

## レーダーを予報技術に生かすには\*

渡 辺 和 夫\*\*

種ヶ島と奄美大島のレーダーが動きだすことによって西日本の気象用レーダー網は充実して来たので、この機会に、レーダーが気象目的にどう利用されているか、また、される可能性があるか、あらためて考えることにしよう。まず、利用方法を分けるとつぎの5つになる。

1. 現象の観測
2. 2時間以内の予報とストームの監視
3. 2—6時間内の予報と広域天気図解析への利用
4. 6—24時間内の予報に利用
5. 気候調査

このうち(1)と(2)は観測所で行なうものであり、(3)は予報中枢で、(4)は解析中枢で、(5)は観測所や資料中枢で行なう性格のものといえよう。

### 1. 現象の観測

第2次大戦後における気象技術の大きな進歩の一つは飛行機によって台風の存在や強さを観測できるようになったことだ——とよく言われる。災害を伴うような気象現象の発生や存在の事実を掴むこと自体が防災技術のうえでは測り知れない重要性をもっている。そしてレーダーこそこのようなストームの発生、存在、動きを知りうるものであることは既に衆知の通りである。

まず、気象用レーダーの性能一杯の巨離(普通には200—400km)にブラウン管をセットしてそこに現われた像を観察することにしよう。

#### 1) 対流性のエコーなら

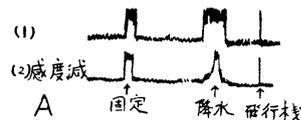
エコーの形状・位置・垂直のひろがり求め、つぎには受信感度を下げてゆくことにより最も強いエコーの部分を知る。エコーの底が高ければ降水はまだ始まってないものと、見做される。またエコーの高さと発雷率につ

いては、地上7kmまでエコーの頂部が達している時の発雷率は30%だが、8kmになると確率が80%と急にふえるから、8km以上にのびたエコーがあれば70~80%まで発雷していることが予期され、さらに12km以上にのびていればもう100%発雷しているとみなせることが古郷により求められている。アメリカでもエコーの高さが7kmから10kmの間なら発雷は50%、10km以上ならほとんどが発雷しているか間もなく発雷するといわれている。

雷については、PPIスコープとスフェリックスの指示器を併用すれば、どのエコー部分が電気的に活発になっているかを知ることができるし、レーダーに記憶装置をつければ雷の放電した跡をPPIスコープ上に表示することも可能である。

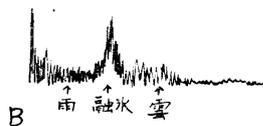
RHIスコープで観測されるエコー断面のうちで、ゾンデ観測によって求めた氷点高度より高い所にある強いエコーの部分は激しい着氷をもたらし可能性のある危険区域とみなしうる。

山岳などの地物による固定エコーや飛行機のエコーと気象エコーの違いは、アンテナをその方向に止めて受信感度をわずか上げ下げすることによって、A(またはR)スコープ上の求める巨離に現われる波型が変わらなければそれは前者であり、波の一部が飽和したり著しくさがったりする場合には後者と見做される(第1図A)。また



第1図

A(R)スコープの像



\* Kazuo Watanabe : Radar for Weather Forecast

\*\* 気象研究所 —1959年7月1日受理—

PPI スコープ上のエコーの変動状況とか、アンテナ仰角を変えることによるエコーの変化などからも両者を判別することはできる。

異常伝播エコー・多重反射エコーの判別などについては多少の経験を要するだろう。

2) 安定性 (層雲性) エコーなら

アンテナの仰角を5~10度にあげた時にPPI スコープに現われるリング状のエコーやA (またはR) スコープの波形から雲が何層になっているか、雲層間隙・雲の各高度・融氷層高度などを観測することができる (第1図B)。これらの観測にRHI スコープが使えればそれにこしたことはない。

観測されるエコーが雪片からのものか雨滴からのものかの判別も大切な問題である。その幾つかの注目すべき点としては:

