

JAERI-M
5221

超音波風速計の風向風速特性試験

1973年3月

林 隆・須賀 新一・角田 道生

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

超音波風速計の風向風速特性試験

日本原子力研究所東海研究所保健物理安全管理部

林 隆・須賀新一・角田道生

(1973年2月10日受理)

超音波風速計とプロペラ型風向風速計の校正および特性試験を、気象庁の風洞を用いておこなった。超音波風速計については、風向別の三成分の風速特性を調べ、各成分の補正係数を明らかにした。この補正係数によって、通常的气象状態のもとでは、いずれの風向に対しても、水平成分の風速測定値の誤差を±2%の範囲内におさえることができた。

Test on the Characteristics of an Ultrasonic Anemometer

Takashi HAYASHI, Shinichi SUGA, Michio KAKUTA

Div. of Health Physics and Safety, Tokai, JAERI

(Received February 10, 1973)

The results of calibration and performance test with the wind tunnel of Japan Meteorological Agency, are described for an ultrasonic anemometer and a Koshinvane.

Wind-velocity characteristics of the three components for the former were measured at various wind directions, concerning the configuration of its sensors, and the correction coefficient for each component was obtained.

目 次

1. まえがき	1
2. 風向風速計と風洞	1
3. 実験法	1
4. 実験結果	2
5. まとめ	5
6. あとがき	6
7. 参考文献	6

1. ま え が き

近年超音波風速計が開発され、大気汚染等の問題においてその必要性和有利性から各所で利用されるようになった。そして、大気境界層解明の研究手段として欠かせない測定器になってきた。当所においても海陸風観測やアルゴン41の雲からの地上照射率観測において利用された。超音波風速計についてはまだ未知の部分もあると思われるが、今回はより正確なデータの取得のため出発点にもどって風向風速特性について調べた。また、比較のためプロベラ型風向風速計についても調べた。

2. 風 向 風 速 計 と 風 洞

1) 超音波風速計

現在、我々は真空管式とトランジスタ式の2台の超音波風速計を使用している。トランジスタ式は真空管式を全く同じ回路機能の下に改造されたものでポータブル化されている。本実験ではトランジスタ式の型名PA-311型(プローブ:TR-11A)を使用した。本器はパルス時間差方式によるもので3方向固定成分風速を測定できる。測定レンジは0~±3, 0~±10, 0~±30m/secと微風から強風までの測定範囲をもっている。プローブスパンは20cm, 最大出力±1V, 出力インピーダンスは150Ωである。プローブ間には100KHzの超音波の送受が約440回毎秒で繰り返されている。詳細については参考文献¹⁾に記されている。

2) プロベラ型風向風速計

2台のプロベラ型風向風速計(以下コーシンペーン)について行なった。1つは(Aとする)風速を直流発電機の出力で測定し、風向は100V送受信器によって行なわれる。形名AS-115, 製造番号K-2527である。他のは(Bとする)風速を交流発電機を用いているのでAと比較して整流損失だけ小さくなる。小さい信号に対しては、それが著しくなるので風速指示は、風速に対して直線関係にならない。しかし、直流発電式の整流子損失や摩擦の影響はない。風向は直流線輪によるものである。形名DS-12, 製造番号NO-6510である。

3) 風 洞

Fig-1に風洞を示す。Fig-2は、吹出し部分である。気象庁地下に設けられているゲッチンゲン型風洞を使用した。この吹出口は1mφ, 風速の制御は200KW 直流電動機を用いたワードレオナード方式によるもので0.5~90m/secの風速を制御する事が可能である。

3. 実 験 法

風洞の標準風速は吹出口に設けたアルコール式マンメータによった。風速への換算は全て気象庁風洞室の加藤氏にやっていただいた。風速が3m/sec以下ではマンメータからの換算では、

1. ま え が き

近年超音波風速計が開発され、大気汚染等の問題においてその必要性和有利性から各所で利用されるようになった。そして、大気境界層解明の研究手段として欠かせない測定器になってきた。当所においても海陸風観測やアルゴン41の雲からの地上照射率観測において利用された。超音波風速計についてはまだ未知の部分もあると思われるが、今回はより正確なデータの取得のため出発点にもとって風向風速特性について調べた。また、比較のためプロベラ型風向風速計についても調べた。

2. 風 向 風 速 計 と 風 洞

1) 超音波風速計

現在、我々は真空管式とトランジスタ式の2台の超音波風速計を使用している。トランジスタ式は真空管式を全く同じ回路機能の下に改造されたものでポータブル化されている。本実験ではトランジスタ式の型名PA-311型(プローブ:TR-11A)を使用した。本器はパルス時間差方式によるもので3方向固定成分風速を測定できる。測定レンジは0~±3, 0~±10, 0~±30m/secと微風から強風までの測定範囲をもっている。プローブスパンは20cm, 最大出力±1V, 出力インピーダンスは150Ωである。プローブ間には100KHzの超音波の送受が約440回毎秒で繰り返されている。詳細については参考文献¹⁾に記されている。

2) プロベラ型風向風速計

2台のプロベラ型風向風速計(以下コーシンペーン)について行なった。1つは(Aとする)風速を直流発電機の出力で測定し、風向は100V送受信器によって行なわれる。形名AS-115, 製造番号K-2527である。他のは(Bとする)風速を交流発電機を用いているのでAと比較して整流損失だけ小さくなる。小さい信号に対しては、それが著しくなるので風速指示は、風速に対して直線関係にならない。しかし、直流発電式の整流子損失や摩擦の影響はない。風向は直流線輪によるものである。形名DS-12, 製造番号NO-6510である。

3) 風 洞

Fig-1に風洞を示す。Fig-2は、吹出し部分である。気象庁地下に設けられているゲッチンゲン型風洞を使用した。この吹出口は1mφ, 風速の制御は200KW直流電動機を用いたワードレオナード方式によるもので0.5~90m/secの風速を制御する事が可能である。

3. 実 験 法

風洞の標準風速は吹出口に設けたアルコール式マノメータによった。風速への換算は全て気象庁風洞室の加藤氏にやっていただいた。風速が3m/sec以下ではマノメータからの換算では、

1. ま え が き

近年超音波風速計が開発され、大気汚染等の問題においてその必要性和有利性から各所で利用されるようになった。そして、大気境界層解明の研究手段として欠かせない測定器になってきた。当所においても海陸風観測やアルゴン41の雲からの地上照射率観測において利用された。超音波風速計についてはまだ未知の部分もあると思われるが、今回はより正確なデータの取得のため出発点にもとって風向風速特性について調べた。また、比較のためプロベラ型風向風速計についても調べた。

2. 風 向 風 速 計 と 風 洞

1) 超音波風速計

現在、我々は真空管式とトランジスタ式の2台の超音波風速計を使用している。トランジスタ式は真空管式を全く同じ回路機能の下に改造されたものでポータブル化されている。本実験ではトランジスタ式の型名PA-311型(プローブ:TR-11A)を使用した。本器はパルス時間差方式によるもので3方向固定成分風速を測定できる。測定レンジは0~±3, 0~±10, 0~±30m/secと微風から強風までの測定範囲をもっている。プローブスパンは20cm, 最大出力±1V, 出力インピーダンスは150Ωである。プローブ間には100KHzの超音波の送受が約440回毎秒で繰り返されている。詳細については参考文献¹⁾に記されている。

2) プロベラ型風向風速計

2台のプロベラ型風向風速計(以下コーシンペーン)について行なった。1つは(Aとする)風速を直流発電機の出力で測定し、風向は100V送受信器によって行なわれる。形名AS-115, 製造番号K-2527である。他のは(Bとする)風速を交流発電機を用いているのでAと比較して整流損失だけ小さくなる。小さい信号に対しては、それが著しくなるので風速指示は、風速に対して直線関係にならない。しかし、直流発電式の整流子損失や摩擦の影響はない。風向は直流線輪によるものである。形名DS-12, 製造番号NO-6510である。

3) 風 洞

Fig-1に風洞を示す。Fig-2は、吹出し部分である。気象庁地下に設けられているゲッチンゲン型風洞を使用した。この吹出口は1mφ, 風速の制御は200KW 直流電動機を用いたワードレオナード方式によるもので0.5~90m/secの風速を制御する事が可能である。

3. 実 験 法

風洞の標準風速は吹出口に設けたアルコール式マノメータによる。風速への換算は全て気象庁風洞室の加藤氏にやっていただいた。風速が3m/sec以下ではマノメータからの換算では、

誤差が大きくなると言われるので直流電動機の回転数によったが、これでも風速が大きいときのマノメータ値と比較した場合多少誤差が大きい。実際の測定値はマノメータの場合有効数字3桁であり、回転数の時は2桁である。

風速の指示記録は、コーシンペーンの場合常時観測記録に使用している風向風速計録計を使用し、また、超音波風速計の出力記録はナショナル2ペンレコーダを使用した。この時の電圧レンジは10Vであった。測定にあたっては目視での指示読み取り値も同時に記録したがここで用いたデータは精度の点からチャート記録によった。

超音波風速計は3CHの固定成分風速を測定できるので種々の測定方法が考えられるが今回は次のように行なった。感部には測定される風速の正方向を示す矢印が製造者によって記されている。CH-1の正方向を直角座標のX軸の方向に、CH-2の正方向をY軸の方向に合わせたとき、CH-3はこれらと右手系をなすようにZ軸の方向に合わせるのが通例である。たとえば、感部のCH-1を西風が正になるように合わせ、CH-2を南風が正になるように合わせれば、CH-3は下から上への風で正の値を示すように配置する。3つの各感部は同一の構造であり、構造の相違に起因する特性の差はない。実験はCH-1、CH-2の2つの感部を平面の絶体風速をあとで求めることができるよう直交した形に組んだ。CH-3については他と組まないで測定した。最初にCH-3について風洞風速を変化させた時の直線性を測定した。直線性の測定はセンサの方向と風洞風とのなす角を 0° 、 5° 、 20° に固定し、そのおのこの場合について行なった。次に風洞風速を 11m/sec に固定して、風向特性の測定をした。また、風洞風速をそのままの 11m/sec とし、鉛直方向に 10° 傾けて同じく風向特性の測定をした。直交させて組んだCH-1、2についても同様にして風速特性(直線性)、風向特性、CH-2を鉛直方向に 10° 傾けた時の風向特性を測定した。コーシンペーンについては風速特性についてのみ行なった。プロペラの中心と風洞の中心を合わせて取り付け用架台に固定し行なった。Fig-3は超音波風速計の感部の取り付け状態を示す。 θ は風洞風に対してCH-2(CH-3)の右回り回転角度で、感部を固定したと考えると左回りになる。したがって、図に示すときは左回りに目盛を付した。 φ は鉛直特性を調べるために傾けた角度、風洞風方向とCH-2(CH-3)の方向を一致させた時の風下を上方に回した場合を正とした。したがって、CH-2のスペンは水平面に対して φ の傾きをもつが、CH-1はスペンが水平となり、スペンと直角方向に φ だけ傾けた事になる。CH-1、2を直交させて組んだ感部を傾ける場合、水平角のどこに基準をおいて傾けるかで種々の傾け方が考えられるが、今回の場合はCH-2を基準にとっての傾きで1例に過ぎない。しかし、他の傾きの場合と大きな差はないと考える。

実験は1972年12月14日に行なった。風洞温度は 18°C であった。

4. 実験結果

Fig-4には風洞風に対し、CH-1では感部のスペン方向となす角を、また、CH-2についてはスペンの直角方向となす角を θ とするFig-3のような組み合わせ配置で、 θ を 0° 、 10° 、 20° と変えた時のおのこのおのこのについて、風速特性を示した。横軸は風洞風速を、縦軸は各

誤差が大きくなると言われるので直流電動機の回転数によったが、これでも風速が大きいとき
のマノメータ値と比較した場合多少誤差が大きい。実際の測定値はマノメータの場合有効数字
3桁であり、回転数の時は2桁である。

風速の指示記録は、コーシンペーンの場合常時観測記録に使用している風向風速計録計を使用
し、また、超音波風速計の出力記録はナショナル2ペンレコーダを使用した。この時の電圧
レンジは10Vであった。測定にあたっては目視での指示読み取り値も同時に記録したがここ
で用いたデータは精度の点からチャート記録によった。

超音波風速計は3CHの固定成分風速を測定できるので種々の測定方法が考えられるが今回
は次のように行なった。感部には測定される風速の正方向を示す矢印が製造者によって記され
ている。CH-1の正方向を直角座標のX軸の方向に、CH-2の正方向をY軸の方向に合わ
せたとき、CH-3はこれらと右手系をなすようにZ軸の方向に合わせるのが通例である。た
とえば、感部のCH-1を西風が正になるように合わせ、CH-2を南風が正になるように合
わせれば、CH-3は下から上への風で正の値を示すように配置する。3つの各感部は同一の
構造であり、構造の相違に起因する特性の差はない。実験はCH-1、CH-2の2つの感部を
平面の絶対風速をあとで求めることができるよう直交した形に組んだ。CH-3については他
と組まないで測定した。最初にCH-3について風洞風速を変化させた時の直線性を測定した。
直線性の測定はセンサの方向と風洞風とのなす角を 0° 、 5° 、 20° に固定し、そのおのこの
場合について行なった。次に風洞風速を 11m/sec に固定して、風向特性の測定をした。ま
た、風洞風速をそのままの 11m/sec とし、鉛直方向に 10° 傾けて同じく風向特性の測定を
した。直交させて組んだCH-1、2についても同様にして風速特性(直線性)、風向特性、
CH-2を鉛直方向に 10° 傾けた時の風向特性を測定した。コーシンペーンについては風速特
性についてのみ行なった。プロベラの中心と風洞の中心を合わせて取り付け用架台に固定し行
なった。Fig-3は超音波風速計の感部の取り付け状態を示す。 θ は風洞風に対してCH-2
(CH-3)の右回り回転角度で、感部を固定したと考えると左回りになる。したがって、図に
示すときは左回りに目盛を付した。 φ は鉛直特性を調べるために傾けた角度、風洞風方向と
CH-2(CH-3)の方向を一致させた時の風下を上方に回した場合を正とした。したがって、
CH-2のスパンは水平面に対して φ の傾きをもつが、CH-1はスパンが水平となり、スパ
ンと直角方向に φ だけ傾けた事になる。CH-1、2を直交させて組んだ感部を傾ける場合、水
平角のどこに基準をおいて傾けるかで種々の傾け方が考えられるが、今回の場合はCH-2を
基準にとっての傾きで1例に過ぎない。しかし、他の傾きの場合と大きな差はないと考える。
実験は1972年12月14日に行なった。風洞温度は 18°C であった。

4. 実 験 結 果

Fig-4には風洞風に対し、CH-1では感部のスパン方向となす角を、また、CH-2に
ついてはスパンの直角方向となす角を θ とするFig-3のような組み合わせ配置で、 θ を 0° 、
 10° 、 20° と変えた時のおのこのについて、風速特性を示した。横軸は風洞風速を、縦軸は各

