

20世紀におけるわが国の電磁力を利用したペレット加速機開発研究例の紹介

Introduction of Some Research Activities for Pellet Acceleration
utilizing Electromagnetic Force in the late 20th century, Japan

澤岡 昭、大同大学

Akira B.Sawaoka, Daido University, Minami, Nagoya 457-8530, Japan

ペレット加速機、電磁力、2段式軽ガス銃、レールガン、プラズマガン、20世紀
pellet accelerator, electromagnetic force, two-stage light gas gun, rail gun, plasma gun, late 20th century

Low cost and easy operational shock wave compression technology is an important factor for material scientists and engineers as a tool of dynamic high pressure experiment. Conventional two-stage light gas gun has been developed at Tokyo Institute of Technology in 1972-75. Electromagnetic accelerator consists of small round bore rail gun and two stage light gas gun has been developed from 1981 as a tool for high pressure research. Plasma gun development has been conducted as a cooperative research with Technical University of Munich between 1984 and 89. These research activities at Tokyo Institute of Technology are introduced as an inside story.

1. はじめに

私が正規の機械工学や電気工学を学んだ者であったら、決して選択しなかったと思われる無謀な研究課題“超高速発射装置の開発”を1971年から正味20年間行うことができたことを想いかえし、感傷に浸っている。それは試行錯誤の連続であった。幸いにも理解ある上司と友人、外国の先達たちに支えられて、大きな事故に遭遇することなく、1991年に、52歳でこの研究の幕引きを行うことができた。1992年には英文報告書“Shock Compression Technology and Material Science”を刊行することができた¹⁾。それから18年間の過ぎた現在、改めて20年間の研究開発をレビューさせていただく。

失敗が連続の無謀と思える研究開発は、強い意思があっても、資金を含めた環境が整わなければ、これを継続することができない。その点においても恵まれた。1972年～75年、科学技術庁特別研究促進調整費による2段式軽ガス銃の製作、1980年～85年、同調整費によるレールガンの開発、1988・89年、文部省科学研究費補助金国際学術研究によるプラズマガンの開発研究を恵まれた環境で実施することができた。

これらの研究において、パートナーとして汗を流した多くの若かった同志、相馬隆雄（現在秋田県立大学）、近藤建一（東工大名誉教授、真下茂（現在熊本大学）、薄葉州（現在産業技術総合研究所）、曾我眞二（現在防衛庁）、田村英樹（現在防衛大学）の諸氏をはじめ多くの仲間に感謝する。

2. 2段式軽ガス銃の製作

1965年北大大学院物理学専攻博士課程を6ヶ月間で中退し、足かけ4年間大阪大学基礎工学部川井直人教授のもとで助手を務めた。川井教授の夢は地球中心に相当する360万気圧と5000°Cの超高压超高温の同時発生を成し遂げることであった。地球物理学が専門のボスのもとで、静的超高压力装置の開発に従事し、得難い経験をした。ここでは、怖いものなしのチャレンジ精神を養うことができた。

69年に東京工業大学工業材料研究所に助手のまま異動し、齋藤進六教授のもとで、ダイヤモンドはじめさまざまな新材料合成研究を開始した。特に興味をもった物質が、隕石孔から発見された六方晶ダイヤモンドであった。グラファイトの衝撃回収実験を行うために、直径20mmの円柱状プロジェクトイル（以下ペレット）を秒速2kmに加速できる火薬銃を製

作したいと齋藤教授に申出たところ、快くお許しがでて、試作が始まった。

1970年は大学紛争の最中でありキャンパスは封鎖状態にあった。装置の製作開始と同時に甲種火薬類取扱保安責任者の資格を取得した。装置が完成する頃には、キャンパスの封鎖が解除され、警視庁に出頭して事情説明の後に、都知事の火薬類譲渡の許可を得て、日本油脂から獵銃用のダブルベース発射薬と黒色火薬を購入することができた。

1972年には直径15mm、5gのアルミニウム円柱ペレットを1.7km/sに加速することに成功し、第14回高压討論会に発表した²⁾。しかし、目標の2kmには届かなかった。