- イ. PPI スコープ上で雪は雨よりも軟かい感じに映る。また雪片は雨滴よりも重さに比して表面積が大きいので風に流されること大きく、エコーはこまかい縞状をすることが多い。
- ロ. プライト・バンドより高い層にあるエコーは雪によるものと考えられる。
- ハ. 雪からの反射波は雨のものよりもずっと弱いので (およそ 1/5)、受信感度を少し落した時に、PPI スコープ上のエコーが雨によるものだとその一部は消えてもまだ残る部分があるが、雪の場合には全部エコーが消えてしまうことが多い。
- ニ. 雨と雪の落下速度の関係で、AやRスコープ上で雨からの反射波は草むらや稲田のような型をしているが、雪からの反射波はたえず全体としての変動が大きく定まった形を示さない。

雪からの反射波は強度は弱い、第1表のごとく近距離においては23cmの防空レーダーでさえも捕えること

第1表 各種レーダーによる雪の捕捉率  
距離別の降雪観測確率と調査回数

波長	型	25-75 マイル	50-100 マイル	75-125 マイル	100-150 マイル	125マイ ル以上
23cm	FPS-3	34%		2%		0%
	MPS-7	(32)		(48)		(31)
10cm	FPS-10	93%		22%		0%
		(93)		(132)		(80)
3cm	CPS-9		44%		5%	
			(275)		(295)	

ができる。もちろんレーダーの波長が3cmのように短かければそれだけ雪の観測は容易だがそれでも200km以上はなれた雪はほとんど観測できない<sup>5)</sup>。

雪片は落下途中の空気が飽和していなければ蒸発しながら落ちてくるので雪が融けはじめるのは実際には湿球温度が0°Cの高さにはいってからであり、ゾンデで測られた気温0°Cの高さとの間には数百メートルの差があることが多い。また雪が融けはじめてからすっかり水滴に変るまでになおかなりの距離を落下するのでプライト・バンドの高さは0°C層より500メートルほども下になっていることが多い<sup>7)</sup>。プライト・バンドの高さは山岳地帯の降水がどの附近から雪に変わっているかを推定する資料になり、さらに山岳を含む流域の流出予想には大切な要素である。

3) 近距離の観測 PPI スコープを遠距離にセットして気象エコーが観測された時は勿論、たとえ何も見えない時でもつぎには100キロから70キロぐらいの近距離にセットしなおして観測する必要がある。このようにして背の低い現象である温暖前線や寒冷前線に伴う弱い線状エコーや局地的な前線を観測することができる。またこのような近距離では強い積乱雲エコーの周辺に突風前線を認めることが多く、積乱雲エコーの一部が釣状やドーナツ状になる際にはその附近で竜巻や降雹を起すことが多い。この3)節の現象は地上1000m以下で起るのでアンテナの仰角も1度内外に止める必要があり、2度以上では観測がむずかしい。

4) 流れの観測

レーダーを使って気流を測ることの歴史は気象エコーを観測するころと同じく古くしかも早くから実用化した。第2次大戦中に高射砲の弾道修正をするために防空レーダーを使って反射板をつけた気球を追跡し上層気流の分布を測った。今日では航空管制を妨害する恐れがあるのであまり使われれないが、それでもアルミ粉を塗った気球を追跡したり、飛行機から俗にウインドウと呼ばれている一握りほどのアルミ箱を落してそのヒラヒラ落ちてゆく群を追跡することが時に行われている。孤立したエコーを10分か20分間ほど追跡することによってそのエコーが存在する気層の平均流を測ることができ、多くの場合において700mb附近の気流に近い値であるとされている (第2表)<sup>10)</sup>。しかし小エコーを15分間以上も

第2表 ポストンにおける降水エコーの動き  
と高度別地衡風との相関 (リグダ)

	850mb	700mb	500mb
速 度	0.49	0.81	0.58
方 向	0.73	0.96	0.87

追跡しているとしばしば他の大きなエコーと混ざりあったり、大きくなってしまったり、不規則な形に変わったりしてそのどの部分を追跡したらよいかわからなくなることがあり、30分以上の追跡はまず困難だろう。しかしエコー群やラインの追跡は数時間行なうことができる。

5) 雨の観測

レーダーは人里遠く離れた水源地帯の降水を観測することができ、しかも24時間を通して広い地域を1人で監視することができる。そこでレーダーで捉えられたストームの分布・移動・発達を観測して洪水予報に使われる。一様な降水を伴う地雨型エコーが現われている場合には、降水強度が弱いので河川の増水には十分な時間の余裕がありまた降水量もあまり場所による変動が大きくないので、雨量計の観測結果を洪水予報に充分使うことができる。しかし対流性エコーにあっては短時間のうちに数十ミリの雨を降らせることがあり、ストームの分布も複雑なのでレーダーの利用価値は大きい。

