

マグヌス飛行体を使用した多様な対象への教育

—— ものづくりを通じての物理教育の実践 ——

伊多波正徳*

(2021年10月22日受理)

Education of diverse students using magnus flying object:
Practice of physics instruction through manufacturing

Masanori ITABA

キーワード: ものづくり, 物理教育, マグヌス効果, 計算機実験

マグヌス飛行体を使った二つの教育実践について報告する。一つは小・中学生向けの科学教室での授業で、講義、マグヌス飛行体の製作、飛行コンテストをとおして、受講者の科学への興味を喚起する試みを行った。もう一つは大学院1年次向けの授業で、マグヌス効果について理論、実験および計算機実験の三つの方法を関係付けた教育方法を試みた。その教育方法は受講者のアンケートから有効であることが分かった。

はじめに

ものづくりを通じての物理教育は学習指導要領¹⁻³⁾で繰り返し示されている「主体的・対話的で深い学びの実現」に寄与する。そのような実践についての報告は幾つかあるが、一つの工作物を多角的に活用できる可能性を示した報告⁴⁾がある。一つの工作物に関する多数の教材開発ができれば、教材開発の一部の労力が省け、また材料の管理もしやすい。

そこで既に報告のあった内容と類似の実践と新たに試みた実践について報告する。前者は実践1、後者は実践2である。実践1では、マグヌス飛行体を使用して小・中学生向けの科学教室の授業の実施について述べた。また実践2では、マグヌス飛行体を使用して修士課程の授業の実施について述べた。

*茨城大学工学部

教育の実践

1. 実践1（小・中学生向けの科学教室）

将来、理工系へ進学を希望する者にとって「様々な物理現象が技術的に活用されることで、社会がより便利でより豊かになっていること」を認識することは学習のモチベーションの維持、増進につながるという意義がある。そこで、その様な児童・生徒が所属している科学クラブ⁵⁾向けの科学教室でマグヌス飛行体を使用した授業を実施した。

平成30年10月21日に日立理科クラブの児童と生徒を対象とした特別授業が茨城大学工学部で実施された⁶⁾。小学校6年生、中学校1、2年生の32名が2班に分かれ、各班について90分の授業が実施された。授業の内容を下の表に示す。

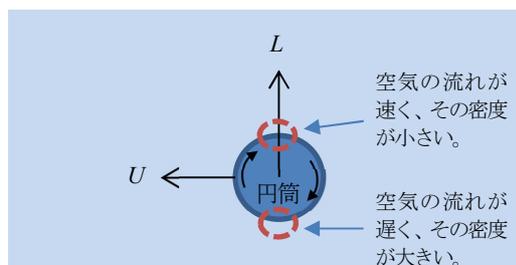


図1 マグヌス効果。回転する円筒が左へ速さ U で進むとき、円筒には力 L が働く。

表1 時間割

順 番	内 容	時間 (分)
①	マグヌス効果とその工学的利用についての説明	15
②	工作	40
③	試験飛行	20
④	飛行コンテスト	15

順番①ではマグヌス効果、つまり移動しながら回転する円筒に働く力について図1で極簡単に説明した。

次にマグヌス効果の利用について次の具体例を解説した。

- (1) ローター船。これは回転する円筒を帆船の帆の代わりに使用するものである。例としてローターが備わっているヨットや輸送船 E-Ship 1 の写真を示し、マグヌス効果を利用すると、船を推進させられること、また船の燃費を良くできることを説明した。
- (2) ローター飛行機。これは回転する円筒を飛行機の翼の代わりに使用したものである。模型飛行機が実際に飛行する動画を示し、マグヌス効果を利用すると、従来にない飛行機の実現の可能性があることを説明した。
- (3) マグヌス風力発電。これは回転する円筒を風車の羽の代わりに使用したものである。この風力発電機は従来の水平軸プロペラ式では低効率あるいは発電が困難だった風速、風向が頻繁に変わる状況においても安定して発電できる。この風力発電機が実際に稼働する様子の動画を示し、マグヌス効果を利用した新しい発電方式について説明した。

