

海水上積雪および飛雪に含まれる海塩

長田和雄*・西尾文彦**・樋口敬二*

Sea Salt in Deposited Snow on Sea Ice and Snow Drift

Kazuo OSADA*, Fumihiko NISHIO** and Keiji HIGUCHI*

Abstract: Fallen snow, snow drift and deposited snow on sea ice were collected in 1986 near Syowa Station, East Antarctica. Electroconductivity measurements of meltwater of the collected samples were performed at Syowa Station. The electroconductivities of the samples were mostly of order $10^2 \mu\text{S}/\text{cm}$ as follows; fallen snow ($2.5-18 \mu\text{S}/\text{cm}$), snow drift under blizzard condition and deposited snow on sea ice ($20-10^3 \mu\text{S}/\text{cm}$), part of them more than $10^4 \mu\text{S}/\text{cm}$. From these measurements, it is pointed out that the electroconductivity of deposited snow on sea ice depends on the presence of bare sea ice area. Under blizzard condition, it is suggested that snow drift originates from fallen snow and erosion of deposited snow on sea ice containing much sea salt, such snow drift is transported by strong wind. In this respect, if the sea salt can be evaporated, the appearance of sea salt particles is deduced.

要旨: 昭和基地周辺での海水の状態と海塩輸送の関係をj知る目的で、降雪、飛雪および海水上の積雪を採取した。得た試料の融水の電気伝導度の測定結果から、海塩の輸送機構を推論した。試料の電気伝導度は、降雪で $2.5-18 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、ブリザード時の飛雪および海水上の積雪で $20-10^3 \mu\text{S}/\text{cm}$ (一部は $10^4 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上)で $10^2 \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度の場合が多かった。海水上の積雪の存在状況と電気伝導度の関係は、海水の露出した地域の存在により、海水上の積雪の電気伝導度が高い値を示した。

ブリザード時には、降雪に起因する飛雪と、塩分の高い積雪層の削剝に起因する飛雪とが混在して輸送されると考えられる。また、塩分の高い積雪層の削剝に起因する飛雪の水分を蒸発させる諸条件が整えば、海塩粒子の生成する可能性を示した。

1. はじめに

南極氷床へ輸送される海塩は、主に低気圧のじょう乱(ブリザード)により南大洋の開水面を起源とすると考えられている。この輸送を支配する要因として、AGETA and KOBAYASHI (1978) は、海水縁までの距離よりも低気圧活動の強弱を述べている。しかし、南極昭和基地での海塩核濃度は、低気圧によるじょう乱時のみならず、降水を伴わない南風の時にも増加することが知られている(菊地・矢浦, 1970)。また、小野ら (1980) は、薄い海水上に

*名古屋大学水圏科学研究所. Water Research Institute, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464.

**国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

存在する表面ブラインの凍結によるソルトフラワー（氷華）が風に吹き飛ばされるので、海水が存在しても、その表面から海塩の輸送が起こることを示唆している。

このように、海水に周囲を囲まれた南極氷床の、特に沿岸部の氷床上に輸送される海塩と海水との関係は、海水の広がりや海水の構造などが物質輸送にどのように影響を及ぼすのかを知る観点から重要な研究課題と考えられる。そこで第27次南極地域観測隊に参加した著者らは、昭和基地周辺での海水の状態（広がりや構造）と海塩輸送の関係をj知る目的で、降雪、飛雪および海水上の積雪の採取を行い海塩の輸送機構を推論した。

2. 試料採集と電気伝導度の測定

海水上に積もった積雪の表面の積雪試料は、とつつき岬ルートおよび向岩ルートで1 km ないし 500 m おきに採取した。ルート付近に点在する氷山周辺や、大陸氷床末端付近の一部の地域では、海水が露出していた。海水上の積雪付近の海水の露出と、海水上の積雪に含まれる海塩との関係を明らかにするため、試料採取と同時に積雪の存在状態を記載した。海水上の積雪の断面観測および各層ごとの積雪試料の採取は、ルート上の昭和基地北方2 km のA点で実施した（図1）。

