

B4

レーザ高度計による流氷海拔高度の観測 (1993-1995 年) Observation of Okhotsk Sea Ice by a Laser Altimeter in 1995-1995

石津 美津雄、水谷 耕平、板部 敏和

Mitsuo Ishizu, Ko-hei Mizutani, Toshikazu Itabe

郵政省 通信総合研究所

Communications Research Laboratory,

Ministry of Posts and Telecommunications

Abstract: An airborne laser altimeter using a diode-pumped Nd:YAG laser have been developed for topography of ice and snow regions. Okhotsk sea ice have been measured in winter seasons of 1993-1995 and the data show unexpected high ice freeboard rising to mean heights of 40 cm and sail heights of 80 cm. Very high correlation was found between the mean freeboard and ice packing density, which will provide a new method estimating total ice amounts. Also studied in this paper is the ranging accuracy using a coherent detection technique which provides improvements of mapping efficiency and eye-safety of the system. This technique enables scanning the laser beam at eye-safe wavelengths with the range accuracy of centi-meter levels from satellites and .

1. はじめに

地球温暖化の進行状況を探るため、その影響が顕著に現れる海面上昇や極域氷床の変化の観測が求められている。極域氷床や海氷は、地上観測や航空機観測では全体の観測が困難で、衛星観測が最適であり合成開口レーダやレーザ高度計による観測が期待されている。両者は各々長所短所があ

るが、レーザ高度計はリアルタイムに高度を計測してゆく点に特徴がある。CRL ではこの衛星搭載の技術開発のため、Nd:YAG レーザを用いた航空機搭載レーザ高度計を開発した。性能は、毎秒 20 回の測定速度で 4300m までの距離を精度 5cm/pulse で観測できる。今後の研究として、アイセーフティー化、小型化、高性能化を目指してコヒーレント検出型レーザ高度計の開発を進めている。

高度計観測では、この装置を用いて国内の顕著な雪氷事象であるオホーツク海流氷を観測した (1993~1995、1997)。この流氷は厚さが薄いので風と潮流による流動性が高いので直接観測は不可能で、高度計による流氷分布に関する観測はこれまで得られていない分布データが得られることに意義がある。解析は、データ自身から海面を推定しこれから測った流氷海拔高度から、この海域の流氷に関する特徴を調べた。

本報告では、高度計装置の概略と流氷データの解析結果、及び、コヒーレント検出型高度計の計画について述べる。

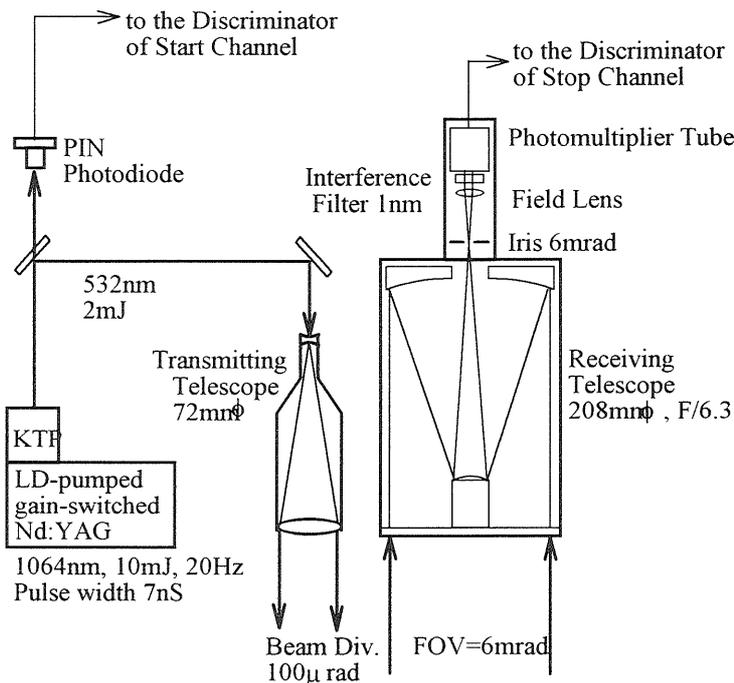


Fig. 1 Optical block diagram of the laser altimeter.

