

GVM と DOWN CHARGE を用いた九大タンデム加速電圧

安定化装置の開発

前田豊和、二宮重史*、島本昌樹、赤間脩治、森川常安、相良建至
九州大学理学研究院、*高エネルギー加速器研究機構

1.はじめに

九大タンデムにおける加速電圧の制御は加速後のビーム・エネルギー過不足（実際には分析電磁石下流に置いたビームスリットの電流）を用いる、いわゆるビームフィードバック方式で行ってきた。この方式で例えば 6MV を±数 kV 以内に安定制御できるが、AMS のためには±1kV 以内での安定制御が必要となった。そこで、ビームを使わず、加速電圧計(Generating Voltage Meter, GVM)での計測値そのものを安定制御する方式(GV 制御)を、KEK の支援をうけて開発した。

2. Down charge 増減による加速電圧制御

加速電圧を制御するには、up charge 増減、down charge 増減、コロナ放電増減、ライナー電圧上下などの方法がある。Up charge 増減では、アース電位から高電位のタンデム中央までペレットチェーンが電荷を運ぶのに約 0.5 秒かかるので、電圧変化の遅れが長すぎて制御に不向きである。Down charge 増減だと、ペレットチェーンに電荷を載せてタンデム中央電位から離れさせるまでの実効時間が約 30ms なので、割合速い制御が出来る。タンデム中央部と壁の間のコロナ放電増減による加速電圧制御は、より速い応答が出来るが、コロナ放電のために加速電圧に応じてタンク内ガス圧を調整する必要があり、また 1-3MV の低加速電圧（天体核反応実験）では安定したコロナ放電が難しい。ライナー電圧上下は速い応答が出来るが、制御のダイナミックレンジが狭いので補助的にしか使えない。

我々は、GVM 計測値に依拠する加速電圧制御に、down charge 増減を採用した。図 1 に全体概略を示す。タンク壁の GVM で中央部の電位（加速電圧）を計測し、その計測値と目標値の差を周波数に変換(V/F)して光信号で中央部に伝える。中央部では周波数によりチェーン・ホイールの電位を上下し(F/V)、チェーンに載せる電荷を増減することで、中央部の電位を上下する。

3. GVM での計測

タンク壁面の GVM は、16 枚の扇形電極とその前面で回転する 8 枚の扇形カバーから成り、電極で電場すなわち中央部の電位（加速電圧）を計測する。回転数は約 3,600rpm(60rps)である。電極電位は電場変化の速い成分も反映出来て GVM のカットオフ周波数 100Hz である。フィードバック信号としては、電極電位をオペアンプにより半波整流して 960Hz の脈流にし、その後 480Hz と 960Hz のローパス付ノッチフィルターに通して直流とし、その直流電圧からフィードバック信号を作る。加速電圧 6MV の時の直流電圧を 6V にした。フィルター周波数と GVM カバー回転数のマッチングをとり、直流電圧のリップルを 6.5mVpp(0.11%)に抑えた。なお、回転数は 10^{-5} で安定している。図 2 に GVM 回転部の構造を示す。