飛雪の採取は、1986年5月から9月にかけて昭和基地内の地学棟北側および気象棟北側で実施した（図2）。地上からの高さ1 m に、ボトル型サンプラーを設置し（図3a）、ブリザード時の飛雪を3時間から12時間ごとに採取した。飛雪の地学棟北側採取地点の環境条件は、風上側に基地の暖房施設があり、これからの汚染が考えられる。しかし、ブリザード時

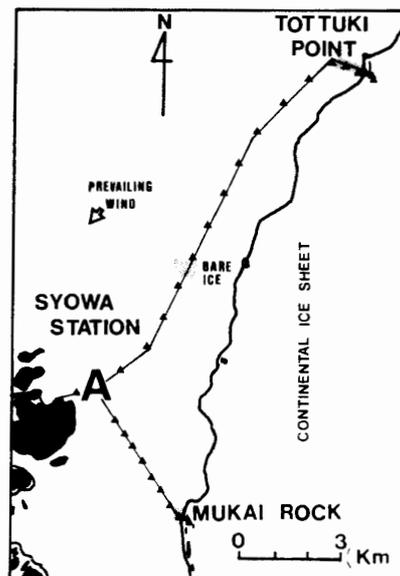


図1 試料採取地点図

Fig. 1. Sampling route from A to Tottuki Point and Mukai Rock. A indicates pit work site. Triangle indicates deposited snow sampling site.

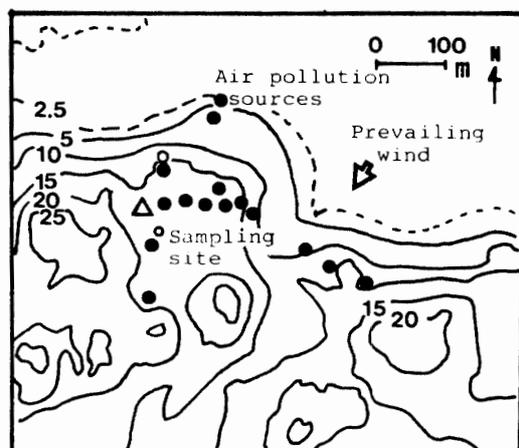
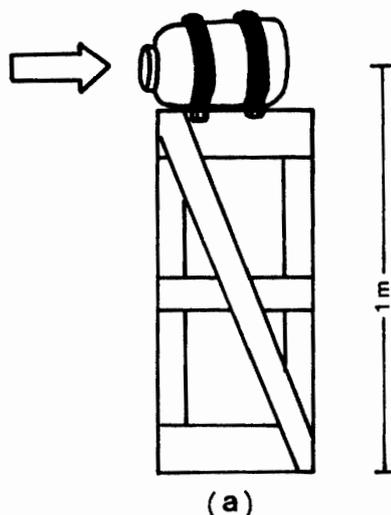


図2 昭和基地内での降雪および飛雪採取地点図

Fig. 2. Topography and location of fallen snow and snow drift sampling sites at Syowa Station. Solid circle indicates air pollution source and open circle indicates snow drift sampling site. Triangle indicates fallen snow sampling site.

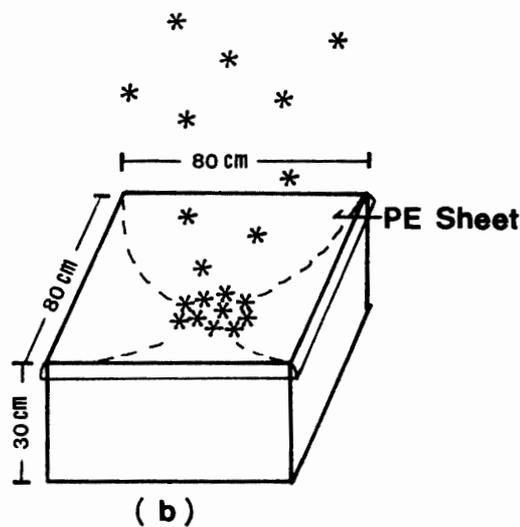
Wind Direction Sampling Bottle



(a)

図3a プリザード時の飛雪の採取方法

Fig. 3a. Snow drift collector.



