

## 結氷河川における氷板の形成要因に関する一考察

Consideration of an Ice-Sheet Conformation Factor in the Ice-Covered River

寒地土木研究所 正会員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)  
 北見工業大学 正会員 渡邊 康玄 (Yasuharu Watanabe)  
 寒地土木研究所 正会員 平井 康幸 (Yasuyuki Hirai)

## 1. はじめに

結氷河川の河水を大別すると、硬い氷板とその下に存在する柔らかい晶氷に分けられる。結氷時において河川内で工事を実施する場合には、この硬い氷板を壊す作業が必要となり、氷板を壊す機材の選定やその回数の判断基準、安全性の確保および作業計画の観点から、事前に氷板の厚さを予測する技術が必要<sup>1)</sup>となる。氷板厚を予測するための式は、氷板下の流れが無視できる湖を対象とした Stefan の式 (1) があり、氷板下に流れがある結氷河川においても、定数  $\alpha$  を適切に与える事により精度良く予測する事が可能である。

$$h_i = \alpha \sqrt{S} \quad (1)$$

ここで、 $h_i$ [cm]: 氷板厚,  $S$ [ $\cdot$ day]: 積算寒度,  $\alpha$ : 定数であり、積算寒度とは計算開始日からマイナスの気温を積算した絶対値である。定数  $\alpha$  は、式の導出過程から氷および雪の密度、熱伝導率、潜熱、積雪深の関数<sup>2)</sup>となるが、これらの値は地点毎に異なるだけでなく測定自体も容易ではないため、定数  $\alpha$  は、過去に行われた氷板厚の観測値を指標として、試行錯誤を行い決定する事になる。これにより、結氷河川特有の流水による融解や晶氷の氷化という複雑な現象を定数  $\alpha$  に織り込んだ事になるため、氷板厚を精度良く予測する事が可能となる。しかし、一方で、氷板がどのような影響をどの程度受けて形成されたかについては不明瞭となる。今後、暖冬や厳冬などの気象変化や融雪量の増加による水量変化などの年変化が顕著に現れる場合には、定数  $\alpha$  も年変化する事が想定されるため、氷板の形成要因をすべて織り込んだ定数  $\alpha$  の物理的意味を把握しておく事は重要となる。

本研究は、氷板の形成要因を明らかにするために、放射・対流、積雪、晶氷、流水の4因子に着目して、氷板の形成に与える影響を定量的に評価する事を目的としている。なお、晶氷が氷化して氷板の増加に寄与する現象については、現地観測結果から予見はされていたが、晶氷厚の連続的な測定が困難であったため、十分に解明されていない状況であった。本研究では ADCP を用いて晶氷厚の連続測定を試みた。

## 2. 現地観測

## (1) 観測地点と観測期間

観測地点は、氷板下に晶氷が存在する図-1 に示す天塩川の恩根内観測所 (KP111.7) とした。観測期間は2008年1月から3月であり、完全結氷期間である1月



図-1 観測地点の位置図

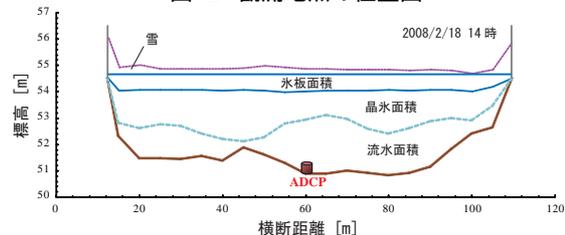


図-2 横断測量結果の一例

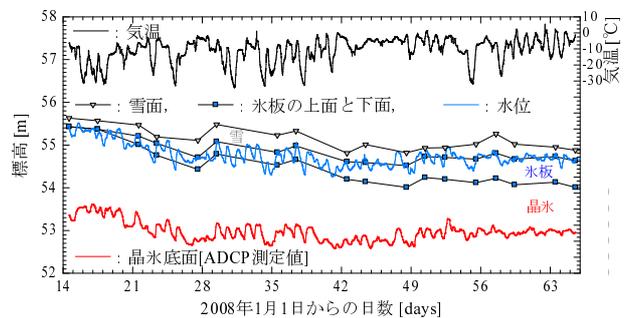


図-3 気温、水位、雪、氷板、晶氷の測定値

15日 14:30 から 3月6日 12:40 の52日間を対象に検討を行った。

## (2) 観測項目

気温および風速 ((株)MCS), 水位 (Mc-1100, 光進電機工業製) を10分毎に測定し、河床、晶氷、氷板、積雪深の横断測量を18回実施した。横断測量結果の一例を図-2に示す。横断測量時に1測線で水温 (コンパクトCTD, (株)アレック電子製) を10cm毎に測定した。また、雲量と降雪データは気象庁の美深観測所の1時間毎データを取得して、10分毎に線形補完した。

