

バローキャニオンにおける流速観測

三寺 史夫^{*1} 畠山 清^{*1} 柏野祐二^{*1}
佐々木保徳^{*1} T. ワインガートナー^{*2} V. K. パブロフ^{*3}

本報告では、海洋科学技術センターが1992年9月～1993年9月まで行った、アラスカ西海岸に隣接するバローキャニオン上端部（水深80m）に設置した音響ドップラー流向流速プロファイラーによる流速計測について記述する。

バローにおける流れは平均的には谷を下る向きに流れるが、2週間に1度程度1.0 m/sにも達する強い逆転流（湧昇）がある。湧昇時には水温上昇を伴うことがある。この高温水は北極海の200m以深に存在する大西洋水と考えられる。12月中旬に生じたイベントについて詳しく見てみると、湧昇流は、強い北東風が吹いた時にアラスカ側で沿岸ポリニアが開いたため生じたことがわかった。北東風が止んだ後、下層に強いジェットが生じた。これは沿岸ポリニアで生成された高塩分水が重力流となってバローキャニオンを下ったためである。

キーワード：バローキャニオン、湧昇、ポリニア、重力流

Velocity Measurements at the Barrow Canyon

Humio MITSUDERA^{*4} Kiyoshi HATAKEYAMA^{*4}
Yuji KASHINO^{*4} Yasunori SASAKI^{*4}
Tom WEINGARTNER^{*5} Vladimir K. PAVLOV^{*6}

In this paper we describe the results from ADCP measurements conducted by JAMSTEC from September 1992 to September 1993. The ADCP mooring was deployed at the top of the Barrow Canyon (80m in depth) situated west of the Alaskan coast.

The principal axis of the current lies in the long-canyon direction in the Barrow Canyon. Currents flow downslope on the average, but flow in reverse (upwelling) with a flow sometimes exceeding 1.0 m/s being observed occasionally (in every 2 or 3 weeks). The upwelling frequently accompanies a temperature rise, which is due to the warm Atlantic water that exists below 200m depth in the Arctic Ocean.

An event which contains a strong flow reversal and subsequent downslope flow occurred

-
- * 1 海洋科学技術センター, 海洋観測研究部
 - * 2 アラスカ大学
 - * 3 ロシア北極南極研究所
 - * 4 Ocean Research Department
 - * 5 University of Alaska, U.S.A
 - * 6 Arctic and Antarctic Research Institute, Russia

in the mid December 1992. The flow reversal occurred when coastal polynyas form along the Alaskan coast due to a northeasterly wind. After the a northeasterly wind stopped, a bottom intensified jet is formed. It is conjectured that high salinity (i.e., heavy) water was produced in the coastal polynyas, and flowed downslope as a gravity current.

Key Words : Barrow Canyon, Upwelling, Polynya, Gravity currents

1 はじめに

北極圏は地球温暖化に最も敏感な地域といわれており、その兆候は氷の融解などにいち早く現れるといわれている。同時に氷の融解による海水・氷床面積の変化による太陽からの正味の短波放射の変化、大量の融水による大規模な海洋大循環の変化等によって、グローバルな気候システムへ影響を与えていく。したがって、カタストロフィックな気候変動メカニズムの解明には、極域における大気-海洋-海水相互作用のメカニズムの理解が欠かすことができない。

極域の海洋変動の解明に向け、海洋科学技術センター（以下センター）では1992年秋よりアラスカとシベリアに挟まれたチュクチ海（図1）でCTD、流速計等を用いて海洋観測を開始した。チュクチ海はアラスカとシベリアに挟まれた非常に広く浅い大陸棚であるが、シベリア沿岸からの大量の河川水（淡水）の流入、ベーリング海からの流入、北極中層の北大西洋中層水（高塩分水）の貫入等、非常に複雑な海況を示す。バローキャニオンはアラスカ側にある深さ200m弱の海谷で、大陸棚端に向かうにしたがって徐々に深くなっている。バローキャニオンのあるアラスカ西海岸では冬季に東風によって沿岸ポリニアが開くため結氷活動が盛んであり、したがってここでは海水生成時のブライン排出のため高塩分を持つ海水が大量に作られている。この高塩分水はキャニオ

ンを通して北極海に流出し、北極海内部で50m-200m深あたりに存在する「冷たい塩分躍層（Cold Halocline）」を維持している可能性が指摘されている。

「冷たい塩分躍層」は北極海に広く分布している密度躍層である。水温は約-1.5℃でほぼ一様で、密度成層は塩分によってなされておりそのレンジは約30~34psuである。北極海内部ではこの低温の水（中冷水）は、その下水深200mから500mに存在する高温（0.5℃）高塩（34.3psu）の大西洋中層水を覆うような構造になっている。したがって、極端な場合もし中冷水がなくなれば高温の大西洋中層水によって膨大な量の海水が融ける事態も考えられ、アルベドと全球的な熱塩循環が劇的に変わり、気候システムのカタストロフィックな変化を促進することが予想される。現実的にも、比較的低塩分の中冷水が北大西洋に流れ出すことにより、現在はグリーンランド沖で生じている深層水形成地点およびその強度を変化させる可能性がある（図2, Aagaard and Carmack, 1994）。このように、縁辺海と北極海内部での相互作用は全球的な意味あいを持つ。チュクチ海は狭い縁辺海ではあるが、気候変動問題を解明する上で重要な海域といえる。

ここでは、センターが1992年9月24日から一年間、バローキャニオン上端部（水深80m）に設置した音響ドップラー流向流速プロファイラー（ADCP）による流速計測の結果について報告する。

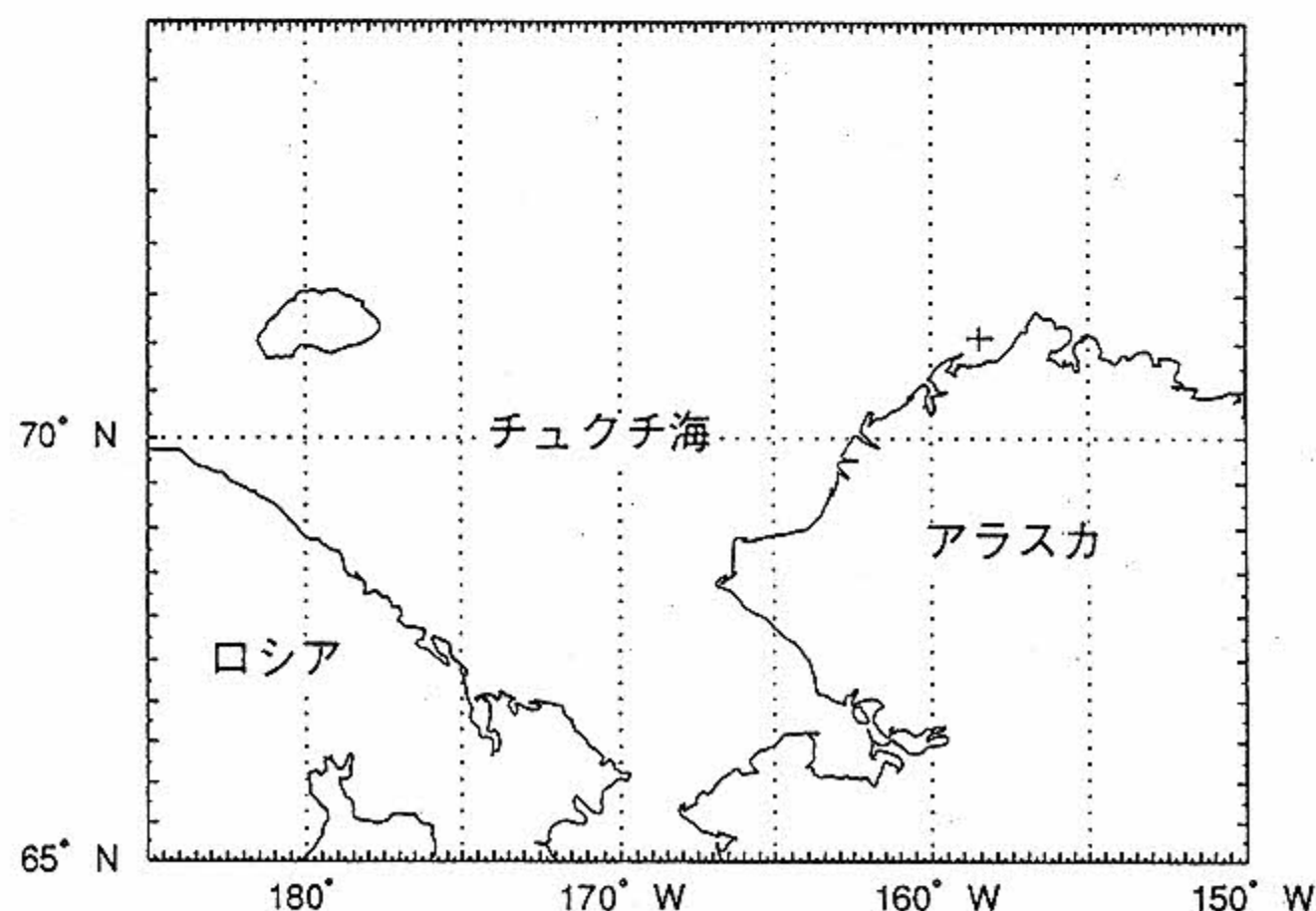


図1 チュクチ海の地形。+は係留系の設置位置。

Fig.1 Geological location of Chukchi Sea. + indicates the location of the ADCP Mooring.

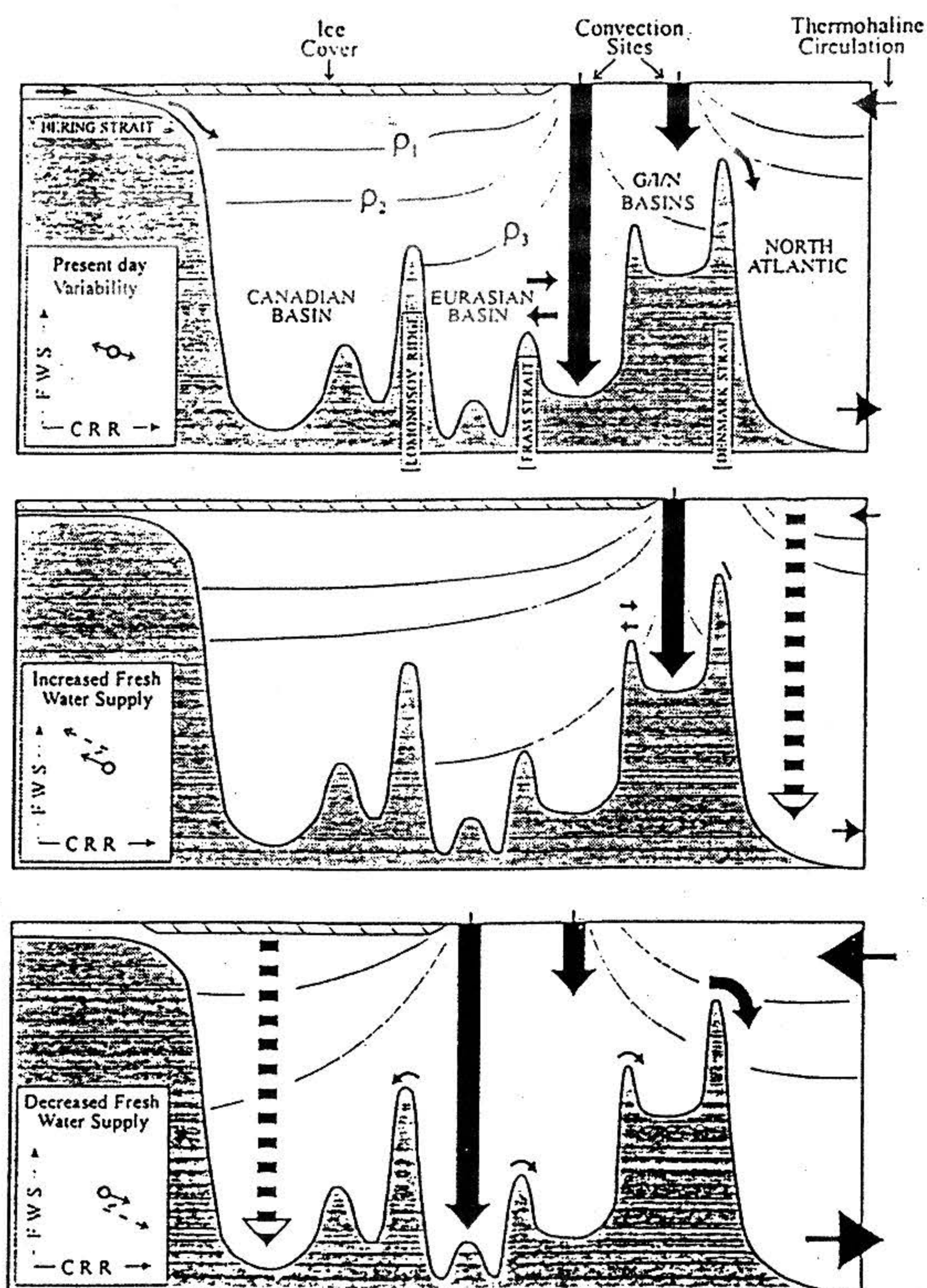


図2 「冷たい塩分躍層」が地球規模の対流に果たす役割。

Fig. 2 The role of the 'Cold Halocline' on the global convection. (From Aagaard and Carmack, 1994)

2 データ

ADCPによる流速観測は1992年9月24日～1993年9月24日に行われた。使用された機器はRD Instruments社の150kHzのもので、アラスカ北部のバローキャニオン南端に設置された。データは60m深より2m深までの東西・南北・鉛直流速成分が30分毎に記録されている。バローキャニオンの流況は谷の走行である東北東（北から60°）に卓越しているので、この谷に沿う方向とそれに直交する成分に分けて解析を行った。また、ADCPには水温計が付いており、その結果も同時に解析した。係留システムを図3に示す。