(b)

図3b 穏やかに降る降雪の採取方法

Fig. 3b. Fallen snow collector.

の強風の条件下で試料採取間隔を短くし、かつ採取上の安全を考慮した地点であり、後述するように、強風時の飛雪の電気伝導度が約 $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上の高い値であれば、相対的に汚染は無視できると考えた。

降雪の採取は、1986年6月下旬から7月にかけて気象棟西側（図2に三角で示す）で80 cm 四方のシート型サンプラー（図3b）を用いて飛雪が混入することのないように弱風下で穏やかに降る降雪を対象とした。シート型サンプラーには、予め純水で洗浄したポリエチレンシートを用いた。また、降雪の採取は、基地設備からの汚染の少ないと考えられる弱い西風の場合に実施した。

昭和基地の飛雪では、村山 (1987) の観測に基づき、電気伝導度の約 90% 以上を海塩の寄与として説明できることから、それぞれの試料に含まれる海塩の指標として融水の電気伝導度を測定した。測定は、試料を室温で融解した後、東亜電波製 CM-50AT に 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下でセル定数 0.1, 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上でセル定数 1 の電極をそれぞれ用いて実施した。大気中の炭酸ガスの影響は約 0.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と見積もれるが、測定に恒温槽を使用していないため厳密な見積もりは難しい。従って 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下の場合には、相対的な誤差の増加が考えられる。

3. 結果と考察

3.1. 海水上の積雪の存在状態と電気伝導度の関係

昭和基地周辺の海水上路で実施した観測結果を表 1 にまとめた。海水上積雪の表面の試料の電気伝導度は、 $10-10^3 \mu\text{S}/\text{cm}$ と広範囲に渡るが、海水の露出している地域に近づくにつれて増加する傾向がある。海水の露出している地域に数 10 m 近接する積雪の電気伝導度の値は、 $10^4 \mu\text{S}/\text{cm}$ を示し、かつ積雪が数 cm と薄いことから、表面ブライン (ZUBOV, 1959) を多量に含んだ積雪と考えられる (MARTIN, 1979)。これに対して、沿岸部のタイドクラックを挟んで氷床上の積雪の電気伝導度の値は、タイドクラックから 50 m ほどで、20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下となる。また、沿岸から氷床上へ約 40 km 南の S25 地点でのコア解析 (1.5–25 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (西尾ら, 1987) や、奥氷河岩近傍の白瀬氷河上湖の採水調査 (10–30 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (西尾ら, 1984) から電気伝導度について同じような値を得ている。このように海水周辺の氷床域での積雪の電気伝導度は、ほぼ 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下である。先に述べたようにタイドクラックを境にして、電気伝導度の値が著しく異なることから、海水上の積雪は海塩を多量に含むため、電気伝導度の値が高くなると考えられる。

表 1 海水上の積雪の存在と電気伝導の関係

Table 1. Relation between deposited snow condition on sea ice and electroconductivity.

Classification of deposited snow	Electroconductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Deposited snow on continental ice sheet (Tottuki Point)	2.6 ± 0.3
Fallen snow (Syowa Station)	2.5 - 18
Deposited snow far from bare sea ice	16 - 115
Deposited snow near to bare sea ice	250 - 412
Deposited snow quite near to bare sea ice	$1.3 \times 10^3 - 1.1 \times 10^4$

Deposited snow was collected during August 1986 along Tottuki Point and Mukai Rocks route near Syowa Station.