ADCP (WorkHorse Sentinel 1200kHz Zed-Hed, RD Instruments, ハイレゾリューションモード) は、図-2の横断距離60mの位置に設置した。但し、ADCPの設置位置は、観測氷穴と重なることを避けるために約1m下流の地点の河床に設置した。設置箇所の河床高は50.84mであり、ADCPセンサー位置は河床から40cm

である。河床に設置した ADCP により流速鉛直分布とボトムトラッキングの値を測定し、10 分毎に 1 分間の測定を行い、1 ピング/秒で 60 データを取得して、この平均値を 1 データとした。カタログ上の測定精度は 0.67cm/sec である。なお、本研究におけるボトムトラッキングの値は、河床ではなく河水底面をトラッキングした値となる。

(3) 観測結果

図-3 に気温、水位、雪、氷板、晶氷、ADCP によるトラッキングの値の測定値を示す。気温および水位が日変動しており、その 1 時間の変動は大きく、気温で 7.1 /hour から -5.7 /hour、水位で 14.7cm/hour から -9cm/hour であった。

3. 氷板厚計算モデルの構築

本研究における氷板の形成要因として、短波放射と長波放射による放射、潜熱と顕熱による対流、積雪深の断熱効果、晶氷の氷化、流水による融解を考慮し、氷板の形成要因を成分分解して検討を行った。

(1) 氷板厚計算の基礎式の導出

図-4 に結氷河川における熱収支の概要図を示す。 $T[ ]$ : 温度,  $h[m]$ : 厚さ,  $\rho[kg/m^3]$ : 密度,  $U[m/s]$ : 速度,  $\phi[W/m^2]$ : 熱フラックスであり、添え字は各層の値であることを示している。

積雪深の増減は、式 (2) において大気と雪、雪と氷板の境界での熱収支を考慮した。なお、降雪による積雪深の増加については、 $dh_s/dt \geq 0$  かつ降雪がある場合は、熱収支による積雪深の増加は無いと仮定して、式 (2) の  $dh_s/dt$  を 0 とした。また、積雪の風による吹あげ、吹きだまり、圧密は考慮していない。

氷板厚の増減は、式 (3) において雪と氷板、氷板と晶氷の境界での熱収支を考慮した。氷板の上面と下面では熱フラックスが異なると仮定して、氷板の熱フラックス  $\phi_i$  を氷板上面  $\phi_{iu}$  と氷板下面  $\phi_{id}$  に分けて考えた。

晶氷厚の増減は、式 (4) において氷板と晶氷、晶氷と流水の境界での熱収支を考慮した。晶氷の上流からの流下・滞留および晶氷の下流への流下は、観測結果の解析により、晶氷底面の摩擦速度と晶氷厚の増減の相関がない事を受けて、本研究では考慮していない。

式 (2), (3), (4) を用いて、氷板厚で整理すると式 (5) が導かれる。

$$\rho_s L_s \frac{dh_s}{dt} = (\phi_a - \phi_s) + (\phi_s - \phi_{iu}) \quad (2)$$

$$\rho_i L_i \frac{dh_i}{dt} = (\phi_{iu} - \phi_i) + (\phi_i - \phi_{id}) \quad (3)$$

$$\rho_f L_f \frac{dh_f}{dt} = (\phi_{id} - \phi_f) + (\phi_f - \phi_w) \quad (4)$$

$$h_i = h'_i + \frac{\Delta t}{\rho_i L_i} \left( \phi_a - \rho_s L_s \frac{dh_s}{dt} - \rho_f L_f \frac{dh_f}{dt} - \phi_w \right) \quad (5)$$