はじめに、異常値の検出を、以下の基準に従って行った。

- (1) エラーステータスが一つでもあるデータ。
- (2) 設置位置の海水温が±7℃であるデータ。
- (3) 流速値が±2.0m以上。

次に、流向の磁気偏角の補正および谷方向への変換を

$$U = u \cdot \cos(-RD - 30^\circ) - v \cdot \sin(-RD - 30^\circ)$$

$$V = u \cdot \sin(-RD - 30^\circ) + v \cdot \cos(-RD - 30^\circ)$$

として行った。ここで、 U は谷方向の流速、 V は直交方向の流速、 u, v はそれぞれ観測された東西・南北流速成分、 RD は磁気偏角の値である。

3 流速, 水温の時系列

図4(a)~(l)に1992年10月~1993年9月の毎時の流速プロフィール, 水温, 深度(圧力), 表面の流速ベクトルを示す。流速プロフィールでは縦軸に深度, 横軸に日が取っており, 流速のゼロ点は破線が横軸上に交差する点である。流速には, 一般的には表面付近を除いて鉛直シアがなく, ほぼ一様である。表面付近の境界層の厚さは10m~20m程度である。流れは谷沿いの成分が卓越している。また, 流れは強く振動しており50cm/sを越える流速が頻繁に発生している。例外なのは12月20日前後に生じた谷下り流れで, 下層に強い流れが生じている。

12月のイベントに関しては, 4節で詳しく述べる。

水温は10月18日に約2℃と高温を記録した。流れはこの時谷下りの向きであり, ベーリング海峡側から水がきていることがわかる。一方, 1992年11月~1993年2月には流向が谷上がりになっているときに水温が上昇している。12月20日前後から水温は氷点(約-1.8℃)を示すようになり, それは5月半ばまで続く。6月からは, 再び昇温が始まる。

表面の流速では, 氷の動きが捉えられているものと考えられる。谷の方向の流速成分が卓越するが, 直交成分も大きな値を示す。直交成分が正の時には沿岸ポリニア

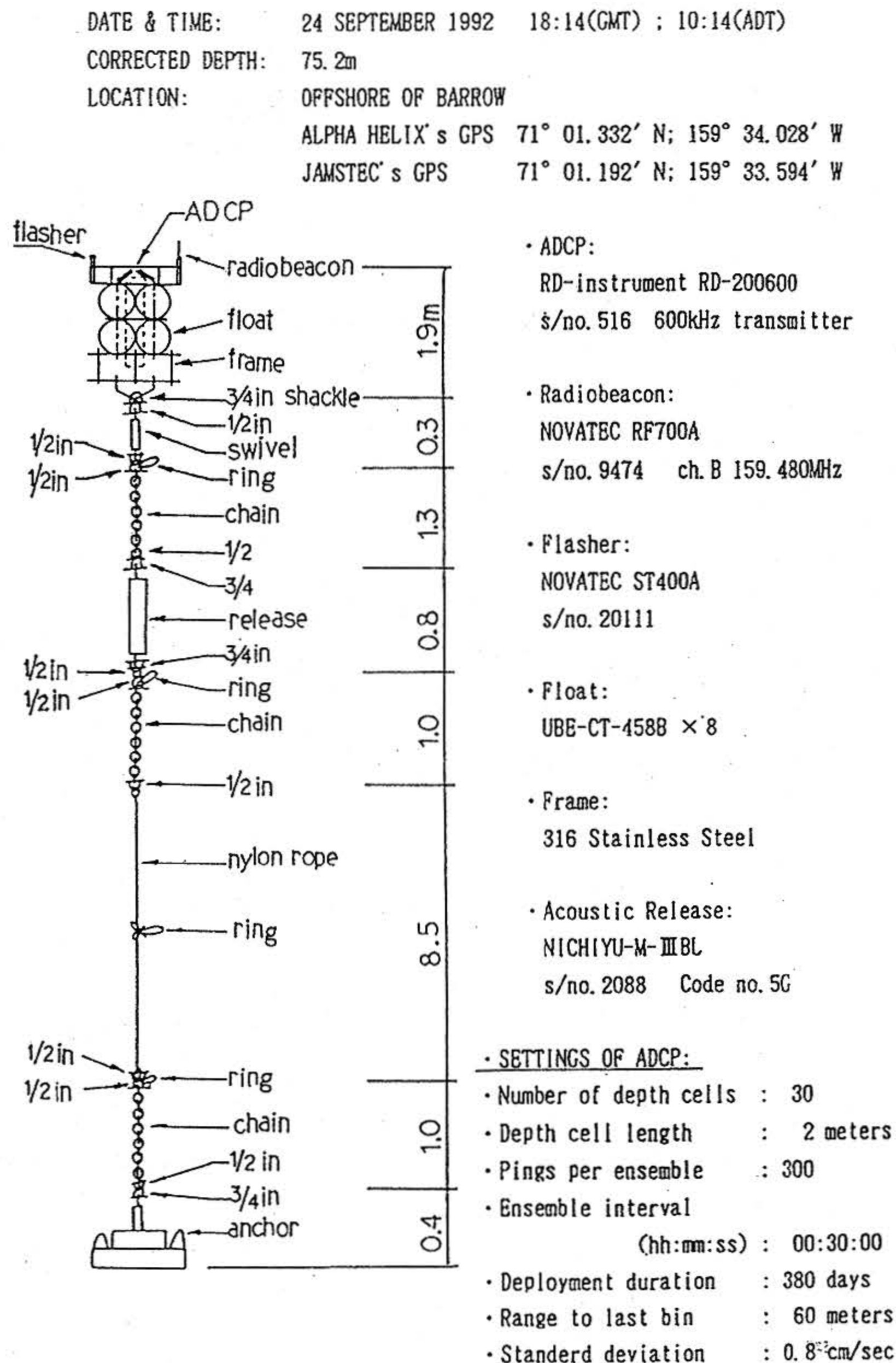


図3 係留システム
Fig. 3 Mooring system

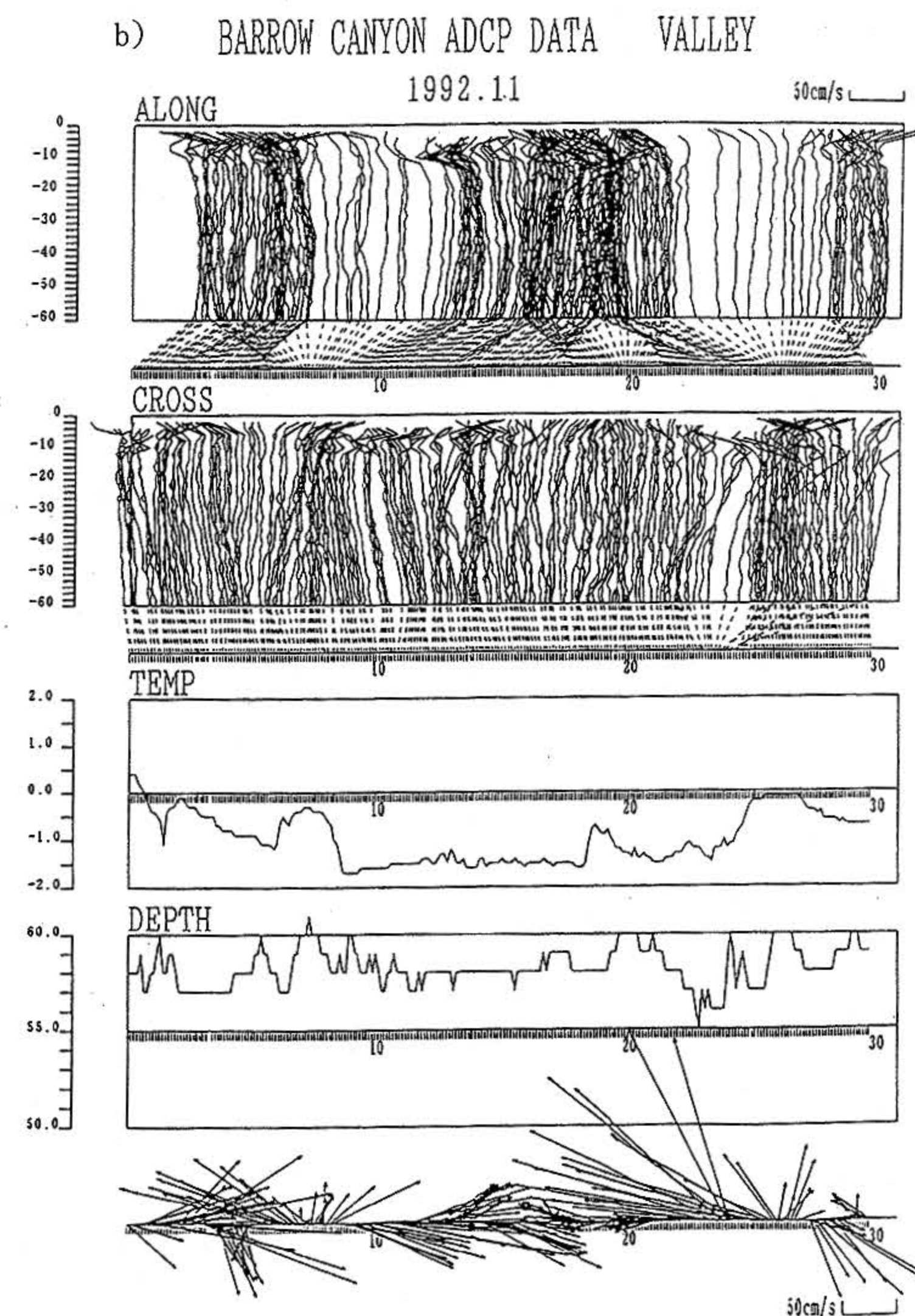
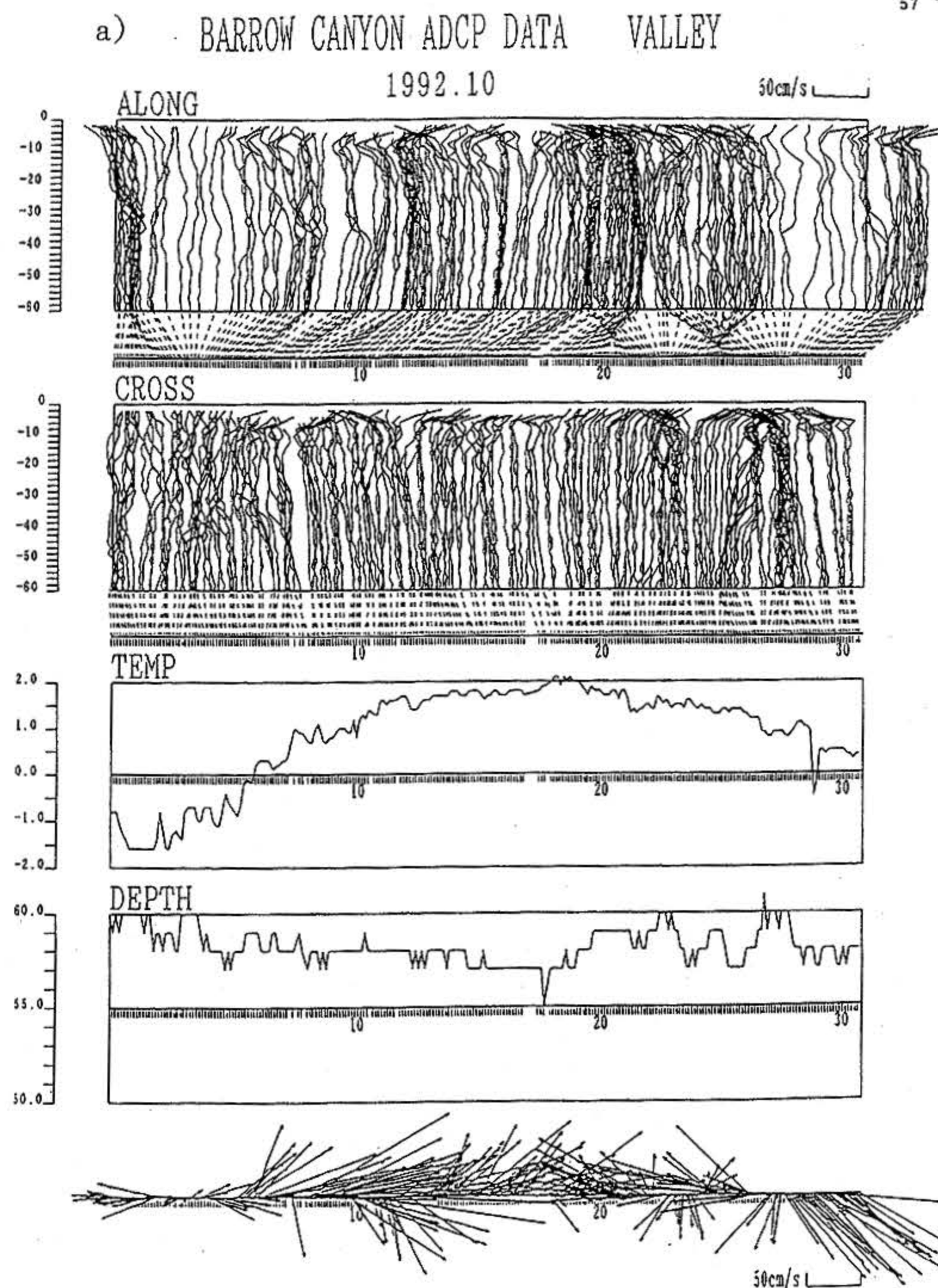
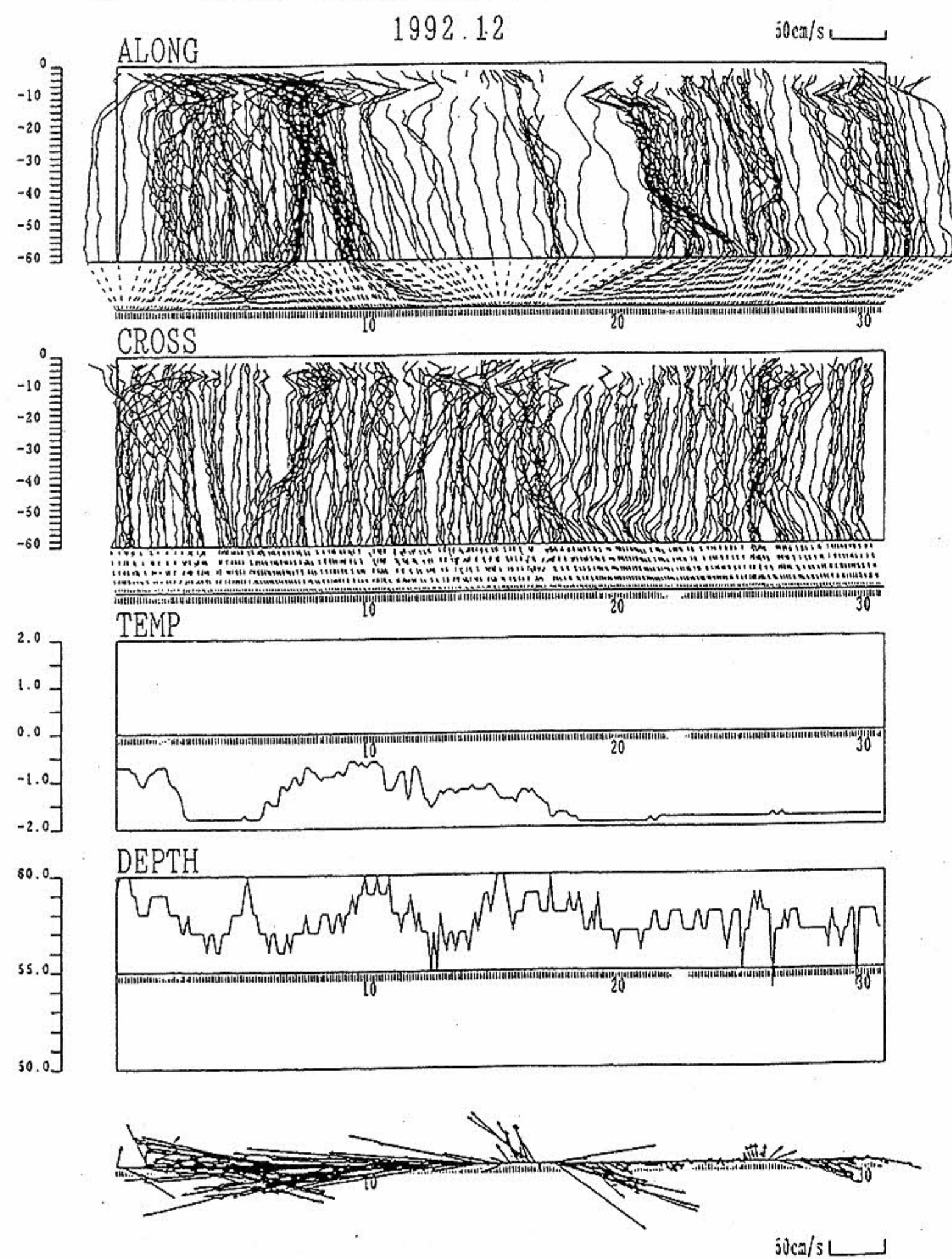