3.2. 海水上積雪の断面観測

図 4 に、海水上積雪の断面観測による積雪層位と電気伝導度の分布を示す。海水上の約

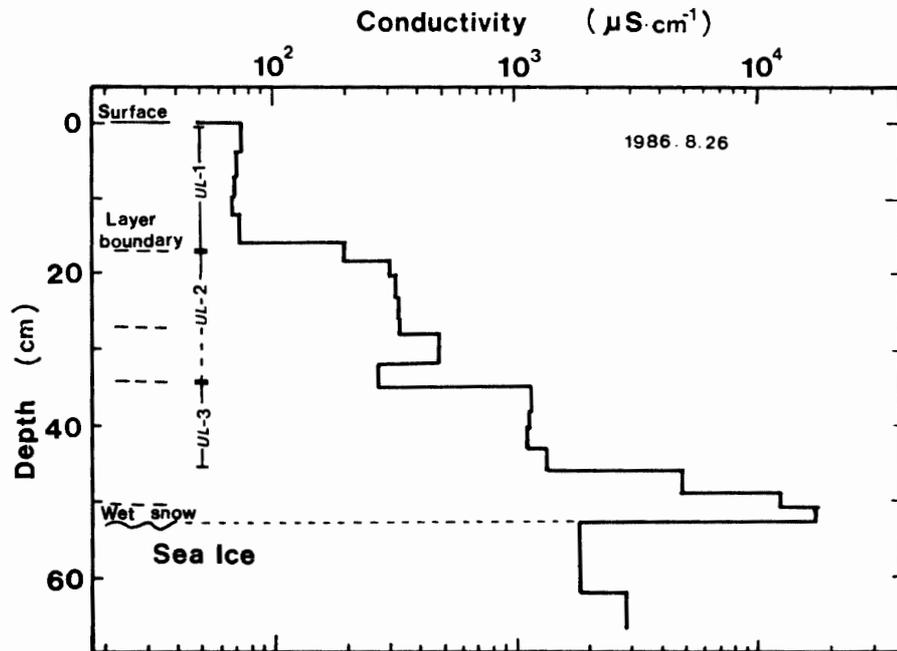


図4 海氷上のA点での積雪の電気伝導度

Fig. 4. Vertical profile of electroconductivity of deposited snow on sea ice at point A. UL indicates unit layer.

3 cmのぬれ雪層は、積雪の荷重によるブライン排水孔中の圧力増加や積雪の毛管作用で、海氷中のブライン排水孔を通り、ブラインが上方へ移動したためと考えられる(滝沢・若土, 1982; 河西・小野, 1984)。ここに示したA点以外の断面観測の結果でも、厚さ30 cmの積雪で海氷上に約3 cmのぬれ雪層が見られた。ぬれ雪層での電気伝導度の値は、 $10^4 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上の高い値を示した。ぬれ雪層の上に堆積した層の電気伝導度は、 $10^2 - 10^3 \mu\text{S}/\text{cm}$ であり3.1. で述べた海氷上の積雪の表面の積雪試料と同じオーダーの値である。また一回の低気圧しよう乱で形成され则认为られる単位層(WATANABE, 1978)の中ではほぼ均一であるが、単位層(図4; UL-1,-2,-3)ごとに、電気伝導度が変化している。このことから、ぬれ雪層の上に堆積した積雪層の電気伝導度は、ぬれ雪層を超えての海氷からのブラインのしみ上がりによる海塩ではなく、飛雪が堆積する時に含んでいた海塩に依存すると考えられる。また、A点では積雪の上層ほど電気伝導度の値が低い。冰山などによる吹きだまりを除いて、一般に、海氷上の積雪が厚くなるにつれて風上側の海氷の露出した地域は遠ざかる。従ってA点では、海氷上の積雪の厚さが増加するにつれて風上側の海氷の露出した地域が遠くなったため、上層ほど値が減少したと考えられる。

3.3. 降雪および飛雪

図5に、昭和基地で採取した降雪およびブリザード時の飛雪の電気伝導度をそれぞれ三角、丸印で示す。この図から電気伝導度が $10^0 - 10^3 \mu\text{S}/\text{cm}$ も変化し、約 $10^2 \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度の場合の多いことがわかる。 $10^3 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上の飛雪試料が採取された5月下旬は、昭和基地の