感部のスパン方向の風洞成分風速に対する指示風速値をあらわす。Fig-5は同様に、 θ を 0° 、 5° 、 20° と変えた場合のCH-3の風速特性である。

この風向角 θ に対する感度の変化を調べるために、指示風速と風洞成分風速との風速比をとり、この風速比が風洞風速に対してどう変わるか、をFig-6に示した。風速が小さい時、風速比すなわち感度の過小傾向が見られるが、風速 3m/sec 以下では超音波風速計の測定レンジの切換えをし、また、風洞風速もファンの回転数から換算している。Fig-6の各場合ともバラツキがあり、また低風速では標準風速の有効桁が2桁である事、超音波風速計の測定レンジを 3m/sec に切変えるために、ウェイトが低いなどで一概に傾向を決めがたい。それゆえ、風速計の振動子支持物が風に及ぼす影響によって低い風速値では感度が異なるかも知れない、という考え方の良否を確かめる事はできなかった。そこで、各点に対して最も偏差の小さく風洞風速の変化に対して一定なる直線を描いた所、最も大きな偏差は低風速 3m/sec 以下を除いて、2%程度となった。また、 3m/sec 以下においては標準風速値の高精度化し、超音波風速計の測定レンジの切変えによる零点の変化および測定レンジ間の校正を正確に行なえるならば風速 $3\sim 10\text{m/sec}$ の傾向とほとんど同じ結果になると思われる。以上の結果から振動子支持物が風に与える影響は風速が $0\sim 10\text{m/sec}$ の範囲において同じ傾向としてさしつかえない。

Fig-7は風向角 θ を変化させて測定したCH-1, 2の風向特性である。図中、実測値をプロットし細線で結んだ曲線は、多少の感部の据え付け角度のずれと、感部取り付用雲台が感部を取り付けたままで全方向に回転できないので感部を付け直し回転するが、この時に生じる不連続とレンジ切換えによる相違があった。Fig-7の破線はそれらの角度ずれや不連続、相違などを修正したものである。以後はこの修正されたデータを用いた。図中太線で示す正弦曲線は風洞風速のスパン方向の成分風速を示す。

Fig-8はCH-3についてFig-7と同じ要領で描いた。

Fig-9はCH-1, 2の組み合わせ時の各チャンネルについて、風洞風速を 10.95m/sec 一定とした場合の風向特性を示した。超音波風速計では固定成分風速を測定するために負の値も観測される。そこで負の値に対しては、その絶対値をとり各風向に対して示した。Fig-10は同じくCH-3について風洞風速 11.0m/sec と一定にした場合の風向特性を示した。

Fig-11はCH-1, 2の指示風速をベクトル合成し、この値と風洞風速との比を全方向について描いたものである。Fig-9によれば感部のある部分の指示風速と風洞成分風速との比は、他の感部の風向 θ が同じ部分に比較して大部小さいために測定した風向($\tan^{-1} x_1/x_2$, x_1 : CH-1の指示風速値, x_2 : CH-2の指示風速値)は真の風向と異なってくる。Fig-11の破線は測定した見掛けの風向に対する風向特性を示した。このように、真の風向に対する風向特性と見掛けの風向特性との差はほとんどない。しかし、どの程度の風向偏差があるかを調べFig-12に示した。ここに示す風向角は $0\sim 45^\circ$ であるが他の部分は、相似関係にあるとみて8個の平均値で示した。

今までに求めた風向特性、風速特性は、風が水平から来る場合についてであった。実際の風は後で示すが、水平のみならず鉛直方向にも変動している。そこで感部を傾けて、風向特性を求めた。これらは鉛直風向特性として示した。CH-1, 2についてはFig-13にCH-3につ

いては Fig-14 に $\varphi = 10^\circ$ の場合の鉛直風向特性を示した。両図ともに、破線で $\varphi = 0^\circ$ の風向特性をも同時に示した。これと比較すると $\varphi = 10^\circ$ の場合は $\varphi = 0^\circ$ と比較して、感部による感度のくほみが小さくなる傾向が判る。ここで問題なのは、傾けた φ が 2 つのチャンネルにどのように影響するかという事である。そこで、風向 θ を固定し、 φ を変化した時の風向特性を鉛直特性として Fig-15 に示した。想像では、CH-1 においては φ を変えてもスパンは水平であり、なんら変化しないで中心の同心円周上に鉛直特性がのるかと思われたが実際は、 $\varphi = 0^\circ$ の風速値を直径とする円周の方に近い特性が得られた。これはかえって、水平成分風速を測定するために都合がよい。CH-2, 3 については感部のある近くの鉛直特性を示した。水平の場合の風向特性で得られた感部による風速感度の低下と同じような鉛直特性が得られた。CH-2 では θ が $\pm 30^\circ$ の間であるためになんとも言えないが CH-3 は感度のくほみから遠ざかると $\varphi = 0^\circ$ の時の風速を直径とする円周に近い鉛直特性が得られた。すなわち、CH-1 と同じく水平成分風速を測定するのに都合がよい。Fig-16 には各チャンネルの水平全方向の補正係数を示した。各チャンネルとも似た傾向を示した。CH-2 は CH-1 より 2 % 程度大きく、CH-3 は CH-2 より 10 % 程度大きい。Fig-17, 18 の実際の風の観測でそれぞれ、風向頻度分布、鉛直振れ角の頻度分布を示している。このデータは 1972 年 7 月 18 日から 21 日までの 8 ケースの平均である。1 ケースは 30 分間、1 秒毎 1 秒平均値をサンプリングした。このデータは Fig-16 で示すような補正はなされていない。Fig-19 は $\theta = 0^\circ$ の場合 Fig-11 で示す補正曲線を 8 つの部分、すなわち $\theta = 0 \sim 45^\circ$ と同じ関係になる部分の平均を求めたものである。 $\varphi = 10^\circ$ の場合の値は、Fig-13 で示す $\theta = 0^\circ$ の値と $\theta = \pm 10^\circ, \pm 20^\circ$ の正負両側の平均の補正係数を示した。

実際の風は先に示した Fig-17 の如く水平に分布し、鉛直にも Fig-18 の如く分布している。また、鉛直角が変わると補正曲線も変わるから鉛直角に応じた補正曲線を考えればよい。しかし、Fig-18 によれば、この分布はある気象状態 8 ケースの平均であるため多少の変動があるが、鉛直振れ角 $0 \sim 5^\circ$ の範囲に 52.9%、 $5 \sim 15^\circ$ の範囲に 38% が含まれている。また、鉛直角 0° と 10° との補正值の差が最大 4 % でしかない。したがって、 φ を考慮しなくとも、唯一の補正曲線を $\varphi = 0^\circ$ と 10° の中央に考えれば、殆んどどの気象状態で最大誤差 $\pm 2\%$ 以内におさまる。これをもっともな補正曲線として Fig-19 に破線として示している。測定風向に対する補正曲線は、測定風向が真の風向とづれる分を考慮して求めた測定風向に対しての補正曲線である。真の風向の補正曲線と比較して最大 1 % 程度の差がある。Fig-20 は、Fig-19 で示す補正係数を横軸 $\tan(\alpha)$ (α : 風向) として、真の風向に対するもっともな補正曲線と測定風向に対するもっともな補正曲線を示した。これは、CH-1 および CH-2 の風速指示をそれぞれ、 x_1, x_2 とすれば、 x_1/x_2 の値から直ちに求められるために便利である。また、CH-1, 2 はそれぞれ単独に使用する事ができるために、 $\theta = 0 \sim 90^\circ$ と同じ関係にある 4 つの部分の平均を各チャンネルについて求めた補正係数を Fig-21 に示した。CH-1 と CH-2 の補正係数の差は大きい所で 2 % と小さいため、CH-1 のもっともな補正曲線は、CH-2 の $\varphi = 0^\circ$ と $\varphi = 10^\circ$ の中央に求めた CH-2 についてのもっともな補正曲線と大きな差はないと考え、同じ曲線とした。Fig-22 は CH-3 について Fig-21 と同じ方法で求めた補正曲線である。Fig-23 は、Fig-21, 22 で示すもっともな補正曲線を $\tan(\theta)$ について求

めたものである。Fig-24はコーシンペーンAとBについての風速特性である。破線で示す範囲は許容誤差範囲(10m/sec 以上は±5%, 10m/sec 以下は風速誤差±0.5m/sec)である。それぞれ、許容誤差内にはいていた。

測定されたデータはTable-1~7で示した。

Table-1 ----- CH-1, 2の各風向の風速指示と風洞風速

Table-2 ----- CH-1, 2の組み合わせ時の風速指示とその風向変化

Table-3 ----- CH-1, 2の組み合わせ時の傾けた場合の風速指示とその風向変化

Table-4 ----- CH-3の風速指示と風洞風速

Table-5 ----- CH-3の風速指示とその風向変化

Table-6 ----- CH-3の傾けた場合の風速指示とその風向変化

Table-7 ----- コーシンペーンの指示と風洞風速

5. ま と め

風洞を用いて超音波風速計の風向特性および風速特性を測定した。風速特性は風洞風速1m/secから11m/secまでの範囲の測定であったが、風速に対する指示値の直線性は種々の風向に対して良好であった。直線性のづれは大きな所で2%程度であった。風洞特性は風速を一定として各方向について求めた。感部と平行に近い風向に対してFig-9のような感度の低下が測定された。感度が風向の変化に対して平坦と考えられる $\theta = 45^\circ$ 付近の角度をなす風向に対する感度比を考へて、これを1とすれば感部と平行の風向では、小さな所で0.87となった。それゆへ、風向に対する感部補正を行なわなければ、風速値は感度が平坦な所に対して10%程度の過小評価になることもある。そこで、各感部の風向とのなす角度に対する供試超音波風速計の補正係数をFig-23に示した。Fig-21はCH-1, 2を直交して組んだ時の測定風向の正接についての補正係数を示した。このような補正係数を用いれば風速データのより正確な解析ができる。真の風向と2つの感部の測定値から計算した見かけの風向との差は角度差で 1.5° 以内におさまった(Fig-12)。その差は実測では無視して良い程度の値であった。水平面内で吹く風を測定するのに、2つの感部が張ると考えられる平面が傾いていたらどうなるか、あるいは水平成分を測るべく組み合わせられて正しく配置されている一組の感部に鉛直成分を持った3次元の風が吹いたときに、測定された風速値は、真の風速の水平成分とどのような偏差を生ずるか、という問題である。この2つの問題は相反し同時には成立しない事である。従って、感部を必ず水平に取り付ける事にすれば、感部は理想的には、3次元的な風速の水平成分風速にだけ感度を持つべきである。

しかしながら、超音波風速計の2つの感部を直交させて組み、2つのうち一方を基準にとりこれをFig-3のように ϕ だけ傾けたとすれば測定値が成分風速を示すためには、両者の値は共に ϕ の余弦に比例すべきであるが、基準にとった感部は水平に吹く風に対して ϕ だけ傾く事になるので余弦に比例すると考えられるとしても、他の感部は、 ϕ を変化しても常に水平になるので必ずしも余弦に比例するとはいえない。

めたものである。Fig-24はコーンベーンAとBについての風速特性である。破線で示す範囲は許容誤差範囲（10m/sec. 以上は±5%，10m/sec. 以下は風速誤差±0.5m/sec）である。それぞれ、許容誤差内にはいていた。

測定されたデータはTable-1~7で示した。

Table-1 ----- CH-1, 2の各風向の風速指示と風洞風速

Table-2 ----- CH-1, 2の組み合わせ時の風速指示とその風向変化

Table-3 ----- CH-1, 2の組み合わせ時の傾けた場合の風速指示とその風向変化

Table-4 ----- CH-3の風速指示と風洞風速

Table-5 ----- CH-3の風速指示とその風向変化

Table-6 ----- CH-3の傾けた場合の風速指示とその風向変化

Table-7 ----- コーンベーンの指示と風洞風速

5. ま と め

風洞を用いて超音波風速計の風向特性および風速特性を測定した。風速特性は風洞風速1m/secから11m/secまでの範囲の測定であったが、風速に対する指示値の直線性は種々の風向に対して良好であった。直線性のずれは大きな所で2%程度であった。風洞特性は風速を一定として各方向について求めた。感部と平行に近い風向に対してFig-9のような感度の低下が測定された。感度が風向の変化に対して平坦と考えられる $\theta = 45^\circ$ 付近の角度をなす風向に対する感度比を考えて、これを1とすれば感部と平行の風向では、小さな所で0.87となった。それゆえ、風向に対する感部補正を行なわなければ、風速値は感度が平坦な所に対して10%程度の過小評価になることもあろう。そこで、各感部の風向とのなす角度に対する供試超音波風速計の補正係数をFig-23に示した。Fig-21はCH-1, 2を直交して組んだ時の測定風向の正接についての補正係数を示した。このような補正係数を用いれば風速データのより正確な解析ができる。真の風向と2つの感部の測定値から計算した見かけの風向との差は角度差で 1.5° 以内におさまった(Fig-12)。その差は実測では無視して良い程度の値であった。水平面内で吹く風を測定するのに、2つの感部が張ると考えられる平面が傾いていたらどうなるか、あるいは水平成分を測るべく組み合わせられて正しく配置されている一組の感部に鉛直成分を持った3次元の風が吹いたときに、測定された風速値は、真の風速の水平成分とどのような偏差を生ずるか、という問題である。この2つの問題は相反し同時には成立しない事である。従って、感部を必ず水平に取り付ける事にすれば、感部は理想的には、3次元的な風速の水平成分風速にだけ感度を持つべきである。

しかしながら、超音波風速計の2つの感部を直交させて組み、2つのうち一方を基準にとりこれをFig-3のように ϕ だけ傾けたとすれば測定値が成分風速を示すためには、両者の値は共に ϕ の余弦に比例すべきであるが、基準にとった感部は水平に吹く風に対して ϕ だけ傾く事になるので余弦に比例すると考えられるとしても、他の感部は、 ϕ を変化しても常に水平になるので必ずしも余弦に比例するとはいえない。

本実験では φ を 10° とし、風洞風速一定のもとで感部架台を回して風向を変えて数点測定した。結果をFig-15のような円グラフ上であらわした。円グラフ上の横軸は $\varphi=0^\circ$ のとき、すなわち感部が傾いていない時である。原点に接するいくつかの円は、風速の水平成分一定としたときの軌跡である。各風向について $\varphi=10^\circ$ のときの点が、 $\varphi=0^\circ$ のときの値を直径とするような円周上に載れば、偏差は零ということになる。グラフを見れば、CH-1の風向角 $\theta=30^\circ$ のときは偏差が大きく6%くらいあったがその他の点はほぼ4%以内に入っている。したがって、感部の傾きが 10° くらいまでは、あるいは風速が鉛直振れ角 10° まで、すなわち風速 V_0 の鉛直方向成分の大きさが $V_0 \sin 10^\circ$ 以下ならば、測定上あまり問題とならない。我々が水平成分および鉛直成分を測定するように3つの感部を組み合わせで行なった実際の風速測定例では、鉛直振れ角の頻度分布(Fig-18)の場合 $0 \sim \pm 5^\circ$ の範囲に52.9%、 $\pm 5 \sim \pm 15^\circ$ の範囲に38%の頻度が含まれる。このような場合は、得られた水平方向成分についての補正方法を用いれば、風速値についての誤差は $\pm 2\%$ 以内におさまる。

鉛直方向の風向の測定のように、風速の一成分についてだけ測定するときは $\varphi=90 \pm 10^\circ$ となるから立体的なこととなり、問題はさらに複雑になる。感部を鉛直方向に配置した場合、Fig-25においてとりつけ軸 LL' のまわりに中心角 20° の扇形 OAB (または $OA'B'$)を回転して得られる立体角の範囲内ならば、本実験の測定結果によって真の風向成分値からの偏差は風向特性だけについて言えば、無補正の場合でもほぼ $\pm 10\%$ 以内にとどまっている。また中心角 20° に対応する鉛直振れ角 10° では、鉛直振れ角 0° との間に最大4%の補正值の差があるが、前のべたように、補正曲線を鉛直振れ角 0° と 10° の中央に考えれば、誤差 $\pm 2\%$ 以内まで補正できる。しかしながら、鉛直方向の風速成分の測定の際には、これ以外の立体角の方向から吹き込んでくる風速も多く、それについては問題として残された。

コーシンペーンについては、風速に対する指示値の直線性は良く許容誤差内に入っていた。

6. あとがき

7月に行なった野外觀測結果の整理にあたって、超音波風速計による風向風速測定値と、ルーチンに用いているコーシンペーンの値との関係の詳細な調査が必要となった。手近かに信頼できる風洞がないので、気象庁測器課に風洞の借用を依頼したところ、年末の多忙の中を当方の日程に好意ある配慮をいただき、予定どおり実験を行なうことができた。さらに、実験当日は終日立ち会って御援助をいただいた。運輸技官片桐隆朝氏、技術主任田宮一夫氏、加藤氏に深く感謝する。

7. 参 考 文 献

- 1) Mituta, Y., 1966: Sonic Anemometer-thermometer for general use. J. Meteor. Soc. Japan, Ser. II, Vol. 44, No. 1, 12-24.