まず<sup>3)</sup> PPIスコープに現われているストームの移動と集水域の性質に注目する必要がある。第2図Cのよう

では急に水があふれる恐れがある。この波形はストームの動きと流出の関係によって決まってくるものであるから、単位流量曲線の峰が最も高くなるようなストームの速度(流出最大集中速度——maximum concentration velocity)を各流域についてベクトルとして求めておけばよい。かくして強いストームがある集水域をその流出最大集中速度に近い速度成分をもって移動したり停滞する時には急激な増水を警戒する必要がある。レーダーを使って洪水警戒をする一例としてテキサスのオースチン測候所が1958年5月12日に発表した警報を掲げておこう。

Radar observations have shown heavy rain and thunderstorms remaining almost stationary from Burnet to Lampasas during the last hour. Lampasas measured 2 inches of rain and it is still raining hard. Much of this rain is falling in the Lampasas area and in the headwaters of the north fork of the San Gabriel. Residents near Georgetown and on the north fork of the San Gabriel should be on the alert for a sudden rise in that stream tonight.

09:05pm May 12, Austin, Texas

降水強度の測定については:

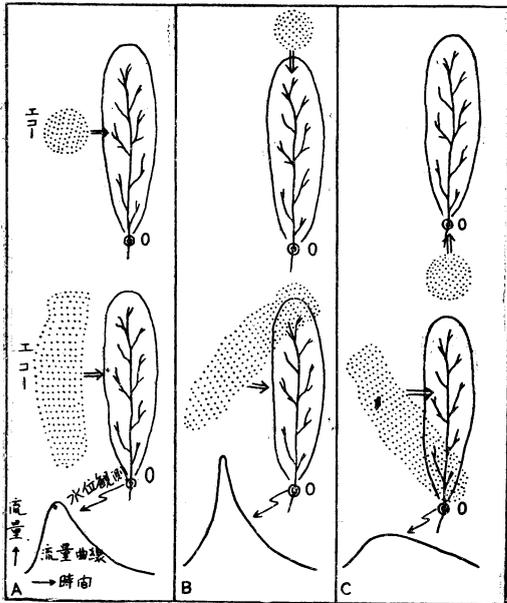
- イ. 標準信号発生器で更正したAスコープに現われる信号の高さを読む
- ロ. 求める方向・巨離に対する受信電力を取り出して記録計に書かせる
- ハ. 受信機の感度を一段づつ下げてゆき、そのたび毎にPPIスコープに現われるエコーの輪郭を描画するかカメラで多重撮影する
- ニ. 等雨量線装置によってPPIスコープ上に等エコー強度線を描かせる

などが試みられており、面積雨量を求めるには:

- イ. PPIのエコーのデーターを加算してゆく
- ロ. 濃いフィルターをつけたカメラで一定時間毎にシャッターを開き、PPIエコーを一枚のフィルムの上に重ねてゆく
- ハ. 面積積算装置による
- ニ. 蓄積管による

などがあり気象研修所テキスト「レーダー気象」(今井)<sup>11</sup>に述べられている。

6) 航空機にあってはそのスピードがストームの動きより遥かに早いので、塔載レーダーで観測されるストームを避けるように変針したり、どうしてもスコールラインを横切らなければならぬ際にはエコー強度の弱い部分



第2図 河川の集水域とストームの関係  
流量曲線は河の0点で測られるものを示す。

にストームが河下から河上に向かって進む場合には0点で測る洪水波はゆるやかで低い。ところが、第2図Bのように上流から下流に向うストームによっては0点の水位が急激に高まり、しかも洪水波の波高が高いので河岸

を求めて横切ることがおこなわれている。このようにして、「レーダーを装備した航空機を使用している」ということは安全かつ快適な旅を保障するという観点からアメリカの国内航空会社でも旅客誘致の宣伝文句になっている。またレーダーで観測されたエコーの成層状態・ブライト・バンドの高さ厚さなどはこれから出発しようとする飛行士に対するブリーフィング資料として大切である。