これらの説明の最後に「様々な物理現象が技術的に活用されることで、社会がより便利でより豊かになっていること」を受講生に示して、その認識を促した。

順番②では受講者が工作手順の説明を聞きながらマグヌス飛行体の工作を行った（図2、表2）。個々の受講生の進度の違いを配慮して、工作手順の資料を予め配布した。

順番③ではまずマグヌス飛行体にかかる4つの力について極簡単に説明した（図4）。また実際の飛行特性について説明した（図5）。次にマグヌス飛行体の飛ばし方を受講者に説明した（図3）。その後、受講者がマグヌス飛行体を実際に飛ばし、その飛行距離を最大にするための条件を試行錯誤しながら探求した。

順番④では飛距離を競うコンテストを行った。上手く飛ばせる者やそうでない者、様々な表情が見られ、歓声が時折場内に響くなど大変好評であった。

本実践では受講者にマグヌス効果についての基礎的な知識を与え、その現象の社会での利用を具体例で示した。更にその現象の理解を深めるために飛行体の工作とその試験飛行を実施した。これら一連の教育により、将来理工系への進学を希望する者へ、物理現象の社会利用への認識を促す教育を実施した。

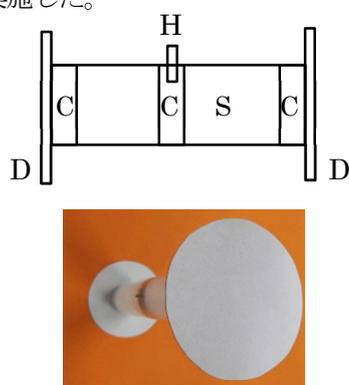


図2 マグヌス飛行体。上はその構造で、下は工作したもの。

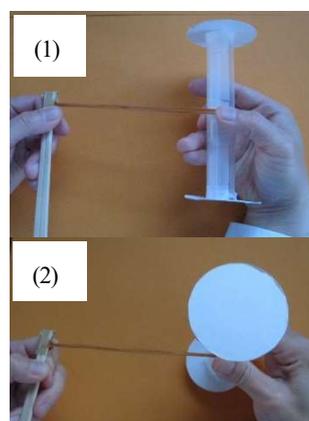


図3 飛ばし方。(1) ゴムをフックに引っ掛ける。(2)数回まいて飛ばす。

表2 材料

記号	部品	備考
C	円柱	発泡スチロール製。直径は25mm、厚さは10mm。
D	円盤	厚紙製。直径は50mm。
H	ゴムかけフック	つまようじを中央のCに10から20mmさし、外は約3mm残す。
S	円筒	ラミネートフィルム製。80×180mmを丸める。

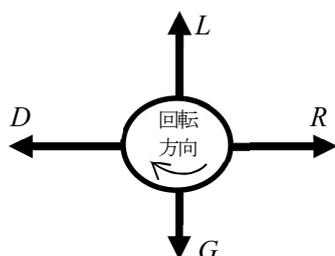


図4 左方向へ飛ぶマグヌス飛行体に働く力。
D：推進力、L：揚力、R：抵抗力、G：重力。

推進力 D : ゴムパチンコで与えられる力。
揚力 L : 飛行体を持ち上げる力 (マグヌス効果)。
抵抗力 R : 空気抵抗による抵抗力。
重力 G : 飛行体を下げる力。これは常に一定。
※ 力は物体の速さと向きを変える。

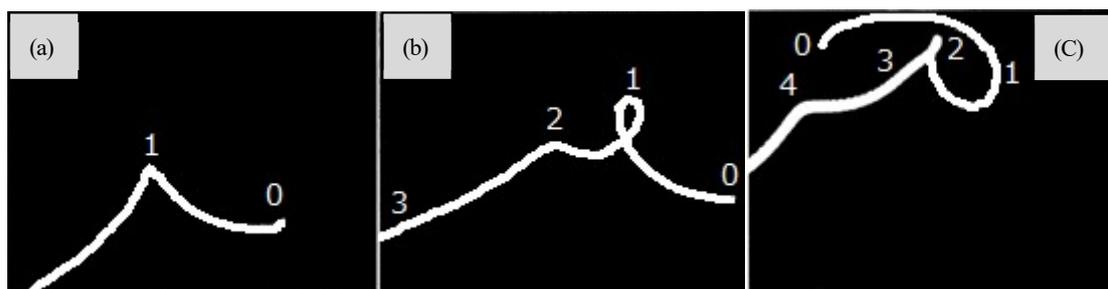


図5 マグナス飛行体の軌跡。0→1→2→…の順番で飛ぶ。(a)ゴムをゆるく巻き付けたとき(円筒の回転が遅い)。(b)ゴムをきつく巻き付けたとき(円筒の回転が速い)。(c)はゴムをきつく巻き付け飛行体の上下を反対向きに射出したとき。(文献4を参考とした。)

