

〈第56回静岡県学生科学賞 県教育長賞〉

2 「変化球を科学するパート4」 カルマン渦の研究～カルマン渦が及ぼす自然現象～

浜松市立佐久間中学校
3年 恩田 浩希

1 動機

小学5・6年生の実験や調査では、ボールが回転して進むときに周りの空気を巻き込んで空気の渦を作って進むため、曲がったり、落ちたりすると知ることができた。そこで、その周りの環境の変化や、ボールの種類・ボール表面の様子でボールの後ろにできるカルマン渦がどのように変化するか様々な方法で実験をした。しかし、流体の変化は目に見えないため、今まで分かってきたことも推論にすぎず、実証してその本質を探りたいと考えた。そこで、ボールの変化をもたらすカルマン渦がどのようにでき、変化しているのか可視化し、さらには定量化してその実態に迫りたいと考え研究を進めた。そのため、以下の3つの基礎実験をして、流体によってできるカルマン渦のでき方やその特性を追究した。

- (1) 牛乳の入った液体に墨汁を落とした環境下で移動する物体の動きで起こる渦を記録する実験。
- (2) アルミニウム粉末を水面にまいた環境下で物体の動きで起こる渦を記録する実験。
- (3) 空気の流れを見るために、ドライアイスが重力で落ちてくることを利用して可視化した実験。

また、得られた資料を基に、起こる現象を図解して自然現象の仕組みの解明に迫った。そして、本年度は以下の2つのことについても追究を試みた。

1つ目は、カルマン渦の発生周期（1秒間あたりに発生する数）は何によって決定するのか、発生条件の追究である。そして最終的には、発生周期を導き出す公式に挑戦した。

2つ目は、カルマン渦が自然現象にどのように関わってきているのか、実験方法を工夫して予備実験を行って、それから仮設したことを、自分なりの方法で追究した。雲のでき方とカルマン渦の関係について、牛乳を使った実験を分析することで追究した。

変化球を科学することから始まった5年間にわたる研究が、カルマン渦と出会い、カルマン渦がもたらす様々な自然現象への追究へと進んでいった。

2 研究方法

5年間で多くの実験を行ってきたのでその中から抜粋して示す。

(1) ドライアイスによる流体可視化実験

空気の流れを可視化するために、ドライアイスを使った〈空気の流れの可視化実験〉を試みた。準備物として以下のものを使った。

- ・ドライアイス、段ボール、軟球ボール、テニスボール、ゴルフボール、ピンポン球、スーパーボール、布団干し台、フック、ふるい、突っ張り棒、黒い画用紙、一眼レフカメラ（canonEOSkissX4、レンズEF-S55-250mmf/4-5.6IS）、三脚

図1



(2) アルミニウム粉末を水面にまいてカルマン渦の特性を探る実験

図 2

この実験では、アルミ缶をヤスリで削ってアルミニウム粉末をつくり水面にまいて水の流れを可視化できるようにした。装置としては図2のように大型の容器に水を入れアルミニウムの粉末をまいた。準備物は以下の通りである。



- ・アルミニウム粉末、プラスチックの入れ物 (12センチ×30センチ)、30センチ定規×2、木の円柱 (直径8センチ、10センチ、12センチ)、ストップウォッチ、一眼レフカメラ (canonEOSkissX4、レンズEF-S55-250mmf/4-5.6IS)、三脚

(3) 斜面回転体落下実験 (回転する物体がどのように変化するか実験する。) 図 3

ドライアイスの実験の考察で空気 (圧力) が強いところと、弱いところが出て、空気 (圧力) が弱い方に変化していくと推理することができた。それを証明するために、小さな坂をつかって、そこからいろいろな物を転がして落とした時にどうなるか実験した。(図3) 準備物は以下の通りである。



- ・大きい板、メジャー、ボール、紙筒 (直径が、2センチ、4センチ、10センチを白黒で一個ずつと、黒だけ14センチ)、船型の木片、ストップウォッチ、机

(4) 牛乳滴下実験 図 4

本年度の実験で竜巻がてきるとき、下から上昇してくる流体によりできあがっていくことがわかったので、上昇気球でできる雲も、カルマン渦のような渦が組み合わさって大きな雲ができあがっているのではと考え、図4のような牛乳による可視化実験を行った。準備物は以下の通りである。



- ・コップ、スポイト、牛乳、ストップウォッチ、30センチものさし、一眼レフカメラ (canonEOSkissX4、レンズEF-S55-250mmf/4-5.6IS)、三脚