表-1 氷の物性値一覧

	単位	s : 雪	i : 氷	f : 晶氷
$\rho$ : 密度	$[ \frac{kg}{m^3} ]$	200.0	917.4	550.4
$L$ : 潜熱	$[ \frac{J}{kg} ] \times 10^5$	3.336	3.336	3.336
$k$ : 熱伝導率	$[ \frac{W}{m} ]$	0.26	2.31	0.72

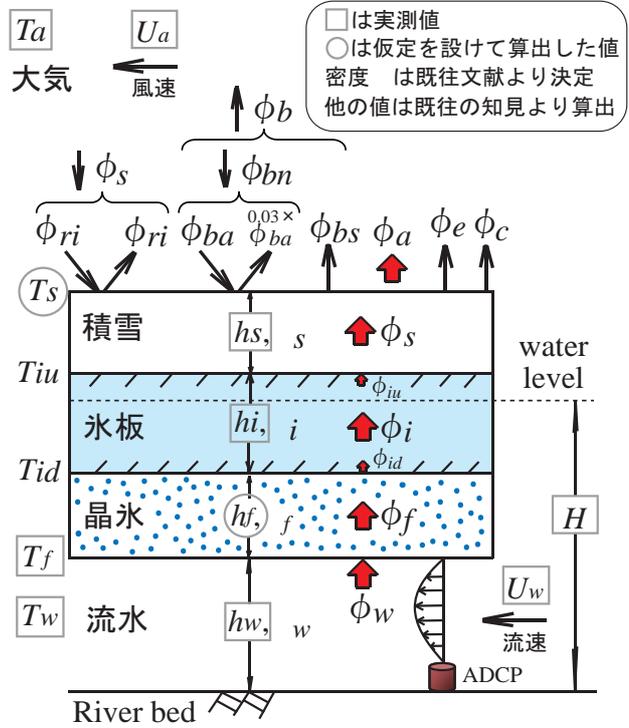


図-4 結氷河川における熱収支の概要図

ここで、 $h_i[m]$ : 氷板厚,  $h'_i[m]$ :  $\Delta t$  前の氷板厚,  $\Delta t[s]$ : 計算時間間隔で 600 秒とした。本研究で用いた氷の物性値を表-1 に示す。密度  $\rho_s$  は、新雪としまり雪の中間の値<sup>3)</sup>とし、密度  $\rho_i$  は、-10 の場合の値<sup>3)</sup>とした。密度  $\rho_f$  は、晶氷層内の水を除く晶氷のみの密度で、晶氷の空隙率  $\lambda$  を 0.4 とした<sup>4)</sup>、 $\rho_f = (1 - \lambda) \times \rho_i$  から算出した。熱伝導率  $k_i$  は-10 の値<sup>3)</sup>であり、熱伝導率  $k_s, k_f$  については、雪の熱伝導率は 80kg/m<sup>3</sup> の場合 0.05W/m/、500kg/m<sup>3</sup> の場合 0.6W/m/ であり<sup>3)</sup>、この値を参考として密度から線形で比例配分して算出した。

(2) 雪面から大気への熱フラックス  $\phi_a$

雪面から大気への熱フラックスは、短波放射量、長波放射量、潜熱フラックス、顕熱フラックスの熱収支を考慮した式 (6) で表わされる。

$$\phi_a = -\phi_s + \phi_b + \phi_e + \phi_c \quad (6)$$

ここで、 $\phi$  の単位は  $[ \frac{cal}{cm^2 day} ]$  であり、 $[ \frac{W}{m^2} ]$  への単位変換は、 $1 [ \frac{cal}{cm^2 day} ] = 0.4844965 [ \frac{W}{m^2} ]$  となる。

a) 短波放射量  $\phi_s$

短波放射量は、式 (7) で表わされる。

$$\phi_s = \phi_{ri} - \gamma \phi_{ri} \quad (7)$$

雪面の反射率  $\gamma$  積雪の反射率 (アルベド) は、経時変化するため熱収支に大きな影響を与える。反射率の算

出には、気温を独立変数とする次式の近藤の式<sup>5)</sup>を用いた。

$$\gamma = (\gamma' - \gamma_{min}) \times \exp\left(-\frac{1}{k}\right) + \gamma_{min} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \gamma_{min} = 0.4 \\ k = -4.9T_a + 4.5 \\ k = 4.0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{when } T_a \leq 0.1 \\ \text{when } T_a > 0.1 \end{array}$$