2. 実践2 (博士前期課程の授業)

対象とする現象を正しく理解する方法は理論や実験があるが、第3の方法として計算科学がある。これら三つはそれぞれ長所と短所があり、現代科学はそれぞれが相互に補うことで発展し続けている。一方、学部教育に目を向けると、三つの方法が科目ごとに分断されて教育が行われることが殆どであり、また扱う内容も統一性や接続性が必ずしも考慮されているとは限らない。更には計算科学の重要な手法、数値解析(これ以後は計算機実験と表すことにする)を扱わないこともある。三つの方法を駆使して対象を多面的に理解する教育を受けることは次世代を担う学生にとって大変意義のあることであろう。

そこで一つの対象として、物理現象であるマグナス効果を取り上げて、それを理解するための授業を三つの方法を使って実施した。またそれが学生に与えた影響をアンケートで調査した。

2.1 実施の内容

令和3年前期・第2クォーターに理工学研究科博士前期課程の科目、計算機応用特論Bにおいて5名を対象として授業を実施した。授業の内容を下の表に示す。

表3 授業の進行

順 番	内 容	授業 / 回目
①	マグナス効果とその工学的利用についての説明	1
②	飛行体の計算機実験	1
③	工作	2
④	試験飛行	2
⑤	飛距離を最大にするための検討	2

順番①では実践1の(1)から(3)および理論(付録1に示すマグナス飛行体の運動方程式の導出)について説明した。

順番②では常微分方程式の数値的解法(オイラー法、かえる跳び法、ルンゲ・クッタ法)および計算機実験(付録2)の内容について説明した。なお、本工学部ではプログラミングの教育でC言語

が使われており、計算機実験においてもその言語を使用した。学生には付録2、表2に示すパラメータ Γ について計算機実験を実施させた。その後、現象への理解を深めるために次の課題を課した。

【1】計算機実験の結果である各グラフ（付録2、図1）の意味することを考察する。

【2】マグヌス効果の工学的応用について調査して、得られた知識をまとめる。

順番③では工作手順の資料と材料を配布し、手順を簡単に説明した。一方、遠隔授業で受講する学生については自宅にある材料、紙コップで作れるマグヌス飛行体の工作手順について説明した。ただしこの場合では先の計算機実験の結果と整合性が良くないことを説明した。

順番④ではマグヌス飛行体にかかるそれぞれの力（図4）について説明した。推進力はゴムパチンコを引いた時のゴムの長さで決まる。また抵抗力は飛ぶ速さに応じて決まる。（向きは推進力の反対で大きさは速さの2乗に比例する。）また揚力はマグヌス効果で生じる。また重力は飛行体の重さで決まる。これらの力がマグヌス飛行体に働くことをイメージして試験飛行に臨ませた。また先の計算機実験の内容とマグヌス飛行体の実際の運動との対応を確認させた。

順番⑤ではマグヌス飛行体の飛距離を最大にするための条件について検討させた。これは自身のアイデアを計算機実験に反映させることで考えの妥当性を確認し、その後その妥当性を飛行実験で実際に検証する過程を経験するためである。そのために次の課題を課した。

【3】マグヌス飛行体をより遠くへ飛ばすための条件を計算機実験の内容も考慮して検討する。

2.2 授業アンケートによる調査

教育の影響を調べるため、授業の実施後にアンケート調査を行った。質問（Q1からQ5）を表4、回答を表5から7に示す。

表4 質問の内容。

番号	内 容
Q1	工作は楽しかったですか。
Q2	計算機実験のプログラムを理解することは簡単ですか。
Q3	理論、実験および計算機実験のつながりを通して学習することは教育効果が高いと思いますか。
Q4	Q3の理由を述べてください。
Q5	もしあなたが大学の教員で本教材（マグヌス効果による飛行体の理論・実験・計算機実験）による授業を行ったと仮定して、あなたはどの様なレポートの問題を出題しますか。

表5 Q1からQ3の回答。

	そう思う (重み5点)	ややそう思う (重み4点)	どちらとも言えない (重み3点)	それほど思わない (重み2点)	そう思わない (重み1点)	荷重平均
Q1	3	2	0	0	0	4.6
Q2	1	2	1	1	0	3.6
Q3	4	1	0	0	0	4.8