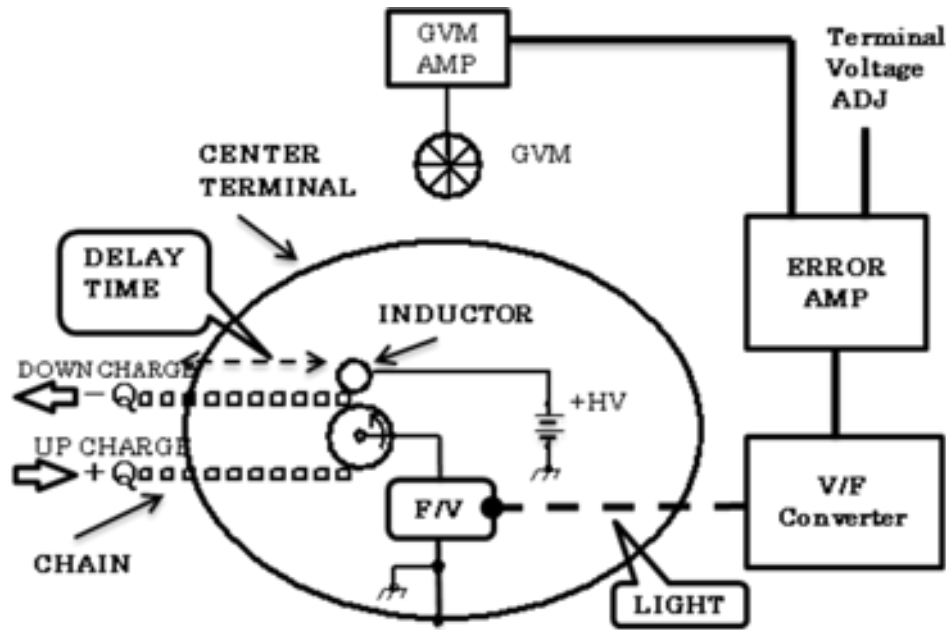


図1 GVM と DOWN CHARGE を用いた概略図

4. フィードバック信号

GVM 計測値から作った直流電圧と基準電圧の差から ERROR AMP でフィードバック信号を作る。基準電圧は温度変化の小さい AD2710KN (5ppm/°C) で作成した。電圧差を高速精密級のオペアンプ OPA627(2.5 μV/°C) で増幅し、その後、電圧-周波数変換(V/F)IC ADVFC32 により周波数に変え、レーザーダイオード光 (LD) でタンク壁のガラス窓を通してタンデム中央部に伝えた。周波数で伝える方式は、光強度で伝えるこれまでの方式より、光源輝度や窓ガラス曇りなどの環境に左右されず信頼度が高くなる。

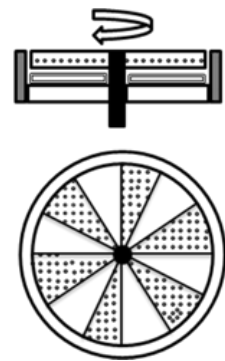


図2 GVM の構造

タンデム中央部では、周波数-電圧変換(F/V)をして±5kVにし、チェーン・ホイール電位を上下させた。ここで用いた高電圧スイッチング電源は 10MΩ 負荷時の応答が 100Hz と高速である。

5. 温度変化

フィードバック信号作成における温度変化の影響を少なくするために、GVM 計測回路、基準電圧生成回路、ERROR AMP を、発砲スチロールで覆いペルチェ素子で冷却して温度制御をした。図3に示す通り、オペアンプの表面温度は (35±1)°C の範囲内に保たれている。

オペアンプや IC の温度変化は 0.5~5ppm/°C と小さいが、フィードバック信号生成回路の金属抵抗の温度変化が 50ppm/°C でありこれが温度変化の主因である。

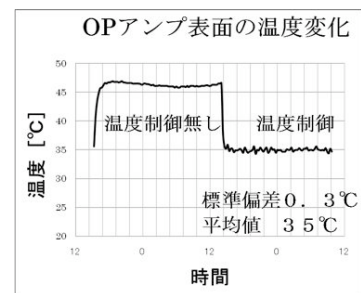


図3 アンプの温度変化

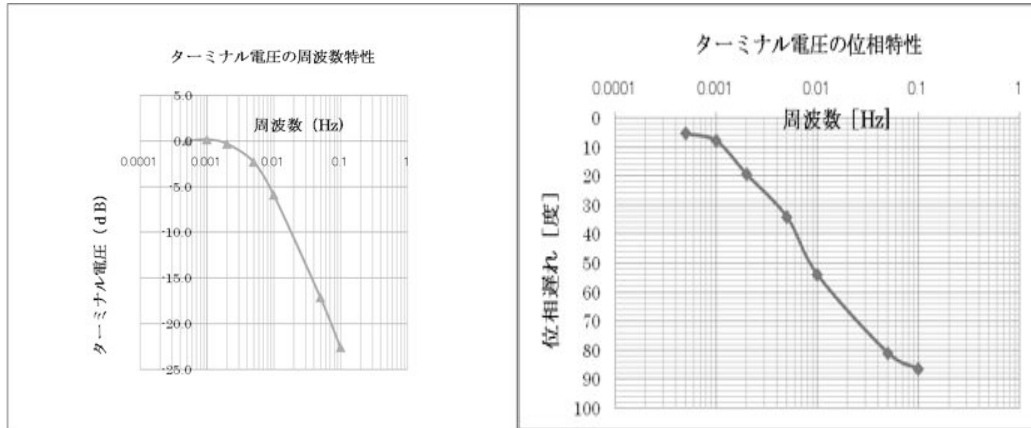


図4 九大タンデムの DOWN CHARGE 入力の GAIN と位相特性 (実測)