文献を調べたところ、東京大学宇宙航空研究所(1971)³⁾と京都大学工学部(1972)⁴⁾に圧縮空気を利用したサボ発射装置があることが分かり、見学させて頂いた。いずれも大がかりな装置であり、これによる秒速2km達成は困難であることが分かった。そこで、文献を手がかりに2段式軽ガス銃を製作する計画を立て、計画が進行していた科学技術庁特別研究促進調整費による超高压プロジェクトに参加させて頂くことができた。当時私は助手であり、ボスの齋藤教授の後押しがなければ到底叶わない未知の挑戦でもあった。

1966年GMのJonesらの論文⁵⁾が頼りであった。彼らは直径20mmのタングステン合金板をプラスチック製サボの前面に取り付けて、長さ5mの発射管中を水素ガスで加速する2段式軽ガス銃によって、8km/sを達成していた。装置は全長15mのものであり、数百万円の予算で、試作できるものではなかった。また未経験者が高压水素ガスを使用することは余りにも危険であった。

結局、1973年5月にヘリウムガスを使用した全長5mの2段式軽ガス銃（HS-2）が完成し、直径15mm、5gのペレットを4km/sに加速することに成功した⁶⁾。しかし、速度測定は、発射管から出たペレットが2本のレーザー光線を横切る時間差から求める方式であり、発光を伴う超高速飛行体の速度測定は誤差が大きく、信頼性に欠ける数値であった。

75年には、全長10m、発射管内径20mmの2段式軽ガス銃、HS-3を製作した⁷⁾。得られた最高速度は5.7km/sと欧米の大型装置の8km/sに及ぶものではなかったが、比較的コンパクトであり、使い勝手が良く、運転コストは外国の装置の1/10以下であることから、後に欧米から多くの研究者や技術者の訪問が相次いであった。

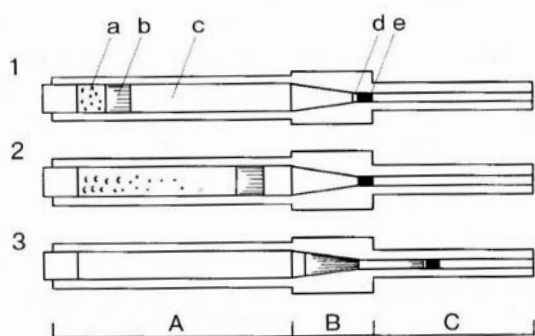


Fig.1 Operation principle of two stage light gas gun. This device consists of three principal parts. A; light gas compression tube, B; high pressure coupling, C; launcher tube. a-gun powder, b-plastic piston, c-light gas, d- diaphragm, e-pellet. High pressure coupling and launcher are isolated by stainless steel diaphragm. Helium gas is filled in the pump tube. When gun powder is ignited, combustion gas causes the plastic piston to accelerate and helium gas is compressed. The diaphragm is ruptured as the helium pressure accumulation; the gas is expelled into the launcher tube and accelerates the pellet. The expansion speed of the light gas such as helium and hydrogen is very high.

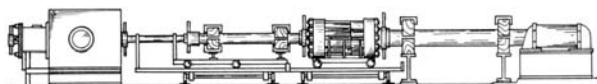


Fig.2 Schematic layout of conventional two stage light gas gun constructed at Tokyo Institute of Technology in 1973.

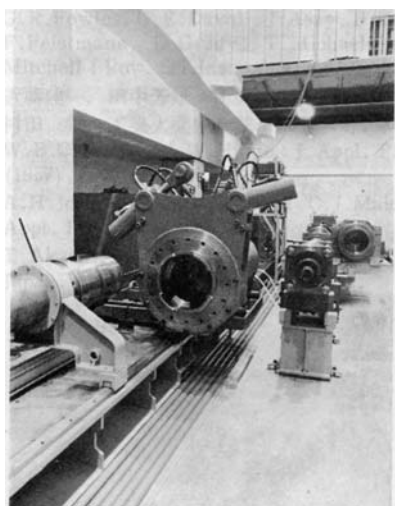


Fig.3 Two stage light gas guns at Tokyo Institute of Technology. The large one (light) is the HS-3 with 10m in long, achieved 5.7km/s. The small one (right) is the HS-2 with 5m in long.