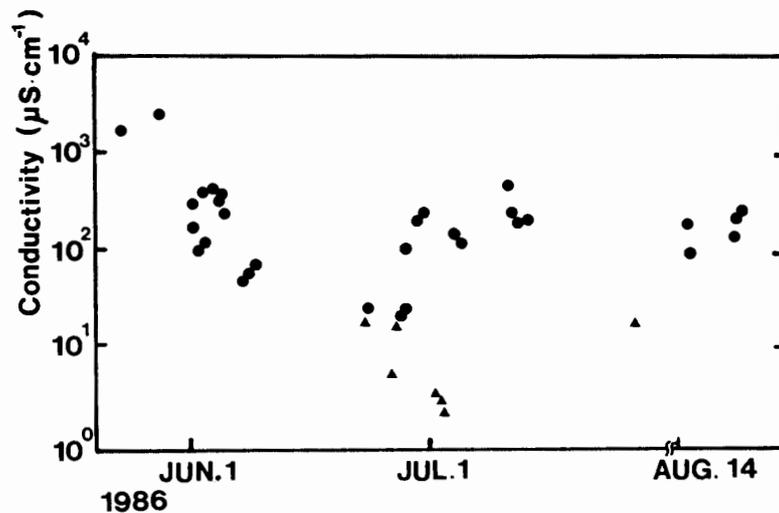


図5 昭和基地での飛雪および降雪の電気伝導度

Fig. 5. Electroconductivity of snow drift and fallen snow at Syowa Station. Solid circle indicates snow drift and triangle indicates fallen snow.

風上側に存在する海氷上に積雪がなかった。また、主に6月下旬から7月の弱風下での穏やかに降る降雪の電気伝導度は、 $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下の値を示し、3.1.で述べた沿岸付近の氷床上の積雪とほぼ同じ値である。このように、穏やかに降る降雪にくらべてブリザード時の飛雪は、著しく高い電気伝導度の値を示した。穏やかに降る降雪とブリザード時の降雪とでは、開水面からの海塩の輸送力が異なると考えられるため、含まれる海塩の量も異なると予想される。しかし、上述したように氷床上の積雪と昭和基地の穏やかに降る降雪の電気伝導度が同程度の値を示すことから、ブリザード時の降雪も穏やかに降る降雪も顕著な差があるとは考えられない。

以上のことから、昭和基地周辺で観測された電気伝導度の高い値を持つ飛雪や海氷上の積雪に含まれる海塩は、次のように考えられる。もともとは約 $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下の海塩しか含まない降雪が、ブリザード時の強風で輸送される際に、海氷上の表面ブラインおよびしみ上がりによるブラインを含んだ薄い積雪の削剝で生じた飛雪と混合するために、海氷上の積雪や昭和基地で観測した飛雪は、海塩を多量に含むようになったと考えられる。

3.4. 飛雪による海氷からの海塩輸送

菊地・矢浦(1970)によれば、昭和基地で観測した海塩核濃度は、ブリザード時と降水を伴わない南風の場合に増加した。この南風による海塩核濃度の増加は、特に海氷が南緯60度以北にまで最も拡大する9月(KUSUNOKI, 1981)に顕著となっており、風向と時期から考えて、開水面からの輸送とは考えにくい。後に行われた観測でも、昭和基地における海塩核濃度は、必ずしも風速に相関して変動しているわけではないがブリザード中に高くなると報告されている(伊藤, 1980)。このように昭和基地での海塩核濃度は、ブリザード時に開水面から輸送される場合、開水面のない南風の吹く場合に増加する。従って、後者の場合には

海氷の表面に海塩核を生成する機構があると推測できる。

ここでは、開水面から輸送されたのではない南風の場合について、海水を間接的な起源とする海塩核の生成を推論する。いいかえれば、海氷成長時に排出されるブラインを起源とする海塩であるソルトフラワーによる大気中の輸送(小野ら, 1980)とは異なり、海氷上のブラインを含む薄い積雪の削剝で生じた飛雪の水分の蒸発による海塩核生成の可能性について考察する。