本実験では φ を 10° とし、風洞風速一定のもとで感部架台を回して風向を変えて数点測定した。結果をFig-15のような円グラフ上であらわした。円グラフ上の横軸は $\varphi=0^\circ$ のとき、すなわち感部が傾いていない時である。原点に接するいくつかの円は、風速の水平成分一定としたときの軌跡である。各風向について $\varphi=10^\circ$ のときの点が、 $\varphi=0^\circ$ のときの値を直径とするような円周上に載れば、偏差は零ということになる。グラフを見れば、CH-1の風向角 $\theta=30^\circ$ のときは偏差が大きく6%くらいあったがその他の点はほぼ4%以内に入っている。したがって、感部の傾きが 10° くらいまでは、あるいは風速が鉛直振れ角 10° まで、すなわち風速 V_0 の鉛直方向成分の大きさが $V_0 \cdot \sin 10^\circ$ 以下ならば、測定上あまり問題とならない。我々が水平成分および鉛直成分を測定するように3つの感部を組み合わせて行なった実際の風速測定例では、鉛直振れ角の頻度分布(Fig-18)の場合 $0 \sim \pm 5^\circ$ の範囲に52.9%、 $\pm 5 \sim \pm 15^\circ$ の範囲に38%の頻度が含まれる。このような場合は、得られた水平方向成分についての補正方法を用いれば、風速値についての誤差は $\pm 2\%$ 以内におさまる。

鉛直方向の風向の測定のように、風速の一成分についてだけ測定するときは $\varphi=90 \pm 10^\circ$ となるから立体的なこととなり、問題はさらに複雑になる。感部を鉛直方向に配置した場合、Fig-25においてとりつけ軸 LL' のまわりに中心角 20° の扇形 OAB (または $OA'B'$)を回転して得られる立体角の範囲内ならば、本実験の測定結果によって真の風向成分値からの偏差は風向特性だけについて言えば、無補正の場合でもほぼ $\pm 10\%$ 以内にとどまっている。また中心角 20° に対応する鉛直振れ角 10° では、鉛直振れ角 0° との間に最大4%の補正值の差があるが、前のべたように、補正曲線を鉛直振れ角 0° と 10° の中央に考えれば、誤差 $\pm 2\%$ 以内まで補正できる。しかしながら、鉛直方向の風速成分の測定の際には、これ以外の立体角の方向から吹き込んでくる風速も多く、それについては問題として残された。

コーシンペーンについては、風速に対する指示値の直線性は良く許容誤差内に入っていた。

6. あとがき

7月に行なった野外観測結果の整理にあたって、超音波風速計による風向風速測定値と、ルーチンに用いているコーシンペーンの値との関係の詳細な調査が必要となった。手近かに信頼できる風洞がないので、気象庁測器課に風洞の借用を依頼したところ、年末の多忙の中を当方の日程に好意ある配慮をいただき、予定どおり実験を行なうことができた。さらに、実験当日は終日立ち会って御援助をいただいた。運輸技官片桐隆朝氏、技術主任田宮一夫氏、加藤氏に深く感謝する。

7. 参 考 文 献

- 1) Mituta, Y., 1966: Sonic Anemometer-thermometer for general use. J. Meteor. Soc. Japan, Ser. II, Vol. 44, No. 1, 12-24.

本実験では φ を 10° とし、風洞風速一定のもとで感部架台を回して風向を変えて数点測定した。結果を Fig-15 のような円グラフ上であらわした。円グラフ上の横軸は $\varphi=0^\circ$ のとき、すなわち感部が傾いていない時である。原点に接するいくつかの円は、風速の水平成分一定としたときの軌跡である。各風向について $\varphi=10^\circ$ のときの点が、 $\varphi=0^\circ$ のときの値を直径とするような円周上に載れば、偏差は零ということになる。グラフを見れば、CH-1 の風向角 $\theta=30^\circ$ のときは偏差が大きく 6 % くらいあったがその他の点はほぼ 4 % 以内に入っている。したがって、感部の傾きが 10° くらいまでは、あるいは風速が鉛直振れ角 10° まで、すなわち風速 V_0 の鉛直方向成分の大きさが $V_0 \cdot \sin 10^\circ$ 以下ならば、測定上あまり問題とならない。我々が水平成分および鉛直成分を測定するように 3 つの感部を組み合わせて行なった実際の風速測定例では、鉛直振れ角の頻度分布 (Fig-18) の場合 $0 \sim \pm 5^\circ$ の範囲に 52.9 %, $\pm 5 \sim \pm 15^\circ$ の範囲に 38 % の頻度が含まれる。このような場合は、得られた水平方向成分についての補正方法を用いれば、風速値についての誤差は ± 2 % 以内におさまる。

鉛直方向の風向の測定のように、風速の一成分についてだけ測定するときは $\varphi=90 \pm 10^\circ$ となるから立体的なこととなり、問題はさらに複雑になる。感部を鉛直方向に配置した場合、Fig-25 においてとりつけ軸 $L'L'$ のまわりに中心角 20° の扇形 OAB (または $O'A'B'$) を回転して得られる立体角の範囲内ならば、本実験の測定結果によって真の風向成分値からの偏差は風向特性だけについて言えば、無補正の場合でもほぼ 10 % 以内にとどまっている。また中心角 20° に対応する鉛直振れ角 10° では、鉛直振れ角 0° との間で最大 4 % の補正值の差があるが、前にのべたように、補正曲線を鉛直振れ角 0° と 10° の中央に考えれば、誤差 ± 2 % 以内まで補正できる。しかしながら、鉛直方向の風速成分の測定の際には、これ以外の立体角の方向から吹き込んでくる風速も多く、それについては問題として残された。

コーシンペーンについては、風速に対する指示値の直線性は良く許容誤差内に入っていた。

6. あ と が き

7月に行なった野外観測結果の整理にあたって、超音波風速計による風向風速測定値と、ルーチンに用いているコーシンペーンの値との関係の詳細な調査が必要となった。手近かに信頼できる風洞がないので、気象庁測器課に風洞の借用を依頼したところ、年末の多忙の中を当方の日程に好意ある配慮をいただき、予定どおり実験を行なうことができた。さらに、実験当日は終日立ち会って御援助をいただいた。運輸技官片桐隆朝氏、技術主任田宮一夫氏、加藤氏に深く感謝する。

7. 参 考 文 献

- 1) Mituta, Y., 1966: Sonic Anemometer-thermometer for general use. J. Meteor. Soc. Japan, Ser. II, Vol. 44, No. 1, 12-24.

Table-1 CH-1, 2 の各風向の風速指示と風洞風速

風洞風速		風向角 θ°	CH-1 の 指示風速 m/sec	CH-2 の 指示風速 m/sec	備 考
測定法	指示 m/sec				
モーター の回転数	1.0	0	0.11	0.82	測定レンジ 3m/sec
	1.0	10	-0.09	0.93	
	1.0	20	-0.25	0.88	
マノメータ	4.90	0	0.20	3.88	測定レンジ CH-1 は 3m/sec
	4.90	10	-0.69	4.43	
	4.90	20	-1.55	4.37	
	6.96	0	-0.34	5.44	CH-2 は 10m/sec
	6.96	10	-0.98	6.02	
	6.96	20	-2.21	5.90	
	9.10	0	0.43	7.38	
	9.10	10	-1.20	7.96	
	9.10	20	-2.84	7.86	
	10.95	0	0.57	8.83	
	10.95	10	-1.46	9.81	
	10.95	20	-3.12	9.55	

Table-3 CH-1, 2 組み合わせ時の傾けた場合の
風速指示とその風向変化

風洞風速 : 10.95m/sec 一定
 測定レンジ : 10m/sec
 * : 測定レンジ 3m/sec
 $\varphi = 10^\circ$

風向角 θ°	CH-1 の 指示風速 m/sec	CH-2 の 指示風速 m/sec
30	5.41	8.35
20	4.24	9.38
10	2.79	9.71
0	0.86*	9.07
-10	-1.38*	9.61
-20	-2.93*	9.57
-30	-4.26	8.93

Table-2 CH-1, 2の組み合わせ時の風速指示と
その風向変化

風洞風速 : 10.95m/sec

測定レンジ : 10m/sec

* : 測定レンジ 3m/sec

風向角 θ°	CH-1の 指示風速 m/sec	CH-2の 指示風速 m/sec	風向角 θ°	CH-1の 指示風速 m/sec	CH-2の 指示風速 m/sec
0	0.57*	8.83	150	-5.66	-8.83
5	-0.47*	9.38	160	-4.05	-9.48
10	-1.46*	9.81	170	-2.39	-9.65
15	-2.47*	9.78	180	-0.72*	-8.89
20	-3.12	9.55	190	1.38*	-9.67
25	-3.92	9.28	200	2.96	-9.61
30	-4.68	8.87	210	4.68	-9.17
40	-6.27	8.06	220	6.18	-8.31
50	-7.88	6.60	230	7.62	-6.74
60	-8.93	5.30	240	8.95	-5.40
65	-8.39	4.60	250	9.69	-3.88
70	-9.71	3.77	260	9.94	-2.08*
75	-9.88	2.72	270	9.48	-0.19*
80	-9.88	2.10*	280	9.71	1.91*
85	-9.67	1.08*	290	9.94	3.22
90	-8.99	0.12*	300	9.50	4.66
95	-9.14	-0.95*	310	8.70	6.02
100	-9.85	-2.04*	320	7.65	7.71
105	-9.89	-2.97*	330	5.83	8.72
110	-9.87	-3.24	340	4.30	9.51
120	-9.48	-4.85	350	2.70	9.81
130	-8.55	-6.08	360	0.83*	8.87
140	-7.21	-7.83			

Table-4 CH-3の風速指示と風洞風速

測定レンジ：10m/sec
 *：測定レンジ3m/secあるいは回転数からの風速
 φ ：鉛直角 θ ：風向角

$\varphi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$		$\varphi = 0^\circ, \theta = 5^\circ$		$\varphi = 0^\circ, \theta = 20^\circ$	
風洞風速	風速指示	風洞風速	風速指示	風洞風速	風速指示
1.0*	0.75*	1.0*	0.77*	3.06	2.58
1.5*	1.05*	1.5*	1.15*	4.97	4.17
2.0*	1.45*	2.0*	1.62*	6.97	5.92
2.5*	1.81	2.5*	2.06*	10.10	8.45
2.95	2.21	2.95	2.47* 2.43	—	—
4.90	3.75	4.90	3.98	—	—
6.90	5.29	6.90	5.69	—	—
9.02	6.92	9.00	7.38	—	—
10.97	8.27	11.00	8.83	—	—

Table-5 CH-3の風速指示と風向変化

測定レンジ：10m/sec
 風洞風速：11.0 m/sec 一定

風向角 θ°	風速指示 m/sec	風向角 θ°	風速指示 m/sec	風向角 θ°	風速指示 m/sec
0	8.35	140	-7.73	250	-3.26
5	8.83	150	-8.60	260	-1.32
10	9.18	155	-9.03	270	0.45
15	9.42	160	-9.22	280	2.21
20	9.32	165	-9.38	290	4.12
30	8.50	170	-9.32	300	5.46
40	7.71	175	-8.83	310	6.80
50	6.54	180	-8.35	320	8.21
60	5.18	185	-9.28	330	8.64
70	3.61	190	-9.44	335	8.93
80	1.94	195	-9.36	340	9.13
90	0.04	200	-9.28	345	9.18
100	-1.81	210	-8.54	350	9.32
110	-3.55	220	-7.57	355	8.41
120	-5.15	230	-6.31		
130	-6.54	240	-4.95		

Table-6 CH-3の傾けた場合の風速指示と風向変化

$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = 10^\circ \\ \text{測定レンジ} : 10 \text{ m/sec} \\ \text{風洞風速} : 11.0 \text{ m/sec 一定} \end{array} \right.$

風向角 θ°	風速指示 m/sec	風向角 θ°	風速指示 m/sec
90	0.16	190	-9.48
100	-1.77	200	-9.22
110	-3.50	210	-8.61
120	-5.05	220	-7.77
130	-6.41	230	-6.60
140	-7.53	240	-5.05
150	-8.39	250	-3.53
160	-9.13	260	-1.75
170	-9.32	270	0.16
180	-8.83		

Table-7 コーシンペーンの指示値と風洞風速

$\left\{ \begin{array}{l} \text{ペーン A} : \text{AS-115, K2527} \\ \text{ペーン B} : \text{DS-12, No.6510} \end{array} \right.$

風洞風速 m/sec	Aの指示 m/sec	$\left(\frac{\text{Aの指示}}{\text{風洞風速}} \right)$	風洞風速 m/sec	Bの指示 m/sec	$\left(\frac{\text{Bの指示}}{\text{風洞風速}} \right)$
5.3	5.3	1.000	5.2	5.2	1.000
10.25	10.5	1.024	10.1	10.0	0.990
20.20	21.2	1.050	20.4	19.9	0.975
28.7	30.0	1.045	30.2	29.1	0.964
39.7	41.5	1.045	40.0	39.2	0.980
48.2	50.5	1.048	48.8	48.5	0.994
53.8	56.0	1.041	59.2	59.3	1.002