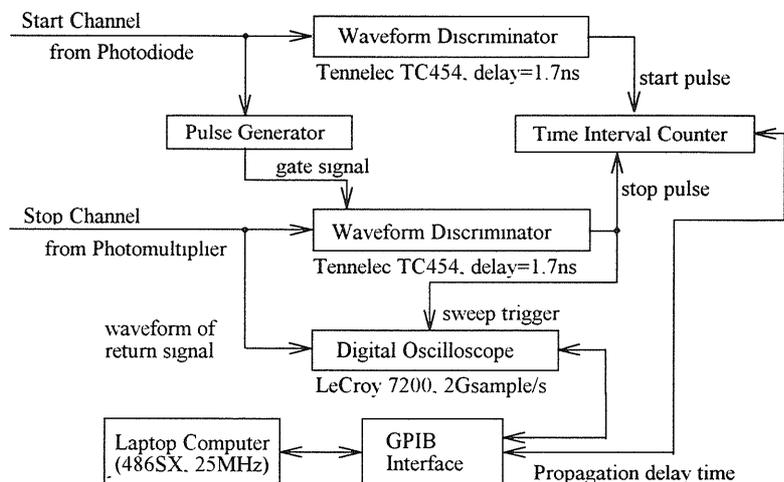


Fig. 2 Electronic block diagram of the laser altimeter.

2. 装置の概略

高度計は光学部とデータ処理部からなり、それぞれ Fig.1 と Fig. 2 にブロック図を示す。光学部は第 2 高調波出力 2mJ、ハルス周波数 20Hz の LD 励起 Nd:YAG レーザの出力を、口径 72mm の送信望遠鏡から地表へ送信している。地上からの散乱光は口径 203mm の反射望遠鏡で集光し、半値全幅 1nm の干渉フィルタを通してチャンネルプレート付光電子増倍管 (PMT) で検出している。送受信ビーム幅はそれぞれ、約 100 μ rad と 6mrad である。データ処理部は、レーザハルスのモニタ用フォトダイオード (PD) と PMT の送受信信号を、波高変化による時間誤差を除くハルス識別器を通して、

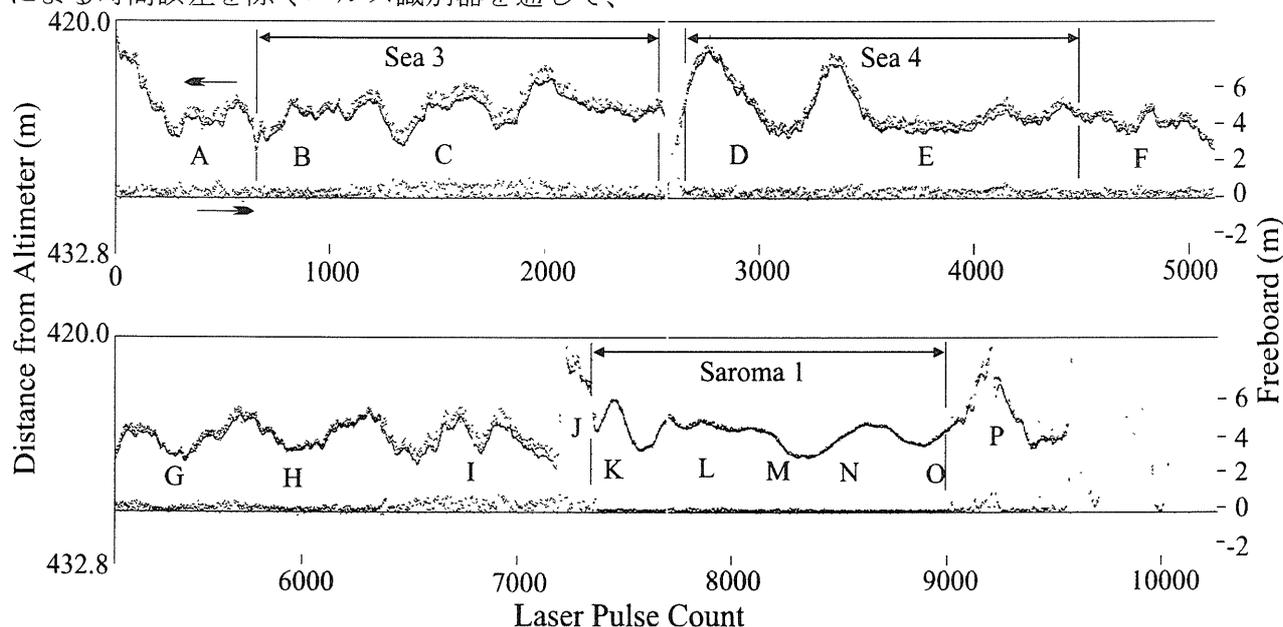


Fig. 3 Plots of the sea ice data; upper is raw and estimated sea level and lower is ice freeboard.