ペレット速度の計測精度を高めるために、発射管出口近くに、垂直に3本の孔を開け、樹脂を充填して、DC X線ビームを導入し、ペレット通過をX線パルスとして検出する方式を採用した⁸⁾。

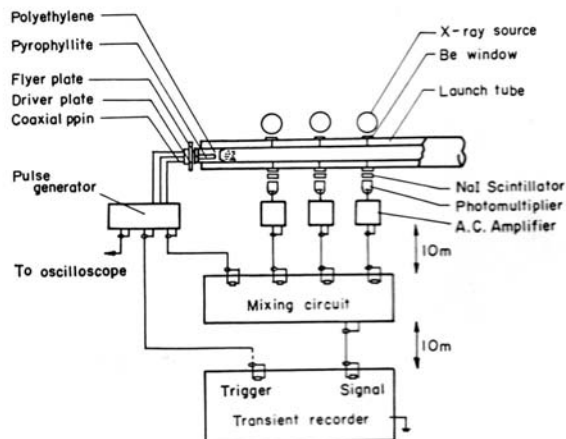


Fig.4 Measurement system for interior pellet motion, using three dc X-ray beams and pin contactor in the two stage light gas gun.

3、困難を極めたレールガンと2段階式軽ガス銃の組合せ

1978年オーストラリア国立大学のRashleighとMarshallは、20mm角プラスチックの後部に銅製ブラシを取り付けた8.2gのペレットを4.3km/sに加速することに成功した⁹⁾。ペレットの速度を上昇させるにはレールに流す電流を増加させる必要がある。1982年、アメリカ・ローレンスリバモア国立研究所のHawkeらは25mm角のペレット加速する場合、レールに流す電流が1MAを超えると、レール間に働く電磁力によって、構造体が破壊することを報告した¹⁰⁾。

我われは、ペレットに初速を与えてレールガンに打ち込むことによって、必要な電流のピーク値を抑制できることを数値シミュレーションによって予測した¹¹⁾。例えば、600kJのキャパシタを使用して、1gのペレットを20km/sに加速する場合、必要とするピーク電流は、ガンのレール間隔が8mmの場合、1MAであるのに対して、初速5km/sの場合は0.8MAであることが分かった。レール間に働く力は、電流の自乗に比例するので、0.8MAに抑制できれば、1MAの場合と比較して、反発力を64%に減少できることが予測された。

5km/sの速度で、ペレットをレールガンに投入させるためには2段階式軽ガス銃が不可欠であると考えた。当時、発表されていたレールガンペレットの形状はすべて角型であった。角型のペレットを2段階式軽ガス銃で加速することはほとんど不可能であった。

加速部の断面形状が円のレールガンの製作を行うこととした。レールの長さは市販品真ちゅう角棒の最長の規格である2mとした。フライス盤を使用して、真ちゅう製角棒の表面に半径4mmの溝加工を行い、直径8mmの鋼製丸棒に2本のレール材を向い合わせて仮止めした。これを、90mmの鉄製パイプに挿入し、エポキシ樹脂を充填した。その際、気泡が入らないよう、全体を真空チューブに入れて、脱気を行いながら固化させた。固化後、丸棒を油圧ジャッキで引き抜き、研磨材を付着させた別の丸棒を回転させながら挿入して、レール内壁の研磨を行った。加工はすべて研究者自身の手で行われた。作業は困難を極めた。当時助手であった薄葉州がほとんど独力で、レールガンの心臓部を製作した。

2段階式軽ガス銃からのレールガンへペレットが突入を正確に検出して、レールガンへの放電を開始させるトリガーのタイミングが難しく、5回のうち1回程度しか、観測データを取得することができなかった。ペレット通過によって、レール内壁が損傷を受けるので、毎回、研磨加工が必要であっ