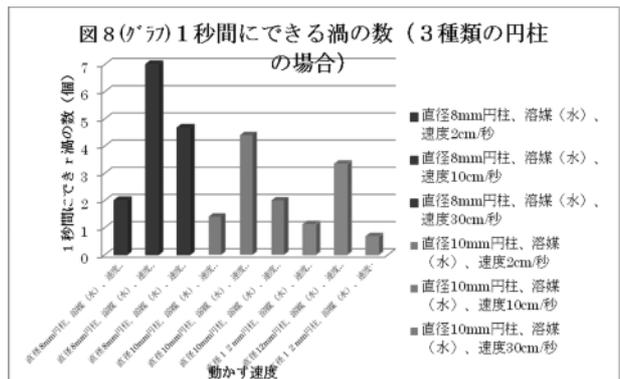
3 結果

(1) ドライアイスによる流体可視化実験

ゴルフボールと軟球では表面の違いによるためか、流体がボールから離れる点 (剥離点) がゴルフボールの方が後ろであった。また、回転をさせて流体の動きを観察すると、回転の方向に流体が巻き込まれていくのが肉眼で確認することができた。

(2) アルミニウム粉末でのカルマン渦の特性を探る実験その1

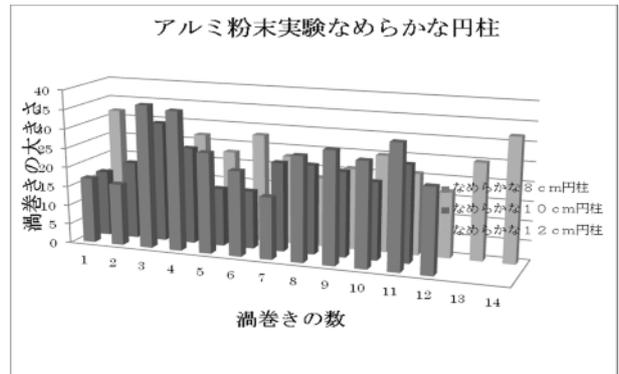
直径8mmの円柱を水の中で動かした場合にできるカルマン渦の数を分析したのが右図である。このように、2mm/秒と10cm/秒では、動かす速度の速いほうが、1秒間にできる渦の数が多くなった。30cm/秒では、数は予想していたよりも増えなかった。また、30cm/秒の実験で



は、円柱が水中を進むときに、水をうまくとらえ切れていない動きが多く水中では、30cm/秒は動きが速すぎる感じがした。10mmも12mmも同じであった。カルマン渦ができる速さの限界を超えているように感じた。30cm/秒の速度を除いた6つのデータでは、速度が速くなるとカルマン渦の発生個数が増加し、円柱の直径が太くなるにつれて、カルマン渦の発生個数が減少するようになった。

(2) イ アルミニウム粉末でのカルマン渦発生仕組みを探る。

カルマン渦は、液体内を移動してきた物体の後ろに2つの渦が逆回りで吹き込みながら形が出来上がっていく。上が左回りで、下が右回りである。最初の渦巻きを吹き込みように作る力を受けて少しずつ渦が成長し、2つの渦の感覚があまり広がらないように互い違いになって連なっていく。右図のようにまるでリズムを持った波のように発生した。



(2) ウ アルミニウム粉末での単位時間あたりカルマン渦発生要素の実験

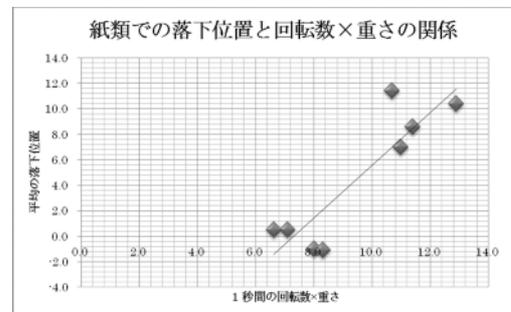
カルマン渦の発生個数と円柱の直径との関係、そしてカルマン渦の発生個数と円柱の動かす速度との関係では、前者は反比例の傾向、後者は比例の傾向にあることがわかった。

