

クロスフロー形風車の設計形状とその性能評価

DESIGN CONFIGURATION AND PERFORMANCE EVALUATION OF CROSS-FLOW WIND ROTORS

牛 山 泉^{*1} 一 色 尚 次^{*2} 柴 国 鐘^{*3}
 Izumi USHIYAMA Naotsugu ISSIKI Guo-zhong CHAI

Abstract

The cross-flow wind rotor is a type of wind rotor which has high torque and low speed characteristics. Until now, there has been little systematic work on the optimum design configuration of cross-flow wind rotors. In the present work, various model tests were carried out in a wind tunnel, in order to determine this optimum configuration. The effects of four design parameters on the aerodynamic performance were experimentally determined. The parameters were the pitch angle of the blades, the number of blades, the blade-chord/diameter ratio, and the aspect ratio. From the experimental results, for all cases, it was found that the torque curves are approximately linear with the tip speed ratio. It was also found that the torque curves reach zero almost at the same tip speed ratio of about 0.75. The maximum value of the power coefficient is approximately 0.12 and the corresponding value of the tip speed ratio is about 0.37. Moreover, the author's proposed expressions for torque and power characteristics were excellent agreement with the experimental results. Thus, the rotor configuration giving the maximum torque and power was deduced from these measurements. Finally, the visualizations of the flow in and around the cross-flow and Savonius rotors were also conducted in a smoke wind tunnel.

Key words: cross-flow, wind rotor, wind tunnel, model test, torque, power, tip speed ratio

1. 緒言

クロス・フロー形風車は、回転軸に取付けられた2枚の円板の間に多数の翼弦長の小さなブレードを並べたものである。その形状はシロッコファンや、バンキ・ターピン水車と類似しており、衝動差動型の典型的な垂直軸抗力型風車の一つである。この風車ブレードの風を受ける面の凹面の動圧が凸面の動圧より大きく、その差が風車の駆動力となる。さらに、この風車の特徴は、流入した気流の一部がロータの外周から中へ入り再びブレードの間を通して外へ出ることである。したがって、気流はロータのブレードに2回作用し、これが付加的な駆動トルクを与えることになる。このように気流がロータをクロスして流れることからクロス・フロー風車あるいは貫流風車といわれる。

この風車は風向に対する方位制御が不要という垂直

軸風車の一般的特徴に加えて、風速2.5m/s程度の低い風速から起動し、最高回転数は低いが、静肅で、高トルクを有することも特徴といえる。しかしこの風車に関する研究はR. Champlly⁽¹⁾およびM. J. Holgate⁽²⁾らによる報告がなされているのみで、その内容もロータ性能に及ぼす設計形状の影響について、きわめて限られた因子について調べているにすぎない。そこで、予備設計の段階において最適設計形状を決定するために、種々の設計形状因子についての影響を明らかにし、体系化することが必要である。

本研究においては、アスペクト比、ブレード枚数、ブレードの弦長と直径の比、およびピッチ角を含む主要な設計形状パラメータのクロス・フロー形風車の性能に及ぼす影響を明らかにした。さらに、可視化実験によりロータの周囲および内部における流れの挙動を明らかにした。

2. 記号および単位

本研究において用いた記号とその単位を以下に示す。

* 原稿受付 平成6年2月17日

* 1 足利工業大学機械工学科 教授

* 2 東京工業大学 名誉教授

* 3 中国・浙江工业大学 助教授

A : 風車掃過面積 [m^2]AR : アスペクト比 ($= H/D$)

B : ブレード枚数

C : ブレード弦長 [m] V : 風速 [m/s]D : ロータ直径 [m] λ : 周速比 ($= U/V$)H : ロータ高さ [m] ρ : 空気密度 [kg/m^3]P : パワー [Nm/s] C_p : パワー係数Q : 軸トルク [Nm] C_q : トルク係数U : ロータ周速度 [m/s]

3. 実験装置および方法

本実験で使用した風洞は矩形断面 $1,050\text{mm} \times 1,050\text{mm}$ の測定部を有する吹出形であり、風速は可変速モータにより 2m/s より 22m/s まで変化できるようになっている。図 1 に実験装置のレイアウトを示すが、トルクメーター（最大容量 2.0Nm ）とパルス・カウンター式回転計は風車ロータ下部に設けられている。風速の測定にはピト管を風洞吹出口に設置し、ベツツ型マノメータにより測定している。図 2 は、供試クロス・フロー風車の形状およびブレード取付角を示している。