6. フィードバックの周波数特性

九大タンデムの中央部～アース (タンク壁) 間の静電容量が 320pF、抵抗が 100GΩ なので、時間定数が計算上 32s(カットオフ周波数 0.005Hz)である。

図4のゲイン実測値が 3dB 下がる所が約 0.005Hz であり、位相遅れ実測値が 45 度になる所も 0.005Hz に近い。

Down charge 増減方式では前述の通り、加速電圧を上下するまでに約 30ms の遅れが生じる。この down charge delay がハンチング等のフィードバック不安定を起こすかもしれない。そこで、現実的なフィードバック回路系に近い時間・アンプ特性をもつ等価回路を想定して、B2 SPICE コードを用いてシミュレーションしてみた。電位差 (エラー) の増幅率を 3000 倍にした。結果を図5、等価回路を図6に示す。

図5で、周波数が 400mHz 付近でゲイン曲線 (上線) が 0dB (gain=1.0)になるが、その時位相 (下線) が 110 度である (180 度から遠い) ので負フィードバックの範囲内にあり、安定制御出来ていることが判る。周波数が 5Hz 以上で位相が大きく変化している (不安定要因になる) が、これは down charge delay の所為である。この delay をより短時間にすれば、安定領域が増え、ゲインを上げられる。なお、100Hz 付近のゲインと位相の急変は GVM フィルターとインダクター 高圧電源の特性が原因である。