← 風洞風

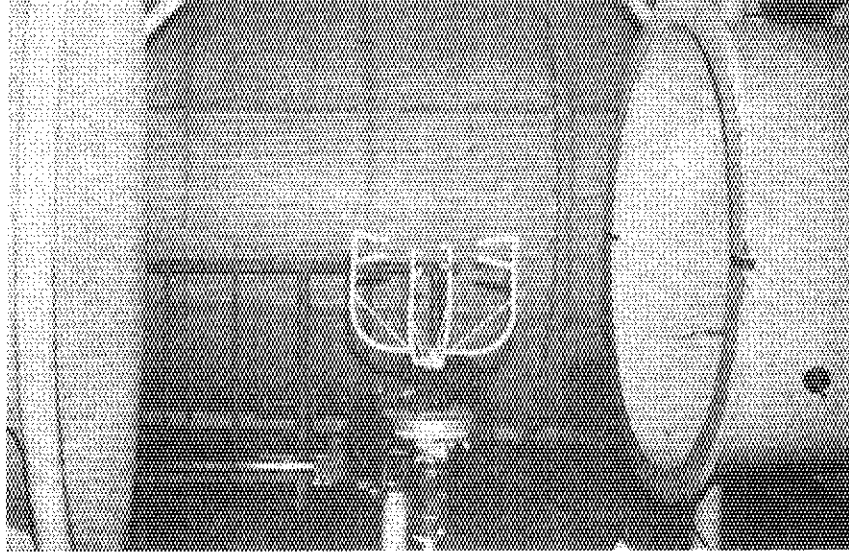


Fig-1 感部取付部

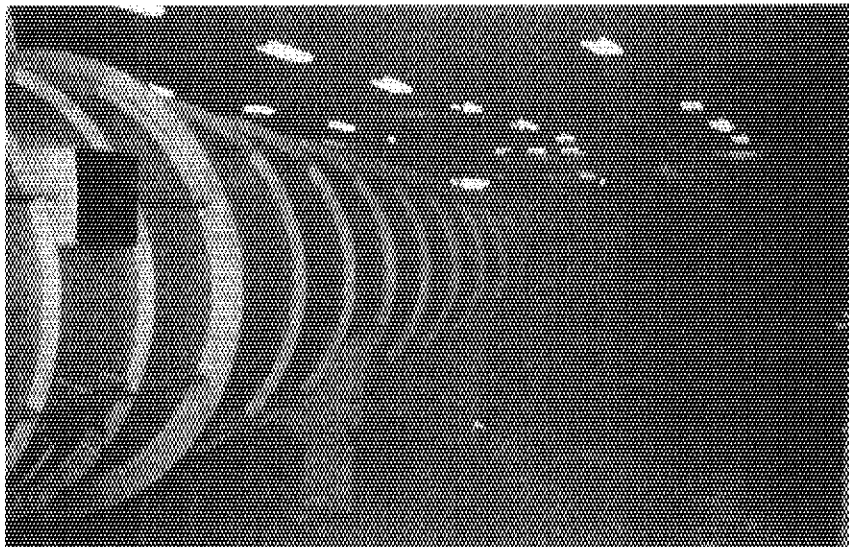


Fig-2 風 洞

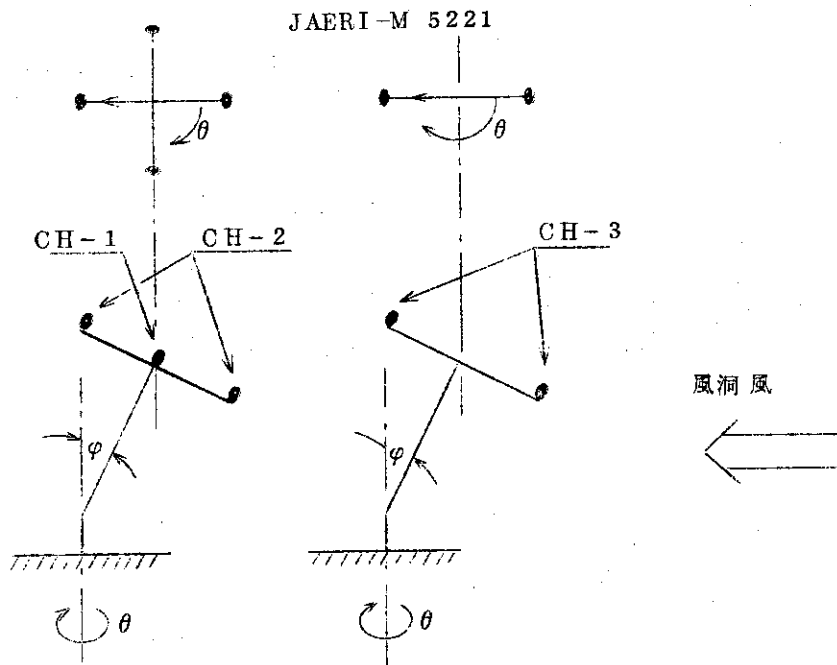


Fig-3 風洞風と感部の位置関係

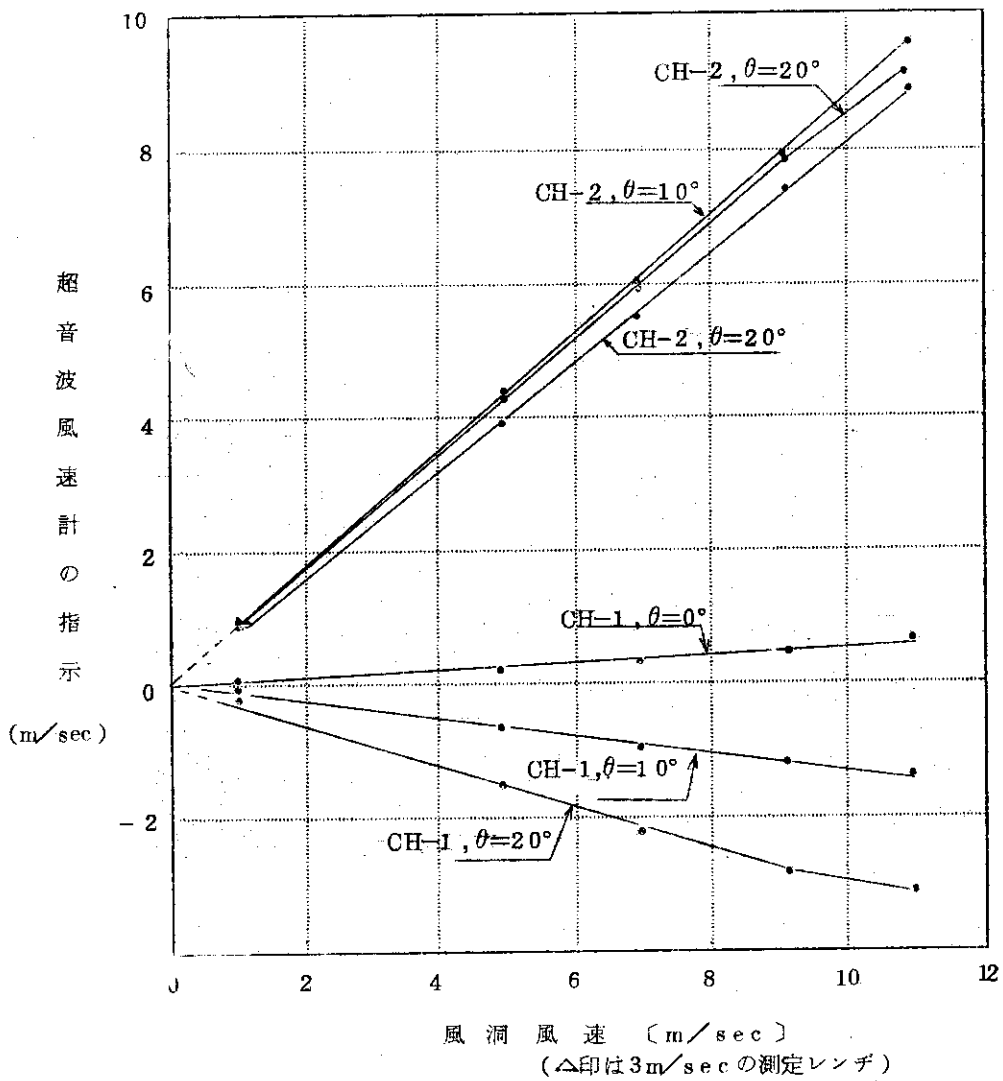


Fig-4 風向別風速の直線性

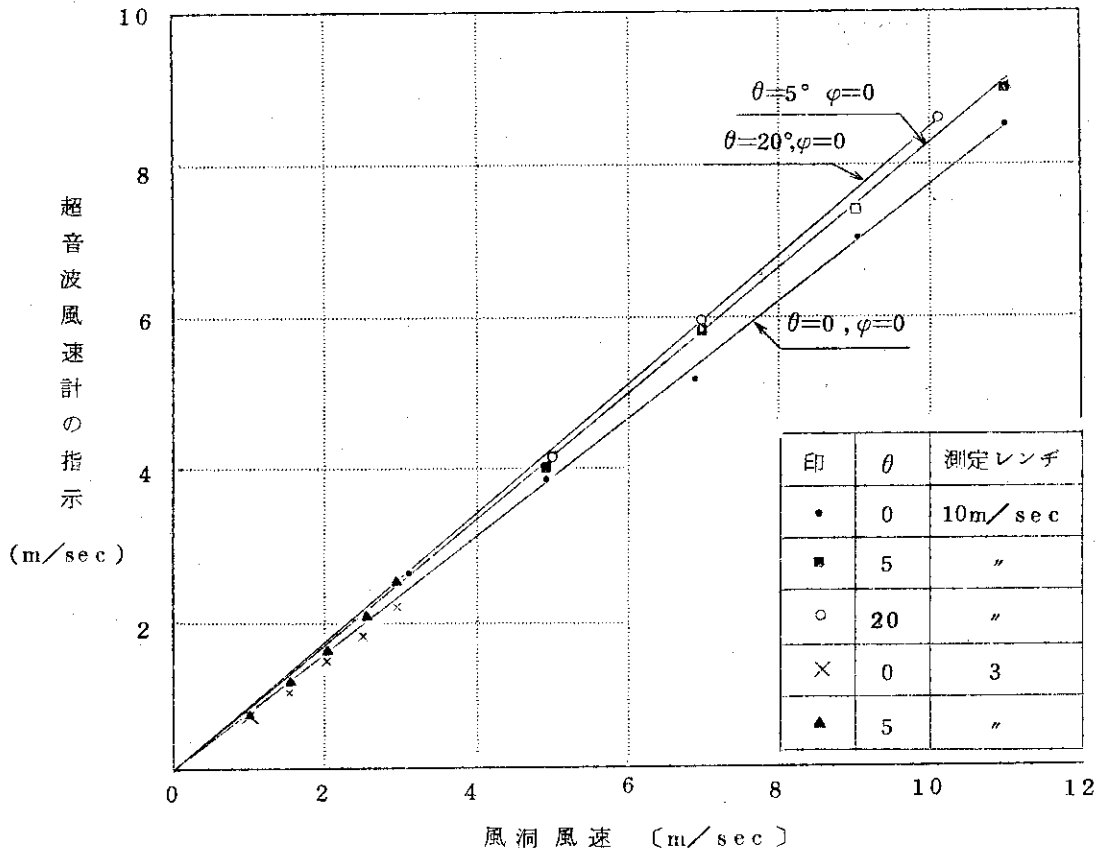


Fig-5 CH-3 風向別風速の直線性

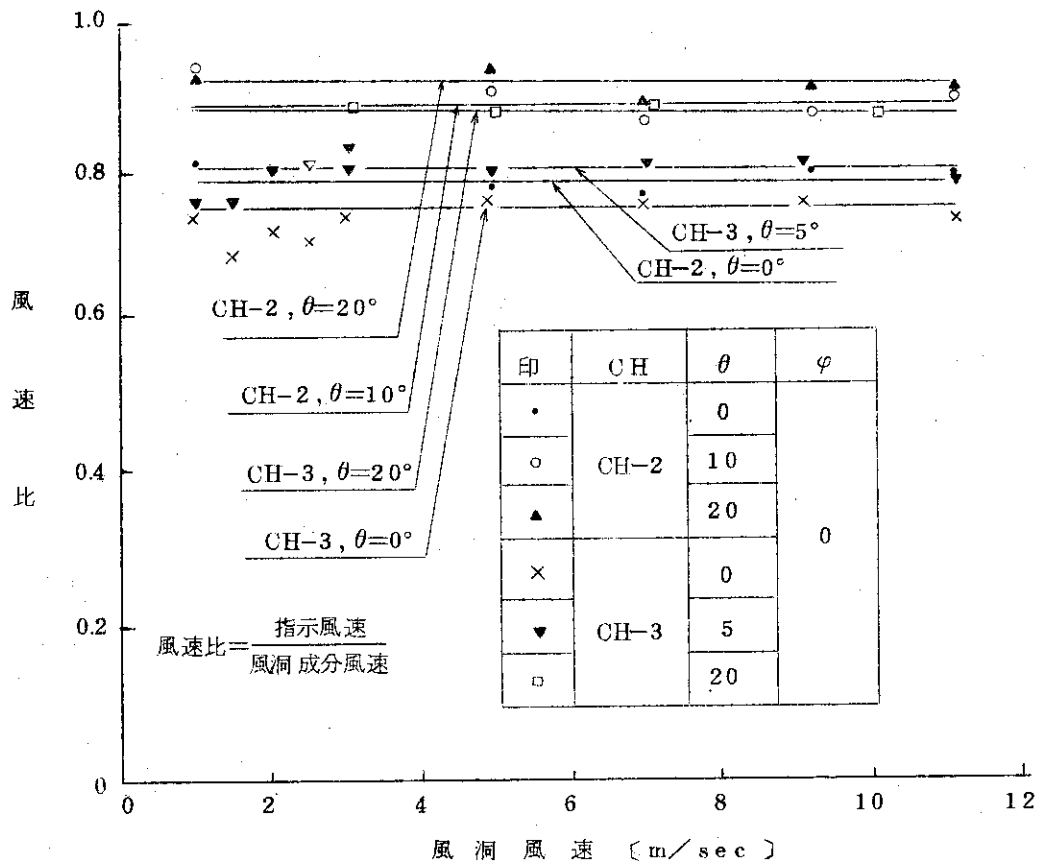


Fig-6 風洞風速と風速比の関係