また表 1 は、9種類の供試模型風車ロータの種々の設計パラメータを示している。ロータは 0.6mm 厚の鋼板で作られている。実験は各ロータに対し、無負荷状態から徐々に制動を加えてゆき、ロータの回転数の変化とこれに対応するトルクを測定する。これからトルク係数とパワー係数を算出することができる。

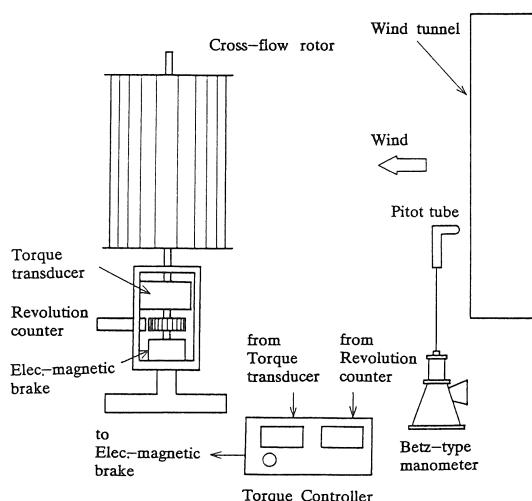


図 1 風洞実験装置概要

表 1 供試風車の設計形状パラメータ

	No. of Blade	Angle (deg)	Chord (mm)	Height (mm)	Diameter (mm)
No. 1	18	34	60	500	300
No. 2	18	34	44	500	300
No. 3	15	34	76	500	300
No. 4	15	34	60	500	300
No. 5	15	34	44	500	300
No. 6	12	34	76	500	300
No. 7	12	34	60	500	300
No. 8	12	34	44	600	250
No. 9	18	34	80	375	400

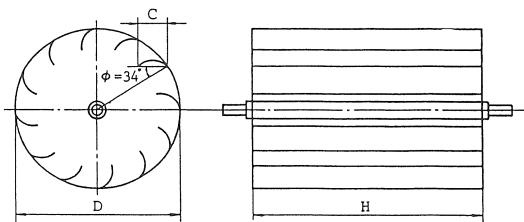


図 2 供試風車の形状およびブレード取付角

4. 実験結果および考察

実験は、著者らの一人、一色により確かめられた最適ピッチ角 34° ⁽³⁾ を有する各設計形状のロータに対し、風速 6m/s 、 8m/s および 10m/s について行っている。

図 3 より図 6 は無次元量を用いて性能を表示しているため、本来はトルク係数やパワー係数に対し、同一周速比においては風速の影響は表れないはずである。しかし、本実験ではトルク計の回転数による摩擦損失の相違などから風速による影響が認められる。

4. 1 ブレード枚数の影響

トルク係数 C_q およびパワー係数 C_p に及ぼすブレード枚数の影響を図 3 および図 4 に示す。これらの図のうち図 3 は No. 1 ロータおよび No. 7 ロータに、図 4 は No. 3 ロータと No. 6 ロータに対応している。これらの図よりトルク特性に関しては、いずれのロータについても、周速比が低い領域ほどトルク係数は大きくなることがわかる。また、ブレード枚数が少ないものほど、トルク係数 C_q は大きく、また、最大トルク係数 $C_{q_{max}}$ も大きいことがわかる。このクロス・フロー風車のトルク特性は、ブレード枚数が多いほどトルク係数 C_q が大きくなる水平軸のプロペラ形や多翼形風車のトルク