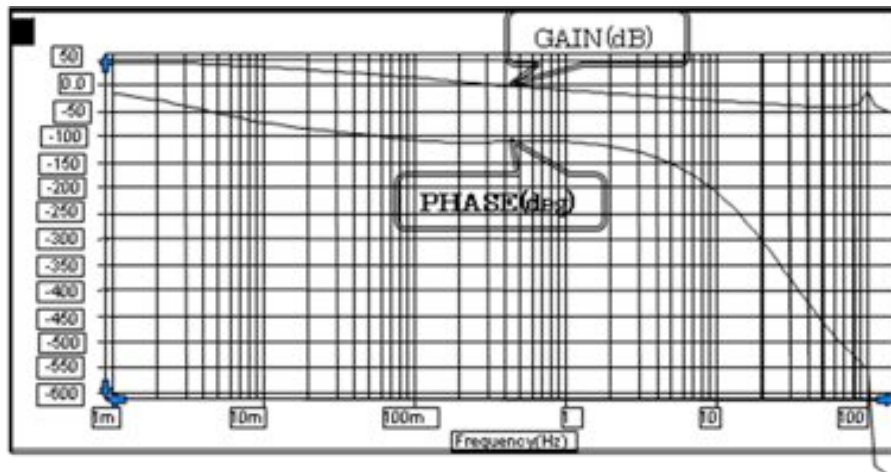


図5 タンデムも含めた全回路のシミュレーション結果

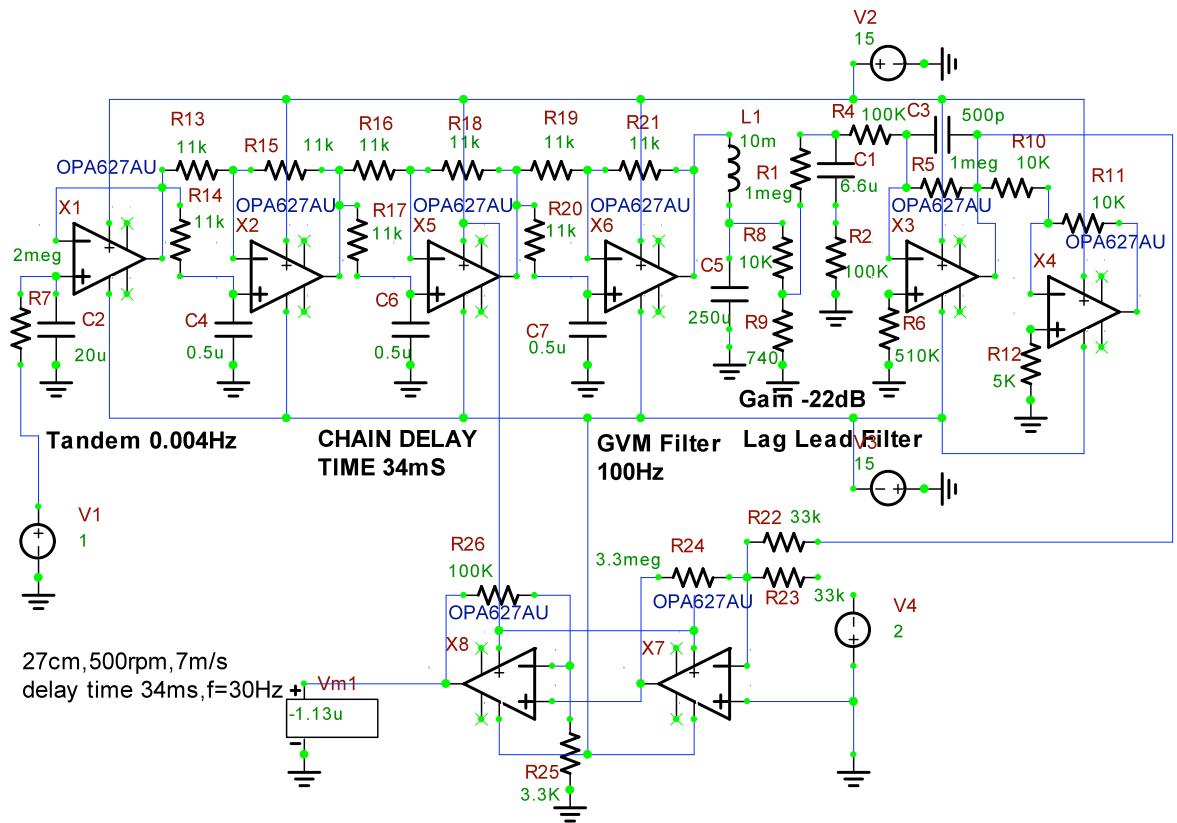


図6 シミュレーションに用いた等価回路図

7. 結果と今後の課題

加速電圧を5MVにしてGV制御を行い、電圧変動分布を実測した。結果を図7に示す。電圧は $\pm 725\text{V}$ ($\pm 150\text{ppm}$)で制御されている。また、GV制御のもとで炭素ビームを加速して90度分析磁石で曲げた後の5m下流の石英ビューワーでビームを観測したところ、ビーム位置変動は $\pm 150\text{ppm}$ と一致していた。この範囲内に制御されていれば、高精度のAMS測定が可能である。

GV制御システムは順調に稼動していたが、2008年8月4日にタンデムをコンディショニング中に7.4MVでスパークが起これ、今回取り付けしたインダクター高電圧電源(米国製市販)が故障した。エポキシでモールドされた製品なので故障箇所の特定制や修理が出来ない。それで、旧来のビームフィードバック方式に戻してAMS以外の実験を行いつつ、これに代わる高電圧電源を自作中である。

もしdown charge delayを短縮出来れば、速い電圧変動も制御でき、より安定なビーム加速が出来る。ライナーは応答が速いが制御範囲が狭いので万全ではない。何か良い案がないか、模索している。

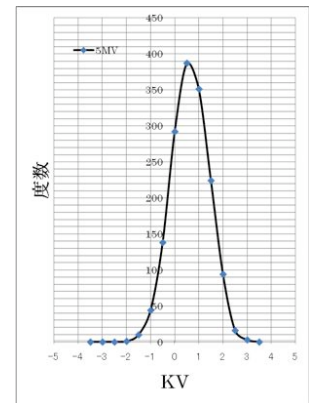


図7 加速電圧安定度

別紙

Development of Terminal Voltage Stabilizer utilizing GVM and DOWN CHARGE at KUTL

T.Maeda, S.Ninomiya*、 M.Simamoto、 S.Akama、 T.Morikawa、 K.Sagara
Kyushu University Tandem Accelerator Laboratory(KUTL)

*High Energy Accelerator Research Organization