伝搬時間を計測し、高度を求めている。また、受信信号波形を記録できる。光ファイバジャイロと差動 GPS で搭載飛行機の位置と姿勢を計測している

3. 流氷観測と解析

北海道北岸には 1 月から 4 月にかけて流氷が漂着・発生する。観測は 1993 ~1995、1997 年のこの時期、地球科学技術フォーラム地球観測委員会極域雪氷圏サイエンスチームのオホーツク海氷実験に同期して行われた。Fig.3 に流氷

高度データの例を示す。図の上段は高度計データとこれから推定した海面高度をプロットした。下段はこの海面を基準にした海拔高度をプロットした。この図で流氷平均高度は 28~34cm であるが、ピークでは 80cm の高度がある。この海域で気象学的に期待される流氷厚は 40cm で、これが海上に浮かぶと海拔高度は 4.3cm にしかならない。しかし、日本海とオホーツク海沿岸は多雪地帯であることから、Weddell 海流氷の多数の調査結果 (1)-(2) と同様に、積雪と流氷の変形発達が北海道沿岸の流氷の発達に大きく関与していることを示唆している。流氷の平均高度が 30cm でその海上部分が雪からなるとすると、海面下深度は

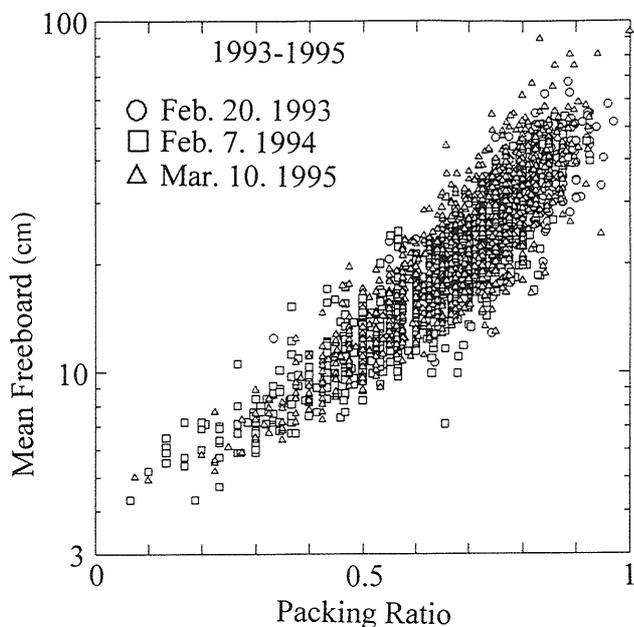


Fig. 4 Plot of mean freeboard versus packing density. 97cm が期待され、これは気象学的流氷厚の 2.5 倍である。流氷団が風や潮流により容易に変形することから、流氷は 2 層 3 層に重なり合っていると考えられる。実際、海岸に漂着したものは 1 m の厚さのものが多数ありこれを裏付ける。

流氷の全体的特徴を調べるため、平均海拔高度と密接度を 2 秒ごと(40 データ)に求め、散布図を調べた。1993-95 年の利用できるすべてのデータに対してプロットしたものを Fig. 4 に示す。両者は高い相関があり、密接度から平均高度を求められることがわかる。オホーツク海の各海域に対し

てこの相関データが蓄積されれば、衛星画像データなどから平均高度分布を求め、さらに氷量分布も求めることができるであろう。

4. コヒーレント検出型レーザ高度計

開発した高度計は送信波長が 532nm なのでアイセーフティーと、飛行機の航跡上の 1 次元観測しかできないことに問題を残している。このためレーザ発振波長を 1.5 μm 以上にするとともに、飛行方向に直角に走査して地図を作製できるように、改良中である。レーザの安全波長域では高速で高感度の PMT がなく、PD または APD 検出器を用いることになる。これらは暗電流と増幅器雑音のため光子計数レベルの検出はできないので、コヒーレント検出法で感度を上げ距離精度を維持する。現在のところ、波長 1.5 μm 以上の送信レーザの利用は難しいので波長は 1 μm とし、高度は衛星と飛行機の 1km と 500km とし、距離精度 ΔR の見積もりを PMT と PD の直接検波とコヒーレント検波方式の 3 通りで行った。

受信口径は地上スポット径を考慮して 1km 高度でそれぞれ 10、10、1.2 cm、500km 高度では 40、40、10cm とした。精度 ΔR はレーザハルス幅 $\Delta T(7\text{ns})$ と S/N 比から、 $\Delta R=c \Delta T / 2 (S/N)$ と表せる。受信信号強度は距離 Z に対し、 $E_r=E_t A_r Z^{-2} T_o T_a^2 r \Omega^{-1}$ となる。 E_r , E_t は受信、送信エネルギー、 A_r