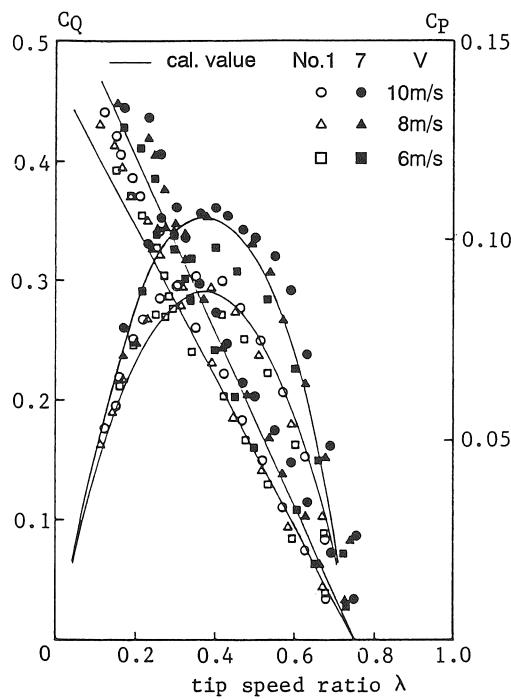


図3 風車性能に及ぼすブレード枚数の影響

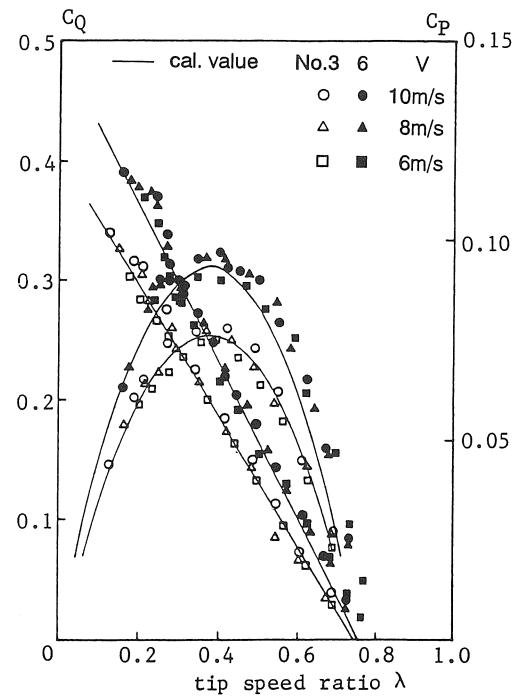


図4 風車性能に及ぼすブレード枚数の影響

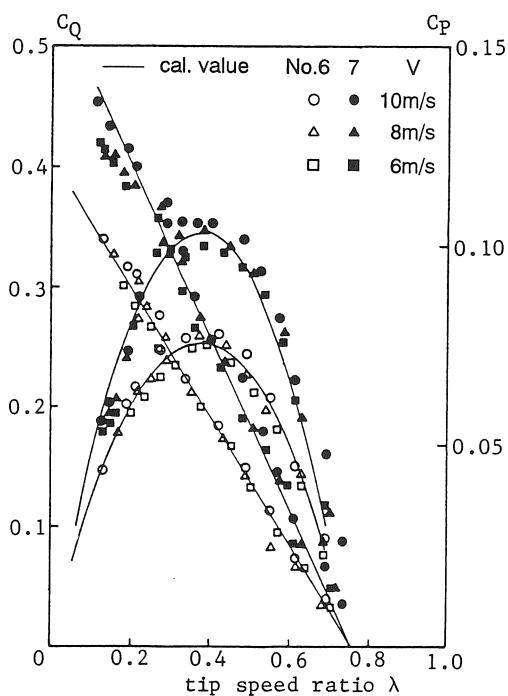


図5 風車性能に及ぼすC/D比の影響

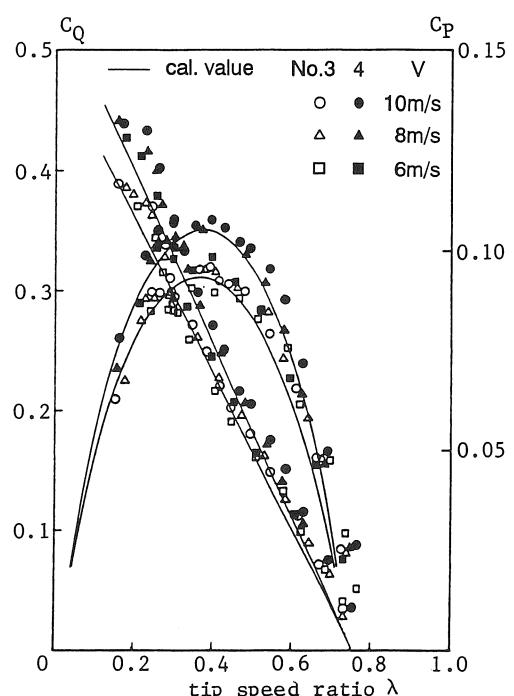


図6 風車性能に及ぼすC/D比の影響

特性とは大きく異なっている。

しかしながら、No. 4 と No. 7 ブレードの間ではこの特徴は明瞭には現れていない。

一方、パワー特性に関しては、いずれのロータも低周速比域においてパワー係数 C_p は低いが、周速比の増加と共に増加して最大値 $C_{p_{max}}$ に到達し、その後、周速比の増加に伴って急激に減少する。これは、他の形式の風車の特性と同様である。