## 2. 30分から2時間程度外挿して使う

ストームの動きや発達にあまり急激な変化がこの期間には無いだろうとの仮定のもとに、PPIスコープで観測されたエコーの動きを外挿して、それが所要地点を通過する時刻を求める。このようにして突風の発生時刻・雨の降り初め終り時刻などを推定することができ、航空気象台ではシーリングや視界の急変予想・基地予報・航空路警報に役立ち、一般社会へのサービスとしておこなう気象現況を説明するにはもっとも大切な資料を提供する。また電力事業については、高さが一万メートル以上に発達したストームがある送電系統に近づいてきたら送電を他の系統に切り換える手配をし、また日中に気象エコーが市街地に近づいてきたら予想される急激な負荷の増大に対する発電量増加の手配をするなどの利用面が考えられる。

## 3. 2-6時間先の予想と天気図解析への利用

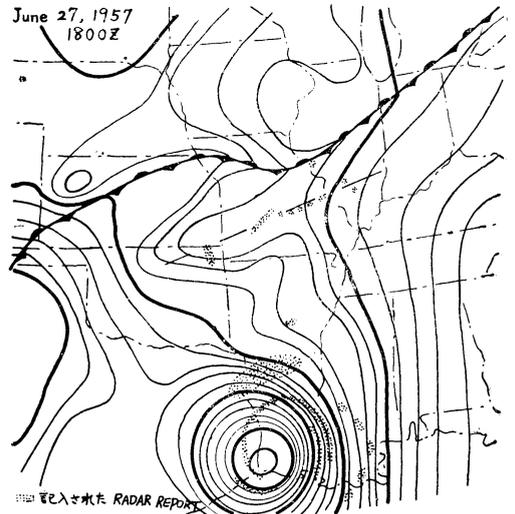
PPIスコープで観測されたストームをそれが存在する気層の一般流で流してその予想位置を求めることによって予報に使う。波長が緯度で15度から20度ぐらいの短い気圧の波の進行に対して、6時間以内ならあまり大きく一般流の場（主として700mb附近の流れ）が変らないと見做せるから、放送される高層気象資料に流線・風速解折を天気図上でほどこし、ストームの予想位置算出に使えばよい。エコーの持続・消滅については垂直流の分布図や渦度分布図・収斂発散図を参考にするとよく、エコーの流跡が南への成分を多く持っているか北方に向っているかによってもある程度推察することができる。大きなエコーの塊は発散域にはいっても3~4時間は消滅するまでに時間を要していることが多い。

2時間以内の予想位置を決めるには、PPIスコープ上にグラス・ペンシルでストームの位置を刻々マークしてゆきながら決めることができる。しかし4~6時間も先の予想位置を求め予報に使うには、もっと広範囲にわたるストームの状況を把握する必要がある。このために

はまず何箇所かのレーダー網で観測された情報を予報中枢に集め、そこで編集・総合が行なわれてのち放送によって再び地方官署に還元させる方式をとるべきであろう。レーダーで観測された情報を予報中枢に伝達する方法としては：

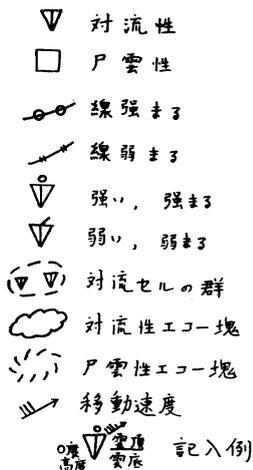
- イ. 観測結果を文章に表現したりコードに組んで電信やテレタイプ：電話などにより通報する
- ロ. 観測者がトレースした像や撮影した速製写真をファクシミリで電送する
- ハ. レーダーが受信した映像信号をマイクロ波リレー回線に乗せて送る
- ニ. 極座標型のPPI信号をメモリー管を使ったscan converterに入れて縦横座標型のテレビ信号に変えてマイクロ波リレー回線に乗せたり、band compressionをして有線や短波で送る。この長所はPPIに現われるエコーと共にエコーの高さや動き・発達などの情報をも併せて送ることができることと、受信には普通のテレビ受信機が使えることである。またアメリカではこの方式で数箇所飛行場のレーダー像を一処に集めるジェット機時代の新航空管制方式がとりいれだしているようだ。