た。最終的には、Fig. 5 に示すような六角真ちゅう製棒材をレール素材に使用したレールガンを作製した。

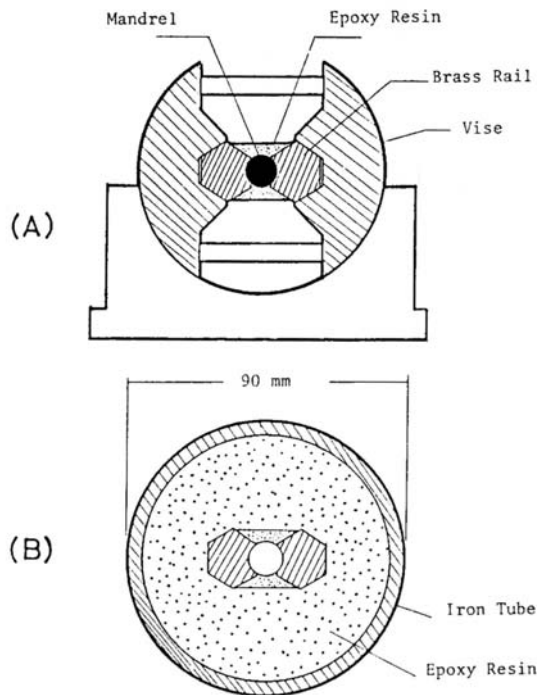


Fig.5 Fabrication process of rail gun for combined with two stage light gas gun. A; Exposed surface of a steel mandrel between two rails were covered with epoxy resin, and B; after being buried in a steel tube with epoxy resin, the mandrel was withdrawn and round bore 10mm in diameter was finished by reaming.

2 段式軽ガス銃とレールガンを接続し、接続部をペレットが通過するタイミングを接触ピンで検出して、600kJ のキャパシタからの放電を開始する回路を作製した¹²⁾。

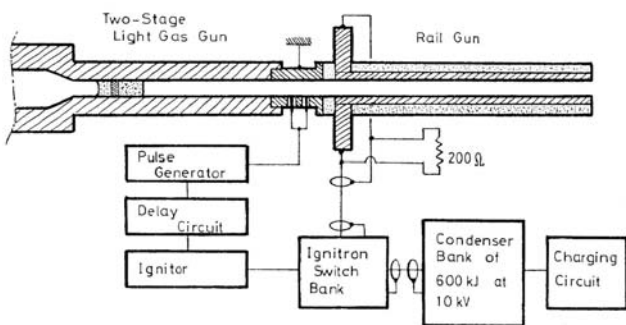


Fig.7 Cross sectional view of connection port of two stage light gas gun and rail gun.

試行錯誤による実験が繰り返された。労力の割には、好ましい結果は得られなかった。初速 2.5km/s で、ペレットを投入した時に、予測を超える 1.25MA のピーク電流が流れた。レールガンに埋め込まれたコイルからの信号から求めた速度は 17.3km/s であったが、これまでの経験から、これがペレットの速度ではないことは確かであった。しかし、なんらかの導電性物体が通過したことは間違いなく、後に行った様々の検証実験から、これはペレットを先行するプラズマの移動速度であると結論した。

何よりも深刻な問題は、レールガンがこの 1.25MA 放電によって大破したことであった。レールガン部分は鋼製鉄チャ

ンバーに収納し、放電操作は遠隔によって行われたが、破損の状態から、これ以上の実験続行は危険であると判断し、2 段式軽ガス銃とレールガンの組合せによる 15 km 達成への挑戦を諦めた。その後、レールガンへのペレットの高速投入についての、着実なデータの積上げを行うことに研究の方向転換を行った。

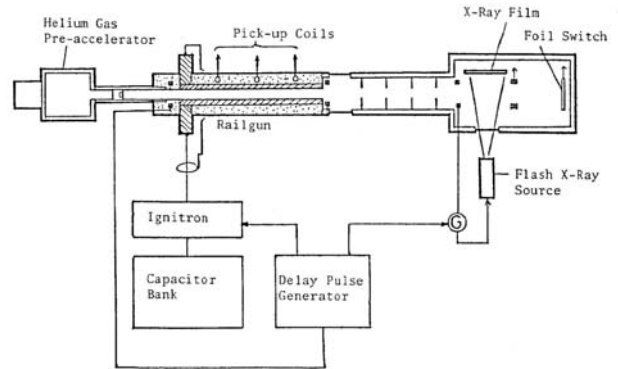


Fig.8 Diagnostics and trigger system. Inductive coils were used for triggering ignition switches and flash X-ray apparatus.