すなわち、本実験の範囲ではブレード枚数は少ないものほどトルク係数 C_q 、パワー係数 C_p も大きくなることがわかる。

4. 2 ブレード弦長と直径の比の影響

ブレード弦長と直径の比 (C/D) のトルク係数 C_q に及ぼす影響を図 5 と図 6 に示す。

これらの図のうち、図 5 は No. 6 と No. 7 ロータに、図 6 は No. 3 と No. 4 ロータに対応している。これらの図から明らかなように C/D 比が小さいロータの方が同一周速比におけるトルク係数 C_q は大きくなることが明らかである。しかしながら、周速比の大きな領域においては、 C/D の影響による差異が小さくなってくることがわかる。

パワー係数 C_p に対する影響も図 5 と図 6 に示されている。これらの図より、この場合のパワー係数 C_p の特性も、図 3 および図 4 におけるパワー係数の特性と類似している。すなわち、低周速比の範囲においては、パワー係数 C_p は小さく、周速比の増大と共に増加する。そして、最大パワー係数 $C_{p_{max}}$ に達したのち、パワー係数は周速比の増大に伴って急速に減少する。さらに、 C/D 比の小さなものほど、パワー係数 C_p もパワー係数の最大値 $C_{p_{max}}$ も大きくなることがわかる。

4. 3 アスペクト比の影響

本研究におけるアスペクト比はロータ高さと直径の比と定義している。トルク係数 C_q 及びパワー係数 C_p に及ぼすアスペクト比の影響を図 7 に示す。この図より、ロータのアスペクト比は、トルク係数 C_q およびパワー係数 C_p にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。つまり、No. 1 ロータのアスペクト比は $A_R = 1.67$ 、No. 9 ロータのアスペクト比は $A_R = 0.938$ であるが、本実験においてはアスペクト比の相違は二次的な影響を有するのみであるといえる。

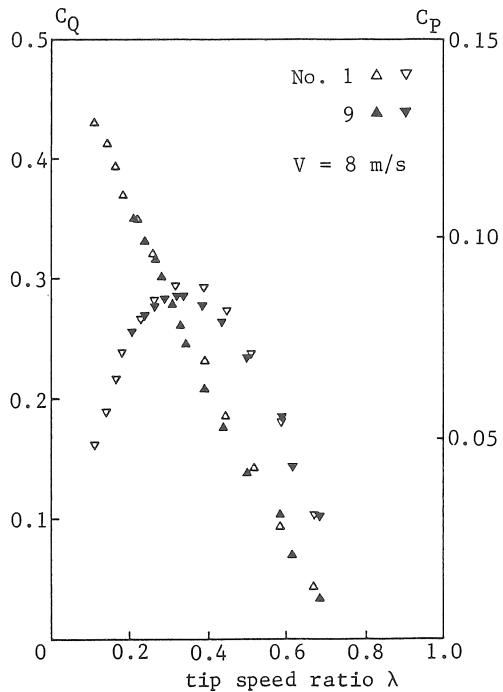


図 7 風車性能に及ぼすアスペクト比の影響

4. 4 トルク係数 C_q とパワー係数 C_p の特性

本研究の供試模型風車に対する、トルク係数 C_q とパワー係数 C_p は、図 3 より図 7 に示されている。

これらの図より、いずれの場合においても周速比に対するトルク係数 C_q の変化は、近似的に直線で表せることが明らかである。

そこでトルク係数 C_q を次の式 (1) のような周速比 λ に関する一次式で表すこととする。

$$C_q = A + B \lambda \quad (1)$$

ここで、トルク係数 C_q は静止時 ($\lambda = 0$) には C_{q0} に等しいので、定数 A は周速比 0 に対応するトルク C_{q0} となる。