図4 上から、3時間毎の谷沿い方向の流速鉛直プロファイル時系列（谷を下る方向が正符号）、直交方向（岸向きが正）、水温、音波の到達水深、海水面での流速、を表す。年月をパネルの上部に示す。

Fig. 4 Top panel: time series of the vertical profile of the long-canyon velocity component.
 2nd panel: time series of the vertical profile of the cross-canyon velocity component.
 3rd panel: temperature at 60m deep.
 4th panel: maximum height which the sound wave reaches
 5th panel: sea surface velocity
 Month and year are indicated at the top of each set of the panels.

c) BARROW CANYON ADCP DATA VALLEY

59



d) BARROW CANYON ADCP DATA VALLEY

60

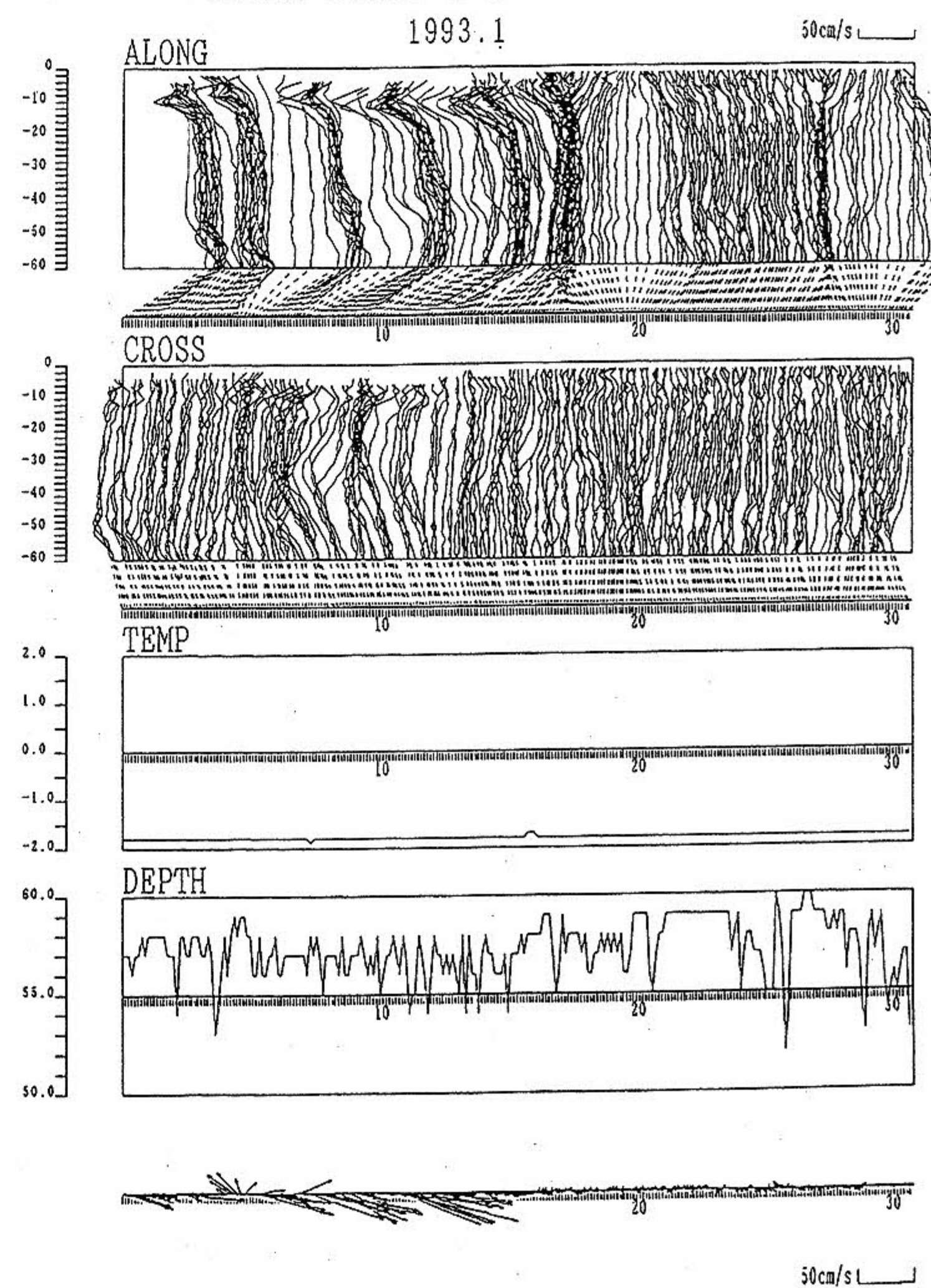
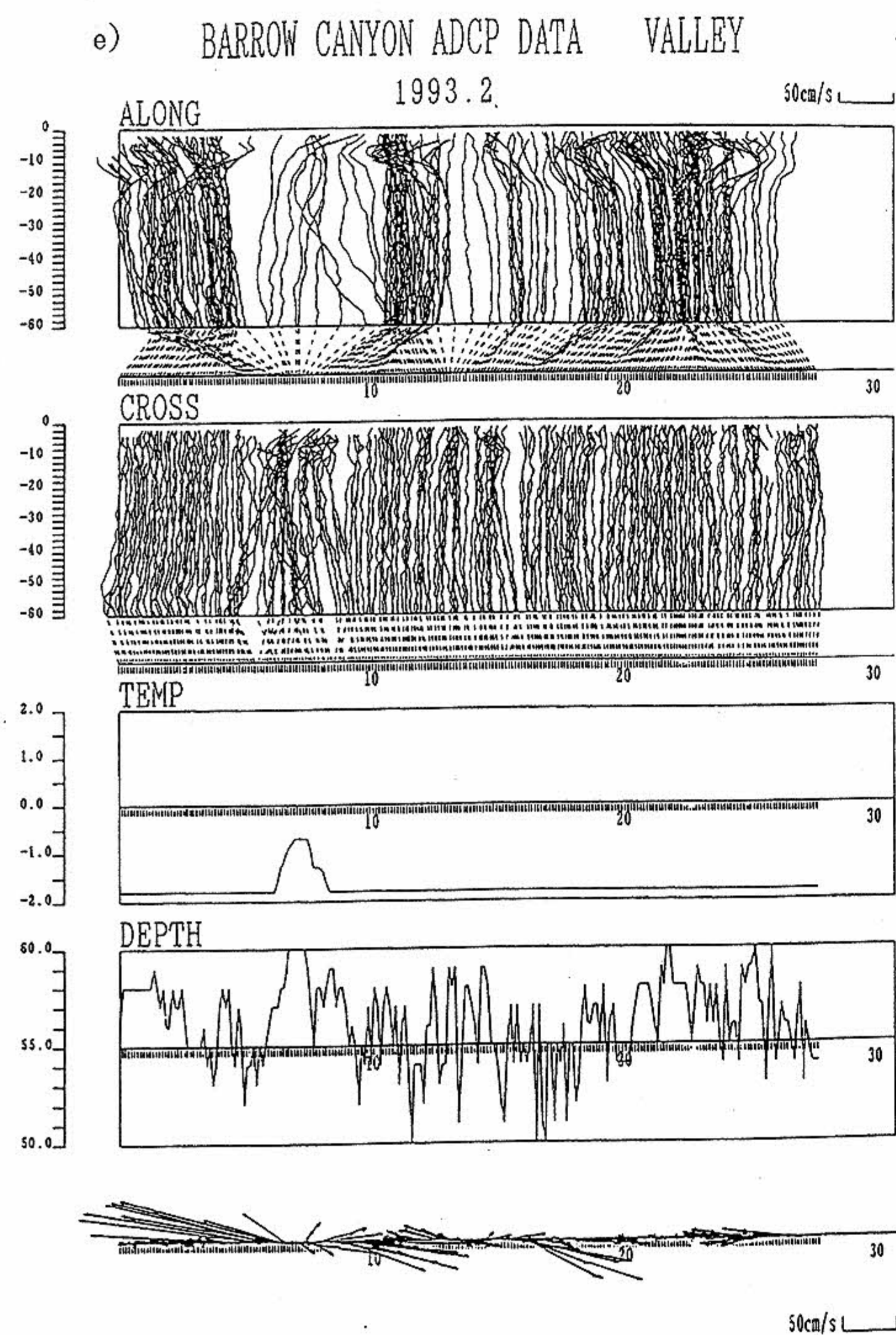
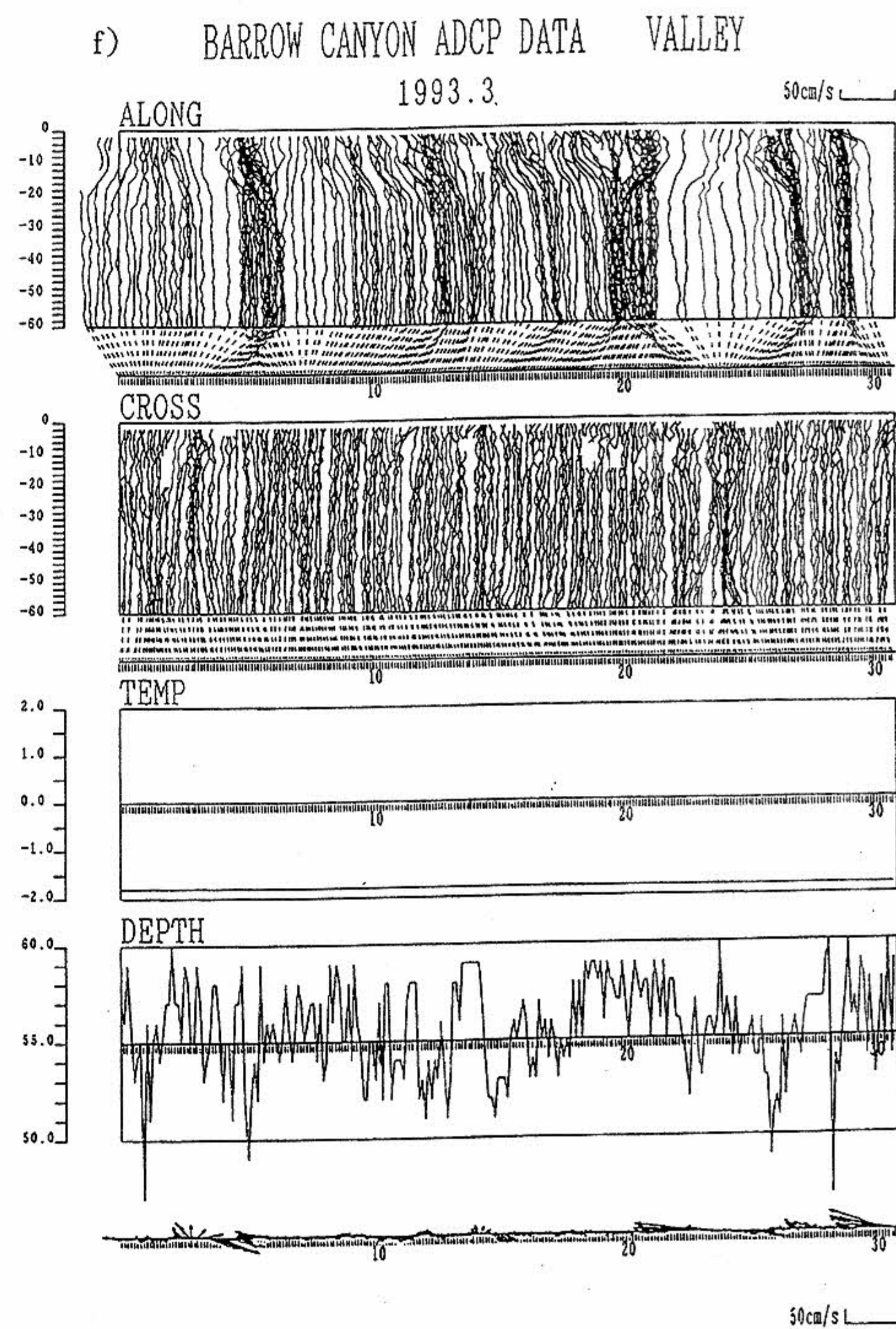