表6 Q4の回答。

番号	内 容
1	計算機実験と実験を通して、マグヌス効果について知識としてだけでなく多角的に理解を深められると考える。
2	理論、計算機実験と実験の結果をそれぞれ比較することで、マグヌス効果についての理解を深められると思った。
3	計算機実験の最大の目的は実際の現象を推測することにある。「計算機実験と実験を行い、それらの結果を比較・評価する」という計算機実験を学ぶ上で最も重要なプロセスを学べたから。
4	机上で理論を学習しただけで100%を理解することは難しく、実際に工作、計算機実験、実験を行うことで理解が深まったから。
5	記憶に定着しやすいから。

表7 Q5の回答。

番号	内 容
1	理論、計算機実験と実験を行うことで、何が得られたかを記述でまとめる問題を出題すると思う。
2	計算機実験と実際の実験を比較し、異なった点あるいは一致した点について論じる。また実際の実験結果をより精度良く推測するためのプログラムの改善方法について論じる。
3	計算機実験において、パラメータを変えることで起きるグラフの変化についての考察。

Q1について。受講者は工学部出身のため、授業で物づくりを取り入れることは好意的に受け止められているようである。(加重平均4.6)

Q2について。本授業で扱った常微分方程式の数値的解法のアルゴリズムの難易度がやや高かったことが考えられる。(加重平均3.6)

Q3について。受講者の多くは「一つの題目について、理論、実験および計算機実験のつながりを通して学習すること」は教育効果が高いと感じたようである。(加重平均4.8)

Q4について。座学で学んだことを実験で確認し、更に実験を計算機上で再現できることの重要性が認識されていること、また一連の行為が現象の本質を深く知ることになると認識されたことが示されている。

Q5について。注目されるのは表7の番号2であり、これは現象と計算機実験の差異が生じたときの対処法について言及しており、これは現象を表現しているモデル式やアルゴリズムの改善に配慮した内容である。受講者は研究・開発者の問題解決の視点で述べている。

本実践では、マグヌス飛行体の教材を使用して、理論、実験および計算機実験の三つの方法使った授業を実施した。アンケートの調査より、三つの方法のつながりを通して学習することは受講者に深い学習を促す効果があることが分かった。

まとめ

実践1では小・中学生向けの科学教室において、受講者にマグナス効果についての基礎的な知識を与え、またその現象の社会での利用を具体例で示した。更にその現象の理解を深めるためにマグナス飛行体の工作とその試験飛行を実施した。これら一連の教育により、将来、理工系への進学を希望する受講者へ、物理現象の社会利用への認識を促す教育を行った。

次に実践2では博士前期課程の授業において、理論、実験および計算機実験の三つの方法を使ったマグナス効果についての授業を実施した。アンケートの調査より、この方法は受講者の深い学習を促す効果があることが分かった。

ここでマグナス飛行体を使用した教育の展開を考えてみる。例えば小学校5, 6年生であれば、マグナス飛行体の飛距離と飛行時間を複数回計測し、そのデータを用いて、小学校学習指導要領¹⁾の算数で示されている割合、数量の関係を表す式についての理解 (p.80)、平均値、速さなど単位量当たりの大きさの意味及び表し方についての理解 (p.86) に関係付けた教材への展開が考えられる。

(その他にも関係付けられる内容が複数認められる。) 中学校学習指導要領²⁾ や高等学校学習指導要領³⁾ の数学、物理についても、展開の可能性が同様に認められる。従って、マグナス飛行体を児童、生徒や学生など多様な層を対象とした教材の開発の展開が期待できる。

注

- 1) 文部科学省「小学校学習指導要領(平成29年度告示)」
(https://www.mext.go.jp/content/1413522_001.pdf, 2021年9月3日9時3分閲覧)
- 2) 文部科学省「中学校学習指導要領(平成29年度告示)」
(https://www.mext.go.jp/content/1413522_001.pdf, 2021年9月3日9時3分閲覧)
- 3) 文部科学省「高等学校学習指導要領(平成30年度告示)」
(https://www.mext.go.jp/content/1384661_6_1_3.pdf, 2021年9月3日9時3分閲覧)
- 4) 藤岡正実ほか「自転するパイプの飛行におけるマグナス効果」『物理教育』, 第60巻, 第3号 (2012), 173-178.
- 5) NPO 法人日立理科クラブホームページ
(<http://hitachi-rika.sakura.ne.jp/>, 2021年8月20日9時20分閲覧)
- 6) 日立理科クラブ「日立理科クラブ通信, No. 122」
(<http://hitachi-rika.sakura.ne.jp/shiryo/rikatsushin/rikatsushin122.pdf>, 2021年9月8日10時1分閲覧)
- 7) 戸田隼人『UNIX ワークステーションによる科学技術計算ハンドブック』(サイエンス社, 1998), 486.