——— 測定値
 - - - 修正値
 ——— $11 \cdot \cos \theta (11 \cdot \sin \theta)$

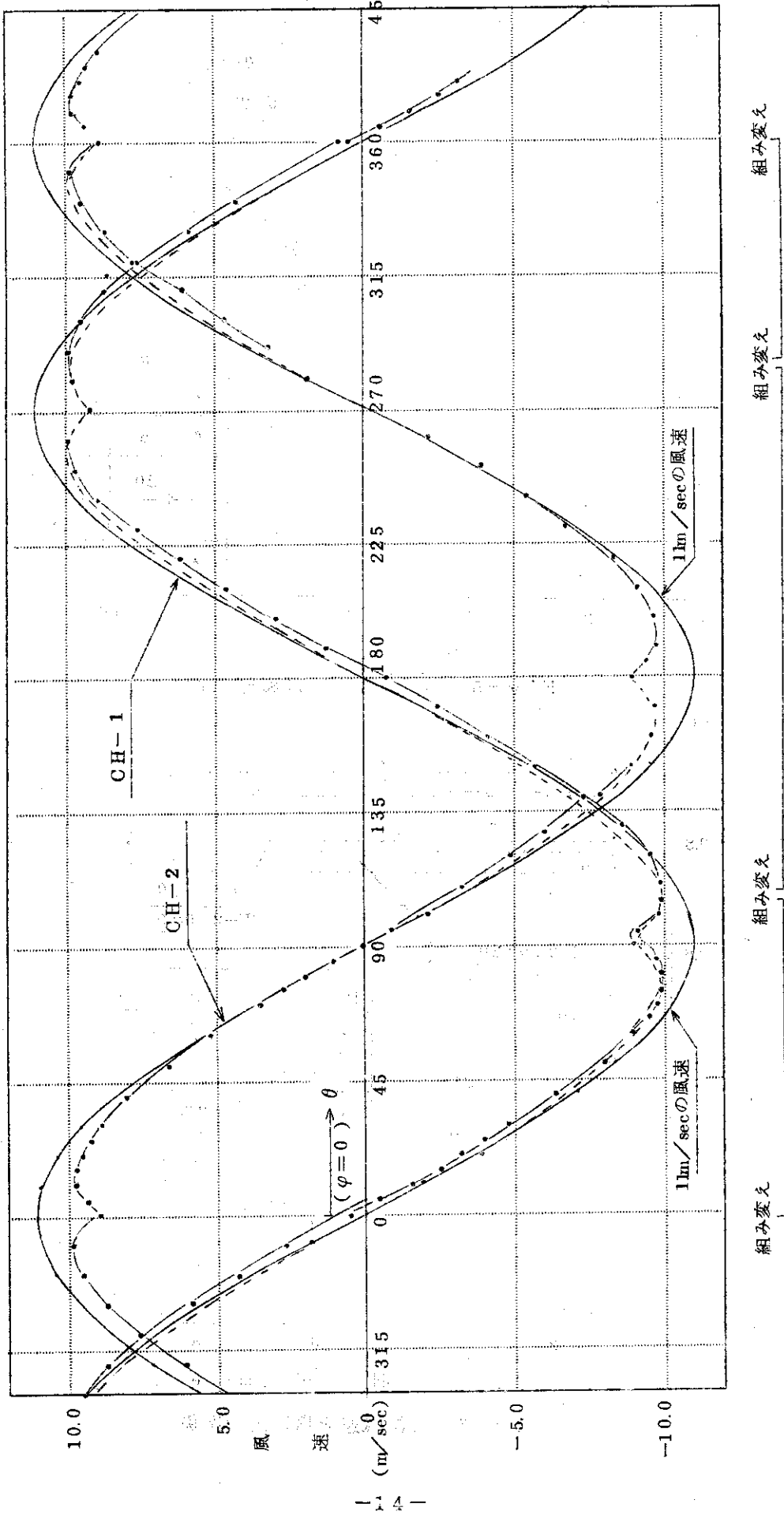
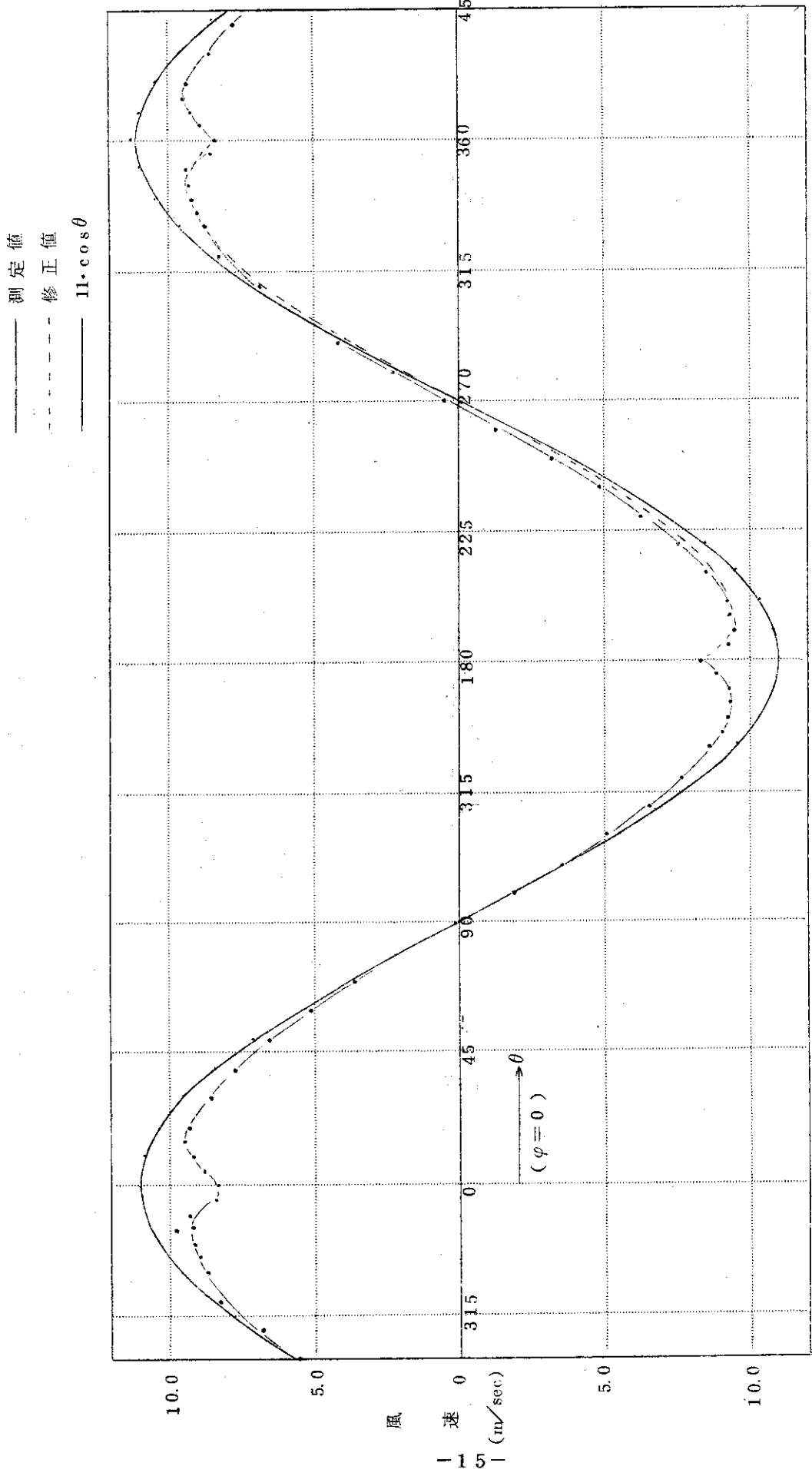
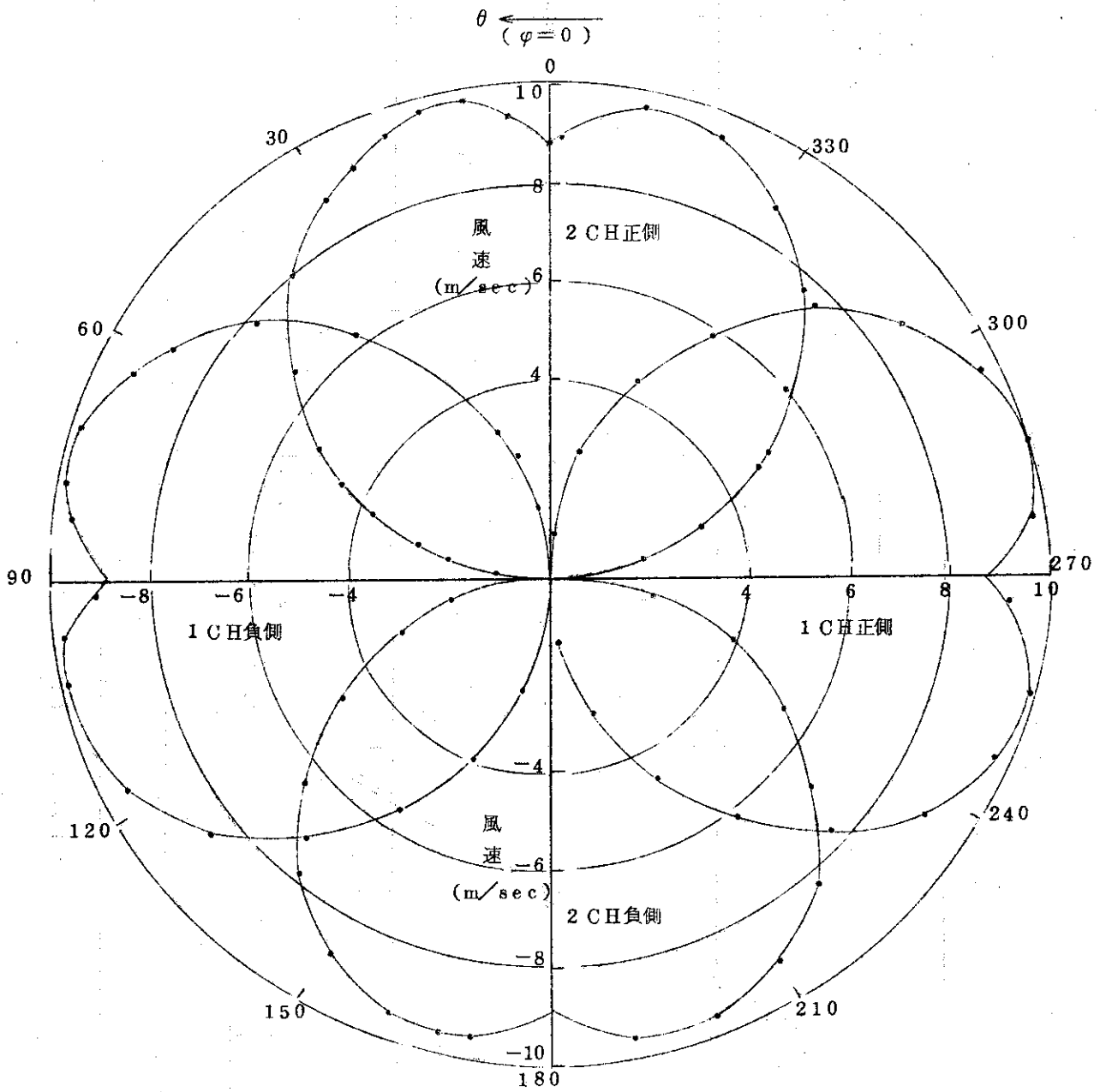


Fig-7 CH-1, 2 風向特性



組分変化

Fig-8 CH-3 風向特性



(風洞風速 10.95 m/sec 一定)

Fig-9 CH-1, 2 の風向特性

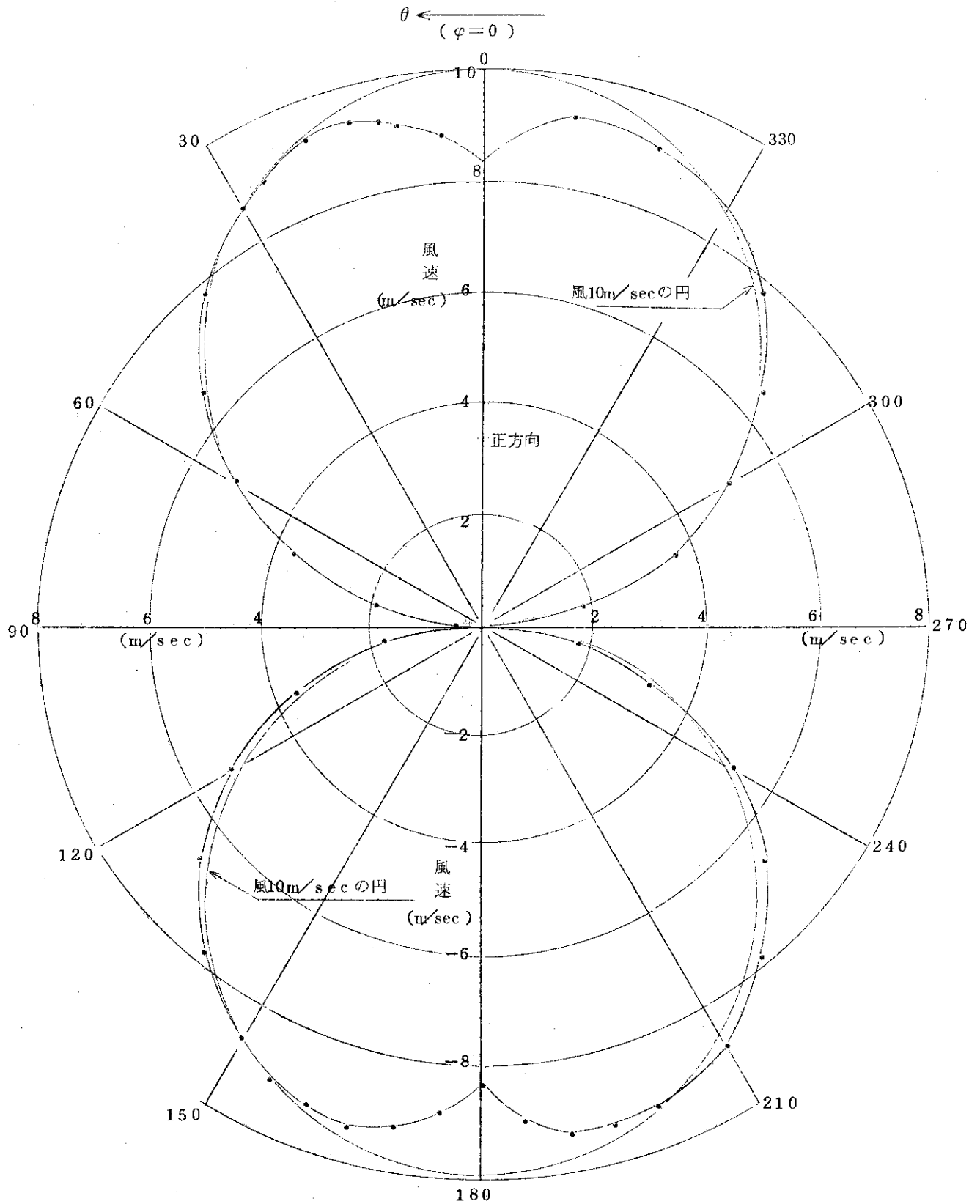


Fig-10 CH-3風向特性
(風洞風速 11m/sec)