図4 (続き)
Fig. 4 (Continued)



61



62

図4 (続き)
Fig. 4 (Continued)

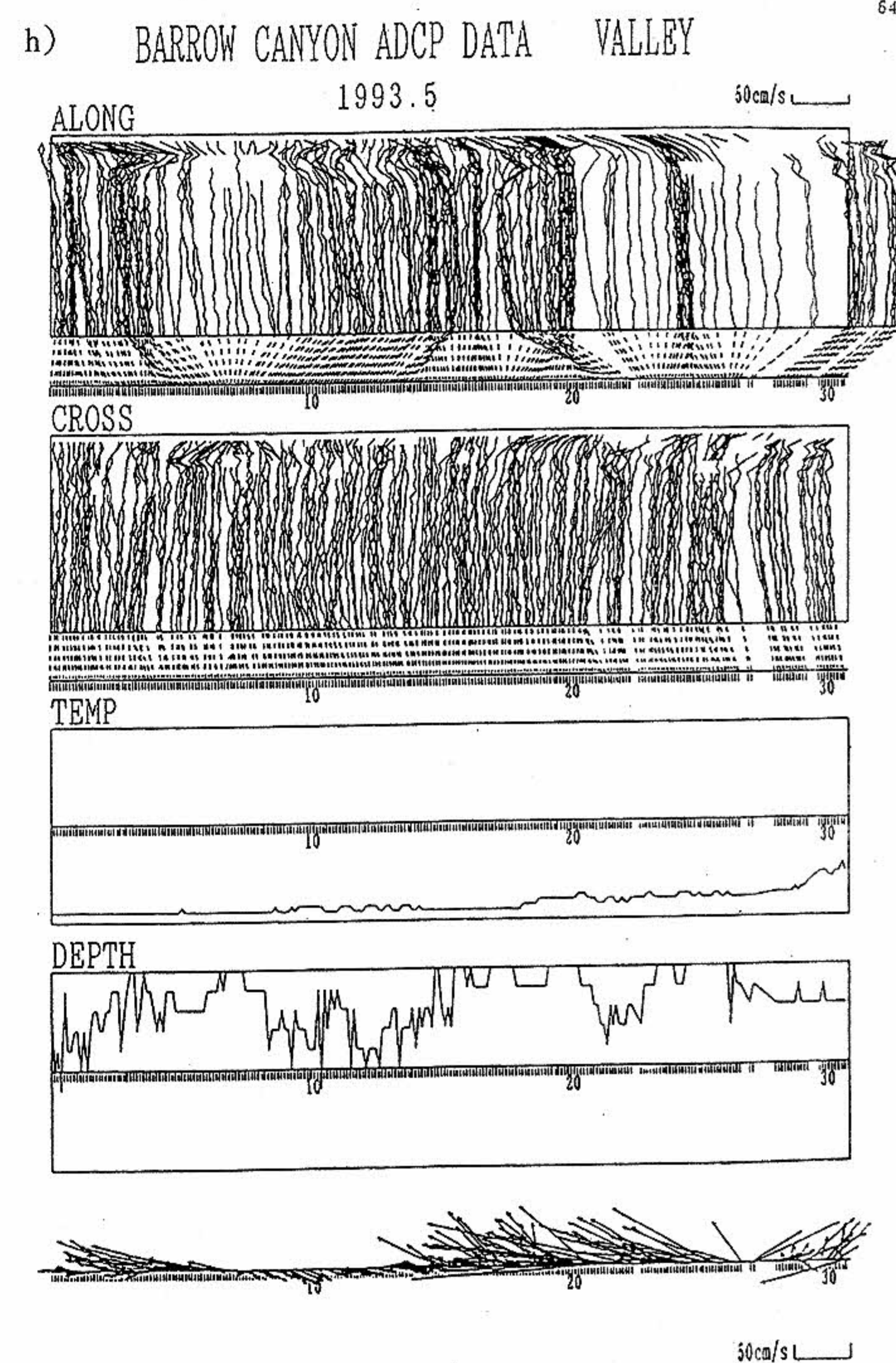
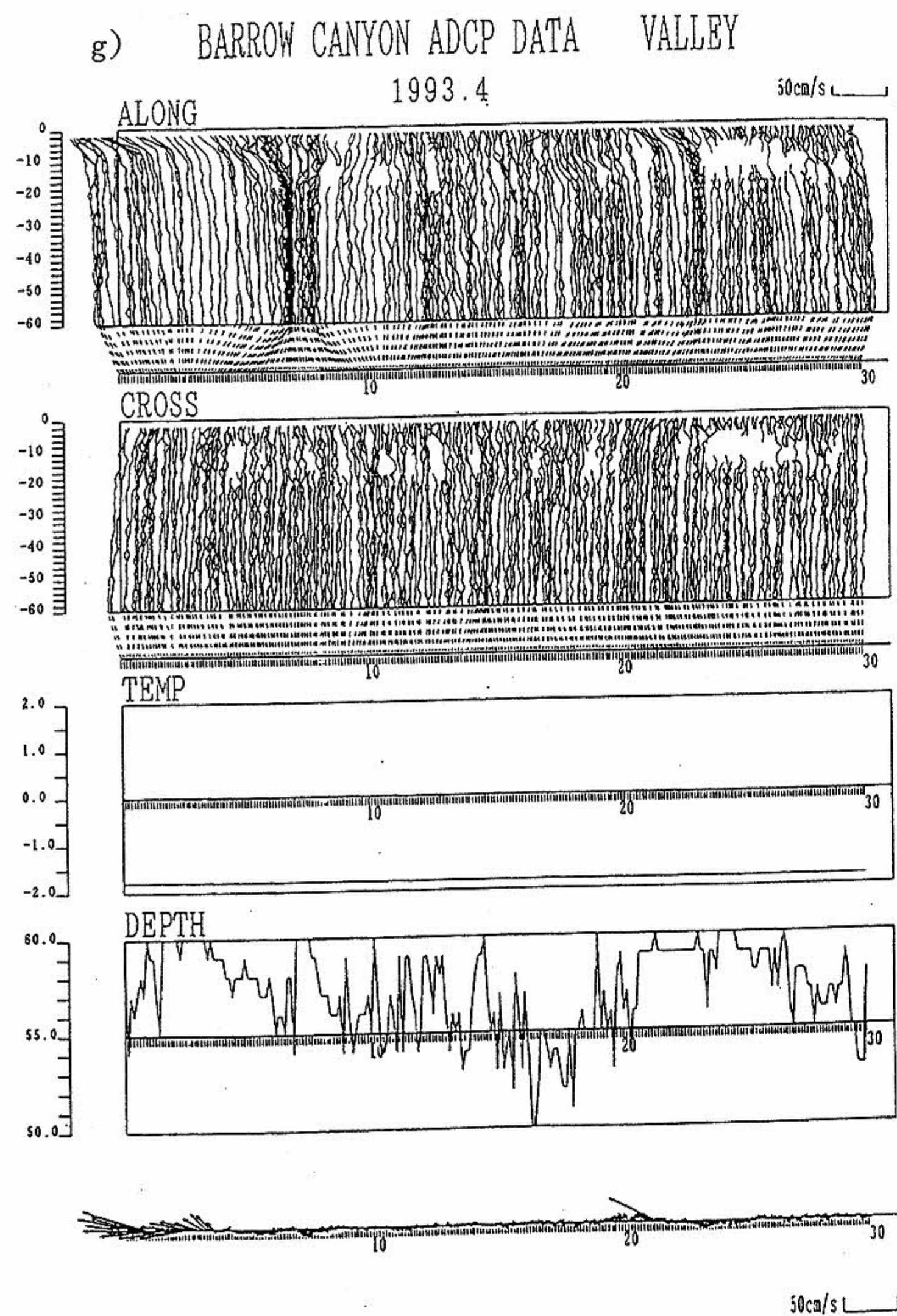


図4 (続き)
Fig. 4 (Continued)