昭和基地での飛雪の電気伝導度の代表値を $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度と考えると村山(1987)に示された昭和基地での雪の電気伝導度と化学成分から、 $130 \mu\text{S}/\text{cm}$ の飛雪 1kg から 57mg の塩が蒸発後に残る。飛雪を球状の粒子として考え、その半径を 0.1mm とし(BUDD, 1966)、氷の完全な球体ではないため密度を $700\text{kg}/\text{m}^3$ と仮定して、それぞれの飛雪粒子が蒸発し、塩化ナトリウム(密度約 $2200\text{kg}/\text{m}^3$)が残るとすると、この塩化ナトリウムは、半径 $3.4\mu\text{m}$ の球状相当の体積を持つことになる。この過程でできる海塩粒子は、その大きさから通常言われる海塩粒子と同様に振る舞うと考えられる。しかし、このように生成したとしても、海水と比較して、海氷からのブラインは、化学的分別作用を受けているため(CRAGIN *et al.*, 1986)、海水から生成された海塩と必ずしも同じ化学組成とは限らない。前述の降水を伴わない南風の場合には、少なくともブリザード時に比べて相対湿度が低いと考えられることから、このような飛雪の水分を蒸発させる諸条件が整えば、海塩核濃度の増加する現象に対する一つの可能な説明として、高塩分の飛雪の水分が蒸発して海塩核をもたらすと推論できる。

謝 辞

調査を支援していただいた第27次南極地域観測隊の吉田栄夫隊長、内藤靖彦越冬隊長および第27次越冬隊員の方々、有益な助言をいただいた名古屋大学水圏科学研究所の上田豊氏、大畑哲夫氏、瀬古勝基氏に深く感謝する。

文 献

- AGETA, Y. and KOBAYASHI, S. (1978): Observations of sea-salt particles in the air in Mizuho Plateau. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 7, 93–99.
- BUDD, W. F. (1966): The drifting of nonuniform snow particles. Studies in Antarctic Meteorology, ed. by M. J. RUBIN. Washinton, D. C., Am. Geophys. Union, 59–70 (Antarct. Res. Ser., Vol. 9).
- CRAGIN, J. H., Gow, A. J. and KOVACS, A. (1986): Chemical fractionation of brine in the McMurdo Ice Shelf, Antarctica. J. Glaciol., 32, 307–313.
- 伊藤朋之 (1980): 南極昭和基地における大気エアロゾル観測. 天気, 27, 13–24.
- 河西 孝・小野延雄 (1984): 薄い海氷中におけるブラインの上方移動に関する実験的研究. 低温科学, 物理編, 43, 149–155.
- 菊地勝弘・矢浦省吾 (1970): 昭和基地における海塩核の観測. 1970年度気象学会春期大会講演予稿集, 113.

- KUSUNOKI, K. (1981): Variations of sea ice conditions in Lützow-Holm Bay area, in Antarctica, in the last 20 years. *Sea Level, Ice and Climatic Change*, ed. by I. ALLISON. Washington, D.C., IAHS, 171–176 (IAHS Publ., No. 131).
- MARTIN, S. (1979): A field study of brine drainage and oil entrainment in first-year sea ice. *J. Glaciol.*, **22**, 473–502.
- 村山治太 (1987): 雪に含まれた塩の組成—昭和基地 1985 年. 1987 年度地球化学会年会講演予稿集, 1023.
- 西尾文彦・内藤靖彦・岩波圭祐・二ツ町悟 (1984): 奥氷河岩・白瀬氷河上湖の採水調査. 南極資料, **83**, 75–80.
- 西尾文彦・長田和雄・樋口敬二 (1987): 表層積雪の chemical stratigraphy. 第 10 回極域気水圏シンポジウムプログラム・講演要旨, 東京, 国立極地研究所, 56–57.
- 小野延雄・若土正暁・河村俊行 (1980): 極域厳寒期における海面凍結過程 I—結氷初期の蒸発の役割と塩のふるまい—. *低温科学, 物理編*, **39**, 159–165.
- 滝沢隆俊・若土正暁 (1978): 海氷上の積雪. *低温科学, 物理編*, **41**, 159–165.
- WATANABE, O. (1978): Stratigraphic studies of the snow cover in Mizuho Plateau. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec Issue*, **7**, 154–181.
- ZUBOV, N. N. (1959): 海氷の物理的・化学的性質. 北氷洋の氷, 第 V 章. 札幌, 北大低温科学研究所, 1–80.

(1987 年 12 月 24 日受理; 1988 年 1 月 13 日改訂稿受理)