降雪がある場合

$$\begin{cases} \gamma = \gamma_{max} \\ \gamma_{max} = -0.12T_a + 0.76 \\ \gamma_{max} = 0.88 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{when } T_a \geq -1.0 \\ \text{when } T_a < -1.0 \end{array}$$

大気短波放射量  $\phi_{ri}$  大気短波放射量は、次式の Shen<sup>6)</sup>の式を用いた。

$$\phi_{ri} = (a - b(NS - 50))(1 - 0.0065C^2) \quad (9)$$

NS:緯度は観測地点の緯度 44 °35 'を与えた。C[雲量(0-10)]:は、気象庁より得られる美深観測所の1時間毎の日照時間データを用いて、日照時間0時間を雲量10、日照時間1時間を雲量0として算出した。aおよびbは月毎の値が得られている<sup>6)</sup>が、日時毎の値を得るために、月毎の値を参考にして日数を独立変数とする次式を導出した。Dは12月1日からの日数である。

$$\begin{cases} a = 76.18 \times \exp(0.015D) \\ b = -0.001D^2 + 0.160D + 5.786 \end{cases}$$

b) 長波放射量  $\phi_b$

長波放射量は、式(10)で表わされる。

$$\phi_b = \phi_{bs} - \phi_{bn} \quad (10)$$

雪面逆長波放射量  $\phi_{bs}$  雪面逆長波放射量は、Stefan-Boltzmanの次式を用いた。Stefan-Boltzman定数  $\sigma[\frac{cal}{cm^2 day K^4}]$  は  $1.171 \times 10^{-7}$  を与えた。

$$\phi_{bs} = 0.97\sigma T_{sk}^4 \quad (11)$$

$$T_{sk} = T_s + 273.15$$

雪面温度  $T_s$  各層の熱移動量は、近似的に熱交換係数、熱伝導率、厚さ、温度差を変数とした式(12)、(13)、(14)、(15)で表わされ、これらの式より式(16)が導かれる。

$$\phi_a = h_{sa}(T_s - T_a) \quad (12)$$

$$\phi_s = \frac{k_s}{h_s}(T_{iu} - T_s) \quad (13)$$

$$\phi_i = \frac{k_i}{h_i}(T_{id} - T_{iu}) \quad (14)$$

$$\phi_f = \frac{k_f}{h_f}(T_f - T_{id}) \quad (15)$$

$$T_f - T_a = \frac{1}{h_{sa}}\phi_a + \frac{h_s}{k_s}\phi_s + \frac{h_i}{k_i}\phi_i + \frac{h_f}{k_f}\phi_f \quad (16)$$

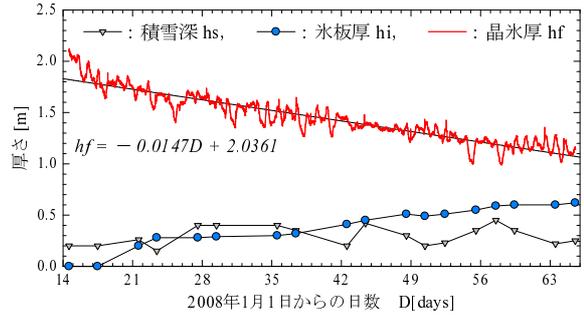


図-5 積雪深、氷板厚、晶氷厚の経時変化

ここで、ある時間において各層の境界面での変動は平衡状態であると仮定すると、 $\phi_a = \phi_s = \phi_i = \phi_f$  となり、式(16)は次式で表わされる。

$$\phi_a = \frac{T_f - T_a}{\beta} \quad (17)$$

$$\beta = h_{sa} \left( \frac{1}{h_{sa}} + \frac{h_s}{k_s} + \frac{h_i}{k_i} + \frac{h_f}{k_f} \right) \quad (18)$$