付録1 運動方程式

クッタ・ジュコーフスキの定理によると、回転する円筒が密度 ρ の流体中で回転軸に対して垂直な向きに速度 U で進むとき、回転軸と U に対して垂直方向に力 L が働く。これは上部と下部に圧力の差が生じて円筒が上に引き付けられるためであり、この現象をマグヌス効果という。 L の単位長さ当たりの力は⁴⁾

$$\rho U \Gamma \tag{1}$$

ここで Γ は周囲の流体の循環という量であり

$$\Gamma = \oint_C v_s ds \tag{2}$$

上の式は回転軸に垂直な面内で円筒を囲む閉曲線 C に沿って流体の速度の接線成分 v_s を線積分したものである。円筒の半径を R 、角速度を ω 、円筒の長さ l が無限に長いとすると、

$$\Gamma_{l=\infty} = 2\pi R^2 \omega \tag{3}$$

今、直行座標の x と y を L と U に対応させると z は回転軸の方向である。 L は l が有限のとき

$$L = \rho U \bar{\Gamma} l = \rho U \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \Gamma(z) dz \tag{4}$$

ここで $\bar{\Gamma}$ は Γ の軸に沿った平均値であり、 $\bar{\Gamma} < \Gamma_{l=\infty}$ である。

一方、空気による抵抗力の大きさ R_a は抵抗係数 C_D 、 U の方向から見た円筒（長方形に見える）の断面積 A とすると、

$$R_a = \frac{1}{2} C_D \rho A U^2 \tag{5}$$

ただし C_D の値はレイノルズ数 Re で変化する。

次に運動方程式について。水平右向きに x 軸、鉛直上向きに y 軸をとる。角速度 ω は反時計回りを正とし、その向きに自転しているとする。飛行体には垂直方向の力 L 、空気抵抗 R_a および重力が働く。重心の運動方程式は質量を m 、速度の水平成分と鉛直成分を U_x 、 U_y 、それらの合成した速さを U 、時間を t 、重力加速度を g とすると次式となる。

$$m \frac{dU_x}{dt} = -\rho \bar{\Gamma} l U_y - \frac{1}{2} C_D \rho A U U_x \tag{6}$$

$$m \frac{dU_y}{dt} = -\rho \bar{\Gamma} l U_x - \frac{1}{2} C_D \rho A U U_y - mg \tag{7}$$

付録2 計算機実験

式(6)と(7)の時間発展をルンゲ・クッタ法⁷⁾で計算する。使用するパラメータを表1に示す。円筒の自転の角速度 ω は実際には時間経過を経て空気摩擦のため少しずつ減少するが、簡略化してこれを常に一定とする。また計算機実験を行うパラメータ Γ の範囲を表2に示す。また計算機実験による飛行の軌跡を図1に示す。

表1 計算機実験に使用する数値。

物理量	値	備考
A/m^2	4.32×10^{-3}	進行方向から見た円筒部分の断面積。 $A = 2Rl$ 。
$C_D/1$	0.8	速度 U は1から10 m/sの間とすると、レイノルズ数 Re は1600から16000の間となる。 $l/2R = 5$ のときの C_D は0.6から0.8となる。ここでは Re によらず C_D を一定とする。
$g/m s^{-2}$	9.8	重力加速度
l/m	180×10^{-3}	円筒の長さ
m/kg	3.35×10^{-3}	円筒の重さ
$U_{x0}/m s^{-1}$	6.0	x 方向の初速度
$U_{y0}/m s^{-1}$	0.0	y 方向の初速度
$U/m s^{-1}$	右式	速度 $U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$
R/m	12×10^{-3}	円筒の半径
dt/s	0.01	刻み時間
$\mu/Pa s$	18.2×10^{-6}	粘度
$\rho/kg m^{-3}$	1.18	空気の密度
$\omega/rad s^{-1}$	100π	文献4)の実験より