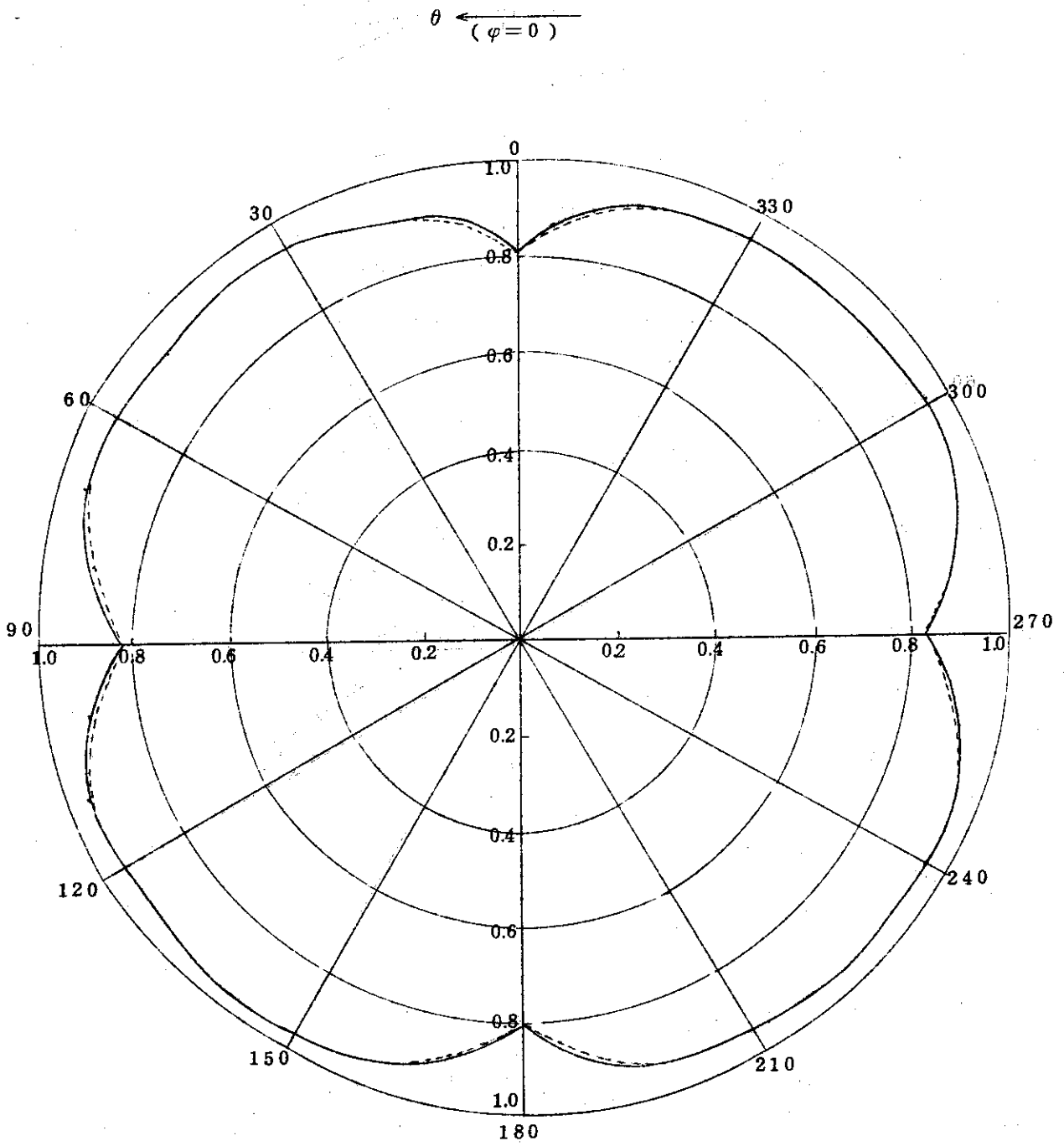


Fig-11 CH-1, 2 合成風速比風向特性

$$\left(\text{風速比} = \frac{\text{測定合成風速}}{\text{風洞風速}} \right)$$

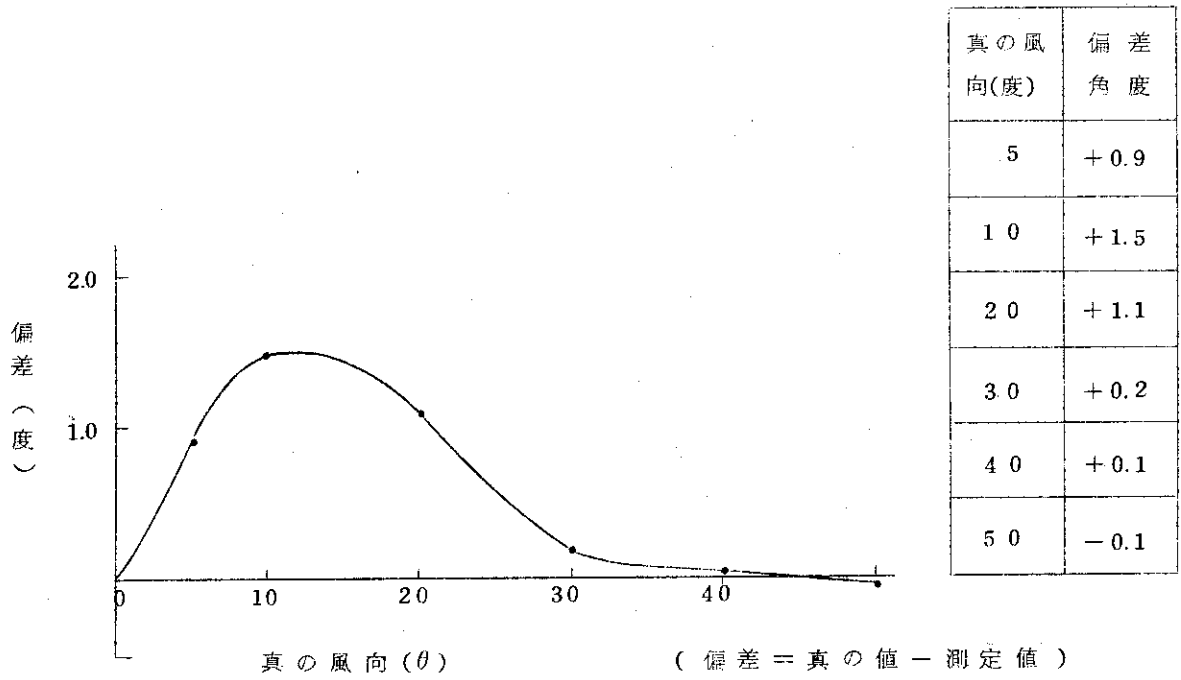


Fig-12 風向偏差曲線

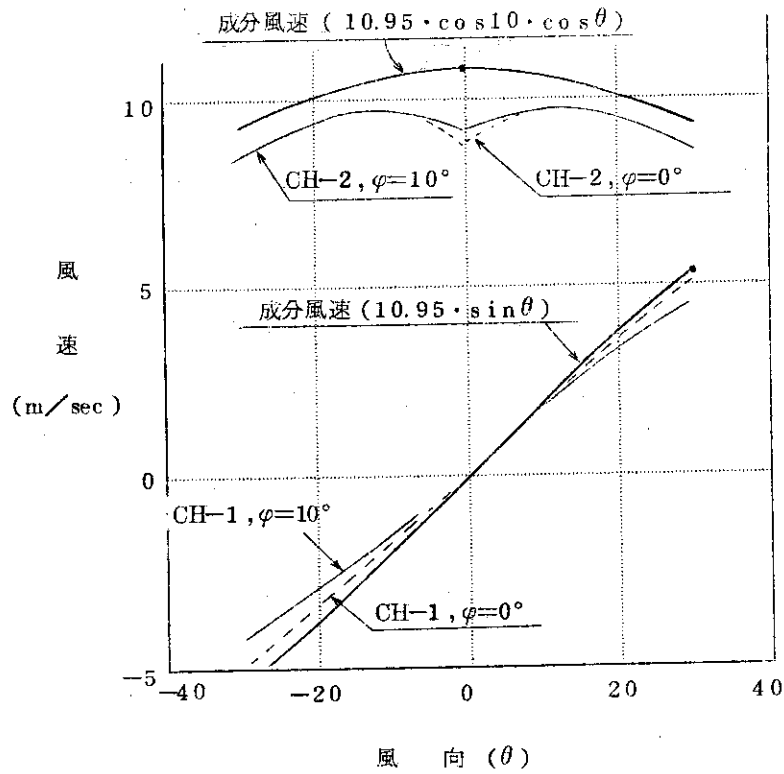


Fig-13 CH-1, 2 の鉛直風向特性

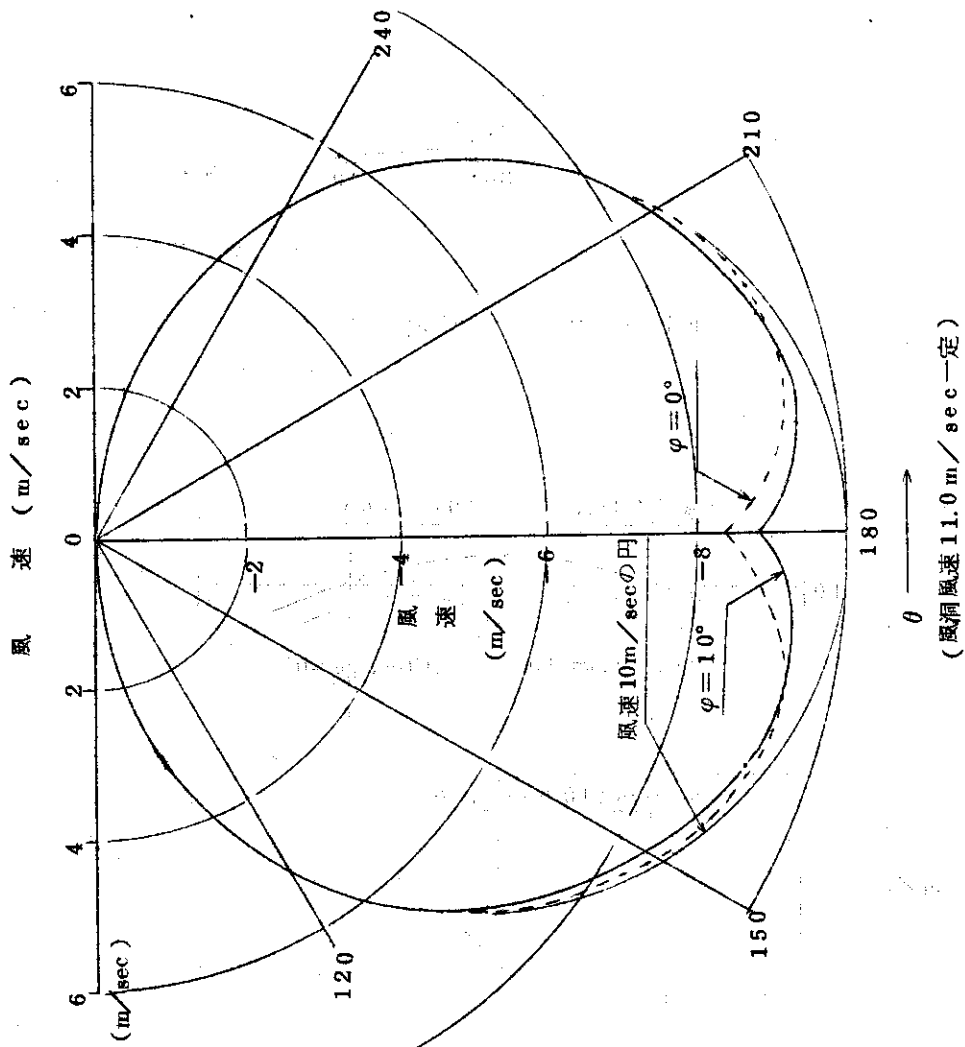


Fig-14 CH-3 鉛直風向特性

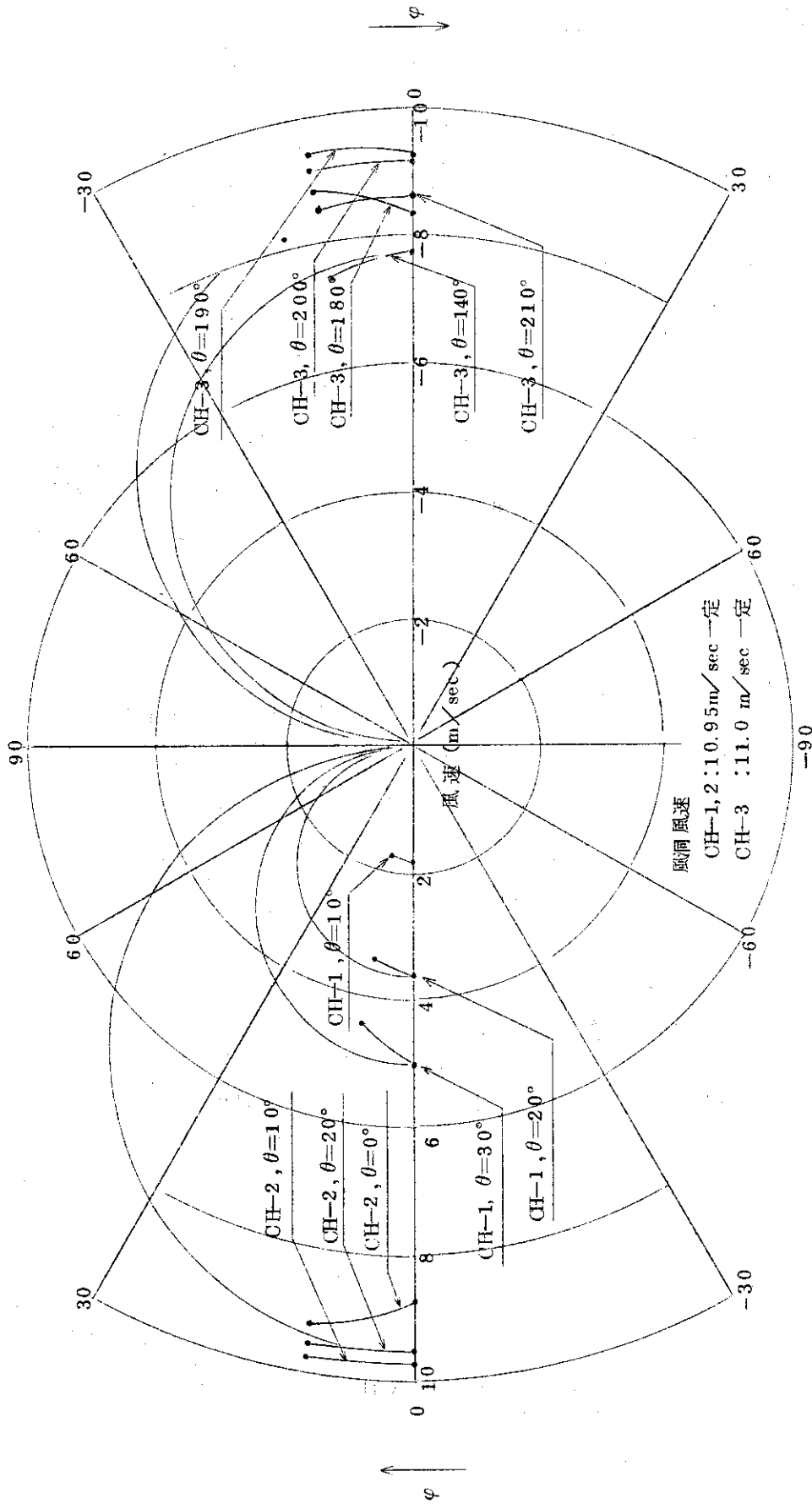


Fig-15 各チャンネルの鉛直特性

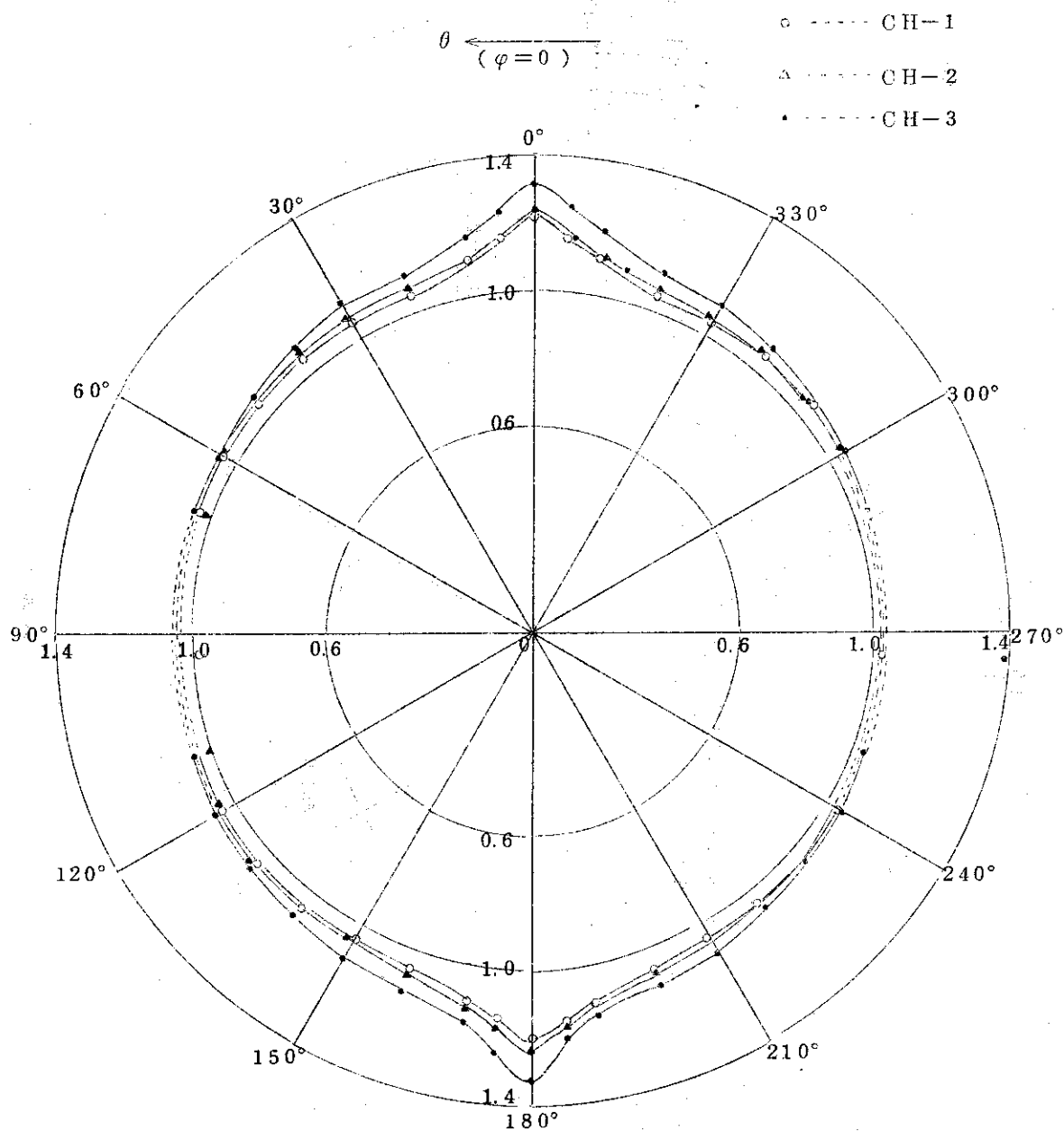


Fig-16 各チャンネルの風速補正曲線
 (CH-1は90°づらしCH-2と同じ
 状態とした)