さらに、これらの図からわかるようにいずれの場合にもトルク係数 C_q は、周速比 λ がほぼ $3/4$ のときにゼロとなることもわかる。

したがって、式 (1) は以下のように書き換えることができる。

$$C_q = C_{q0} (1 - 4/3 \lambda) \quad (2)$$

ここで、一般にパワー係数とトルク係数の関係を表す $C_p = C_{q0} \lambda$ の関係を式 (2) に代入し、パワー係数 C_p を表す以下の式を導くことができる。

$$C_p = C_{q0} (1 - 4/3 \lambda) \lambda \quad (3)$$

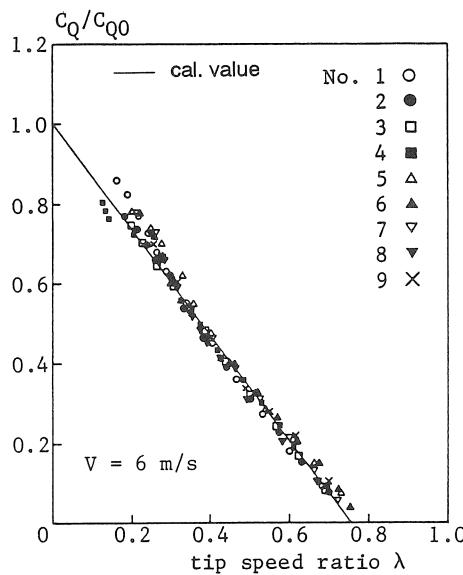


図 8 正規化したトルク係数と周速比の関係

この式(3)は λ に関する二次式であるから放物線を表すことになる。

パワー係数 C_P の最大値は式(3)を λ に関して微分し0とおくことにより得られ、 $C_{P\max}$ に対応する λ の値は $\lambda = 3/8$ となる。

この値を式(3)に代入すると次式が得られる。

$$C_{P\max} = (3/16) C_{Q0} \quad (4)$$

さらに、この式(4)を式(3)に代入し、次のような関係が得られる。

$$C_P = (16/3) C_{P\max} (1 - 4/3 \lambda) \lambda \quad (5)$$

これらの式(2)、(4)および(5)より、パワー係数の最大値 $C_{P\max}$ あるいは周速比0に対応するトルク C_{Q0} がわかれれば、トルクおよびパワーの特性を求めることができる。図3より図7の中に描かれている曲線は最大パワー係数 $C_{P\max}$ がわかっていると仮定して式(2)、(4)および(5)より計算したものである。これらの図より、ここで提案した式により、実験結果をよく整理することができることがわかる。

次に、式(2)および式(5)より、正規化されたトルク係数 C_Q/C_{Q0} およびパワー係数 $C_P/C_{P\max}$ を得る。

$$C_Q/C_{Q0} = 1 - 4/3 \lambda \quad (2)$$

$$C_P/C_{P\max} = 16/3 (1 - 4/3 \lambda) \lambda \quad (5)$$

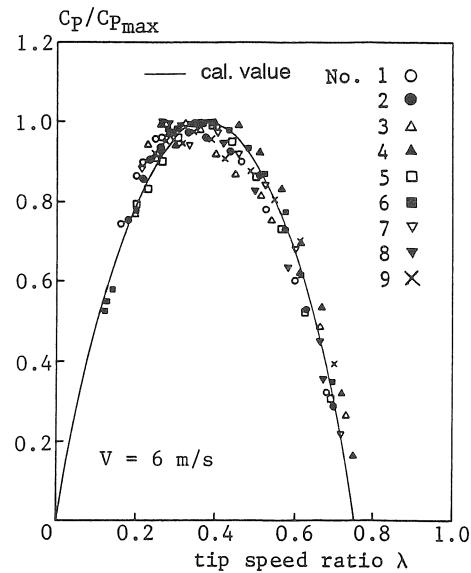
図8および図9に正規化されたトルク係数 C_Q/C_{Q0} 

図9 正規化したパワー係数と周速比の関係

および正規化されたパワー係数 $C_P/C_{P\max}$ を示す。これらの図から、本研究における全ての実験結果が、トルク係数に関しては直線、パワー係数に関しては放物線で表されることがわかる。