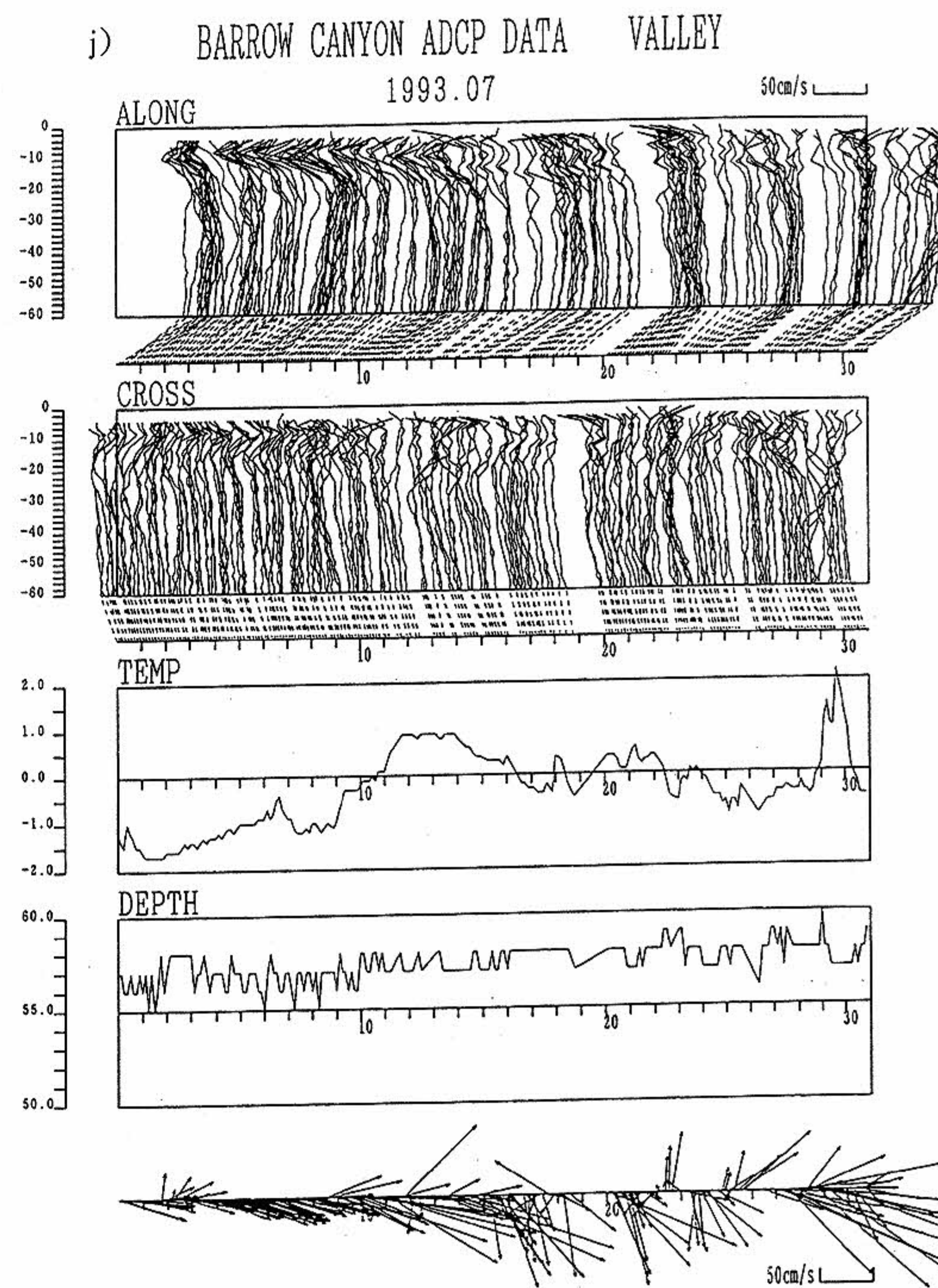
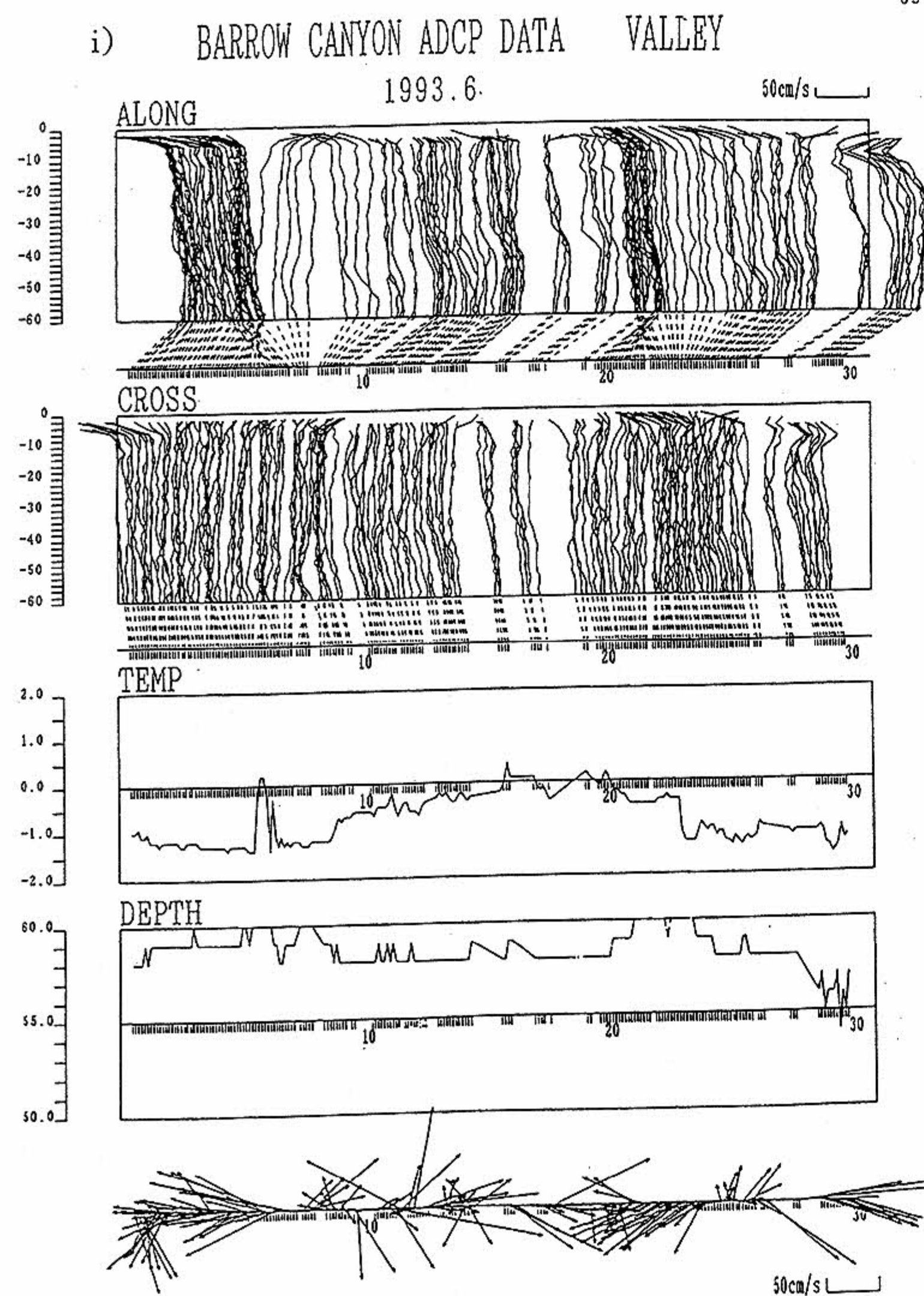
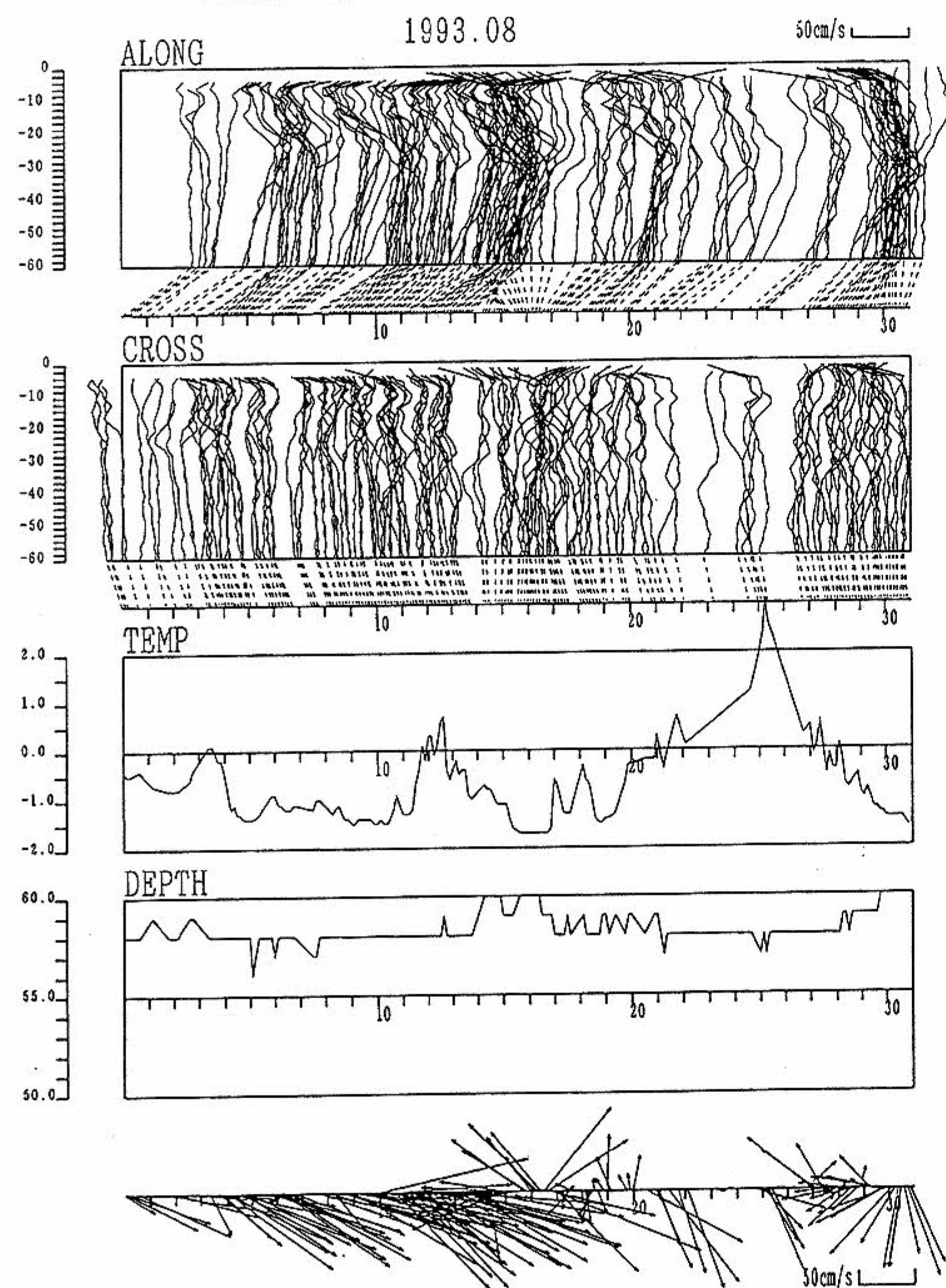


図4 (続き)
Fig. 4 (Continued)

k) BARROW CANYON ADCP DATA VALLEY



l) BARROW CANYON ADCP DATA VALLEY

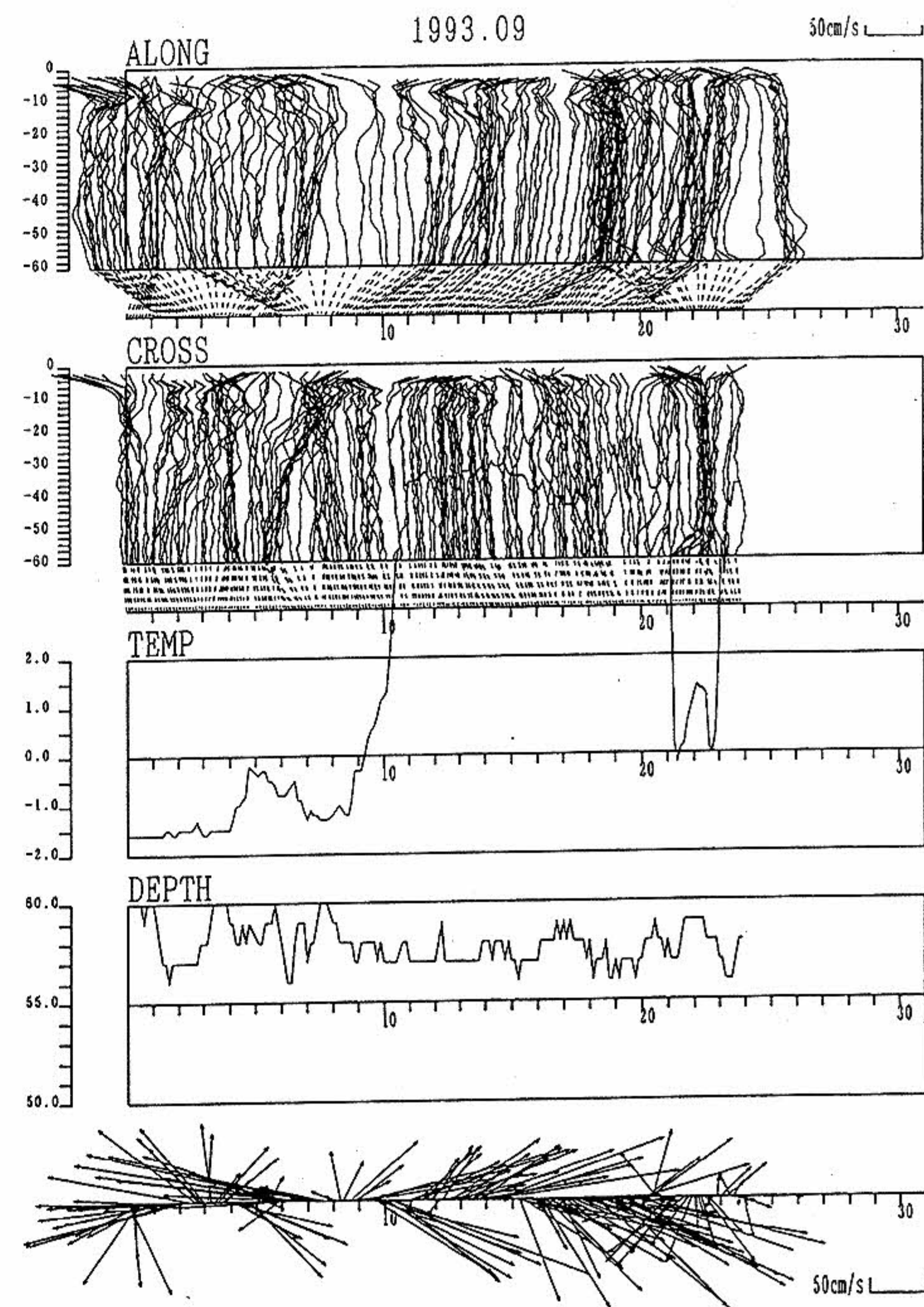


図4 (続き)
Fig. 4 (Continued)

が形成されることになる。また、1月下旬、3月、4月には、氷の動きは弱い。それにもかかわらず、30m以深ではかなり強い振動流がある。これは、シベリアなど遠隔地で生じた陸棚波や 中規模渦等の中規模現象がキャニオンを通して伝わっているためであると考えられる。

流速は鉛直方向にはほぼ一様である場合が多いため、図5に60m以浅で平均した日平均(25時間平均)の流速時系列を示す。谷沿い方向成分の振動の振幅は非常に大きく、特に冬に強い流れを生ずる。2月までは平均的には谷下りの向きだが、谷上がりの流れも強く、時には1.0 m/s以上の流速を示すこともある。この谷上がりの流れは、通常2日~6日間程度続く。3月~5月は平均の流れはほとんどなく、振幅0.3m/s程度の振動がある。先に述べたようにこの期間には氷は動かないため風によるローカルな強制はなく、遠隔地からの強制によって生じている振動である。1993年6月再び谷下りの流速が強

くなり60cm/sを越す。1993年9月に行われた船舶によるパローキャニオンでのCTD観測(図6, JJ-line)から、これは高温(5℃以上)低塩(31psu以下)の水であり、ベーリング海峡から流入してくるユーコン川起源の水が周りとは混合することによって生じたということがわかる(図6, Bering Strait 参照)。

スペクトルでは谷沿い方向、直交方向ともほぼ一週間周期、二週間周期が卓越しており、大気の高気圧の変動によって強制を受けていることが示唆される(図7)。特に二週間周期がはっきりとしたピークを持っている。谷上がりの流れが生ずるのは一月に2~3度なので、二週間周期はこれに対応したものであろう。回転スペクトルにおいてもやはり正・負の回転成分とも二週間周期が卓越している。また、すべての周期で両回転成分が同程度の値を示しており、したがって、すべての周期で谷沿いの流れが卓越していることがわかる(図8)。

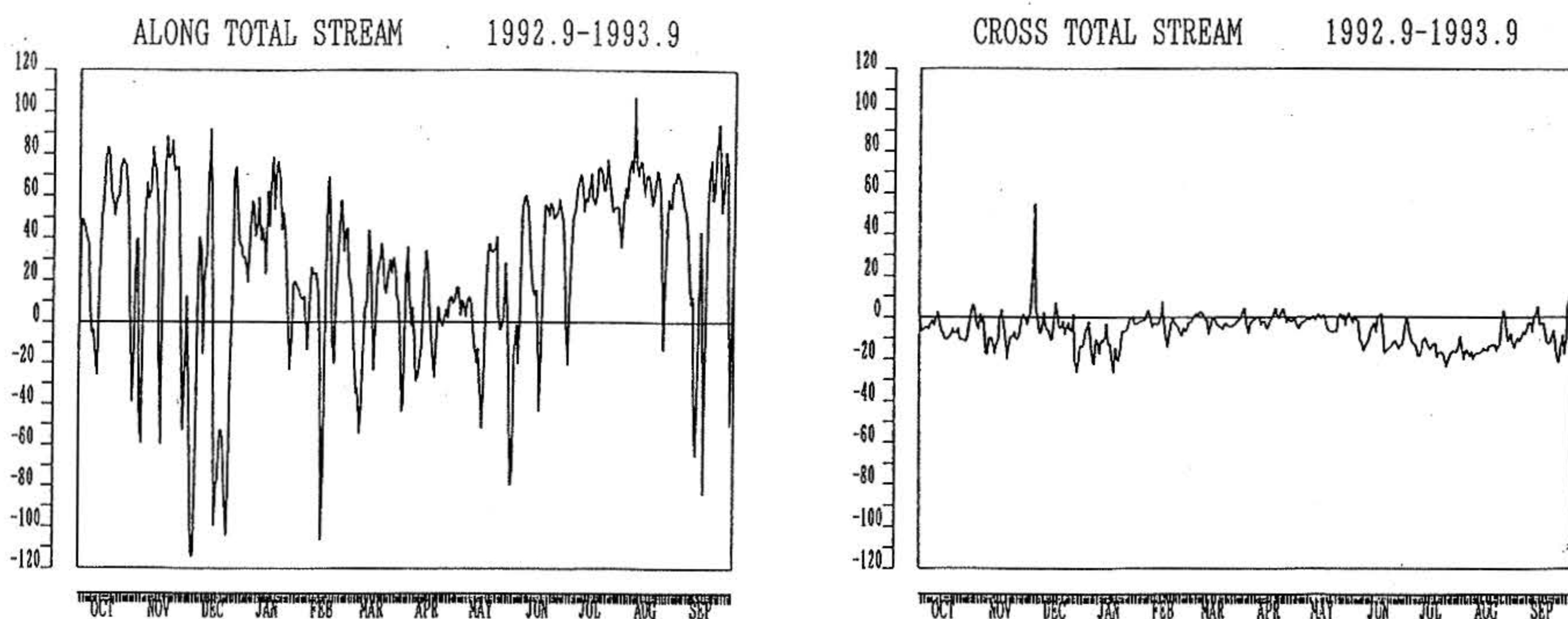


図5 25時間平均の鉛直平均の時系列。上から、谷沿い方向(谷下りが正)、谷へ直交する方向(岸向きが正)。

Fig. 5 Time series of the vertically-averaged velocities.