式(17)を式(12)に代入して、雪面温度の算出式である式(19)を導出した。

$$T_s = T_a + \frac{T_f - T_a}{\beta} \quad (19)$$

雪面長波放射量  $\phi_{ba}$  雪面長波放射量は、式(20)で表わされ、 $\phi_{ba}$ の算出はBolzmanの式(21)を用いた。

$$\phi_{bn} = \phi_{ba} - 0.03\phi_{ba} \quad (20)$$

$$\phi_{ba} = (0.55 + 0.052\sqrt{e_a})(1 + 0.0017C^2)\sigma T_{ak}^4 \quad (21)$$

$$T_{ak} = T_a + 273.15$$

ここで、 $e_a$ [hPa]:気温の飽和水蒸気圧は、 $T$ [ ]:対象とする温度として、式(22)の Tetens<sup>5)</sup>の式から算出した。

$$e = 6.1078 \times 10^{(aT)/(b+T)} \quad (22)$$

$$a = 9.5, \quad b = 265.3$$

c) 潜熱フラックス  $\phi_e$  と顕熱フラックス  $\phi_c$

潜熱フラックスと顕熱フラックスは、気温と風速を変数とする Rimsha-Donchenko の式(23)、(24)を用いた。

$$\phi_e = (1.56K_n + 6.08U_a)(e_s - e_a) \quad (23)$$

$$\phi_c = (K_n + 3.9U_a)(T_s - T_a) \quad (24)$$

$$K_n = 8.0 + 0.35(T_s - T_a)$$

$U_a$ [m/s]:風速、 $e_s$ [hPa]:雪面の飽和水蒸気圧であり、式(22)の Tetens<sup>5)</sup>の式から算出した。

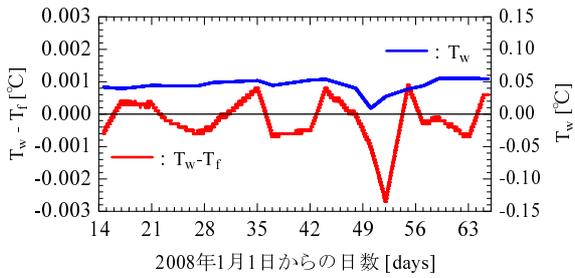


図-6 水温  $T_w$  と晶氷底面の温度  $T_f$  の差と水温の観測値

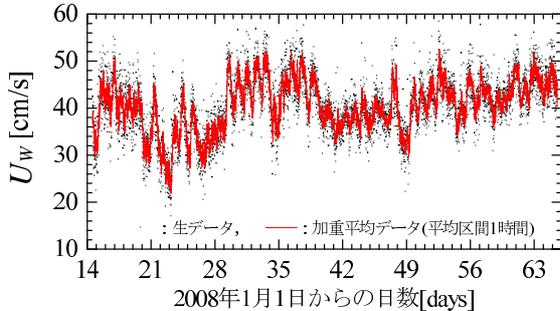


図-7 晶氷下の平均流速の経時変化

(3) 積雪深と晶氷厚の時間変化量

積雪深は、現地でも実測した値を線形補完して単位時間の変化量を算出し、晶氷厚は式(25)から算出した。ここで、 $\rho'_f$  [kg/m<sup>3</sup>] : 晶氷層内の水を含む密度で式(26)から求めると950.38が得られた。図-5に得られた値を示す。図-5より、晶氷厚は1.47cm/dayで減少しているため、この値を単位時間の変化量とした。

$$h_f = \frac{1}{\rho'_f} \left\{ \rho_w H - \rho_w h_w - \rho_s h_s - \rho_i h_i \right\} \quad (25)$$

$$\rho'_f = \lambda \rho_w + (1 - \lambda) \rho_i \quad (26)$$

(4) 流水から晶氷底面への熱フラックス  $\phi_w$

流水から晶氷底面への熱フラックスは、水深と流速を独立変数とする次式<sup>2)</sup>から算出した。

$$\phi_w = h_{wf} (T_w - T_f) \quad (27)$$

$$h_{wf} = C_{wi} \frac{U_w^{0.8}}{h_w^{0.2}} \quad (28)$$

ここで、 $C_{wi}$  は  $1622 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot s} \cdot \frac{S^{0.8}}{m^{2.6}} \right]$  であり、 $U_w$  [m/s] : 流速は鉛直平均流速として与えた。図-6, 7に計算に用いた値を示す。