(2) エ アルミニウム粉末での船型木片周囲の流体の変化

船を浮かべたときから船の周辺だけアルミが消えた。その後、船を進ませていってもアルミのない部分が航跡となって続いた。

(3) 斜面回転体落下実験

右図のように薄い紙で作った筒や画用紙で作った筒は、1秒間の回転数と重さの積が少なければ、少ないほど、筒が曲がって落下し、内側に曲がること分かった。

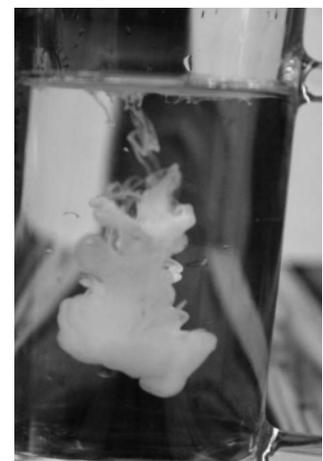


(4) ア 牛乳滴下実験 (カルマン渦の自然現象に及ぼす影響)

一方向に流れが生じた場合、必ずその中で、カルマン渦が発生することが分かった。その際、そのカルマン渦によってドーナツ状に丸い形状のものを作っていくことが分かった。

(4) イ 牛乳滴下実験 (カルマン渦と雲との関係)

1枚1枚の写真を観察するとよく分かるが、小さなカルマン渦が小さなドーナツ状の雲を作り、それが複雑に連なって、大きな積乱雲のような雲になることがよく分かる。



4 考察

(1) ドライアイスによる流体可視化実験

流体は回転する物体の回転方向に巻き込まれて流れていく。そのため、流体が巻き込まれた側は空気の流の速度が増した分だけ圧力が下がっていく。逆に反対側は気圧が高くなっていく。流体の速度が早くなっていくほうに曲がっていくといえる。

(2) アルミニウム粉末でのカルマン渦の特性を探る実験

粘性の違う液体でも実験をしたが30cm/秒の速度を除いた円柱すべてで、円柱を液体中で動かすとき、円柱を動かす速度が速くなるとカルマン渦の発生個数が増加し、円柱の直径が大きくなるにつれてカルマン渦の発生個数が減少する。

(3) アルミニウム粉末でのカルマン渦発生仕組みを探る。

同時に発生した2つの渦の間隔があまり広がらないように、リズムをもった波のように互い違いになって並んでいく。渦と渦の間には一本の大きなうねりのような流れが生じる。

(4) アルミニウム粉末での単位時間あたりのカルマン渦発生要素の実験

カルマン渦の発生個数と円柱の直径との関係、そしてカルマン渦の発生個数と円柱の動かす速度との関係を実験結果から考えると、カルマン渦の発生個数は、円柱の直径に対して反比例することから分母に、円柱の速度は比例することから分子になることがわかる。円柱の直径を、「D」とし、円柱の速度を、「V」とすると

$$\text{カルマン渦発生個数 (F)} = a \times V / D \quad (a: \text{比例定数}) \text{ となる。}$$

(5) アルミニウム粉末での船型木片周囲の流体の変化

船の構造により、水面の下から水の流れが生まれ船底に沿って外側に押しやられるため、カルマン渦はできにくく船はスムーズに進む。

(6) 斜面回転体落下実験

飛び出した瞬間の回転が空気に徐々に伝わって行って、考察(1)との関連で分かるように回転体が回転する側に流体が巻き込まれその方向に回転体が曲がっていく。

(7) 牛乳滴下実験その1

牛乳の球体の固まりの下から流れを受け中心が割れる。中心に入った流れは、牛乳に接していないところは速く、接しているところは遅くなるため、遅くなった側は曲がり始め、逆Uの字を書くように巻き込むことでドーナツ状のものができる。

(8) 牛乳滴下実験その2

積乱雲などの雲は、空気の上昇気流の時に発生する小さなカルマン渦で、ドーナツ状の雲がたくさんできて、それがたくさん重なって、大きな積乱雲のような雲になっていることが分かる。雲はカルマン渦でできるといえる。

4 参考文献

- ・「流れの法則」を科学する (伊藤慎一郎著) 『技術評論社』
- ・身近な流体力学『丸善』
- ・いまさら流体力学? (木田重雄著) 『丸善』
- ・改訂版流れの化学 (木村竜治著) 『東海大学出版会』 など

5 謝辞

5年間続けてきたこの研究は、一人ではここまで成し遂げることができなかつたと思います。両親には、実験や実験レポートの作成を手伝ってもらい、先生方にはレポート作成について御指導をいただきました。たくさんの人の協力があつてこの作品が出来上がりました。本当にありがたい気持ちでいっぱいです。