表2 パラメータ Γ の範囲。

記号	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
$\Gamma/m^2 s^{-1}$	0.00	0.04	0.08	0.12	0.28
$N/回 s^{-1}$	$\doteq 0$	$\doteq 7$	$\doteq 14$	$\doteq 21$	$\doteq 49$

N : 単位時間当たりの回転数の見積値。

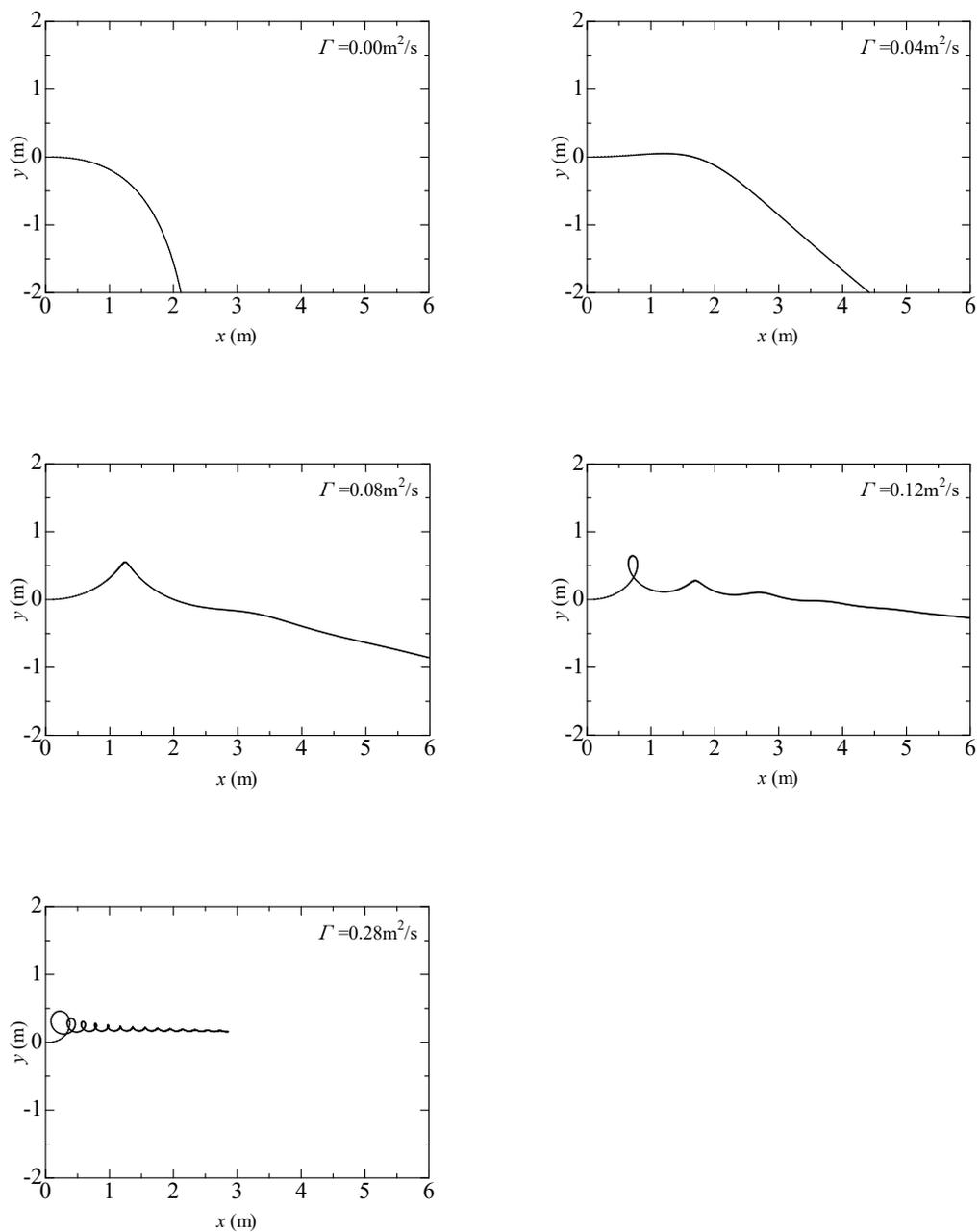


図1 マグナス飛行体の軌跡の計算機実験。 $\Gamma = 0.28 \text{ m}^2/\text{s}$ は計算時間の打ち切りのため距離が 6m に達していない。