Detection	Direct (PMT) gain 5.0E5 $\eta=0.046$ Fb=1Å	Direct (PD) fc=4.0GHz $\eta=0.8$, Fb=1Å Id=0.1nA, In=9pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$	Coherent (PD) fc=4GHz $\eta=0.8$, (Fb= 0.2Å) Id=0.1nA, In=9pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
wavelength(nm)	532	1064	1064
Aperture (cm)	10	10	1.2
FOV (mrad)	1	1	0.11
Ns (photon)	2.0E6	4.1E6	9.5E4
Nb (photon)	25	31	1.1E-3
Nd (photon)	4.1E-3	12	(12)
Nn (photon)	-	6.7E4	75
accuracy (cm)	0.07	2	0.4

Table 1. Estimation of the range accuracy from 1 km altitude using direct and coherent detection with transmitting laser power of 1 mJ.

Detection	Direct (PMT)	Direct (PD)	Coherent (PD)
Aperture (cm)	40	40	10
FOV (mrad)	1	1	0.013
Ns (photon)	1.3E4	2.5E4	2.6E3
Nb (photon)	410	490	1.1E-3
Nd (photon)	4.1E-3	12	(12)
Nn (photon)	-	6.7E4	75
accuracy (cm)	1	280	3

Table 2. Estimation of ranging accuracy from 500 km altitude. System parameters are the same as in Table 1 except for the laser power of 100 mJ and the receiving aperture.

受信開口面積、 T_o 、 T_a は光学系と大気透過率、 r は地表面アルベド、 Ω は散乱立体角(sr)である。背景光雑音は $E_b=R_t F_v F_b A_r T_g$ で表せる。 R_t は太陽の地表散乱光、 F_v は受信視野(sr)、 F_b はフィルタバンド幅(A)、 T_g は受信ゲート時間(15ns)である。雑音源にはこのほか受信素子の暗電流、増幅器雑音を考慮した。これらを等価入射光子数 N_s 、 N_b 、 N_d 、 N_n に換算して、 $S/N = N_s / (N_s+N_b+N_d+N_n)^{1/2}$ と表せる。見積もりでは雪氷反射率 $r=0.5$ でランバート反射を仮定し、大気透過率は1.0、太陽散乱光強度は波長0.5 (1.0) μm で0.025 (0.016) $\text{W}/(\text{m}^2 \text{sr A})$ とした。装置のパラメータと距離精度の表をTable 1-2に示す

これらの表から、高度 1km ではいずれも $\Delta R < 2\text{cm}$ で十分な精度であるが、コヒーレント方式では送受信開口径がわずかに 1.2cm ϕ ですみ、飛行機上からビームを高速走査することが可能になる。衛星高度からは、PD 直接検波方式は増幅器雑音のため精度が 3m に劣化してしまうが、コヒーレント方式は口径が直接検波方式よりはるかに小さいにも関わらず、PMT と同等の cm レベルの精度を維持できる。アイセイフティーと小型軽量化は衛星搭載に非常に有利である。この実現には光行差を回折限界の精度で補正する追尾技術も必要である。この方式は高速半導体検出器が使用できるので、モード同期レーザを用いた衛星レーザ測距においても有効な方式である。

5. まとめ

飛行機搭載レーザ高度計を開発し、流氷周辺海域にあたる北海道沿岸の流氷観測を行った。この

装置は送信ビームが機体に固定であり、飛行航跡上のデータを取得する。それでも従来は直接測定できない薄い流氷域で、その平均海拔高度は予想よりはるかに高い 30~40cm あり、これと流氷密接度に高い正の相関があることを明らかにした。これは密接度から海拔密度を推定する新しい方法が可能であることを示し、衛星流氷観測に応用されることが期待される。

今後の開発は、高度計地図の作製を目指して2次元走査を可能にするため、とりあえず波長 1 μm のコヒーレント検出型の高度計の製作を進めている。距離精度の比較では波長 0.5 μm の PMT 検出の高度計と同等の精度が得られ、同時に大幅な小型化が可能である。衛星搭載では、アイセイフティーと装置の小型化が重要であり、これを実現できるコヒーレント方式は Doppler Lidar だけでなく高度計や衛星レーザ測距等にも有効である試算が得られた。

本研究の一部は科学技術庁海洋開発及び地球科学技術調査促進費、及び、宇宙開発事業団地球観測委員会の研究補助を受けて行った

references

- (1) H. Eicken et. al.; "Characteristics and distribution patterns of snow and meteoric ice in the Weddell Sea and their contribution to the mass balance sea ice", *Ann. Geophysicae*, 12, 80-93(1994).
- (2) R. A. Masson et. Al.; "Winter snow cover on sea ice in the Weddell Sea", *J. Geophys. Res.*, 102, C1, 1101-1117(1997).