Upper panel: long-canyon component.

Lower panel: cross-canyon component.

4 1992年12月のイベント

図4(c)および図5で見たとおり、1992年12月には前半に強い谷上がりの流れ、後半に谷を下る流れを観測している。図9(a)(b)にはその時の流速の鉛直分布並びにADCPに付属している水温の30分毎の時系列を示す。

12月前半(12月6日後半~12月11日頃)の谷上がりの流れの時には、鉛直方向にほぼ一様な流れとなっているが、ところどころ特徴的な鉛直構造を見いだすことができる。表層10mでは流速の鉛直シアアが強く、よく発達した境界層が見いだせる。また、7日および11日には水深40mに10cm/sを越える流速のシアアがある。これは風の変化に伴って生じた調節(内部ケルビン波等の通過)を表現しているのかもしれない。13日のSSM/Iの衛星画像によると(図10)、アラスカ側で沿岸ポリニアが広がっていることがわかる。また、図11(a)気圧配置から北東風が吹いていたことがわかる。図4(c, 最下図)から氷も西南西に動いていることが示された。従って、この谷上がりの流れは北東風により海水が沖に流され、水面が開いたところに風応力が局所的に加わったため生じ

た流れである、と結論できる。興味深いのは、流れが谷を上る向きになった時に水温が上がっていることである。塩分計測がなく確実なことは言えないが、この水は北極中層の大西洋中層水の可能性がある。

12月中旬になるとアラスカ沿岸では気圧場の等高線間隔が広くなり、風はゆるむ(図11(b))。図4(c)から、この時谷に沿って重力流がジェットとなって流れ下っているのがわかる。図9(b)には18日~24日の詳しい流速プロファイルを示す。18日~19日前半までは鉛直方向にほぼ一様な流速分布を示す。この時、氷も北東向きへ移動しており(図4(c))表面まで流れは達していた。しかし、19日後半からは40m以深でジェットが発達し始め、20日の前半には90cm/sに達した。一方30mでの流速は35cm/s、表面ではほとんど流速ゼロとなった。水温は氷点を示しており、重力流を生じるほど水が重いのは塩分差が大きいためである。従って、この重い水は観測点近傍の沿岸ポリニアで生成された高塩分水であろう。

同様の過程が、1993年2月5日~10日にかけて生じている。

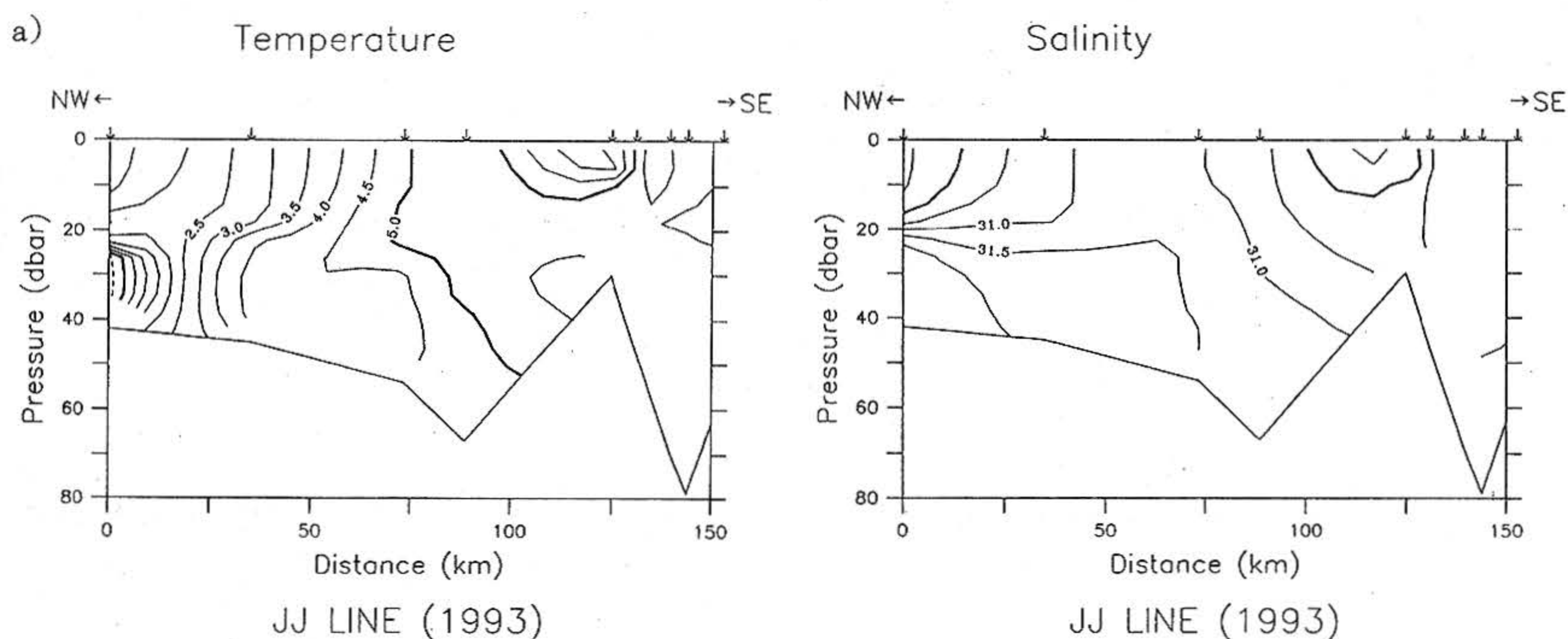
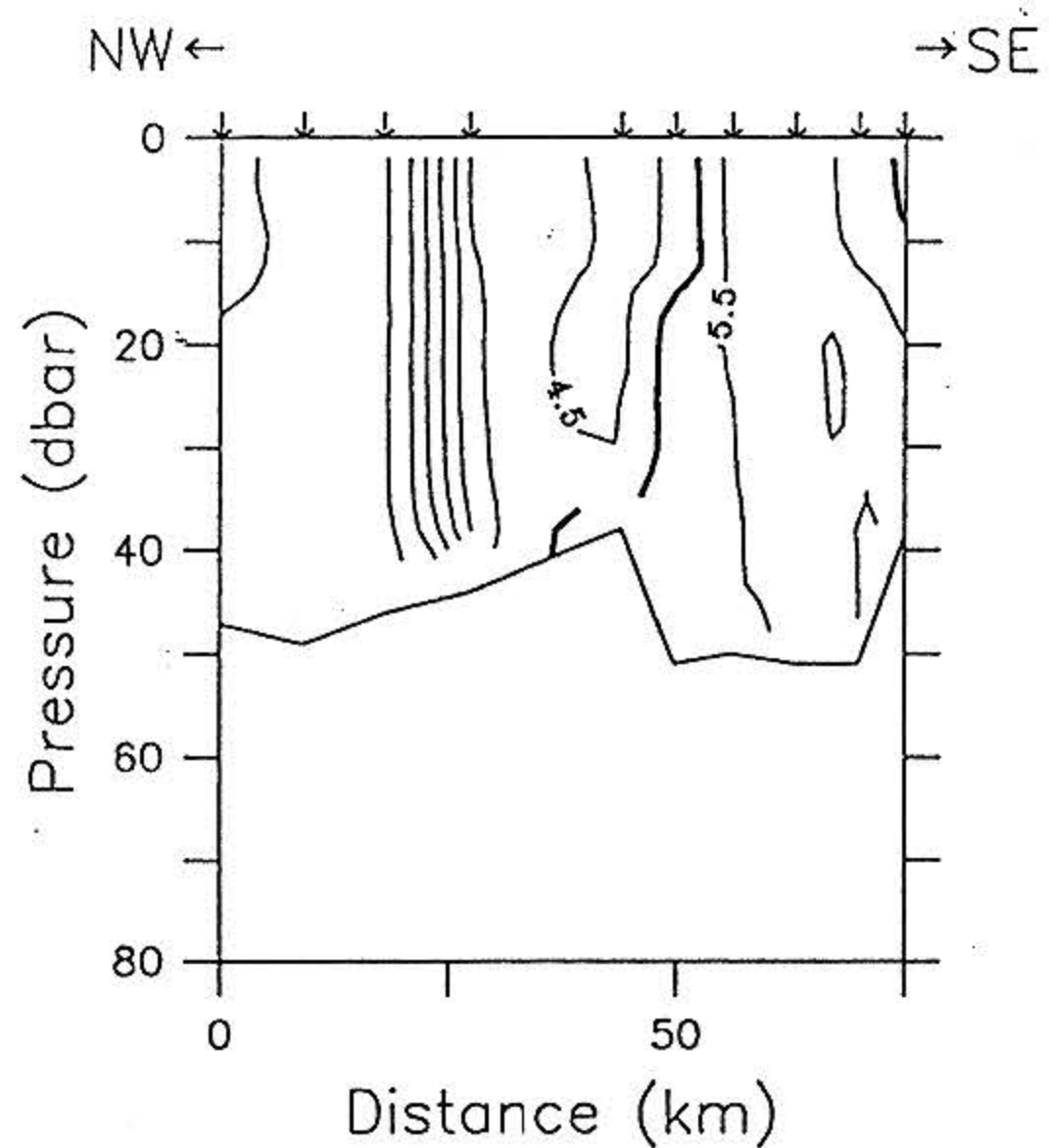


図6 1993年9月に行われた船舶CTD観測の断面図。JJ-lineはバローキャニオンの断面を表す。また、Bering Strait はベーリング海峡の断面を表す。

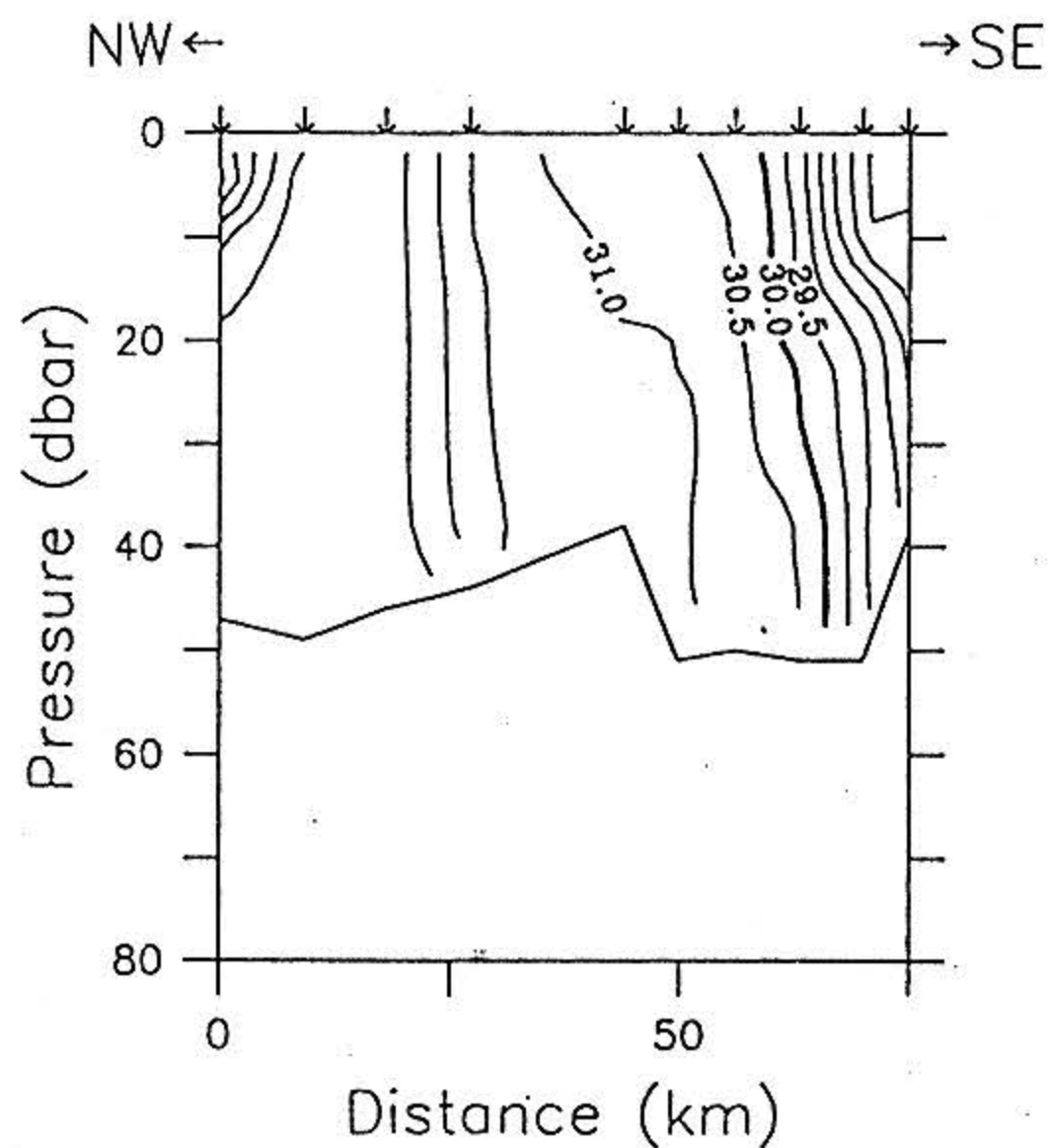
Fig. 6 CTD cross-section done in September 1993. "JJ-line" indicates the section across the Barrow Canyon. "Bering Strait" denotes the section across the Bering Strait.