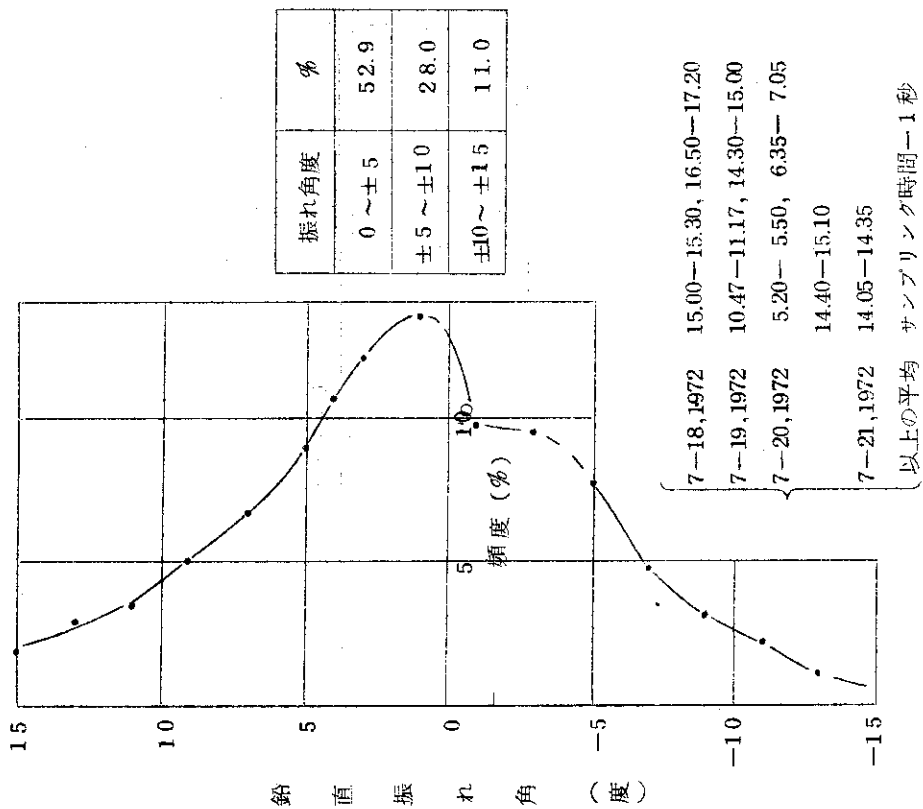


Fig-18 風向頻度分布 (鉛直, %)

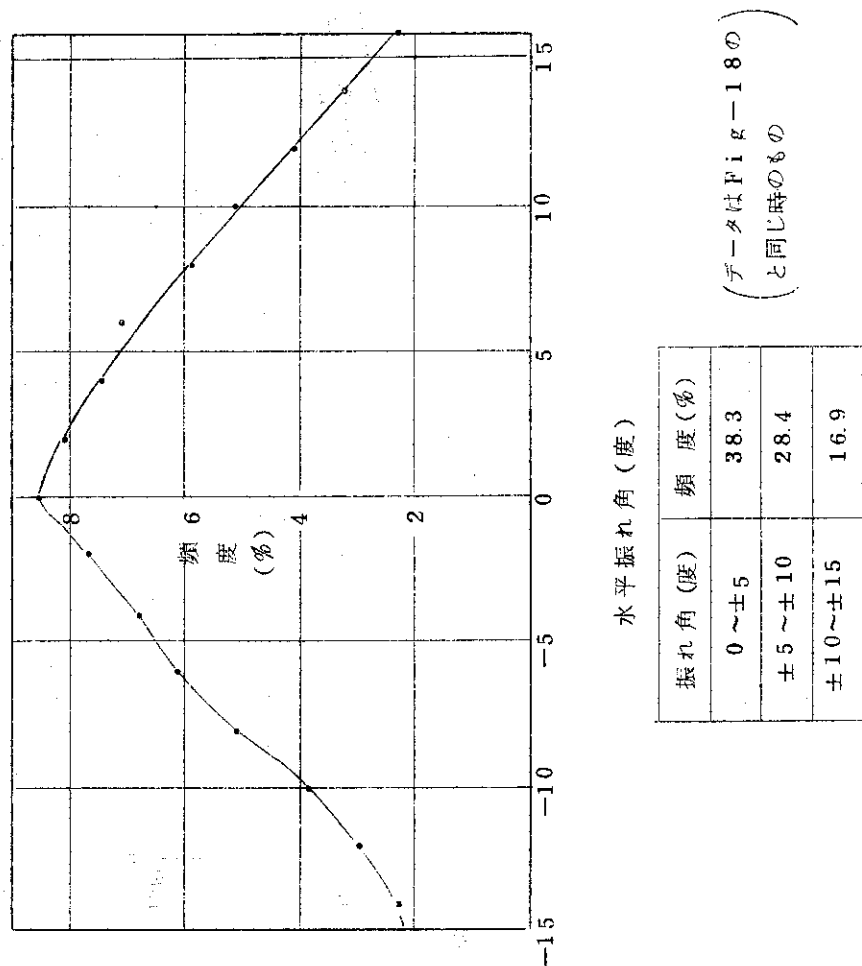


Fig-17 風向頻度分布 (%)