2 段式軽ガス銃とレールガンの組合せにおいて、キャパシタバンクの放電トリガーのタイミング合せが極めて難しいことから、初速を犠牲にしても確実にトリガーが確保できる、単純な圧縮ヘリウムガス銃を初段加速に使用した。システム全体を Fig. 8 に示す。この方式による基礎的なデータの集積の後、1986 年に東京工業大学でのレールガン研究は幕が降ろされた。

その後、薄葉州は、当時の通産省工業技術院化学技術研究所（現在産業技術総合研究所）に異動し、そこで長期間にわたって電磁加速の基礎研究を行い、本分野に不可欠なデータを蓄積し、多くの報告を行った。

4、プラズマガンによるガラスビーズ加速機の開発

1975 年、直径 0.2mm のガラスビーズを 20km/s に加速して、ピンセットでつまめる大きさの粒子加速の世界記録を樹立したのは NASA に滞在していたミュンヘン工科大学 Igenbergs であった¹³⁾。プラズマガンはアルミフォイルの放電爆発によって発生したプラズマを磁界によって絞り込んで加速し、フォイルに付着させたガラスビーズをプラズマの流れに乗せて加速する方法である。

直径 0.2mm では 20km/s が得られたが、直径 0.4mm では 5 km/s と速度が著しく低くなることが課題であった。その理由は、Igenbergs らが使用したキャパシタバンクの放電時定数は 0.2mm に適したものであったが、0.4mm には適していないことであった。彼は 0.3~0.4mm に適した、放電時定数がやや大きなキャパシタバンクを持っている研究機関を探していた。

ミュンヘン工科大学のプラズマガンは同軸円筒の奥に、ビーズ数百個を付着させたフォイルを置き、フォイルにパルス大電流を通電させることによって、フォイルを爆発させ、発生したアルミニウムプラズマによって、ビーズを加速し、プラズマガンコイルに投入する方法であった。ビーズの初速が十分でないまま、コイル内で加速されたビーズは、軸方向から分散し、ターゲットに到達するビーズの数はわずかであると同時に、正確な速度測定を行うことができないことが欠点であった。

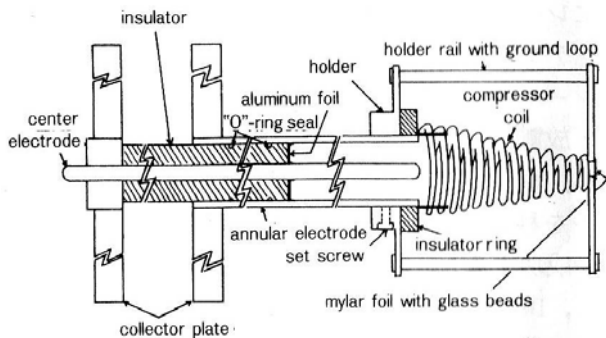


Fig.9 Schematic layout of plasma gun developed at Technical University of Munich, which consists of a coaxial accelerator and a compressor coil.

1983年、アメリカで開かれた会議で Igenbergs 教授と議論する機会があった。東京工業大学はレールガン用の 600kJ スローバンク（指月電気製）を保有していることを話すと、彼は即座に東工大に滞在して、実験をしたいとの希望した。Igenbergs 教授は日本学術振興会の補助金で、1985年9月より10ヶ月間日本に滞在し、実験を行った。彼が持参したミュンヘン工科大学製のプラズマガン用コイルを使用して、直径 0.10~11mm ビーズでは 12 km/s、0.25~0.35mm では 10 km/s の速度を得ることができたが、ビーズの飛び出す方向を正確に制御することが困難であった¹⁴⁾。

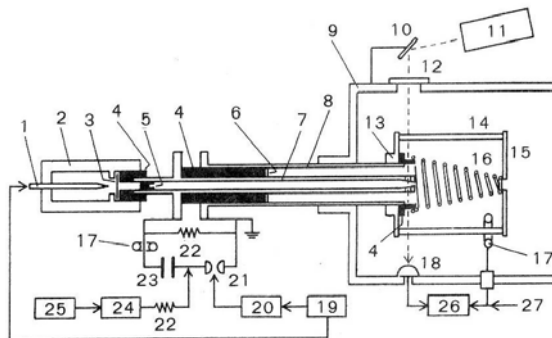


Fig.10 Schematic layout of plasma gun combined with light gas pellet. 1; needle, 2; helium gas reservoir, 3; diaphragm, 4; insulator, 5; sabot and projectile, 6; aluminum foil, 7; center electrode, 8; outer electrode, 9; vacuum chamber, 10; mirror, 11; He-Ne laser, 12; window, 13; holder for ground loop, 14; holder rail, 15; coil spacer plate, 16; compression coil, 17; Rogowski coil, 18; photodetector, 19; trigger circuit, 20; ignitor, 21; ignitron, 22; resistor, 23; capacitor bank, 24; charging unit, 25; controller, 26; transient recorder, 27; signal from the piezo-ceramic sensor