さて予報中枢では集められた各地の観測資料を編集して図上に貼りあわせ、広い地域のエコー分布図を作ったり天気図に記入したりする（口絵と第3図参照）。またこ



第3図 各地から集まってきたレーダー・エコーの観測報告を天気図に記入したところ（1957年6月27日ルイジアナにはハリケーン・オドリーがあり、ミズリー州を横切る不安定線がみとめられる）

のさいに第4図に示されているような記号で雲頂・移動・  
0°C 高度・発達などを示すのも便利である。



第4図 気象エコーの性質や動きを表わす記号の一覧

このようにして総合されたものはエコー分布図として  
ファックスにより放送されたり、文章の形で有線・無線  
放送される。ここでは1957年夏のハリケーン・オドリー  
がルイジアナ州に上陸しつつある頃にカンサス・シティー  
から毎時間送られていたレーダー総合報の一部を紹介  
しておこう。

SD MKC 271840Z

Northern plains area broken moderate increasing 50 wide 40 ssw VTN 10 w LBF cells 3 diam weak decreasing 35 NNE SCT.....  
Central plains area broken moderate increasing 10 diam 40 nnw STL ..... line solid moderate increasing 5 wide 20 w VIH to SGF.....  
Gulf coast spiral band solid weak 50 wide 40 E ELD 20 NNE SHV 40 sw SHV spiral band broken moderate 10 wide 40 wsw MSY 25 wnw MCB 40 N AEX 40 E LFK over BUJ 30 se BUJ.....

このエコー分布図を天気図解析に利用する範囲としては  
前線解析・不安定線の検出・台風中心の位置判定などが  
主なるものであろう。前線の位置とエコーの分布には  
密接な関係があって線状に走るエコーの附近には前線が  
存在することが多い。エコーの分布だけでなく個々の小  
さなエコー・セルの動きにも注目するとよい。ただし線  
状エコーは前線の前面に現われることも、後面に認めら  
れることも、また一致していることもあるのであまりこ  
れにとらわれる必要はない。線状エコーの位置が気圧や

風・気温などから判断する前線の位置と一致するかどう  
か検討することは必要だ。ただ線状エコーの存在だけで  
すぐ結論できることは、その附近の前線が活発である  
ということであろう。台風の眼はおよそスパイラル・バン  
ドの曲率の中心と見做することができる。しかし眼とそれ  
を囲むエコー・バンドの関係には微妙なものがあり、エ  
コー・バンドに対して前後左右に片寄ったり、ぼやけ  
たり、くっきり現われたり、不規則な形に変形したりし  
てゆくようだ。したがって雲やエコーから求める眼の  
中心と気圧中心の間には 10km から時としては 30km 程  
度の差があるであろうことに留意すべきである。

4. 6-24時間先への予想

6時間以上先の予報に気象エコーの観測資料を使おう  
としても、もう降雨群を前節でのべた方法で一般流にの  
せて流し予想位置を求めることには色々の問題がある。  
まず、降雨群の寿命の問題であり、つぎは一般流の場  
の変化を考えなければいけないことである。この後者につ  
いては電子計算機を使って1時間毎の流線函数と垂直行  
の場を求め流跡の計算に使うことができるから前者につ  
いてすこし検討しよう。ここでは、積雲活動によって高  
層に運ばれた多量の水蒸気や水晶が風下に流されてゆき  
ながらどのような影響を将来の雲の分布や降水分布に与  
えてゆくかという形式で問題をとりあげるべきであろ  
う。たしかに、スコール・ラインが発生すると、のちほ  
どその附近の気塊が温暖前線にさしかかる頃にその方面  
の雨域が広がり雨勢の強まることが経験され、また雷が  
多く発生したりスコール・ラインが発生すると急に濃厚  
な巻層雲が風下にひろがってゆくことがある。しかしこ  
の予想法については降水機構などの点でまだ解決しな  
ければいけない多くの点があり、今後の研究をまたなけ  
ばならない。

24時間よりもっと先までの予想ということになると今  
度は流跡を計算するうえでの誤差が大きくなってくるの  
で降水予報の観点からすると時間と共に急激に価値が落  
ちてゆくことになる。

5. 気候調査

レーダーの観測資料を使って気候要素を統計的に調べ  
ることであり、その一例としてはつぎのようなものが考  
えられる:

- イ. 積雲やスコール・ラインならびに局地前線などの  
発生しやすい場所を求め、その発生地域が気象状態  
の差によってどう違ってくるかを知る

- ロ. 気象エコー発達の日変化を知る
- ハ. 気象エコーの発生や移動についての土地の癖を知る

天気の局地予報をだすにはその土地の癖を知っていることが必要であると同様に、レーダーで得られる情報を利用しつくすにはこれら気候条件を十分に理解していることが必要である。

6. む す び

レーダーを気象目的に利用することはアメリカにおいてまず航空の安全を守るために各主要空港において実施され、後になって洪水やトルネードなどの災害を予防する目的にも使われたのであって、利用方法としても2時間以内ぐらいの変化を推定することにほとんどの場合が限られていた。したがって3時間以上先の天気予報にどう利用してゆくかという問題についてはまだ幾つかの試みがなされているだけで、それを実用化させるにはまだ多くの研究が必要であろう。なお本稿の閲読を願った今井一郎博士に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Myron G.H. Ligda & others, 1956: Study of the Synoptic Application of Weather Radar Data, Project Report, Texas A & M College.
- 2) Myron G.H. Ligda, 1951: Radar Storm Observation, Compendium of Meteorology,

- American Met. Soc., p.p. 1265—1282.
- 3) M.G.H. Ligda, S.B. Bigler, R.D. Tarble, L. E. Truppi, 1956: The Use of Radar in Severe Storm Detection, Hydrology, and Climatology, Project Report, Texas A & M College.
- 4) G.D. Smith, M.G.H. Ligda, 1957: The Use of Composite Radar Photographs in Synoptic Weather Analysis, Project Report. Texas A & M College.
- 5) S.G. Bigler, R. D. Tarble, Application of Radar Weather Observations to Hydrology, Project Report, Texas A & M College.
- 6) Lloyd E. Jacobs, 1957: Kinematics of Precipitation Echoes, Technical Note, Texas A & M College.
- 7) F.W. van Straten, 1957: Radar as a Weather Instrument A Manual, NAVAER 50-1P-544, U.S. Navy.
- 8) Hal Foster, 1955: The Use of Radar in Weather Forecasting with Particular Reference to Radar Set AN/CPS-9, Technical Report No. 20, M.I.T. Dept. Meteorology.
- 9) J.S. Marshall, W. Hirschfeld, K.L.S. Gun, 1955, Advances in Radar Weather, Advances in Geophysics Vol. II.
- 10) M.G.H. Ligda, 1953, The Horizontal Motion of Small Precipitation Areas as Observed by Radar, Technical Report No. 21, M.I.T.
- 11) 今井一郎, 1959, レーダー気象, 気象庁研修所テキスト.

大 会 の 講 演 数 と 講 演 時 間

気象学会大会のプログラム編成のための参考資料として1959年以降の春秋2回の大会の講演数と講演時間を調べて見たところ下表のようになった。ただし講演数はプログラム所載のもので、その後の追加、取消などは含んでいない。総講演時間も同様で、実際のものではない。一講演当りの平均時間は総時間を講演数で割ったもの

年	春 季			秋 季				
	場 所	講 演 数	一 講 演 当 り 総 時 間	場 所	講 演 数	一 講 演 当 り 総 時 間		
			時 間 分			時 間 分		
1954	東京	81	28	21	東京	33	15	27
1955	大阪	82	19	14	東京	52	17.5	20
1956	東京	92	20	13	東京	66	21	19
1957	名古屋	94	29	19	東京	76	28	22
1958	東京	91	24	16	仙台	69	28	24
1959	東京	97	32	20	福岡			
平均		(89)		17分		(59)		22分

で、申込時間とは違い討論の時間も含んでいる。

この表から分るように、講演数は年を追うて増加の傾向にあるが、こゝ3、4年は春季90~100、秋季70前後と大体きまって来たようである。開催地にはあまりよらないらしい。秋に少いのは地方の人の参加が少いたためである。1959年から56年にかけて秋が急増しているのは、気象研究所報告会から秋季大会へ漸次移行したことを物語っている。

一講演当りの時間にはかなりの変動があり、春の平均が17分、秋の平均が22分となる。春は総会など行事が多いので窮屈になるのはやむを得ないが、今後はなるべく行事の時間を短くして講演時間にゆとりを持たせるようにしたいものである。

今 井 一 郎