b) Temperature



Bering Strait (1993)

Salinity



Bering Strait (1993)

図6 (続き)
Fig.6 (Continued)

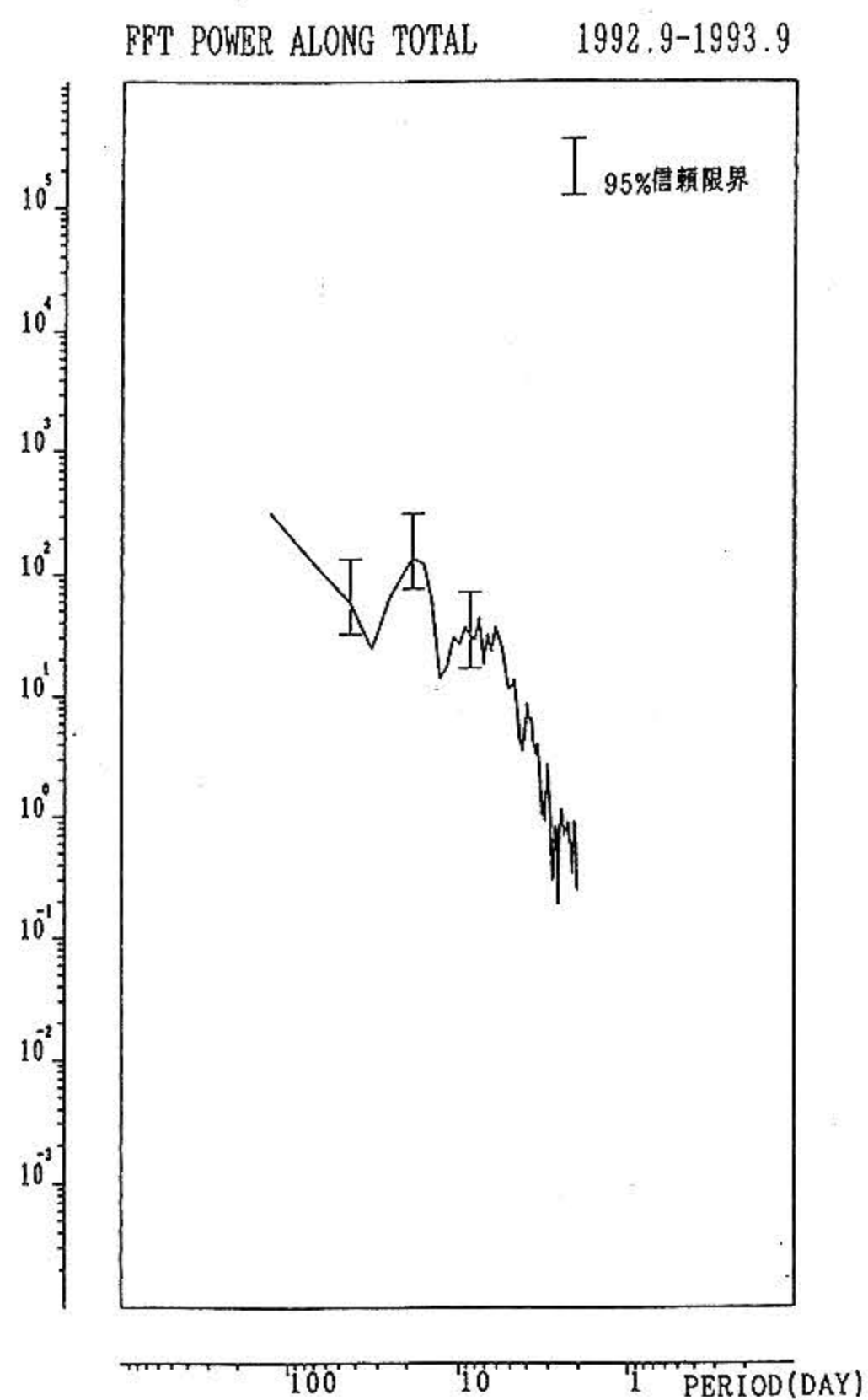


図7 鉛直平均流速（谷沿い方向成分）のパワースペクトル。
Fig.7 Power spectrum of the vertically averaged long-canyon velocities.

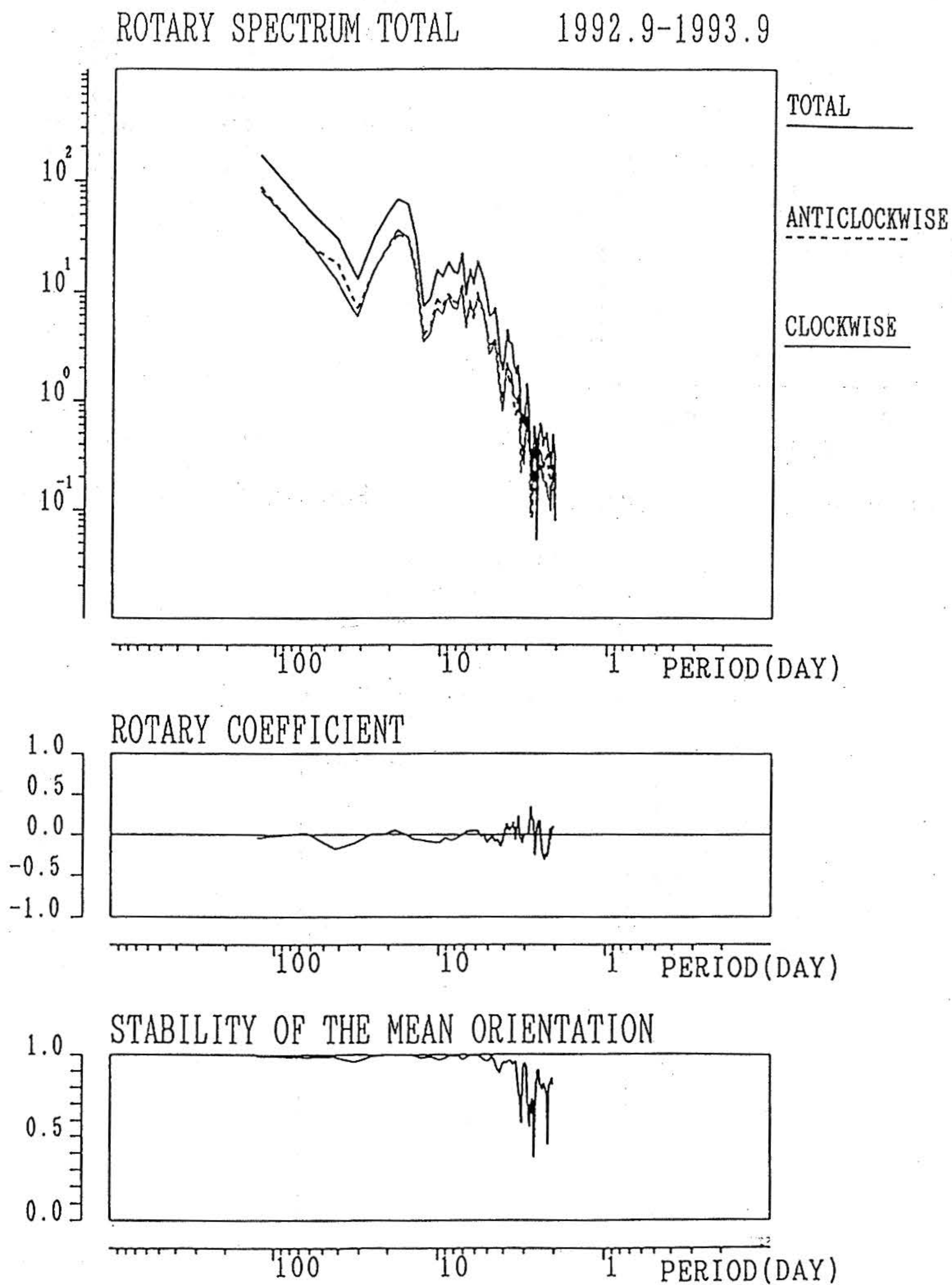


図8 鉛直平均流速の回転スペクトル。

Fig.8 Rotary spectrum of the vertically averaged velocities.

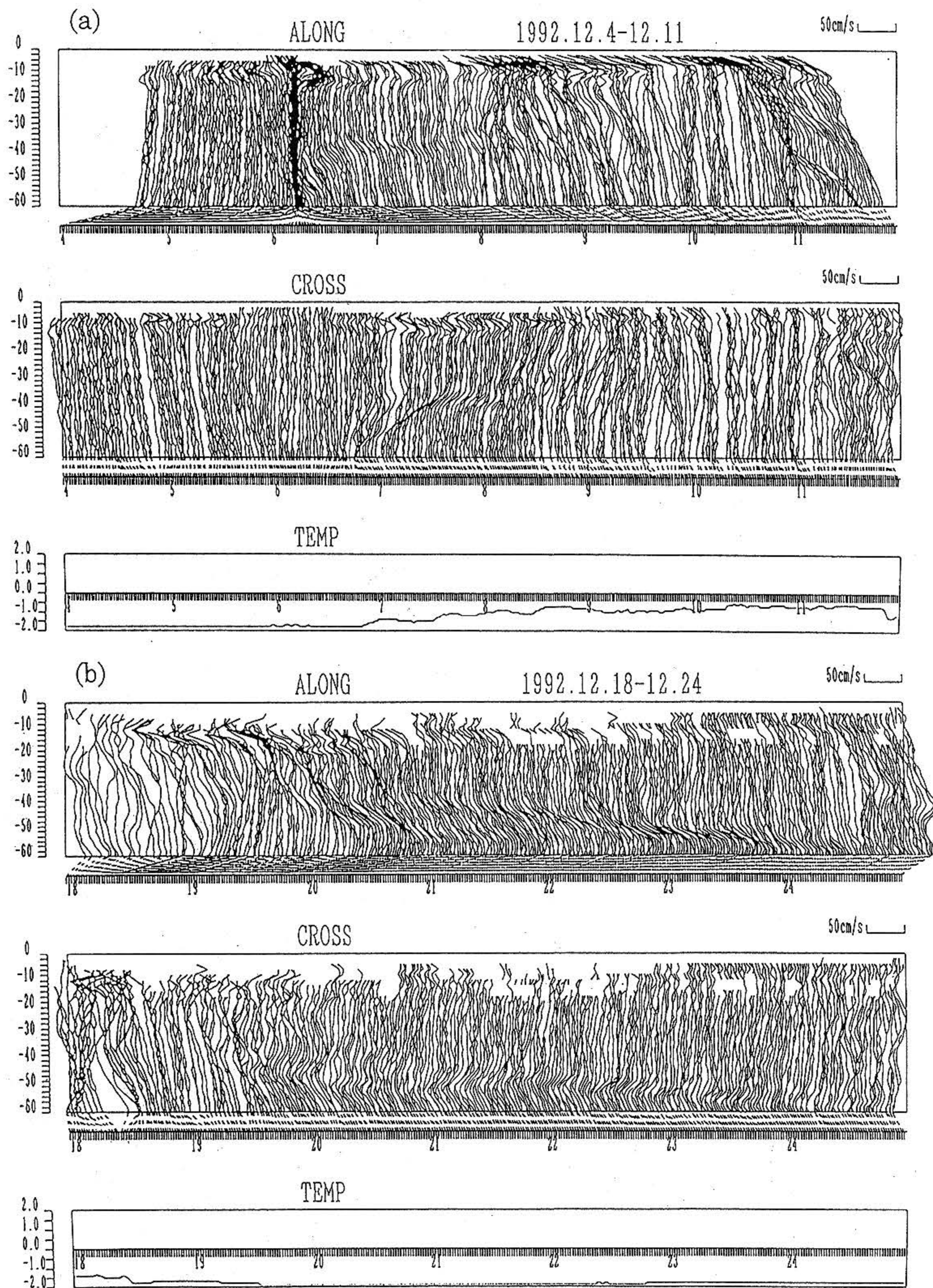


図9 30分毎の谷沿い方向の流速鉛直プロファイル時系列（谷を下る方向が正符号）、直交方向（岸向きが正）、水温の図。(a)12月4日～11日, (b)12月18日～24日。

Fig.9 Velocity profiles for each 30 minutes. 1st panel: long-canyon component. 2nd panel: cross-canyon component. 3rd panel: temperature.

(a) from 4th to 11th of December, 1992, (b) from 18th to 24th of December, 1992.