5. 可視化実験

従来、クロス・フロー風車のロータ周囲および内部の気流の挙動が明らかにされていないため、アクリル製の透明風車模型を用いて、煙風洞において可視化実験を行った。また、クロスフロー風車と同じ垂直軸抗力型風車の中でもっともよく知られているサボニウス風車⁽⁴⁾との比較も行った。

測定部の側面は500mm×700mm、断面は500mm×100mm、模型は高さ75mm、直径92mmである。気流の可視化は灯油ミスト法により、流速5m/sで行なった。レイノルズ数は $R = 1.35 \times 10^4$ である。

写真1にクロス・フロー風車の内部流れの様子を示す。また写真2には比較のために、サボニウス風車の内部流れの様子を示す。

クロス・フロー風車の場合には写真1よりロータ外周部前方より気流が内部に流入しているが、これがロータ後方より流出するためロータ外周部の流れは剥離してしまっている。また、ロータ後流の広がりの小さいこともわかる。

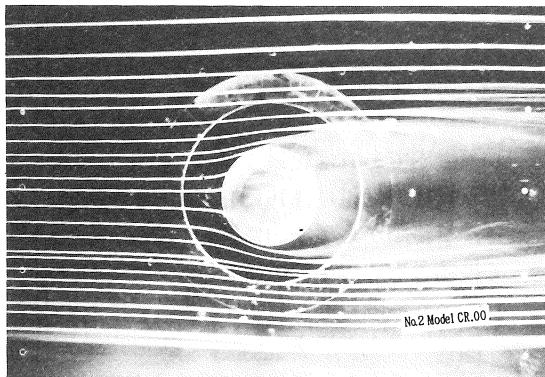


写真1 クロス・フロー風車の周囲および内部の流れ

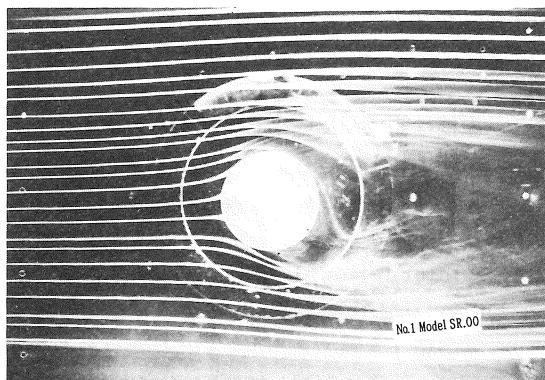


写真2 サボニウス風車の周囲および内部の流れ

一方、サボニウス風車の場合には写真2からロータの後方まで周囲の流れは剥離せず、これがクロス・フロー風車より高性能である理由のひとつと考えられる。また、ロータ周囲および後流の広がりがクロス・フロー風車より大きくなっていることもわかる。

6. 結論

クロス・フロー形風車ロータに関する本実験の範囲から以下の結論が得られた。

- 1) ブレード枚数は、少ないほど、同一周速比におけるトルク係数およびパワー係数は大きくなり、トルク係数の最大値とパワー係数の最大値も大きくなる。
- 2) ブレード弦長と直径の比が小さいほど、同一周速比におけるトルク係数およびパワー係数は大きくなり、パワー係数の最大値も大きくなる。
- 3) アスペクト比はトルク係数およびパワー係数にほとんど影響を与えない。

4) 筆者らの提案したトルク特性およびパワー特性に関する実験式により、実験結果をよく整理することができることがわかった。

5) 本研究の結果から、最大のトルクおよびパワーを与えるロータの設計形状を求めることができる。

6) 可視化実験によりクロス・フロー風車のロータ周囲および内部の流れの挙動が明らかになった。

謝辞： 本研究における可視化実験については東海大学開発技術研究所の関和市教授の御指導・御協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) R. Champly, Theorie, construction, montage, utilisation au puisage de l'eau et à la production de l'électricité, (1933), Dunold publishers, Paris
- (2) M. J. Holgate, A Cross Flow Wind Turbine, Proc. International Symposium on Wind Energy Systems, B2-29~38, (1976)
- (3) Issiki et al., Experiments of One-through Wind Turbine, Proc. Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Vol. 4, 1236-1241 (1986)
- (4) 牛山泉、長井浩、サボニウス風車の最適設計形状に関する研究、日本機械学会論文集（B編）、52巻480号、（昭61-8）