1988・89年度の科学研究費補助金による国際共同研究課題が採択されて、ガラスビーズに秒速数百 m の初速を与えて、ビーズの方向性を制御する技術開発が行われた¹⁵⁾。

直径 0.35~0.45mm のガラスビーズに初速を与えない場合、平均 3.1 km/s の速度が得られ、200 個のビーズをマウントしたが、直径 70mm のターゲットに到達したビーズは平均 2 個であった。1 km/s の初速を与えると、速度は平均 4.5 km/s に上昇し、ターゲットに到達したビーズは 10 倍の 20 個に増加した。

このようにプラズマガンによる高速衝突実験においては 2 段加速が不可欠であることが明らかになった。この方式を秒

速 10km 以上の衝突実験に拡張する計画であった。しかし、1990 年春に本共同研究が終了した後は、優先度の高い別の研究課題に重点を移すことになり、プラズマガンは遂に再び陽の目を見ることなく埋もれてしまったのは誠に残念なことであった。ミュンヘン工科大学との共同研究についての解説を 1990 年発行の学術月報に行った¹⁶⁾。

5、おわりに

1990 年以降、東京工業大学では、近藤建一らによって、2 段式軽ガス銃のさらなる改良が行われ、欧米の大型装置並みの性能が達成された。

以上、私が関与した 1971 年から約 20 年間のペレット超高速加速装置の概要について述べた。それから 20 年経過した現在、当時の開発研究を振りかえって述べたが、記憶違いや誤解があって、間違った記述があることを心配している。

お気づきの点はご指摘願いたい。本年中に著者のホームページに訂正版を掲載し、私の本分野における本当に最後の貢献となることを願っている。

参考文献

- 1) Shock Compression Technology and Material Science, edited by A.B.Sawaoka, KTK Scientific Publishers / Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, Japan, 1992
- 2) 相馬隆雄、澤岡 昭、齋藤進六、第 14 回高圧討論会講演要旨、P49, 1972
- 3) 小口伯郎、船曳勝之、佐藤後逸、東京大学宇宙航空研究所報告 7 (2), 1971
- 4) G.Kamimoto, A.Tsukamoto, K.Otsuji, Dept. Aero. Eng. Kyoto, Current Papers 34, 1972
- 5) A.H.Jones et al., J.A.P., 37, 3493, 1966
- 6) 相馬隆雄、澤岡 昭、齋藤進六、圧力技術 11, 241, 1973
- 7) A.Sawaoka, K.Kondo, Report of Research Laboratory of Engineering Materials, Tokyo Institute of Technology, 9, 131, 1984
- 8) T.Mashimo, A.Sawaoka, Jpn. J. Appl. Phys. 20, 963, 1981
- 9) S.C.Rashleigh, R.A.Marshall, J.Appl. Phys., 49, 2450, 1978
- 10) R.S.Hawke et al., IEEE Transactions on Magnetics, 18, 82, 1982
- 11) S.Usuba, K.Kondo, A.Sawaoka, IEEE Transactions on Magnetics, 20, 260, 1984
- 12) S.Usuba, K.Kondo, A.Sawaoka, IEEE Transactions on Magnetics, 22, 1790, 1986
- 13) E.B.Igenbergs, D.W.Jex, E.L.Shriver, AIAA Journal 13, 1024, 1975
- 14) 曾我眞二、田村英樹、澤岡 昭、E.Igenbergs、圧力技術、25, 120, 1987
- 15) H.Tamura, A.Sawaoka, E.Igenbergs, Jpn. J. Appl. Phys., 27, L1986, 1988
- 16) 澤岡 昭、学術月報、43, 917, 1990

追記

最初に述べたように、著者は本分野の研究開発を 1990 年に幕を閉じた。その後、数年間はこの分野の進歩に関心を持っていたが、1995 年に東京工業大学工業材料研究所長に就任した後は、研究所改組と国際宇宙ステーション運用の問題に専念したため、その後の電磁加速装置の進歩についてはほとんど知らない。さらに、1999 年には、大同工業大学（現在大同大学）学長に就任し、教育行政を優先した生活を送っているため、取り上げるべき最近のトピックスを無視した講演になる事をお許し願いたい。