J. Meteor. Soc. Japan*, **57**, 484–487.
Kikuchi, K. and N. Sato, 1984: On the snow crystals of cold temperature types. *Proc. 9th Inter'l Cloud Physics Conf. Tallinn*, 169–172.
Kikuchi, K. and H. Uyeda, 1992: *Studies on the Snow Crystals of Low Temperature Types and Arctic Aerosols (Greenland Expedition)*. Hokkaido Univ. 178 pp.
菊地勝弘・梶川正弘，2011: 雪の結晶図鑑．北海道新聞社，190pp.
菊地勝弘・山下　晃・亀田貴雄・樋口敬二・権田武彦・藤野丈志，雪結晶の新しい分類表を作る会メンバー 2010: 中緯度と極域での観察に基づいた新しい雪結晶分類の提案．雪氷研究大会（2010・仙台）講演要旨集，14.
菊地勝弘・亀田貴雄・樋口敬二・山下　晃，雪結晶の新しい分類表を作る会メンバー，2011: 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）．雪氷研究大会（2011・長岡）講演要旨集，100.
小林禎作，1957: Diffusion cloud chamber による雪結晶習性の研究．低温科学，物理篇 **16**, 1–26.
小林禎作，1970: 雪の結晶，講談社，304pp．写真版 16 pp.
Kobayashi, T., 1965: Vapour growth of ice crystal between −40 and −90℃. *J. Meteor. Soc. Japan*, **43**, 359–367.
Libbrecht, K., 2006: 雪の結晶（*Snowflakes*）．山と渓谷社，111pp.
Magono, C., 1978: *Snow Crystals in the Arctic Canada. Hokkaido Univ.* 172pp.
Magono, C. and C.W. Lee, 1966: Meteorological classification of natural snow crystals. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser.Ⅶ, **4**, 321–335 (with Plates 27).
Mason, B.J., 1957: *The physics of clouds*. Oxford, Clarendon Press. 481pp.
Mason, B.J., 1971: *The physics of clouds* (Second Edition). Oxford, Clarendon Press. 671pp.
中田勝夫，浅野浅春，山下　晃，1991: 多結晶雪の研究（第 2 報），—巨大人工多結晶雪の形態学的分類—，大阪教育大学紀要，第Ⅲ部門，**39**，139–151.
中谷宇吉郎，1938: 雪．岩波書店，161pp.
中谷宇吉郎，1949: 雪の研究．岩波書店，161pp．付録，17pp．図版 319pp.
Nakaya,U., 1954: *Snow crystals —natural and artificial—* Harvard Univ., Press, 510pp.
Ohtake, T., 1970: Unusual crystal in ice fog. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 509–511.
Sato, N. and K. Kikuchi, 1985: Formation mechanisms of snow crystals at low temperature. *Ann. Glaciol.*, **6**, 232–234.
Schaefer, V.J., 1951: Snow and its relationship to experimental meteorology. *Compendium of Meteorology*, edited by T.F. Malone, Boston, Waverly Press. Inc., 221–234.
Schaefer, V.J. and R. Cheng, 1968: The effect of nucleus on ice crystal structure. *Proc. Inter'l Conf. Cloud Physics*, Toronto, Canada. 255–259.
Shimizu, H., 1963: "Long Prism" crystals observed in precipitation in Antarctica. *J. Meteor. Soc., Japan*, **41**, 305–307.
山下　晃，1974: 大型低温箱を使った氷晶の研究．気象研究ノート，**123**, 49–94.
山下　晃，1979: 自由落下中に成長する人工雪の結晶—凍結微水滴からの成長—．日本結晶成長学会誌，**6**, 41–51.
Заморский, А.Д., 1955: Атмосферный Лед. Издателъство Академии　Наук СССР. 200pp.
Клинов, Ф.Я. 1960 : Вода в Атмосферепри Низких Температурах. Издатедъство Академии Наук СССР. 170 pp.

Global classification, new classification of natural snow crystals based on observations in mid-latitude and polar regions

Katsuhiro KIKUCHI[1], Takao KAMEDA[2], Keiji HIGUCHI[3], Akira YAMASHITA[4]
and Working group members for new classification of snow crystals

[1] *Professor Emeritus of Hokkaido University and Akita Prefectural University, Momijidai Kita 2-5-4, Atsubetsu-ku, Sapporo 004-0014*
[2] *Department of Civil and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology, 165, Koencho, Kitami 090-8507*
[3] *Professor Emeritus, Nagoya University, 1-12-4, Wagogaoka, Togocyo, Aichi 470-0154*
[4] *Professor Emeritus, Osaka Kyoiku University, 1-11-1-813, Sakasegawa, Takarazuka, Hyogo 665-0035*

（2012 年 3 月 8 日受付，2012 年 4 月 5 日改稿受付，2012 年 4 月 5 日受理）