Total Sea Ice Concentration

13 Dec. 1992 - 16 Dec. 1992
010622-010664

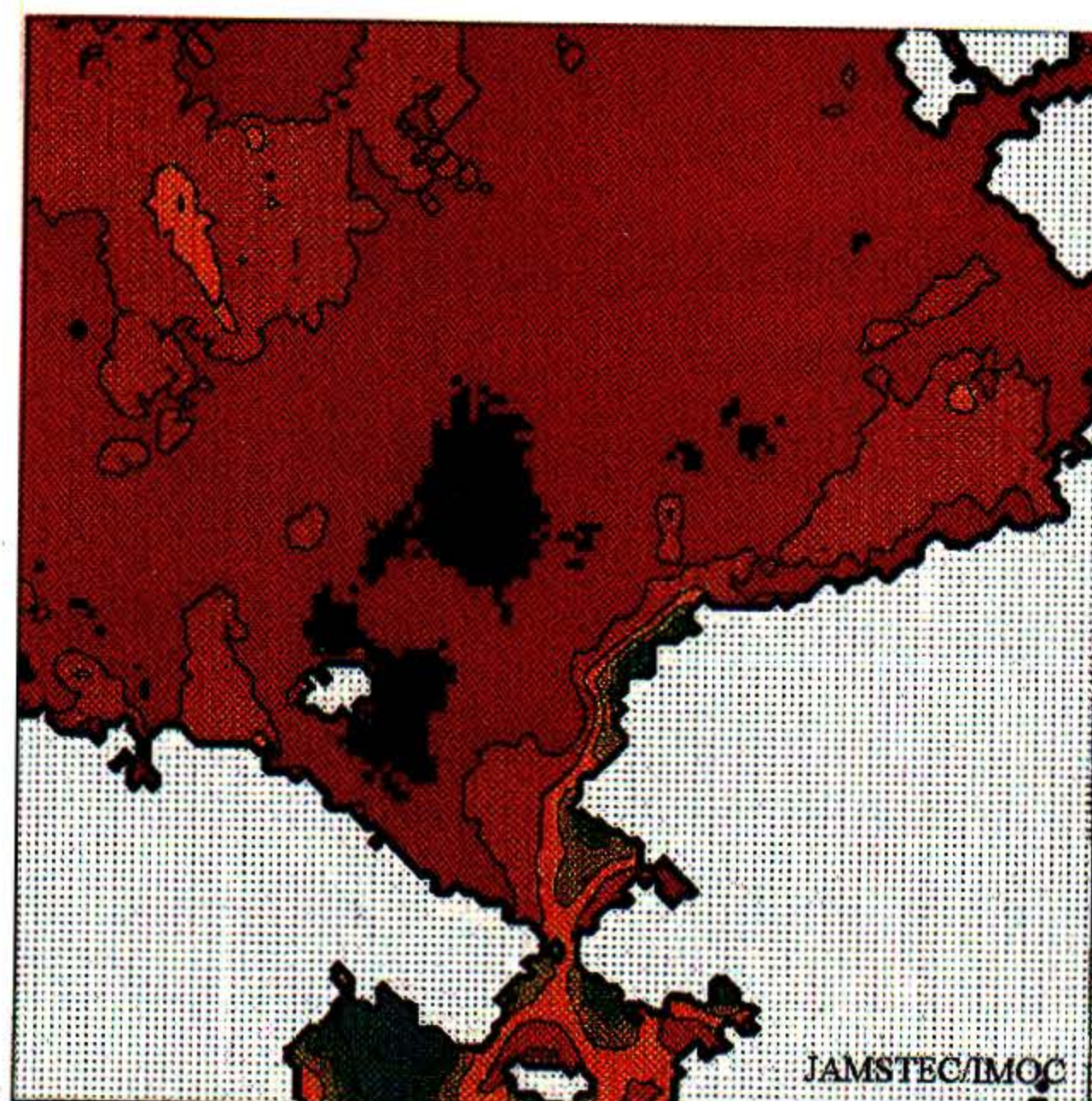
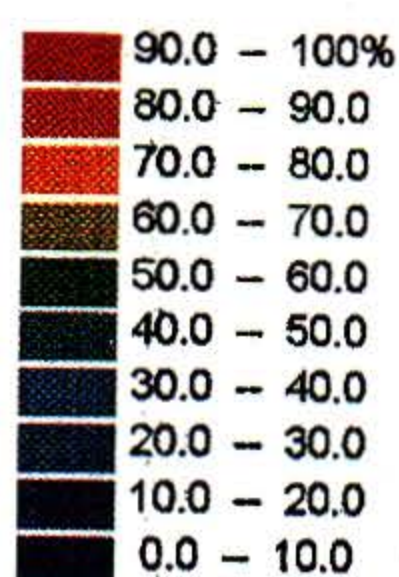


図10 SSM/Iから求めた氷の密接度。12月13日から16日の平均。

Fig.10 Averaged total ice concentration from 13th to 16th. December, 1992, derived from SSM/I.

1992年12月7日～11日の
5日間平均海面気圧配置図

1992年12月17日～21日の
5日間平均海面気圧配置図

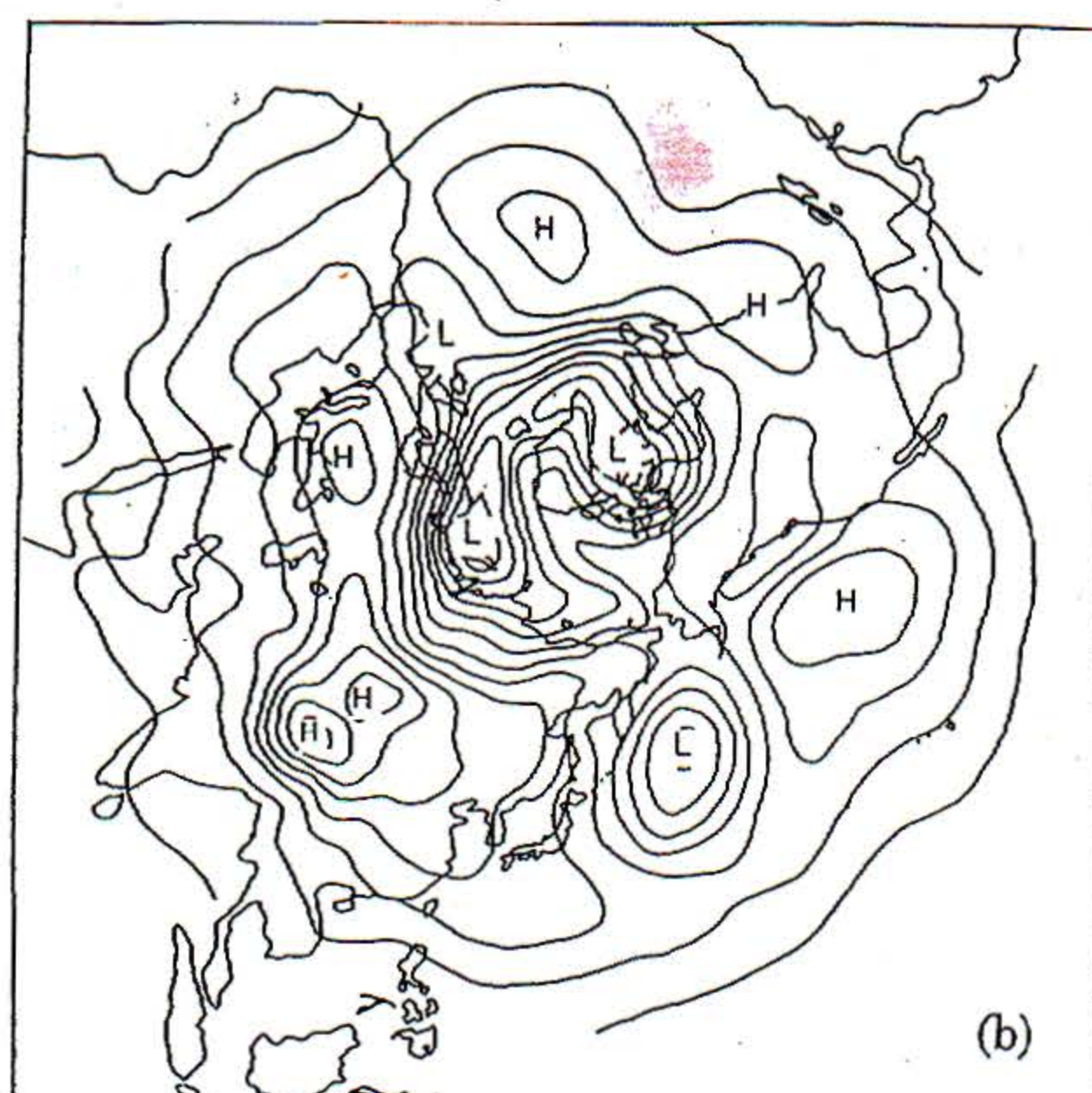
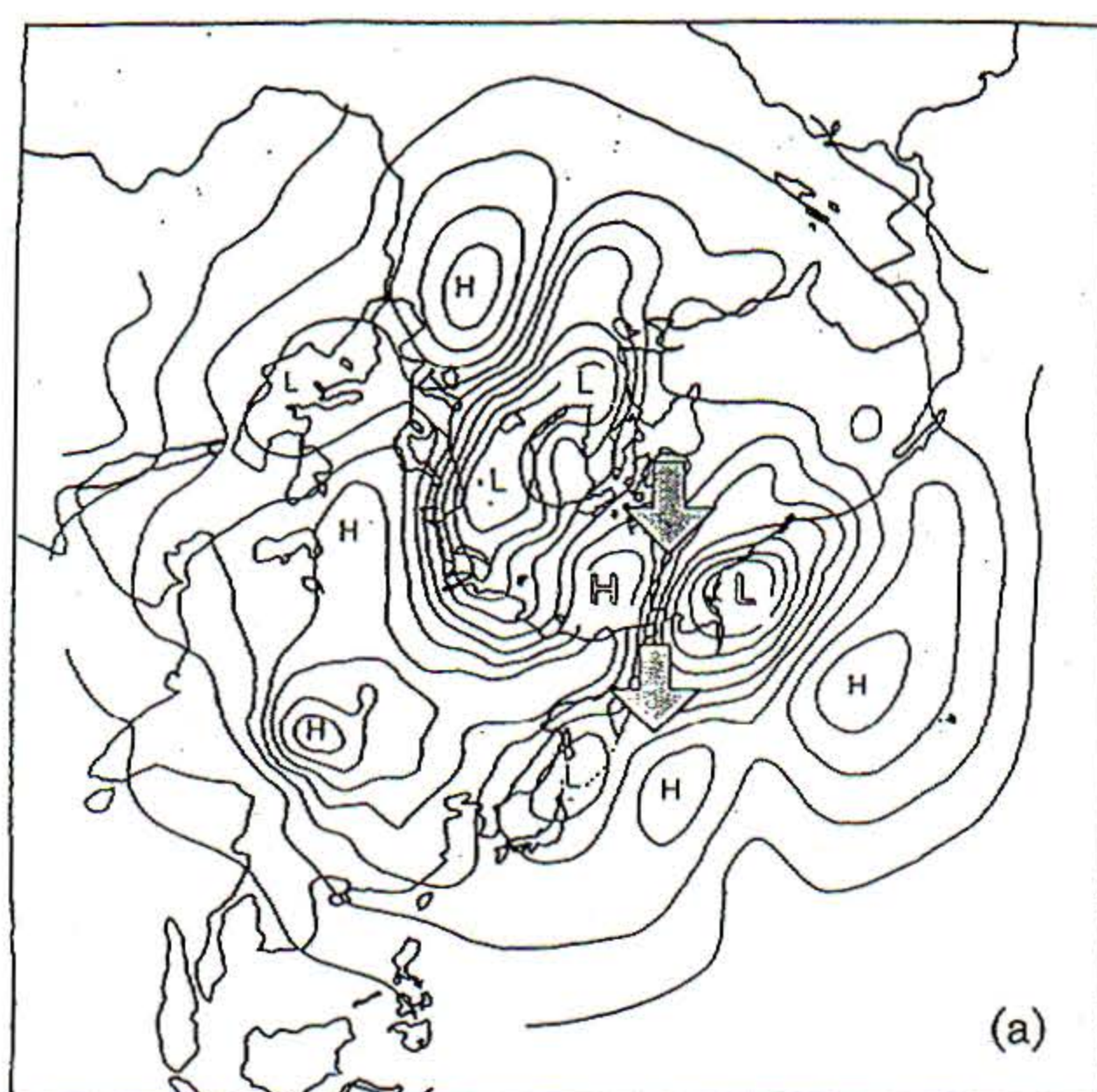


図11 気圧配置図。(a)12月7日から11日の平均, (b)17日から21日の平均。

Fig.11 5-day average of sea surface pressure distribution.

(a) from 7th to 11th of December, 1992, (b) from 17th to 21st.

5 おわりに

本報告では、'92年9月～'93年9月にかけて行われた ADCP 観測の一次解析に基づいて、バローキャニオンにおける流速場に関する記述を行った。その結果、以下のことがわかった。

- ① 流れは平均的には谷を下る方向だが、二週間に一度程度 1.0m/s にも達する流れの強い逆転（湧昇）がある。
- ② 冬季、湧昇時には水温の上昇を伴う。
- ③ 局所的な風で駆動されているときは、10mから20mの厚さを持つ境界層が発達する。それ以下は鉛直方向にほとんど一様な流速分布を示す。
- ④ 3月～5月にかけて、表面が氷に覆われている場合でも 30cm/s 程度の振幅を持つ振動がある。

ケーススタディーとして、12月中旬に生じたイベントについて詳しく議論した。この時には強い北東風が吹き沿岸ポリニアが開いたため、表層で 1.0m/s を越す湧昇流が生じた。その後、風がゆるむと重力流が流れ落ちる様子を観測することができた。同様のイベントは2月にも生じていた。

Aagaard and Roach (1990) は湧昇時の高温水は、北極海150m以深に存在する北大西洋起源の水であるとのことをCTDの係留観測により見いだした。12月、2月のイベントで高温水湧昇の後重力流が観測されたことは、高塩分水生成時における北大西洋水の関与を示唆するものである。深度200mに存在する大西洋水の湧昇のメカニズムは未だ解明されていないが、我々はバローキャニ

オンを導波管とする地形性ロスビー波によって深くまで風の情報が伝わるのではないかと考えている。

今回の観測では、塩分計を取り付けていなかったため水塊の測定はできなかったが、アラスカ大のグループも同時期に係留観測しており、今後データを比較してさらに解析を進める必要がある。また、'94年9月～'95年9月に設置していた係留系には塩分計も取り付けてあるので、それも詳しく解析する予定である。

謝 辞

この観測を受託し、困難な状況の中で観測を行った国際気象海洋の小山登氏に感謝いたします。また、William Rook 船長以下、Alpha Helix の乗務員の方々には苛酷な環境のもと観測支援をしていただきました。併せて感謝いたします。

参考文献

- 1) Aagaard K. and E.C. Carmack 1994, The Arctic Ocean and Climate : A Perspective. in *The Polar Oceans and Their Role on Shaping the Global Environment*, Geophysical Monograph 85, 5-20.
- 2) Aagaard K. and A.T. Roach 1990, Arctic ocean-shelf exchange: measurements in Barrow Canyon. *J. Geophys. Res.*, 95, 18, 163-18, 175.

(原稿受理 : 1996年1月24日)