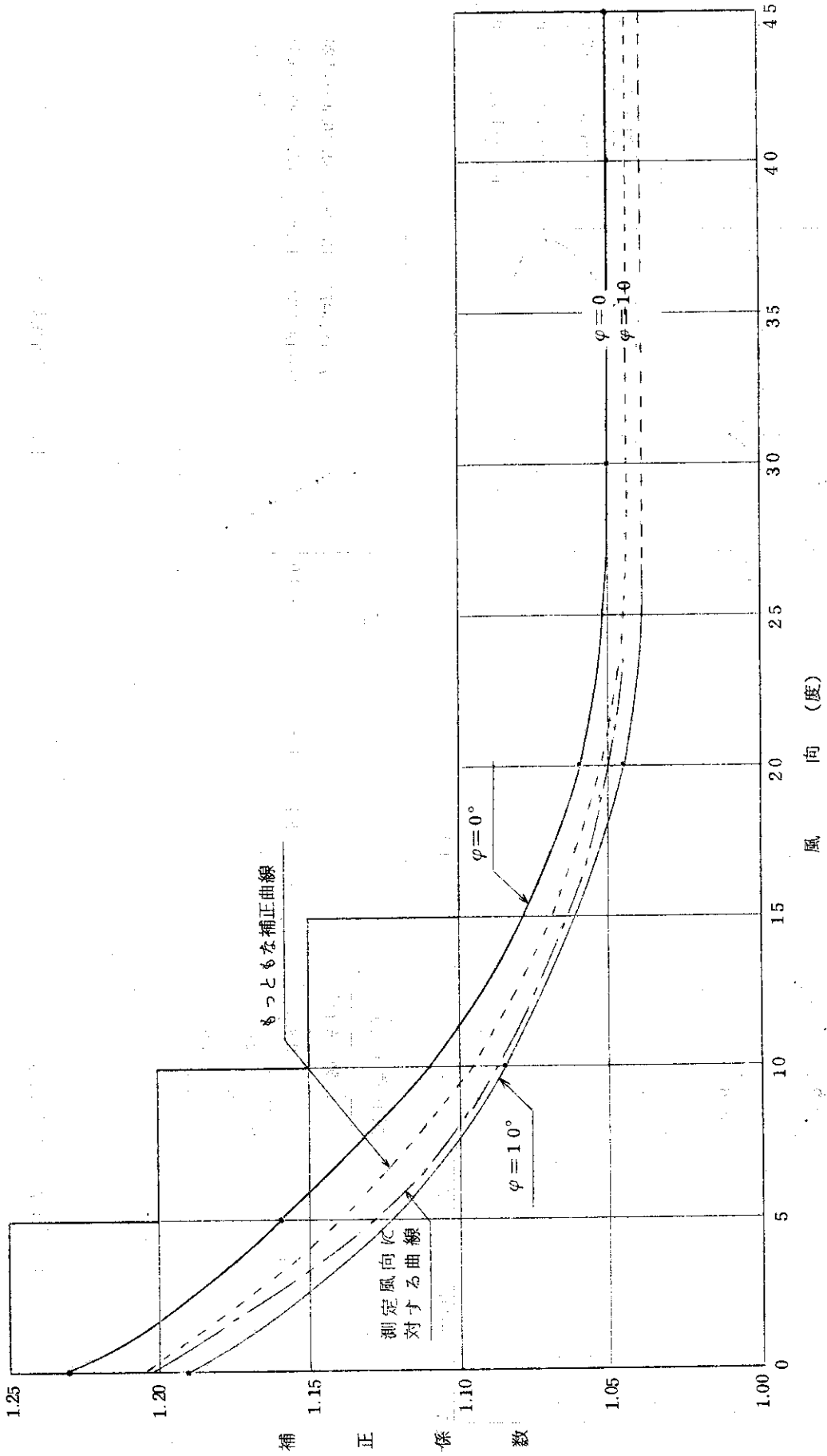


Fig-19 CH-1, 2 合成風速補正曲線

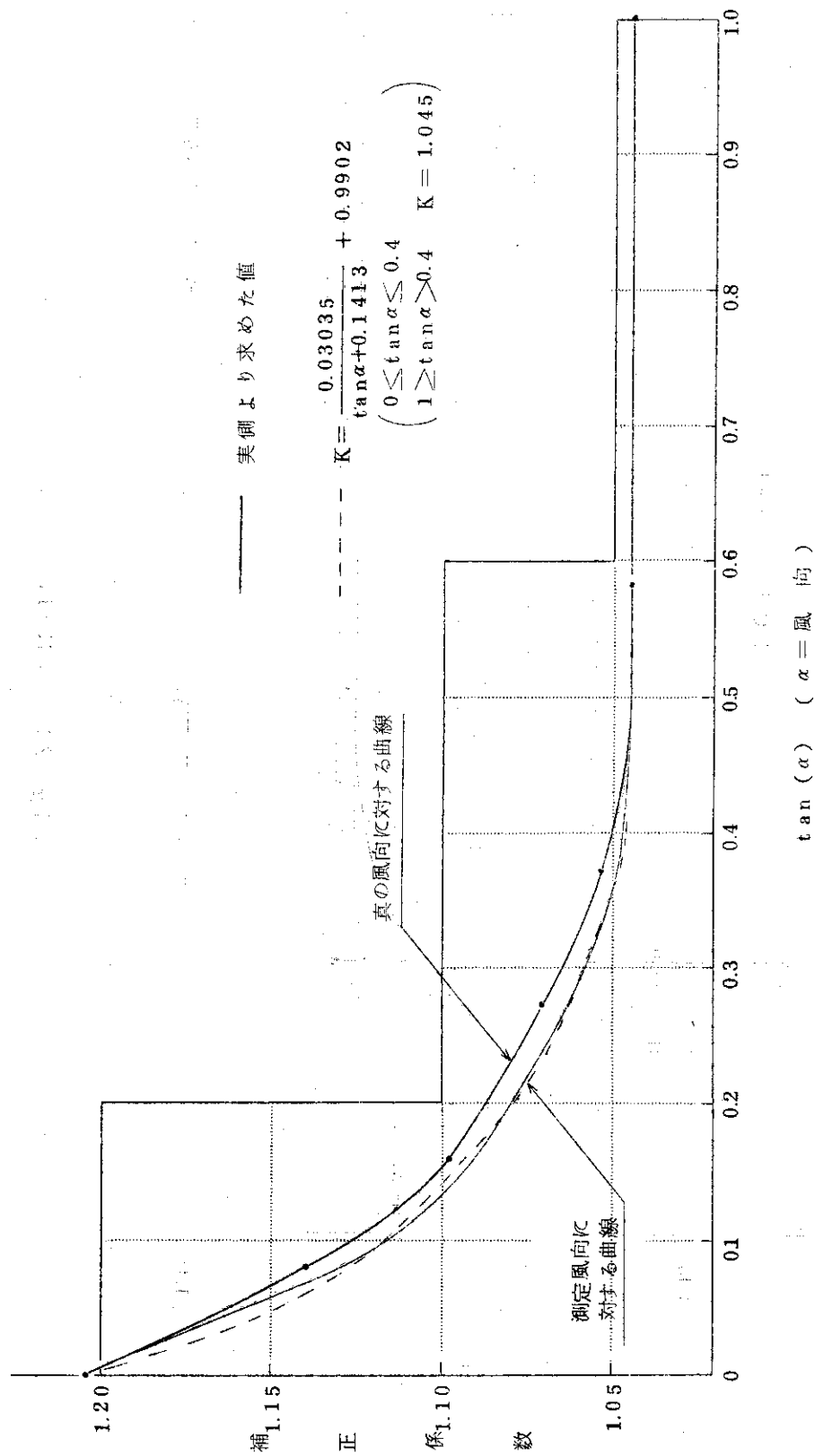


Fig-20 CH-1, 2 合成風速補正曲線

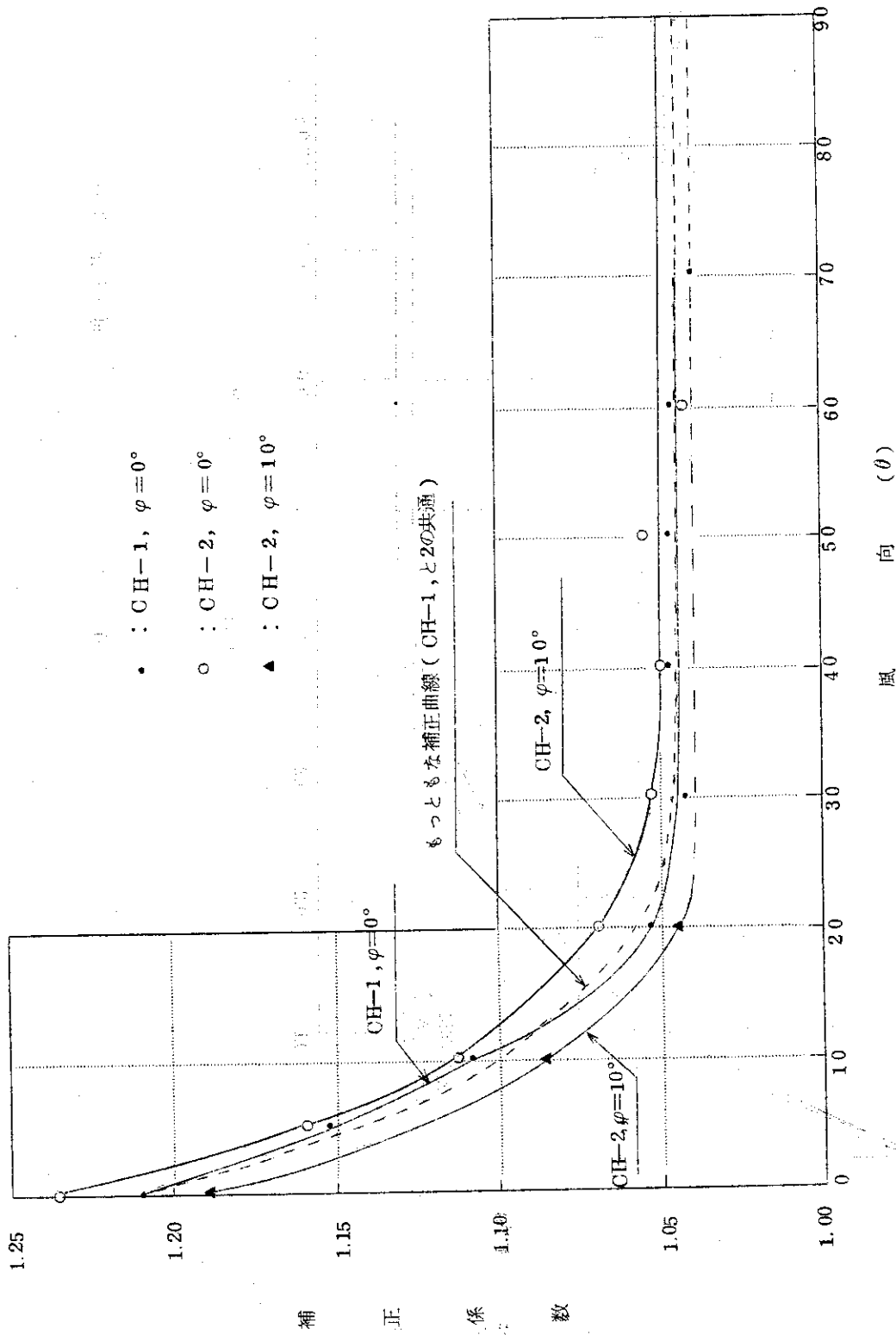


Fig-21 CH-1, CH-2 補正係数曲線

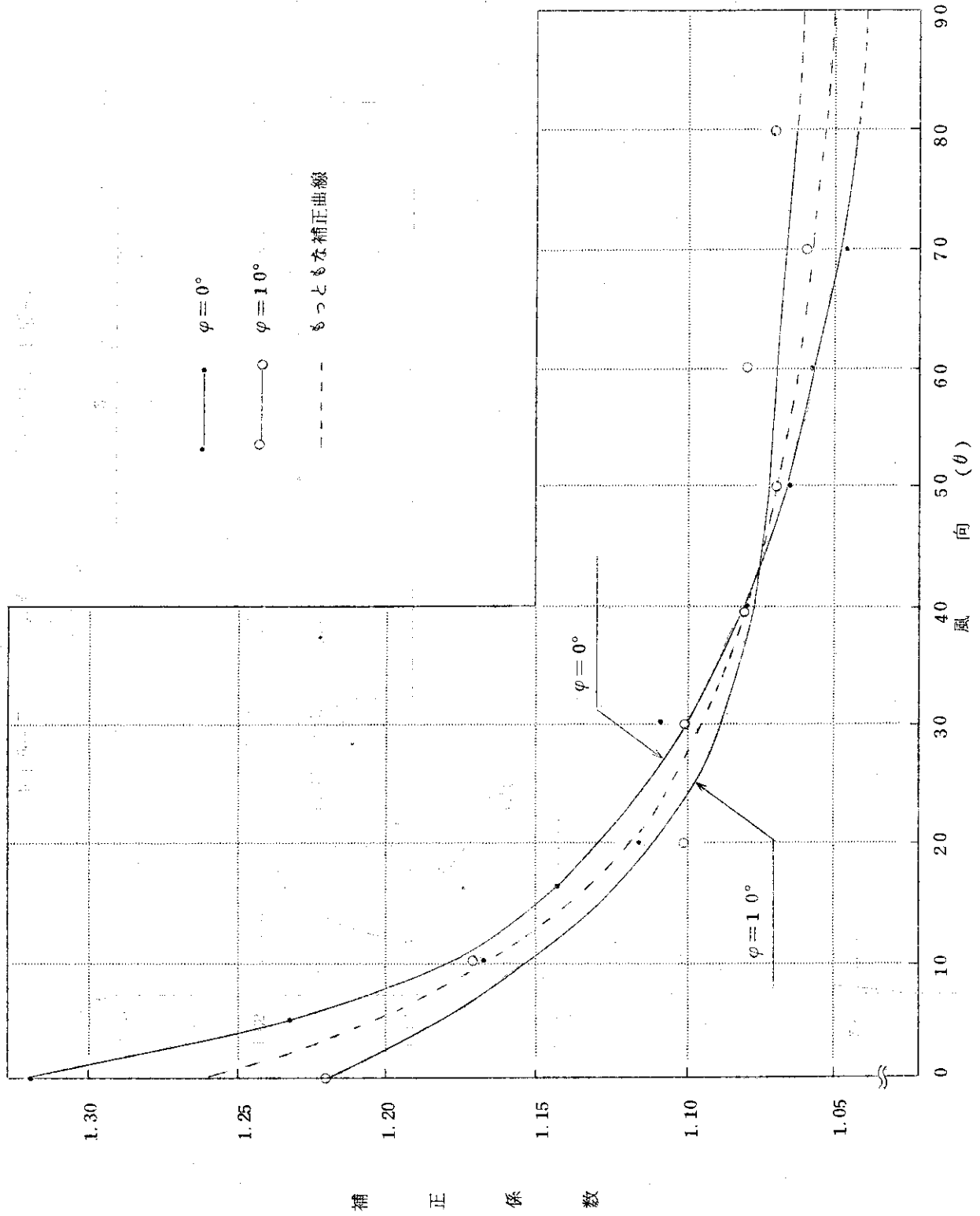


Fig-22 CH-3 の補正曲線

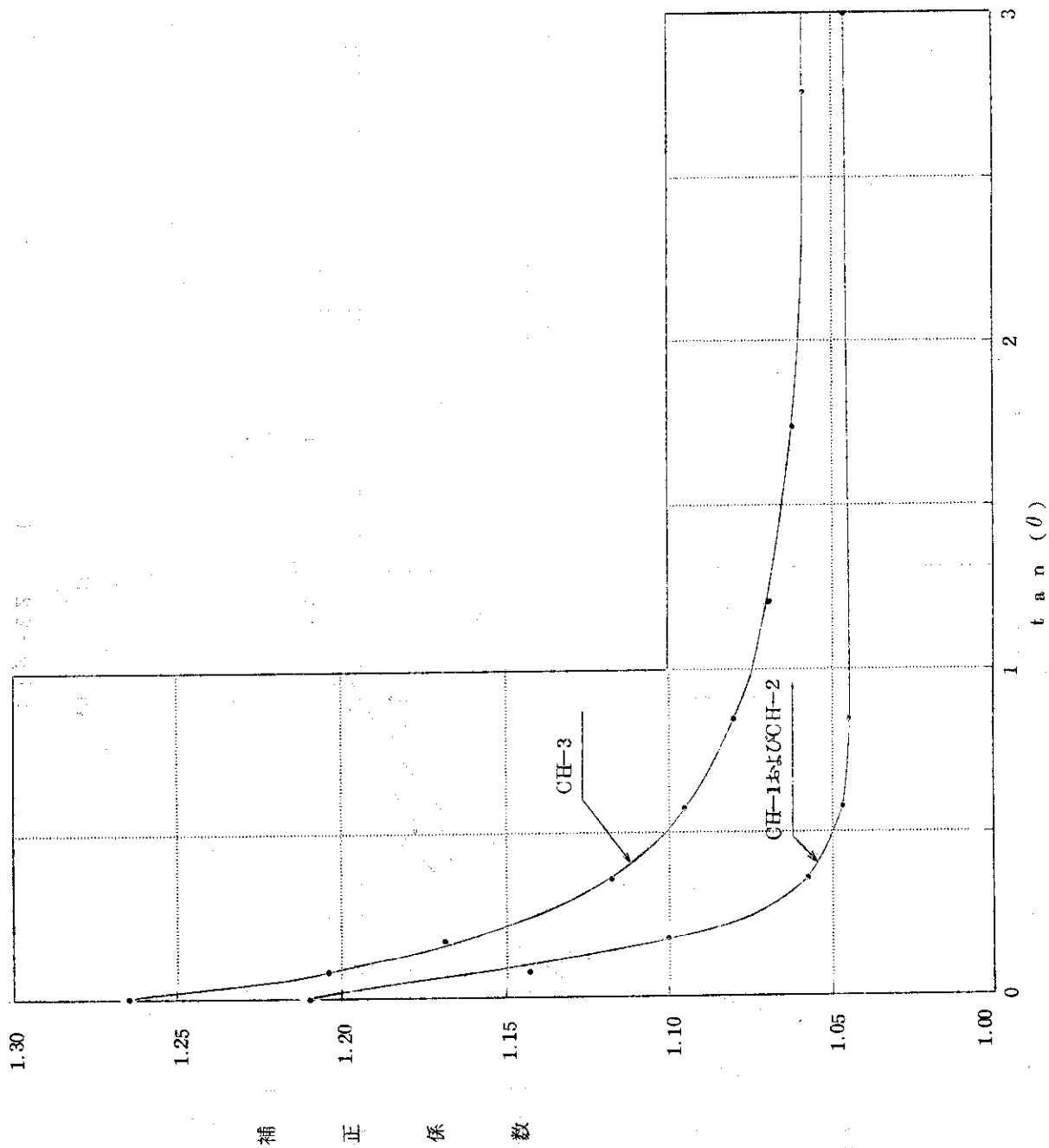


Fig-23 各チャンネルのもつともな補正曲線

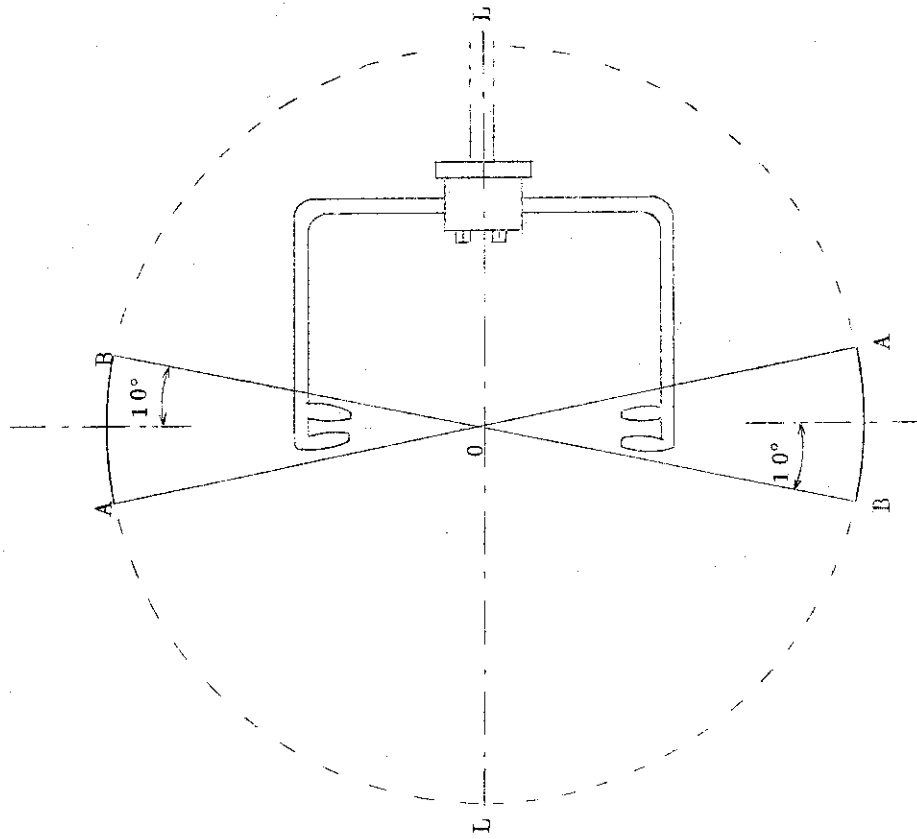


Fig-25 本実験で測定した立体角の範囲
(センサを鉛直方向に配置した場合)

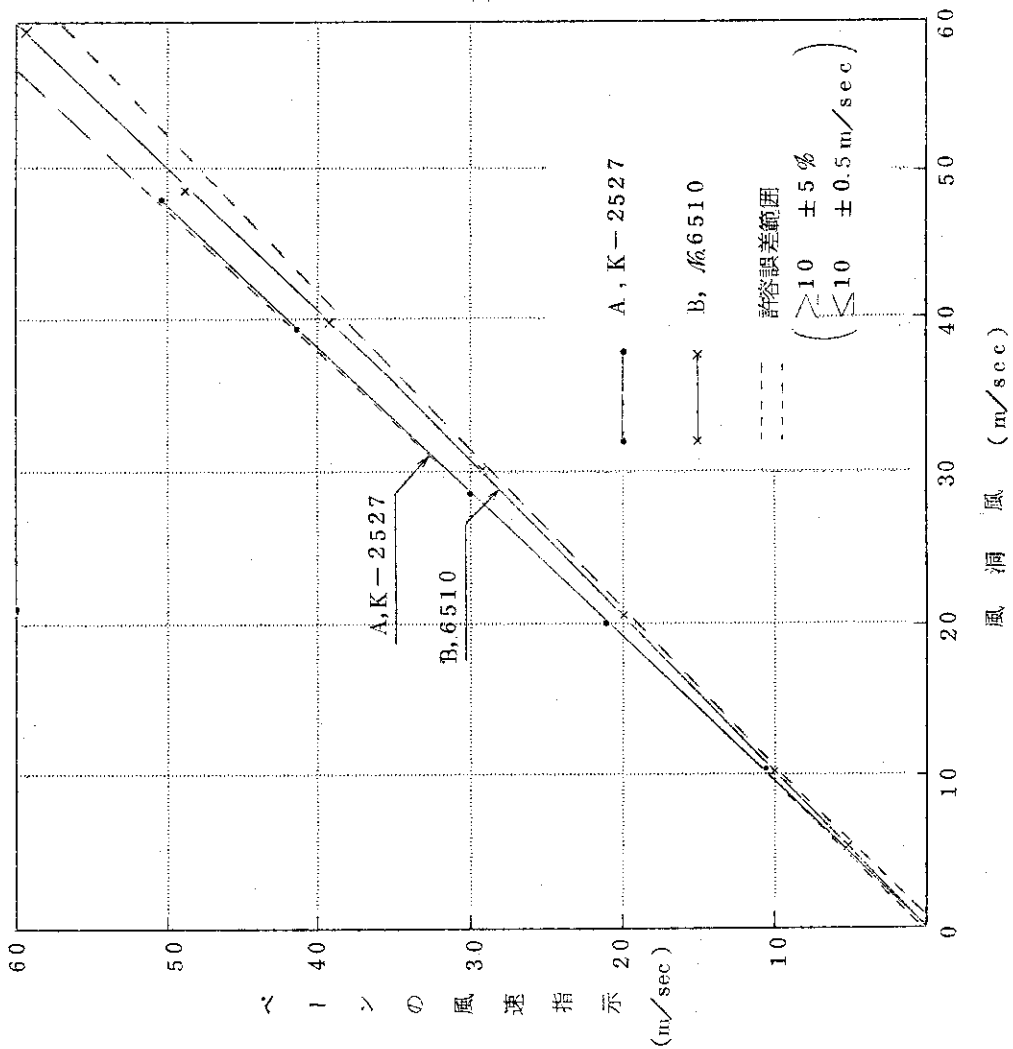


Fig-24 ベーソンの風速特性