4. 氷板厚の実測値と計算値の比較

氷板の形成要因について、式(5)より下記の4因子に成分分解した。左から、(放射・対流)、(積雪)、(晶氷)、(流水)の影響因子である。これらの値が氷板の形成に与える影響を定量的に評価した。

$$\left( \phi_a \frac{\Delta t}{\rho_i L_i} \right), \left( -\rho_s L_s \frac{dh_s}{dt} \frac{\Delta t}{\rho_i L_i} \right), \left( -\rho_f L_f \frac{dh_f}{dt} \frac{\Delta t}{\rho_i L_i} \right), \left( -\phi_w \frac{\Delta t}{\rho_i L_i} \right)$$

図-8に氷板厚の実測値と計算値を示す。また、参考にStefan式による計算値も合わせて示した。

放射・対流による氷板厚の計算値とStefan式 ( $\alpha=1.0$ ) の計算値は良く一致している。この事は、複雑な放射・

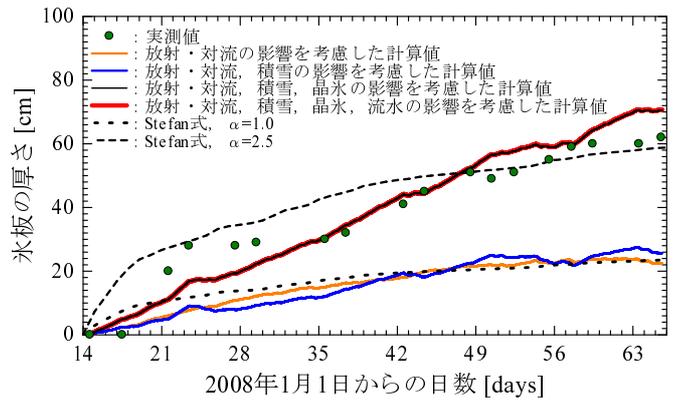


図-8 氷板厚の実測値と計算値

対流の計算をせずとも、放射・対流が氷板の形成要因に支配的である場所であれば、Stefan式は精度良く氷板厚を算出できる事を示唆している。

積雪による影響については、約24日目から42日目の断熱効果や約42日目からの雪の氷化の現象が推察できるが、その影響は全体の氷板厚に対して小さい。一方、晶氷の氷化による氷板厚の増加は大きく、全体の氷板厚の半分以上を占めている。

流水による影響については、今回の対象とした期間では、ほとんど氷板の形成に影響を与えていない。図-6より水温差が小さく、式(27)より流水による融解が促されなかったと推定できる。

全ての影響を考慮した氷板厚の計算値とStefan式 ( $\alpha=2.5$ ) の比較では、計算開始ではStefan式の方が、氷板厚を大きく計算しており一致していないが、実測値との比較では、全ての影響を考慮した氷板厚の計算値では最大誤差約12cmで、Stefan式の計算値では最大誤差約18cmであり、両者ともに許容範囲内で再現可能であると言える。

5. まとめ

氷板の形成要因として放射・対流、積雪、晶氷、流水の4因子に着目して、実測値を用いた氷板厚計算モデルを構築し、氷板形成に与える影響を定量的に評価した。本研究により、以下の事が明らかとなった。

Stefan式は、氷板の形成に対して放射・対流が支配的である場所であれば、精度良く氷板厚を算出できる。

今回の観測地点での氷板の形成要因は、放射・滞留および晶氷の氷化の影響が支配的であり、雪および流水による影響は小さい事が明らかとなった。

参考文献

- 1) 河川結氷対策指針, 通年施工推進協議会, pp.4-5, 1999.
- 2) George D. Ashton, Ed.: River Lake Ice Engineering, Water Resources Publications, pp.233-236, pp.289, 1986.
- 3) 雪と氷の事典, (社)日本雪氷学会 [監修], 朝倉書店, pp.91, pp103-105, pp.241, 2002.
- 4) H.T.Shen, De.Sheng.Wang: UNDER COVER TRANSPORT AND ACCUMULATION OF FRAZIL GRANULES, JHE, Vol.121, No.2, February, pp184-195, 1995.
- 5) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, pp.26, pp252-253, 1994.
- 6) H.T.Shen, M.ASCE and Li-Ann Chiang: SIMULATION OF GROWTH AND DECAY OF RIVER ICE COVER, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.110, No.7, July, 1984